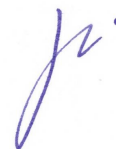


**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФГБОУ ВПО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»**

На правах рукописи



Рубцов Евгений Андреевич

**РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СРЕДСТВ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ**

05.22.13 — Навигация и управление воздушным движением

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель
кандидат технических наук,
профессор Соболев Е.В.**

Санкт-Петербург — 2015

Содержание

Введение.....	5
Глава 1. Анализ существующих методик оценки уровня безопасности полетов	12
1.1. Методика определения уровня безопасности полетов, используемая в авиапредприятиях	13
1.2. Методика определения уровня безопасности полетов основанная на расчете риска столкновения	14
1.3. Методика определения уровня безопасности полетов основанная на расчете вероятности нарушения норм эшелонирования	15
1.4. Методика определения уровня безопасности полетов основанная на расчете вероятности выхода ВС за пределы трассы	16
1.5. Анализ методик определения уровня безопасности полетов	17
1.6. Постановка задачи и разработка требований к методу определения уровня безопасности полетов в регионе	18
1.7. Выводы	19
Глава 2. Разработка алгоритма двухэтапного анализа эксплуатационных характеристик средств РТОП	21
2.1. Зона действия	21
2.1.1. Методы стандартного расчета ЗД	22
2.1.1.1 Влияние атмосферы на дальность радиовидимости	34
2.1.2 Методы энергетического расчета ЗД	36
2.1.2.1. Статистические модели	37
2.1.2.2. Имитационные (расчетные) модели	39
2.1.3. Определение размеров ЗД средств радиотехнического обеспечения полетов	46

2.1.3.1. РТС связи	47
2.1.3.2. РТС навигации	50
2.1.3.3. РТС наблюдения	51
2.1.4 Разработка комплекса программ расчета зон действия РТС навигации, связи и наблюдения.....	54
2.1.5 Выводы по методикам расчета ЗД.....	56
2.2 Рабочая область	59
2.2.1 Расчет рабочей области РТС навигации.....	60
2.2.1.1 Метод расчета РО при выполнении полета по концепции оборудованных трасс	61
2.2.1.2 Метод расчета РО при выполнении полета по концепции зональной навигации	64
2.2.2 Расчет рабочей области РТС наблюдения.....	75
2.2.3 Расчет рабочей области РТС связи	75
2.2.3.1 Расчет рабочей области систем аналоговой радиосвязи	76
2.2.3.2 Расчет рабочей области систем цифровой радиосвязи.....	78
2.2.4 Расчет РО с учетом обобщенной надежности.....	86
2.3 Алгоритм двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП.....	86
2.4 Разработка комплекса программ расчета зон действия и рабочих областей РТС навигации, наблюдения и связи.....	90
2.5 Выводы.....	92
Глава 3. Разработка методики расчета зон конфликтных ситуаций ...	94
3.1 Анализ законов распределения ошибок определения координат воздушных судов	94
3.2 Разработка методики расчета поля ошибок	107
3.3 Разработка методики расчета зон конфликтных ситуаций	109
3.4. Разработка комплекса программ расчета зон конфликтных ситуаций.....	113
3.5 Выводы.....	114

Глава 4. Расчет ЭХ средств РТОП в Санкт-Петербургском центре ОВД.....	116
4.1. Санкт-Петербургский центр ОВД: структура воздушного пространства и оснащенность трасс РТС навигации, наблюдения и связи	116
4.2. Результаты расчета ЭХ средств РТОП в Санкт-Петербургском центре ОВД.....	125
4.2.1 Анализ РТС связи	125
4.2.2 Анализ РТС навигации.....	134
4.2.3 Анализ РТС наблюдения	138
4.3. Результаты расчета зон конфликтных ситуаций.....	149
4.4. Выводы.....	152
Заключение	153
Список сокращений и условных обозначений.....	155
Список литературы.....	158

Введение

Создание укрупненных центров единой системы организации воздушного движения (ОрВД), а также внедрение новых радиотехнических средств (РТС) навигации, наблюдения и связи, приводит к существенным изменениям в структуре ОрВД. Цели и задачи этих изменений отражены в Концепции создания и развития Аэронавигационной системы России, а также в федеральной целевой программе «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009-2020 годы)» [9, 10]. Изменения, в целом, направлены на оптимизацию структуры воздушного пространства и модернизацию РТС навигации, наблюдения и связи, потому особую важность приобретает задача оценки безопасности полетов при заданной (существующей или перспективной) инфраструктуре средств радиотехнического обеспечения полетов (РТОП).

Увеличение объема перевозок неизбежно требует сокращения минимумов горизонтального и вертикального эшелонирования [1-3], и, как следствие, ужесточения требований к радиотехническим системам навигации и наблюдения, а также введению новых принципов обеспечения характеристик требуемой навигации [4, 5]. Повышение требований к безопасности полетов влечет за собой необходимость тщательного анализа ситуации в контролируемом воздушном пространстве, оценки возможностей инфраструктуры, и определения того, как изменения в составе и размещении оборудования повлияют на безопасность полетов.

В настоящее время в Российской Федерации основными средствами РТОП являются: навигационные маяки VOR и DME, обзорные радиолокаторы и системы радиосвязи ОБЧ диапазона. Безопасность полетов оценивается с помощью ряда критериев, к которым относятся: вероятность выхода ВС за пределы трассы, вероятность нарушения норм эшелонирования, а также условие полного перекрытия воздушных трасс региона радионавигационными, радиолокационными и радиосвязными полями. Перечисленные критерии

определяются эксплуатационными характеристиками (ЭХ) средств РТОП: зоной действия и рабочей областью, а также зоной конфликтных ситуаций. Определенные для совокупности РТС, распределенных по региону, эксплуатационные характеристики являются интегральными.

Методы оценки уровня безопасности полетов разрабатывались и продолжают разрабатываться в авиационных вузах России и зарубежных стран. Большой вклад в разработку новых методов внесли такие ученые, как Григорьев С.В. [6], Верещака А.И. [7], Красов А.И. [62], Кузнецов В.Л. [14], Кузьмин Б.И. [8, 85], Кулик Н.С. [92], Марьин Н.П. [24, 25], Олянюк П.В. [5, 7], Пятко С.Г. [62], Сарайский Ю.Н. [91], Соболев Е.В. [21, 22], Соломенцев В.В. [14] и др.

Целью диссертационной работы является разработка и реализация методов расчета эксплуатационных характеристик средств радиотехнического обеспечения полетов, и оценка, с их помощью, безопасности полетов в выбранном регионе. В качестве ЭХ были выбраны зоны действия и рабочие области РТС навигации, наблюдения и связи, а также зоны конфликтных ситуаций. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1. Разработка алгоритма двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП, предполагающего расчет зон действий и рабочих областей РТС навигации, наблюдения и связи, и определение степени перекрытия ими воздушных трасс.
2. Разработка методики расчета зон конфликтных ситуаций, в которой учитываются погрешности определения координат ВС.
3. Разработка комплекса компьютерных программ по расчету ЭХ средств РТОП.
4. Расчет ЭХ средств РТОП в Санкт-Петербургском центре ОВД с использованием разработанных компьютерных программ.

Основные методы исследования. При решении перечисленных задач были использованы методы математического анализа, теории вероятностей и теории случайных процессов, а также методы имитационного моделирования.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан алгоритм двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП, в котором реализован единый подход в расчете ЭХ (зоны действия и рабочей области) для основных РТС навигации, наблюдения и связи.

2. Введено понятие рабочей области РТС связи ОВЧ диапазона. Таким образом, определяется не только область устойчивого радиообмена, но и область, в пределах которой обеспечивается требуемое качество связи; реализуется принцип единого подхода в расчете ЭХ. Разработана методика расчета рабочей области РТС связи ОВЧ диапазона.

3. Разработана новая вероятностная модель конфликтной ситуации, позволяющая учесть погрешности определения координат ВС. При этом используется не применявшийся ранее составной закон распределения, позволяющий достоверно оценивать вероятность возникновения редких событий.

Практическая значимость работы. Разработанное программное обеспечение внедрено в Санкт-Петербургском центре ОВД и использовалось для определения степени перекрытия региона зонами действия РТС связи ОВЧ диапазона, а также зонами действия радионавигационных маяков-дальномеров, предназначенных для обеспечения высокоточной навигации в районе аэродрома Пулково. Комплекс компьютерных программ по расчету ЭХ средств РТОП также используется в учебном процессе на кафедре Радиоэлектронных систем Санкт-Петербургского университета гражданской авиации.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Алгоритм двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП, в котором реализован единый подход в расчете ЭХ РТС навигации, наблюдения и связи.

2. Методика расчета зон конфликтных ситуаций, в которой учитываются погрешности определения координат ВС и используется не применявшийся ранее составной закон распределения.

3. Результаты расчета ЭХ средств РТОП в Санкт-Петербургском центре ОВД.

Публикации результатов. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 6 в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК изданий.

Апробация результатов. Материалы диссертации докладывались на региональной конференции «Школа радиоэлектроники» (Санкт-Петербург, ЛЭТИ, 2010г.); на Международной молодежной научной конференции «XXXVII Гагаринские чтения» (Москва, Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского, 2011г.); на XLIII, XLIV и XLV научно-практических конференциях аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти И.И. Сикорского (Санкт-Петербург, 2011, 2012, 2013гг.); XXIII всероссийской научно-технической конференции школы-семинара «Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах» (Сочи, 2012г.); на III международной научно-практической конференции «Человек и транспорт» в секции «Авиационный и скоростной наземный транспорт» (Санкт-Петербург, 2014г.).

Структура и объем работы. Диссертационная работа содержит: введение, 4 главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы, включающий 96 источников, а также 4 приложения, представленных в отдельном томе. Диссертация изложена на 167 страницах, включает 73 рисунка, 46 таблиц. Приложения включают 59 страниц из них 30 страниц распечаток используемых в работе программ, а также 24 рисунка и 15 таблиц.

Во введении, обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется цель, задачи и методы исследования, приводятся данные о научной новизне и практической значимости исследования, перечислены выносимые на защиту положения, дается общая постановка задачи, сведения о публикациях и апробации работы, а также аннотация содержания работы.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ научных работ, посвященных оценке безопасности полетов, проанализированы применяемые в данных работах методики. В основе этих методик лежит оценка некоторого критерия безопасности полетов, в качестве которого может выступать: риск столкновения ВС, вероятность выхода ВС за пределы трассы, а также вероятность нарушения норм эшелонирования. Также обязательным условием обеспечения безопасности полетов является полное перекрытие воздушных трасс региона радионавигационными, радиолокационными и радиосвязными полями.

Анализ целесообразности применения критериев для решения практических задач, позволил выбрать для использования в диссертационной работе следующие критерии: вероятность выхода ВС за пределы трассы, вероятность нарушения норм эшелонирования, а также условие перекрытия воздушных трасс радионавигационными, радиолокационными и радиосвязными полями. Данные критерии определяются эксплуатационными характеристиками средств РТОП, включающими: зону действия, рабочую область и зону конфликтных ситуаций.

На основе проведенного анализа сформулированы основные задачи диссертационного исследования: разработать алгоритм двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП, предполагающего расчет зон действия и рабочих областей РТС навигации, наблюдения и связи; разработать методику расчета зон конфликтных ситуаций; реализовать полученные методики в виде комплекса компьютерных программ и провести с их помощью расчет ЭХ средств РТОП в Санкт-Петербургском центре ОВД.

Вторая глава посвящена разработке методов расчета зон действия и рабочих областей РТС навигации, наблюдения и связи, а также алгоритма двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП.

В главе проанализированы различные методы расчета дальности действия, которые можно разделить на два класса:

- 1) позволяющие непосредственно определять дальность действия;

2) позволяющие рассчитывать напряженность поля в точке приема.

Исходя из этого разработано два варианта расчетов: стандартный и энергетический. Стандартный расчет основан на использовании информации об углах закрытия наземной антенны. Энергетический расчет позволяет определить напряженность поля в точке приема, а зона действия РТС рассчитывается исходя из требований к минимальному уровню напряженности поля. Рассматриваются особенности каждого типа РТС, влияющие на дальность действия.

Разрабатываются методики расчета рабочих областей. РО средств навигации и наблюдения рассчитываются для концепции зональной навигации. Для проведения расчетов был усовершенствован геометрический метод, предполагающий расчет эллипса погрешностей, а также учитывающий погрешность пилотирования ВС. В работе введено понятие рабочей области РТС связи ОВЧ диапазона и разработаны методики, позволяющие определить размеры РО для систем аналоговой и цифровой радиосвязи.

Для каждой РТС навигации, наблюдения и связи, рассчитывается ЗД и РО: первая характеристика определяет границы, в пределах которых обеспечивается получение требуемой информации, вторая – задает область пространства, в пределах которой полученная информация имеет требуемое качество. Таким образом, реализуется единый подход в расчете ЭХ средств РТОП. Объединенные ЗД и РО совокупности РТС, распределенных по региону, представляют собой интегральные ЭХ средств РТОП.

В третьей главе рассматривается методика расчета зон конфликтных ситуаций. Предлагается использовать вероятностный метод расчетов, позволяющий учесть погрешности определения местоположения ВС. При этом использовалось не применявшееся ранее составное распределение.

На основе разработанных методик был разработан комплекс компьютерных программ. Он построен по модульному принципу: для каждой задачи используется отдельная программа, что позволяет быстро модернизировать программы, входящие в комплекс, с условием сохранения формы входной и выходной информации.

В четвертой главе производится расчет ЭХ средств РТОП в Санкт-Петербургском центре ОВД.

Результаты двухэтапного анализа представлены в виде радионавигационных карт с отображенными на них зонами действия и рабочими областями РТС и не перекрытыми участками трасс, а также в виде таблиц с рассчитанными коэффициентами перекрытия. Для каждого типа средств рассчитан интегральный показатель покрытия воздушных трасс полями РТС. Даны рекомендации по модернизации инфраструктуры РТС навигации, наблюдения и связи. Для выбранных участков трасс рассчитаны размеры зон конфликтных ситуаций.

В заключении представлен перечень основных результатов диссертационной работы.

В приложениях содержится код разработанных компьютерных программ, в которых реализованы представленные в работе расчетные методы, а также материалы по расчету рабочей области РТС связи ОВЧ диапазона, сравнение расчетных значений зон действия радиолокаторов с данными облетов и результаты расчета ЭХ средств РТОП Санкт-Петербургского центра ОВД.

Глава 1. Анализ существующих методик оценки уровня безопасности полетов

Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов является одним из важнейших видов обеспечения полетов, поскольку состояние РТС и поддержание заданного уровня надежности функционирования в существенной мере определяют безопасность воздушного движения.

План развития наземной инфраструктуры, а также методов ОВД изложен в Федеральной целевой программе «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009-2020 гг.)» [9], где указано, что повышение безопасности полетов и эффективности использования воздушного пространства будет выполнено в первую очередь за счет использования новых технических средств и технологий в соответствии со стандартами и рекомендуемой практикой Международной организации гражданской авиации.

Среди основных задач Программы отмечено внедрение перспективных наземных и бортовых средств и систем аэронавигации, модернизация и техническое перевооружение инфраструктуры (объектов) аэронавигации, а также укрупнение центров организации воздушного движения [10]. Решение перечисленных задач невозможно без анализа текущей структуры средств РТОП региона, и прогноза изменений ЭХ с целью отыскания оптимального решения. Иными словами, необходимо иметь систему анализа эксплуатационных характеристик средств РТОП, позволяющую на основе данных об инфраструктуре РТС навигации, наблюдения и связи, а также структуре воздушного пространства, оценивать уровень безопасности полетов в регионе. В основе анализа должен лежать расчет некоторых критериев безопасности и сравнение их с предельно допустимыми значениями, заданными нормативными документами. Рассмотрим, какие критерии принимаются в расчет в настоящее время.

1.1 Методика определения уровня безопасности полетов, используемая в авиапредприятиях

В авиапредприятиях (в частности в службе ЭРТОС), согласно действующим нормативным документам [11-13], безопасность полетов считается обеспеченной при соблюдении требований по:

- 1) размещению оборудования;
- 2) эксплуатационно-техническим характеристикам оборудования;
- 3) пространственным характеристикам оборудования.

Первый пункт требований актуален при установке новых объектов, а также при решении вопроса строительства на близлежащей к объектам территории. Соответствие ЭТХ требованиям проверяется во время выполнения ТО и наземных проверок. Пространственные характеристики средств (дальность действия, форма ДНА и т.д.) проверяются во время облетов [13].

Кроме выполнения указанных требований (к размещению, ЭТХ и пространственным характеристикам) необходимо также обеспечить полное перекрытие воздушных трасс зонами действия РТС. В этом случае безопасность полетов в регионе считается обеспеченной.

Стоит отметить, что расчет дальности действия в нормативных документах описан с применением упрощенных методик, либо реализация процесса расчета отдана в ведение инженерно-технического персонала, который использует в расчета наиболее простые подходы. Компенсируется этот недостаток коррекцией вычисленных результатов по данным облетов.

Данный подход, приемлемый для концепции оборудованных трасс, малоэффективен для оценки работы РТС в концепции зональной навигации, так как программа облетов не позволяет в должной мере оценить характеристики РТС во всем объеме зоны действия. Что касается РТС связи, то оборудование проверяется только при вводе в эксплуатацию и замене АФУ, периодических облетов при этом не выполняется [13].

Для обеспечения навигации по двум маякам-дальномерам DME/DME, рекомендуется рассчитывать рабочую область системы [4]. Для других РТС рабочие области не рассчитываются. Таким образом, на основе критериев, принятых в авиапредприятиях, полет в регионе считается безопасным, если удовлетворены требования к размещению, ЭТХ и пространственным характеристикам оборудования, а также обеспечено перекрытие трасс зонами действия РТС (и рабочими областями для систем DME/DME).

Подводя итог, можно сказать, что применяемая на авиапредприятиях методика анализа эксплуатационных характеристик РТОП имеет ряд недостатков. Так, процедура расчета зон действия устарела, а погрешности методов не могут быть в полной мере нивелированы в процессе облета. Особенно это касается средств авиационной воздушной электросвязи ОВЧ диапазона. Внедрение зональной навигации с последующим отказом от жесткой системы воздушных трасс потребует применение более точных расчетных методов, способных определить границы зоны действия по всем направлениям, для всех высот полета. Рабочие области рассчитываются только для маяков-дальномеров DME/DME, хотя документы ИКАО определяют, что только в пределах рабочих областей обеспечивается безопасность полетов [4]. Отсутствует интегральный показатель, характеризующий степень перекрытия воздушных трасс региона. Перечисленные недостатки говорят о необходимости разработки новой методики анализа ЭХ средств РТОП.

1.2 Методика определения уровня безопасности полетов основанная на расчете риска столкновения

В последнее время большую популярность приобрели работы, рассматривающие уровень безопасности полетов с точки зрения риска столкновения ВС. В основе методов расчета лежат модели Рейха и Хсю. Как указано в [14], они различаются принятой системой координат и некоторыми операциями расчета.

Данной проблемой занимаются такие организации, как Национальная аэрокосмическая лаборатория NLR, Национальное агентство по космическим исследованиям NASA, ГосНИИ «Аэронавигация», университеты МГТУ ГА, ГУАП, ГУГА и др. [15].

Разработанные модели позволяют в реальном времени оценивать риск столкновения пары ВС как в горизонтальной плоскости, так и в трехмерном пространстве. Так как расчет риска ведется в реальном масштабе времени, то, для уменьшения времени расчета принимается ряд упрощений: упрощена модель распределения ошибок определения координат ВС, для описания распределения погрешностей применяют в основном нормальный закон, а также не учитываются погрешности пилотирования. В рамках решаемой в диссертационной работе задачи, подход, основанный на определении риска столкновения, не позволяет в полной мере осуществить анализ достаточности инфраструктуры средств РТОП.

1.3 Методика определения уровня безопасности полетов основанная на расчете вероятности нарушения норм эшелонирования

Хорошим решением можно признать выбор в качестве критерия безопасности полетов вероятность нарушения норм эшелонирования. Из последних исследований в этой области можно назвать работы Е.И. Компанцевой [16-18], О.А. Троицкой [19, 20] и др. В перечисленных работах авторы моделировали полет двух ВС по одной трассе, а также по параллельным и пересекающимся трассам, с целью определить вероятность нарушения норм эшелонирования при различных значениях погрешности определения координат и различных скоростях самолетов.

В работах, однако, есть ряд спорных моментов. Так, авторы рассматривают движение ВС по трассе с систематическим боковым отклонением; на практике это не встречается, т.к. систематические погрешности устраняются соответствующими системами управления, потому рассматриваемые погрешности являются случайными и несмещенными. В

качестве закона распределения погрешности определения координат ВС принят нормальный закон, несмотря на то, что в официальных документах ИКАО применение его ставится под сомнение. При решении задачи, результаты расчетов излишне загроублялись, в результате чего момент нарушения норм эшелонирования определялся с существенной ошибкой.

Сам подход к анализу безопасности полетов путем расчета вероятности нарушения норм эшелонирования довольно интересен и требует дальнейшей проработки. Недостатком данного подхода является необходимость оперирования с довольно малыми величинами. Поэтому для получения результатов большой точности, необходимо затратить значительное время.

1.4 Методика определения уровня безопасности полетов основанная на расчете вероятности выхода ВС за пределы трассы

Так как предельно допустимая вероятность нарушения норм эшелонирования – величина довольно малая, то в качестве критерия точности самолетовождения была принята вероятность выхода за пределы трассы заданной ширины [21]. В Академии гражданской авиации был разработан пакет прикладных программ «Alfa-7» [22], позволяющий оценить точность самолетовождения и выявить участки потенциально возможного выхода ВС за пределы трассы. Исходными данными являются: тип используемого ВС, перечень наземных РТС с указанием места установки и характеристик, а также параметры трассы. Результат расчетов предоставляется в виде таблицы, с указанием СКП определения координат и вероятности выхода за пределы трассы.

Программа построена для анализа полетов, выполняемых по концепции оборудованных трасс, и позволяет рассчитывать только боковые отклонения ВС от оси трассы. В качестве закона распределения ошибок навигации принят нормальный закон. Модель расчета имеет ряд упрощений, среди которых, например, задание зон действия РТС в виде окружностей.

В основе программы заложен хороший принцип: на основе анализа полета ВС, делается вывод о достаточности наземной инфраструктуры и выдается рекомендация, направленная на улучшение ситуации в регионе. Задача расчета вероятности выхода ВС за пределы трассы остается актуальной и в настоящее время, что подтверждается соответствующими работами [24, 25]. Однако идея анализа эксплуатационных характеристик средств РТОП на основе данных о параметрах полета должного развития не получила.

1.5 Анализ методик определения уровня безопасности полетов

Рассмотрение описанных методик позволяет сделать вывод о необходимости разработки совокупности методов расчета ЭХ средств РТОП в регионе, позволяющих оценить влияние изменений в инфраструктуре РТС навигации, наблюдения и связи на безопасность полетов (для существующих и перспективных требований).

В современных исследованиях по оценке безопасности полетов, зонам действия РТС уделяется мало внимания. Как было указано ранее, в авиапредприятиях применяются упрощенные методы расчета дальности действия. Из этого можно сделать вывод о необходимости анализа и разработки методик расчета зон действия РТС навигации, наблюдения и связи, и определение степени перекрытия воздушных трасс. В качестве примера можно назвать такие программные продукты, как AREPS и WRAP Civil Aviation [26, 27].

Используемый в пакете прикладных программ «Alfa-7» метод оценки уровня безопасности полетов по вероятности выхода ВС за пределы трассы имеет хорошую основу, однако не подходит для решения современных задач в условиях внедрения концепции зональной навигации. Кроме того, при анализе не учитывается влияние на рассматриваемое воздушное судно других судов, выполняющих полет на соседних трассах.

Более полную информацию об уровне безопасности полетов, можно получить при анализе вероятности нарушения норм эшелонирования. Для этого

необходимо разработать соответствующие методики расчета. Кроме того, следует обратить внимание на применяемые законы распределения ошибок, так как во многих источниках указывается на необходимость замены нормального закона распределения, а также о некорректных результатах расчета при использовании закона Лапласа [68, 89].

1.6 Постановка задачи и разработка требований к методу определения уровня безопасности полетов в регионе

Таким образом, необходимо разработать методы расчета таких эксплуатационных характеристик средств РТОП, как:

- 1) Зона действия РТС навигации, наблюдения и связи;
- 2) Рабочая область РТС навигации, наблюдения и связи;
- 3) Зона конфликтных ситуаций.

Первые две ЭХ целесообразно объединить в рамках двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП с последующим расчетом интегральных показателей степени перекрытия воздушных трасс региона ЗД и РО. По результатам расчетов дается заключение о достаточности наземной инфраструктуры, оптимальности расположения РТС, а также о качестве структуры воздушного пространства.

Разрабатываемые методы должны быть достаточно просты для использования инженерно-техническим персоналом, требовать небольшое количество входных данных, получение которых не вызовет больших трудностей. Методы должны быть реализованы в виде готовых к использованию компьютерных программ, вывод результатов должен содержать числовую и графическую составляющие, которые можно использовать как справочных материал для работников авиапредприятий.

Таким образом, в рамках диссертационной работы необходимо разработать алгоритм двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП (включающего методы расчета ЗД и РО) и методику расчета зон конфликтных ситуаций, реализовать данные методы в виде компьютерных программ и провести с

помощью этих программ расчет ЭХ средств РТОП в Санкт-Петербургском центре ОВД.

Алгоритм двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП предполагает расчет зон действия и рабочих областей РТС навигации, наблюдения и связи, с последующим выводом результатов расчетов в виде таблиц и схем, по которым определяется степень перекрытия региона полями РТС навигации, связи и наблюдения. Так же предполагается расчет интегрального показателя степени перекрытия воздушных трасс.

Методика расчета зон конфликтных ситуаций предполагает определение вероятности нарушения норм эшелонирования. При этом учитывается расположение и характеристики средств РТОП и конфигурация воздушных трасс. Так как и нормальный, и двойной экспоненциальный законы распределения в ИКАО считают неподходящими для описания погрешностей, имеющих большую величину и крайне малую частоту появления, необходимо найти другие распределения погрешности определения координат ВС. Результат расчета должен быть представлен в виде таблиц и графиков.

С помощью разработанных методов необходимо оценивать текущий уровень безопасности полетов в регионе, а также делать прогноз последствий от внедрения новой техники или изменения структуры воздушного пространства.

Разработанные методы должны быть реализованы в виде компьютерных программ для использования в службе ЭРТОС и на других авиапредприятиях ГА, а также в учебных заведениях.

1.7 Выводы

В настоящее время для оценки уровня безопасности используются следующие критерии: риск столкновения ВС, вероятность нарушения норм эшелонирования, вероятность выхода ВС за пределы трассы, а также условие полного перекрытия воздушных трасс зонами действия РТС навигации, наблюдения и связи. Выбор конкретного критерия обусловлен спецификой задачи.

Анализ подходов к оценке уровня безопасности полетов показал, что для оценки инфраструктуры РТС навигации, наблюдения и связи целесообразно совершенствовать методики расчета критериев, используемых на авиапредприятиях, а также использовать методы расчета вероятности выхода ВС за пределы трассы и вероятности нарушения норм эшелонирования.

В диссертационной работе в качестве критериев безопасности полетов были выбраны: степень перекрытия воздушных трасс зонами действия и рабочими областями РТС навигации, наблюдения и связи, а также вероятность нарушения норм эшелонирования. Данные критерии определяются эксплуатационными характеристиками средств РТОП. Были сформулированы требования к методам расчета ЭХ, а также определены пути реализации этих методов.

Глава 2. Разработка алгоритма двухэтапного анализа эксплуатационных характеристик средств РТОП

Двухэтапный анализ ЭХ средств РТОП подразумевает два этапа: расчет зон действия, рабочих областей РТС, а также представление информации в удобной для использования форме, в виде графиков на радионавигационной карте. Для комплексной оценки достаточности и эффективности инфраструктуры навигационных средств, используется интегральная оценка степени перекрытия воздушных трасс ЗД и РО.

2.1 Зона действия

Под зоной действия понимается область пространства, в пределах которой обеспечивается получение требуемой навигационной или радиолокационной информации, а также область, где возможно установление и поддержание устойчивого радиообмена [21]. Для РТС связи большее распространение получил термин покрытие (coverage).

Максимальная дальность действия зависит от используемого диапазона радиоволн и условий их распространения, а также от технических характеристик, передающих, приемных и антенных устройств РТС.

На предприятиях ГА размер зон действия РТС определяют расчетным методом, с последующей корректировкой по результатам облетов. Данный подход имеет ряд существенных недостатков. Так, расчет ЗД выполняется с использованием упрощенных методов, что сказывается на точности и достоверности результатов. Для экономии средств, время облета, количество эшелонов, а также направлений пролета РТС сводится к минимуму [12, 13]. Это приводит к тому, что дальность действия точно определяется только для скорректированных направлений полета на заданной высоте.

Концепция зональной навигации требует точного определения дальности действия РТС для всех направлений и для всех высот. Решать проблему за счет расширения программы облетов нецелесообразно по экономическим

соображениям. Следовательно, необходимо внедрять в производство передовые расчетные методы.

В настоящее время разработано большое количество методов расчета дальности действия РТС, основанных на различных моделях прохождения радиоволн. Из-за ограничений на высоты источника и приемника, диапазон частот и т.д., не все из них подходят для анализа авиационных РТС. Рассмотрим только те, что удовлетворяют данным условиям.

Методы расчета зон действия можно разделить на две группы:

- 1) Методы, непосредственно определяющие дальность действия.
- 2) Методы, позволяющие определить напряженность поля.

Расчет, произведенный с использованием методов первой группы, будем называть *стандартным* расчетом. Расчет, произведенный с использованием методов второй группы – *энергетическим*.

Основные средства РТОП работают в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ. Свойства радиоволн данных диапазонов схожи, поэтому для расчета прохождения можно применять одни и те же методы с небольшими модификациями. Исключением является подвижная радиосвязь ВЧ диапазона, методы ее расчета будут рассмотрены отдельно.

2.1.1 Методы стандартного расчета ЗД

Самым простым методом первой группы является метод определения прямой радиовидимости [28]:

$$R = D \cdot (\sqrt{h_{BC}} + \sqrt{h_{ант}}), \quad (2.1)$$

где R – дальность действия

h_{BC} , $h_{ант}$ - высоты воздушного судна и антенны наземного средства

D – корень из удвоенного произведения радиуса земли и коэффициента k , учитывающего рефракцию (для нормальной атмосферы в средних широтах он равен 4/3, соответственно $D = 4.12$).

$$D_3[\text{км}] = -\frac{16900 \cdot \text{tg} \beta_3}{2} + \sqrt{\left(\frac{16900 \cdot \text{tg} \beta_3}{2}\right)^2 + 16,9 \cdot H_{\text{ЭШ}}[\text{м}]}, \quad (2.2)$$

где D_3 – дальность действия средства с учетом закрытий

$H_{\text{ЭШ}}$ – высота эшелона

β_3 – угол закрытия

Формулу (2.2) можно расширить, для случая, когда наземная антенна установлена на возвышении (крыша здания, мачта, вышка). В этом случае радиоволны смогут распространяться на углах в 90° и больше, соответственно, дальность действия увеличится.

Если антенна расположена у земли, как в формуле (2.2), то минимальный угол закрытия равен нулю и дальность действия можно рассчитать, как:

$$D_3[\text{км}] = -\frac{16900 \cdot \text{tg} \beta_3}{2} + \sqrt{\left(\frac{16900 \cdot \text{tg} \beta_3}{2}\right)^2 + 16,9 \cdot (H_{\text{ЭШ}} + h_{\text{ант}})[\text{м}]}, \quad (2.3)$$

Для поднятой антенны минимальный угол закрытия будет меньше нуля (см. рисунке 2.2), дальность действия находятся как:

$$D_3[\text{км}] = 2 \cdot \sqrt{16,9 \cdot (H_{\text{ЭШ}} + h_{\text{ант}})[\text{м}]} - \frac{16900 \cdot \text{tg} \beta_3}{2} + \sqrt{\left(\frac{16900 \cdot \text{tg} \beta_3}{2}\right)^2 + 16,9 \cdot (H_{\text{ЭШ}} + h_{\text{ант}})[\text{м}]} \quad (2.4)$$

В (2.3) угол закрытия β_3 больше или равен нулю, в (2.4) – меньше нуля.

Остановимся подробнее на способах определения углов закрытия. Они измеряются представителями специальных организаций (таких как ОАО «Ленаэропроект») по данным навигационных спутников, либо обслуживающим персоналом объекта с помощью теодолита. Результаты измерений оформляются в виде графиков и таблиц.

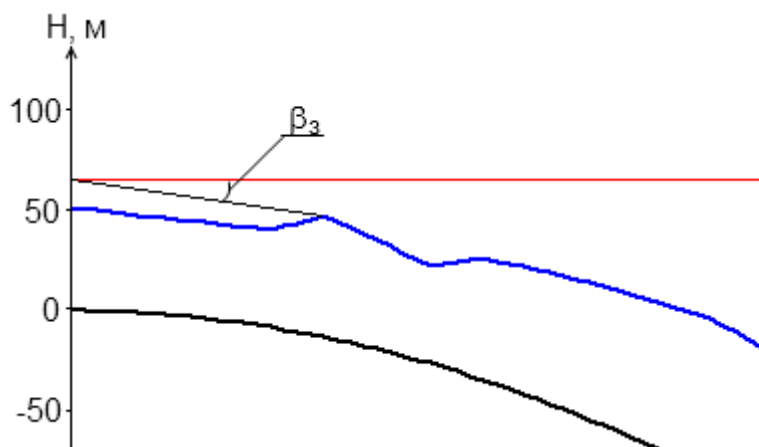


Рисунок 2.2 – Отрицательный угол закрытия

Для ряда объектов (радиолокаторы, маяки VOR/DME) такие графики входят в состав формуляра, и расчет дальности действия средства не представляет трудностей. Если графика углов закрытий нет (как например, для антенн ОБЧ-радиосвязи) и непосредственно измерить углы нельзя, то подобный график необходимо подготовить.

Для того чтобы определить угловую величину закрытия пользуются профилями местности, снятыми для различных азимутальных углов. Получить данные о высотах рельефа можно с помощью:

- 1) Топографических карт;
- 2) ГИС программ;
- 3) цифровых моделей рельефа.

Снятие профиля местности по топографическим картам является традиционным способом построения графика углов закрытия (алгоритм построения графика для радиолокатора можно найти в [31]). Недостатки способа – большая трудоемкость и отсутствие автоматизации. Преимущества заключаются в том, что карты хорошего качества можно найти в свободном доступе (как в электронном, так и в бумажном виде), информация о высотах рельефа достоверна, а профиль можно снять с бумажной карты вручную.

Второй способ определения характера рельефа вокруг антенны – использование ГИС программ. Многие из них (например, продукты ЗАО

Конструкторское бюро «Панорама») позволяют работать с картами высот, а также снимать профиль местности между двумя точками. Применение этой функции на примере Google Earth показано на рисунке 2.3.

Автоматизация работы с ГИС программами сопряжено с рядом трудностей. Так, для построения графика углов закрытия, необходимо снимать профили под определенными азимутальными углами, для чего приходится вручную назначать начальную и конечную точки профиля. Создать модуль, автоматизирующий эту работу проблематично, так как ГИС в основном имеют закрытый код. Полученный профиль отображается в виде графика (см. рисунок 2.3), и переводить данные в табличный вид приходится вручную. Большинство ГИС, обладающие достаточным функционалом, распространяются на коммерческой основе. Для образовательных учреждений этот факт становится решающим.

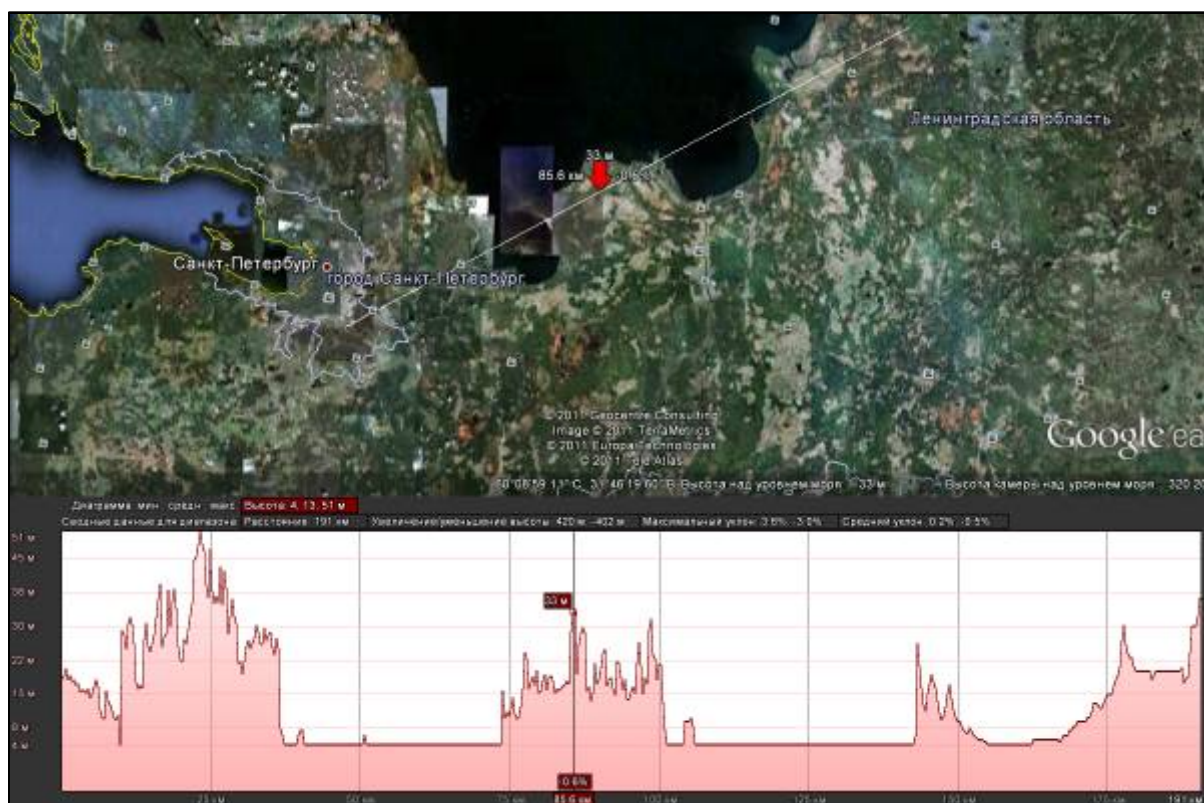


Рисунок 2.3 – Снятие профиля местности с помощью GoogleEarth

Источником используемых в ГИС данных о высотах рельефа являются цифровые модели рельефа, содержащие базы данных с информацией о высотах.

В качестве примера можно привести ETOPO и GLOBE, которые находятся на сервере NOAA National Data Centers [32], базу GTOPO, созданную в U.S. Geological Survey, а также базу SRTM, созданную в NASA/JPL-Caltech [33].

ETOPO содержит данные о высотах, взятых с шагом в 5 минут, остальные базы предлагают данные взятые с шагом 3–30 секунд.

Перечисленные цифровые модели рельефа находятся в свободном доступе, а ГИС является лишь оболочкой, предлагающей различные варианты обработки данных. Поэтому целесообразно напрямую использовать цифровую модель рельефа для получения профилей местности.

Для расчета углов закрытия по данным цифровой модели рельефа SRTM был создан пакет прикладных программ, позволяющий снимать профили местности и строить график углов закрытия в автоматическом режиме. Рассмотрим расчетную алгоритм расчета.

Углы закрытия определяются для каждого углам азимута (шаг 1°). При этом строится ряд профилей местности, расходящихся от исследуемой антенны на удаление до 50км (см. рисунок 2.4).

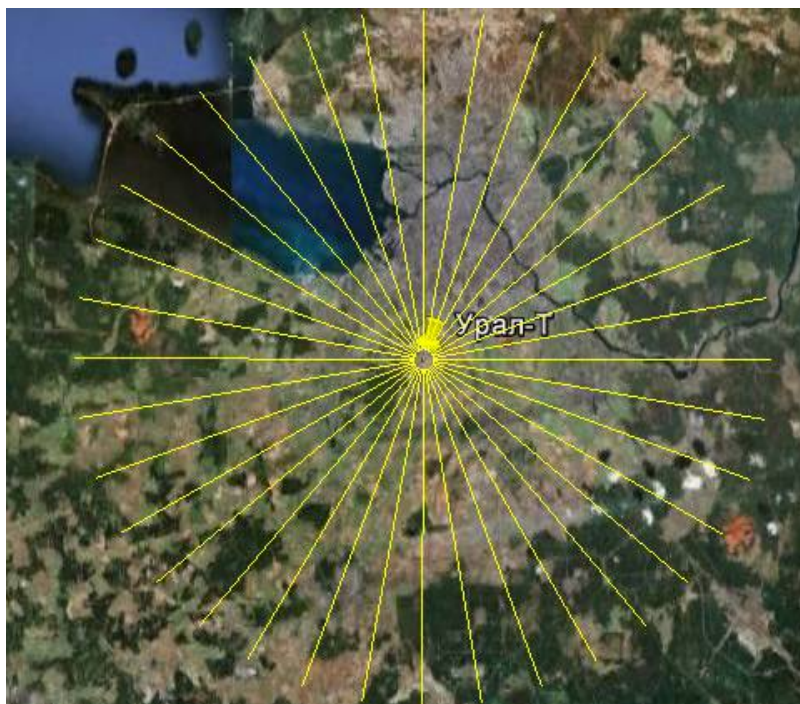


Рисунок 2.4 – К методике съемки профилей местности

Съемка профиля представляет собой решение прямой геодезической задачи: по известному азимуту и удалению от заданной точки определяются координаты второй точки. Для решения геодезических задач применяется метод Рунге-Кутты [34]. Координаты находятся косвенным методом, с помощью системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_2 - B_1 = \int_0^S \frac{V^3}{C} \cos A dS \\ L_2 - L_1 = \int_0^S \frac{V}{C} \sec B \sin A dS \\ A_2 - A_1 \pm 180^\circ = \int_0^S \frac{V}{C} \sin B \sec B \sin A dS \end{array} \right. , \quad (2.5)$$

где B_1, B_2 – широта первой и второй точек;
 L_1, L_2 – долгота первой и второй точек;
 A_1, A_2 – прямой и обратный азимут;
 V – вторая функция геодезической широты;
 C – радиус кривизны меридиана эллипсоида в полюсах.

$$\left\{ \begin{array}{l} B_2 = B_1 + \frac{1}{6}(\Delta B_1 + 4\Delta B_3 + \Delta B_4) \\ L_2 = L_1 + \frac{1}{6}(\Delta L_1 + 4\Delta L_3 + \Delta L_4) , \\ A_2 = A_1 + \frac{1}{6}(\Delta A_1 + 4\Delta A_3 + \Delta A_4) \end{array} \right. \quad (2.6)$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta B_i = S_0 V_i^3 \cos \alpha_i \\ \Delta L_i = S_0 V_i \frac{\sin \alpha_i}{\cos \phi_i} , \\ \Delta A_i = \Delta L_i \sin \phi_i \end{array} \right. \quad (2.7)$$

$$V_i = \frac{1 + 0.6\gamma_i}{1 + 0.2\gamma_i}; \quad \gamma_i = \beta \cos^2 \phi_i; \quad S_0 = 0.0322304 \cdot S; \quad \beta = 1.25e^2,$$

$i = 1, \dots, 6$ - номер шага.

Значения α_i и φ_i приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

i	α	φ
1	A_1	B_1
2	$A_1 + 0.5\Delta A_1$	$B_1 + 0.5\Delta B_1$
3	$A_1 + 0.25(\Delta A_1 + \Delta A_2)$	$B_1 + 0.25(\Delta B_1 + \Delta B_2)$
4	$A_1 - \Delta A_2 + 2\Delta A_3$	$B_1 - \Delta B_2 + 2\Delta B_3$
5	$A_1 + 1/27(7\Delta A_1 + 10\Delta A_2 + \Delta A_3)$	$B_1 + 1/27(7\Delta B_1 + 10\Delta B_2 + \Delta B_3)$
6	$A_1 + 1/625(28\Delta A_1 - 125\Delta A_2 + 546\Delta A_3 + 54\Delta A_4 - 378\Delta A_5)$	$B_1 + 1/625(28\Delta B_1 - 125\Delta B_2 + 546\Delta B_3 + 54\Delta B_4 - 378\Delta B_5)$

Построение профиля - наиболее трудоемкая задача. Алгоритм построения выглядит следующим образом:

- 1) По известным координатам первой точки, заданному азимуту и удалению, определяется координата второй точки.
- 2) Из матрицы рельефа SRTM находим высоту этой точки.
- 3) Принимаем найденную точку за первую и переходим в начало алгоритма.

Таким образом, двигаясь от точки к точке, находим профиль высот. Шаг по горизонтали фиксированный и составляет 50м. После достижения предельного расстояния, переходим к следующему азимуту. Графически, линии съемки профилей представлены на рисунок 2.4. После того, как получены профили для всех направлений, определяются углы закрытия. Расчет выполняется по формуле:

$$\beta_{3_i} = \arctg \left(\frac{h_{rel_i} - \frac{R^2}{16.9} - h_{ант}}{R} \right), \quad (2.8)$$

где β_{3_i} - угол закрытия для данной точки профиля;

h_{rel_i} - высота точки профиля;

h_{ant} - высота антенны;

R - удаление точки профиля от антенны.

Величина закрытия определяется для каждой точки профиля, а затем выбирается наибольшая величина, которая будет соответствовать углу закрытия на данном азимуте. Таблица углов, а также профиль местности для каждого направления, сохраняются в файлах, для дальнейшей обработки.

Для проверки точности расчетов, использовались контрольные примеры: результаты моделирования сравнивались с теодолитной съемкой радиолокаторов. На рисунке 2.5 представлено сравнение графиков углов закрытия радиолокатора 1Л118 аэропорта Кеми. Результаты статистической обработки измерений приведены на рисунке 2.6. Математическое ожидание отклонения измеренных и расчетных значений составило 0.14° , СКП – 0.12° .

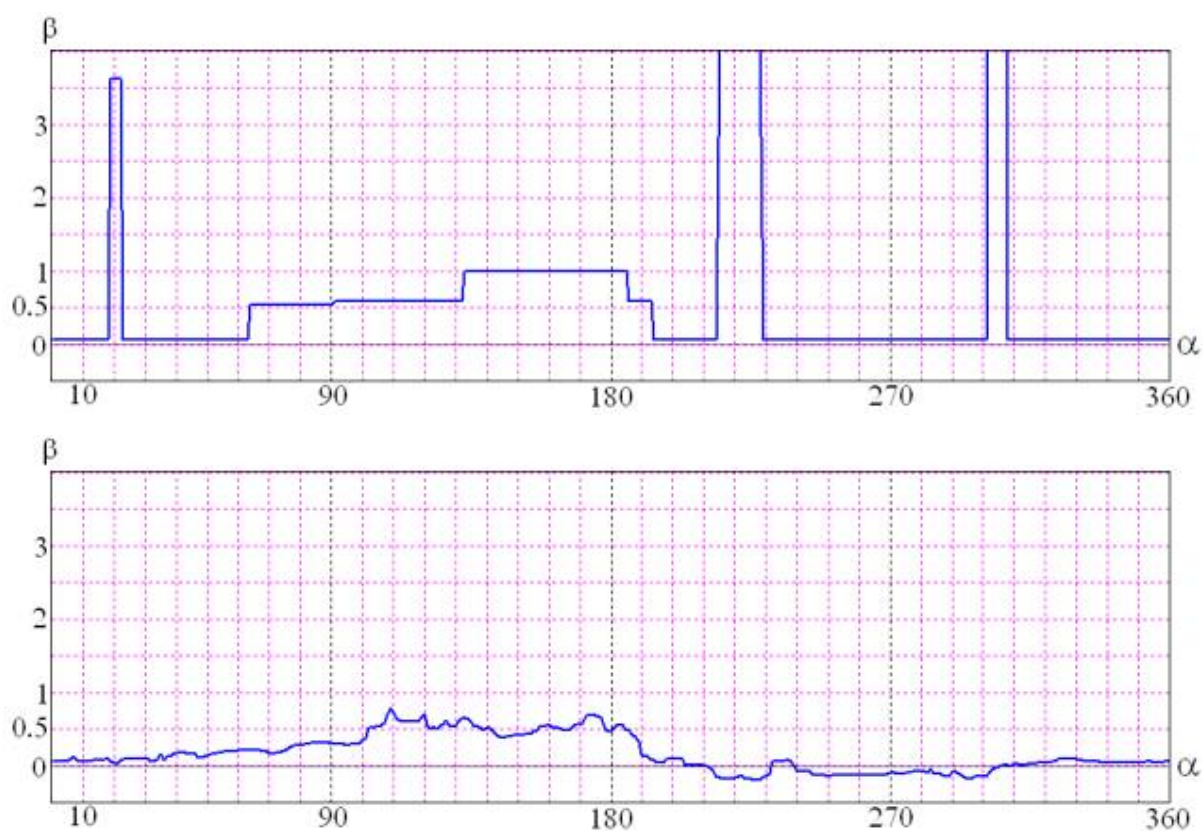


Рисунок 2.5 – Графики углов закрытия ОРЛ-Т 1Л118: теодолитная съемка (вверху), расчет с применением цифровой модели рельефа (внизу)

На графике (рисунок 2.5) отсутствуют большие закрытия прямоугольной формы. Они вызваны близкорасположенными опорами других радиолокаторов. Так как разрешение модели рельефа 3x3 секунды, то высоты в прямоугольнике размером 90x60 метров усредняются и подобного рода точечные закрытия модель «не видит».

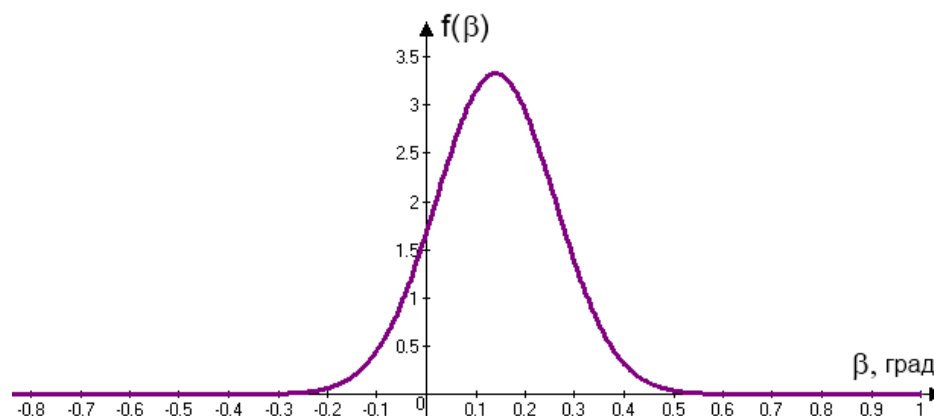


Рисунок 2.6. Плотность вероятности ошибки определения углов закрытия для радиолокатора 1Л118



Рисунок 2.7 – Близкорасположенные к радиолокатору 1Л118 объекты

На рисунке 2.7 анализируемый локатор выделен зеленым, а близкорасположенные препятствия – красным. Чтобы учесть эти закрытия, необходимо проанализировать окружающую антенну территорию, чтобы получить данные для решения обратной геодезической задачи: по координатам двух точек найти расстояние между ними и азимут одной точки относительно

другой. Для близкорасположенных объектов можно воспользоваться упрощенным методом Винсенти [35].

Зная высоту и удаление препятствия можно найти угол закрытия, а зная ширину препятствия – вычислить, какой сектор на азимутальной шкале будет закрыт. Скорректированный график можно увидеть на рисунке 2.8.

Предложенная методика имеет некоторые особенности. Необходимо учитывать, что в SRTM используется система координат WGS84, в то время как координаты объектов даны в СК-42. Разница может составлять до десятков секунд, разница высот: 20–30м. Кроме того данные высот содержат некоторую систематическую погрешность. На больших удалениях она мало влияет на точность расчета, но вблизи антенны ошибка может значительно исказить результаты. Так как высоты усредняются, то полученный рельеф будет несколько ниже реального. Это компенсируется пересчетом высоты. В целом, результаты расчета относительно небольшую погрешность, а также отражают морфологию рельефа.

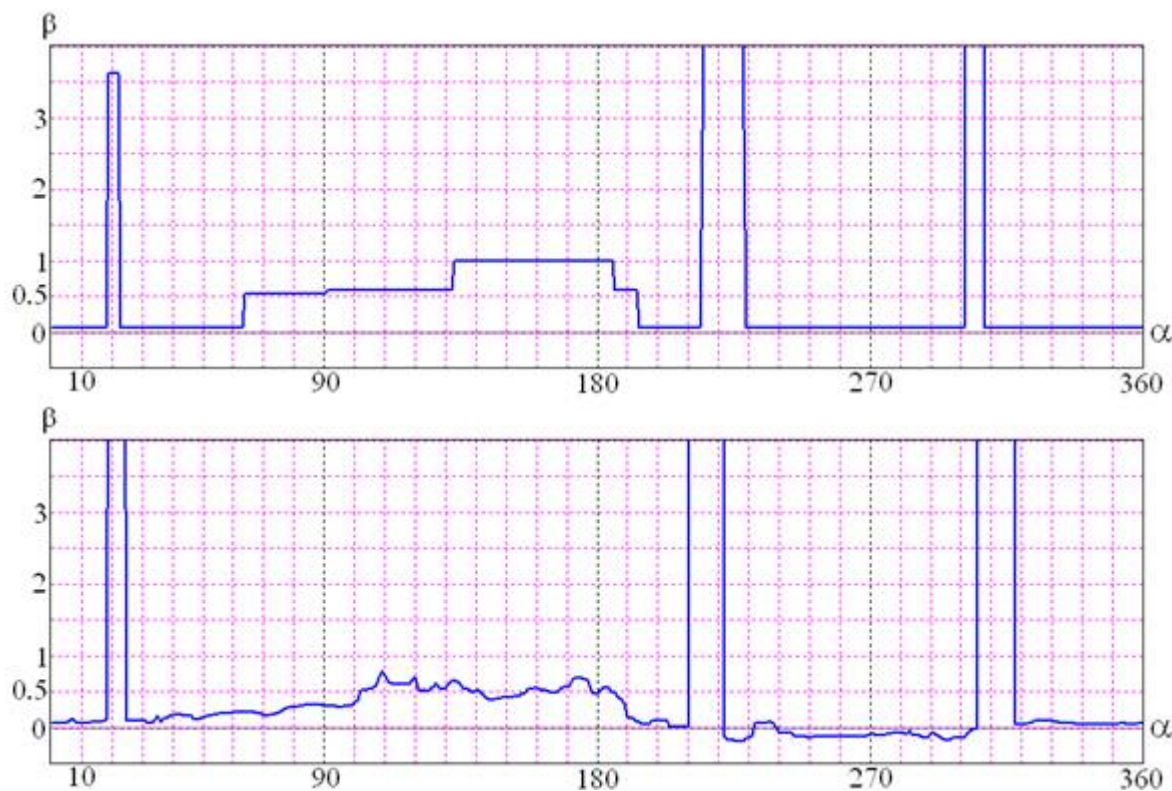


Рисунок 2.8 – График углов закрытия ОРЛ-Т 1Л118: теодолитная съемка (вверху), расчет с применением цифровой модели рельефа (внизу)

Полученные профили местности позволяют предотвратить искажение данных, возникающее при попытке пересчитать углы закрытия антенны при изменении высоты последней. Иногда, имея в одной точке несколько разновысотных антенн, график углов закрытия снимают только для одной, предполагая, что данные для других антенн будут получены пересчетом. Однако, как показывают исследования, это вносит неточность в результат, а потому целесообразно, наряду с графиком углов закрытия иметь и профили местности, так как только по ним можно произвести пересчет углов закрытия при изменении высоты антенны.

Полученные с помощью расчетов углы закрытия используются в программе «Дальность прямой радиовидимости» (см. рисунок 2.9). Метод определения дальности радиовидимости с учетом углов закрытия (стандартный расчет) является достаточно точным, зона действия имеет сложный вид.

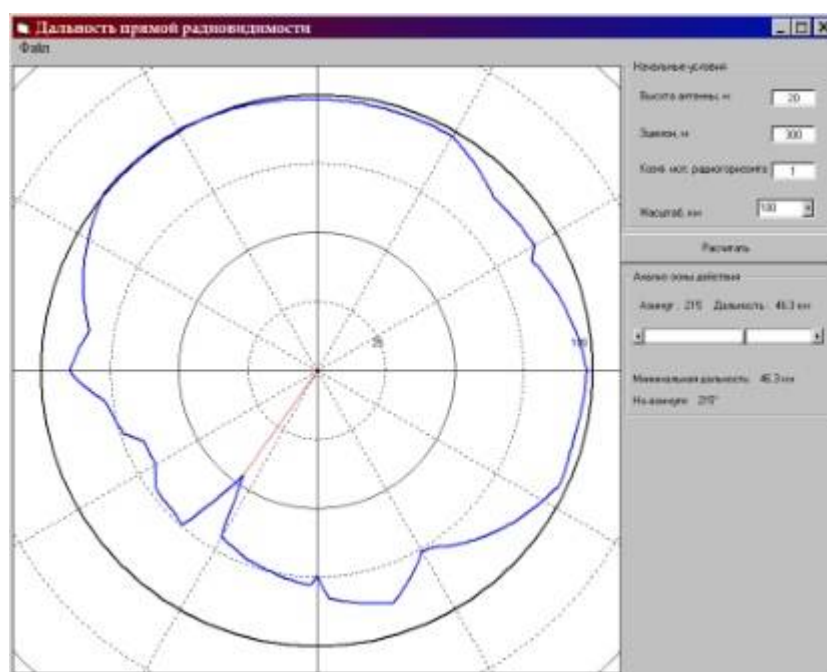


Рисунок 2.9 – Программа «Дальность прямой радиовидимости»

Рассмотренные способы расчета дальности радиовидимости обладают достоинствами и недостатками. Формулу (2.1) можно применять для предварительной оценки покрытия региона полями радиосредств, в случае, если информация о рельефе отсутствует или не может быть получена в приемлемый

срок. При наличии графика углов закрытия целесообразно воспользоваться более точным методом, произведя расчет дальности по формулам (2.3) и (2.4).

Полезно, кроме графика углов закрытия полезно иметь также профили местности. Они дают возможность оценить угловые размеры препятствия для любой высоты антенны, что актуально для связных антенн, так как для них углы закрытия специально не измеряются. Таким образом, профиль поверхности вокруг антенны является для них единственным источником информации о закрытиях. Для систем навигации и наблюдения он может служить как источник, дополняющий график углов закрытия.

2.1.1.1 Влияние атмосферы на дальность радиовидимости

Для расчета радиовидимости (2.1) используется число D , равное корню из удвоенного эквивалентного радиуса Земли. При коэффициенте рефракции $k=4/3$:

$$a_{\text{эк}} = k \cdot a_0 = \frac{4}{3} \cdot 6370 \approx 8450 \text{ км}, \quad (2.9)$$

Используемые в формулах (2.2-2.4) коэффициенты $16,9$ и 16900 так же являются производными от эквивалентного радиуса. Согласно [38], он определяется из формулы:

$$a_{\text{эк}} = \frac{a}{1 + a_0 \cdot \frac{dN}{dh} \cdot 10^{-5}}, \quad (2.10)$$

где $a_0 = 6370$ км – фактический радиус Земли.

$\frac{dN}{dh}$ - градиент индекса преломления атмосферы.

Значение эквивалентного радиуса $a_{\text{эк}}=8450$ км получено исходя из того, что градиент индекса преломления $\frac{dN}{dh}$ принимается неизменным и равным $-0,04 \text{ м}^{-1}$. Эти значения принято считать средними, их используют для предварительной оценки дальности действия РТС.

В реальной атмосфере индекс преломления постоянно меняется и зависит от температуры, плотности воздуха и давления водяных паров. Хорошим

решением будет создание карт покрытия, рассчитанных с учетом параметров атмосферы данного региона.

Среднегодовые и среднемесячные параметры атмосферы можно найти в аэроклиматических справочниках [36]. Индекс рефракции рассчитывается по формуле [37]:

$$N = \frac{77.6 \cdot P}{T} - \frac{5.6 \cdot P}{T} + \frac{3.75 \cdot 10^5 \cdot e}{T^2}, \quad (2.11)$$

где P – давление воздуха;

T – температура воздуха в Кельвинах;

e – давление водяных паров.

Используемые в формулах значения эквивалентного радиуса и индекса рефракции находятся при сопоставлении параметров атмосферы в приземном слое и на высоте в 1000м. Рассчитанные для Санкт-Петербурга значения эквивалентного радиуса и коэффициента D равны:

а) Среднегодовые: $D = 4.08$, $a_{эк} = 8338$ км.

б) Для худшего месяца (июль): $D = 3.95$, $a_{эк} = 7816$ км.

Характер влияния гидрометеоров на дальность действия РТС, работающих в УВЧ и СВЧ диапазонах можно видеть в таблице 2.2 [38]. Для радиоволн ОВЧ диапазона ослабление пренебрежимо мало.

Таблица 2.2 – Влияние осадков на дальность действия РЛС

Поглощение, ослабление	Длина волны 30см	Длина волны 10см
Пары воды + кислород	9,5%	14,6%
Туман с видимостью 50м.	0%	0%
Дождь с интенсивностью 5 мм/ч	0%	15,2%
Дождь с интенсивностью 100 мм/ч + ослабление в дождевом облаке.	4,8%	38%

Влияние гидрометеоров на дальность действия РТС учитывается путем изменения коэффициента использования радиогоризонта [31]. В таблице 2.3 представлены значения коэффициента использования радиогоризонта для радиоволн диапазонов СВЧ, УВЧ и ОВЧ.

Таблица 2.3 – Индекс использования радиогоризонта при различных условиях прохождения для радиоволн ОВЧ

Условия прохождения	Длина волны 10см	Длина волны 30см	Длина волны 100см
Ясная погода	0.7	0.75	0.8
Дождь с интенсивностью 5 мм/ч	0.6	0.75	0.8
Дождь с интенсивностью 100 мм/ч + ослабление в дождевом облаке.	0.5	0.70	0.8

2.1.2 Методы энергетического расчета ЗД

Вторая группа методов включает в себя модели прохождения радиоволн, позволяющие рассчитывать напряженность поля в точке приема. Модели различаются по сложности, количеству учитываемых параметров и точности результатов. Многие из них автоматизированы и существуют в виде алгоритмов (например, АРМ [26]).

Большинство моделей создавалось для расчета наземных радиосетей. Это следует из ограничений, например, на высоты антенн (в рекомендации МСЭ-Т Р.1546-4 до 3000м).

Модели расчета напряженности поля можно классифицировать, используя различные признаки. По принимаемым в расчет факторам – на модели, учитывающие (комплексно или по отдельности) влияние атмосферы, поляризацию, рельеф, растительность и др. По характеру результата – на модели, рассчитывающие полные потери и модели, рассчитывающие дополнительные потери, которые нужно прибавлять к потерям на

распространение в свободном пространстве. Классификационным признаком может служить частота радиосигнала, а также особенности распространения.

Целесообразно классифицировать модели по способам расчета. Исходя из выбранного признака, можно выделить две подгруппы моделей:

1) *Статистические модели.* В основе их лежит обработка эмпирических данных многолетнего мониторинга, составление таблиц, графиков и вывод формул на основе полученных результатов. Предполагается, что в сходных условиях, прохождение радиоволн будет иметь такой же характер. Для других условий (входящих в область применимости данной модели) разрабатываются формулы пересчета. Использование подобных моделей обусловлено тем, что при расчетах трудно, а зачастую невозможно, учесть все возможные факторы, а накопленные в результате эксперимента данные позволяют вывести эмпирические закономерности, согласующиеся с прогнозом.

2) *Имитационные (расчетные) модели.* При расчетах моделируется прохождение радиоволн через среду. Преимущество моделей состоит в том, что расчет можно произвести для любой (в рамках ограничений модели) конфигурации среды и конечных пунктов, что позволяет сделать прогноз для проектируемых систем. Недостатком данного способа является то, что в расчетах присутствует ошибка, возникающая как вследствие несовершенства теории, так и вследствие неполноты исходных данных.

2.1.2.1 Статистические модели

Данные модели широко применяются для расчета зон покрытия сотовой связи в городах. Для нужд авиации подходит модель, описанная в рекомендации МСЭ-Т Р.528-2 [39]. Она опирается на методы модели IF-77 [40], и позволяет рассчитать потери при распространении радиоволн РТС связи и навигации, работающих в диапазоне ОВЧ, УВЧ и СВЧ.

В документе представлены кривые потерь для 5%, 50% и 95% времени. Кривые построены для умеренного континентального климата. В расчетах земля была принята сферической и ровной, фактор эффективного радиуса Земли $k=4/3$

(рефракция в поверхностном слое $N_s=301$), так же применялась компенсация чрезмерного искривления луча на больших высотах, связанная с принятым значением эффективного радиуса. Параметры рельефа, электрические характеристики почвы, профиль атмосферы и характеристики антенны не учитывались.

Кривые потерь рассчитываются для пары антенн, одна из которых может иметь высоту 1.5, 15, 30, 60, 1000, 10000 либо 20000м, вторая – 1000, 10000 либо 20000м. Соответственно, получается три графика. Также, идет разделение по частотам: 125, 300, 1200, 5100, 9400 и 15500 МГц. Пример кривых представлен на рисунке 2.11.

Энергетический запас (превышение мощности передатчика над мощностью потерь) для 95% и 50% времени, рассчитывается по формулам:

$$R(0.95) = R(0.50) + Y_R(0.95) \quad (2.12)$$

$$R(0.50) = P_t + G_t + G_r - L_b(0.50) \quad (2.13)$$

$$Y_R = -\sqrt{[L_b(0.95) - L_b(0.50)]_{Wanted}^2 + [L_b(0.05) - L_b(0.50)]_{Unwanted}^2} \quad (2.14)$$

где P_t – мощность передатчика;

G_b, G_r – КНД передающей и приемной антенны.

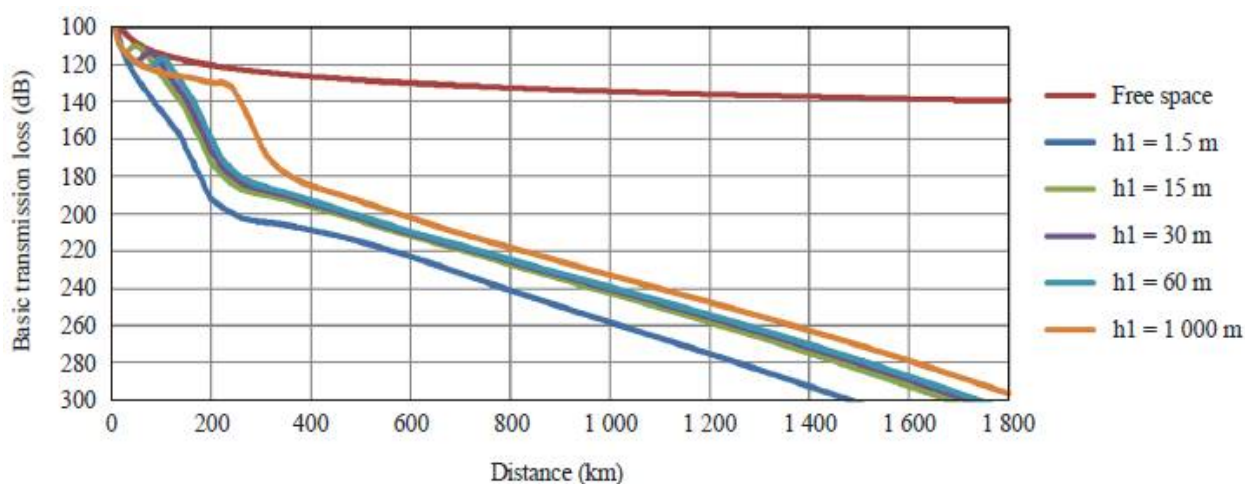


Рисунок 2.11 – Кривые потерь на частоте 125МГц для 95% времени для высоты второй антенны $h_2 = 1000\text{м}$

При создании модели были сделаны некоторые упрощения. С одной стороны, это делает модель более универсальной, с другой – снижает достоверность результатов. В целом, для соответствующей климатической зоны, модель можно использовать для примерной оценки покрытия и для сравнения с результатами расчетов других методов.

2.1.2.2 Имитационные (расчетные) модели

Расчетные модели и алгоритмы расчета представляют собой обширный класс моделей по определению параметров поля. Наиболее общей является рекомендация МСЭ-Т Р.525 [41], где описан расчет ослабления в свободном пространстве. Рекомендация позволяет найти минимальные потери, которые лежат в основе сложных моделей, рассчитывающих либо полные потери на распространение, либо дополнительные потери, которые нужно складывать с потерями на распространение в свободном пространстве.

Рассмотрим общий алгоритм, широко представленный в отечественной и зарубежной литературе [42, 43, 44]. В основе его лежит разбиение пространства на освещенную, теневую и полутеневую области (рисунок 2.12). Напряженность поля в первой области рассчитывается по интерференционным формулам, во второй и третьей – по дифракционным формулам.

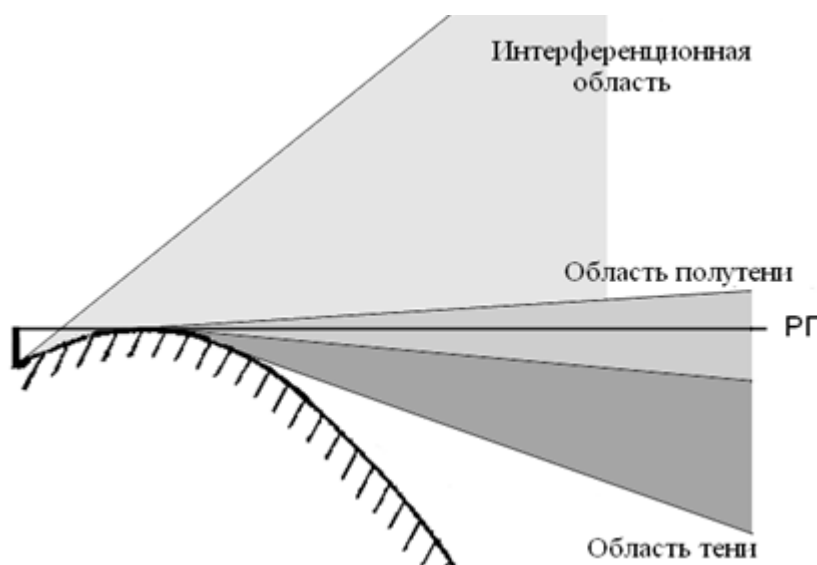


Рисунок 2.12 – Положение освещенной, теневой и полутеневой областей

Принадлежность пространства к той или иной области определяется при анализе просвета трассы. Если он больше эталонного, то напряженность поля рассчитывается по интерференционным формулам, если меньше, то, по дифракционным. Эталонный просвет рассчитывается как:

$$H_0 = \sqrt{\frac{\lambda \cdot r \cdot k \cdot (1 - k)}{3}}, \quad (2.15)$$

где r – расстояние между антеннами;

$$k = r_h/r;$$

r_h – расстояние до препятствия;

λ – длина волны.

Напряженность поля находится с учетом: расстояния между основаниями антенн – r , излучаемой мощности, высот передающей и приемной антенн $h1$ и $h2$, их коэффициентов направленности $D1$ и $D2$, длины волны λ , вида поляризации, диэлектрической проницаемости почвы – ε и ее электрической проводимости – σ .

Напряженности поля в освещенной области находим как:

$$E_D = \frac{173 \sqrt{P1_{[квт]} D1}}{r_{[км]}} \cdot F, \text{ мВ / м}, \quad (2.16)$$

где F – коэффициент ослабления.

Используя интерференционную теорию, находим напряженность в точке приема как результат сложения прямой волны $E1$ и волны, отраженной от земной поверхности $E2$. Действующее значение напряженности определяется формулой:

$$E_D = \frac{173 \sqrt{P1_{[кВт]} D1}}{r_{[км]}} \cdot \sqrt{1 + 2R \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r) + R^2}, \text{ мВ / м} \quad (2.17)$$

Фактически, задача сводится к нахождению множителя ослабления F :

$$F = \sqrt{1 + 2R \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r) + R^2} \quad (2.18)$$

В выражение (2.18) входит три неизвестных величины: модуль коэффициента отражения R , угол потери фазы θ , и разность хода лучей Δr .

Коэффициент отражения R и угол потери фазы θ для вертикально поляризованных волн находится как:

$$R = \frac{\varepsilon' \cdot \cos \gamma - \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \gamma}}{\varepsilon' \cdot \cos \gamma + \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \gamma}}, \quad (2.19)$$

для горизонтально поляризованных волн:

$$R = \frac{\sin \gamma - \sqrt{\varepsilon' - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{\varepsilon' - \cos^2 \gamma}}, \quad (2.20)$$

где γ – угол возвышения;

$\varepsilon' = \varepsilon - j60\lambda\sigma$ – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость поверхности;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость поверхности;

σ – удельная электропроводимость поверхности;

λ – длина волны.

Параметры ε и σ можно видеть в таблице 2.4 [44]. На небольших удалениях землю можно считать плоской, и тогда угол возвышения γ рассчитывается как:

$$\gamma \approx \arctg \frac{h1 + h2}{r} \quad (2.21)$$

Разность хода лучей, определяется по формуле:

$$\Delta r \approx \frac{2 \cdot h1 \cdot h2}{r} \quad (2.22)$$

Если расстояние между антеннами велико, то необходим учет сферичности земли. Для этого заменим высоты антенн $h1$ и $h2$ на приведенные высоты $h'1$ и $h'2$:

$$h'1 = h1_{[м]} - \frac{r_{[км]}^2}{k \cdot 12.74}, \text{ м} \quad (2.23)$$

$$h'^2 = h^2_{[м]} - \frac{r_{2[км]}^2}{k \cdot 12.74}, \text{ м} \quad (2.24)$$

где r_1 и r_2 – расстояния от антенн до точки отражения;

k – коэффициент рефракции.

Таблица 2.4 – Электрические параметры различных видов поверхности

Вид поверхности	Длина волны, м	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	Удельная электропроводимость σ , сим/м
Вода: морская/пресная	>1	75 / 80	$1 \cdot 10^{-6} / 3 \cdot 10^{-2}$
	0.1	70 / 75	$1 \cdot 10^{-6} / 1 \cdot 10^{-2}$
	0.03	65 / 65	$10 \cdot 10^{-20} / 10 \cdot 10^{-20}$
Почва: влажная/сухая	>1	20-30 / 3-6	$2 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-2} / 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3}$
	0.1	20-30 / 3-6	$0.5 \cdot 10^{-2} / 7 \cdot 10^{-2}$
	0.03	10-20 / 3-6	$1 \cdot 10^{-3} / 0.1 \cdot 10^{-2}$
Мерзлая почва	>1	3-6	$10^{-3} \cdot 10^{-2}$
Лед/снег ($t = -10^\circ$)	>1	4-5 / 1.2	$0.01 \cdot 10^{-6} / 10^{-6}$
	0.1	3-5 / 1.2	$10^{-4} \cdot 10^{-3} / 10^{-5}$
	0.03	2-3 / 1.2	$10^{-4} \cdot 10^{-3} / 10^{-5}$
Лес	>1	1.004	$10^{-6} \cdot 10^{-5}$
	0.1	1.04-1.4	$10^{-5} \cdot 10^{-3}$

Расстояния до точки отражения r_1 и r_2 находятся как длины дуг, с центральными углами α и β , а угол возвышения γ находится следующим образом:

$$\gamma = \arctg \left(\frac{\cos \alpha - \frac{k \cdot a}{k \cdot a + h_1}}{\sin \alpha} \right) = \arctg \left(\frac{\cos \beta - \frac{k \cdot a}{k \cdot a + h_2}}{\sin \beta} \right). \quad (2.25)$$

Место точки отражения аналитически определить невозможно, поэтому углы α и β рассчитываются методом последовательного перебора вариантов.

Полученные из формул (2.23) и (2.24) значения приведенных высот, необходимо подставить в выражение (2.22), которое теперь будет иметь вид:

$$\Delta r \approx \frac{2 \cdot h_1' \cdot h_2'}{r} \quad (2.26)$$

В том случае, если просвет трассы меньше эталонного, либо удаление до точки превышает 0.7–0.8 от дальности радиовидимости r_0 , необходимо пользоваться дифракционными формулами.

Дифракционное распространение радиоволн описывается формулой (рядом) Фока [42]. Прямой расчет представляет собой достаточно сложную задачу, потому в дифракционной области обычно пользуются более простой формулой, разработанной Введенским:

$$E_D = \frac{2,18 \sqrt{P1_{[кВт]} \cdot D1 \cdot h1_{[м]} \cdot h2_{[м]}}}{r_{[км]}^2 \cdot \lambda_{[м]}} \quad (2.27)$$

Таким образом, расчет напряженности поля выполняется по следующей схеме:

- 1) На основе данных о высоте рельефа вокруг антенны, определяется величина просвета трассы;
- 2) Сравнивая полученный просвет с эталонным просветом, выбирается метод расчета: интерференционный или дифракционный.

Рассмотренный алгоритм является базовым методом определения напряженности поля в точке приема. Рассмотрим дополнительные условия, позволяющие учесть различные факторы распространения радиоволн, и, таким образом, увеличивающие точность расчета.

В освещенной области на модуль коэффициента отражения влияет не только угол возвышения γ и электрические параметры почвы, но и неровности рельефа на участке, существенном для отражения. Размеры отражательной площадки, имеющей форму эллипса, находим как:

$$a_n = \frac{1}{\sin \gamma} \sqrt{\frac{\lambda \cdot h l}{\sin \gamma} \cdot \left(1 + \frac{\lambda}{4 \cdot h l \cdot \sin \gamma}\right)},$$

$$b_n = a_n \cdot \sin \gamma,$$
(2.28)

где a_n и b_n – большая и малая полуоси эллипса отражающей площадки.

Для оценки шероховатости используют критерий Рэлея. В пределах области, ограниченной эллипсом, найденным по формуле (2.28), необходимо определить среднюю высоту рельефа Δh .

При отражении от неровной поверхности, лучи отражаются от участков разной высоты, и в среднем получают сдвиг по фазе:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi \cdot \Delta h}{\lambda}$$
(2.29)

Если сдвиг превышает $\pi/2$, то отражения носят диффузный характер, и поверхность можно считать шероховатой. В этом случае коэффициент отражения R , входящий в формулу (2.18) должен быть уменьшен. Аналитического выражения для расчета коэффициента отражения в случае шероховатой поверхности не существует, поэтому нужно использовать данные экспериментов, проведенных в соответствующих условиях.

В отчете [45] описан модифицированный способ определения коэффициента отражения R , позволяющий учесть сферичность земли.

Передача энергии отраженной волны в точку приема происходит двояко. С одной стороны, есть зеркальное отражение, при с другой – происходит диффузное отражение, т.е. рассеяние энергии от освещенной площадки во все стороны. Первый вид отражения учитывается с помощью критерия Рэлея:

$$g = 4\pi \cdot \frac{\Delta h}{\lambda} \cdot \sin \varphi$$
(2.30)

Для среднепересеченной местности со случайным расположением препятствий подходит выражение:

$$\rho_s = \exp(-1/2 \cdot g^2)$$
(2.31)

Для сильнопересеченной местности необходимо ввести в формулу функцию Бесселя, либо использовать упрощенное выражение:

$$\rho_S = \frac{1}{\sqrt{3.2x - 2 + \sqrt{(3.2x)^2 - 7x + 9}}}, \quad (2.32)$$

где $x = 0.5g^2$.

Коэффициент отражения находится как:

$$R_S = \rho_S \cdot R \quad (2.33)$$

Диффузное отражение изучено не достаточно хорошо, чтобы можно было разработать аналитическое выражение для его учета. В [45] отмечено, что коэффициент ρ_d для ровной поверхности, а также спокойного моря коэффициент равен 0.4, а для сильнопересеченной местности 0.2.

Коэффициент диффузного отражения находится как:

$$R_S = \rho_S \cdot R \quad (2.34)$$

Результирующее поле в точке приема есть сумма энергий прямого и зеркально отраженного луча, а также энергии диффузного рассеяния.

$$E_{\Sigma} = E_{\text{пр}} + E_{\text{зрк}} + E_{\text{диф}} \quad (2.35)$$

В формуле множителя ослабления для диффузной энергии следует исключить потери фазы θ , так как пришедшие волны имеют случайную фазу, и данный вид потерь включен в величину модуля коэффициента отражения.

Вопросы рефракции хорошо освещены для наземных трасс, а также случая связи с космическими спутниками [46, 47]. Учет рефракции реальной атмосферы для высокоподнятой антенны в формулах расчета напряженности поля требует дополнительных исследований. МСЭ-Т рекомендует использовать эквивалентный радиус с поправкой на больших высотах [39].

Дифракционное распространение радиоволн рассмотрено в рекомендации [48], где представлены формулы расчета дифракции над гладкой поверхностью Земли и при наличии ярко выраженных препятствий.

При расчете поля прямой и отраженной волны, необходимо учитывать и направленные свойства антенн, для чего нужно иметь нормированные

диаграммы направленности. Указываемый в документации коэффициент усиления относится к направлению максимального излучения, поэтому наличие диаграмм направленности является гарантией получения результатов высокой точности. Получить информацию о диаграмме направленности антенны можно расчетным способом, с помощью программы MMANAGAL [49]. Пример ДНА представлен на рисунке 2.13.

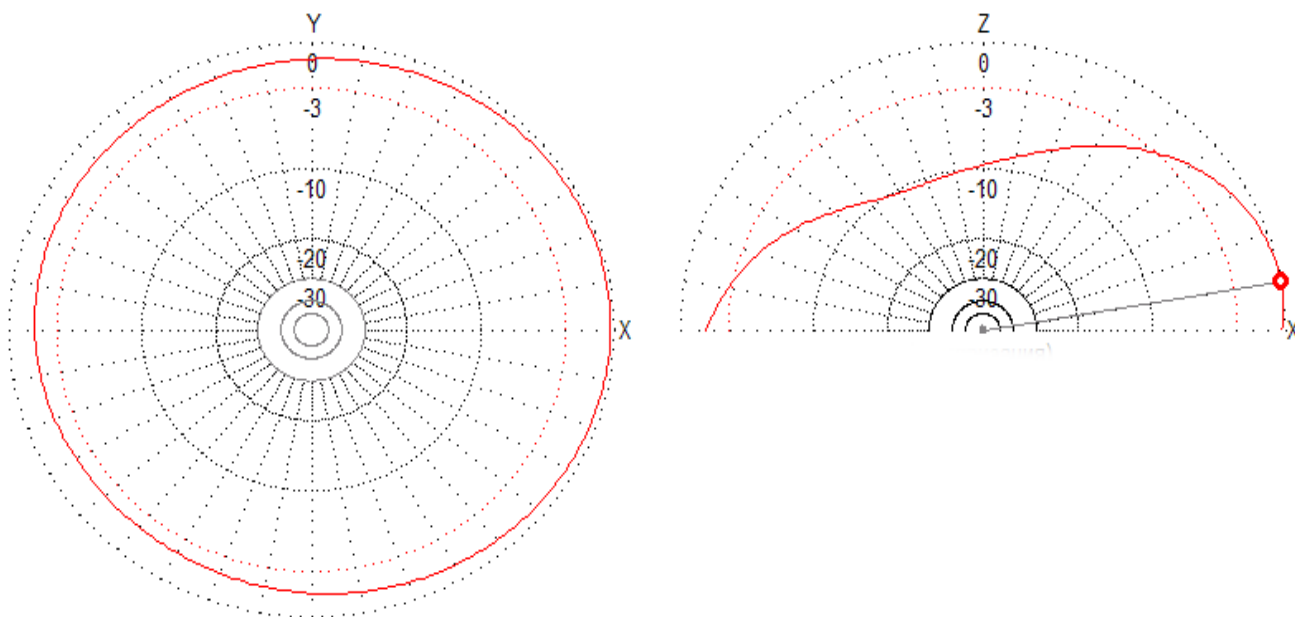


Рисунок 2.13 – Диаграмма направленности дискокonusной антенны, рассчитанная с помощью программы MMANA-GAL

Перечисленные факторы являются основными, определяющими дальность действия РТС. Для повышения точности расчетов, необходимо учитывать особенности исследуемых РТС. Для этого рассмотрим каждый вид применяемых средств и внесем в расчетную часть необходимые дополнения.

2.1.3 Особенности определения размеров 3Д средств радиотехнического обеспечения полетов

Применяемые в гражданской авиации РТС можно разделить на средства связи, навигации и наблюдения. Посмотрим, как определяется зона покрытия для средств каждого из перечисленных видов РТС.

2.1.3.1 РТС связи

Основным средством взаимодействия диспетчеров и экипажей остаются радиостанции ОВЧ диапазона. К ним относятся изделия серии: *Полет* производства ЗАО «Электросигнал» (передатчики Полет-1АМ1 и приемники Полет-М1, радиостанции Полет-2 и Полет-2М), *Фазан* разработанные в ОАО «Владимирское КБ радиосвязи» (Фазан-Р2, Фазан-Р5, Фазан-Р8, Фазан-19), *Орлан* производства конструкторского бюро «Сигнал» (Орлан-85СТ).

Современные радиостанции (Полет-2М, Фазан-Р5, Фазан-19) работают в диапазоне 100-149,975МГц (класс излучения А3), имеют мощность до 50Вт и чувствительность приемника 1–1.5мкВ. Более старые модели (Полет-2, Орлан-85СТ) имеют мощность 7-25Вт и чувствительность приемника 1.5–2мкВ [50].

Наиболее используемыми являются дискоконусные и штыревые антенны, а также ФАР, построенные на полуволновых и четверть волновых вибраторах (например, «Чинара»). Диаграмму направленности антенн можно найти в описании изделия, либо рассчитать с помощью программы MMANA-GAL.

Расчет зоны действия для радиосредств ОВЧ диапазона не требует внесения каких-либо изменений в рассмотренный выше алгоритм расчета. Границы 3Д средств связи определяются минимальной напряженностью поля в точке приема. В [51] указано, что для аналоговой связи напряженность поля вблизи бортовой антенны должна быть не менее 75 мкВ/м, а для цифровой (VDL) – 150 мкВ/м. Напряженность поля у наземных антенн должна быть не менее 25 и 50 мкВ/м соответственно.

В качестве резервной связи экипажи используют ДКМВ радиосвязь. Расчет напряженности поля декаметровой радиосвязи является сложной инженерной задачей [8, 52, 53]. ДКМВ радиосвязь используется в тех областях, где не обеспечивается перекрытие зон действия средств ОВЧ радиосвязи (удаленные районы или полеты на малых высотах). Нас будут интересовать возможность ведения переговоров между диспетчером и экипажем ВС на дальностях больше 300км. Для простейшего определения зоны действия радиостанции, необходимо знать: угол места максимального излучения в

вертикальной плоскости, ширину диаграммы направленности в вертикальной плоскости, а также высоту отражающего слоя ионосферы.

Из этих величин труднее всего определить высоту отражающего слоя. Для простоты расчета можно воспользоваться усредненными данными для различных сезонов и времен суток [54], как это видно из рисунка 2.14.



Рисунок 2.14 – Высоты слоев ионосферы

Самым ионизированным слоем считается слой F_2 . При низких частотах и пологом входе в атмосферу отражение может идти также от слоя E . В [54] приводится таблица дистанции скачка волны при отражении от слоев E и F_2 , принимая, что высота слоя E – 105км, F_2 – 320км (см. таблице 2.5).

Описанный способ является простейшим и наименее точным. Более сложные и точные методики рассмотрены в [55–58]. Однако в авиационных предприятиях чаще пользуются приближенными методиками. При использовании ДКМВ радиосвязи на небольшом удалении от радиоцентра (при отказе наземного или бортового оборудования ОВЧ радиосвязи), прохождение радиоволн определяют по кривым, представленным в [59]. В эксплуатации находятся следующие бортовые и наземные ДКМВ радиостанции: Микрон, Ядро-1, Ядро-2, Пирс – характеристики которых можно увидеть в таблице 2.6.

Таблица 2.5

Угол излучения, град	Длина скачка, слой E, км	Длина скачка, слой F ₂ , км
0	2250	4025
5	1400	3010
10	980	2315
15	700	1800
20	540	1475
25	430	1205
30	350	1000
35	280	835
40	240	700
50	170	500
60	120	345

Таблица 2.6 – Характеристики радиостанций ДКМВ диапазона

Изделие	Диапазон частот, МГц	Класс излучения	Мощность передатчика, Вт	Чувствительность приемника, мкВ
Микрон	2-28	A1A, J3E, A3E, R3E	400	3
Ядро-1	2-18	J3E, A3E	100	5 (A3E), 3 (J3E)
Ядро-2	2-30	A1A, J3E, A3E	400	5 (A3E), 3 (J3E)
ПРД Пирс	1,5-30	A1A, F1B, G1B, J3E, H3E, R3E, J7B	500, 1000, 5000	-
ПРМ Пирс	1.5-30	J3E, J7B, F1B, J2DE, J2DBF, H3E, R3E	-	0.6 (J3E, J7B, J2DE), 0.3 (J2B)

Радиостанции Кристалл и Микрон используются на вертолетах и самолетах местных воздушных линий. Аппаратура семейства Пирс – является наземной. Для работы на данных частотах используют вертикальные штыревые антенны, антенны типа ВГД и ВГДШ [52].

2.1.3.2 РТС навигации

К основным средствам навигации относят: азимутальные маяки (VOR, DVOR) и дальномерные маяки (DME). Дополнительным средством навигации являются приводные радиостанции (ПРС). В качестве навигационного средства можно также рассматривать аппаратуру передачи дифференциальных поправок для спутниковых систем навигации.

Азимутальные навигационные маяки работают в диапазоне 108-112 МГц, маяки-дальномеры - 962-1213 МГц. Таким образом, основные средства навигации работают в диапазонах ОВЧ и УВЧ, поэтому для расчета ЗД применимы рассматриваемые выше методы без каких-либо модификаций, так как длина волны и тип применяемых антенн заложены в формулы.

Дальномерный маяк имеет особенности, связанные со способом определения дальности до ВС. При большой плотности воздушных судов, начинает действовать механизм селекции: информацию получают суда, находящиеся близко к маяку. Это эквивалентно уменьшению зоны покрытия средства. Согласно [60], маяк может обслуживать одновременно до 100 самолетов. Таким образом, чтобы оценить фактическую дальность действия, нужно будет пропорционально уменьшать зону покрытия до тех пор, пока в ней не окажется 100 воздушных судов. Для средней оценки, необходимо иметь данные о средней плотности потоков на единицу площади. Эта проблема актуальна для регионов с большой интенсивностью движения.

Второй особенностью маяков DME является то, что маяки могут работать как в составе комплекса VOR/DME, так и парами – DME/DME. Последний вариант применяется для высокоточной навигации в районе аэродрома. В этом

случае, маяки располагаются на удалениях порядка 100–150 км друг от друга, зона действия комплекса имеет сложную форму.

Мощность передатчика азимутального маяка составляет от 20 до 100 Вт, мощность передатчика маяка-дальномера – не менее 500 Вт. Для излучения радиосигналов в маяках дальномерах используются вертикальные вибраторы, либо система щелевых вибраторов, что позволяет прижать главный лепесток к земле. Антенная система DVOR состоит из одного центрального вибратора и ряда периферийных, расположенных по окружности. В качестве антенн обычно используют кольцевые вибраторы. Диаграмма направленности всенаправленная в азимутальной плоскости. В вертикальной плоскости она имеет сектор излучения не превышающий 40° . Напряженность поля или плотность мощности сигналов VOR, требуемые для обеспечения удовлетворительной работы типовой бортовой установки на максимальном радиусе обслуживания, составляет 90 мкВ/м или -107 дБВт/м² [60].

Приводные радиостанции являются вспомогательным навигационным средством, в настоящее время их заменяют на системы VOR/DME.

ПРС работают в диапазоне 190-1750 кГц. В качестве опорной информации о дальности действия станции можно использовать нормативные минимумы (150 км), а также данные облетов. Расчет напряженности поля для ПРС производят в соответствии с рекомендацией [59]. Минимальная величина напряженности поля в номинальной зоне действия ОПРС должна составлять 70 мкВ/м [60].

Расчет ЗД средств передачи дифференциальной информации аналогичен расчету связных радиостанций ОВЧ-диапазона.

2.1.3.3 РТС наблюдения

Средства наблюдения включают первичные и вторичные радиолокаторы (ПРЛ и ВРЛ), автоматические радиопеленгаторы (АРП), а также наземную аппаратуру АЗН.

АРП являются вспомогательным оборудованием, позволяющим определить пеленг, а в случае использования двух и более средств, и координаты воздушного судна. АРП работает в диапазоне ОВЧ радиостанций, поэтому прохождение рассчитывается приведенному ранее методу без внесения в него дополнений. Чувствительность, на примере DF-2000, составляет 3 мкВ [61]. Антенна представляет собой систему вертикальных вибраторов, с всенаправленной диаграммой в азимутальной плоскости, и ограниченной угол в 60° в угломестной. Более точное представление о направленных свойствах антенны АРП, можно получить с помощью программы MMANAGAL.

Перспективным средством наблюдения является АЗН – технология, предполагающая определение местоположения воздушного судна с помощью спутниковой навигации, с последующей передачей информации о местоположении и некоторой дополнительной информации конкретным абонентам (адресная АЗН) либо передачу информации в режиме вещания (вещательная АЗН).

Для приема данных с борта ВС, создается сеть наземных приемных пунктов. В нашей стране и за рубежом, широко обсуждаются преимущества подобной системы [62–64], однако недостаточно внимания уделяется анализу и планированию. Так, упомянутый ранее рисунок 2.1 наглядно показывает, приблизительность оценок покрытия.

Западные компании применяют современные программы определения покрытия РТС (например, пакет WRAP Civil Aviation). В качестве примера можно привести анализ зон действия наземных станций АЗН, выполненный в США и Австралии [65, 66]. Зоны действия представлены на рисунке 2.15.

Для передачи данных с борта на Землю планируется применять средства цифровой радиосвязи VDL Mode 4, а также сигнал расширенного сквиттера вторичного радиолокатора (частота 1090 МГц).

Размеры покрытия могут быть рассчитаны с высокой степенью достоверности, при использовании общих формул распространения радиоволн ОВЧ диапазона. Можно предположить, что мощность передатчика и

чувствительность приемника будет не хуже, чем у связных радиостанций, а также то, что применяться будут аналогичные связные антенны. Характеристики второго канала связи – сигналов вторичного радиолокатора – известны и могут применяться в расчетах.

На размер зоны действия наземной станции АЗН влияет также количество воздушных судов. При увеличении количества передач, слотов в суперфрейме не хватает на всех и транспондер начинает захватывать слоты принадлежащие наиболее удаленным ВС [62]. Этот процесс можно сравнить с ограничением зоны покрытия маяка дальномера.

Для линии передачи VDL Mode 4 и использовании двух каналов, получаем 75 слотов в секунду на канал, и в общем 150 слотов. Максимальное количество ВС, определяется по формуле:

$$N_{\max} = ST, \quad (2.36)$$

где S – количество слотов;

T – период обновления информации.

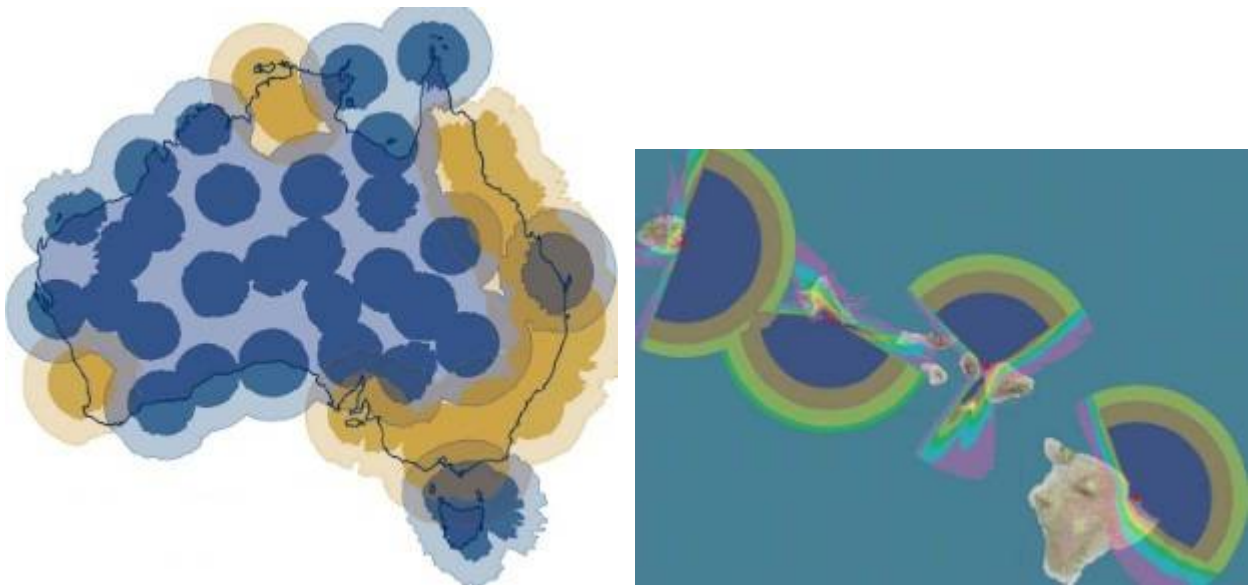


Рисунок 2.15 – Зона покрытия сети станций АЗН и радиолокаторов (Австралия), и аэродромных радиолокаторов (о-ва Гавайи)

При $T=10\text{с}$ (что эквивалентно радиолокационному обзору при частоте вращения кабины 6 об/мин), максимальное количество обслуживаемых ВС:

$$N_{\max} = 150 \cdot 10 = 1500 \quad (2.37)$$

При уменьшении периода обновления информации до 1с, максимальное количество одновременно обслуживаемых ВС сократится до 150. После расчета зоны действия, необходимо проанализировать плотность потоков и определить, сколько ВС находится в пределах зоны. Если их число превышает максимальное количество одновременно обслуживаемых ВС, необходимо уменьшать размеры зоны до тех пор, пока не будет выполняться условие загруженности транспондера.

2.1.4 Разработка комплекса программ расчета зон действия РТС навигации, связи и наблюдения

Рассмотренные выше методы (разработанные, а также рекомендованные МСЭ-Т) легли в основу комплекса компьютерных программ расчета зон действия РТС (коды программ представлены в Приложении А). Программы написаны на языке высокого уровня Visual Basic 6 и Python 3.2, и позволяют:

1) Рассчитывать графики углов закрытия для существующих антенн РТС связи ОВЧ диапазона, а также для определения оптимальной позиции планируемых к внедрению РТС. Пример графика приведен на рисунке 2.8.

2) Рассчитывать профили местности вокруг анализируемой антенны для каждого угла азимута.

3) Рассчитывать зоны действия РТС. Графики рассчитанных зон приведены на рисунках 2.16 и 2.17 (сравнение расчетных ЗД с данными облетов представлены в Приложении В).

На рисунках синим цветом выделена ЗД, рассчитанная с помощью разработанных компьютерных программ, красным – рассчитанная с помощью аналогов (либо полученная в результате облетов). Оценка точности расчета ЗД приведена в таблице 2.7.

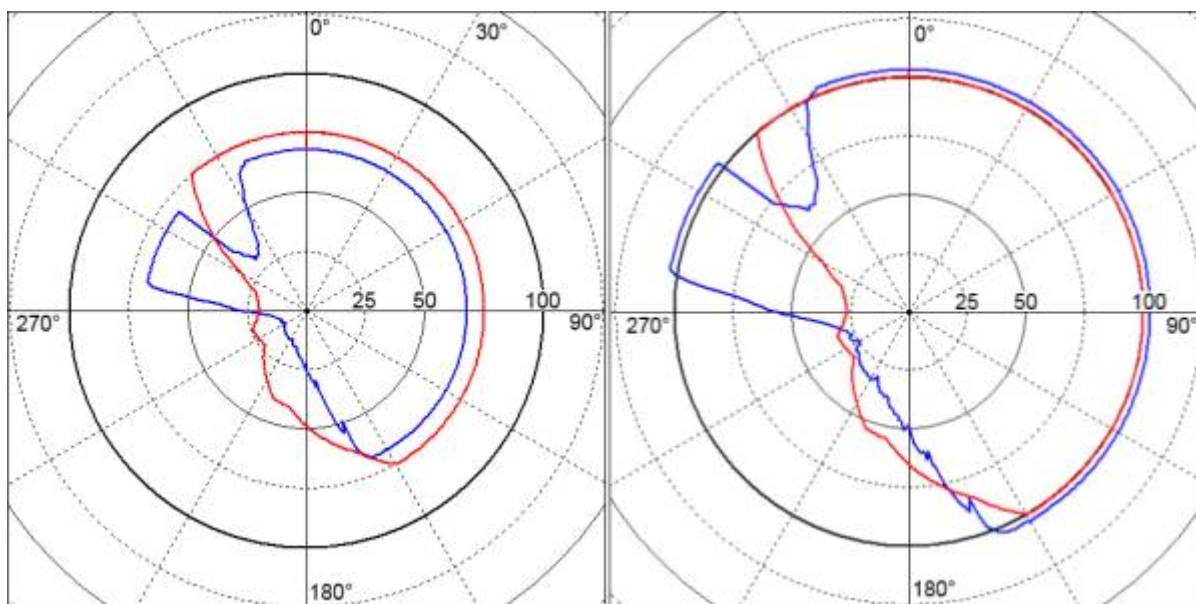


Рисунок 2.16 – Сравнение расчетных зон действия радиолокатора, расположенного на о. Гавайи для высоты цели 600м и 1500м

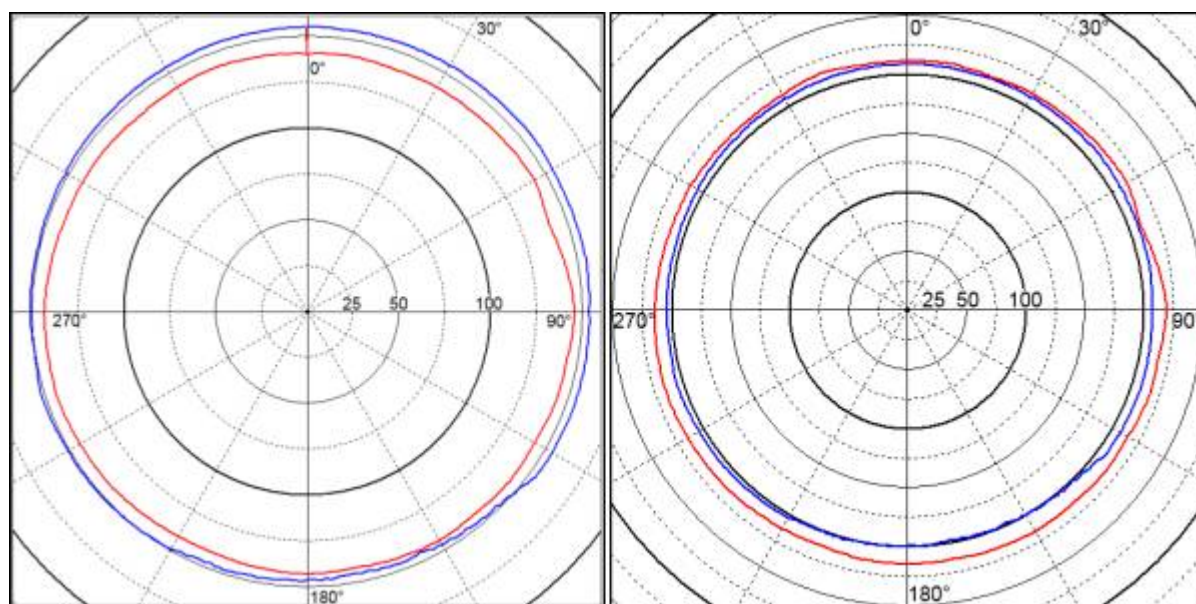


Рисунок 2.17 – Сравнение расчетных зон действия станции АЗН, расположенной на аэродроме Nullabor (Австралия), для высоты цели 1500м и 3000м

Особую важность представляет расчет ЗД для РТС связи ОВЧ диапазона, так как для них не снимаются углы закрытия, а облеты проходят при вводе в эксплуатацию и по минимальной программе. В авиапредприятиях зоны действия РТС связи рассматривают как имеющие вид окружности (см. рисунок 2.18). Учет окружающего антенну рельефа позволяет скорректировать форму ЗД. Сравнение зон покрытия АРТР в Санкт-Петербургском центре ОВД показано на

рисунке 2.19 (ЗД, рассчитанные в службе ЭРТОС выделены желтым цветом, рассчитанные с помощью разработанных методик – сиреневым).

Таблица 2.7 – Оценка точности расчета ЗД

РТС	Среднее отклонение ΔX , км	СКП, км	Доверит. интервал, для $P=0.95$, км	Медиана, км
Радиолокатор, $h_{\text{цели}} = 600\text{м}$	14.3	11.3	10.3–12.4	7.3
Радиолокатор, $h_{\text{цели}} = 1500\text{м}$	12.5	18	16–20	3
Станция АЗН, $h_{\text{ВС}} = 1500\text{м}$	9.4	3.5	3.4–3.7	9.9
Станция АЗН, $h_{\text{ВС}} = 3000\text{м}$	8.8	4.2	4–4.7	8.4

Заметим, что рассматриваемые антенны расположены на равнинных участках, и учет рельефа приводит к некоторому уменьшению дальности действия и незначительной деформации ЗД, вызванной холмами. Если антенна расположена на пересеченной местности, то провалы в ЗД становятся значительными, и неучтенные препятствия могут привести к потере связи. Так, из рисунка 2.19 видно, что перебои в связи могут происходить при полете между АРТР в Киришах и Боровичах.

2.1.5. Выводы по методикам расчета ЗД

Модели расчета ЗД можно разделить на две группы. Методы первой группы определяют дальность радиовидимости, обладают средней точностью, легко поддаются автоматизации и требуют небольшого количества входных данных. Методы второй группы позволяют определить напряженность поля в точке приема. Они обладают высокой точностью, учитывают различные эффекты распространения радиоволн (характер подстилающей, интерференцию,

дифракцию, ДНА), однако требуют большого количества входных данных и сложны в использовании. Для нахождения зоны покрытия необходимо произвести моделирование распространения радиоволн, т.е. определить напряженность поля. Задавая минимально допустимые значения напряженности (содержащиеся в нормативных документах), определяют дальность действия РТС.

В практической работе целесообразно использовать методы как первой, так и второй группы. Основная причина этого – недостаток данных или невозможность их получения. Поэтому, для обеспечения гибкости, алгоритм анализа эксплуатационных характеристик РТОП должен включать как методы расчета дальности радиовидимости, так и методы определения напряженности поля.

Определение формы и размеров зон действия РТС связи имеет большое значение, в особенности, когда полет происходит на небольшой высоте, что характерно для малой авиации и в аэродромной зоне. Воздушное судно (как и диспетчер) может терять информацию от РТС, либо получать ее в плохом качестве, что, несомненно, отразится на точности самолетовождения и увеличит нагрузку на диспетчера и экипаж.

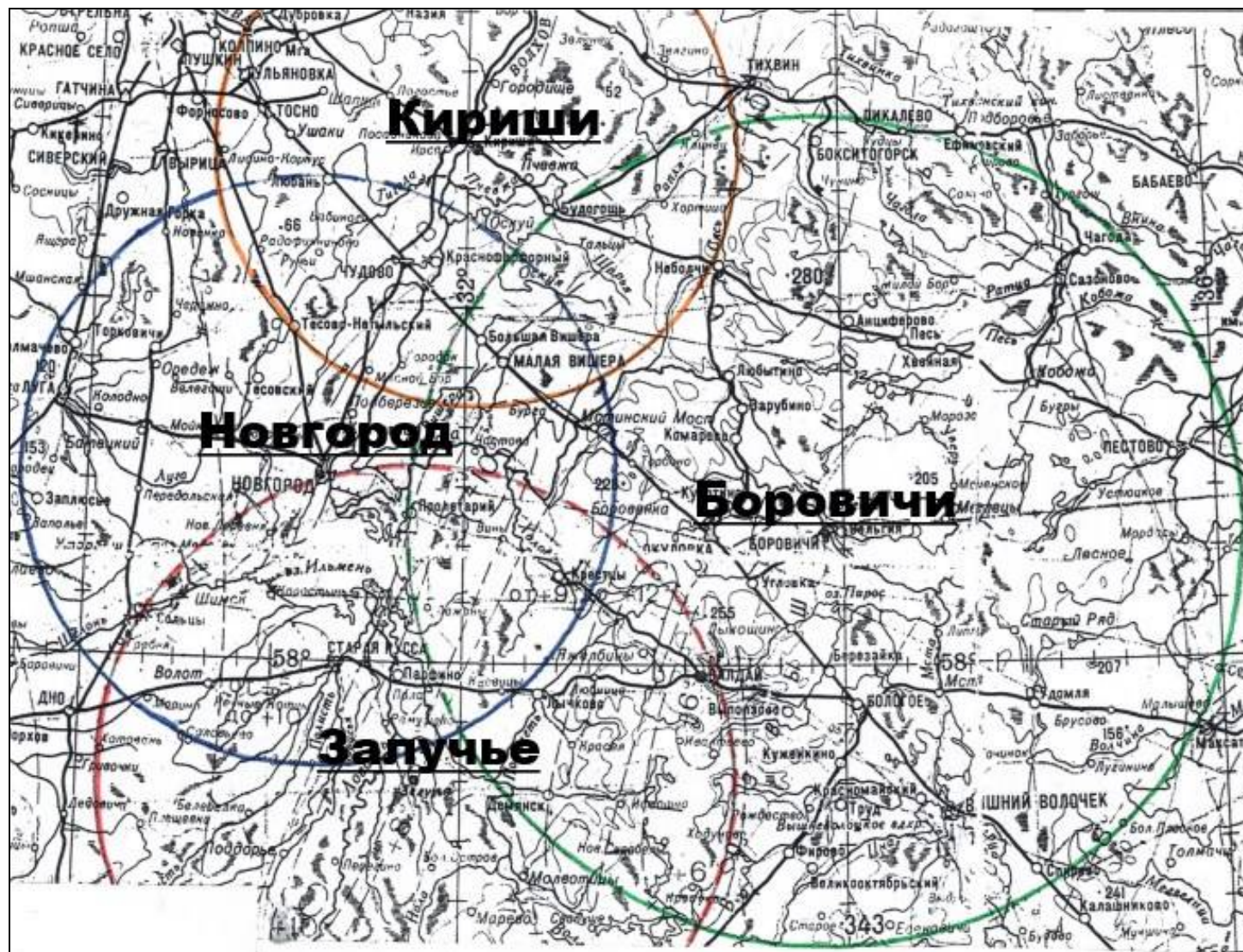


Рисунок 2.18 – Зоны действия АРТР Боровичи, Кириши, Новгород и Залучье для высоты полета 200м, рассчитанные в службе ЭРТОС Пулково



Рисунок 2.19 – Зоны действия АРТР Боровичи, Кириши, Новгород и Залучье для высоты полета 200м, рассчитанные с учетом углов закрытия

2.2 Рабочая область

Рабочей областью РТС называют объем пространства, в пределах которого данная радиотехническая система обеспечивает требуемые точность и безопасность полетов [21].

В общем случае, расчет рабочей области сводится к выбору критерия α , характеризующего качество информации РТС. Также вводится предельно допустимое значение критерия $\alpha_{\text{доп}}$, при котором обеспечивается безопасность полетов. Текущее значение критерия зависит от удаления самолета от РТС, а также от эксплуатационно-технических характеристик самого РТС. Тогда, рабочей областью будет объем пространства, в пределах которого текущее значение критерия не превосходит предельно допустимое (см. рисунок 2.20).

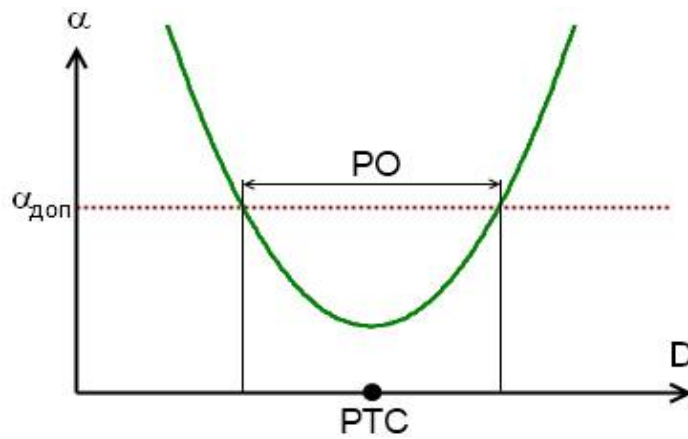


Рисунок 2.20 – К определению рабочей области

В качестве критерия для систем навигации и наблюдения используют погрешность определения координат ВС. Для систем цифровой радиосвязи критерием служит количество ошибок, для аналоговой – разборчивость речи.

В настоящее время рабочие области рассчитываются только для дальномерных маяков (DME/DME), по упрощенной методике, опубликованной в документах ИКАО [4].

Для средств навигации, связи и наблюдения рассмотрим, как определяется текущее значение критерия качества информации и его предельно допустимое значение. На основе полученных данных сформулируем методику расчета размеров PO .

2.2.1 Расчет рабочей области РТС навигации

Текущие точность и безопасность полетов, обеспечиваемые той или иной радиотехнической системой навигации, можно характеризовать средней квадратической погрешностью отклонения σ измеренных координат от точки маршрута (оси трассы), и вероятностью $P(b)$ нахождения летательного аппарата в пределах заданного интервала b (ширины трассы, коридора, эшелона и т.п.) [21, 22]. Расстояние от точки расположения РТС до воздушного судна, при котором текущие средняя квадратическая погрешность и вероятность нахождения летательного аппарата в пределах интервала равны допустимым, является радиусом рабочей области.

Размеры рабочей области зависят от эксплуатационных характеристик РТС и требований к точности и безопасности полетов. РО не может выходить за пределы зоны действия.

В настоящее время существует две концепции выполнения полетов: традиционная (концепция оборудованных трасс) и концепция зональной навигации. Методика расчета РО для этих концепций несколько отличается.

2.2.1.1 Метод расчета РО при выполнении полета по концепции оборудованных трасс

Концепция оборудованных трасс предполагает, что полет проходит от одной радионавигационной точки (РНТ) к другой. Воздушное судно может лететь только «на маяк» или «от маяка», поэтому определяющей является погрешность в поперечном направлении, называемая также линейным боковым отклонением (ЛБУ).

В [22] указывается, что, в соответствии с существующими нормативными документами $P(b)=0.95$, следовательно, для нормально распределенной погрешности:

$$\sigma_{\text{доп}} = b/1,98 \approx b/2 \quad (2.38)$$

Таким образом, для трассы шириной 10км, $\sigma_{\text{доп}} \approx 2.5$ км.

Выполнение указанных требований зависит от степени оснащённости ВС и трасс радиотехническим оборудованием и от его возможностей. Точность контроля пути зависит от величины СКП, от дальности до точки размещения оборудования и других факторов.

Требования к навигационным системам определяются из требований к точности самолетовождения. Общая погрешность самолетовождения состоит из[21]:

- погрешности задания траектории;
- погрешности навигационных измерений;
- инструментальной погрешности вычислений (обработки навигационной информации);

- погрешности отображения информации;
- погрешности пилотирования.

В документах ИКАО [4] общая погрешность обозначается как суммарная погрешность системы (TSE), состоящая из погрешностей определения траектории (PDE), техники пилотирования (FTE) и погрешности навигационной системы (NSE). Их влияние на точность навигации показано на рисунке 2.21.

Величина погрешностей характеризуется средней квадратической погрешностью ЛБУ ВС, при этом общая погрешность самолетовождения определяется как [21]:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{z\ tr}^2 + \sigma_{z\ нс}^2 + \sigma_{z\ инстр}^2 + \sigma_{z\ отобр}^2 + \sigma_{z\ пил}^2}, \quad (2.39)$$

где $\sigma_{z\ tr}$, $\sigma_{z\ нс}$, $\sigma_{z\ инстр}$, $\sigma_{z\ отобр}$, $\sigma_{z\ пил}$ - средние квадратические значения погрешности задания траектории, погрешности навигационных систем, инструментальной погрешности вычислений, погрешности отображения информации и погрешности пилотирования.



Рисунок 2.21 – Погрешности боковой навигации

Если приравнять текущую СКП ЛБУ к максимально допустимой – $\sigma_{z\ доп}$, то тогда требуемая точность навигационной системы будет равна:

$$\sigma_{z\ нстреб} = \sqrt{\sigma_{z\ доп}^2 - (\sigma_{z\ tr}^2 + \sigma_{z\ инстр}^2 + \sigma_{z\ отобр}^2 + \sigma_{z\ пил}^2)}. \quad (2.40)$$

В (2.40) $\sigma_{znc \text{ треб}}$ – максимально допустимая СКП ЛБУ исследуемой навигационной системы. Современные бортовые системы позволяют свести к минимуму погрешности задания и отображения траектории, а также погрешности вычислений. Учитывать эти погрешности следует, если полет выполняют устаревшие ВС.

Таким образом, основными составляющими в суммарной погрешности самолетовождения являются погрешности навигационных систем и погрешности пилотирования. Тогда, требования к точности навигационного оборудования определяются значениями требуемых навигационных характеристик и достижимой точностью самолетовождения [21].

$$\sigma_{Z_нс_треб} = \sqrt{\sigma_{Z_доп}^2 - \sigma_{Z_пил}^2} \quad (2.41)$$

Погрешности пилотирования приведены в таблице 2.8 [21, 67].

Таблица 2.8 – Погрешности пилотирования

Этап полета	Режим пилотирования					
	Ручной		Директорный		Автоматический	
	км	м.м	Км	м.м	Км	м.м
Океаническое ВП	3,7	2,0	0,93	0,5	0,463	0,25
Маршрут	1,85	1,0	0,93	0,5	0,463	0,25
Узловой район	1,85	1,0	0,93	0,5	0,463	0,25
Заход на посадку	0,93	0,5	0,463	0,25	0,231	0,125

Рассчитанная таким образом предельно допустимая погрешность является порогом, превышая который, самолет выходит за пределы рабочей области. Определение текущего значения СКП ЛБУ при использовании различных средств навигации подробно описано в [22]. Там же приведены рабочие формулы, положенные в основу пакета прикладных программ «Альфа-7».

Методика расчета радиуса РО при выполнении полета по концепции оборудованных трасс заключается в последовательном расчете текущего

значения СКП ЛБУ на различных удалениях от места установки оборудования. Дальность, на которой текущее значение СКП ЛБУ будет равно предельно допустимому значению – есть граница РО. Таким образом, зная характеристики трассы, по которой производится полёт (ширина, место установки и тип радиотехнических средств), а также состав и точностные характеристики бортового навигационного оборудования, можно определить возможность выполнения полёта по маршруту с выдерживанием заданных норм эшелонирования, а, следовательно, и обеспечения требуемого уровня безопасности полётов.

2.2.1.2 Метод расчета РО при выполнении полета по концепции зональной навигации

Согласно концепции зональной навигации полет выполняется по любой желаемой траектории в пределах зоны действия опорных станций навигационных средств [4]. При этом можно выбрать наиболее удобный (с точки зрения безопасности и экономии топлива) маршрут.

Как и в традиционной концепции, критерием точности выступает СКП измерения координат ВС с той разницей, что ошибки измерения имеют двумерное распределение. В качестве интервала выступает круговая область, в пределах которой ВС должно находиться 95% полетного времени.

В ИКАО разработана система требуемых навигационных характеристик – показателей точности самолетовождения, которые должны обеспечиваться всеми воздушными судами в пределах определенной области воздушного пространства. Выделяют несколько типов воздушных пространств: RNP1, RNP4, RNP12.6 и RNP20, а также промежуточные RNAV5 и RNAV10 (показано в таблице 2.9).

Типы RNP для полетов по маршруту определены в виде значения требуемой точности. В качестве показателя точности навигации в Руководстве ИКАО выбрана круговая погрешность заданного радиуса, под которой

понимается величина отклонения фактической координаты от истинного значения, вероятность не превышения которой составляет 0.95.

Таблица 2.9 – Величина круговой области для различных типов RNP

Тип RNP	Радиус круговой области R, м. м.	Радиус круговой области R, км
RNP1	1	1.85
RNP4	4	7.4
RNP12.6	12.6	23.31
RNP20	20	37
RNAV5	5	9.25
RNAV10	10	18.5

Так как в качестве показателя точности используется величина круговой погрешности, то это означает, что в пределах указанных величин должны находиться погрешности навигации, как в боковом, так и в продольном направлении. Если в традиционной системе навигации ограничивающим критерием была ширина трассы, и для обеспечения безопасности воздушного движения требовалось точно выдерживать курс (не допускать слишком большой погрешности ЛБУ), то при зональной навигации, чтобы не выйти за пределы круговой зоны удерживания, необходимо точно определять координату ВС в горизонтальной плоскости по двум параметрам (азимут и удаление от маяка для VOR\DME или два удаления от маяков DME\DME). Погрешности определения этих параметров необходимо ограничить, чтобы, как уже было описано выше, не допустить выхода самолета за пределы зоны удерживания.

Следует также учесть влияние погрешности пилотирования. Используя данные, приведенные в предыдущем параграфе, можно найти скорректированные предельно допустимые значения круговой погрешности [23]:

$$R_{\text{скор}} = \sqrt{R^2 - \sigma_{\text{пил}}^2}, \quad (2.42)$$

где $\sigma_{\text{пил}}$ – погрешность пилотирования, зависящая от этапа полета и режима пилотирования.

Для расчета текущей погрешности определения координат ВС в ИКАО предлагают использовать упрощенную методику. Согласно ей, радиус аппроксимирующего круга равен [68]:

$$R = 2 \cdot d_{\text{rms}}, \quad (2.43)$$

где $d_{\text{rms}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ – суммарная СКП,

σ_1, σ_2 – погрешности каналов измерения координаты ВС.

Откуда методом имитационного моделирования находят удаление, на котором радиус аппроксимирующего круга равен радиусу круга удерживания. Найденное удаление будет радиусом рабочей области.

С точки зрения теории вероятности [69], при нормальном распределении погрешностей, радиус круга нужно рассчитывать по формуле:

$$R = k \cdot \sigma_{\Sigma} \cdot \sqrt{2}, \quad (2.44)$$

где $k = \sqrt{-\ln(1-P)}$,

P – вероятность пребывания ВС в круге радиусом R ,

$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ – суммарная погрешность,

σ_1, σ_2 – погрешности каналов измерения координаты ВС.

Для вероятности равной 95%, получаем [23]:

$$k = \sqrt{-\ln(1-P)} = 1.73 \quad (2.45)$$

$$R = k \cdot \sigma_{\Sigma} \cdot \sqrt{2} = 2.45 \cdot \sigma_{\Sigma} \quad (2.46)$$

Следовательно, предлагаемый ИКАО метод расчета радиуса аппроксимирующего круга занижает результаты в 1.225 раз. Однако основным недостаток метода состоит в излишнем упрощении при постановке задачи. Из рисунка 2.22 видно, что радиус аппроксимирующего круга отличается от

полуосей эллипса рассеивания. Таким образом можно сделать вывод о том, что применяемая в настоящее время методика расчета суммарной погрешности местоопределения ВС дает некорректные результаты.

Кроме того, что игнорируется характер распределения, предполагающий распределение ошибок внутри эллипса, а не круга, упрощенная методика не позволяет [68]:

- получить информацию о направлении максимальной погрешности;
- определить характер распределения вероятности за пределами аппроксимирующего круга.

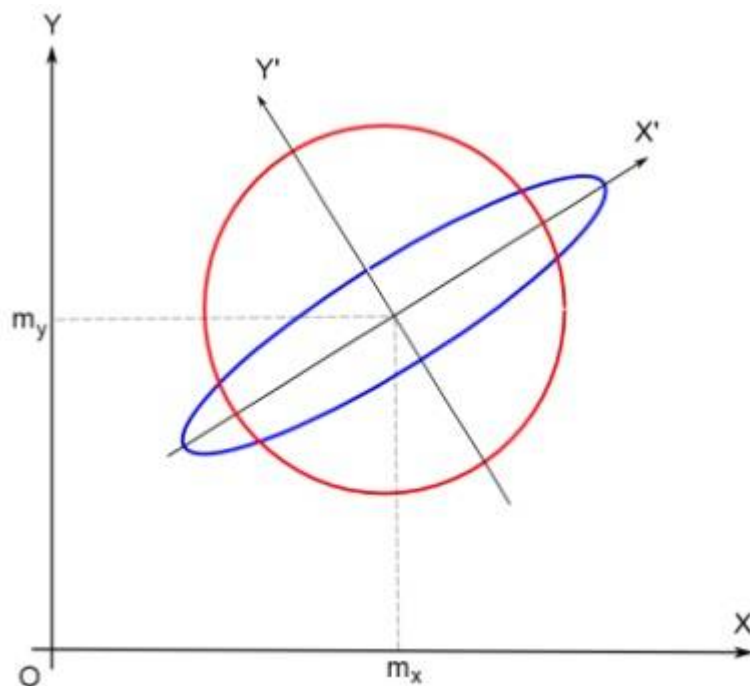


Рисунок 2.22 – Соотношение аппроксимирующего круга и эллипса ошибок

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о целесообразности построения более точной модели расчета области, в которой ВС находится с определенной вероятностью. Для этого, прежде всего, необходимо определить размеры и ориентацию эллипса рассеивания.

Основными средствами навигации являются азимутально-дальномерные системы (VOR/DME, РМА/РМД, РСБН), а также дальномерно-дальномерные системы DME/DME; последние позволяют достигнуть точности навигации сравнимой с точностью спутниковых систем.

При использовании азимутально-дальномерных систем, местоположение ВС определяется по двум параметрам: азимуту и наклонной дальности. При этом линии положения радионавигационных средств всегда пересекаются под прямым углом. Полуоси эллипса ошибок находятся как [23]:

$$a_{\alpha} = k \cdot D \cdot \sigma_{\alpha} \cdot \sqrt{2} \quad (2.47)$$

$$a_D = k \cdot \sqrt{\sigma_D^2 + (D \cdot k_D)^2} \cdot \sqrt{2}, \quad (2.48)$$

где a_{α} - полуось, размер которой обусловлен погрешностью азимутального канала;

a_D - полуось, размер которой обусловлен погрешностью дальномерного канала;

σ_{α} - погрешность азимутального канала;

σ_D - погрешность дальномерного канала;

k_D - коэффициент нарастания погрешности дальномерного канала с расстоянием.

Ориентация эллипса ошибок зависит от того, какая из полуосей будет наибольшей (см. рисунок 2.23). Если наибольшей окажется полуось, размер которой обусловлен ошибками дальномерного канала, то угол наклона осей эллипса равен азимуту. Если наибольшей окажется полуось, размер которой обусловлен погрешностью азимутального канала, то угол наклона равен сумме азимута и $\pi/2$.

Рабочая область угломерно-дальномерной системы определяется из условия, что большая полуось эллипса ошибок не будет превышать допустимую погрешность, которая определяется типом воздушного пространства RNP. Удаление, на котором величина большей полуоси эллипса будет равна радиусу круга удержания находится методом имитационного моделирования.

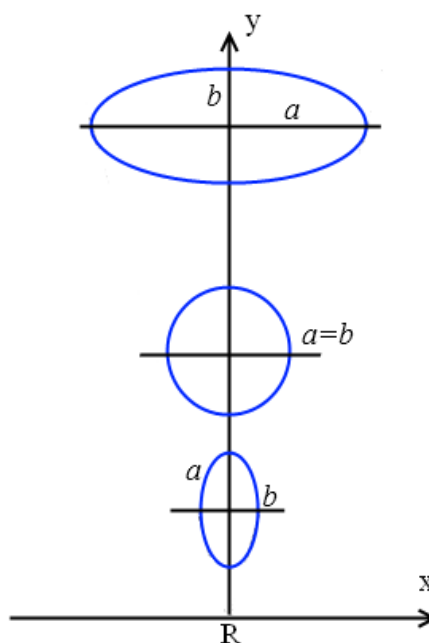


Рисунок 2.23 – Эллипсы ошибок угломерно-дальномерной системы

При навигации по системе двух дальномеров DME/DME удастся добиться погрешности, сопоставимой с погрешностью спутниковых систем навигации. В настоящее время для расчета РО при навигации по двум маякам-дальномерам применяется «Инструкция по построению схем полетов на маршруте и в районе аэродрома при использовании методов зональной навигации» [70]. В ней указано, что погрешность определения координат достигает недопустимо больших величин, если линии направления на самолет пересекаются под углом меньшим 30° или большим 150° . В связи с этим вводится зона коррекции, где применяется правило $30/150^\circ$ (на рисунке 2.24 – заштрихованная область). Вне этой зоны определять местоположение самолета по двум маякам DME не рекомендуется. Точность определения координаты рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \frac{\sqrt{(\sigma_{1_sis}^2 + \sigma_{1_air}^2) + (\sigma_{2_sis}^2 + \sigma_{2_air}^2)}}{\sin \theta}, \quad (2.49)$$

где $\sigma_{sis} = 0,0926 \text{ км}$ - погрешность сигнала;

$\sigma_{air} = \text{MAX}\{0,157 \text{ км или } 0,125\% \text{ от расстояния}\}$ - погрешность измерителя;

$30^\circ < \theta < 150^\circ$ – угол пересечения линий направления на самолет.

Формула (2.49) позволяет найти круговую погрешность, что, как уже было написано выше, является упрощением. В [71] описан алгоритм расчета параметров эллипса ошибок, а именно: большой и малой полуосей и ориентировка эллипса.

Ориентировка эллипса (угол наклона θ) зависит от соотношения между ошибками определения каждой из дальностей и от угла между линиями положения ψ .

$$\theta = \frac{\arctg\left(\frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cdot \tg\psi\right)}{2}, \quad (2.50)$$

где σ_1, σ_2 – погрешности определения дальности первого и второго маяков DME;

ψ – угол пересечения линий положения;

θ – ориентация эллипса (угол наклона).

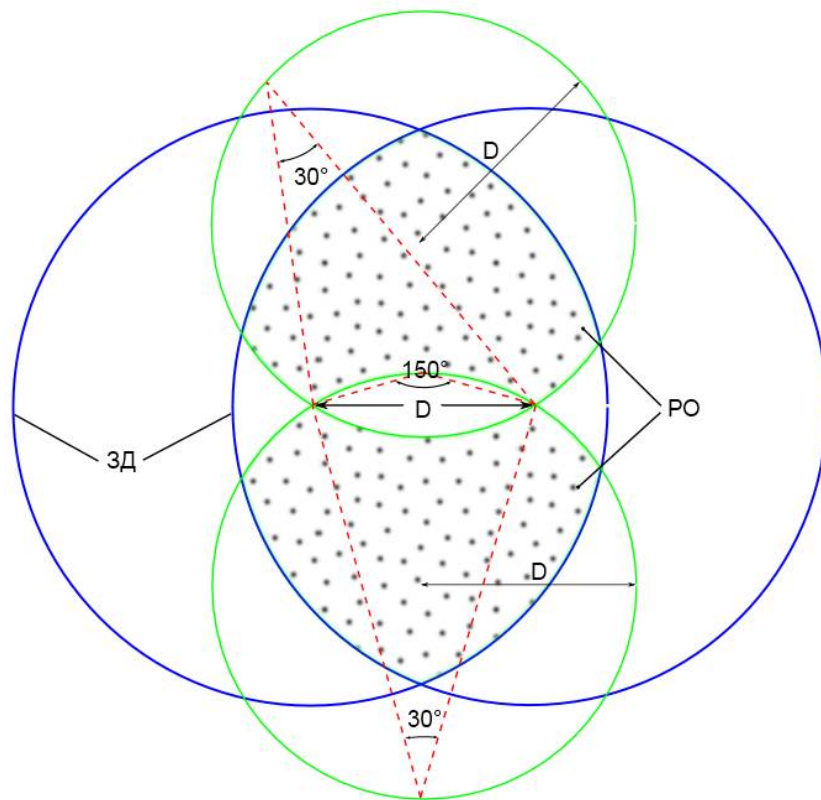


Рисунок 2.24 – К определению рабочей области двух маяков DME

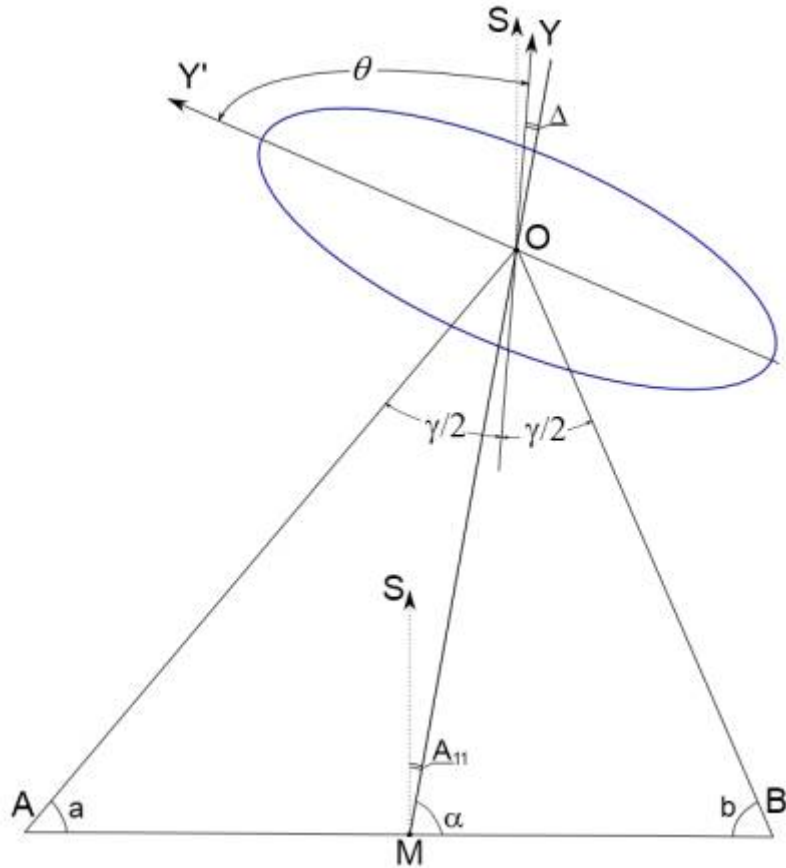


Рисунок 2.25 – К определению угла ориентации эллипса ошибок

Ориентация эллипса связана с азимутом следующим соотношением (см. рисунок 2.25):

$$A_{OY'} = 2\pi - \theta + (A_{11} - \Delta) \quad (2.51)$$

Размеры полуосей эллипса ошибок зависят от точности измерений дальности, от вероятности нахождения ВС в пределах эллипса и от угла пересечения линий положения.

$$a_y = \sqrt{\frac{4 \cdot k^2 \cdot \sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^2 - 4 \cdot \sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 \cdot \sin^2 \psi}}}, \quad (2.52)$$

$$a_x = \sqrt{\frac{4 \cdot k^2 \cdot \sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^2 - 4 \cdot \sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 \cdot \sin^2 \psi}}}, \quad (2.53)$$

где k – коэффициент, характеризующий вероятность нахождения ВС в пределах эллипса, он определяется как:

$$k = \sqrt{-\ln(1-P)}, \quad (2.54)$$

где P - вероятность нахождения ВС в пределах эллипса.

Из выражений (2.52–2.53) можно найти величину СКП в новой системе координат, приравняв коэффициент k принять за 1.07.

Рабочая область дальномерно-дальномерной системы определяется из условия, что большая полуось эллипса ошибок не будет превышать допустимую погрешность, которая определяется типом воздушного пространства RNP. Схематичное изображение РО, полученное с помощью программы «Расчет рабочей области маяков DME» представлен на рисунке 2.26.

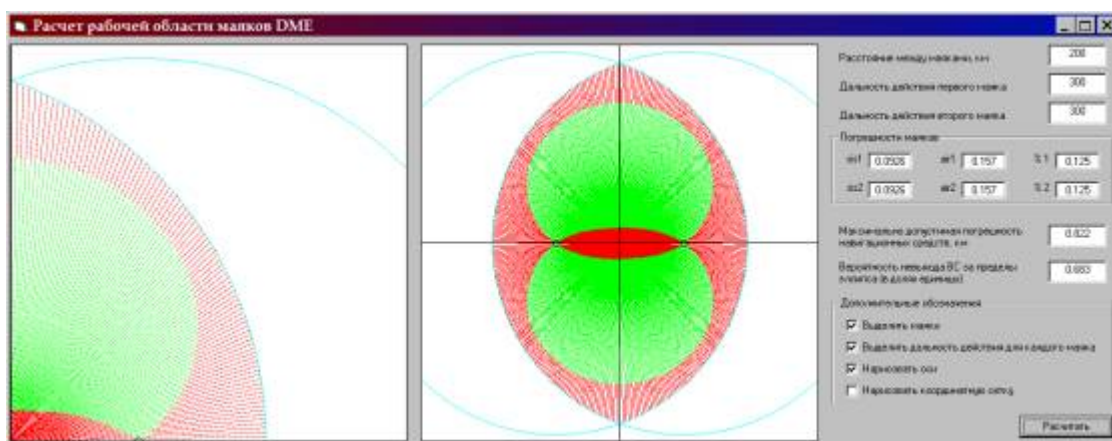


Рисунок 2.26 – Окно программы «Расчет рабочей области маяков DME»

В приведенных выше расчетах радиус РО обуславливался размером эллипса ошибок, поэтому подобные методы расчета можно назвать геометрическими. Однако условие поддержания должного уровня безопасности полетов требуют, чтобы самолет 95% времени находился в пределах круга, радиус которого задается типом воздушного пространства. Отсюда следует, что при выполнении условия:

$$P\{(X, Y) \in C_k\} = \iint_{(C_k)} f(x, y) dx dy < 0.95 \quad (2.55)$$

где C_k – круговая область, в пределах которой проводится интегрирование (радиус области определяется типом воздушного пространства RNP);

$f(x, y)$ - плотность вероятности закона распределения,

ВС будет находиться в пределах круга C_k данного радиуса с вероятностью не ниже заданной (95%). Принимая гипотезу о нормальном распределении ошибок определения координат, получаем:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r_{xy}^2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2\sqrt{1-r_{xy}^2}} \cdot \left[\frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2r_{xy}(x-m_x)(y-m_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \quad (2.56)$$

где σ_x, σ_y - СКП каналов измерения навигационных параметров;

m_x, m_y - математические ожидания;

r_{xy} - коэффициент корреляции.

Сравним вероятностную модель расчета РО с разработанной выше геометрической, а также с моделью, предлагаемой ИКАО. В качестве контрольного примера рассмотрим расчет для трех азимутально-дальномерных систем, характеристики которых представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Характеристики азимутально-дальномерных систем

Характеристика	Система №1	Система №2	Система №3
σ_α , рад	0.01745	0.0087	0.0349
σ_D , км	0.465	0.15	0.15
k_D	0.00125	0.01	0.03

Расчет производится для воздушного пространства RNP4. Результаты представлены в таблице 2.11. Здесь модель расчета, обозначенная как «ИКАО

скор.» означает скорректированный метод ИКАО, где размер аппроксимирующего круга рассчитан по правилам теории вероятностей.

Таблица 2.11 – Результаты расчета радиуса РО

Модель расчета	Радиус РО (1), км	Радиус РО (2), км	Радиус РО (3), км
ИКАО	217	285	82
ИКАО скор.	177	233	67
Геометрический	144	250	70
Вероятностный	206	260	71

Предложенные методы расчета (геометрический и вероятностный) имеют прочную теоретическую основу и позволяют не только определить вероятность выхода ВС за пределы круга (или превышение размеров эллипса над радиусом круга удерживания), но и рассчитать ориентацию эллипса рассеивания, то есть направление максимальной ошибки.

Из условия не выхода погрешности за пределы области, ограниченной кругом заданного радиуса следует, что размер рабочей области определяется большей полуосью эллипса рассеивания. Если между осями эллипса имеется большое различие, то геометрический способ определения размеров РО дает более консервативную оценку, нежели другие способы. Для азимутально-дальномерных систем (при отсутствии ограничений по дальности), РО имеет форму круга. Форма РО дальномерно-дальномерных систем более сложная и зависит не только от точностных характеристик оборудования, но и от расстояния между маяками.

Рассмотренный выше вероятностный метод расчета позволяет определить размер РО из условия нахождения ВС в пределах круга заданного радиуса с вероятностью не ниже 95%, а также направление наибольшей ошибки и распределение погрешностей за пределами круга удержания.

2.2.2 Расчет рабочей области РТС наблюдения

Для систем наблюдения ИКАО были разработаны требуемые характеристики наблюдения RSP [72]. RSP не является аналогом RNP. Отличие их состоит в том, что RSP регламентируют не точность определения местоположения ВС, а время передачи данных диспетчеру УВД, а также непрерывность, доступность и целостность информации.

Документы международной организации гражданской авиации [73, 74] содержат инструктивный материал о системах наблюдения, однако не дают сведений о требованиях к точности определения местоположения ВС. Поэтому, целесообразно для расчета РО РТС наблюдения использовать предельно допустимые погрешности, задаваемые для определенного типа воздушного пространства RNP. Таким образом, анализ первичных и вторичных радиолокаторов становится аналогичен анализу азимутально-дальномерных систем ближней навигации. Результаты расчета РО для трассового и диспетчерского радиолокаторов (системы №2 и №3) представлены в табл.2.11, данные для расчета взяты из [75].

В спецификациях систем наблюдения Eurocontrol [76] приводится рекомендуемое значение погрешности для определения координат в горизонтальной плоскости, равное 500м при минимуме эшелонирования 5м.м. и 300м при минимуме эшелонирования 3м.м. Тогда, при существующих в России нормах горизонтального эшелонирования 30км, предельно допустимая СКП не должна превышать 1.6км.

2.2.3 Расчет рабочей области РТС связи

ИКАО были разработаны требуемые характеристики систем связи – RCP. Они характеризуется такими параметрами как: время транзакции, непрерывность, готовность и целостность. Параметры рекомендуемых типов RCP представлены в таблице 2.12 [77].

Таблица 2.12 – Требуемые характеристики связи

Тип RCP	Время транзакции, с	Непрерывность, (вероятность/ час полета)	Готовность (вероятность/ час полета)	Целостность (частота/ час полета)
10	10	0.999	0.99998	10^{-5}
60	60	0.999	0.9999	10^{-5}
120	120	0.999	0.9999	10^{-5}
240	240	0.999	0.999	10^{-5}
420	420	0.999	0.999	10^{-5}

Как следует из [77] тот или иной тип RCP назначается после проведения соответствующего мониторинга. Определение типа RCP требует больших материальных и временных затрат, поэтому целесообразно ввести другие параметры для анализа качества информации. В аналоговых системах радиосвязи приемлемым критерием качества может служить разборчивость речи, в цифровых системах - вероятность приема ошибочного сообщения. Рассмотрим методы расчета текущего значения критерия качества, а также его пороговые значения, определяющие границы рабочей области.

2.2.3.1 Расчет рабочей области систем аналоговой радиосвязи

В аналоговых системах качество передачи речевой информации оценивается разборчивостью речи и ее понятностью. Различают разборчивость звуков (W), слогов (S), слов (D) и фраз (Ф) [78]. Наиболее распространенным методом измерения разборчивости является метод артикуляции: слоговой, словесной и фразовой. Нормированные показатели разборчивости речи приведены в таблице 2.13.

Современные объективные методы оценки разборчивости речи подразделяются на формантные, теоретико-информационные, модуляционные и эмпирические [79]. Они учитывают параметры среды передачи, особенности микрофонной и воспроизводящей аппаратуры, а также тембр голоса [80]. Эти

методы достаточно сложны и требуют проведения специальных работ по определению качества связи, поэтому для анализа подвижной радиосвязи в радиоцентрах ГА они не подходят.

Таблица 2.13 – Нормированные показатели разборчивости речи

Артикуляция	Разборчивость речи, %			
	слабая	удовлетворительная	хорошая	отличная
Слоговая, S	25...40	40...55	55...80	более 80
Словесная, D	75...87	87...93	93...98	более 98
Фразовая, Ф	90...95	95...97	97...99	более 99

Более простой подход к определению качества речевой информации основан на сравнении отношения сигнала/шум на входе приемника с допустимым значением, при котором качество связи удовлетворительно.

$$\gamma_U = \frac{U_c}{U_{ш}} \quad (2.57)$$

Для работы речевого канала необходимо, чтобы это отношение было не меньше 3-10 дБ [81]. Напряжение сигнала находят как произведение напряженности поля в точке приема и действующей длине антенны:

$$U_c = E \cdot l_d \quad (2.58)$$

Для бортовых антенн действующая длина l_d лежит в диапазоне 0.2...0.5м, напряженность поля E в точке приема находится из энергетического расчета ЗД.

Напряжение шума складывается из собственного шума приемника и атмосферных шумов (включающих естественные и искусственные). Собственный шум приемника несложно найти, имея информацию о коэффициенте шума:

$$T_{ПР} = (K_{шпр} - 1) \cdot T_0, \quad (2.59)$$

где $K_{шпр}$ - коэффициент шума приемника;

$$T_0 = 293\text{К}$$

Необходимо также учитывать шумовую температуру антенны T_A . Мощность шума приемника находится как:

$$P_{ш_ПРМ} = k(T_{ПР} + T_A) \cdot \Delta F, \quad (2.60)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана;

ΔF - ширина полосы пропускания приемника.

Мощность атмосферных шумов зависит от района, над которым совершается полет, времени суток, грозовой активности и многих других факторов, учет которых является сложной, а подчас и просто невыполнимой задачей. Поэтому, в расчетах рекомендуется применять средние значения атмосферных шумов, характерные для данного региона. Тогда, напряжение помехи находится как:

$$U_{П} = \sqrt{P_{\Sigma ш} / R}, \quad (2.61)$$

где $P_{\Sigma ш} = P_{ш_ПРМ} + P_{ш_атм}$ - суммарный уровень шума (собственный шум приемника и атмосферные шумы);

$R = 50$ Ом – входное сопротивление ПРМ.

2.2.3.2 Расчет рабочей области систем цифровой радиосвязи

Цифровая радиосвязь является перспективным направлением развития средств взаимодействия диспетчера и пилота, она позволяет осуществлять автоматический обмен сообщениями, использовать помехоустойчивое кодирование и рационально использовать радиочастотный спектр [82]. При этом снижается нагрузка на диспетчера и экипаж, поскольку метеоданные, координаты ВС, характеристика полета и т.д. - передается в автоматическом режиме. Часть стандартных сообщений, передаваемых ранее посредством речевой связи, передается в виде короткого текстового сообщения.

В [83] указано, что вероятность приема ошибочного сообщения не должна превышать 10^{-6} . Эта величина зависит от вероятности ошибки на один бит информации (bit error rate - BER) и от длины сообщения.

Как отмечено в [62], длина сообщений АЗН варьируется от 89 бит (для обязательных параметров, передающихся постоянно) до 338 бит (при передаче всех параметров). Подробнее о составе сообщения можно узнать из таблицы 2.14.

Максимальная длина сообщения для CPDLC, с учетом 24-битной фиксированной части, составляет 8216 бит [84]. Минимальный размер зависит от типа сообщения, однако, если предположить, что в самом коротком слове будет 5 букв при 8-битном кодировании, то получим 64 бита.

Для удобства расчетов, зададим следующие величины: минимальная длина сообщения для АЗН и CPDLC – 100 бит, максимальная - 350 и 8300 бит соответственно. Вероятность ошибочного приема сообщения без использования избыточного кодирования равна:

$$P_{\Pi} = 1 - \prod_{i=1}^S (1 - P_{Ci}), \quad (2.62)$$

где P_{Π} – вероятность ошибочного приема сообщения

P_{Ci} – вероятность ошибочного приема i -го бита

S – длина пакета

Так, если $P_{Ci} = 10^{-7}$ и $S=100$, то $P_{\Pi} = 10^{-6}$. А при $S=350$ и 8300 вероятность ошибочного приема сообщения становится равной $3.5 \cdot 10^{-5}$ и $8.3 \cdot 10^{-4}$, что говорит о необходимости уменьшать вероятность ошибки на один бит.

На практике, при передаче данных по цифровым радиоканалам используют помехоустойчивое кодирование. Это кодирование осуществляется с помощью систематического кода Рида-Соломона фиксированной длины [85], который использует шесть избыточных бит, соответственно, может исправить три ошибки. Если в сообщении будет четыре ошибочных бита, код их полностью не исправит и такое сообщение можно считать ошибочным.

Таблица 2.14 – Состав и длина сообщений АЗН

Параметры	Дисциплина передачи		Дискретность, 1/с	Длина, бит
	постоянно	по запросу		
Координаты (широта, долгота)	+	-	0.0125	42
Высота, м	+	-	2.4	16
Время, с	+	-	0.125	15
Показатель качества	+	-		16
Опознавательный индекс	-	+		48
Поле активации	-	+		16
Т-экстраполированные координаты	-	+	0.0125	42
Т-экстраполированная высота, м	-	+	2.4	16
2Т-экстраполированные координаты	-	+	0.0125	42
2Т-экстраполированная высота, м	-	+	2.4	16
Курс, град	-	+	0.1	13
Приборная скорость, км/ч (число М)	-	+	1 (0.001)	14
Вертикальная скорость, м/с	-	+	0.08	12
Скорость ветра, км/ч	-	+	2	9
Направление ветра, град	-	+	0.7	9
Температура	-	+	0.25	12

Также стоит учесть, что код Рида-Соломона налагает ограничение на длину сообщения в 240 бит (при длине пакета 256 бит), поэтому большие

сообщения разбиваются на ряд более мелких. Если нужно передать сообщение длиной меньше, чем 240 бит, остаток сообщения заполняется пустыми битами.

Определим, какова будет вероятность приема ошибочного сообщения, если его длина равна 240 бит, вероятность ошибки на бит 10^{-7} , и ошибка в сообщении возникает, только если оно содержит не менее 4-х ошибочных бит. Для этого используем выражение [86]:

$$P_{\Pi} = \frac{a^m}{m!} \cdot e^{-a} \quad (2.63)$$

где m – заданное количество ошибок в сообщении;

$a = N \cdot P_{\text{ош}}$ - среднее количество ошибок в сообщении данной длительности (N – длина сообщения, $P_{\text{ош}}$ – вероятность ошибок на бит).

Сообщение будет принято с ошибкой в том случае, если в нем будет не менее 4-х ошибочных бит. Если длина сообщения равна 240 бит, а вероятность ошибки на бит не превышает 10^{-7} , получим:

$$a = 240 \cdot 10^{-7} = 0.000024 \quad (2.64)$$

$$P_{\Pi} = \frac{0.000024^4}{4!} \cdot e^{-0.000024} = 1.4 \cdot 10^{-20} \quad (2.65)$$

Вероятности неправильного приема для других вероятностей ошибки на бит представлены в таблице 2.15.

Для достижения требуемой вероятности неправильного приема 10^{-6} , необходимо, чтобы вероятность ошибки на бит была не более $3.0 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, помехоустойчивое кодирование позволяет значительно снизить требования к качеству канала.

Ключевым элементом в определении вероятности приема сообщения с ошибкой является вероятность ошибки на бит (BER). Эта величина зависит от типа модуляции и отношения сигнал/шум. В каналах авиационной цифровой радиосвязи используется восьмипозиционная дифференциальная фазовая манипуляция (D8PSK).

Таблица 2.15 – Вероятность неправильного приема сообщения при различных значениях вероятности ошибки на бит

Вероятность ошибки на бит	Вероятность неправильного приема сообщения
10^{-7}	$1.4 \cdot 10^{-20}$
10^{-6}	$1.4 \cdot 10^{-16}$
10^{-5}	$1.4 \cdot 10^{-12}$
10^{-4}	$1.3 \cdot 10^{-8}$
10^{-3}	$1.0 \cdot 10^{-4}$

Для расчета вероятности ошибки на бит используется формула [87]:

$$P_{ош} = \frac{2}{3} \left[F\left(\frac{13\pi}{8}\right) - F\left(\frac{\pi}{8}\right) \right], \quad (2.67)$$

где
$$F(\psi) = \frac{\sin\psi}{4\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\exp\{-(E/N) \cdot \log_2 M (1 - \cos\psi \cos\theta)\}}{1 - \cos\psi \cos\theta} d\theta, \quad (2.68)$$

где M – количество позиций манипуляции;

E/N – отношение сигнал/шум.

Значения вероятности ошибки на бит при различных значениях отношения сигнал/шум можно увидеть на рисунок 2.27 и в таблице 2.16.

Расчет радиуса рабочей области средств цифровой радиосвязи сводится к следующему алгоритму: сначала необходимо определить величину отношения сигнал/шум, затем, по графику, либо расчетным путем найти вероятность ошибки на бит (BER).

Учитывая помехоустойчивое кодирование, найти вероятность неправильного приема сообщения. Дальность, на которой эта вероятность станет равной 10^{-6} – есть граница рабочей области средств цифровой радиосвязи.

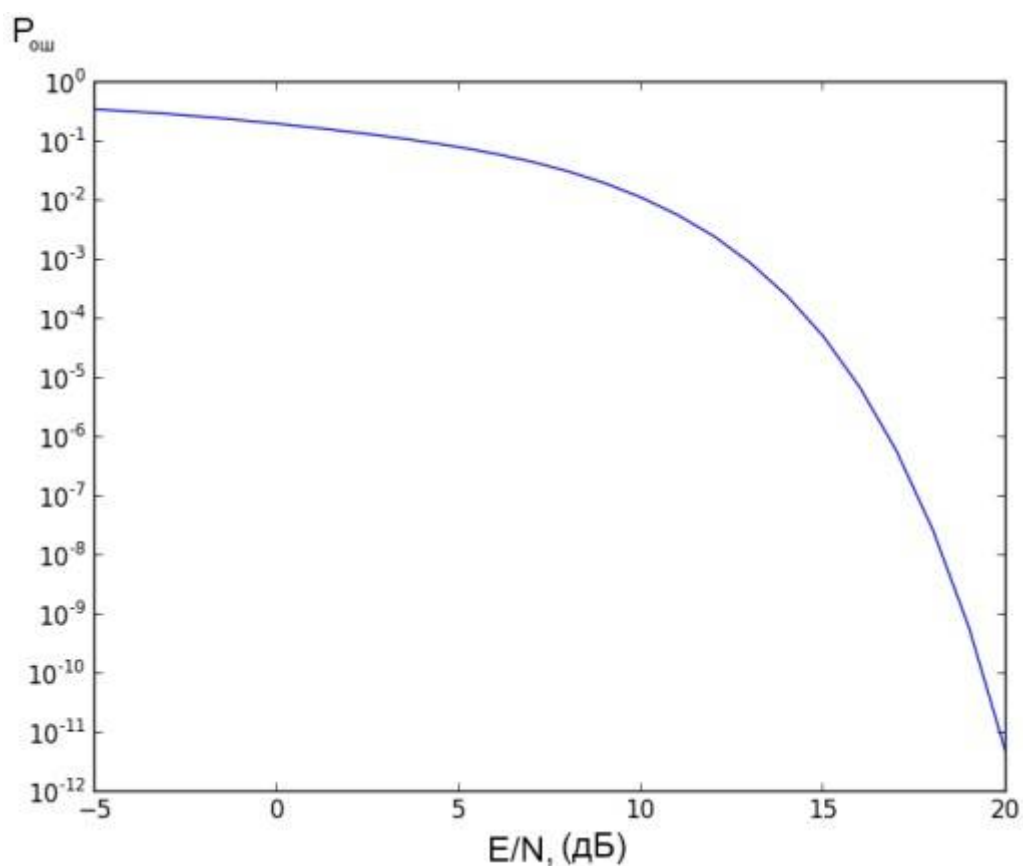


Рисунок 2.27 – Вероятность ошибки на бит для дифференциальной фазовой манипуляции

Таблица 2.16 – Вероятность ошибки на бит при различных значениях отношения сигнал/шум

Отношение сигнал/шум, дБ	Вероятность ошибки на бит
-5	0.34
0	0.19
5	0.08
10	0.001
15	$4.9 \cdot 10^{-5}$
20	$4.7 \cdot 10^{-12}$

Таким образом, по мере удаления от радиостанции, сигнал будет ослабляться и, на определенном расстоянии, качество канала перестанет быть

удовлетворительным. Данное расстояние и будет границей рабочей области данного средства цифровой радиосвязи.

Такой подход применим к сообщениям, длина которых равна 240 битам. При передаче информации между диспетчером и пилотом потребуется разбить большой по объему текст на ряд пакетов размером в 240 бит. При передаче координатной информации в системе АЗН таких пакетов может быть два, при передаче сообщения максимальной длины в системе CPDLC число пакетов может достигать 35. Вероятность ошибочного приема сообщения можно найти по формуле:

$$P_{\Pi} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{\Pi i}), \quad (2.69)$$

где $P_{\Pi i}$ – вероятность неправильного приема одного пакета;

N – количество пакетов в одном сообщении.

Таким образом, правильность принятие всего сообщения будет зависеть и от количества пакетов, что отражено в таблице 2.17 (вероятность неправильного приема одного пакета примем за 10^{-6}).

Таблица 2.17 – Вероятность неправильного приема сообщения при передаче текста несколькими пакетами

Количество переданных пакетов	Вероятность неправильного приема сообщения
1	$1.0 \cdot 10^{-6}$
10	$1.0 \cdot 10^{-5}$
20	$2.0 \cdot 10^{-5}$
35	$3.5 \cdot 10^{-5}$

При передаче коротких сообщений (это относится к сообщениям АЗН, а также ряду сообщений CPDLC), информация может занимать лишь часть пакета. Остальная часть окажется заполненной пустыми битами (безындформационными), повреждение которых не приведет к ошибкам в

сообщении. С учетом перемежения, будем считать, что помеха может воздействовать на любой бит, и тогда вероятность того, что он будет нести полезную информацию, равна:

$$P_{инф} = \frac{N_{инф}}{N_{П}}, \quad (2.70)$$

где $P_{инф}$ – вероятность повреждения информационного бита;

$N_{инф}$ – количество информационных бит в пакете;

$N_{П}$ – длина пакета (240 бит).

Полученную вероятность $P_{инф}$ нужно перемножить с вероятностью ошибки на бит P_{Ci} , для получения скорректированной вероятности P'_{Ci} :

$$P'_{Ci} = P_{инф} \cdot P_{Ci} \quad (2.71)$$

Рассмотрим, как влияет длина сообщения на вероятность неправильного приема, для чего произведем расчет для различных $N_{инф}$. В расчетах ошибка на бит принималась равной 10^{-7} , результаты расчетов приведены в таблице 2.18.

Таблица 2.18 – Вероятность ошибки на бит при неполном заполнении пакета

Количество информационных бит в пакете $N_{инф}$	Вероятность повреждения информационного бита	Скорректированная вероятность ошибки на бит
50	0.21	$2.1 \cdot 10^{-8}$
100	0.42	$4.2 \cdot 10^{-8}$
200	0.83	$8.3 \cdot 10^{-8}$

По скорректированной вероятности ошибки на бит рассчитывается вероятность ошибки данного пакета. Если сообщение состоит из нескольких пакетов, и один из них частично заполнен, то применяется формула (2.70) с подстановкой соответствующих вероятностей. Пример расчета РО для РТС связи ОВЧ диапазона представлен в Приложении Б.

2.2.4 Расчет РО с учетом обобщенной надежности

Более полной характеристикой безопасности полетов является *обобщенная надежность* [21]. Точность определения координат ВС зависит не только от погрешностей РТС, но от надежности оборудования. Таким образом, обобщенная вероятность ($P_{он}$) того, что ВС будет находится в пределе области заданного размера равняется:

$$P_{он} = P_{РТС} \cdot P_{\tau}, \quad (2.72)$$

где P_{τ} – вероятность безотказной работы оборудования.

Величина P_{τ} определяется по среднему времени наработки на отказ $T_{свно}$ данного типа оборудования и исходя из экспоненциального закона распределения вероятности безотказной работы

$$P_{\tau} = P(t, t + \tau) = e^{-\frac{\tau}{T_{свно}}} \quad (2.73)$$

Если измерительная система состоит из нескольких элементов, то вероятность безотказной работы равна:

$$P_{\tau} = \prod_{i=1}^n P_{\tau i}, \quad (2.74)$$

где $P_{\tau i}$ – вероятность безотказной работы i -го элемента системы.

Вероятность $P_{он}$ (обобщенная надежность), помещенная в формулу по определению РО вместо предельно допустимой вероятности позволяет скорректировать размер РО с учетом надежности применяемых радиотехнических систем обеспечения полетов.

2.3 Алгоритм двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП

Рассмотренные ранее методики расчета ЗД и РО объединяются в единую систему: алгоритм двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП. Алгоритм включает в себя следующие шаги (блок-схема показана на рисунке 2.28):

1) расчет ЗД РТС навигации, наблюдения и связи с помощью методов, изложенных в параграфах 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3; расчет выполняется с помощью программных средств, описанных в параграфе 2.1.4;

2) расчет РО РТС навигации, наблюдения и связи с помощью методов, изложенных в параграфах 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3;

3) вывод полученных результатов на радионавигационных картах для определения частных коэффициентов перекрытия воздушных трасс и интегрального коэффициента для исследуемого региона.



Рисунок 2.28 – Алгоритм двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП

Найденные ЗД и РО РТС навигации, связи и наблюдения отображаются на радионавигационной карте. В качестве примера на рисунке 2.29 представлена карта Санкт-Петербургского центра ОВД с ЗД и РО навигационного маяка DVOR/DME (желтым цветом обозначена ЗД, сиреневым – РО). Расчет велся для высоты эшелона 10000м и для воздушного пространства типа RNP4.

По результатам анализа радионавигационной карты, выявляются участки трасс, где не обеспечивается требуемый уровень безопасности полетов. Улучшить ситуацию можно одним из способов:

1) *Техническое перевооружение.* Предполагает замену РТС на более современное, имеющее лучшие показатели дальности действия и точности. При этом место установки может сохраниться или претерпит незначительные изменения. Метод применим для центров ОВД, эксплуатирующих устаревшее оборудование и при незначительных нарушениях уровня БП.

2) *Дооснащение.* В том случае, если имеются значительные по протяженности участки воздушных трасс, не перекрытые ЗД и РО, имеет смысл развернуть на территории региона дополнительные средства навигации, связи и наблюдения.

3) *Изменение типа воздушного пространства.* Изменение типа ВП или увеличение ширины трассы позволяет снизить требования к точности РТС, тем самым увеличивая их рабочую область. Метод применим для регионов с невысокой интенсивностью полетов.

После необходимых согласований со службами ЭРТОС и УВД, конкретный вариант принимается дирекцией центра ОВД.



Рисунок 2.29 – ЗД и РО маяка DVOR/DME в Санкт-Петербургском центре ОВД

Рассмотренный двухэтапный анализ ЭХ средств РТОП позволяет выявить участки трасс, где не соблюдаются требования к точности и безопасности

полетов. Результат расчета отображается на радионавигационной карте с нанесенными на ней зонами действия, рабочими областями и участками трасс, где не обеспечивается требуемая точность, и выводится в виде таблиц с информацией о протяженности перекрытых участков. Работать с таким объемом информации не вполне удобно, поэтому, был разработан интегральный критерий. Интегральный критерий перекрытия воздушных трасс ЗД и РО учитывает:

- 1) степень перекрытия трасс зонами действия РТС;
- 2) степень перекрытия трасс рабочими областями РТС.

Эти параметры показывают, какая часть воздушной трассы (или участка трассы) перекрыта зонами действия и рабочими областями РТС. Рабочие формулы следующие:

- определение степени перекрытия ЗД воздушной трассы (участка):

$$P_{mp_ЗД} = \frac{l_{ЗД}}{l_{общ}}, \quad (2.75)$$

где $l_{ЗД}$ - участок, перекрытый ЗД радиотехнического средства;
 $l_{общ}$ - общая протяженность трассы.

- определение степени перекрытия РО воздушной трассы (участка):

$$P_{mp_РО} = \frac{l_{РО}}{l_{общ}}, \quad (2.76)$$

где $l_{РО}$ - участок, перекрытый РО РТС;
 $l_{общ}$ - общая протяженность трассы.

Найденные соотношения позволяют рассчитать интегральные коэффициенты степени перекрытия трасс и региона ЗД и РО:

$$K_{mp_ЗД} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{mp_ЗД}}{n}, \quad (2.77)$$

где n – количество трасс (участков трасс).

$$K_{mp_PO} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{mp_PO}}{n} \quad (2.78)$$

Они позволяют оценить ситуацию в регионе в целом и в удобной форме представить выгоду от внедрения новых РТС или модернизации существующих.

2.4 Разработка комплекса программ расчета зон действия и рабочих областей РТС навигации, наблюдения и связи

Разработанные методы были реализованы в виде комплекса компьютерных программ расчета зон действия и рабочих областей РТС (коды программы представлены в Приложении А). Программы написаны на языке высокого уровня Visual Basic 6 и Python 3.2, и позволяют:

- 1) рассчитывать углы закрытия (пример см. на рисунке 2.8);
- 2) рассчитывать зоны действия РТС навигации, наблюдения и связи (примеры см. на рисунках 2.19 и 2.29)
- 3) рассчитывать рабочие области азимутально-дальномерных систем, таких как навигационные маяки VOR/DME и радиолокаторы;
- 4) рассчитывать рабочие области дальномерно-дальномерных систем.
- 5) рассчитывать рабочие области РТС связи ОВЧ диапазона;

Сравнение РО азимутально-дальномерных систем приведено в табл.2.11. Пример отображения результатов расчета на радионавигационной карте приведен на рисунке 2.28.

Сравнение РО двух маяков-дальномеров, рассчитанной с помощью предлагаемой методики и методики рекомендуемой ИКАО представлено на рисунках 2.30 и 2.31 (зеленым цветом обозначена РО, красным – область, где погрешность определения координат ВС превышает предельно допустимый уровень), а также в таблице 2.19. Следует учесть, что предлагаемая методика учитывает не только погрешности РТС, но и погрешности пилотирования.

Таблица 2.19 – Сравнение размеров РО, рассчитанной различными методами

Метод	Дальность по внутренней границе	Дальность по внешней границе
ИКАО	25км	280км
Предложенный	24км	223км
Разница	1км, 4 %	57км, 20 %

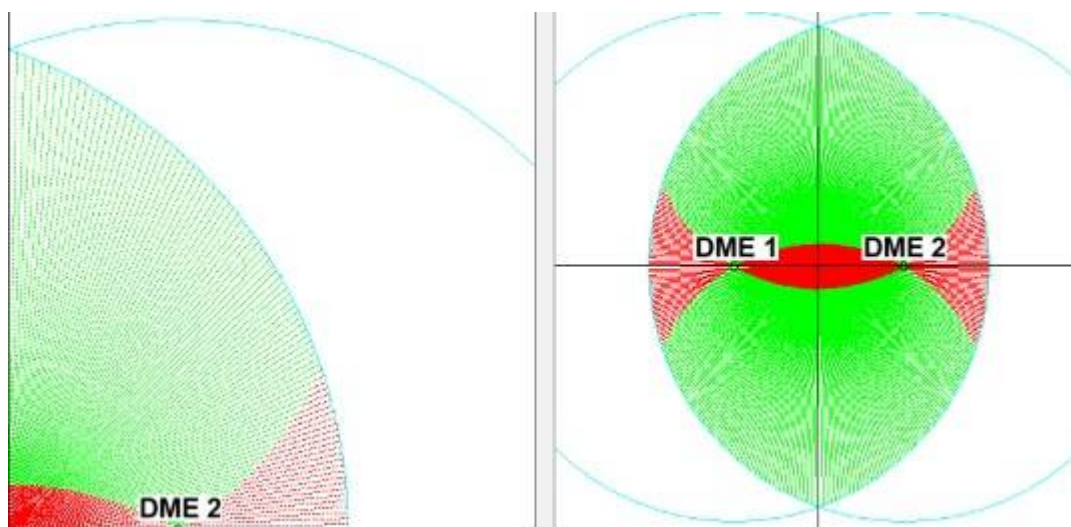


Рисунок 2.30 – Рабочая область системы двух дальномеров, рассчитанная с помощью методики рекомендуемой ИКАО для воздушного пространства RNP1

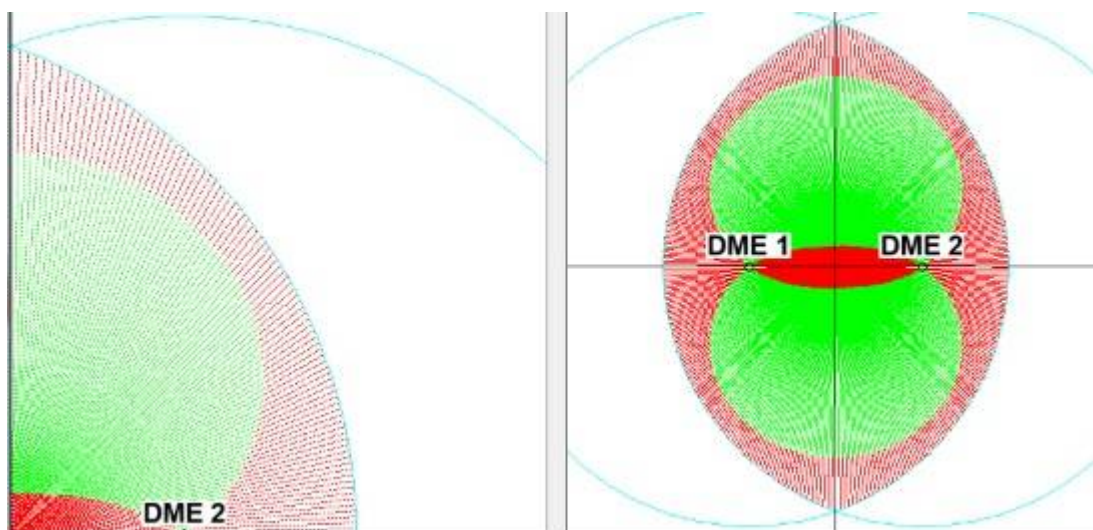


Рисунок 2.31 – Рабочая область системы двух дальномеров, рассчитанная предложенным методом для воздушного пространства RNP1

2.5 Выводы

Алгоритм двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП включает в себя:

- расчет ЗД РТС навигации, наблюдения и связи;
- расчет РО РТС навигации, наблюдения и связи;
- вывод полученных результатов на радионавигационных картах для определения частных коэффициентов перекрытия воздушных трасс и интегрального коэффициента для исследуемого региона.

Двухэтапный анализ ЭХ средств РТОП позволяет оценить степень перекрытия региона ЗД и РО. Результаты расчетов, будучи отображенными на радионавигационной карте дают ясную картину проблемных участков трасс и областей региона, где использование РТС невозможно (нет перекрытия ЗД), либо качество информации не позволяет обеспечить должный уровень безопасности (нет перекрытия РО). Разработан интегральный коэффициент степени перекрытия воздушных трасс.

В главе были рассмотрены различные методики расчета ЗД. В рамках диссертационной работы проводилась оценка сильных и слабых сторон той или иной методики и выбор оптимальных по соотношению сложность - точность расчета методик. Важным обстоятельством является разработка простой и в то же время достаточно точной методики расчета ЗД средств ОБЧ радиосвязи, так как в авиапредприятиях покрытие связных полей определяется по упрощенным формулам, без учета рельефа.

Что касается рабочих областей, то взамен упрощенной методики, рекомендованной ИКАО, было предложено две новые методики расчета РО РТС навигации: геометрическая и вероятностная. Применение нового подхода позволило учесть характер распределения ошибки определения координат ВС и сделать расчет более точным и достоверным. Для расчета РО радиолокаторов предлагается использовать методики расчета РО для азимутально-дальномерных систем.

В ходе исследования была разработана методика расчета РО РТС ОБЧ связи. Аналоговые системы радиосвязи предлагается оценивать по отношению

сигнал/шум, для цифровых систем критерием качества информации выступает вероятность приема ошибочного сообщения. Оценка возможностей цифровой радиосвязи позволит оценить достаточность и эффективность перспективных систем, в том числе наземных станций АЗН.

Разработанный алгоритм двухэтапного анализа ЭХ средств РТОП целесообразно внедрить на авиапредприятиях (в частности в службе ЭРТОС) для оценки безопасности полетов при существующих и перспективных РТС навигации, наблюдения и связи, а также в условиях внедрения зональной навигации.

Также рекомендуется пересмотреть существующие подходы к определению рабочих областей РТС навигации и наблюдения, и заменить их на предложенные в данной работе, так как они учитывают реальное распределение погрешностей определения координат ВС (эллипс погрешностей), а также погрешности пилотирования ВС на различных этапах полета и в различных типах воздушного пространства.

Рекомендуется внедрить в практику методы расчета рабочей области РТС связи ОВЧ диапазона, как для существующих аналоговых систем, так и для перспективных цифровых систем радиосвязи.

Глава 3. Разработка методики расчета зон конфликтных ситуаций

3.1 Анализ законов распределения ошибок определения координат воздушных судов

При расчете вероятности нарушения норм эшелонирования необходимо рассчитывать вероятность возникновения крайне малых событий. Таким образом, особое внимание уделяется хвостам функций распределения, то есть частям графика, описывающим большие по величине, редко возникающие ошибки.

Эксперименты показали, что использование в расчетах нормального закона нецелесообразно, так как он занижает вероятность появления больших ошибок, т.е. имеет тонкие хвосты. Недостоверность результатов, получаемых при использовании закона Гаусса, отмечали такие видные ученые как Паркер и Хсю [68]. И если Паркер только указывал на необходимость введения нового закона, то Хсю в своих работах уже использовал двойное экспоненциальное (Лапласа) распределение.

Для замены нормального распределения предлагаются три вида распределений:

1. Классические распределения.
2. Обобщенные распределения.
3. Составные распределения.

Первым направлением в решении задачи является поиск классического распределения, заменяющего нормальное. На основе материалов Хсю [68], можно сделать вывод о том, что из совокупности законов более всего на эту роль подходит закон Лапласа. Однако проведенные в последнее время работы показали, что замена нормального распределения двойным экспоненциальным не дает удовлетворительных результатов [14]. К такому же выводу пришли и в ИКАО: как отмечено в [89], классический закон Гаусса завышает результаты, потому его можно применять «для получения более консервативных значений».

Таким образом, классические законы распределения не обладают достаточной точностью для описания реальных распределений ошибок определения координат ВС.

Второе направление - обобщенные законы. Исследование обобщенного нормального закона [72] показало его непригодность в использовании. В то же время, Хсю [68] писал о необходимости более глубокого анализа классического двумерного экспоненциального распределения, намекая на возможность создания его обобщенного вида.

Активные работы по созданию обобщенного закона Лапласа начали проводиться относительно недавно. Большинство авторов сосредоточили усилия на исследовании асимметричных вариантов распределения, что для наших целей не представляет интереса. Отечественные ученые В.Е. Бенинг и О.О. Лямин разработали обобщенный закон Лапласа, позволяющий, через нормировочную константу, произвести настройку поведения функции плотности [88]. Функция плотности вероятности этого закона имеет вид:

$$f(x, \theta) = C(a, b) \cdot e^{-a(x-\theta)^2 - b|x-\theta|}, \quad (3.1)$$

где $C(a, b)$ – нормировочная константа такая, что

$$C(a, b) = \begin{cases} \frac{b}{2}, & a = 0 \\ \frac{1}{\sqrt{\pi} \exp\{b^2 / 4a\} \cdot \operatorname{erfc}(b / (2\sqrt{a}))} & a > 0 \end{cases}; \quad (3.2)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-y^2} dy; \quad (3.3)$$

a и b – некоторые параметры, причем

$$a \geq 0, b > 0, x \in R$$

Параметр a регулирует тяжесть хвостов функции, то есть вероятность появления больших ошибок; параметр b пропорционален масштабу стандартного распределения Лапласа и находится как:

$$b = \frac{\sigma}{\sqrt{2}}. \quad (3.4)$$

Возможность тонкой регулировки хвостов, наравне с простотой закона, делает обобщенный закон Лапласа хорошей заменой нормальному. Подбором коэффициентов нормировочной константы можно добиться точной аппроксимации экспериментальных данных, однако остается проблема контрольных примеров, с которыми необходимо сличать новое распределение.

Третьим направлением в решении проблемы создания нового закона распределения ошибок определения координат ВС является использование составных законов. Получить составной закон можно в виде:

- 1) комбинации плотностей вероятности;
- 2) комбинации функций вероятности;
- 3) суммы плотностей вероятности с применением коэффициента соотношения.

Примером первого варианта является Normex – комбинация нормального и экспоненциального законов распределения, разработанная Рабоном и Лордом в начале 1970-х [68]. Сущность закона заключается в том, что небольшие по величине ошибки описывает плотность нормального закона, а за точкой перехода (breakpoint) начинает действовать экспоненциальный закон (см. рисунке 3.1). Недостаток данного подхода в том, что функция вероятности на некотором интервале превысит единицу, таким образом носитель функции окажется ограничен, что противоречит условиям задачи.

Второй вариант подразумевает смену в точке перехода не плотностей, а функций вероятности. При этом график комбинации законов довольно плавный, а плотность вероятности имеет характерный излом в точке перехода. Метод комбинации функций вероятности малоизучен из-за сложностей, возникающих при попытке формульного описания новой плотности вероятности.

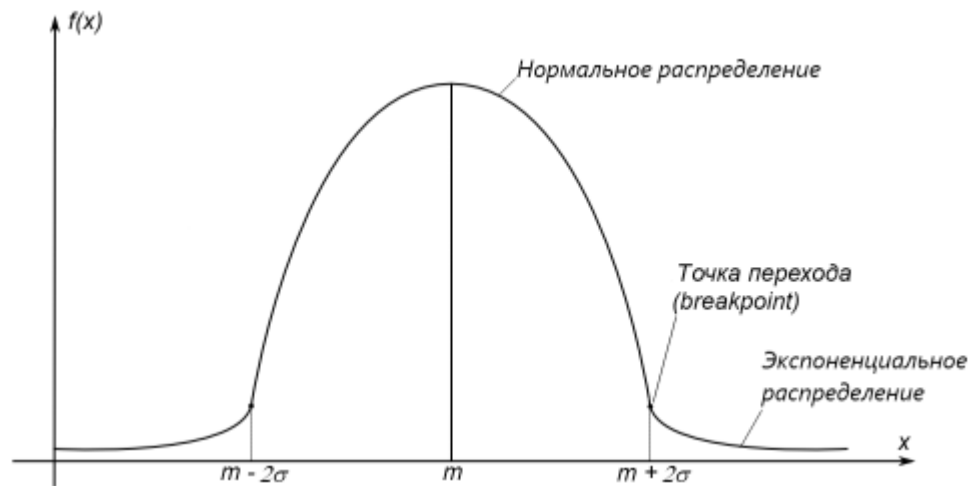


Рисунок 3.1 – Составное распределение Normex

Третий вариант получения составного закона - суммирование плотностей вероятности, с учетом коэффициента соотношения. При этом выделяют плотность, описывающую типичное отклонение и плотность, описывающую нетипичное отклонение. Коэффициент соотношения показывает, насколько реже происходят нетипичные отклонения. В общем виде это можно представить, как:

$$f = (1 - p) \cdot f_{core} + p \cdot f_{tail}, \quad (3.5)$$

где f_{core} , f_{tail} – плотности вероятности типичного (core) и нетипичного (tail) законов распределения;

p – коэффициент соотношения (весовой коэффициент).

Данный метод можно встретить в современных работах [72] и документах ИКАО [89]. В качестве типичного отклонения обычно принимают закон Гаусса. В качестве нетипичного отклонения принимают:

- нормальное распределение с большей дисперсией;
- равномерное распределение;
- экспоненциальное распределение;
- распределение Лапласа.

Применение нормального закона с большей дисперсией математически некорректно, при использовании же равномерного распределения функция вероятности составного закона при некоторых значениях превысит единицу, то

есть область определения будет ограничена. Таким образом, из перечисленных вариантов закона для нетипичного отклонения применять можно только экспоненциальное распределение и распределение Лапласа. Большую трудность при работе с составными законами представляет подбор коэффициента соотношения, такого, чтобы рассматриваемое распределение соответствовало экспериментальным данным, а также создание контрольных примеров для оценки нового распределения.

Как видно из вышеизложенного, существуют распределения, позволяющие регулировать хвосты функции, однако для точного подбора параметров необходимо иметь некоторый эталон. Экспериментальные данные за относительно небольшой период могут дать информацию для хорошего описания типичных отклонений. При этом редкие события могут не случиться в обозреваемом периоде, и созданная на основе этих данных функция будет некорректна. Проблему учета редких событий в ИКАО решили при помощи эталонного распределения [89], аппроксимирующего экспериментальные данные при среднеквадратической ошибке равной 1. В качестве эталона выбрано обобщенное распределение Парето, имеющего функцию плотности вероятности:

$$1 - \left(1 + \xi \frac{(x - u)}{\beta}\right)^{-1/\xi}, \quad (3.6)$$

где $u = 3.2$ – параметр сдвига;

$\xi = -0.089$ – параметр формы;

$\beta = 0.31$ – параметр масштаба.

Так как параметр формы ξ отрицательный, то носитель функции распределения Парето определен не на всей числовой области. Слева интервал ограничен значением u . Двигаясь по числовой оси вправо, функция, после прямолинейного участка, резко устремляется в область малых значений. Принимая за интервал определения область, где функция имеет плавный вид, будем рассматривать обобщенное распределение Парето на интервале (3.2, 6.5). График функции вероятности распределения занимает промежуточную позицию между нормальным и двойным экспоненциальным законами. Из этого можно

сделать вывод о том, что хвост реального распределения ошибки измерения координат ВС имеет хвосты намного тяжелее, нежели у распределения Гаусса, и в то же время легче, чем те что имеет классическое распределение Лапласа (см. рисунок 3.2). Данное наблюдение подтверждает претензии, предъявляемые к распределению Лапласа, дающему излишне консервативные результаты [14, 89].

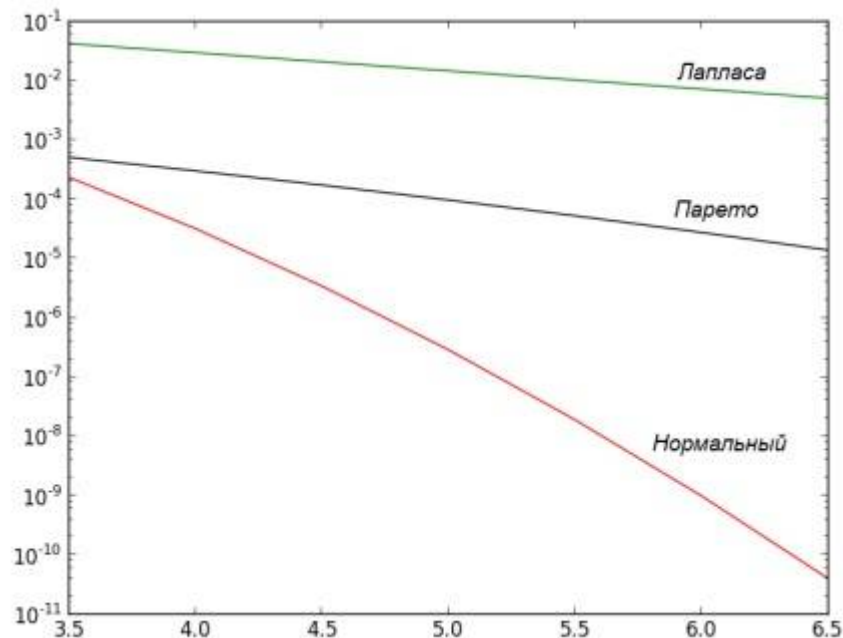


Рисунок 3.2 – Графики функций вероятности законов распределения: нормального, Лапласа и обобщенного Парето

Имея эталонное распределение, можно разработать новое распределение, позволяющее корректно описывать реальные данные. Из рассмотренных вариантов приемлемыми можно считать обобщенный закон Лапласа, а также составные законы.

Наиболее близким к распределению Парето является обобщенное распределение Лапласа при $a = 0.12$ (см. рисунок 3.3). Проявляющееся в левой части графика на рисунке 3.4 (численные данные – в таблице 3.1) расхождение сокращается на исследуемом интервале до пренебрежимо малой величины. Таким образом, обобщенный закон Лапласа, дающий несколько более тяжелые хвосты для сравнительно небольших отклонений, нежели эталонный закон, можно считать более консервативным.

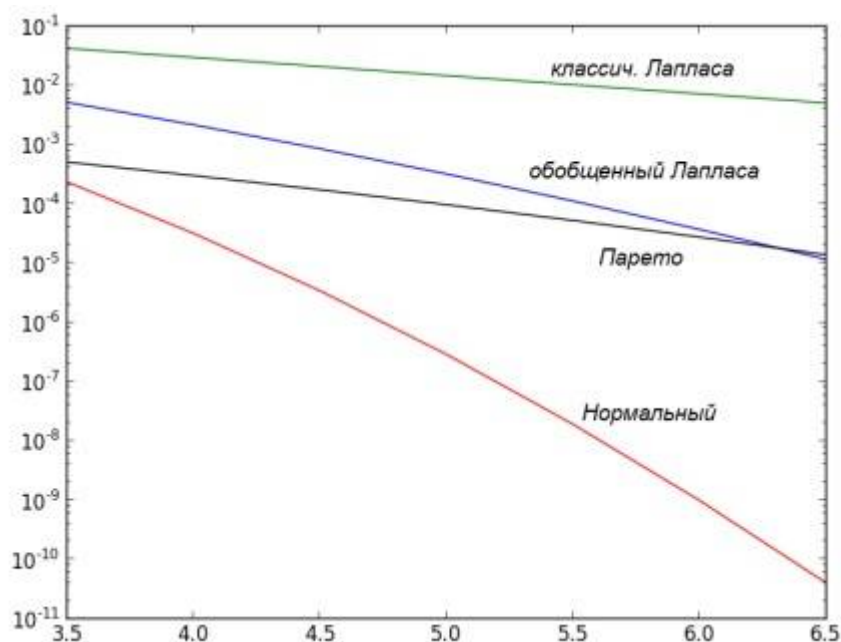


Рисунок 3.3 – Графики функций вероятности обобщенного закона Лапласа при $a = 0.12$

Таблица 3.1 – Значения вероятности, полученные для различных законов распределения

х	Нормальный закон	Классический закон Лапласа	Обобщенный закон Парето	Обобщенный закон Лапласа
3.5	0.00023	0.04208	0.00051	0.00525
4.0	0.00003	0.02955	0.00029	0.00214
4.5	3.4e-06	0.02075	0.00017	0.00084
5.0	2.9e-07	0.01457	9.7e-05	31.2e-05
5.5	1.9e-08	0.01023	5.2e-05	11.0e-05
6.0	9.8e-10	0.00718	2.7e-05	3.6e-05
6.5	4.0e-12	0.00504	1.4e-05	1.2e-05

Что касается составных распределений, то наиболее приемлемой заменой нормальному закону могут служить два из них: в первом плотность вероятности равна сумме нормального и экспоненциального распределений, во втором – сумме распределений нормального и Лапласа:

$$f_{norm_exp} = (1-p) \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) + p \cdot \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{x}{\sigma}\right), \quad (3.7)$$

где $p = 0.98610$;

$$f_{norm_Lap} = (1-p) \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) + p \cdot \frac{\sqrt{2}}{2\sigma} \exp\left(-\frac{\sqrt{2} \cdot |x|}{\sigma}\right), \quad (3.8)$$

где $p = 0.71226$.

Графики функций вероятности представленных законов, в сравнении с графиком эталонного распределения Парето представлены на рисунке 3.4. Для наглядности также отображен график нормального закона (красная кривая) и классического закона Лапласа (зеленая кривая). Числовые значения можно найти в таблице 3.2.

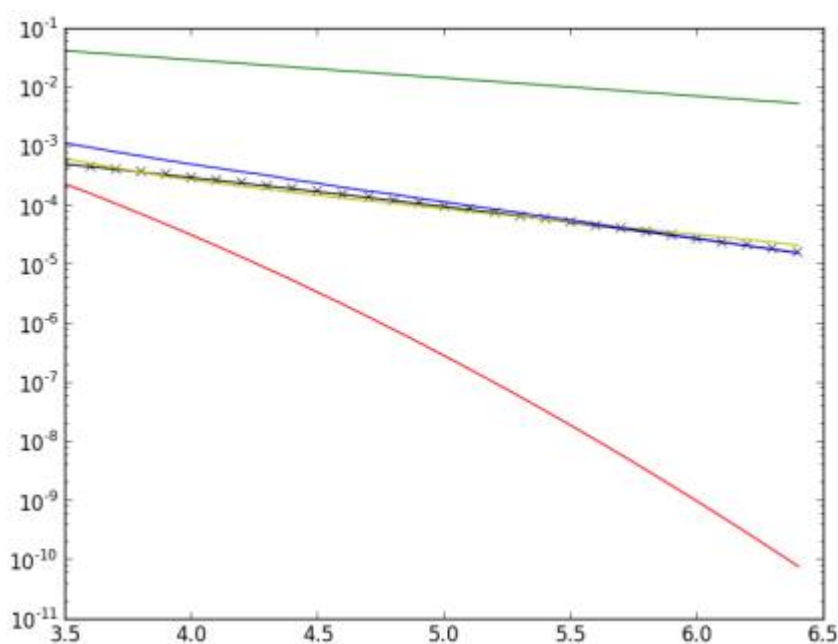


Рисунок 3.4 – Графики функций вероятности законов распределения:

—×— Парето; — желтая — составного f_{norm_exp} ; — синяя — составного f_{norm_Lap}

Как видно из графиков и таблицы, представленных выше, составные законы дают результаты лишь незначительно отличающиеся от эталонного распределения.

Таблица 3.2 – Значения вероятности, полученные для различных законов распределения

х	Обобщенный закон Парето	Составной закон f_{norm_exp}	Составной закон f_{norm_Lap}
3.5	0.00051	0.00062	0.00114
4.0	0.00029	0.00027	0.00050
4.5	0.00017	0.00015	0.00024
5.0	9.7e-05	8.8e-05	11.4e-05
5.5	5.2e-05	5.3e-05	5.6e-05
6.0	2.7e-05	3.3e-05	2.8e-05
6.5	1.4e-05	2.2e-05	1.5e-05

Посмотрим, как три полученных распределения (обобщенный закон Лапласа и два составных распределения) ведут себя на продолжении числовой оси. Для этого сделаем правую границу рассматриваемого интервала равной 15. Левую границу сделаем равной 2 (см. рисунок 3.5). Числовые характеристики распределений на данном интервале приведены в таблице 3.3.

Как видно из рисунка 3.5, хвосты полученных распределений ведут себя по-разному. Составное распределение, образованное суммой плотностей нормального и экспоненциального законов дает самые консервативные результаты, менее тяжелый хвост у второго составного распределения, и, наконец, обобщенный закон Лапласа довольно быстро уходит в область малых значений. Это необходимо учитывать при построении моделей оценки уровня безопасности полетов.

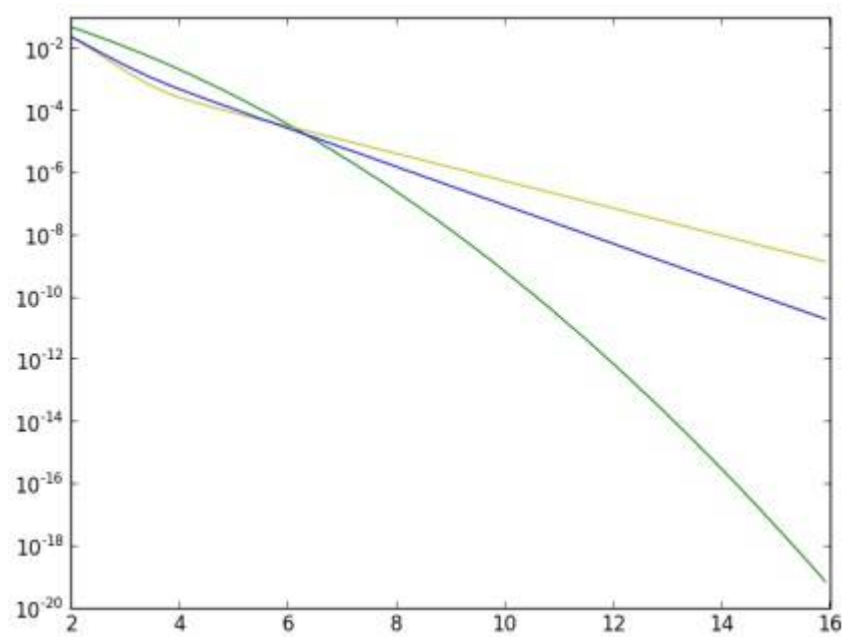


Рисунок 3.5 – Графики функций вероятности законов распределения:

— обобщенного Лапласа; — составного f_{norm_exp} ;

— составного f_{norm_Lap}

Таблица 3.3 – Значения вероятности, полученные для различных законов распределения

х	Обобщенный закон Лапласа	Составной закон f_{norm_exp}	Составной закон f_{norm_Lap}
2	0.05058	0.02387	0.02424
3	0.01173	0.00198	0.00296
4	0.00214	0.00027	0.00050
5	31.2 e-05	8.8e-05	11.4 e-05
6	3.6e-05	3.3e-05	2.8e-05
7	3.4e-06	1.2e-05	6.8e-06
8	2.6e-07	4.3e-06	1.6e-06
9	1.5e-08	1.6e-06	3.9e-07
10	6.8e-10	5.7e-07	9.3e-08
11	2.4e-11	2.0e-07	2.2e-08

Перейдем к двумерным законам распределения, позволяющим рассчитывать распределения ошибок определения координат ВС. Эталонное распределение для этого случая не создано, поэтому при поиске закона, будем пользоваться полученным ранее принципом: хвосты функции распределения должны быть существенно тяжелее, чем у нормального закона и легче, нежели у классического закона Лапласа. Данному критерию вполне соответствует закон, разработанный Т. Ж. Козубовским [90]:

$$f(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \cdot K_0 \left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}}} \cdot \sqrt{x^2\sigma_2/\sigma_1 - 2\rho xy + y^2\sigma_1/\sigma_2} \right), \quad (3.9)$$

где K_0 – модифицированная функция Бесселя третьего рода нулевого порядка.

На рисунке 3.6 представлен график плотности вероятности закона, а на рисунке 3.7 – сравнение рассматриваемого закона (обозначен как н. Лапласа) с двумерным нормальным и двумерным классическим законом Лапласа, при среднеквадратических погрешностях равных 1, и нулевом коэффициенте корреляции. Рассчитанные значения вероятностей приведены в таблице 3.4.

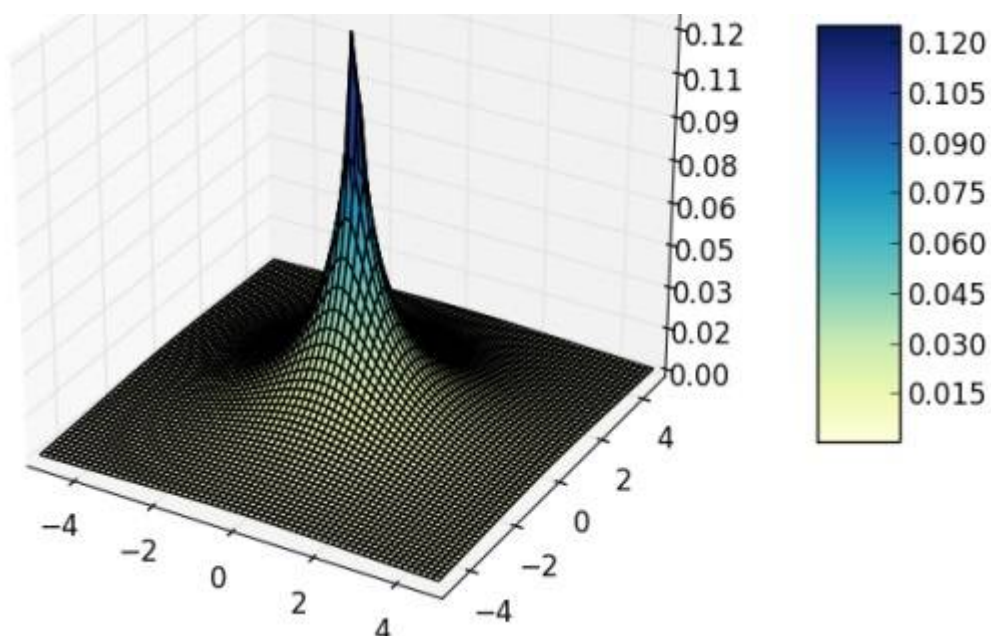


Рисунок 3.6 – Плотность вероятности двумерного обобщённого закона Лапласа

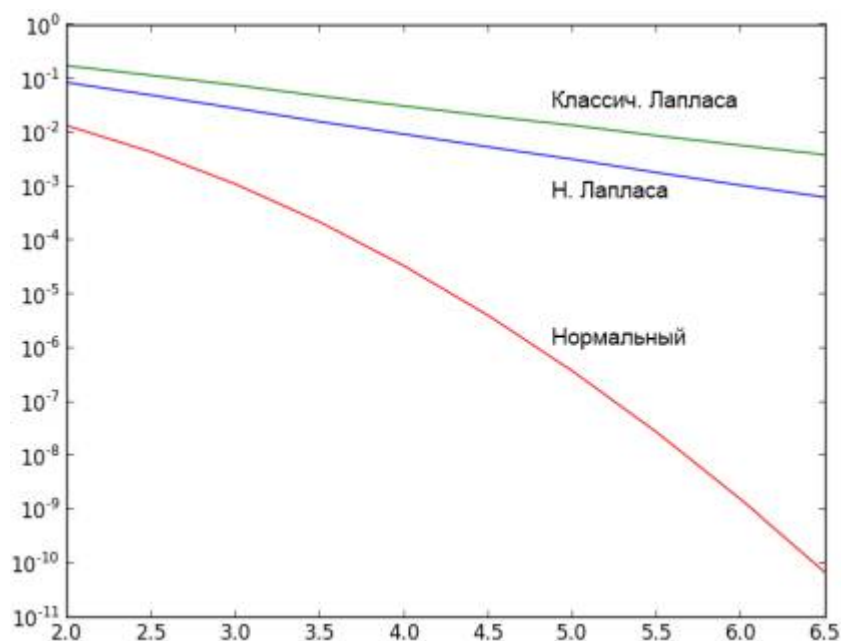


Рисунок 3.7 – График нового двумерного распределения Лапласа, в сравнении с распределениями: нормальным и классическим Лапласа

Таблица 3.4 – Значения вероятности, полученные для двумерных законов распределения

х	Нормальный закон	Классический закон Лапласа	Новый закон Лапласа
2.0	0.013534	0.17616	0.08583
2.5	0.00439	0.11691	0.05007
3.0	0.00111	0.07699	0.02865
3.5	0.00022	0.04907	0.01646
4.0	3.4e-5	0.03231	0.00964
4.5	4.0e-06	0.02014	0.00528
5.0	3.7e-07	0.01342	0.00311
5.5	2.7e-08	0.00896	0.00188
6.0	1.5e-09	0.00590	0.00106
6.5	6.7e-11	0.00389	0.00063

Недостаток рассмотренного двумерного распределения состоит в невозможности регулировки хвостов функции распределения. Решить проблему

можно, используя составные распределения. Так, плотность вероятности, образованная суммой нормального закона и рассмотренного выше закона Лапласа имеет вид:

$$f(x, y) = (1 - p) \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} + \\ + p \cdot \frac{1}{\pi\sigma_1\sigma_2} \cdot K_0\left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_1\sigma_2}} \cdot \sqrt{x^2\sigma_2/\sigma_1 + y^2\sigma_1/\sigma_2}\right), \quad (3.10)$$

Составное распределение позволяет отрегулировать хвосты функции, делая их более или менее тяжелыми. Так как эталонного распределения для двумерного случая нет, примем $p = 0.5$. Плотность вероятности такого распределения при СКП, равных 1, представлена на рисунке 3.8.

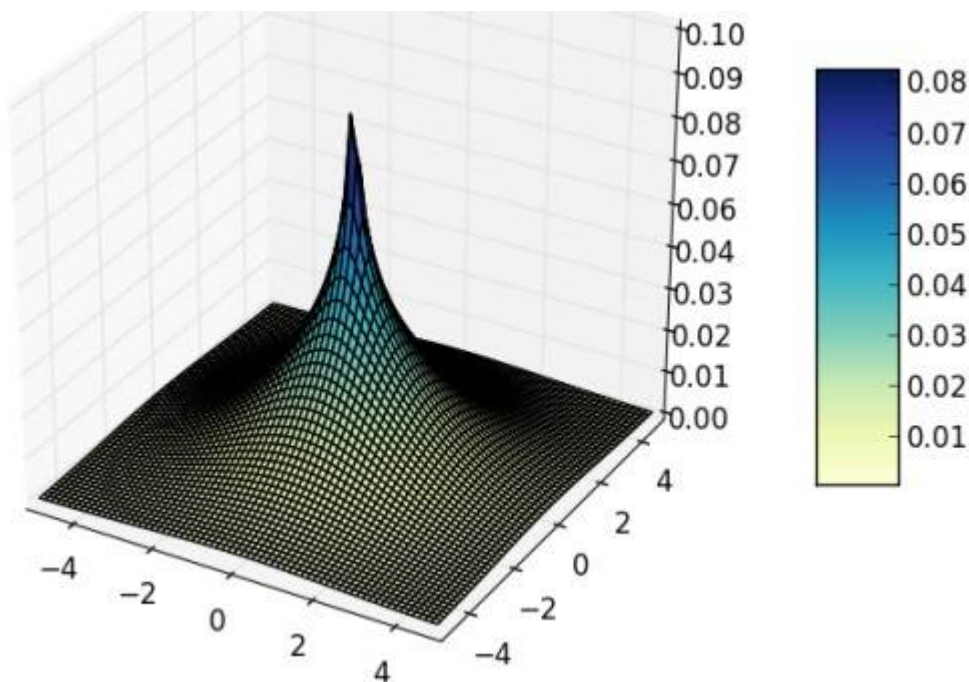


Рисунок 3.8 – Плотность вероятности составного распределения

Исследования показали, что широко применяемое нормальное распределение хорошо аппроксимирует небольшие по величине, часто возникающие ошибки определения координат ВС. В то же время, закон Гаусса занижает вероятность появления больших и редких ошибок. Замена нормального распределения на распределение Лапласа не дала

удовлетворительных результатов, так как оценка, полученная при использовании двойного экспоненциального закона излишне консервативна.

Разработанные одномерные законы близки к эталонному распределению, предложенному ИКАО, но расходятся на продолжении числовой оси. В связи с этим их можно использовать для задания различных сценариев расчета: оптимистического, пессимистического и среднего. Разработанные двумерные законы не имеют эталонного примера, однако соответствуют общему требованию к распределениям ошибок определения координат ВС. В целом, новые законы можно рекомендовать как хорошую замену нормального и двойного экспоненциального распределений.

3.2 Разработка методики расчета поля ошибок

Поле ошибок представляет собой базу данных, содержащую информацию о погрешностях определения координат ВС для точек воздушной трассы, либо всего района. Для расчета вероятности нарушения норм эшелонирования необходимо иметь информацию о среднеквадратических погрешностях, а также ориентацию эллипса ошибок.

В предыдущей главе были разработаны методы расчета СКП и ориентации эллипса ошибок для азимутально-дальномерных и дальномерно-дальномерных систем. Применяя полученные формулы для анализа точек маршрута или всего района, получим поле ошибок.

Поле ошибок воздушной трассы находится путем определения координат ее точек, взятых с шагом 1 км, и расчета характеристик эллипса ошибок: большой и малой полуосей и угла ориентации.

Длина трассы в радианах $S_{\text{рад}}$ определяется как [91]:

$$S = \arccos (\sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \cos [\lambda_2 - \lambda_1]), \quad (3.11)$$

где φ_1, φ_2 – широты начальной и конечной точек трассы;

λ_1, λ_2 – долготы начальной и конечной точек трассы.

Длина трассы в километрах $S_{\text{км}}$:

$$S_{км} = R_3 \cdot S_{рад}, \quad (3.12)$$

где $R_3 = 6372.9\text{км}$ – средний радиус Земли.

Начальный азимут (из первой точки) находится как:

$$A = \arctg \left(\frac{\cos \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2}{\sin(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{\sin \varphi_1}{\operatorname{tg}(\lambda_2 - \lambda_1)} \right) \quad (3.13)$$

Далее, имея угол A и расстояние (для шага $\Delta S = 1\text{км}$), решаем прямую геодезическую задачу для сферических треугольников:

$$s = \Delta S / R_3. \quad (3.14)$$

$$B_2 = \arcsin(\sin B_1 \cdot \cos s + \cos B_1 \cdot \sin s \cdot \cos A),$$

$$L_2 = L_1 + \arccos \left(\frac{\cos s - \sin B_2 \cdot \sin B_1}{\cos B_1 \cdot \cos B_2} \right). \quad (3.15)$$

Подобным образом находим координаты всех остальных точек трассы. Знание координат навигационного маяка и точек трассы позволяет, по приведенным ранее формулам найти наклонную дальность и прямой азимут. Из этих данных находим величину СКП и ориентацию эллипса ошибок.

Для расчета поля ошибок на трассе разработана программа «Поле ошибок воздушной трассы». Пример рассчитанного поля ошибок для азимутально-дальномерных систем представлен в таблице 3.5. Пример рассчитанного поля ошибок для дальномерно-дальномерных систем представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.5 – Поле ошибок азимутально-дальномерной системы

Координаты точки		Ориентация эллипса ошибок, град	СКП ази- мутально- го канала, км	СКП даль- но- мерного канала, км
60°6'0" с.ш.	26°27'24" в.д.	128.5	2.04	0.61
60°5'55" с.ш.	26°28'28" в.д.	128.7	2.02	0.61
60°5'51" с.ш.	26°29'32" в.д.	129.0	2.01	0.61
60°5'47" с.ш.	26°30'37" в.д.	129.2	1.99	0.61

Таблица 3.6 – Поле ошибок дальномерно-дальномерной системы

Координаты точки		Ориентация эллипса ошибок, град	малая полуось эллипса ошибок, км	большая полуось эллипса ошибок, км
59°48'33" с.ш.	30°10'58" в.д.	12.2	0.65	4.10
59°48'27" с.ш.	30°12'2" в.д.	12.4	0.65	4.08
59°48'21" с.ш.	30°13'5" в.д.	12.6	0.65	4.06
59°48'15" с.ш.	30°14'8" в.д.	13.0	0.64	4.04

3.3 Разработка методики расчета зон конфликтных ситуаций

В настоящее время зоны конфликтных ситуаций рассчитываются геометрическим методом [92], который позволяет выявить случаи нарушения норм эшелонирования, т.е. опасных сближений. При этом применяются принципы концепции круговой защищенной зоны (Circle Protection Area, CPA), размеры которой задаются в соответствии с интервалами бокового и продольного эшелонирования.

Зоной конфликтных ситуаций считается область, где происходят пересечение круговых защищенных зон двух ВС, т.е. где происходит нарушение интервала эшелонирования. Определение конфликтной зоны поясняется на рисунке 3.9.

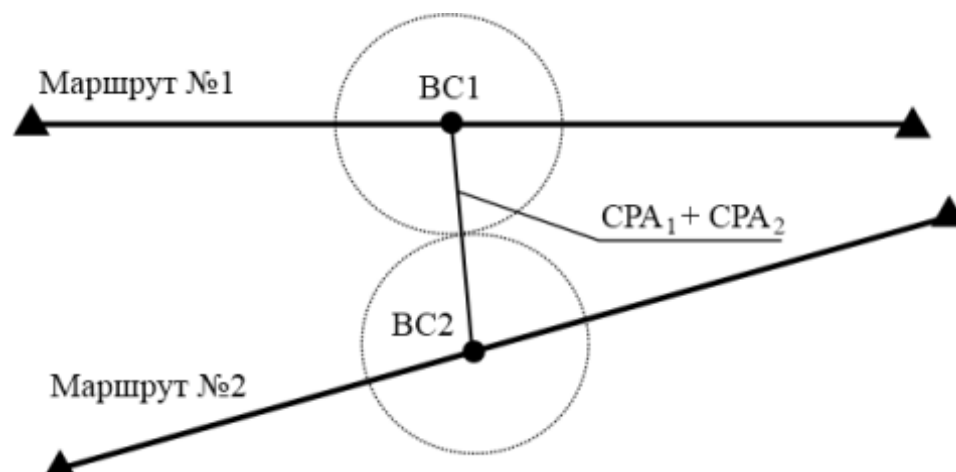


Рисунок 3.9 – К расчету зон конфликтных ситуаций

На рисунке 3.10 представлен график, показывающий размеры зоны конфликтных ситуаций для случая параллельных трасс. Радиус защищенной зоны для обоих маршрутов одинаков и равен 15 км. По оси абсцисс отложена протяженность первого маршрута, по оси ординат – второго. Точки синего и зеленого цвета показывают соответственно начало и конец зоны конфликтных ситуаций для данной точки первого маршрута. Так, если ВС находится на 50-м километре первого маршрута, то суда, находящиеся на интервале от 47 до 80 км второго маршрута конфликтуют с ним (пояснением к графику рисунку 3.10 служит рисунок 3.11).

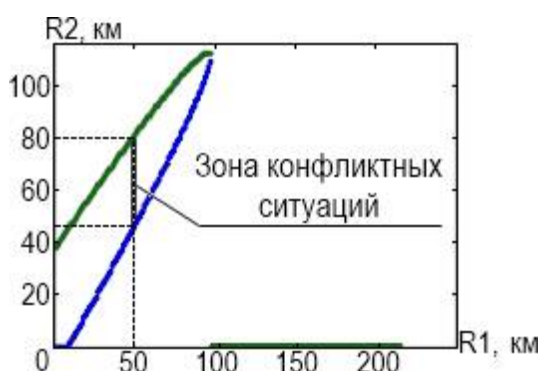


Рисунок 3.10 – График зоны конфликтных ситуаций для параллельных трасс

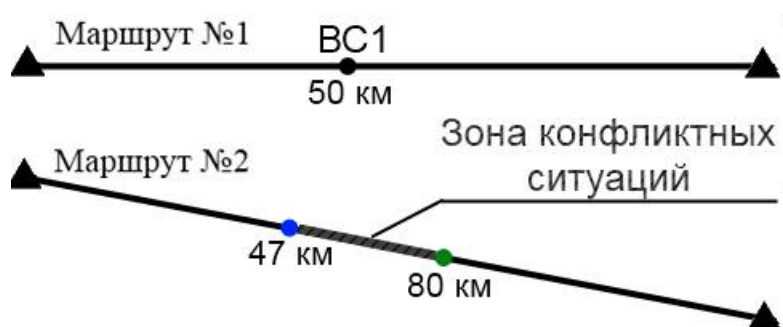


Рисунок 3.11 – Пояснение к графику зоны конфликтных ситуаций

Данный способ выявления конфликтных ситуаций используется в STCA (Short Term Conflict Alert) и MTCD (Medium Term Conflict Detection).

STCA является одним из инструментов системы Safety Nets [93] и позволяет на основе данных РТС наблюдения выявить нарушения норм эшелонирования и произвести прогноз на глубину до двух минут.

MTCD – инструмент, позволяющий оценить план полета ВС на предмет конфликтных ситуаций. В качестве исходных данных используется план полета, глубина прогноза составляет 20 минут [94].

Описанный метод [92] не учитывает влияние погрешностей РТС. Для учета данного немаловажного фактора был разработан вероятностный метод расчета размеров зоны конфликтных ситуаций. Суть предлагаемой методики состоит в расчете вероятности появления первого самолета в пределах круговой защитной зоны второго самолета. Текущее значение вероятности находится как интеграл от распределения ошибки определения координат первого ВС взятый на площади круговой защитной области второго ВС. Предельно допустимое значение вероятности равно $3.5 \cdot 10^{-8}$ (см. рисунок 3.12).

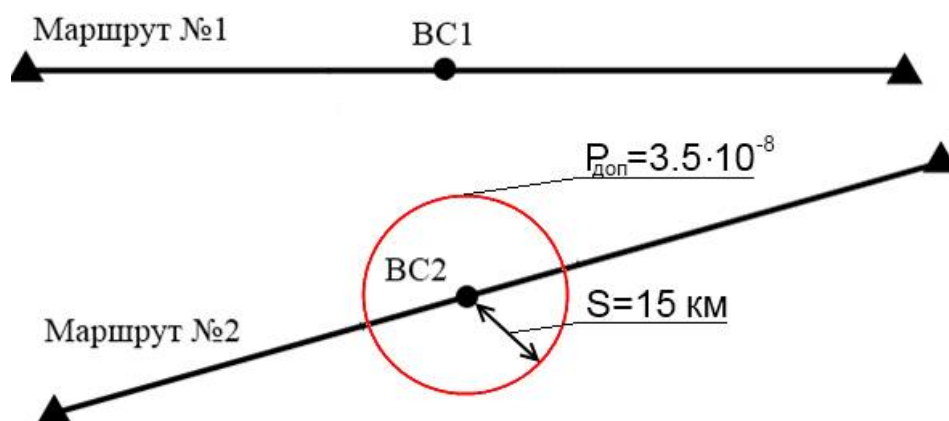


Рисунок 3.12 – Пояснение к вероятностному методу расчета зоны конфликтных ситуаций

Алгоритм расчета размеров зоны конфликтных ситуаций можно свести к следующим шагам:

1) На основе данных поля ошибок о погрешностях определения координат ВС в данной точке воздушной трассы, определить вероятность нахождения судна, совершающего полет по первому маршруту, в пределах своего эшелона.

2) По данным поля ошибок второго маршрута, рассчитать вероятность появления второго ВС в пределах круговой защитной зоны первого судна. При этом во внимание принимается взаимное расположение двух ВС, а также

размеры и ориентация эллипса ошибок второго судна. Расчет произвести для каждой точки второго маршрута.

3) Сравнить полученную вероятность нарушения норм эшелонирования с нормативной ($3.5 \cdot 10^{-8}$). Результаты анализа представить в виде графика.

Важной проблемой при расчете, является выбор закона распределения ошибки. Проведенный в предыдущих главах анализ показал, что взамен широко применяемого нормального закона целесообразно использовать составное распределение, представляющее собой сумму плотностей вероятности двумерного нормального закона и обобщенного закона Лапласа, как наиболее точно аппроксимирующее данные измерений.

На рисунке 3.13 показана зона конфликтных ситуаций, рассчитанная с применением нормального, и составного распределений (на графике обозначены как 1 и 2).

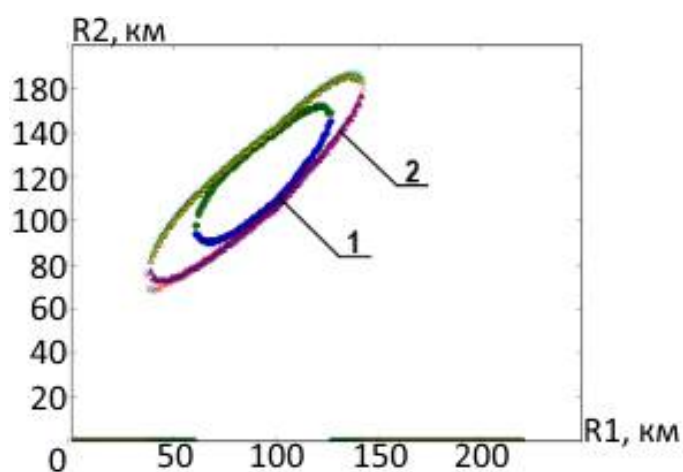


Рисунок 3.13 – Зона конфликтных ситуаций, рассчитанная вероятностным методом; R1 – первая воздушная трасса, R2 – вторая воздушная трасса

Результаты расчета зон конфликтных ситуаций можно использовать как справочный материал для диспетчера УВД, либо непосредственно внести данные в АС УВД, для выдачи предупреждения о том, что положение воздушных судов в имеющейся конфигурации может повлечь нарушение норм эшелонирования (таким образом усовершенствовать имеющиеся системы STCA и MTCD).

3.4 Разработка комплекса программ расчета зон конфликтных ситуаций

Разработанные методы были реализованы в виде комплекса компьютерных программ расчета зон конфликтных ситуаций (коды программ представлены в Приложении А). Программы написаны на языке высокого уровня Visual Basic 6 и Python 3.2, и позволяют:

- 1) рассчитывать поле ошибок воздушной трассы для азимутально-дальномерных и дальномерно-дальномерных систем: радиолокаторов, систем VOR/DME и DME/DME;
- 2) рассчитывать зоны конфликтных ситуаций с учетом погрешностей РТС.

Рассмотрим пример пересекающихся воздушных трасс и на его основе составим примерное представление о разнице в размерах зон конфликта, рассчитанных различными методами. Пусть РТС находится в отдалении от точки пересечения трасс, как это показано на рисунке 3.13. Тогда зона конфликтных ситуаций, рассчитанная вероятностным методом начинается на 34км раньше и оканчивается на 41км дальше, нежели зона конфликтных ситуаций, рассчитанная геометрическим методом.

На рисунке 3.14 показано сравнение результатов расчета, выполненного с применением геометрической и вероятностной методик. Из сравнения графиков видно, что при вероятностном расчете зона может быть не только больше, за счет учета погрешности определения координат ВС, но и в некоторых местах меньше чем при геометрическом расчете. Это вызвано разной постановкой задачи, разными определениями самого конфликта.

В целом, сравнивать вероятностный метод расчета зон конфликтных ситуаций с геометрическим довольно сложно, так как размер зоны зависит от многих факторов: расположения воздушных трасс, места установки и характеристик РТС. Потому разницу между рассматриваемыми методами невозможно выразить однозначно.

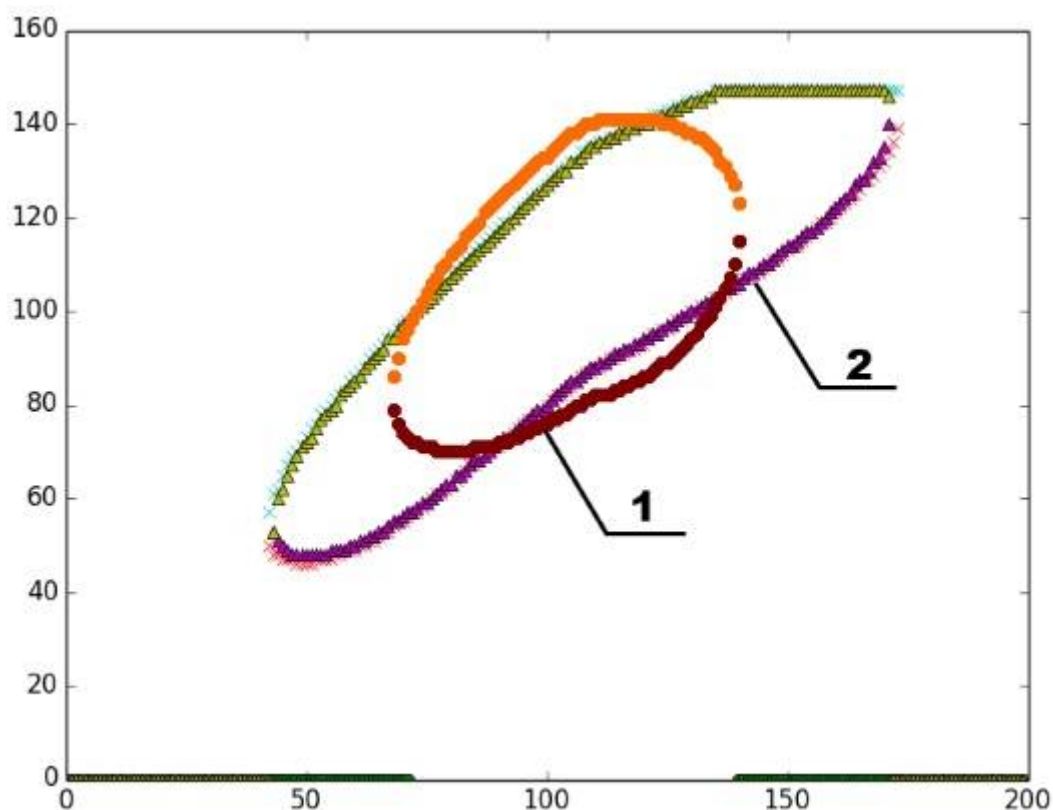


Рисунок 3.14 – Зона конфликтных ситуаций, рассчитанная:

1 – геометрическим методом; 2 – вероятностным методом

3.5 Выводы

Разработка новой методики расчета зон конфликтных ситуаций повлекла за собой решение ряда важных проблем. Так, была разработана методика расчета среднеквадратической ошибки определения координат воздушного судна, находящегося в заданной точке воздушной трассы. Появилась возможность рассчитывать поля ошибок для последующего использования в оперативных задачах, а также для определения вероятности нарушения норм эшелонирования.

Были проанализированы применяемые в настоящее время законы распределения ошибок определения координат ВС, отмечены их недостатки, и, на основе рекомендаций ИКАО, применены другие распределения (обобщенный закон Лапласа и составное распределение).

Наконец, на основе данных поля ошибок, а также при использовании предложенных распределений, разработана новая методика расчета зон конфликтных ситуаций. Данная методика использует вероятностные методы, в противовес применяемым в настоящее время геометрическим, и позволяет учесть влияние погрешности определения координат ВС.

Исходя из вышеизложенного, рекомендуется внедрить разработанную методику расчета зон конфликтных ситуаций в производственную практику, как замену инструментам, использующим геометрический подход (в частности STCA и MTCD). Методика может использоваться персоналом авиапредприятий непосредственно или входить в состав автоматизированных систем. Это позволит снизить частоту инцидентов, повысить безопасность полетов и уменьшить нагрузку на диспетчера УВД.

Глава 4. Расчет ЭХ средств РТОП в Санкт-Петербургском центре ОВД

4.1 Санкт-Петербургский центр ОВД: структура воздушного пространства и оснащённость трасс РТС навигации, наблюдения и связи

Санкт-Петербургский центр ОВД является структурным подразделением филиала «Аэронавигация Северо-запада» ФГУП «Госкорпорация по организации воздушного движения». Ежегодно он обслуживает более 700000 полетов воздушных судов различных министерств, ведомств, а также особо важные правительственные рейсы [95].

Обслуживание воздушного движения на воздушных трассах Санкт-Петербургского района обеспечивается районным центром Единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД), в Санкт-Петербургском аэроузле – аэроузловым диспетчерским центром (АДЦ), в районе аэродрома Пулково – аэродромно-командным диспетчерским пунктом (АКДП).

Центр оснащен современным комплексом средств автоматизации управления воздушным движением (КСА УВД) Альфа версия 3. ОВД в районе аэродрома Пулково и Санкт-Петербургском аэроузле осуществляется с использованием автоматизированной системы управления воздушным движением (АС УВД) «Синтез-А2». В практику ОВД внедрены современные технологии, облегчающие экипажам воздушных судов выполнение полетов и обеспечивающие качественно новый уровень обслуживания воздушного движения. Проводится большая работа по оптимизации структуры воздушного пространства с учетом стандартов и рекомендуемой практики ИКАО [95, 96].

Зона ответственности Санкт-Петербургского РЦ ЕС ОрВД подразделяется на 6 секторов ОВД, один из которых предназначен для ОВД вне воздушных трасс. При полетах ниже нижнего безопасного эшелона ОВД осуществляется диспетчерами МДП, воздушное пространство зоны ответственности МДП разделено на 2 сектора. Санкт-Петербургский РЦ ЕС ОрВД взаимодействует со смежными РЦ: Таллинн, Тампере, Вологда, Москва, Великие Луки, Санкт-

Петербургским АДЦ, а также с органами ВВС и ПВО. Санкт-Петербургский РЦ ЕС ОрВД, благодаря своему географическому и геополитическому положению, является одним из самых загруженных в России. Разветвленная сеть воздушных трасс, находящихся в зоне ответственности, простирается до удаления 450км от Санкт-Петербурга.

В воздушном пространстве центра ОВД проходят участки 41 воздушной трассы, из них 35 – международные, протяженностью около 8920км, 6 – внутренние воздушные трассы протяженностью около 1355км, площадь района ответственности около 334450 кв.км. За 2010 год центром обслужено 730 000 воздушных судов. Наиболее загруженными секторами РЦ ЕС ОрВД являются: сектор «Юго-восток» (максимальная часовая интенсивность – 28 ВС/ч, максимальная суточная ИВД – 443 ВС) и сектор «Запад» (максимальная часовая интенсивность – 26 ВС/ч, максимальная суточная ИВД – 329 ВС).

В 2010г. начался процесс укрупнения Санкт-Петербургского центра ОВД в рамках федеральной программы укрупнения центров ОВД «12+1», предусматривающий присоединение Петрозаводского и Великолукского РЦ. В перспективе районный центр будет насчитывать более 20 секторов ОВД [95, 96].

Обслуживание воздушного движения на воздушных трассах Санкт-Петербургского района осуществляется с применением современных средств РТОП. Рассмотрим эти средства подробнее.

Используемые РТС связи (без указания частот), а также их основные характеристики представлены в таблице 4.1.

Используемые РТС навигации (без указания частот), а также их основные характеристики представлены в таблице 4.2.

Используемые РТС наблюдения (без указания частот), а также их основные характеристики представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.1 – РТС связи Санкт-Петербургского центра ОВД

Оборудование	Мощность излучения, Вт	Тип антенны	Поляризация	Тип модуляции	Коэффициент усиления, дБ	Ширина ДНА		Наклон, град	Координаты	Высота антенны от земли, м
						В гор. плоскости	В верт. плоскости			
Радиостанции ОВЧ диапазона										
АДЦ «Полет-1»	50	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	59°48'06" 30°15'23"	14
АДЦ «Баклан-РН»	5	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	59°48'06" 30°15'23"	14
АКДП «Полет-1»	50	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	59°48'06" 30°15'42"	52
АКДП «Баклан-РН»	5	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	59°48'06" 30°15'42"	52
РЦ УВД «Баклан-РН»	5	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	59°48'29" 30°16'38"	6
ПРЦ «Полет-2А»	50	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	59° 48'36" 30° 09'30"	21
ПРЦ «Полет-2АМ»	50	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	59° 48'36" 30° 09'30"	21

Оборудование	Мощность излучения, Вт	Тип антенны	Поляризация	Тип модуляции	Коэффициент усиления, дБ	Ширина ДНА		Наклон, град	Координаты	Высота антенны от земли, м
						гор. в плоскости	верт. в плоскости			
ПРЦ «Фазан-П2»	50	АНК 100/150	верт.	АМ	2	360	180	0	59° 48'36" 30° 09'30"	21
АРТР Тихвин «Полет-1»	50	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	59°39'00" 33°33'00"	28/16
АРТР Тихвин «Баклан-РН»	5	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	59°39'00" 33°33'00"	28/16
АРТР Боровичи «Полет-1»	50	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	58°23'00" 33°56'00"	255/153
АРТР Боровичи «Баклан-РН»	5	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	58°23'00" 33°56'00"	255/153
АРТР Лодейное поле «Полет-1»	50	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	60°43'00" 33°29'00"	65/39
АРТР Лодейное поле «Баклан- РН»	5	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	60°43'00" 33°29'00"	65/39
АРТР Кириши «Полет-1»	50	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	58°43'09" 32°00'40"	86

Оборудование	Мощность излучения, Вт	Тип антенны	Поляризация	Тип модуляции	Коэффициент усиления, дБ	Ширина ДНА		Наклон, град	Координаты	Высота антенны от земли, м
						В гор. плоскости	В верт. плоскости			
АРТР Кириши «Баклан-РН»	5	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	58°43'09" 32°00'40"	86
АРТР Залучье «Полет-1»	50	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	57°40'00" 31°48'00"	255
АРТР Залучье «Баклан-РН»	5	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	57°40'00" 31°48'00"	255
АРТР Залучье «Баклан-РН»	5	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	57°40'00" 31°48'00"	255
АРТР Новгород «Полет-1»	50	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	58°30'50" 31°13'35"	35
АРТР Новгород «Баклан-РН»	5	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	58°30'50" 31°13'35"	35
АРТР Шумило- во «Полет-1»	50	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	60°45'00" 30°00'00"	30
АРТР Шумило- во «Баклан-РН»	5	дискоконусная	верт.	АМ	2	360	180	0	60°45'00" 30°00'00"	30

Оборудование	Мощность излучения, Вт	Тип антенны	Поляризация	Тип модуляции	Коэффициент усиления, дБ	Ширина ДНА		Наклон, град	Координаты	Высота антенны от земли, м
						В гор. плоскости	В верт. плоскости			
Радиостанции ВЧ диапазона										
ПРЦ Р-140	1кВт	УГД	гориз.	АМ	1	360	-	до 30	59°48'36" 30°09'30"	24
ПРЦ «Береза»	1кВт	УГД	гориз.	АМ	1	360	-	до 30	59°48'36" 30°09'30"	24
ПРЦ «Кедр»	1кВт	УГД	гориз.	АМ	1	360	-	до 30	59°48'36" 30°09'30"	24
ПРЦ ПП-1000	1кВт	УГД	гориз.	АМ	1	360	-	до 30	59°48'36" 30°09'30"	24

Таблица 4.2 – РТС навигации Санкт-Петербургского центра ОВД

Оборудование	Мощность излучения, Вт	Тип антенны	Поляризация	Тип модуляции	Коэффициент усиления, дБ	Ширина ДНА		Наклон, град	Координаты	Высота антенны от земли, м
						В гор. плоскости	В верт. плоскости			
Радиотехнические системы ближней навигации										
Доплеровский азимутальный маяк DVOR	100	рамочная	горизонт.	АМ, ЧМ	8	360	40	0	59°48'24.7" 30°16'36.6"	4.4
Дальномерный маяк DME	1000	щелевая	верт.	АМ импульс.	9	360	10	0	59°48'24.7" 30°16'36.6"	6

Оборудование	Мощность излучения, Вт	Тип антенны	Поляризация	Тип модуляции	Коэффициент усиления, дБ	Ширина ДНА		Наклон, град	Координаты	Высота антенны от
						В гор. плоскости	В верт. плоскости			
Приводные радиостанции										
ДПРМ-10Л РМП-200	200	зонтична я	верт.	АМ	1	360	40	0	59° 49'18" 30° 10'30"	30
ОПРС «Горка» ПАР-10С	400	ВГД	верт.	АМ	1	360	40	0	59° 49'00" 32° 21'00"	20
ОПРС «Кикери- но» ПАР-10С	400	ВГД	верт.	АМ	1	360	40	0	59° 27'00" 29° 38'00"	20
ОПРС «Кириши» ПАР-10С	400	ВГД	верт.	АМ	1	360	40	0	59° 27'00" 32° 03'00"	20
ОПРС «Кобона» ПАР-10С	400	ВГД	верт.	АМ	1	360	40	0	60° 02'00" 31° 33'00"	20
ОПРС «Котлы» ПАР-10С	400	ВГД	верт.	АМ	1	360	40	0	59° 36'00" 28° 46'00"	20
ОПРС «Осьмино» ПАР-10С	400	ВГД	верт.	АМ	1	360	40	0	59° 00'00" 29° 07'00"	20
ОПРС «Чудово» ПАР-10С	400	ВГД	верт.	АМ	1	360	40	0	59° 07'00" 31° 39'00"	20

Таблица 4.3 – РТС наблюдения Санкт-Петербургского центра ОВД

Оборудование	Мощность излучения, кВт	Тип антенны	Поляризация	Тип модуляции	Коэффициент усиления, дБ	Ширина ДНА		Наклон, град	Координаты	Высота антенны от земли, м
						В гор. плоскости	В верт. плоскости			
Радиолокаторы										
ОРЛ-А «Иртыш СКУ»	200 кВт	усеч. параболоид	гор.	АМ импульс.	31	2	35	2	59° 47'0" 30° 15'42"	9 ПРЛ 14 ВРЛ
ВРЛ-А / ВРЛ-Т МВРЛ-СВК	4 кВт	ФАР	1090-верт. 740-гориз.	АМ импульс.	25	2,3- 3,3	0,3- 45	0	59° 47'0" 30° 15'42"	35
ТРЛК «Утес»	30кВт x 2	парабалоид		имп. ЛЧМ	34,5	1	45	2	59°46'23" 30°16'45"	28
РЛК «Лира-А10»	1,8кВт	решетка, парабалоид	1090-верт. 740-гориз.	имп.	27	2,5- 3,5	45	0	59°46' 28" 30°15' 35"	28
Автоматические радиопеленгаторы										
АРП «Платан» №1	-	кольцевая		АМ	0.04	360	60	0	59° 48'12" 30° 17'06"	4
АРП «Платан» №2	-	кольцевая		АМ	0.04	360	60	0	59° 48'18" 30° 17'01'	4

4.2 Результаты расчета ЭХ средств РТОП в Санкт-Петербургском центре ОВД

4.2.1 Анализ РТС связи

Анализ РТС связи начнем с радиостанций, обеспечивающих связь с воздушными судами на местных воздушных линиях.

В Санкт-Петербургском центре ОВД, помимо радиостанций, установленных на территории аэродрома, имеется также 7 АРТР. Расположены они вблизи населенных пунктов: Шумилово, Новгород, Залучье, Боровичи, Тихвин, Кириши, Лодейное Поле.

Определение зоны покрытия ретрансляторов представляло проблему для инженерно-технического персонала службы ЭРТОС из-за отсутствия информации о рельефе местности вблизи антенн, а также невозможности проводить облеты аппаратуры. В связи с этим зоны действия ретрансляторов рассчитывались с применением упрощенных методик, что влияло на точность результатов (пример таких расчетов представлен на рисунке 4.1.

Рассмотренная выше методика расчета ЗД позволила решить данную проблему. Так, на рисунке 4.2 представлена объединенная зона действия АРТР, обслуживающих зону при высоте полета ВС 500м.

Через воздушное пространство Санкт-Петербургского центра ОВД проходит 8 местных воздушных линий, 3 из которых открыты для международных полетов. Информация о трассах приведена в таблице 4.4.

Проанализируем степень перекрытия воздушных трасс зонами действия РТС. При полете на средней высоте эшелона, равной 500м, участки с неполным перекрытием имеют трассы №1, 3 и 5 (указаны номера трасс из таблице 4.4). Длины этих участков равны 139, 59 и 56км соответственно. На рисунке 4.2 данные участки выделены красным.

Таблица 4.4

№	Трасса	Протяженность, км	Примечание
1	НАТАБ – МИСГУ	277	открыта для межд. полетов
2	ЛУНОК – РАТЛА	158	открыта для межд. полетов
3	РАНВА – ГОРУГ	126	открыта для межд. полетов
4	СОРОС – НАТАБ	292	закрыта для межд. полетов
5	АБЕДО – СЕГОН	309	закрыта для межд. полетов
6	ОСАРД – УСЛАК	386	закрыта для межд. полетов
7	БЕСАБ – НАТАБ	295	закрыта для межд. полетов
8	ПЕСТО – АКАТР	327	закрыта для межд. полетов

Приняв скорость ближнемагистрального ВС (или вертолета) за 300км/ч, легко определить, что перерывы в связи превысят 5 минут в том случае, если разрывы в связном поле составят 25км и более. Как видно, в данном случае, разрывы намного превышают эту величину. Степень покрытия каждой трассы зонами действия АРТР представлена в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Номер трассы	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина трассы, км	277	158	126	292	309	386	295	327
Длина перекрытого участка, км	138	158	67	292	253	386	295	327
Степень перекрытия	0.498	1.000	0.532	1.000	0.819	1.000	1.000	1.000

Коэффициент степени перекрытия местных воздушных линий зонами действия АРТР найдем как:

$$K_{\text{АТР}} = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i}{8} = 0.856. \quad (4.1)$$

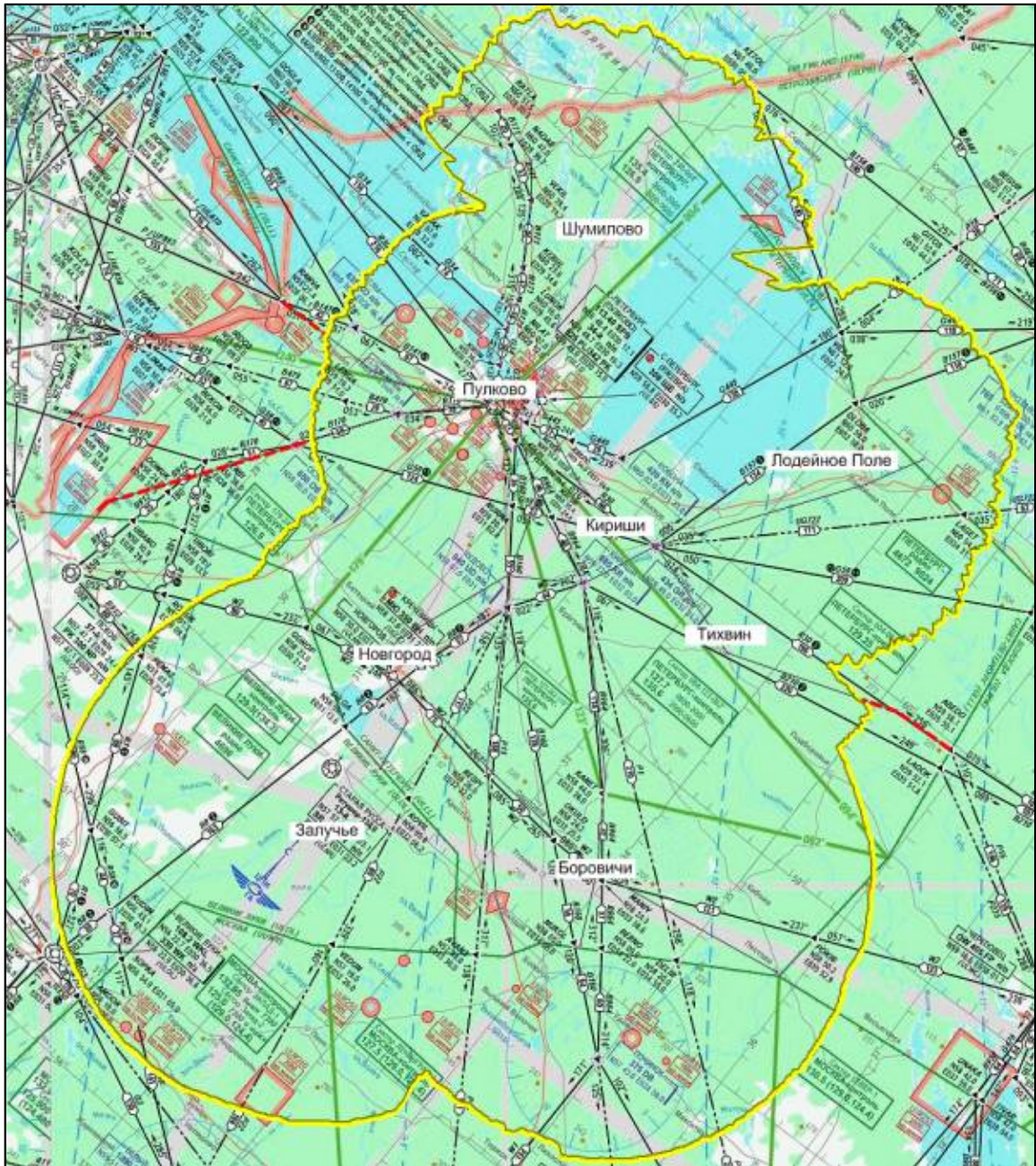


Рисунок 4.2 – Перекрытие местных воздушных трасс зонами действия АРТР в Санкт-Петербургском центре ОВД

Анализ текущей ситуации позволяет сделать вывод о необходимости дооснащения региона как минимум одним дополнительным АРТР. Целесообразно разместить его в Осьмино, где уже расположена ОПРС.

В таком случае длина участков с неполным перекрытием для трассы №1 сократится со 139 до 53км. Трасса №3 окажется полностью перекрытой, а участок на трассе №5 останется неизменным. Смоделированные последствия ввода в действие АРТР Осьмино можно видеть на рисунке 4.3.

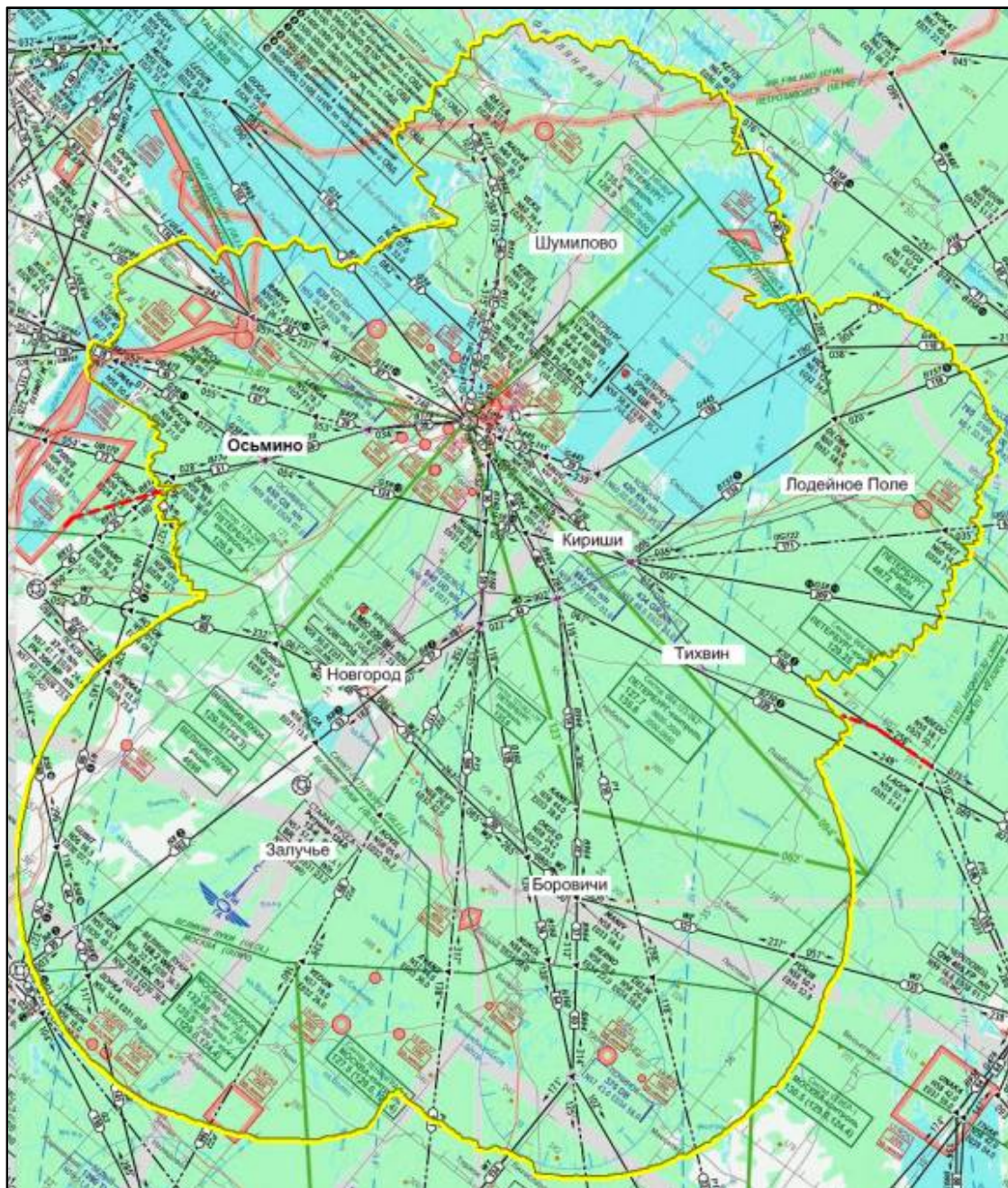


Рисунок 4.3 – Перекрытие местных воздушных трасс зонами действия АРТР в Санкт-Петербургском центре ОВД при использовании дополнительного ретранслятора в Осьмино

Степень покрытия трасс зонами действия АРТР представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.6

Номер трассы	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина трассы, км	277	158	126	292	309	386	295	327
Длина перекрытого участка, км	224	158	126	292	253	386	295	327
Степень перекрытия	0.809	1.000	1.000	1.000	0.819	1.000	1.000	1.000

Коэффициент степени перекрытия местных воздушных линий зонами действия АРТР в случае введения в строй станции в Осьмино:

$$K_{АРТР} = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i}{8} = 0.954 \quad (4.2)$$

Разработанное программное обеспечение позволяет смоделировать ситуацию отказа одного из ретрансляторов, что позволит оценить изменения в степени перекрытия местных воздушных трасс зонами действия. На рисунке 4.4 показано изменение зоны покрытия АРТР при отказе аппаратуры в Боровичах.

При исключении АРТР в Боровичах степень перекрытия трасс снизилась до 0.756.

Подобным образом можно произвести анализ каждого ретранслятора (оценка перекрытия местных воздушных трасс ЗД АРТР, а также моделирование отказов различных АРТР представлены в Приложении Г). Результаты покажут, какая аппаратура значительно влияет на уровень безопасности полетов, а какая не оказывает существенного влияния. Так, анализ показывает, что отключение станции в Залучье не повлияет на степень покрытия воздушных трасс зонами действия АРТР.

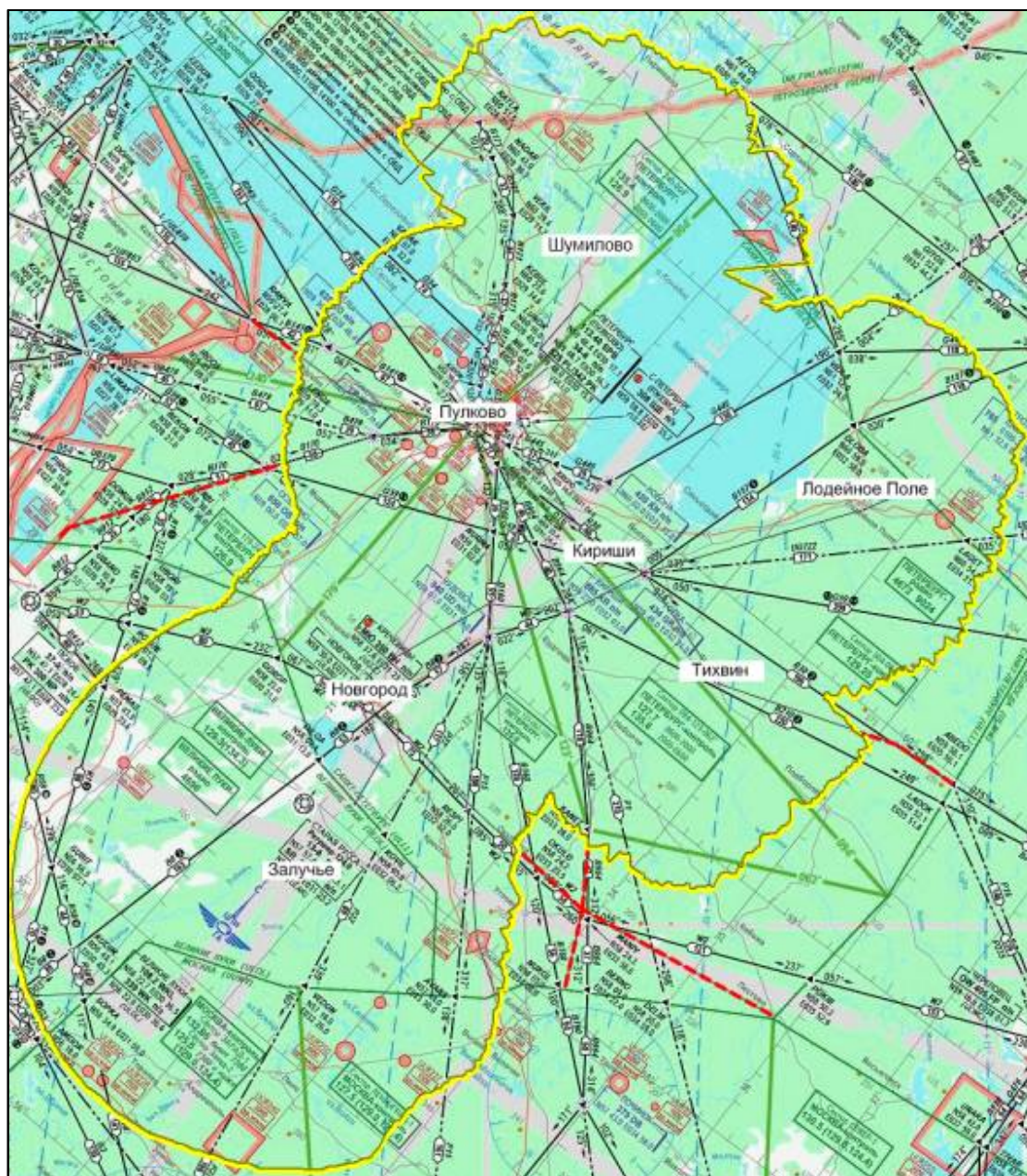


Рисунок 4.4 – Перекрытие местных воздушных трасс зонами действия АРТР в Санкт-Петербургском центре ОВД при отказе ретранслятора в Боровичах

Перейдем к анализу перекрытия магистральных трасс зонами действия средств связи. Данный анализ подразумевает расчет покрытия для эшелонов от 6000 до 10000м (как показывает практика, целесообразно также иметь информацию о зоне покрытия и для более низких эшелонов, чтобы оценить возможности средств связи при работе с прибывающими и убывающими ВС).

Проведем схематический анализ, для чего выделим 5 воздушных трасс (список трасс представлен в таблице 4.7). Первые три проходят через зону аэродрома Пулково, остальные не пересекают ее.

Таблица 4.7

№	Трасса	Протяженность, км
1	GOGLA–LADOK	540
2	RATLA–AVANS	458
3	VIDLA–UBANO	544
4	LIMAK–RODEN	508
5	GOROP–POKIB	293

Зоны покрытия для высот полета 6000м и 10000м можно увидеть на рисунках 4.5 и 4.6.

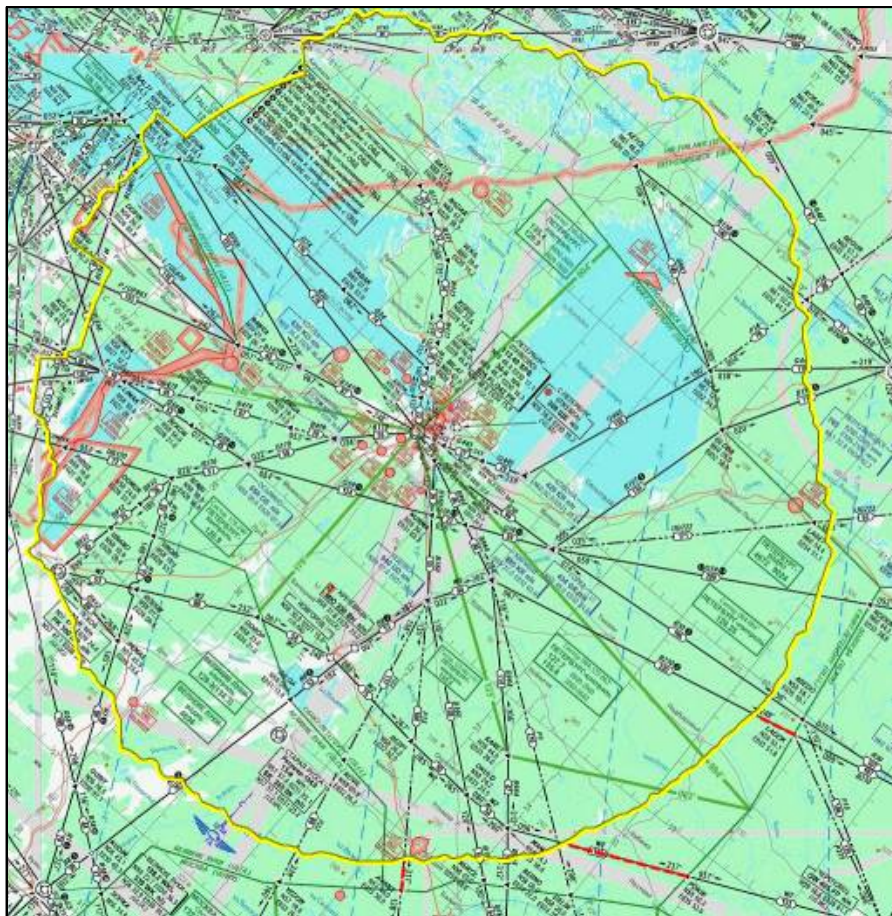


Рисунок 4.5 – Перекрытие воздушных трасс Санкт-Петербургского центра ОВД зонами действия средств авиационной воздушной электросвязи ОВЧ-диапазона при высоте полета 6000м

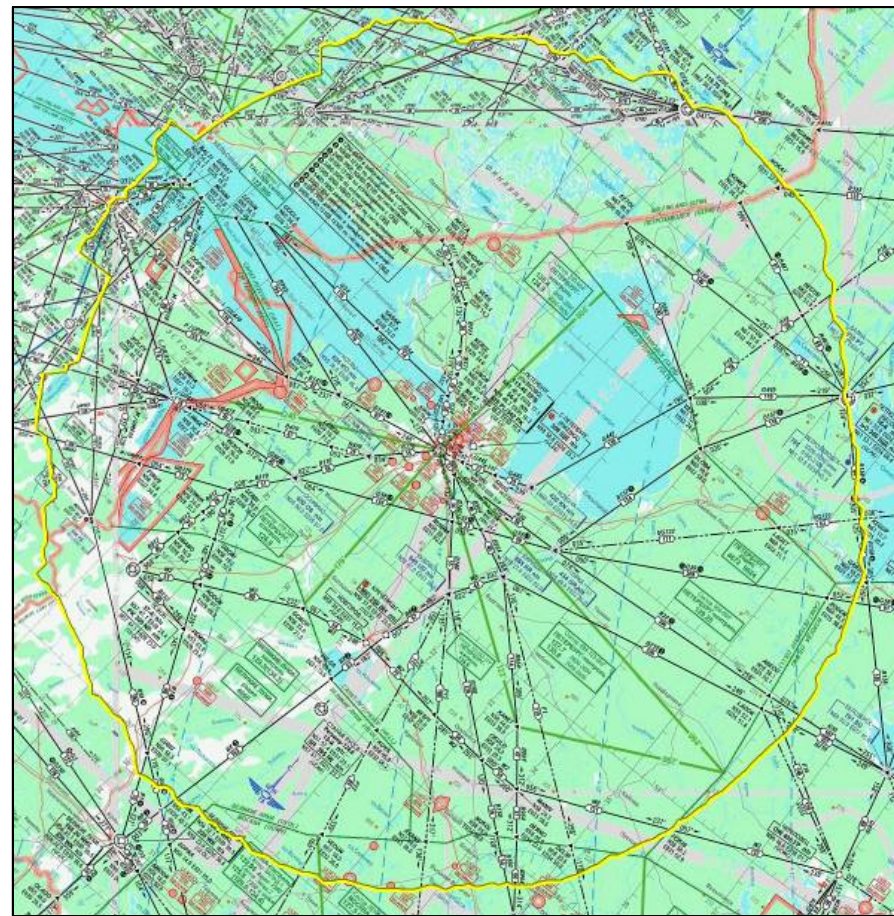


Рисунок 4.6 – Перекрытие воздушных трасс Санкт-Петербургского центра ОВД зонами действия средств авиационной воздушной электросвязи ОВЧ-диапазона при высоте полета 10000м

При высоте полета 6000м, имеются не перекрытые участки на трассах №1, 2 и 5. Длины участков равны 29, 20 и 81км соответственно. Степень покрытия этих трасс представлена в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Номер трассы	1	2	3	4	5
Длина трассы, км	540	458	544	508	293
Длина перекрытого участка, км	511	438	544	508	212
Степень перекрытия	0.946	0.956	1.000	1.000	0.724

Коэффициент степени перекрытия трасс:

$$K_{BT} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{5} = 0.925 \quad (4.3)$$

Как видно из рисунка 4.6, при высоте полета 10000м, обеспечивается 100% перекрытие воздушных трасс средствами авиационной воздушной электросвязи ОВЧ-диапазона. Соответственно, степень покрытия равна единице.

Несмотря на достаточно высокую степень перекрытия, результат можно улучшить, если увеличить высоту антенны, тем самым уменьшив углы закрытия. Если же нормы строительства не позволяют это сделать, то целесообразно разместить антенны на вышке за пределами аэродрома, где она не будет представлять опасности для воздушных судов.

Рассмотрим средства авиационной радиосвязи ВЧ диапазона. Так как данный вид связи является резервным и, где возможно, заменяется на средства ОВЧ диапазона, то ограничимся простым анализом.

На ПРЦ Санкт-Петербургского центра ОВД установлены антенны УГД, высотой 24м. Для осуществления радиосвязи используется набор частот в диапазоне от 3 до 12МГц.

При работе на частоте 3 МГц максимум излучения направлен в зенит, а минимальный угол ДНА (по половинной мощности) составляет 20°. При столь низкой частоте отражение может происходить как от слоя F2, так и от слоя E. В первом случае будет обеспечена максимальная дальность до 1400км, во втором – до 540км. Частоты, близкие к 3 МГц предназначены для работы в непосредственной близости от ПРЦ.

При работе на частоте 12 МГц угол наклона лепестка ДНА составит 15°. Принимая тот факт, что отражение происходит от слоя F2, находим, что дальность равняется 1700км. Ширина ДНА составляет 20°, минимальный и максимальный углы 5° и 25° соответственно. Это означает, что уверенный прием будет обеспечен на удалении от 1200 до 3000км.

Таким образом, работая на верхних и нижних частотах, удастся перекрыть весь регион.

4.2.2 Анализ РТС навигации

Основным средством навигации является маяк VOR/DME, расположенный на территории аэродрома Пулково. В качестве анализируемых трасс используем уже рассматриваемые выше трассы в количестве 5 штук (см. табл.4.5). Анализ будет проводится для высот полета 6000 и 10000м.

При высоте полета 6000м, имеются не перекрытые участки на всех трассах, длины их, в соответствии с номером трассы, равны 69, 50, 39, 71 и 126км. Степень покрытия трасс представлена в таблице 4.9.

Таблица 4.9

Номер трассы	1	2	3	4	5
Длина трассы, км	540	458	544	508	293
Длина перекрытого участка, км	471	408	505	437	167
Степень перекрытия	0.872	0.891	0.928	0.861	0.570

Коэффициент степени перекрытия трасс:

$$K_{BT} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{5} = 0.824 \quad (4.4)$$

При высоте полета 10000м, имеются не перекрытые участки на трассах №1 и 5. Длины участков равны 9 и 23км соответственно. Степень покрытия трасс представлена в таблице 4.10.

Таблица 4.10

Номер трассы	1	2	3	4	5
Длина трассы, км	540	458	544	508	293
Длина перекрытого участка, км	531	458	544	508	270
Степень перекрытия	0.983	1.000	1.000	1.000	0.922

Коэффициент степени перекрытия трасс:

$$K_{BT} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{5} = 0.981 \quad (4.5)$$

Результаты расчетов представлены на рисунках 4.7 и 4.8. Видно, что навигационное средство обеспечивает достаточно хорошую степень перекрытия, проблемные участки присутствуют вблизи границ района.

В Санкт-Петербургском центре ОВД имеется 8 отдельных приводных радиостанций, расположенных на ПРЦ службы ЭРТОС Пулково (используется ДПРМ), а также в Осьмино, Горке, Новгороде Котлах, Кикерино, Кобоне, Киришах. ОПРС в настоящее время используются как вспомогательное навигационное средство (в будущем планируется постепенно заменить их навигационными маяками типа РМА/РМД). Местоположение ВС в отсутствие спутниковых средств и средств ближней навигации определяется преимущественно по данным достаточно точных автономных инерциальных систем. В связи с этим анализ покрытия воздушных трасс полем ОПРС не производится.

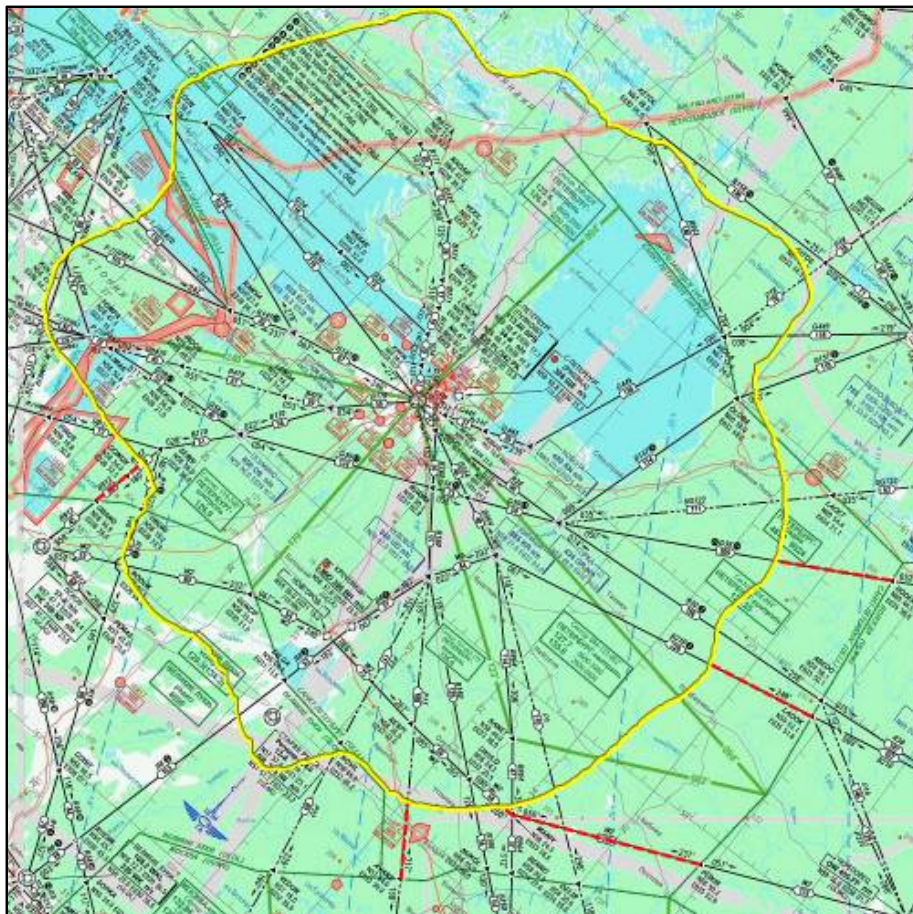


Рисунок 4.7 – Перекрытие воздушных трасс Санкт-Петербургского центра ОВД зоной действия маяка VOR/DME при высоте полета 6000м

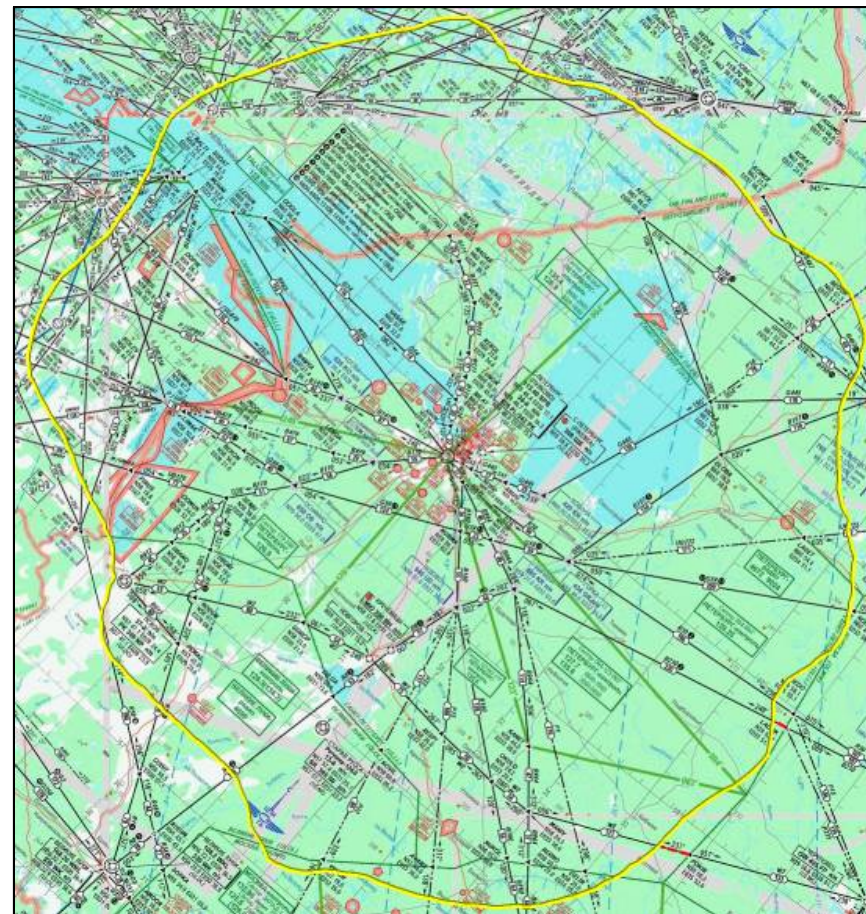


Рисунок 4.8 – Перекрытие воздушных трасс Санкт-Петербургского центра ОВД зоной действия маяка VOR/DME при высоте полета 10000м

Перейдем к анализу рабочих областей средств навигации. Данные о точностных характеристиках маяка DVOR/DME, полученные в результате облетов, представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11

Наименование параметра, характеристики	Норма	Результат измерений
Ошибка определения азимута, σ_α	1°	0.56°
Ошибка определения дальности, σ_D	75м	39м

Размеры рабочей области, рассчитанные по методикам, представленным в главе 3, для типов воздушного пространства RNP1 (используется в районе аэродрома) и RNP4 представлены в таблице 4.12.

Результаты расчетов, представлены на рисунках 4.9 и 4.10. На рисунках желтым контуром выделена рабочая область для воздушного пространства типа RNP4, и пурпурным – для воздушного пространства типа RNP1.

Как видно из рисунков, уже на высоте 10000м проявляется ограничение рабочей области дальностью действия РТС, а на высоте 6000м, размер РО полностью ограничен формой ЗД.

Таблица 4.12

Тип воздушного пространства	Радиус рабочей области, км
RNP1	69.3
RNP4	272.6

Оценим степень перекрытия воздушных трасс рабочей областью маяка VOR/DME. При высоте полета 6000м, имеются не перекрытые участки на всех трассах. Если учесть, что форма РО повторяет форму ЗД, то степень перекрытия трасс РО будет равна степени перекрытия трасс ЗД для данной высоты полета (см. рисунок 4.9).

При высоте полета 10000м, имеются не перекрытые участки на трассах №1, 2, 4 и 5. Длины участков равны 39, 23, 46 и 98км соответственно (см. рисунок 4.10). Степень покрытия трасс представлена в таблице 4.13.

Таблица 4.13

Номер трассы	1	2	3	4	5
Длина трассы, км	540	458	544	508	293
Длина перекрытого участка, км	501	435	544	462	195
Степень перекрытия	0.928	0.950	1.000	0.909	0.666

Коэффициент степени перекрытия трасс:

$$K_{BT_PO} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{5} = 0.891 \quad (4.6)$$

4.2.3 Анализ РТС наблюдения

При анализ радиолокационных средств наблюдения целесообразно рассматривать отдельно первичный и вторичный каналы.

Начнем с первичного канала. При высоте полета 6000м, имеются не перекрытые участки на трассах № 1, 2, 4 и 5. Длины участков равны 28, 20, 50 и 107км соответственно (см. рисунок 4.11).

Степень покрытия трасс представлена в таблице 4.14.

Таблица 4.14

Номер трассы	1	2	3	4	5
Длина трассы, км	540	458	544	508	293
Длина перекрытого участка, км	512	438	544	458	216
Степень перекрытия	0.948	0.956	1.000	0.902	0.737

Коэффициент степени перекрытия трасс:

$$K_{BT} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{5} = 0.907 \quad (4.7)$$

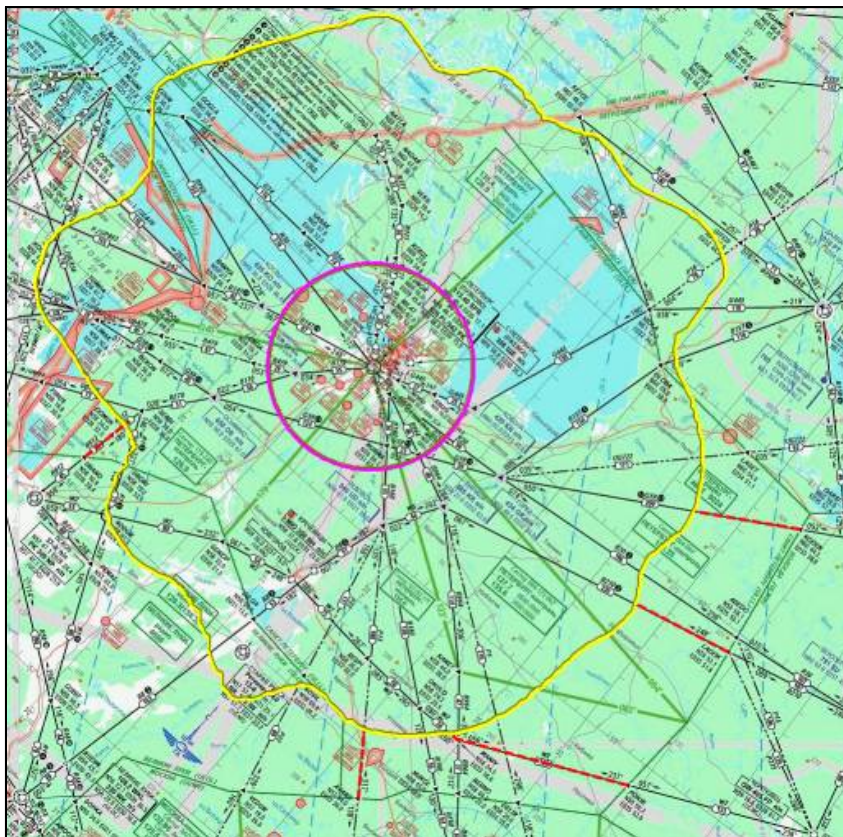


Рисунок 4.9 – Перекрытие воздушных трасс Санкт-Петербургского центра ОВД рабочей областью маяка DVOR/DME при высоте полета 6000м

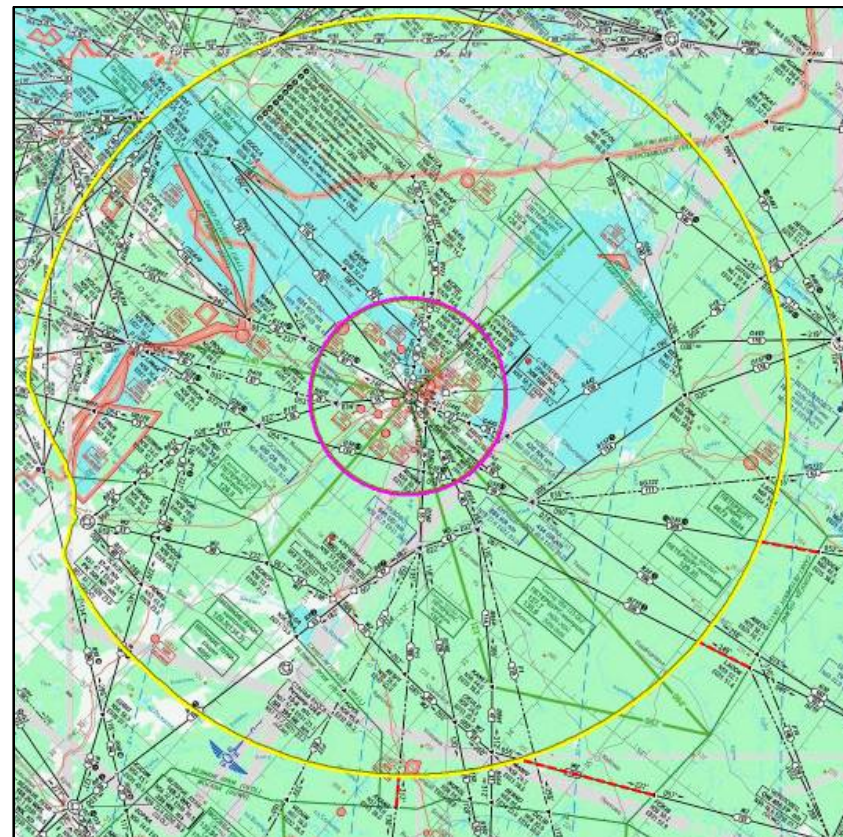


Рисунок 4.10 – Перекрытие воздушных трасс Санкт-Петербургского центра ОВД рабочей областью маяка DVOR/DME при высоте полета 10000м

При высоте полета 10000м, не перекрытых участков нет (см. рисунок 4.12). Коэффициент степени перекрытия трасс равен единице.

Что касается вторичного канала, то при высоте полета 6000м, имеются не перекрытые участки на трассах №.1, 4 и 5 (см. рисунок 4.13). Длины участков равны 23, 21 и 61км соответственно.

Степень покрытия трасс представлена в таблице 4.15.

Таблица 4.15

Номер трассы	1	2	3	4	5
Длина трассы, км	540	458	544	508	293
Длина перекрытого участка, км	517	458	544	487	232
Степень перекрытия	0.957	1.000	1.000	0.959	0.792

Коэффициент степени перекрытия трасс:

$$K_{BT} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{5} = 0.942 \quad (4.8)$$

При высоте полета 10000м, не перекрытых участков нет (см. рисунок 4.14). Коэффициент степени перекрытия трасс равен единице.

Средства наблюдения Санкт-Петербургского центра ОВД обеспечивают приемлемое перекрытие на эшелоне 10000м и выше. Не вполне удачное расположение радиолокаторов (сосредоточены в районе аэродрома Пулково) приводит к тому, что на малых высотах непокрытыми оказываются участки трасс вблизи границ зоны ответственности.

Представленную методику можно использовать для анализа укрупненных центров ОВД. В качестве примера, можно рассмотреть объединенную зону действия радиолокаторов, расположенных в Пулково, Чалне (Петрозаводск) и Кеми (см. рисунок 4.15).

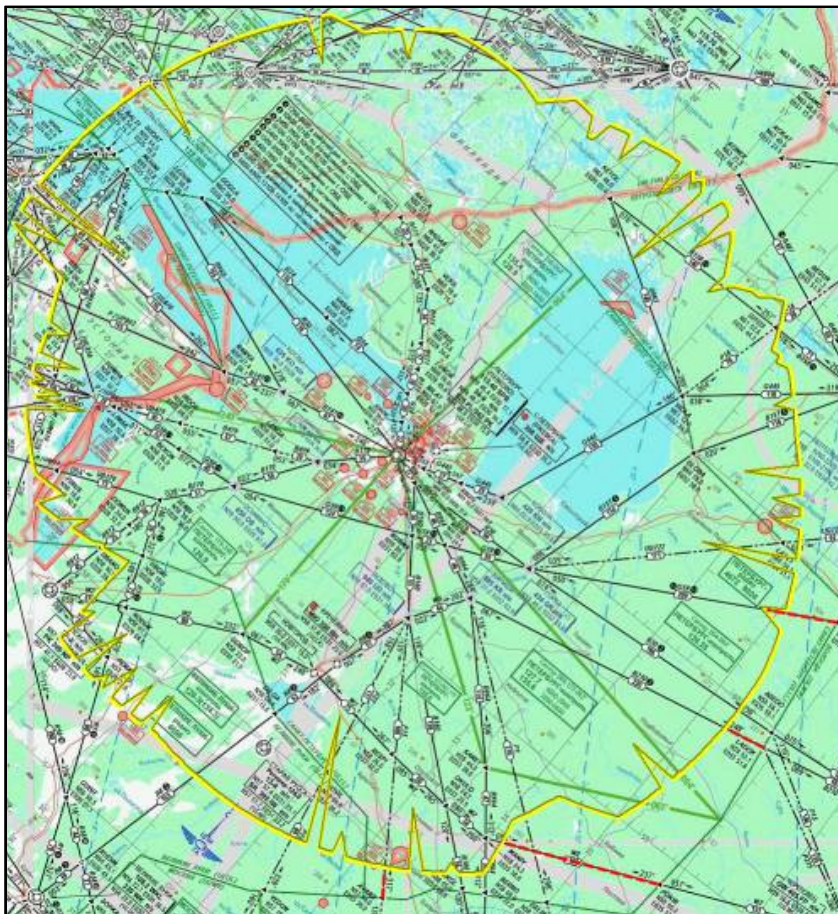


Рисунок 4.11 – Зона покрытия первичного канала радиолокаторов в Санкт-Петербургском центре ОВД для высоты полета 6000м

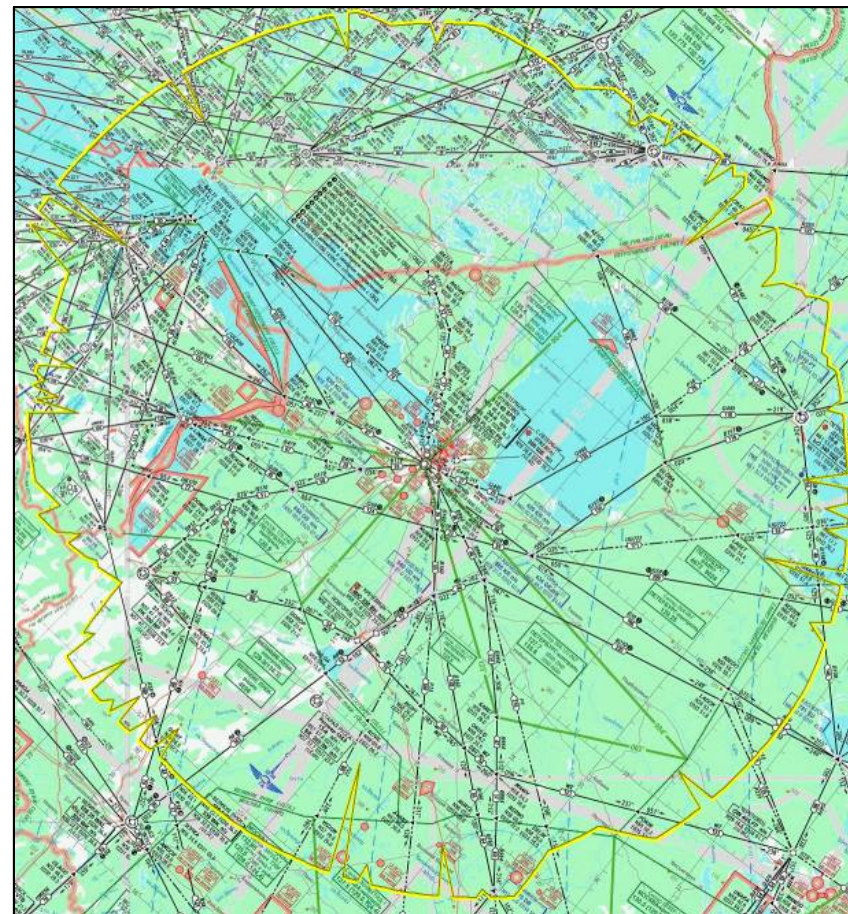


Рисунок 4.12 – Зона покрытия первичного канала радиолокаторов в Санкт-Петербургском центре ОВД для высоты полета 10000м

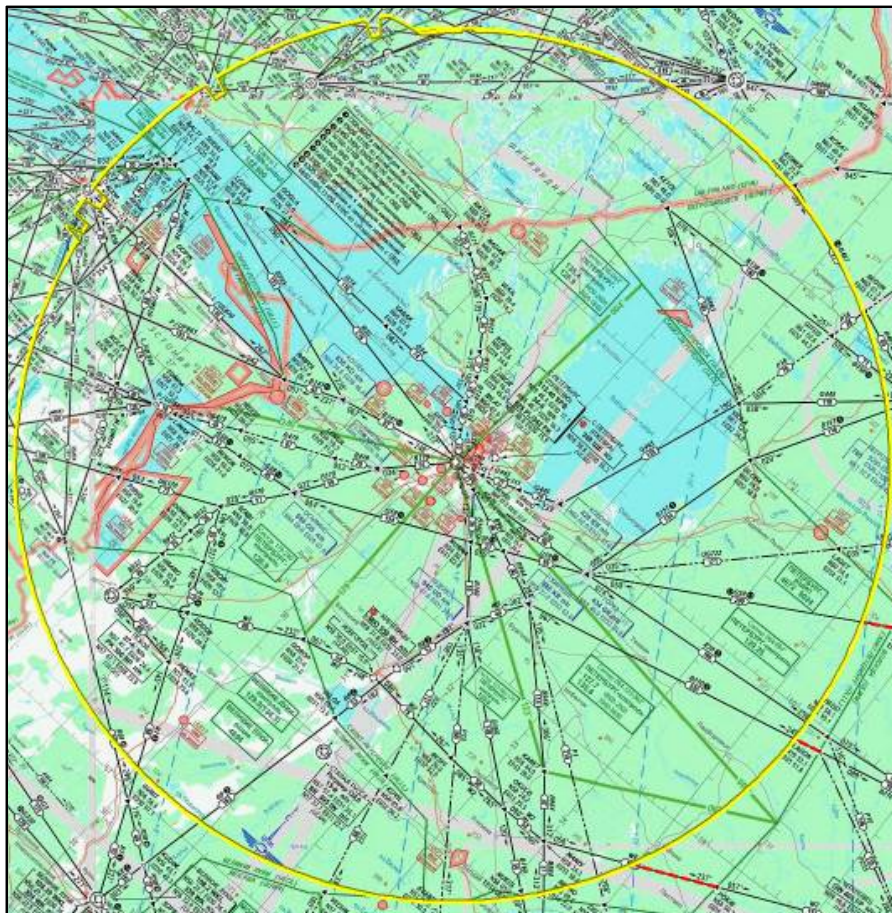


Рисунок 4.13 – Зона покрытия вторичного канала радиолокаторов в Санкт-Петербургском центре ОВД для высоты полета 6000м



Рисунок 4.14 – Зона покрытия вторичного канала радиолокаторов в Санкт-Петербургском центре ОВД для высоты полета 10000м

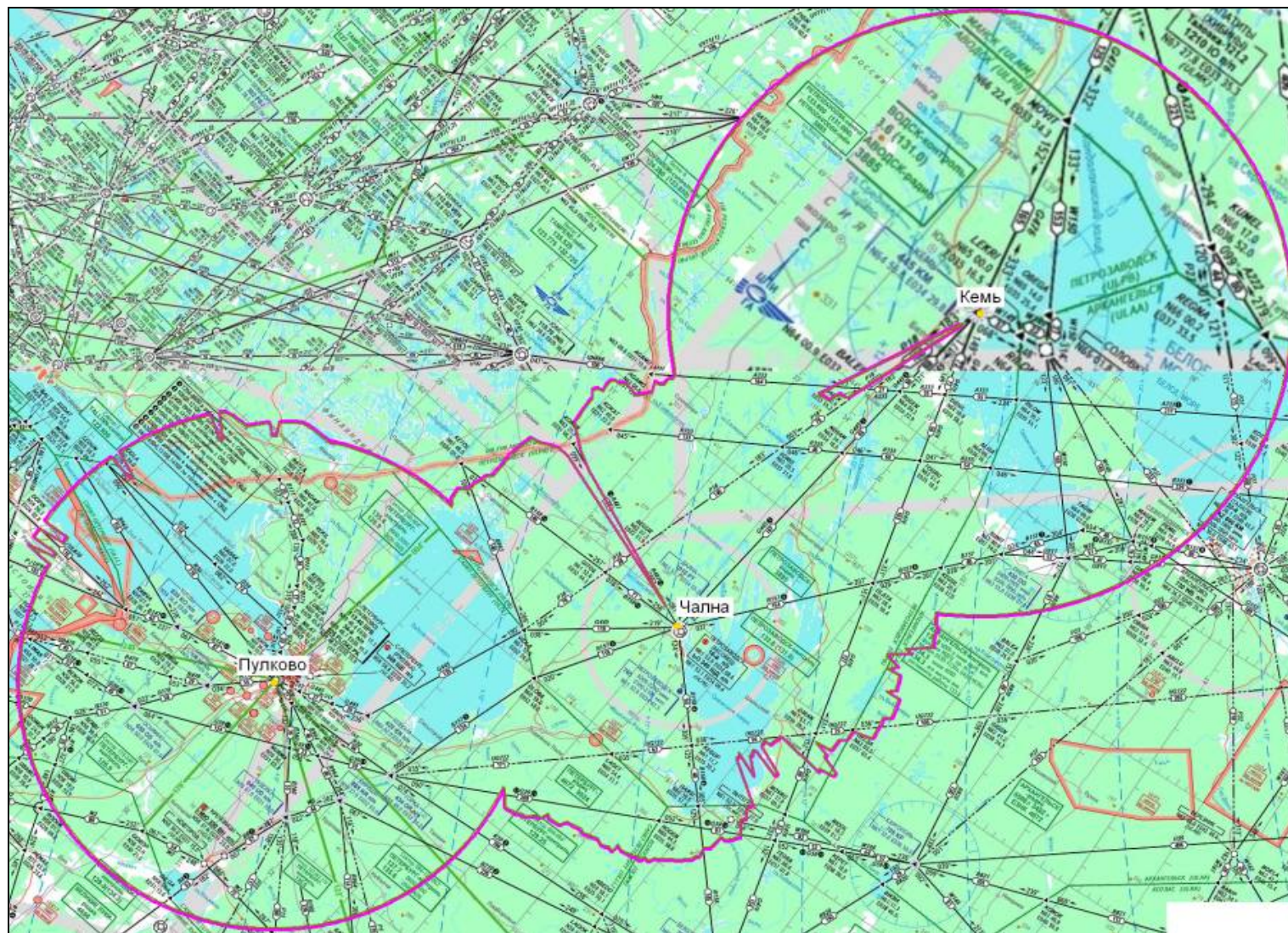


Рисунок 4.15 – Объединенная зона покрытия ВРЛ, расположенных в Пулково, Чалне и Кемь
для высоты полета 3000м

Перейдем к анализу рабочих областей средств наблюдения. Данные о точностных характеристиках РТС представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16

Наименование РТС	Наименование параметра, характеристики	Значение параметра, характеристики
Иртыш-СКУ	Ошибка определения азимута, σ_α	0.019° (первич.) 0.18° (втор. «УВД») 0.019° (втор. «RBS»)
	Ошибка определения дальности, σ_D	105м (первич.) 157м (втор. «УВД») 75м (втор. «RBS»)
Лира А-10	Ошибка определения азимута, σ_α	0.023° (первич.) 0.8° (втор. «УВД») 0.09° (втор. «RBS»)
	Ошибка определения дальности, σ_D	46м (первич.) 50м (втор. «УВД») 45м (втор. «RBS»)
МВРЛ СВК	Ошибка определения азимута, σ_α	0.12° («УВД») 0.08 («RBS»)
	Ошибка определения дальности, σ_D	70м
Утес-Т	Ошибка определения азимута, σ_α	0.07° (первич.) 0.117° (втор. «УВД») 0.08° (втор. «RBS»)
	Ошибка определения дальности, σ_D	26м (первич.) 60м (втор. «УВД») 30м (втор. «RBS»)

Так как при облетах не определяется коэффициент нарастания ошибки измерения дальности, то будем в расчетах использовать нормативные данные.

Для трассового радиолокатора коэффициент равен 0.01, для аэродромного – 0.03 [75].

Для оценки размеров РО, будем использовать две предельно допустимые погрешности. Одна будет обусловлена типом воздушного пространства (для RNP4, $\sigma_{\text{доп}}=3.78\text{км}$), вторая будет соответствовать рекомендациям Eurocontrol (для минимума горизонтального эшелонирования 30км, СКП $\sigma_{\text{доп}}=1.6\text{км}$). Результаты расчетов приведены в таблице 4.17.

Рабочую область аэродромных радиолокаторов оценим исходя из требований для воздушного пространства типа RNP1. Результаты расчетов приведены в табл.4.18

Таблица 4.17

Наименование РТС	Канал	Радиус РО при $\sigma_{\text{доп}}=3.78\text{км}$, км	Радиус РО при $\sigma_{\text{доп}}=1.6\text{км}$, км
Утес-Т	Первич.	267.0	130.0
	Вторич. «УВД»	261.0	128.0
	Вторич. «RBS»	264.0	129.0
МВРЛ СВК	Вторич. «УВД»	266.8	128.0
	Вторич. «RBS»	268.0	128.0

Таблица 4.18

Наименование РТС	Канал	Радиус РО, км
Иртыш-СКУ	Первич.	26.9
	Вторич. «УВД»	26.0
	Вторич. «RBS»	27.5
Ли́ра А-10	Первич.	27.6
	Вторич. «УВД»	25.8
	Вторич. «RBS»	27.0
МВРЛ СВК	Вторич. «УВД»	27.4
	Вторич. «RBS»	27.6

Расчеты показывают, что при достаточно малых угловых погрешностях, а также небольшой СКП определения дальности, определяющую роль играет коэффициент нарастания ошибки измерения дальности. Проблема состоит в том, что данный коэффициент не указан в характеристиках оборудования и никак не проверяется в ходе летных. Из этого можно сделать вывод о необходимости изменения программы облетов радиолокаторов.

Оценку степени перекрытия воздушных трасс РО радиолокаторов выполним отдельно для первичного и вторичного каналов. Рабочие области и не перекрытые участки трасс первичного канала радиолокаторов можно видеть на рисунке 4.16 для высоты полета 6000м и на рисунке 4.17 для высоты полета 10000м.

При высоте полета 6000м, имеются не перекрытые участки на трассах №1, 2, 4 и 5. Длины участков равны 46, 29, 49 и 108км соответственно.

Степень покрытия трасс представлена в таблице 4.19.

Таблица 4.19

Номер трассы	1	2	3	4	5
Длина трассы, км	540	458	544	508	293
Длина перекрытого участка, км	494	429	544	459	185
Степень перекрытия	0.915	0.937	1.000	0.903	0.631

Коэффициент степени перекрытия трасс:

$$K_{BT_PO} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{5} = 0.877 \quad (4.9)$$

При высоте полета 10000м, имеются не перекрытые участки на трассах №1, 2, 4 и 5. Длины участков такие же, как и при высоте полета 6000м, следовательно, и степень перекрытия трасс остается без изменений.

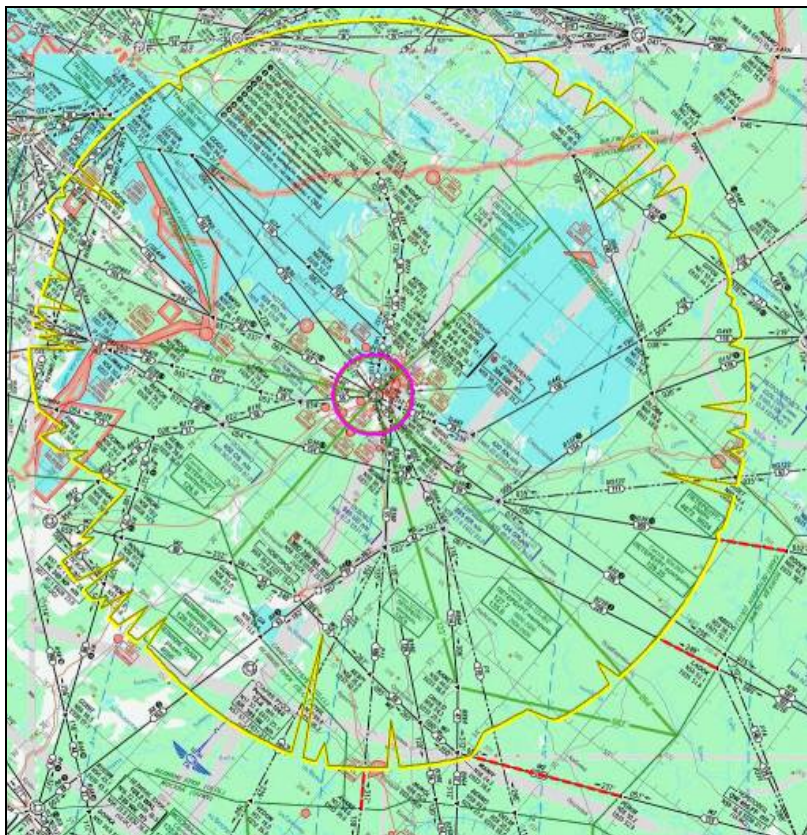


Рисунок 4.16 – Перекрытие воздушных трасс Санкт-Петербургского центра ОВД рабочей областью первичного канала радиолокаторов при высоте полета 6000м

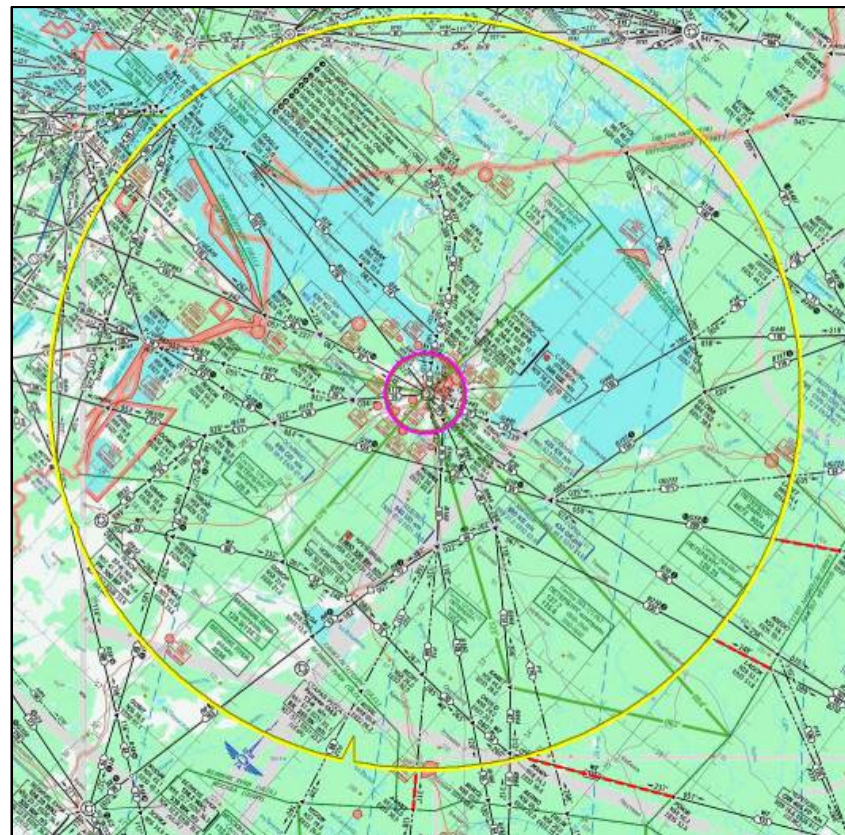


Рисунок 4.17 – Перекрытие воздушных трасс Санкт-Петербургского центра ОВД рабочей областью первичного канала радиолокаторов при высоте полета 10000м

Рабочие области и не перекрытые участки трасс вторичного канала радиолокаторов можно видеть на рисунке 4.18.

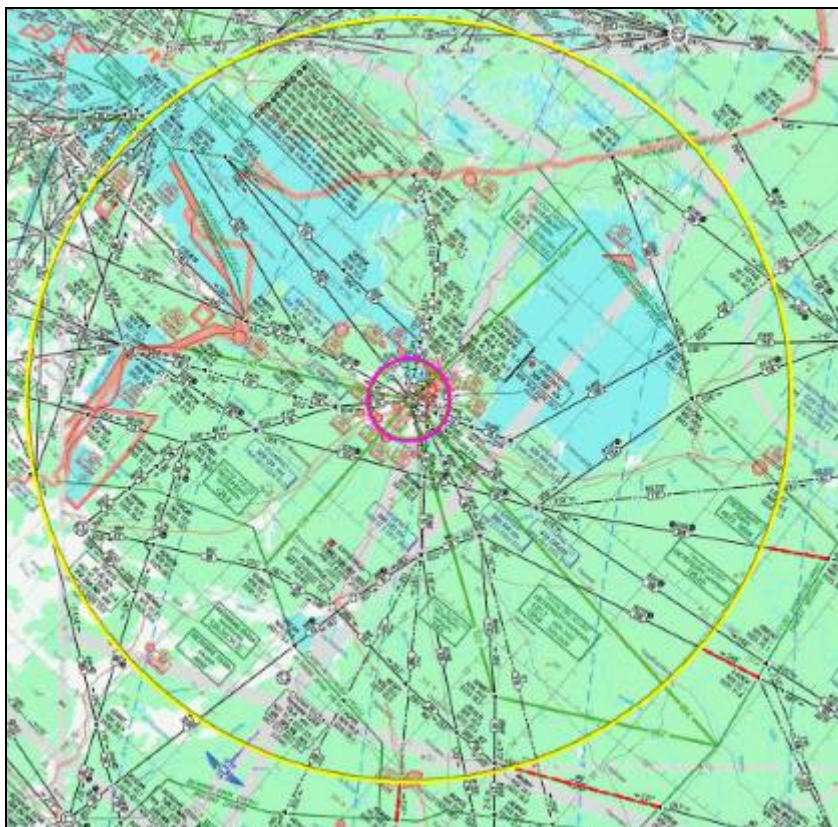


Рисунок 4.18 – Перекрытие воздушных трасс Санкт-Петербургского центра ОВД рабочей областью вторичного канала радиолокаторов

Дальность действия вторичного канала радиолокаторов такова, что не оказывает влияния на форму РО. Следовательно, степень перекрытия трасс для высот полета 10000м и 6000м будет одинаковой.

Имеются не перекрытые участки на трассах №1, 2, 4 и 5. Длины участков равны 44, 27, 46 и 106км соответственно. Степень покрытия трасс представлена в таблице 4.20.

Таблица 4.20

Номер трассы	1	2	3	4	5
Длина трассы, км	540	458	544	508	293
Длина перекрытого участка, км	496	431	544	462	187
Степень перекрытия	0.919	0.941	1.000	0.909	0.638

Коэффициент степени перекрытия трасс:

$$K_{BT_PO} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{5} = 0.881 \quad (4.10)$$

4.3 Результаты расчета зон конфликтных ситуаций

Для анализа были выбраны параллельные и пересекающиеся участки трасс (показано в таблице 4.21). Размеры зон конфликтных ситуаций определялись стандартным (геометрическим) и вероятностным методами.

Таблица 4.21

Параллельные участки трасс	Пересекающиеся участки трасс
LEDUN–Котлы	LIMAK–NURMA
GOGLA–Санкт-Петербург	PIRUS–Санкт-Петербург

Анализ проводился для двух типов РТС: навигации и наблюдения.

Первый вариант дает представление об уровне безопасности полетов на трассе в случае использования экипажем имеющихся навигационных средств. Второй вариант позволяет узнать степень достоверности информации, которой располагает диспетчер, осуществляющий управление воздушным движением.

Результаты расчета зоны конфликтных ситуаций параллельных участков трасс для радиолокационных станций Санкт-Петербургского центра ОВД представлены на рисунке 4.19. Результаты расчета размера зоны конфликтных ситуаций вероятностным методом с применением различных распределений представлены на рисунке 4.20. На рисунках 4.21 и 4.22 представлены результаты расчетов зоны конфликтных ситуаций для пересекающихся участков трасс.

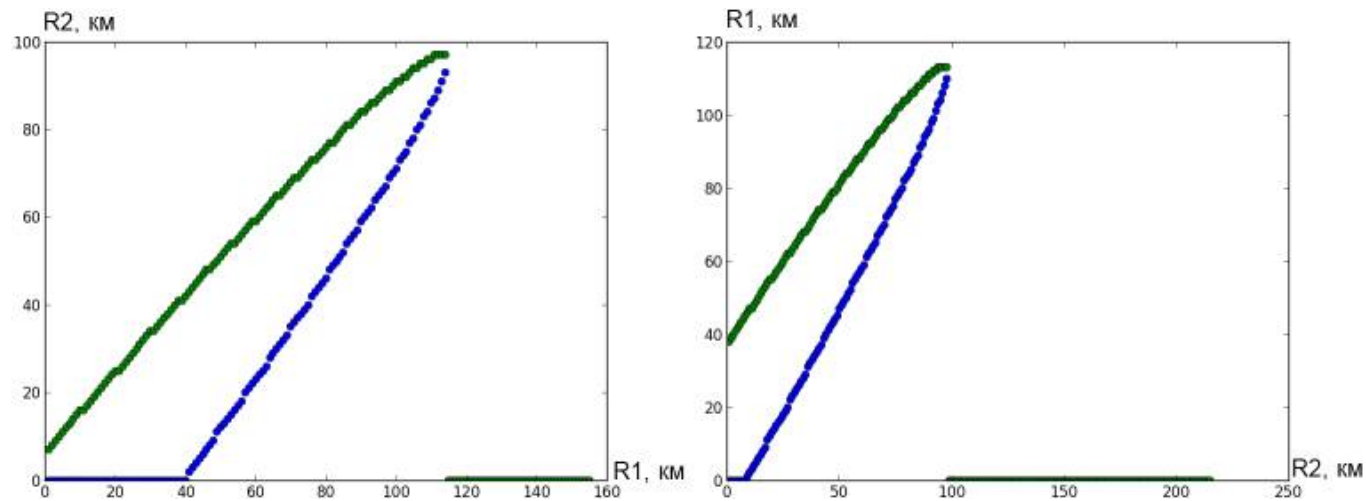


Рисунок 4.19 – Зона конфликтных ситуаций для параллельных трасс, рассчитанная геометрическим методом

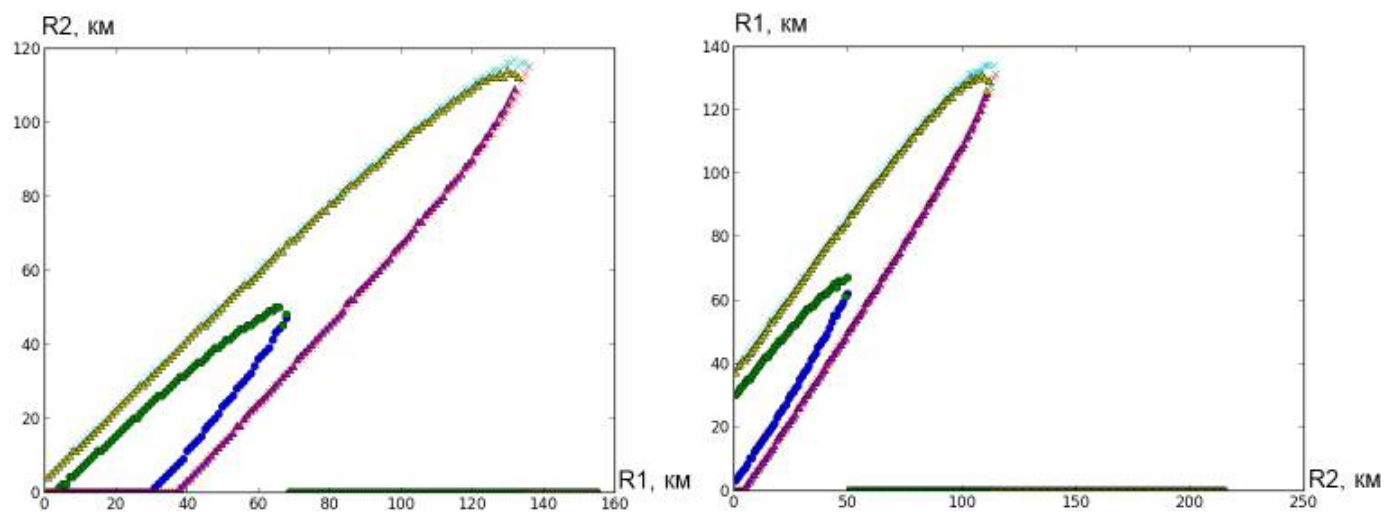


Рисунок 4.20 – Зона конфликтных ситуаций для параллельных трасс, рассчитанная вероятностным методом с применением: ●● - нормального распределения, ▲▲ - составного распределения

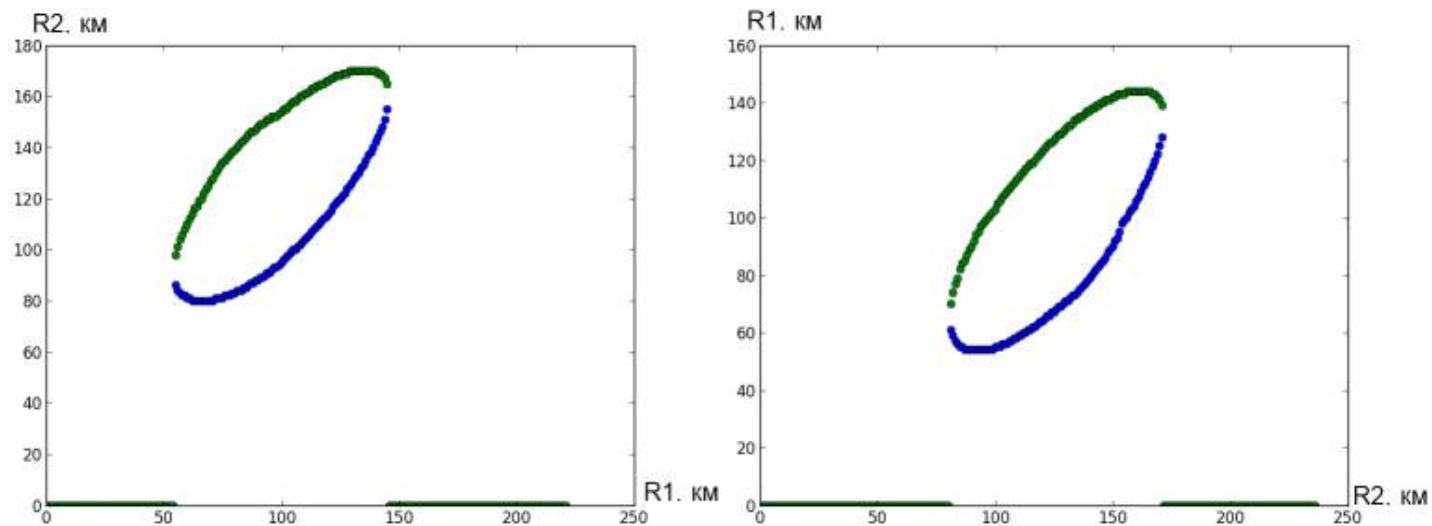


Рисунок 4.21 – Зона конфликтных ситуаций для пересекающихся трасс, рассчитанная геометрическим методом

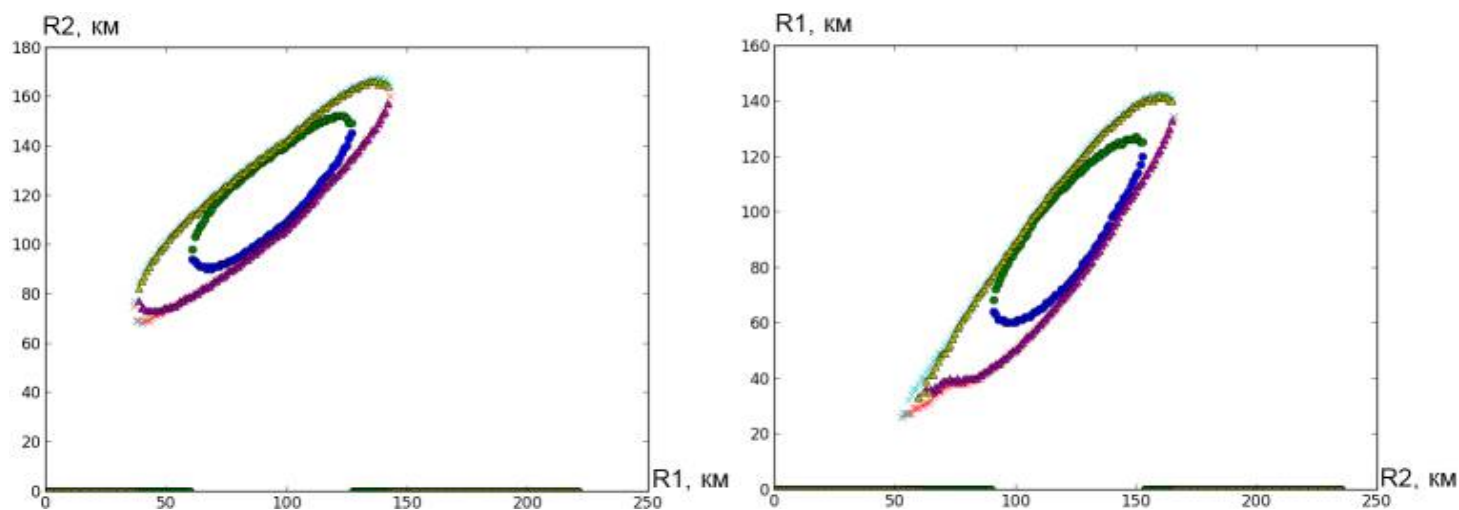


Рисунок 4.22 – Зона конфликтных ситуаций для пересекающихся трасс, рассчитанная вероятностным методом с применением: ●●- нормального распределения, ▲▲- составного распределения

4.4. Выводы

С помощью разработанных методов был произведен расчет ЭХ средств РТОП в Санкт-Петербургском центре ОВД. Двухэтапному анализу подверглись основные РТС навигации, наблюдения и связи. Для выбранных участков трасс были рассчитаны зоны конфликтных ситуаций.

Анализ АРТР в Ленинградской области позволил выявить участки на местных воздушных линиях, где связь будет отсутствовать или иметь неудовлетворительное качество. По результатам анализа была дана рекомендация внедрить дополнительный ретранслятор на позиции существующей ОПРС в Осьмино. Повторный анализ ЗД с учетом внедренного средства показал повышение коэффициента перекрытия воздушных трасс.

Также были проанализированы случаи выхода из строя одного из ретрансляторов. Было показано, что наиболее чувствительным является АРТР в Боровичах, а наименьшее влияние на безопасность полетов будет иметь отказ АРТР в Залучье. В связи с этим можно рекомендовать повысить надежность АРТР в Боровичах (например, путем установки дополнительной радиостанции).

Что касается обеспечения связи на магистральных воздушных трасс, то анализ показал достаточно хорошее перекрытие, с незначительными участками с неустойчивой связью на границе контролируемого района.

Анализ РТС навигации (маяка DVOR/DME) показал высокую степень перекрытия для эшелонов выше 6000м. Проблемные участки также присутствуют на границе контролируемого пространства.

Радиолокационные средства наблюдения обеспечивают хорошее перекрытие воздушных трасс, однако имеются не перекрытые участки на границе контролируемого пространства. Это вызвано не вполне удачным расположением РТС, при котором радиолокаторы сосредоточены в районе аэродрома Пулково.

Двухэтапный анализ ЭХ средств РТОП выявил общий для всех РТС Санкт-Петербургского центра ОВД недостаток: слабое перекрытие воздушных трасс на границе зоны ответственности.

Заключение

Цель диссертационной работы заключалась в разработке и реализации методик расчета эксплуатационных характеристик радиотехнического обеспечения полетов, и оценка, с их помощью, безопасности полетов в выбранном регионе. На пути к этой цели были выполнены следующие работы и получены следующие результаты:

1. Проанализированы различные методики оценки уровня безопасности полетов в регионе. На основе их анализа сделан вывод о необходимости разработки совокупности методов расчета ЭХ средств РТОП в регионе, позволяющих оценить влияние изменений в инфраструктуре РТС навигации, наблюдения и связи на безопасность полетов.

2. Разработан алгоритм двухэтапного анализа эксплуатационных характеристик средств РТОП, позволяющий рассчитывать зоны действия и рабочие области РТС навигации, связи и наблюдения, а также определять степень перекрытия воздушных трасс зонами действия и рабочими областями.

Модифицирована методика расчета рабочей области РТС навигации и наблюдения, предполагающая расчет эллипса погрешностей и учет погрешности пилотирования ВС для разных этапов полета и типов воздушного пространства.

Введено понятие рабочей области РТС связи ОВЧ диапазона. Таким образом, определяется не только область устойчивого радиообмена, но и область, в пределах которой обеспечивается требуемое качество связи; реализуется принцип единого подхода в расчете эксплуатационных характеристик средств РТОП.

Разработанные методики расчета ЭХ могут быть использованы для анализа средств РТОП в различных регионах, например, в Санкт-Петербургском центре ОВД. Полученные математические модели, кроме расчета ЭХ средств РТОП, позволяют разрабатывать предложения по оптимизации структуры и размещения радиотехнических средств в заданном регионе.

3. Проанализированы одномерные и двумерные законы распределения погрешности определения координат ВС. Предложено составное распределение,

дающие более достоверные результаты, нежели нормальный закон и классический закон Лапласа.

4. Разработана методика расчета зон конфликтных ситуаций учитывающая погрешности РТС. При этом расчет производится с применением составного распределения.

5. Разработанные методы реализованы в виде комплекса компьютерных программ, позволяющих производить расчет ЭХ средств РТОП.

6. Произведен расчет ЭХ средств РТОП в Санкт-Петербургском центре ОВД. Результаты анализа показали высокую степень перекрытия магистральных трасс зонами действия и рабочими областями радиотехнических систем навигации, наблюдения и связи. Для высот полета 10000м интегральный коэффициент перекрытия трасс зонами действия составил от 0.98 до 1.0, для 6000м – от 0.82 до 0.94. Интегральный коэффициент перекрытия трасс рабочими областями для высоты полета 10000м составил от 0.88 до 1.0, для 6000м – от 0.82 до 0.93. Не перекрытые участки трасс присутствуют на границе контролируемого воздушного пространства, что связано с расположением РТС, для устранения этого недостатка необходимо пространственное разнесение РТС.

По результатам анализа эксплуатационных характеристик РТС связи ОВЧ была выработана рекомендация внедрить дополнительный АРТР на позиции ОПРС Осьмино, что позволит повысить интегральный коэффициент перекрытия с 0.856 до 0.954. Также было выявлено, что наибольшее влияние на безопасность полетов будет иметь отказ АРТР в Боровичах. При этом интегральный коэффициент перекрытия понизится с 0.856 до 0.756.

Список сокращений и условных обозначений

АДЦ – аэродромный диспетчерский центр

АЗН – автоматическое зависимое наблюдение

АЗН-В – вещательное автоматическое зависимое наблюдение

АКДП – аэродромно-командный диспетчерский пункт

АМ – амплитудная модуляция

АРП – автоматический радиопеленгатор

АРТР – автономный ретранслятор

АС УВД – автоматизированная система управления
воздушным движением

АФУ – антенно-фидерное устройство

БП – безопасность полетов

ВВС – военно-воздушные силы

ВГД – вибратор горизонтальный диапазонный

ВП – воздушное пространство

ВРЛ – вторичный радиолокатор

ВС – воздушное судно

ВЧ – высокая частота

ГА – гражданская авиация

ГИС – геоинформационная система

ДКМВ – декаметровый диапазон

ДНА – диаграмма направленности антенны

ЕС ОрВД – единая система организации воздушного движения

ЗД – зона действия

ИВД – интенсивность воздушного движения

ИКАО (ICAO) – международная организация гражданской авиации

КСА УВД – комплекс средств автоматизации управления
воздушным движением

ЛБУ – линейное боковое уклонение

ЛЧМ – линейная частотная модуляция
МДП – местный диспетчерский пункт
МСЭ-Т – международный союз электросвязи и телеграфии
ОВД – обслуживание воздушного движения
ОВЧ – очень высокая частота
ОПРС – отдельная приводная радиостанция
ОрВД – организация воздушного движения
ПВО – противовоздушная оборона
ПРС – приводная радиостанция
ПРЛ – первичный радиолокатор
ПРМ – приемник
ПРЦ – передающий радиоцентр
РМА – радиомаяк азимутальный
РМД – радиомаяк дальномерный
РНТ – радионавигационная точка
РО – рабочая область
РСБН – радиотехническая система ближней навигации
РТОП – радиотехническое обеспечение полетов
РТС – радиотехническое средство
РЦ – радиоцентр
СВЧ – сверх высокая частота
СКП – средняя квадратическая погрешность
ТО – техническое обслуживание
УВД – управление воздушным движением
УВЧ – ультра высокая частота
ФАР – фазированная антенная решетка
ЧМ – частотная модуляция
ЭРТОС – электро-радиотехническое обеспечение и связь
ЭТХ – эксплуатационно-технические характеристики

APM (Advanced Propagation Model) – усовершенствованная модель распространения радиоволн

BER (Bit Error Rate) – средняя вероятность ошибки на бит

CPA (Circle Protection Area) – круговая защищенная зона

CPDLC (Controller Pilot Digital Link Communication) – связь

«диспетчер–пилот» по линии передачи данных

DME (Distance Measuring Equipment) – дальномерный

радионавигационный маяк

DVOR (Doppler VHF Omni-directional Radio Range) – доплеровский

всенаправленный азимутальный ОБЧ радионавигационный маяк

FTE (Flight Technical Error) – погрешность техники пилотирования

NSE (Navigation System Error) – погрешность навигационной системы

PDE (Path Definition Error) – погрешность определения траектории

RCP (Required Communication Performance) – характеристики

требуемой связи

RNAV (Area Navigation) – зональная навигация

RNP (Required Navigation Performance) – характеристики требуемой

навигации

RSP (Required Surveillance Performance) – характеристики требуемого

наблюдения

SRTM (Shuttle radar topographic mission) – высотные данные рельефа

TSE (Total System Error) – суммарная погрешность системы

VDL (VHF Data Link) – ОБЧ линия передачи данных

VOR (VHF Omni-directional Radio Range) – всенаправленный

азимутальный ОБЧ радионавигационный маяк

Список литературы

1. Правила аэронавигационного обслуживания. Организация воздушного движения: ИКАО документ 4444 PANS/ATM-501, 2007. – 481с.
2. Руководство по применению минимума вертикального эшелонирования в 300м (1000фут) между ЭП 290 и ЭП 410 включительно: ИКАО документ 9574 AN/934, издание третье, 2012. – 70с.
3. Руководство по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования: ИКАО документ 9689 AN/953, 1998. – 230с.
4. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN): ИКАО документ 9613 AN/937, издание третье, 2008. – 304с.
5. Воздушный транспорт в современном мире: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.В. Бабаскин и др., под ред. П. В. Олянюка. – Санкт-Петербург: Университет гражданской авиации, 2010. – 335 с.
6. Григорьев, С. В. Организация радиотехнического обеспечения полетов. Часть 2. Оптимизация структуры и размещения средств радиотехнического обеспечения полетов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / С.В. Григорьев. – СПб: СПбГУ ГА. Санкт-Петербург, 2013. – 76 с.
7. Верещака, А.И. Авиационное радиооборудование: учебное пособие для вузов гражданской авиации / А.И. Верещака, П.В. Олянюк. – М.: Транспорт, 1996. – 342с.
8. Кузьмин, Б.И. Авиационная цифровая электросвязь в условиях реализации «Концепции ИКАО-ИАТА CNS/ATM» в Российской Федерации / Б.И. Кузьмин. – С.-Петербург, Н. Новгород: ООО «Агентство «ВиТ-принт»», 2007. – 384 с.
9. Федеральная целевая программа «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009-2020 годы)»: [утв. постановлением Правительства Российской Федерации №652 от 1 сент. 2008г.: редакция от 9 марта 2013г.]. – 51с.

10. Концепции создания и развития Аэронавигационной системы России: [одобрена на заседании Правительства Российской Федерации от 4 октября 2006г.]. – 18с.

11. Федеральные авиационные правила «Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь»: [утв. приказом Федеральной аэронавигационной службы №115 от 26 окт. 2007г.]. – 27с.

12. Федеральные авиационные правила «Летные проверки наземных средств радиотехнического обеспечения полетов, авиационной электросвязи и систем светосигнального оборудования аэродромов гражданской авиации»: [утв. приказом Минтранса РФ №1 от 18 янв. 2005г.]. – 39с.

13. Методические рекомендации по летным проверкам наземных средств радиотехнического обеспечения полетов, авиационной электросвязи и систем светосигнального оборудования аэродромов гражданской авиации. Приложение к распоряжению Минтранса России № ИЛ–79-р от 24 августа 2005г.: в ред. распоряжения Минтранса России № МС-82-р от 29.06.2012. – 207с.

14. Кузнецов, В.Л. К задаче моделирования риска столкновений воздушных судов / В.Л. Кузнецов, В.В. Соломенцев // Научный вестник МГТУ ГА, серия Прикладная математика. Информатика. – 2007. – №120. – С. 5–16.

15. Габринович, А.Д. Вероятностная оценка уровня безопасности полетов в зонах ответственности центров управления воздушным движением : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Габринович Анна Данииловна. – СПб., 2009. – 144 с.

16. Компанцева, Е.И. Вероятность опасного сближения воздушных судов, вызванного их продольными отклонениями (ситуация «догон») / Е.И. Компанцева // Научный вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиотехника. – 2005. – №87(5). – С. 63–67.

17. Компанцева, Е.И. Динамическая модель опасного сближения воздушных судов при конфликтной ситуации типа «пересечение» / Е.И. Компанцева // Научный вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиотехника. – 2005. – №87(5). – С. 83–86.

18. Компанцева, Е.И. Вероятность опасного сближения воздушных судов, вызванного их боковыми отклонениями (ситуация «догон») / Е.И. Компанцева // Научный вестник МГТУ ГА, серия Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. – 2005. – №90(8). – С. 139–143.

19. Троицкая, О.А. Динамическая модель опасного сближения воздушных судов при конфликтной ситуации типа «догон» / О.А. Троицкая // Научный вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиотехника. – 2004. – №87(5). – С. 82–92.

20. Троицкая, О.А. Динамическая модель опасного сближения воздушных судов при конфликтной ситуации типа «пересечение» / О.А. Троицкая // Научный вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиотехника. – 2004. – №87(5). – С. 123–128.

21. Соболев, Е.В. Организация радиотехнического обеспечения полетов. Часть 1. Основные эксплуатационные требования к авиационным комплексам навигации, посадки, связи и наблюдения: учебное пособие / Е.В. Соболев. – СПб: СПбГУ ГА. – Санкт-Петербург. – 2007. – 120 с.

22. Соболев, Е.В. Радиотехнические средства навигации: Методические указания к проведению лабораторных занятий на ПЭВМ / Е.В. Соболев, Б.А. Сушкевич. – Санкт-Петербург: Ордена Ленина Академия гражданской авиации. – 1992. – 60с.

23. Аль-Рубой, М.Х. Обзор методик расчета рабочей области азимутально-дальномерных радиотехнических систем / М.Х. Аль-Рубой, Е.А. Рубцов // Естественные и технические науки. – 2014. – №8(76). – С. 137-144.

24. Марьин, Н.П. Моделирование сдерживания линии полета ВС при наличии навигационной общей системной ошибки / Н.П. Марьин // Научный вестник МГТУ ГА, серия Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. – 2005.– №90(8).– С. 82–92.

25. Марьин, Н.П. Контроль выхода летательных аппаратов за пределы трассы (оценка по среднему значению биномиального распределения) / Н.П.

Марьин // Научный вестник МГТУ ГА, серия Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. – 2005. – №90(8). – С. 32–41.

26. Software programs [Электронный ресурс] / SPAWAR: System Center PACIFIC. – Режим доступа: [http:// public.navy.mil/spawar/Pacific/55480/Pages/SoftwarePrograms.aspx](http://public.navy.mil/spawar/Pacific/55480/Pages/SoftwarePrograms.aspx).

27. Civil Aviation [Электронный ресурс] / WRAP International. – Режим доступа: <http://wrap.se/civil-aviation>.

28. Черный, Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный. – М.: Советское радио. – 1962. – 480 с.

29. Рекомендация МСЭ-Т Р.835-4. Эталонные стандарты атмосферы. – 2005. – 10с.

30. Кругов, А.Б. Организация воздушных работ в районах освоения арктического шельфа предприятиями ООО “Газпром” [Частное сообщение]: Материалы VI-го Ежегодного Международного Семинара «Современные средства повышения эффективности и безопасности навигации». – Санкт-Петербург. – 2011. – 17 с.

31. Назаров, В.Н. Программы и методики наземных и летных проверок радиолокационных средств УВД / В.Н. Назаров. – М.: издательство «Воздушный транспорт». – 1989. – 112 с.

32. National Geophysical Data Center (NGDC) [Электронный ресурс] / National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA). – Режим доступа: <http://ngdc.noaa.gov/ngdc.html>.

33. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [Электронный ресурс] / Terrain Data Centre (TRC). – Режим доступа: http://www.src.com/datasets/datasets_terrain.html.

34. Практикум по высшей геодезии (вычислительные работы): учебное пособие для вузов / Н.В. Яковлев, Н.А. Беспалов, В.П. Глумов и др. – М.: издательство «Недра». – 1982. – 370 с.

35. Vincenty, T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equation / T. Vincenty // Survey Review. – 1975. – №23 (176). – P. 88–93.

36. Аэроклиматический справочник СССР. Основные аэроклиматические характеристики. Выпуск 1, часть 1. Северные и центральные районы Европейской территории СССР, Свердловская, Челябинская и Курганская области / Научно-исследовательский институт аэроклиматологии, главная геофизическая обсерватория. – Гидрометеорологическое издательство. – Ленинград. – 1975. – 326 с.

37. Seybold, J.S. Introduction to RF propagation. / J.S. Seybold. – John Wiley & Sons Inc. – Hoboken, New Jersey. – 2005. – 330 p.

38. Быстров, Р.П. Статистика дальности РЛС в гидрометеорах [Электронный ресурс] / Р.П. Быстров, А.В. Соколов, Л.В. Федорова // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – №7. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul12/6/text.html>.

39. Recommendation ITU-R P.528-3. Propagation curves for aeronautical mobile and radionavigation services using the VHF, UHF and SHF bands. – 2012. – 51p.

40. Gierhart, G.D. The IF-77 Electromagnetic Wave Propagation Model / G.D. Gierhart, M.E. Jhonson. – U.S. Department of Commerce National Telecommunications and Information Administration Institute for Telecommunications. Boulder, Colorado. – 1983. – 96 p.

41. Рекомендация МСЭ-Т P.525-2. Расчет ослабления в свободном пространстве. – 1994. – 4с.

42. Долуханов, М.П. Распространение радиоволн / М.П. Долуханов. – М., «Связь». – 1972. – 336с.

43. Голев, К.В. Расчет дальности действия радиолокационных станций / К.В. Голев. – М.: «Сов. Радио». – 1962г. – 204 с.

44. Родос, Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб.-метод. комплекс (учебное пособие) / Л.Я. Родос. – СПб.: Изд-во СЗТУ. – 2007. – 90с.
45. ITU-R Report 1008-1. Reflection from the surface of the earth. – 1990. – 8p.
46. Recommendation ITU-R P.453.-9. The radio refractive index: its formula and refractivity data. – 2003. – 28p.
47. Рекомендация МСЭ-Т P.834-6. Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн. – 2007. – 12 с.
48. Рекомендация МСЭ-Т P.526-13. Распространение радиоволн за счет дифракции. – 2013. – 43с.
49. Описание базовой MMANA-GAL [Электронный ресурс] / Professional antenna software. – Режим доступа: <http://gal-ana.de/basicmm/ru>.
50. Средства связи для гражданской авиации [Электронный ресурс] / ОАО «Владимирский завод Электроприбор». – Режим доступа: http://electropribor.ru/catalog/Sredstva_svyazi_dlya_grazhdanskoy_aviatsii.
51. Авиационная электросвязь. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации: международные стандарты, рекомендуемая практика и правила аэронавигационного обслуживания. Том III. Системы связи. – ИКАО. – 2008. – 277с.
52. Головин, О.В. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / О.В. Головин, С.П. Простов. Под ред. профессора О.В. Головина. – М.: Горячая линия – Телеком. – 2006. – 598 с.
53. Попов, Н.А. Территориальное распределение уровней сигнала на радиотрассах декаметрового диапазона волн от передатчика с антенной «ромб» / Н.А. Попов, Г.И. Данилов, О.Э. Чоракаев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т.13. – 2011. – №4(2). – С. 564–573.
54. Ротхаммель, К. Антенны. Том 1 (11-е издание). / К. Ротхаммель, А. Кришке. – М.: Данвел. – 2007. – 416 с.
55. Альперт, Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера / Я.Л. Альперт. – М., изд-во «Наука». – 1972. – 560 с.

56. Брюнелли, Б.Е. Физика ионосферы / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгладзе. – М.: «Наука». – 1988. – 328 с.
57. Рекомендация МСЭ-Т Р.1239-3. Эталонные характеристики ионосферы, разработанные МСЭ-Т. – 2012. – 29с.
58. Рекомендация МСЭ-Т Р.533-11. Метод для прогнозирования рабочих характеристик ВЧ-линий. – 2012. – 29с.
59. Рекомендация МСЭ-Т Р.368-9. Кривые распространения земной волны для частот между 10 кГц и 30 МГц. – 2007. – 54с.
60. Авиационная электросвязь. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации: международные стандарты, рекомендуемая практика и правила аэронавигационного обслуживания. Том I. Радионавигационные средства. – ИКАО. – 2006. – 616с.
61. Автоматический радиопеленгатор DF 2000 [Электронный ресурс] / Группа компаний «Азимут». – Режим доступа: <http://www.azimut.ru/catalogue/navigation/df2000>.
62. Автоматизированные системы управления воздушным движением. Новые информационные технологии в авиации: учеб. пособие / Р.М. Ахмедов, А.А. Бибутов, А.В. Васильев и др.; под ред. С.Г. Пятко и А.И. Красова. – Спб.: Политехника. – 2004. – 446 с.
63. Babbitt, J. Randolph. Automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) out performance requirements to support air traffic control (ATC) service. Final rule / J. Randolph Babbitt. – Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA). – Washington, DC. – 2010. – 37p.
64. Cabler, J. M. Susan. Avionics supporting automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) aircraft surveillance applications (ASA). Technical standard order / Susan J. M. Cabler. – Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA). – Washington, D.C. – 2010. – 43p.
65. Proposed regulatory plan in support of the Australian government's aviation white paper. Document DP 1006AS. – Australia. – 2010. – 38 p.

66. Lester, A. Edward. Benefits and incentives for ADS-B equipage in the national airspace system. Report № ICAT-2007-2 / Edward A. Lester, R. John Hansman. – MIT international center for air transportation department of aeronautics & astronautics Massachusetts institute of technology. – USA, Cambridge. – 2007. – 156 p.

67. Руководство по требуемым навигационным характеристикам (RNP). ИКАО документ 9613 AN-937. – 1999. – 68 p.

68. Stellios, P.M. Error distributions and accuracy measures in navigation: an overview. Geodesy and geomatics engineering UNB, technical report №113 / P.M. Stellios. – Department of Surveying Engineering University of New Brunswick, Canada. – 1985. – 160 p.

69. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк. – 2000. – 480 с.

70. Проект приказа Минтранса России «Об утверждении Инструкции по построению схем полётов на маршруте и в районе аэродрома при использовании методов зональной навигации». – 2009. – 60с.

71. Ярлыков, М.С. Статистическая теория радионавигации / М.С. Ярлыков. – М.: Радио и связь. – 1985г. – 344 с.

72. Andrews, John W. Validation of required surveillance performance (RSP) accuracy [Private communication] / John W. Andrews, Steven D. Thompson. – 7th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. – Barcellona, Spain. – 2007. – 19 p.

73. Руководство по авиационному наблюдению. ИКАО документ 9924 AN/474. – 2010г. – 336 с.

74. Авиационная электросвязь. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации: Международные стандарты; Рекомендуемая практика и Правила аэронавигационного обслуживания. Том IV. Системы наблюдения и предупреждения столкновений. – ИКАО. – 2008. – 318 с.

75. Кузнецов, А.А. Эксплуатация радиооборудования аэродромов и трасс / А.А. Кузнецов, В.И. Дубровский. – М.: Транспорт. – 1981. – 224 с.

76. Eurocontrol specification for ATM surveillance system performance (Volume 1). – EUROCONTROL-SPEC-0147, first released version. – 2012. – 86 p.
77. Руководство по требуемым характеристикам связи (RCP). ИКАО документ 9869 AN/462. – 2008г. – 46 с.
78. Силяков, В.А. Системы авиационной радиосвязи: учеб. пособие / В.А. Силяков, В.Н. Красюк. – СПб, ГУАП. – 2004. – 160 с.
79. Рева, И.Л. Сравнительный анализ объективных методов оценки разборчивости речи / И.Л. Рева // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – №1 (59). – С. 91–102.
80. Покровский, Н.Б. Расчет и измерение разборчивости речи / Н.Б. Покровский. – Связьиздат, Москва. – 1962г. – 392с.
81. Бобров, Н.В. Радиоприемные устройства / Н.В. Бобров. – изд. 2-е, доп. – М., «Энергия». – 1976. – 368 с.
82. Затучный, Д.А. Вероятность ошибки при передаче информации по цифровому каналу связи / Д.А. Затучный // Научный вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиоэлектроника. – 2007. – №112. – С. 102–106.
83. McConkey, D. Edwin. Automatic Dependent Surveillance for Rotorcraft Operations in a Low Altitude, Non-Radar Environment / Edwin D. McConkey, Eric H. Bolz. – Science Applications International Corporation Air Transportation Systems Operation. Arlington, Virginia. – 1999. – 110 p.
84. Руководство по сети авиационной электросвязи (ATN), использующей стандарты и протоколы пакета протоколов Интернет (IPS). ИКАО документ 9896 AN/469. – издание первое. – 2010г. – 112с.
85. Кузьмин, Б.И. Сети и системы авиационной цифровой электросвязи: учебное пособие. Ч. 2. Международная авиационная телекоммуникационная сеть ATN / Б.И. Кузьмин. – Санкт-Петербург: ООО «Агентство «РДК-принт». – 2000. – 304с.
86. Данко, П.Е. Высшая математика в упражнениях и задачах. В 2ч. Ч. 2: учеб. пособие для вузов / П.Е. Данко, А.Г. Попов, Т.Я. Кожевникова. – 6-е изд. –

М.: ООО «Издательство Оникс»: ООО «Издательства «Мир и Образование». – 2006. – 416 с.

87. Simon, K. Marvin. Digital communication over fading channels: a unified approach to performance analysis / Marvin K. Simon, Mohamed-Slim Alouini. – John Wiley & Sons Inc. – Hoboken, New Jersey. – 2005. – 900p.

88. Бенинг, В.Е. О мощностях критериев в случае обобщённого распределения Лапласа / В.Е. Бенинг, О.О. Лямин // Информатика и её применения. – 2009. – Т.3. №3. – С. 79–85.

89. Единые принципы моделирования риска столкновений в обоснование Руководства по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования (Дос. 9689). ИКАО циркуляр 319 – AN/181. – 2009. – 74с.

90. Kotz, S. The Laplace Distribution and Generalizations: A Revisit with Applications to Communications, Economics, Engineering and Finance. / S. Kotz, T.J. Kozubowski, K. Podgórski. – Birkhäuser, Boston. – 2001. – 349 p.

91. Сарайский, Ю.Н. Геоинформационные основы навигации: учебное пособие / Ю.Н. Сарайский. – СПб: СПбГУГА. – 2010. – 245 с.

92. Энциклопедия безопасности авиации / Н.С. Кулик, В.П. Харченко, М.Г. Луцкий и др. – под ред. Н.С. Кулика. – К.: Техніка. – 2008. – 1000 с.

93. Eurocontrol specification for short term conflict alert. EUROCONTROL-SPEC-122. – first released version. – 2010. – 25 p.

94. Eurocontrol specification for medium-term conflict detection. EUROCONTROL-SPEC-0139. – first released version. – 2010.– 25 p.

95. Общие сведения о Санкт-Петербургском центре ОВД [Электронный ресурс] / филиал «Аэронавигация Северо-Запада», ФГУП «Госкорпорация по ОрВД». – Режим доступа: <http://atcspb.ru>.

96. Служба ЭРТОС Санкт-Петербургского центра ОВД [Электронный ресурс] / филиал «Аэронавигация Северо-Запада», ФГУП «Госкорпорация по ОрВД». – Режим доступа: http://atcspb.ru/?page_id=836.

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФГБОУ ВПО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»**

На правах рукописи



Рубцов Евгений Андреевич

**РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СРЕДСТВ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ
(ПРИЛОЖЕНИЯ)**

05.22.13 — Навигация и управление воздушным движением

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель
кандидат технических наук,
профессор Соболев Е.В.**

Санкт-Петербург — 2015

Содержание

Приложение А. Компьютерные программы, используемые для расчета эксплуатационных характеристик средств РТОП.....	3
Приложение Б. Расчет рабочей области РТС связи ОВЧ диапазона	34
Приложение В. Сравнение расчетных значений зон действия радиолокаторов с данными облетов.....	38
Приложение Г. Оценка степени перекрытия местных воздушных линий РТС связи ОВЧ диапазона в Санкт-Петербургском центре ОВД	49

Приложение А

Компьютерные программы, используемые для расчета эксплуатационных характеристик средств РТОП

1. Распечатка программы расчета углов закрытия (Python 3.2)

```

from math import *
def GradSec(Grad, Min, Sec):
    Grad = Grad * 3600
    Min = Min * 60
    GradSec = Grad + Min + Sec
    return GradSec
    print("GradSec = ", GradSec)
def Point2Geo(B1, L1, A1, S):
    B1=GradSec(B1org[0], B1org[1], B1org[2])
    B1 = B1 / 648000 * pi # в радианах
    L1=GradSec(L1org[0], L1org[1], L1org[2])
    L1 = L1 / 648000 * pi # в радианах
    A1= GradSec(A1org[0], A1org[1], A1org[2])
    A1 = A1 / 648000 * pi # в радианах
    S0 = Sorg/C * ro
    # -- Расчетные формулы --
    # [1]
    Fi[1] = B1
    Gam[1] = Beta * pow(cos(Fi[1]),2)
    V[1] = (1 + 0.6*Gam[1]) / (1 + 0.2*Gam[1])
    Alfa[1] = A1
    dB[1] = S0 * pow(V[1],3) * cos(Alfa[1])
    dL[1] = S0 * V[1] * sin(Alfa[1]) / cos(Fi[1])
    dA[1] = dL[1] * sin(Fi[1])
    # [2]
    Fi[2] = B1 + 0.5 * dB[1] / 648000 * pi
    Gam[2] = Beta * pow(cos(Fi[2]),2)
    V[2] = (1 + 0.6*Gam[2]) / (1 + 0.2*Gam[2])
    Alfa[2] = A1 + 0.5 * dA[1] / 648000 * pi

```

```

dB[2] = S0 * pow(V[2],3) * cos(Alfa[2])
dL[2] = S0 * V[2] * sin(Alfa[2]) / cos(Fi[2])
dA[2] = dL[2] * sin(Fi[2])
# [3]
Fi[3] = B1 + 0.25 * (dB[1] + dB[2]) / 648000 * pi
Gam[3] = Beta * pow(cos(Fi[3]),2)
V[3] = (1 + 0.6*Gam[3]) / (1 + 0.2*Gam[3])
Alfa[3] = A1 + 0.25 * (dA[1] + dA[2]) / 648000 * pi
dB[3] = S0 * pow(V[3],3) * cos(Alfa[3])
dL[3] = S0 * V[3] * sin(Alfa[3]) / cos(Fi[3])
dA[3] = dL[3] * sin(Fi[3])
# [4]
Fi[4] = B1 + (2*dB[3] - dB[2]) / 648000 * pi
Gam[4] = Beta * pow(cos(Fi[4]),2)
V[4] = (1 + 0.6*Gam[4]) / (1 + 0.2*Gam[4])
Alfa[4] = A1 + (2*dA[3] - dA[2]) / 648000 * pi
dB[4] = S0 * pow(V[4],3) * cos(Alfa[4])
dL[4] = S0 * V[4] * sin(Alfa[4]) / cos(Fi[4])
dA[4] = dL[4] * sin(Fi[4])
# [5]
Fi[5] = B1 + 1/27*(7*dB[1] + 10*dB[2] + dB[3]) / 648000 * pi
Gam[5] = Beta * pow(cos(Fi[5]),2)
V[5] = (1 + 0.6*Gam[5]) / (1 + 0.2*Gam[5])
Alfa[5] = A1 + 1/27*(7*dA[1] + 10*dA[2] + dA[3]) / 648000 * pi
dB[5] = S0 * pow(V[5],3) * cos(Alfa[5])
dL[5] = S0 * V[5] * sin(Alfa[5]) / cos(Fi[5])
dA[5] = dL[5] * sin(Fi[5])
# [6]
Fi[6] = B1 + 1/625*(28*dB[1] - 125*dB[2] + 546*dB[3] + 54*dB[4] - 378*dB[5]) / 648000
* pi
Gam[6] = Beta * pow(cos(Fi[6]),2)
V[6] = (1 + 0.6*Gam[6]) / (1 + 0.2*Gam[6])
Alfa[6] = A1 + 1/625*(28*dA[1] - 125*dA[2] + 546*dA[3] + 54*dA[4] - 378*dA[5]) /
648000 * pi
dB[6] = S0 * pow(V[6],3) * cos(Alfa[6])

```

```

dL[6] = S0 * V[6] * sin(Alfa[6]) / cos(Fi[6])
dA[6] = dL[6] * sin(Fi[6])
# -- выходные данные
B2 = 1/6*(dB[1] + 4*dB[3] + dB[4])
L2 = 1/6*(dL[1] + 4*dL[3] + dL[4])
A2 = 1/6*(dA[1] + 4*dA[3] + dA[4])
#переменная для хранения информации (град мин сек)
Bi2=[0.0, 0.0, 0.0]
Li2=[0.0, 0.0, 0.0]
Ai2=[0.0, 0.0, 0.0]
Bi2[0] = int(B2/3600)
Bi2[1] = int((B2/3600 - Bi2[0])*60)
Bi2[2] = round(((B2/3600 - Bi2[0])*60 - Bi2[1])*60,1)
Li2[0] = int(L2/3600)
Li2[1] = int((L2/3600 - Li2[0])*60)
Li2[2] = round(((L2/3600 - Li2[0])*60 - Li2[1])*60,1)
Ai2[0] = int(A2/3600)
Ai2[1] = int((A2/3600 - Ai2[0])*60)
Ai2[2] = round(((A2/3600 - Ai2[0])*60 - Ai2[1])*60,1)
return Bi2 + Li2 + Ai2

# профиль для одного направления
def ProfileRange(Azimuth):
    Bh2 = [0, B1org[1], B1org[2]]
    Lh2 = [0, L1org[1], L1org[2]]
    if B2org[0] != int(fileB) or L2org[0] != int(fileL):
        fileB = str(B1org[0])
        fileL = '0' + str(L1org[0])
        fileName = 'N' + fileB + 'E' + fileL + '.hgt'
        BinHeights = open('Heights_3s/' + fileName, 'rb').read()
    stringNo = int(GradSec(Bh2[0], Bh2[1], Bh2[2])/3) * 1201
    rowNo = int(GradSec(Lh2[0], Lh2[1], Lh2[2])/3)
    pointNo = stringNo + rowNo
    Hi = int.from_bytes(BinHeights[pointNo*2:pointNo*2+2], byteorder='big')
    fileA[0] = str(Azimuth) + '-' + str(0) + '=' + str(Hi)

```



```

Azimuth = 0
A1org = [Azimuth, 0, 0]
# Широта
Bg = input('Широта, градусы: ')
Bm = input('Широта, минуты: ')
Bs = input('Широта, секунды: ')
B1org = [int(Bg), int(Bm), int(Bs)]
# Долгота
Lg = input('Долгота, градусы: ')
Lm = input('Долгота, минуты: ')
Ls = input('Долгота, секунды: ')
L1org = [int(Lg), int(Lm), int(Ls)]
print(B1org)
print(L1org)
# для файла высот
fileB = str(B1org[0])
fileL = '0' + str(L1org[0])
fileName = 'N' + fileB + 'E' + fileL + '.hgt'
# файл с высотами рельефа
BinHeights = open('Heights_3s/' + fileName, 'rb').read()
#высота начальной точки рельефа
stringNo = int(GradSec(0, B1org[1], B1org[2])/3) * 1201
rowNo = int(GradSec(0, L1org[1], L1org[2])/3)
pointNo = stringNo + rowNo
Hi = int.from_bytes(BinHeights[pointNo*2:pointNo*2+2], byteorder='big')
Hant0 = Hi
#Высота антенны
Antenna = int(input('Высота антенны: '))
hAnt = Hant0 + Antenna
print('Абсолютная высота поверхности: ', Hant0, 'м')
print('Абсолютная высота антенны: ', hAnt, 'м')
# высота первой точки (где установлена антенна)
Bh2 = [0, B1org[1], B1org[2]]
Lh2 = [0, L1org[1], L1org[2]]
# двумерный массив с высотами для всех азимутов

```

```

fileRange = [0.0]
# угол закрытия Takeoff Angle
TOA =[0.0] # takeoff angles
Rs =[0.0] #ranges
Hs =[0.0] #heights
for i in range(360):
    fileRange += [0.0]
    TOA += [0.0]
    Rs += [0.0]
    Hs += [0.0]
outFileName = 'Ranges.txt'
TestFile = open('Output_Profiles/' + outFileName, 'w')
outFileName2 = 'Heights.txt'
TestFile2 = open('Output_Profiles/' + outFileName2, 'w')
outFileName3 = 'Angles.txt'
AnglesFile = open('Output_Profiles/' + outFileName3, 'w')
outFileName4 = 'Angles_list.txt'
AnglesList = open('Output_Profiles/' + outFileName4, 'w')
outFileName5 = 'ProfFull.txt'
ProfFull = open('Output_Profiles/' + outFileName5, 'w')
outFileName6 = 'ProfC.txt'
ProfC = open('Output_Profiles/' + outFileName6, 'w')

```

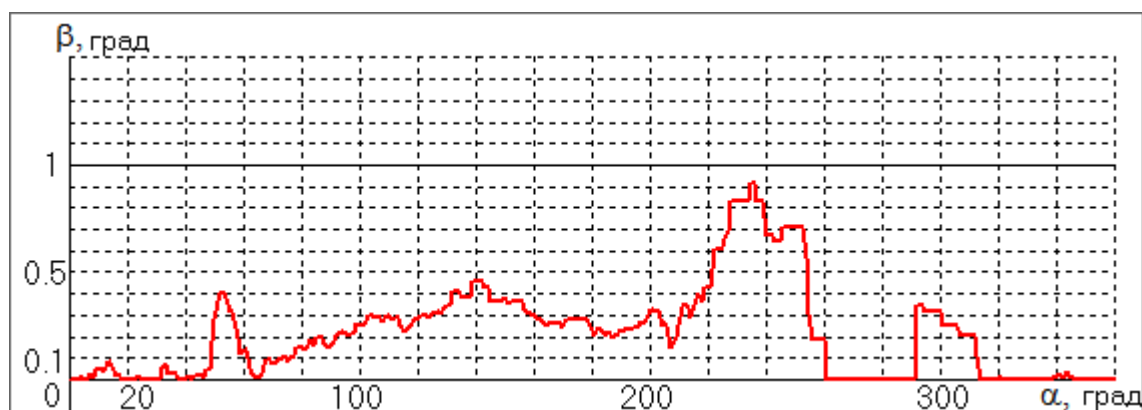


Рисунок А.1 – Пример расчета углов закрытия для АРТР расположенного в Шумилово

2. Распечатка программы стандартного расчета дальности действия

PTC (Visual Basic 6.0)

Option Explicit

```
Dim strFileName As String
Dim strFileW As String
Dim FileNo As Integer
Dim i As Integer
Dim e As Integer
Dim intCounter As Integer
Dim strTemp As String
Dim intEshelon As Single 'eshelon altitude
Dim antennaAltitude As Single 'antenna altitude
Dim sngTOA(360) As Single 'arrey with takeoff angles
Dim sngRange(360) As Single 'arrey with ranges
Dim tgB As Single 'tangent beta angle
Dim sngRangeKM As Single 'range in kilometres
'for negative takeoff angles calculation
Dim sngC, sngA, sngB As Single 'angles of triangle
Dim AC, AB, BC As Single 'sides of triangle
Dim sngK As Single 'koefficient of the horizon utilizing
Dim max(1) As Single 'for maximum range
Dim deltK As Single 'for dinamic koefficient
```

Private Sub Form_Load()

```
pctR.Scale (-460, 460)-(460, -460) 'for 450 km range
intEshelon = Val(txtEsh)
antennaAltitude = Val(txtAntHeight)
sngK = Val(txtKoef)
'scale list
comRange.AddItem "100"
comRange.AddItem "150"
comRange.AddItem "200"
comRange.AddItem "300"
comRange.AddItem "450"
comRange.ListIndex = 1
```

End Sub

Private Sub cmdCalculate_Click()

```
intCounter = 0
FileNo = FreeFile
Open strFileName For Input As FileNo
Do Until EOF(FileNo)
    Input #FileNo, strTemp
    intCounter = intCounter + 1
Loop
Close
'fill arrey takeoff angles
FileNo = FreeFile
Open strFileName For Input As FileNo
For i = 0 To intCounter - 1
```

```

    Input #FileNo, strTemp
    sngTOA(i) = Val(strTemp)
Next i
Close
' antenna and aircraft altitude data
antennaAltitude = Val(txtAntHeight) 'antenna height
sngK = Val(txtKoef) 'koeff
deltK = (0.95 - sngK) / Val(txtEsh)
intEshelon = 10000 'aircraft height
sngK = 0.95 - deltK * intEshelon
For e = 1 To 12
    intEshelon = e * 1000
    sngK = 0.95 - deltK * intEshelon
    Call Range
Next e
intEshelon = 0.5 * 1000
sngK = 0.95 - deltK * intEshelon
Call Range
intEshelon = 0.2 * 1000
sngK = 0.95 - deltK * intEshelon
Call Range
End Sub

Private Sub Range()
'*** calculate range
max(0) = 0
max(1) = 20
For i = 0 To 360
    If max(1) > sngTOA(i) Then max(1) = sngTOA(i): max(0) = i
Next i
For i = 0 To 360
    If sngTOA(i) > 0 Then
        tgB = Sin(sngTOA(i) * 3.14 / 180) / Cos(sngTOA(i) * 3.14 / 180)
        sngRangeKM = Sqr((16900 * tgB / 2) ^ 2 + 16.9 * (intEshelon + antennaAltitude)) - 16900 *
tgB / 2
        sngRangeKM = Int(sngRangeKM * 10) / 10
        sngRange(i) = sngRangeKM * sngK
    Else
        Call TOA
    End If
Next i
max(0) = 0
max(1) = 0
For i = 0 To 360
    If max(1) < sngRange(i) Then max(1) = sngRange(i): max(0) = i
Next i
'fill array takeoff angles
FileNo = FreeFile
strFileW = CurDir + "\Output\" + Str(intEshelon / 1000) + ".txt"
Open strFileW For Output As FileNo
For i = 0 To 360
    Print #FileNo, sngRange(i)

```

Next i
Close
Call DRAW
End Sub

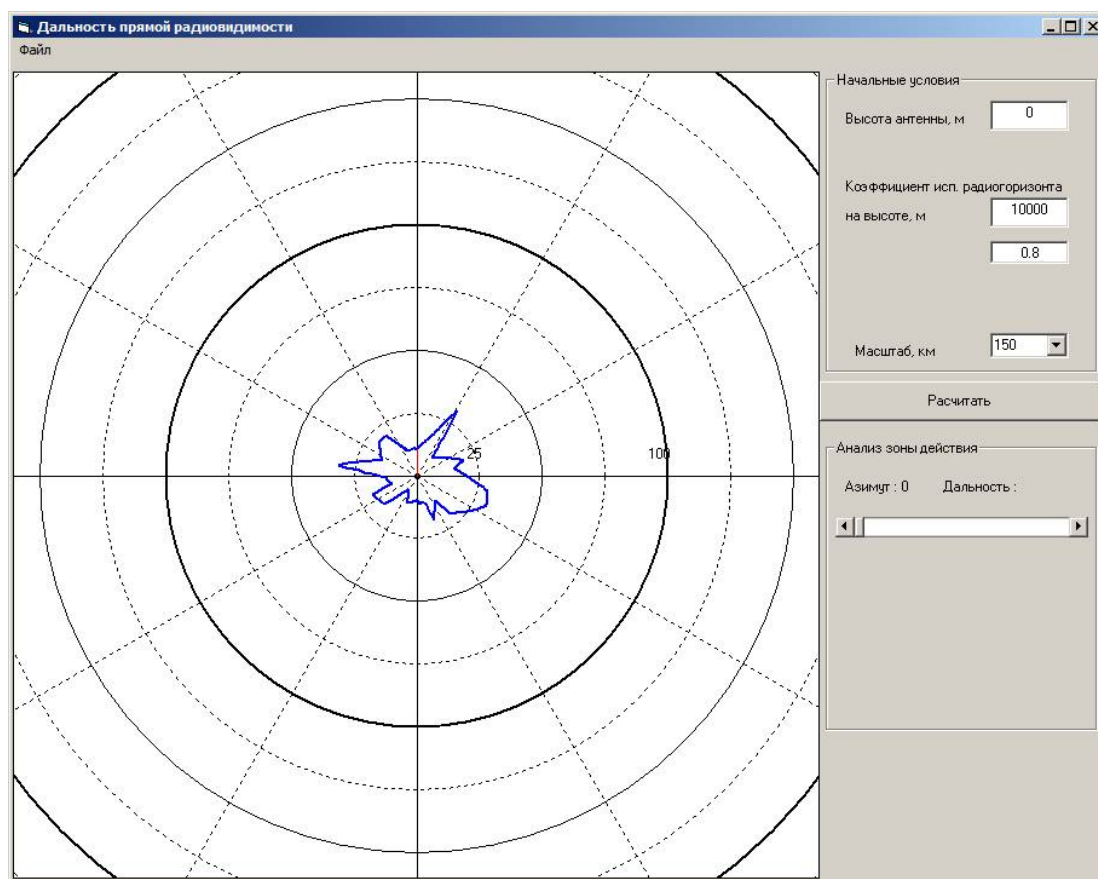


Рисунок А.2 – Главное окно программы стандартного расчета дальности РТС

3. Распечатка программы энергетического расчета дальности действия РТС (Python 3.2)

```
# *** calculate signal power ***
import csv
from math import *
from cmath import *
import numpy as np
from numpy import *
outFileName = 'Range.txt'
TestFile = open('Output/' + outFileName, 'w')
outFileName2 = 'Field.txt'
Field = open('Output/' + outFileName2, 'w')
# действующее значение напряженности (operating field intensity)
Ed = 0
# мощность р/с в кВт
P1 = 0
# КНД передающей антенны (directive gain)
```

```

D1 = 0
# КНД приемной антенны (directive gain)
D2 = 0
# КНД для прямой и отраженной волн (зависят от ДНА)
Dpr = 0
Dotr = 0
# коэффициент нормированной ДНА передающей антенны (для данного угла)
Fant = 0
# wave length
lyamda = 0
# frequency
freq = 0
# soil characteristic
eps = 0 #complex variable
eps0 = 0
sigma = 0
# wave polarization
pol = 'vert' # or 'hor'
# glancing angle
fi = 0
# antenna elevation angle
gam = 0
gam0 = 0
# расстояние до точки отражения
x0 = 0
# удаление до центра эллипса
xn = 0
# полуось эллипса
An = 0
# разность хода лучей
delR = 0
# коэффициент отражения
R = 0 + 0j
# сдвиг фазы (phase shift)
Teta = 0
# propagation factor
F = 0
# simplified propagation factor
Fsimp = 0
AlfaR = 0
BetaR = 0
# ellipse axe
a = 0
# save ranges and heights in two dimentional arrey
arRelief = zeros((2,361))
# range
fileName = 'Data/Ranges.txt'
relR = open(fileName).read()
relR = relR.split('\n')
for i in range(361):
    arRelief[0][i] = float(relR[i])
# height

```

```

fileName = 'Data/Heights.txt'
relH = open(fileName).read()
relH = relH.split('\n')
for i in range(361):
    arRelief[1][i] = float(relH[i])
#function for curve earth
Tup = [1]
for i in range(1,1001):
    Tup += [0]
def HP(r, h1, h2):
    gam = 0
    AngleR = r / 8450000
    for i in range(1, 1001):
        Alfa = AngleR / (2*i)
        Beta = AngleR - Alfa
        Tup1 = atan((cos(Alfa) - 4.12*6370000/(4.12*6370000 + h1))/sin(Alfa))
        Tup2 = atan((cos(Beta) - 4.12*6370000/(4.12*6370000 + h2))/sin(Beta))
        Tup[i] = abs(Tup2 - Tup1)
    for i in range(1, 1001):
        Alfa = AngleR / (2*i)
        Beta = AngleR - Alfa
        Tup1 = atan((cos(Alfa) - 4.12*6370000/(4.12*6370000 + h1))/sin(Alfa))
        Tup2 = atan((cos(Beta) - 4.12*6370000/(4.12*6370000 + h2))/sin(Beta))
        if abs(Tup2-Tup1) == min(Tup):
            AlfaR = AngleR / (2*i)
            BetaR = AngleR - Alfa
            gam = atan((cos(AlfaR) - 4.12*6370000/(4.12*6370000 + h1))/sin(AlfaR))
            gam = atan(((h1-(AlfaR*8450)**2 / 4.12 / 12.74)+(h2-(BetaR*8450)**2 / 4.12 / 12.74))/r)
            x0 = h1 / tan(gam)
            xn = x0 * (1 + lyamda/(2*h1*sin(gam)))
            An = 1/sin(gam) * sqrt(lyamda*h1/sin(gam) * (1 + lyamda/((4*h1*sin(gam)))))
            return [(AlfaR*8450)**2 / 4.12 / 12.74] + [(BetaR*8450)**2 / 4.12 / 12.74] + [gam*180/pi] + [xn -
An] + [xn + An] + [An]  # + [xn] + [An]
# work with antenna diagramm
def CountNumOfRows(strNo, file):
    reader = csv.reader(open(file, "r"))
    count = 0
    for row in reader:
        count = count + 1
        if count == strNo:
            return row
            break
# work with profiles close to antenna
fileName = 'Data/ProfC.txt'
ProfC = open(fileName).read()
ProfList = ProfC.split('\n')
ProfList.remove("")
def CloseProf(Azimuth, A1, B1):
    ProfList2 = zeros((B1-A1)/50)
    Heights = zeros((B1-A1)/50)
    for i in range(int((B1-A1)/50)-1):
        ProfList2[i] = float(ProfList[Azimuth*399 + int(A1) + i])

```

```

delH = sum(ProfList2) / int((B1-A1)/50)
Rel = lyamda / (16*sin(gam0))
for i in range(int((B1-A1)/50)):
    Heights[i] = abs(ProfList2[i] - delH)

avH = sum(Heights) / int((B1-A1)/50)
if Rel < avH:
    pass
# ground and air antenna heights (relative)
h1 = int(input('Введите высоту антенны в метрах: '))
h2 = int(input('Введите высоту ВС в метрах: '))
# reduced heights
hp1 = 0
hp2 = 0
# distance between antennas
r = 0
freq = int(input('Введите частоту в МГц: '))
lyamda = 300/freq
P1 = int(input('Введите мощность передатчика в Ваттах: ')) / 1000
D1 = int(input('Введите КНД наземной антенны: '))
D2 = 1
#polarization
pol = input('Введите вид поляризации (hor / vert): ')
# soil characteristics
eps0 = int(input('Введите проводимость почвы eps: '))
sigma = float(input('Введите диэлектрическую проницаемость почвы sigma: '))
eps = complex(eps0, 60*lyamda*sigma)
# radiation pattern (ДНА)
AntDfile = 'Ant_1.csv'
Azimuth = 0
Zenith = 0
A1 = 0
B1 = 0
Edop = int(input('Введите предельно допустимый уровень напряженности поля, в мкВ/м: '))
for Azimuth in range(360):
    for r in range (50000,400000+1,1000):
        AAA = HP(r, h1, h2)
        hp1 = h1 - AAA[0]
        hp2 = h2 - AAA[1]
        delR = 2 * hp1 * hp2 / r
        gam0 = atan((hp1+hp2)/r)
        fi = pi/2 - gam0
        # эталонный просвет H0
        r1 = arRelief[0][Azimuth]
        k = r1/r
        H0 = sqrt(abs(lyamda*r*k*(1-k)/3))
        # просвет над препятствием
        gam = atan((h1+h2)/r)
        Hpath = r1 * sin(gam) + h1
        Ngrad = -12 * pow(10, -8)
        delH = pow(r1/1000, 2)/16.9
        Hg = Hpath.real + delH - arRelief[1][Azimuth]

```


4. Распечатка программы расчета поля ошибок для азимутально-дальномерных РТС (Python 3.2)

```
# поле ошибок для трассы
from math import *
from numpy import *
import scipy as sp
from scipy.special import *
# WGS-84
compF = 298.257223563
axisA = 6378137
axisB = axisA - axisA/compF
# секунд в радиане
ro=206264.806247096355
# радиус земли
Rz = 6372.9
# перевод градусов в секунды
def GradSec(Grad, Min, Sec):
    Grad = Grad * 3600
    Min = Min * 60
    GradSec = Grad + Min + Sec
    return GradSec
# из радианов в град-мин-сек
def RadCoord(rad):
    Rad = rad*180/pi*3600
    Grad = int(Rad/3600)
    Min = int((Rad/3600-Grad)*60)
    Sec = int(Rad - Grad*3600 - Min*60)
    return (Grad, Min, Sec)
def Trassa(E1, N1, E2, N2):
    #1
    Point1e = GradSec(E1[0], E1[1], E1[2]) / ro
    Point1n = GradSec(N1[0], N1[1], N1[2]) / ro
    #2
    Point2e = GradSec(E2[0], E2[1], E2[2]) / ro
    Point2n = GradSec(N2[0], N2[1], N2[2]) / ro
    # длина трассы (участка трассы)
    Sd = acos(sin(Point1e)*sin(Point2e) + cos(Point1e)*cos(Point2e)*cos(Point2n-Point1n))
    Sd = int(Sd * Rz)
    # точка трассы - через 1км
    arrPoints = zeros([Sd+1,2], dtype=object)
    #начальный азимут (A0) в первой точке трассы
    A0 = cos(Point1e)*tan(Point2e)/sin(Point2n-Point1n) - sin(Point1e)/tan(Point2n-Point1n)
    if A0>=0:
        A0 = arcsin(1/sqrt(1+A0*A0))
    else:
        A0 = pi - arcsin(1/sqrt(1+A0*A0))
    S=1
    AP = Range(VDf1, VDl1, Point1e, Point1n, h)
    # write in file
    ErrorField = open('Output_Files/' + outFileNames, 'a')
```

```

ErrorField.write(str(AP) + '\n')
for i in range(1,Sd-1):
    arrPoints[i][0] = arcsin(sin(Point1e)*cos(S/Rz) + cos(Point1e)*sin(S/Rz)*cos(A0))
    arrPoints[i][1] = Point1n + arccos((cos(S/Rz) -
sin(arrPoints[i][0])*sin(Point1e))/(cos(Point1e)*cos(arrPoints[i][0])))
    Point1e = arrPoints[i][0]
    Point1n = arrPoints[i][1]
    PE = Point1e
    PN = Point1n
    A0 = cos(Point1e)*tan(Point2e)/sin(Point2n-Point1n) - sin(Point1e)/tan(Point2n-Point1n)
    if A0>=0:
        A0 = arcsin(1/sqrt(1+A0*A0))
    else:
        A0 = pi - arcsin(1/sqrt(1+A0*A0))
    arrPoints[i][0] = RadCoord(Point1e)
    arrPoints[i][1] = RadCoord(Point1n)
    AP = Range(VDf1, VDl1, Point1e, Point1n, h)
    # write in file
    ErrorField = open('Output_Files/' + outFileName, 'a')
    ErrorField.write(str(AP) + '\n')
    AP = Range(VDf1, VDl1, Point2e, Point2n, h)
    # write in file
    ErrorField = open('Output_Files/' + outFileName, 'a')
    ErrorField.write(str(AP) + '\n')
#радиус кривизны
def radCurve(B1, B2):
    B = (B1+B2)/2
    e2 = (axisA*axisA - axisB*axisB) / (axisA*axisA)
    p = sqrt(axisA*axisA*cos(B)*cos(B) + axisB*axisB*sin(B)*sin(B))
    radM = axisB*axisA / p
    return radM
def Range(F1, L1, F2, L2, h):
    F1r = F1
    L1r = L1
    F2r = F2
    L2r = L2
    U1 = atan((1-1/compF)*tan(F1r))
    U2 = atan((1-1/compF)*tan(F2r))
    L = L2r - L1r
    sig = 0
    alf = 0
    lam = L
    lam2 = 10
    i=0
    for i in range(5):
        Sinsig = sqrt(pow(cos(U2)*sin(lam),2) + pow(cos(U1)*sin(U2)-sin(U1)*cos(U2)*cos(lam),2))
        Cossig = sin(U1)*sin(U2) + cos(U1)*cos(U2)*cos(lam)
        sig = atan(Sinsig/Cossig)
        Sinalf = cos(U1)*cos(U2)*sin(lam) / Sinsig
        Cos2alf = 1 - pow(Sinalf,2)
        Cosalf = sqrt(Cos2alf)
        Cos2sigm = Cosalf - 2*sin(U1)*sin(U2)/Cos2alf

```

```

C = 1/compF/16 * Cos2alf * (4+1/compF*(4-3*Cos2alf))
lam2 = L + (1-C) * (1/compF) * Sinalf * (sig + C*Sinsig * (Cos2sigm + C*Cossig * (-1 +
2*pow(Cos2sigm,2))))
i=i+1
if (lam2-lam)<pow(10,-12):
    break
lam = lam2
sU = Cos2alf * (axisA*axisA - axisB*axisB) / (axisB*axisB)
A = 1 + sU/256 * (64 + sU * (-12 + 5*sU))
B = sU/512 * (128 + sU * (-64 + 37*sU))
delSig = B * Sinsig * (Cos2sigm + B * Cossig * (-1 + 2*pow(Cos2sigm,2)))
# дальность
S = axisB * A * (sig - delSig)
S = int(S)
# азимут
A1 = atan2(cos(U2)*sin(lam), (cos(U1)*sin(U2)-sin(U1)*cos(U2)*cos(lam)))
if A1<=0:
    A1 = A1+2*pi
if A1>pi:
    A1 = A1 - pi
radiusM = radCurve(F1,F2)
hordS = int(2*radiusM * sin(S/(2*radiusM)))
gamma = pi - (pi-S/radiusM)/2
L = sqrt(h*h + hordS*hordS - 2*h*hordS*cos(gamma) )
sigAL = hordS/1000 * sigAngle1 * pi/180
sigAL = int(sigAL*1000)/1000
if sigAL<0.001:
    siagAL = 0.001
sigD = sigRange1 + hordS/1000 * KoefR
sigD = int(sigD*1000)/1000
if sigD<0.001:
    sigD = 0.001
F2 = RadCoord(F2)
L2 = RadCoord(L2)
return [F2, L2, int(L/100)/10, int(A1*180/pi*10)/10, sigAL, sigD]
# Высота полета BC
h=10000
# файлы для записи поля ошибок для данной высоты
outFileName = 'Error_A-D.txt'
AnglesList = open('Output_Files/' + outFileName, 'w')
# координаты точек трассы
*** начальная
print('Координаты первой точки трассы')
# Широта
Bg = input('Широта, градусы: ')
Bm = input('Широта, минуты: ')
Bs = input('Широта, секунды: ')
E1 = [int(Bg), int(Bm), int(Bs)]
# Долгота
Lg = input('Долгота, градусы: ')
Lm = input('Долгота, минуты: ')
Ls = input('Долгота, секунды: ')

```

5. Распечатка программы расчета поля ошибок для дальномерно-дальномерных РТС (Python 3.2)

```
# DME/DME
from math import *
from numpy import *
import scipy as sp
from scipy.special import *
# WGS-84
compF = 298.257223563
Beta = 1 / compF
axisA = 6378137
axisB = axisA - axisA/compF
ro = 206264.806247096355
# радиус земли
Rz = 6372.9
dB=[0.0]
dL=[0.0]
dA=[0.0]
V=[0.0]
Gam=[0.0]
Alfa=[0.0]
Fi=[0.0]
Bh2 = [0.0]
Lh2 = [0.0]
for i in range(6):
    dB += [0.0]
    dL += [0.0]
    dA += [0.0]
    V += [0.0]
    Gam += [0.0]
    Alfa += [0.0]
    Fi += [0.0]
# перевод градусов в секунды
def GradSec(Grad, Min, Sec):
    Grad = Grad * 3600
    Min = Min * 60
    GradSec = Grad + Min + Sec
    return GradSec
# из радианов в град-мин-сек
def RadCoord(rad):
    Rad = rad*180/pi*3600
    Grad = int(Rad/3600)
    Min = int((Rad/3600-Grad)*60)
    Sec = int(Rad - Grad*3600 - Min*60)
    return (Grad, Min, Sec)
#радиус кривизны
def radCurve(B1, B2):
    B1r = GradSec(B1[0], B1[1], B1[2]) * pi / (180*3600)
    B2r = GradSec(B2[0], B2[1], B2[2]) * pi / (180*3600)
    B = (B1r+B2r)/2 #средняя широта
```

```

e2 = (axisA*axisA - axisB*axisB) / (axisA*axisA)
p = sqrt(axisA*axisA*cos(B)*cos(B) + axisB*axisB*sin(B)*sin(B))
radM = axisB*axisA / p
return radM
def Point2Geo(B1, L1, A1, S):
    S0 = S/axisA * ro
    # -- Расчетные формулы --
    # [1]
    Fi[1] = B1
    Gam[1] = Beta * pow(cos(Fi[1]),2)
    V[1] = (1 + 0.6*Gam[1]) / (1 + 0.2*Gam[1])
    Alfa[1] = A1
    dB[1] = S0 * pow(V[1],3) * cos(Alfa[1])
    dL[1] = S0 * V[1] * sin(Alfa[1]) / cos(Fi[1])
    dA[1] = dL[1] * sin(Fi[1])
    # [2]
    Fi[2] = B1 + 0.5 * dB[1] / 648000 * pi
    Gam[2] = Beta * pow(cos(Fi[2]),2)
    V[2] = (1 + 0.6*Gam[2]) / (1 + 0.2*Gam[2])
    Alfa[2] = A1 + 0.5 * dA[1] / 648000 * pi
    dB[2] = S0 * pow(V[2],3) * cos(Alfa[2])
    dL[2] = S0 * V[2] * sin(Alfa[2]) / cos(Fi[2])
    dA[2] = dL[2] * sin(Fi[2])
    # [3]
    Fi[3] = B1 + 0.25 * (dB[1] + dB[2]) / 648000 * pi
    Gam[3] = Beta * pow(cos(Fi[3]),2)
    V[3] = (1 + 0.6*Gam[3]) / (1 + 0.2*Gam[3])
    Alfa[3] = A1 + 0.25 * (dA[1] + dA[2]) / 648000 * pi
    dB[3] = S0 * pow(V[3],3) * cos(Alfa[3])
    dL[3] = S0 * V[3] * sin(Alfa[3]) / cos(Fi[3])
    dA[3] = dL[3] * sin(Fi[3])
    # [4]
    Fi[4] = B1 + (2*dB[3] - dB[2]) / 648000 * pi
    Gam[4] = Beta * pow(cos(Fi[4]),2)
    V[4] = (1 + 0.6*Gam[4]) / (1 + 0.2*Gam[4])
    Alfa[4] = A1 + (2*dA[3] - dA[2]) / 648000 * pi
    dB[4] = S0 * pow(V[4],3) * cos(Alfa[4])
    dL[4] = S0 * V[4] * sin(Alfa[4]) / cos(Fi[4])
    dA[4] = dL[4] * sin(Fi[4])
    # [5]
    Fi[5] = B1 + 1/27*(7*dB[1] + 10*dB[2] + dB[3]) / 648000 * pi
    Gam[5] = Beta * pow(cos(Fi[5]),2)
    V[5] = (1 + 0.6*Gam[5]) / (1 + 0.2*Gam[5])
    Alfa[5] = A1 + 1/27*(7*dA[1] + 10*dA[2] + dA[3]) / 648000 * pi
    dB[5] = S0 * pow(V[5],3) * cos(Alfa[5])
    dL[5] = S0 * V[5] * sin(Alfa[5]) / cos(Fi[5])
    dA[5] = dL[5] * sin(Fi[5])
    # [6]
    Fi[6] = B1 + 1/625*(28*dB[1] - 125*dB[2] + 546*dB[3] + 54*dB[4] - 378*dB[5]) / 648000 * pi
    Gam[6] = Beta * pow(cos(Fi[6]),2)
    V[6] = (1 + 0.6*Gam[6]) / (1 + 0.2*Gam[6])
    Alfa[6] = A1 + 1/625*(28*dA[1] - 125*dA[2] + 546*dA[3] + 54*dA[4] - 378*dA[5]) / 648000 * pi

```

```

dB[6] = S0 * pow(V[6],3) * cos(Alfa[6])
dL[6] = S0 * V[6] * sin(Alfa[6]) / cos(Fi[6])
dA[6] = dL[6] * sin(Fi[6])
# выходные данные
B2 = 1/6*(dB[1] + 4*dB[3] + dB[4]) + B1*180*3600/pi
L2 = 1/6*(dL[1] + 4*dL[3] + dL[4]) + L1*180*3600/pi
A2 = 1/6*(dA[1] + 4*dA[3] + dA[4]) + A1*180*3600/pi
# переменная для хранения информации
Bi2=[0.0, 0.0, 0.0]
Li2=[0.0, 0.0, 0.0]
Ai2=[0.0, 0.0, 0.0]
Bi2[0] = int(B2/3600)
Bi2[1] = int((B2/3600 - Bi2[0])*60)
Bi2[2] = int(((B2/3600 - Bi2[0])*60 - Bi2[1])*60)
Li2[0] = int(L2/3600)
Li2[1] = int((L2/3600 - Li2[0])*60)
Li2[2] = int(((L2/3600 - Li2[0])*60 - Li2[1])*60)
Ai2[0] = int(A2/3600)
Ai2[1] = int((A2/3600 - Ai2[0])*60)
Ai2[2] = int(((A2/3600 - Ai2[0])*60 - Ai2[1])*60)
return Bi2 + Li2 #+ Ai2
def Trassa(E1, N1, E2, N2):
    #1
    Point1e = GradSec(E1[0], E1[1], E1[2]) / ro
    Point1n = GradSec(N1[0], N1[1], N1[2]) / ro
    #2
    Point2e = GradSec(E2[0], E2[1], E2[2]) / ro
    Point2n = GradSec(N2[0], N2[1], N2[2]) / ro
    # длина трассы
    Sd = acos(sin(Point1e)*sin(Point2e) + cos(Point1e)*cos(Point2e)*cos(Point2n-Point1n))
    Sd = int(Sd * Rz)
    arrPoints = zeros([Sd,2], dtype=object)
    A0 = cos(Point1e)*tan(Point2e)/sin(Point2n-Point1n) - sin(Point1e)/tan(Point2n-Point1n)
    if A0>=0:
        A0 = arcsin(1/sqrt(1+A0*A0))
    else:
        A0 = pi - arcsin(1/sqrt(1+A0*A0))
    S=1
    arrPoints[0][0] = E1
    arrPoints[0][1] = N1
    AP = Range(VDf1o, VDl1o, VDf2o, VDl2o, E1, N1, h)
    ErrorField = open('Output_Files/' + outFileNames, 'a')
    ErrorField.write(str(AP) + '\n')
    for i in range(1,Sd-1):
        arrPoints[i][0] = arcsin(sin(Point1e)*cos(S/Rz) + cos(Point1e)*sin(S/Rz)*cos(A0))
        arrPoints[i][1] = Point1n + arccos((cos(S/Rz) -
sin(arrPoints[i][0])*sin(Point1e))/(cos(Point1e)*cos(arrPoints[i][0])))
        Point1e = arrPoints[i][0]
        Point1n = arrPoints[i][1]
        PE = Point1e
        PN =Point1n
        A0 = cos(Point1e)*tan(Point2e)/sin(Point2n-Point1n) - sin(Point1e)/tan(Point2n-Point1n)

```

```

if A0>=0:
    A0 = arcsin(1/sqrt(1+A0*A0))
else:
    A0 = pi - arcsin(1/sqrt(1+A0*A0))
arrPoints[i][0] = RadCoord(Point1e)
arrPoints[i][1] = RadCoord(Point1n)
AP = Range(VDf1o, VDl1o, VDf2o, VDl2o, RadCoord(Point1e), RadCoord(Point1n), h)
print('AP', AP)
ErrorField = open('Output_Files/' + outFileNames, 'a')
ErrorField.write(str(AP) + '\n')
arrPoints[214][0] = E2
arrPoints[214][1] = N2
AP = Range(VDf1o, VDl1o, VDf2o, VDl2o, E2, N2, h)
ErrorField = open('Output_Files/' + outFileNames, 'a')
ErrorField.write(str(AP) + '\n')
def Range(F1, L1, F2, L2, PF, PL, h):
    # Beacon №1 coordinates in radians
    F1r = GradSec(F1[0], F1[1], F1[2]) * pi / (180*3600)
    L1r = GradSec(L1[0], L1[1], L1[2]) * pi / (180*3600)
    # Beacon №2 coordinates in radians
    F2r = GradSec(F2[0], F2[1], F2[2]) * pi / (180*3600)
    L2r = GradSec(L2[0], L2[1], L2[2]) * pi / (180*3600)
    # Point coordinates in radians
    PFr = GradSec(PF[0], PF[1], PF[2]) * pi / (180*3600)
    PLr = GradSec(PL[0], PL[1], PL[2]) * pi / (180*3600)
    # расстояние между маяками DME
    U1 = atan((1-1/compF)*tan(F1r))
    U2 = atan((1-1/compF)*tan(F2r))
    L = L2r - L1r
    sig = 0
    alf = 0
    lam = L
    lam2 = 10
    i=0
    for i in range(5):
        Sinsig = sqrt(pow(cos(U2)*sin(lam),2) + pow(cos(U1)*sin(U2)-sin(U1)*cos(U2)*cos(lam),2))
        Cossig = sin(U1)*sin(U2) + cos(U1)*cos(U2)*cos(lam)
        sig = atan(Sinsig/Cossig)
        Sinalf = cos(U1)*cos(U2)*sin(lam) / Sinsig
        Cos2alf = 1 - pow(Sinalf,2)
        Cosalf = sqrt(Cos2alf)
        Cos2sigm = Cosalf - 2*sin(U1)*sin(U2)/Cos2alf
        C = 1/compF/16 * Cos2alf * (4+1/compF*(4-3*Cos2alf))
        lam2 = L + (1-C) * (1/compF) * Sinalf * (sig + C*Sinsig * (Cos2sigm + C*Cossig * (-1 +
2*pow(Cos2sigm,2))))
        i=i+1
        if (lam2-lam)<pow(10,-12):
            break
        lam = lam2
    sU = Cos2alf * (axisA*axisA - axisB*axisB) / (axisB*axisB)
    A = 1 + sU/256 * (64 + sU * (-12 + 5*sU))
    B = sU/512 * (128 + sU * (-64 + 37*sU))

```

$$\text{delSig} = B * \text{Sinsig} * (\text{Cos2sigm} + B * \text{Cossig} * (-1 + 2 * \text{pow}(\text{Cos2sigm}, 2)))$$

$$S = \text{axisB} * A * (\text{sig} - \text{delSig})$$

$$S = \text{int}(S)$$

$$\text{ABZ} = \text{atan2}(\cos(U2) * \sin(\text{lam}), (\cos(U1) * \sin(U2) - \sin(U1) * \cos(U2) * \cos(\text{lam})))$$

if $\text{ABZ} \leq 0$:

$$\text{ABZ} = \text{ABZ} + 2 * \pi$$

$$\text{MF} = [0, 0, 0]$$

$$\text{ML} = [0, 0, 0]$$

$$\text{MF}[0] = \text{Point2Geo}(\text{F1r}, \text{L1r}, \text{ABZ}, S/2)[0]$$

$$\text{MF}[1] = \text{Point2Geo}(\text{F1r}, \text{L1r}, \text{ABZ}, S/2)[1]$$

$$\text{MF}[2] = \text{Point2Geo}(\text{F1r}, \text{L1r}, \text{ABZ}, S/2)[2]$$

$$\text{ML}[0] = \text{Point2Geo}(\text{F1r}, \text{L1r}, \text{ABZ}, S/2)[3]$$

$$\text{ML}[1] = \text{Point2Geo}(\text{F1r}, \text{L1r}, \text{ABZ}, S/2)[4]$$

$$\text{ML}[2] = \text{Point2Geo}(\text{F1r}, \text{L1r}, \text{ABZ}, S/2)[5]$$

$$\text{MFr} = \text{GradSec}(\text{MF}[0], \text{MF}[1], \text{MF}[2]) * \pi / (180 * 3600)$$

$$\text{MLr} = \text{GradSec}(\text{ML}[0], \text{ML}[1], \text{ML}[2]) * \pi / (180 * 3600)$$

$$U1 = \text{atan}((1 - 1/\text{compF}) * \tan(\text{F1r}))$$

$$U2 = \text{atan}((1 - 1/\text{compF}) * \tan(\text{PFr}))$$

$$L = \text{PLr} - \text{L1r}$$

Таблица А.1 – Пример поля ошибок азимутально-дальномерной РТС

Координаты точки		Ориентация эллипса ошибок, град	СКП азиму- тального канала, км	СКП дального мерного канала, км
58°27'17" с.ш.	32°44'36" в.д.	205.5	0.429	2.121
58°27'15" с.ш.	32°45'38" в.д.	206.3	0.431	2.129
58°27'13" с.ш.	32°46'40" в.д.	207.0	0.432	2.136
58°27'11" с.ш.	32°47'42" в.д.	207.7	0.434	2.143
58°27'8" с.ш.	32°48'43" в.д.	208.5	0.435	2.151
58°27'6" с.ш.	32°49'45" в.д.	209.2	0.437	2.158
58°27'4" с.ш.	32°50'47" в.д.	210.0	0.438	2.166
58°27'2" с.ш.	32°51'48" в.д.	210.7	0.440	2.173
58°26'59" с.ш.	32°52'50" в.д.	211.4	0.442	2.180

6. Распечатка программы расчета размеров конфликтной зоны геометрическим методом (Python 3.2)

```

from math import *
from numpy import *
import scipy as sp
import numpy as np
from scipy.special import *
import matplotlib.pyplot as plt
# WGS-84
compF = 298.257223563
axisA = 6378137
axisB = axisA - axisA/compF
# секунд в радиане
ro=206264.806247096355
# радиус земли
Rz = 6372.9
# перевод градусов в секунды
def GradSec(Grad, Min, Sec):
    Grad = Grad * 3600
    Min = Min * 60
    GradSec = Grad + Min + Sec
    return GradSec
# из радианов в град-мин-сек
def RadCoord(rad):
    Rad = rad*180/pi*3600
    Grad = int(Rad/3600)
    Min = int((Rad/3600-Grad)*60)
    Sec = int(Rad - Grad*3600 - Min*60)
    return (Grad, Min, Sec)
#радиус кривизны
def radCurve(B1, B2):
    B = (B1+B2)/2
    e2 = (axisA*axisA - axisB*axisB) / (axisA*axisA)
    p = sqrt(axisA*axisA*cos(B)*cos(B) + axisB*axisB*sin(B)*sin(B))
    radM = axisB*axisA / p
    return radM
# расстояние между точками трасс и прямой азимут
def Range(F1, L1, F2, L2):
    if F1 == F2:
        F2 = F2 + 0.000000000001
    if L1 == L2:
        L2 = L2 + 0.000000000001
    # точки трассы №1
    F1r = F1
    L1r = L1
    # точки трассы №2
    F2r = F2
    L2r = L2
    U1 = atan((1-1/compF)*tan(F1r))
    U2 = atan((1-1/compF)*tan(F2r))

```

```

L = L2r - L1r
sig = 0
alf = 0
lam = L
lam2 = 10
i=0
for i in range(5):
    Sinsig = sqrt(pow(cos(U2)*sin(lam),2) + pow(cos(U1)*sin(U2)-sin(U1)*cos(U2)*cos(lam),2))
    Cossig = sin(U1)*sin(U2) + cos(U1)*cos(U2)*cos(lam)
    sig = atan(Sinsig/Cossig)
    Sinalf = cos(U1)*cos(U2)*sin(lam) / Sinsig
    Cos2alf = 1 - pow(Sinalf,2)
    Cosalf = sqrt(Cos2alf)
    Cos2sigm = Cosalf - 2*sin(U1)*sin(U2)/Cos2alf
    C = 1/compF/16 * Cos2alf * (4+1/compF*(4-3*Cos2alf))
    lam2 = L + (1-C) * (1/compF) * Sinalf * (sig + C*Sinsig * (Cos2sigm + C*Cossig * (-1 +
2*pow(Cos2sigm,2))))
    i=i+1
    if (lam2-lam)<pow(10,-12):
        break
    lam = lam2
    sU = Cos2alf * (axisA*axisA - axisB*axisB) / (axisB*axisB)
    A = 1 + sU/256 * (64 + sU * (-12 + 5*sU))
    B = sU/512 * (128 + sU * (-64 + 37*sU))
    delSig = B * Sinsig * (Cos2sigm + B * Cossig * (-1 + 2*pow(Cos2sigm,2)))
    S = axisB * A * (sig - delSig)
    if S is nan:
        S = 100
    S = int(S)
    A1 = atan2(cos(U2)*sin(lam), (cos(U1)*sin(U2)-sin(U1)*cos(U2)*cos(lam)))
    A1 = A1 - pi
    if A1<=0:
        A1 = A1+2*pi
    radiusM = radCurve(F1,F2)
    hordS = int(2*radiusM * sin(S/(2*radiusM)))
    L = hordS
    return [int(L/100)/10, int(A1*180/pi*10)/10]
# трасса №1
strFileName1 = 'Trassa1.txt'
Count1=0
for line in open(strFileName1):
    Count1 += 1
# координаты точек
arrPoints1 = zeros((Count1, 6))
# угол поворота эллипса
arrAng1 = zeros(Count1)
#полуоси эллипса
arrEr1 = zeros((Count1, 2))
#расстояние между точками трассы №2
n=0
for line in open(strFileName1):
    arr = line.replace('[',")

```

```

arr = arr.replace(']', '')
arr = arr.replace('(', '')
arr = arr.replace(')', '')
arr = arr.split(',')
arrPoints1[n] = arr[0], arr[1], arr[2], arr[3], arr[4], arr[5]
arrAng1[n] = arr[7]
arrEr1[n] = arr[8], arr[9]
n += 1
# трасса №2
strFileName2 = 'Trassa2.txt'
Count2=0
for line in open(strFileName2):
    Count2 += 1
# координаты точек
arrPoints2 = zeros((Count2, 6))
# угол поворота эллипса
arrAng2 = zeros(Count2)
#полуоси эллипса
arrEr2 = zeros((Count2, 2))
# расстояние между точками трассы №2
n = 0
for line in open(strFileName2):
    arr = line.replace('[', '')
    arr = arr.replace(']', '')
    arr = arr.replace('(', '')
    arr = arr.replace(')', '')
    arr = arr.split(',')
    arrPoints2[n] = arr[0], arr[1], arr[2], arr[3], arr[4], arr[5]
    arrAng2[n] = arr[7]
    arrEr2[n] = arr[8], arr[9]
    n += 1
# нарушение норм эшелонирования
arrEsh = zeros((Count1, Count2))
# массив с дальностями
arrRoute = zeros((Count1, 2))
# нормы эшелонирования для трасс (в км)
print("")
print('Нормы горизонтального эшелонирования')
CPA1 = int(input('Введите нормы горизонтального эшелонирования для трассы №1, км: '))
CPA2 = int(input('Введите нормы горизонтального эшелонирования для трассы №2, км: '))
print(CPA1+CPA2)
# перебираем все точки второй трассы для каждой точки первой
for j in range(Count1):
    for i in range(Count2):
        E1 = GradSec(arrPoints1[j][0], arrPoints1[j][1], arrPoints1[j][2]) / ro
        N1 = GradSec(arrPoints1[j][3], arrPoints1[j][4], arrPoints1[j][5]) / ro
        E2 = GradSec(arrPoints2[i][0], arrPoints2[i][1], arrPoints2[i][2]) / ro
        N2 = GradSec(arrPoints2[i][3], arrPoints2[i][4], arrPoints2[i][5]) / ro
        Dist = Range(E1, N1, E2, N2)[0]
        if Dist < (CPA1+CPA2):
            arrEsh[j][i] = 1
for j in range(Count1):

```

```

for i in range(Count2):
    # no critical points
    if np.count_nonzero(arrEsh[j]) == Count2:
        arrRoute[j][0] = 0.0
        arrRoute[j][1] = 0.0
        break
    # first point
    if arrEsh[j][i] > 0:
        arrRoute[j][0] = i
        break
for i in range(int(arrRoute[j][0]), Count2):
    if arrEsh[j][i] == 0:
        arrRoute[j][1] = i-1
        if arrRoute[j][1] == -1:
            arrRoute[j][1] = 0
        break
    if i == Count2-1:
        arrRoute[j][1] = Count2-1
        break
# файлы для записи
outFileName = 'A-D.txt'
AnglesList = open(outFileName, 'w')
for i in range(Count1):
    Ans = i, ') ', arrRoute[i][0], arrRoute[i][1]
    ErrorField = open(outFileName, 'a')
    ErrorField.write(str(Ans) + '\n')
arrX = zeros(Count1)
for i in range(Count1):
    arrX[i] = i+1
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111)
ax.plot(arrX, arrRoute, 'o')
plt.show()

```

7. Распечатка программы расчета размеров конфликтной зоны вероятностным методом (Python 3.2)

```

from math import *
from numpy import *
import scipy as sp
import numpy as np
from scipy.special import *
import matplotlib.pyplot as plt
# WGS-84
compF = 298.257223563
axisA = 6378137
axisB = axisA - axisA/compF
# секунд в радиане
ro=206264.806247096355

```

```

# радиус земли
Rz = 6372.9
# перевод градусов в секунды
def GradSec(Grad, Min, Sec):
    Grad = Grad * 3600
    Min = Min * 60
    GradSec = Grad + Min + Sec
    return GradSec
# из радианов в град-мин-сек
def RadCoord(rad):
    Rad = rad*180/pi*3600
    Grad = int(Rad/3600)
    Min = int((Rad/3600-Grad)*60)
    Sec = int(Rad - Grad*3600 - Min*60)
    return (Grad, Min, Sec)
#радиус кривизны
def radCurve(B1, B2):
    B = (B1+B2)/2
    e2 = (axisA*axisA - axisB*axisB) / (axisA*axisA)
    p = sqrt(axisA*axisA*cos(B)*cos(B) + axisB*axisB*sin(B)*sin(B))
    radM = axisB*axisA / p
    return radM
def Range(F1, L1, F2, L2):
    if F1 == F2:
        F2 = F2 + 0.000000000001
    if L1 == L2:
        L2 = L2 + 0.000000000001
    # точки трассы №1
    F1r = F1
    L1r = L1
    # точки трассы №2
    F2r = F2
    L2r = L2
    U1 = atan((1-1/compF)*tan(F1r))
    U2 = atan((1-1/compF)*tan(F2r))
    L = L2r - L1r
    sig = 0
    alf = 0
    lam = L
    lam2 = 10
    i=0
    for i in range(5):
        Sinsig = sqrt(pow(cos(U2)*sin(lam),2) + pow(cos(U1)*sin(U2)-sin(U1)*cos(U2)*cos(lam),2))
        Cossig = sin(U1)*sin(U2) + cos(U1)*cos(U2)*cos(lam)
        sig = atan(Sinsig/Cossig)
        Sinalf = cos(U1)*cos(U2)*sin(lam) / Sinsig
        Cos2alf = 1 - pow(Sinalf,2)
        Cosalf = sqrt(Cos2alf)
        Cos2sigm = Cosalf - 2*sin(U1)*sin(U2)/Cos2alf
        C = 1/compF/16 * Cos2alf * (4+1/compF*(4-3*Cos2alf))
        lam2 = L + (1-C) * (1/compF) * Sinalf * (sig + C*Sinsig * (Cos2sigm + C*Cossig * (-1 +
2*pow(Cos2sigm,2))))

```

```

i=i+1
if (lam2-lam)<pow(10,-12):
    break
lam = lam2
sU = Cos2alf * (axisA*axisA - axisB*axisB) / (axisB*axisB)
A = 1 + sU/256 * (64 + sU * (-12 + 5*sU))
B = sU/512 * (128 + sU * (-64 + 37*sU))
delSig = B * Sinsig * (Cos2sigm + B * Cossig * (-1 + 2*pow(Cos2sigm,2)))
S = axisB * A * (sig - delSig)
S = int(S)
A1 = atan2(cos(U2)*sin(lam), (cos(U1)*sin(U2)-sin(U1)*cos(U2)*cos(lam)))
A1 = A1 - pi
if A1<=0:
    A1 = A1+2*pi
radiusM = radCurve(F1,F2)
hordS = int(2*radiusM * sin(S/(2*radiusM)))
L = hordS
return [int(L/100)/10, int(A1*180/pi*10)/10]
# трасса №1
strFileName1 = 'Trassa1.txt'
Count1=0
for line in open(strFileName1):
    Count1 += 1
# координаты точек
arrPoints1 = zeros((Count1, 6))
# угол поворота эллипса
arrAng1 = zeros(Count1)
#полуоси эллипса
arrEr1 = zeros((Count1, 2))
n=0
for line in open(strFileName1):
    arr = line.replace('[', '')
    arr = arr.replace(']', '')
    arr = arr.replace('(', '')
    arr = arr.replace(')', '')
    arr = arr.split(',')
    arrPoints1[n] = arr[0], arr[1], arr[2], arr[3], arr[4], arr[5]
    arrAng1[n] = arr[7]
    arrEr1[n] = arr[8], arr[9]
    n += 1
# трасса №2
strFileName2 = 'Trassa2.txt'
Count2=0
for line in open(strFileName2):
    Count2 += 1
# координаты точек
arrPoints2 = zeros((Count2, 6))
# угол поворота эллипса
arrAng2 = zeros(Count2)
#полуоси эллипса
arrEr2 = zeros((Count2, 2))
# нормальное распределение

```

```

arrEshN = zeros((Count1, Count2))
# обобщенное распределение лапласа
arrEshL = zeros((Count1, Count2))
# составное распределение
arrEshCOM = zeros((Count1, Count2))
# массив с дальностями
arrRouteN = zeros((Count1, 2))
arrRouteL = zeros((Count1, 2))
arrRouteCOM = zeros((Count1, 2))
n = 0
for line in open(strFileName2):
    arr = line.replace('[', '')
    arr = arr.replace(']', '')
    arr = arr.replace('(', '')
    arr = arr.replace(')', '')
    arr = arr.split(',')
    arrPoints2[n] = arr[0], arr[1], arr[2], arr[3], arr[4], arr[5]
    arrAng2[n] = arr[7]
    arrEr2[n] = arr[8], arr[9]
    n += 1
N1 = 10
N2 = 10
lam1 = N1/Count1
lam2 = N2/Count2
ax=0
ay=0
# вероятность нахождения ВС на эшелоне в первой точке
n = 5000 # количество итераций для метода Монте-Карло
d = float(input('Минимум горизонтального эшелонирования, км: '))
Rad = 200
r = 0
ax1 = 0
ay1 = 0
P1 = [0,0,0] # вероятность нахождения ВС в первой точке
P2 = [0,0,0] # вероятность нахождения ВС во второй точке
# перебираем все точки второй трассы для каждой точки первой
for j in range(Count1):
    print(j)
    Angle = random.uniform(0, 360, n)
    Radius = d + Rad * sqrt(random.uniform(0, 1, n))
    x = cos(Angle*pi/180)*Radius + ax1
    y = sin(Angle*pi/180)*Radius + ay1
    # погрешности
    s1n = arrEr1[j][0]
    s2n = arrEr1[j][1]
    #Normal
    sn = sum(1/(s1n*s2n*2*pi*sqrt(1-r*r))*exp(-1/(2*(1-r*r)) * ((x-ax)**2/s1n/s1n - 2*r*(x-ax)*(y-ay)/s1n/s2n + (y-ay)**2/s2n/s2n)))
    #Laplace
    sl = sum(1/(2*pi*s1n*s2n*sqrt(1-r*r)) * kv(0,1/sqrt(s1n*s2n*sqrt(1-r*r))*sqrt((x-ax)*(x-ax)*s2n/s1n - 2*r*(x-ax)*(y-ay) + (y-ay)*(y-ay)*s1n/s2n)))

```

8. Распечатка программы отображения 3Д и РО на радионавигационной карте (Visual Basic 6.0)

Option Explicit

```
Dim i, j, k As Integer 'counters
Dim koefK As Integer 'eshelon coefficient
Dim EshArrey(36) As Integer 'arrey with eshelons
Dim MinArrey(36) As Integer 'arrey for round off inserting data
Dim intEshelon As Integer
Dim min, max As Integer
Dim frMapContainerTop, frMapContainerLeft As Integer 'left upper frame corner
Dim frMapContainerHeight, frMapContainerWidth As Integer 'right lower frame corner
```

(size)

```
Dim FormMinHeight, FormMinWidth As Integer 'minimal form size
Dim minMapNavHeight, minMapNavWidth As Integer 'minimal size of map
```

navigation frame

```
Dim frMapNavHeight, frMapNavWidth As Integer 'right lower frame corner (size)
Dim intNavRmin, intNavRmax As Integer 'radius for navigation picture
Dim sngNavA(7) As Single 'angles for navigation picture
Dim navX, navY As Single 'coordinates for Nav picture
Dim sngNavCurA As Single 'current radius from vertical line
Dim sngNavCurR As Single 'current radius of cursor
Dim picFLAG As Boolean 'flag for down button picture
Dim directoryFLAG As Boolean
Dim flagPressSec As Byte 'for each sector on the picture - button is pressed
Dim flagCurSec As Byte 'current cursor location
Dim flagPress As Boolean 'determining wheather buttom is pressed
Dim flagUp, flagRight, flagDown, flagLeft As Boolean 'for blocking directions
Dim flagSpace As Boolean 'for moving map by mouse
Dim flagMouse As Boolean 'to check wheather mouse button is pressed
Dim flageHadPermit As Boolean 'permission for hand moving
Dim x1, x2, y1, y2 As Single 'for hand moving
Dim flagNumPad As Boolean 'for enabling/disabling NumPad
Dim butDirection As Integer 'move using NumPad
Dim flagMouseDown As Boolean 'pressed button
Dim intScale As Byte 'For changing scale by scroll bar
Dim corX, corY As Single
'additional
Dim realRadius As Integer
Dim realAngle As Single
Dim mapX, mapY As Single
Dim intCounter As Integer 'counter
Dim intSubCounter As Integer 'sub counter
Dim intRadiusKM As Integer 'ðààèõñ çüü ääéñòâèý â èì
'for dawning
Dim ObjArreyData() As Variant 'for equated data (zone radius etc)
Dim ObjArreyDraw() As Variant 'data for drawing (koordinates of zone dots)
Dim TakeoffAngleData() As Variant 'for take off angles
Dim TakeoffAngleDraw() As Variant 'data for drawing
Dim EshelonData() As Variant 'eshelones at azimuth
Dim EshelonDraw() As Variant 'drawing eshelons
```



```

'Effective range arrays
Dim sngCircleEffRange As Single      'for circle zone
Dim CircleEffRangeData() As Variant
Dim CircleEffRangeDraw() As Variant
Dim AzimuthEffRangeData() As Variant 'data for each azimuth
Dim AzimuthEffRangeDraw() As Variant 'draw for each azimuth
'map
Dim flagCalculated As Boolean      'show the end of equation
Dim arrNorth(360) As Single      'array for north direction
Dim intNorthAngle As Integer      'for saving the angle
Dim X, Y As Single                'for drawing
Dim a, R As Single                'for drawing (polar coordinates)
Dim varColor As Variant           'color of object
Dim sngTwipKoeff As Single        'for recalculation kilometres into twips
Dim eshX1, eshX2, eshY1, eshY2 As Single 'for eshelon range calculation
Dim eshK, eshB As Single          'coefficients for eshelon range calculation
Dim tgB As Single                 'tangent of takeoff angle
'for information
Dim minZone, maxZone As Single    'Zone
Dim minRange, maxRange As Single  'effective range
Dim strZonemin, strZonemax As String 'string variable for txtInformation Zone
Dim strRangemin, strRangemax As String 'string variable for txtInformation Effective
Range
'for takeoff angle
Dim sngAngleKoeff As Single
Dim FileNo As Integer
Dim strFileName As String
'for new meridians
Dim PoleX, PoleY As Integer      'pole coordinates
Dim AngleMer As Single           'meridian angle
Dim strTemp As String
Dim coorForReport(1, 360) As Single 'coordinates of each point, for report
Dim strColour
'for several antennas
Dim rFile As String
Dim cFile As String
Dim rLongitude As Single 'for coordinates
Dim rLatitude As Single
Dim sngLongitude As Single

Private Declare Function GetWindowRect Lib "user32" (ByVal hwnd As Long, lpRect As
RECT) As Long
Private Declare Function ReleaseDC Lib "user32" (ByVal hwnd As Long, ByVal hdc As
Long) As Long
Private Declare Function OpenClipboard Lib "user32" (ByVal hwnd As Long) As Long
Private Declare Function EmptyClipboard Lib "user32" () As Long
Private Declare Function SetClipboardData Lib "user32" (ByVal wFormat As Long, ByVal
hMem As Long) As Long
Private Declare Function CloseClipboard Lib "user32" () As Long
Private Declare Function SelectObject Lib "gdi32" (ByVal hdc As Long, ByVal hObject As
Long) As Long
Private Declare Function DeleteDC Lib "gdi32" (ByVal hdc As Long) As Long

```

```
Private Declare Function BitBlt Lib "gdi32" (ByVal hDestDC As Long, ByVal X As Long,
ByVal Y As Long, ByVal nWidth As Long, ByVal nHeight As Long, ByVal hSrcDC As Long, ByVal
xSrc As Long, ByVal ySrc As Long, ByVal dwRop As Long) As Long
```

```
Private Declare Function CreateDC Lib "gdi32" Alias "CreateDCA" (ByVal lpDriverName
As String, ByVal lpDeviceName As String, ByVal lpOutput As String, lpInitData As DEVMODE) As
Long
```

```
Private Declare Function CreateCompatibleBitmap Lib "gdi32" (ByVal hdc As Long, ByVal
nWidth As Long, ByVal nHeight As Long) As Long
```

```
Private Declare Function CreateCompatibleDC Lib "gdi32" (ByVal hdc As Long) As Long
```

```
Private Declare Function GetDesktopWindow Lib "user32" () As Long
```

```
Private Const CCHDEVICENAME = 32
```

```
Private Const CCHFORMNAME = 32
```

```
Private Type RECT
```

```
Left As Long
```

```
Top As Long
```

```
Right As Long
```

```
Bottom As Long
```

```
End Type
```

```
Private Type DEVMODE
```

```
dmDeviceName As String * CCHDEVICENAME
```

```
dmSpecVersion As Integer
```

```
dmDriverVersion As Integer
```

```
dmSize As Integer
```

```
dmDriverExtra As Integer
```

```
dmFields As Long
```

```
dmOrientation As Integer
```

```
dmPaperSize As Integer
```

```
dmPaperLength As Integer
```

```
dmPaperWidth As Integer
```

```
dmScale As Integer
```

```
dmCopies As Integer
```

```
dmDefaultSource As Integer
```

```
dmPrintQuality As Integer
```

```
dmColor As Integer
```

```
dmDuplex As Integer
```

```
dmYResolution As Integer
```

```
dmTTOption As Integer
```

```
dmCollate As Integer
```

```
dmFormName As String * CCHFORMNAME
```

```
dmUnusedPadding As Integer
```

```
dmBitsPerPel As Integer
```

```
dmPelsWidth As Long
```

```
dmPelsHeight As Long
```

```
dmDisplayFlags As Long
```

```
dmDisplayFrequency As Long
```

```
End Type
```

```
Public Sub Capture(control_hWnd As Long, fName As String, Optional OnlyToClipboard As
Boolean = False)
```

```
On Error GoTo ErrorCapture
```

```

Dim sp As RECT, X As Long
If fName <> "" Then
X = GetWindowRect(control_hWnd, sp)
ScrnCap sp.Left, sp.Top, sp.Right, sp.Bottom
If OnlyToClipboard = False Then
SavePicture Clipboard.GetData, fName
End If
End If
Exit Sub
ErrorCapture:
MsgBox Err & ":Error in Caputre(). Error Message:" & Err.Description, vbCritical,
"Warning"
Exit Sub
End Sub

Private Sub ScrnCap(Lt, Top, Rt, Bot)
On Error GoTo ErrorScrnCap
Dim rWIDTH As Long, rHEIGHT As Long
Dim SourceDC As Long, DestDC As Long, bHANDLE As Long, Wnd As Long
Dim dHANDLE As Long, dm As DEVMODE
rWIDTH = Rt - Lt
rHEIGHT = Bot - Top
SourceDC = CreateDC("DISPLAY", 0&, 0&, dm)
DestDC = CreateCompatibleDC(SourceDC)
bHANDLE = CreateCompatibleBitmap(SourceDC, rWIDTH, rHEIGHT)
SelectObject DestDC, bHANDLE
BitBlt DestDC, 0, 0, rWIDTH, rHEIGHT, SourceDC, Lt, Top, &HCC0020
Wnd = 0
OpenClipboard Wnd
EmptyClipboard
SetClipboardData 2, bHANDLE
CloseClipboard
DeleteDC DestDC
ReleaseDC dHANDLE, SourceDC
Exit Sub
ErrorScrnCap:
MsgBox Err & ":Error in ScrnCap(). Error Message:" & Err.Description, vbCritical,
"Warning"
Exit Sub
End Sub

Public Sub CaptureDesktop()
On Error GoTo ErrorCaptureDesktop
Dim dhWND As Long, sp As RECT, X As Long
dhWND = GetDesktopWindow
If dhWND <> 0 Then
X = GetWindowRect(dhWND, sp)
ScrnCap sp.Left, sp.Top, sp.Right, sp.Bottom
End If
Exit Sub
ErrorCaptureDesktop:

```

```
MsgBox Err & ":Error in CaptureDesktop. Error Message: " & Err.Description, vbCritical,
"Warning"
```

```
Exit Sub
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Color1_Click()
```

```
    '* change graphic colour
```

```
    If Color1 = 0 Then
```

```
        Color1.BackColor = vbYellow
```

```
    Else
```

```
        Color1.BackColor = vbMagenta
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Color2_Click()
```

```
    '* change graphic colour
```

```
    If Color2 = 0 Then
```

```
        Color2.BackColor = vbYellow
```

```
    Else
```

```
        Color2.BackColor = vbMagenta
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Color3_Click()
```

```
    '* change graphic colour
```

```
    If Color3 = 0 Then
```

```
        Color3.BackColor = vbYellow
```

```
    Else
```

```
        Color3.BackColor = vbMagenta
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Color4_Click()
```

```
    '* change graphic colour
```

```
    If Color4 = 0 Then
```

```
        Color4.BackColor = vbYellow
```

```
    Else
```

```
        Color4.BackColor = vbMagenta
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Color5_Click()
```

```
    '* change graphic colour
```

```
    If Color5 = 0 Then
```

```
        Color5.BackColor = vbYellow
```

```
    Else
```

```
        Color5.BackColor = vbMagenta
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

Приложение Б

Расчет рабочей области РТС связи ОВЧ диапазона

Найдем радиус рабочей области РТС связи ОВЧ диапазона, используя кривые из рекомендации МСЭ-Т 528-3 (показаны на рисунке Б.1).

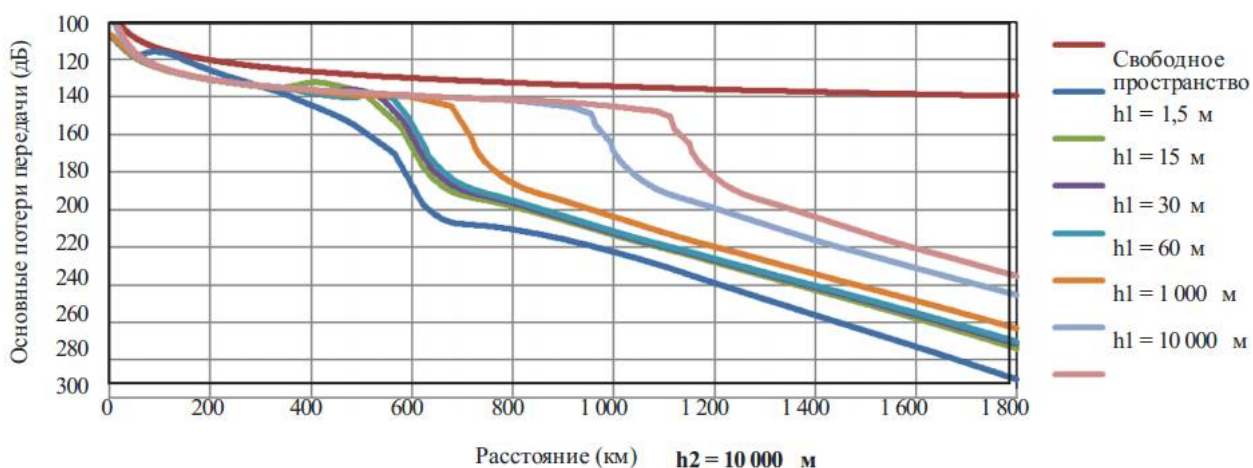


Рисунок Б.1 – Кривые потерь на частоте 125МГц для 95% времени

Пусть радиостанция имеет мощность 50Вт (значение характерное для современных радиостанций семейства Фазан и Полет), что соответствует 46.9дБм. Усиление наземной антенны примем равным 2дБ (что соответствует антеннам Л-120 или АНК-100/150), бортовую антенну будем считать всенаправленной. Мощность сигнала вблизи бортовой антенны находим по формуле:

$$P_{ПРМ_A} = P_{ПРД_A} - L, \quad (Б.1)$$

где L – потери на распространение

Действующая длина бортовой антенны ОВЧ диапазона составляет 0.2...0.5м, в расчетах будем использовать величину 0.3м. Таким образом, можно посчитать напряжение сигнала на входе приемника.

Также необходимо знать напряжение шума. Оно складывается из собственного шума приемника и атмосферных шумов (включающих естественные и искусственные). Собственный шум приемника находится как:

$$T_{\text{ПР}} = (K_{\text{ШПР}} - 1) \cdot T_0, \quad (\text{Б.2})$$

где $K_{\text{ШПР}}$ - коэффициент шума приемника;
 $T_0 = 293\text{K}$

При коэффициенте шума равном 10, получим

$$T_{\text{ПР}} = (10 - 1) \cdot 293 = 2630\text{K} \quad (\text{Б.3})$$

Необходимо также учитывать шумовую температуру антенны T_A . Мощность шума приемника находится как:

$$P_{\text{Ш_ПРМ}} = k(T_{\text{ПР}} + T_A) \cdot \Delta F, \quad (\text{Б.4})$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана;
 ΔF - ширина полосы пропускания приемника.

Шумовую температуру бортовой антенны примем за 1000K (в диапазоне метровых волн она может достигать 1400K). Ширина полосы пропускания приемника 300...2700Гц. Тогда:

$$P_{\text{Ш_ПРМ}} = 120 \cdot 10^{-18} \text{Вт} \quad (\text{Б.5})$$

Мощность атмосферных шумов зависит от района, над которым совершается полет, времени суток, грозовой активности и многих других факторов, учет которых является сложной, а подчас и просто невыполнимой задачей. Поэтому, в расчетах рекомендуется применять средние значения атмосферных шумов, характерные для данного региона.

Шумовая температура для большого города на частоте 100МГц оценивается примерно в 30000K, за пределами города она снижается примерно до 3000K. Трассы преимущественно пролегают как над тихими местами, поэтому примем среднюю температуру за 4000K, а мощность атмосферного и промышленного шума на входе приемника: $P_{\text{Ш_атм}} = 166 \cdot 10^{-18} \text{Вт}$. Напряжение помехи находится как:

$$U_{\text{П}} = \sqrt{\frac{P_{\text{Ш_ПРМ}} + P_{\text{Ш_атм}}}{R}} = \sqrt{\frac{120 \cdot 10^{-18} + 166 \cdot 10^{-18}}{50}} = 2.4 \cdot 10^{-9} \text{В} \quad (\text{Б.6})$$

Зная напряжение помехи, а также имея кривую потерь на распространение можно определить отношение сигнал/шум на различных удалениях от радиостанции (показано в таблице Б.1).

Таблица Б.1

Удаление, км	Потери, дБ	U_c , дБм / мкВ	U_c/U_{Π} , дБ
80	124	-77,0 / 0.120	16.98
100	126	-79,1 / 0.076	15.00
120	127	-80,1 / 0.060	13.98
140	128	-81,1 / 0.050	13.18
160	130	-83,1 / 0.030	10.97
180	131	-84,1 / 0.030	10.97
200	131	-84,1 / 0.024	10.00
220	132	-85,1 / 0.019	8.98
240	133	-86,1 / 0.015	7.95
260	134	-87,1 / 0.012	6.98
280	134	-87,1 / 0.012	6.98
300	135	-88,1 / 0.010	6.19
320	136	-89,1 / 0.008	5.22
340	137	-90,1 / 0.006	3.98
360	138	-91,1 / 0.005	3.18
380	139	-92,1 / 0.004	2.23
400	140	-93,0 / 0.003	0.97

Из таблицы Б.1 видно, что радиосвязь имеет отличное качество на дальностях до 200км, и приемлемое – на дальностях до 370км.

Результаты расчета РО для цифровых средств радиосвязи представлены в таблице Б.2.

Таблица Б.2

Удаление, км	$U_C/U_{П}$, дБ	BER	Р при S =100 бит	Р при S =350 бит	Р при S =8300 бит
80	16.98	$4.77 \cdot 10^{-7}$	$6.5 \cdot 10^{-21}$	$1.42 \cdot 10^{-18}$	$5 \cdot 10^{-13}$
100	15.00	$2.86 \cdot 10^{-5}$	$8.4 \cdot 10^{-14}$	$1.84 \cdot 10^{-11}$	$6.4 \cdot 10^{-7}$
120	13.98	$0.22 \cdot 10^{-3}$	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$6.46 \cdot 10^{-8}$	0.002
140	13.18	$0.6 \cdot 10^{-3}$	$1.62 \cdot 10^{-8}$	$3.57 \cdot 10^{-6}$	0.052
160	10.97	$4 \cdot 10^{-3}$	$3.21 \cdot 10^{-5}$	0.007	0.1
180	10.97	$4 \cdot 10^{-3}$	$3.21 \cdot 10^{-5}$	0.007	0.1
200	10.00	$11 \cdot 10^{-3}$	0.001	0.04	0.15

Анализ таблицы Б.2 показывает, что для цифровых каналов связи радиус рабочей области составит 150км (для сообщения размером 100 бит), 130км (для сообщения размером 350 бит) и 110км (для сообщения размером 8300 бит).

Размер РО цифровой радиосвязи определяется отношением сигнал/шум, поэтому, при другом виде кривой потерь, данные таблицы будут иметь другие значения.

Приложение В

Сравнение расчетных значений зон действия радиолокаторов с данными облетов

Рассмотрим радиолокаторы Санкт-Петербургского центра ОВД. Данные радиолокаторы размещены на территории аэродрома Пулково.

ТРЛК «Утес» имеет координаты: $59^{\circ}46'23''$ с.ш., $30^{\circ}16'45''$ в.д. Сравнение расчетных зон действия, полученные с помощью рассмотренных ранее компьютерных программ, для высот 10000, 6000 и 3000м показаны на рисунках В.1, В.2 и В.3. Зоны действия, полученные расчетными методами имеют синий цвет, полученные в ходе облетов – красный.

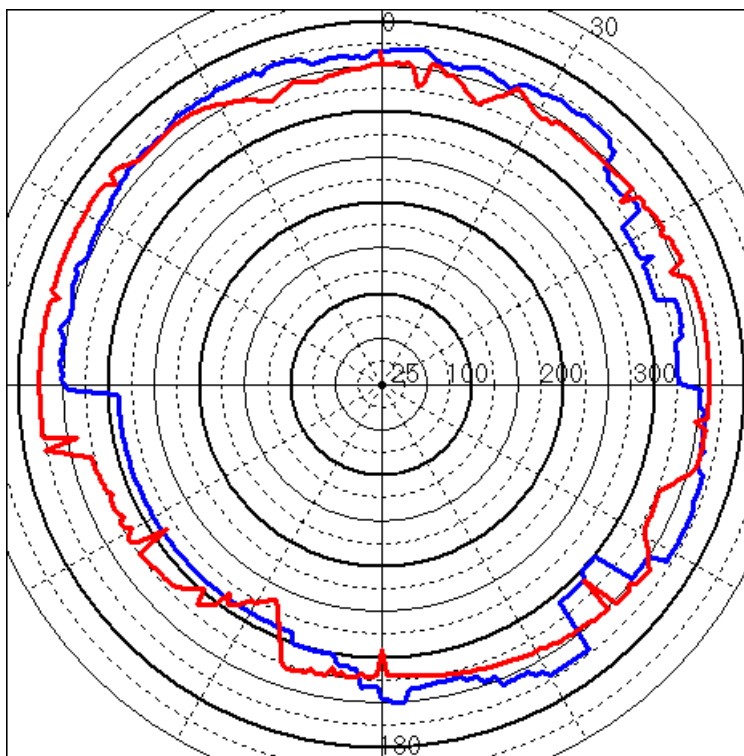


Рисунок В.1 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета ТРЛК «Утес» Санкт-Петербургского центра ОВД для высоты цели 10000м

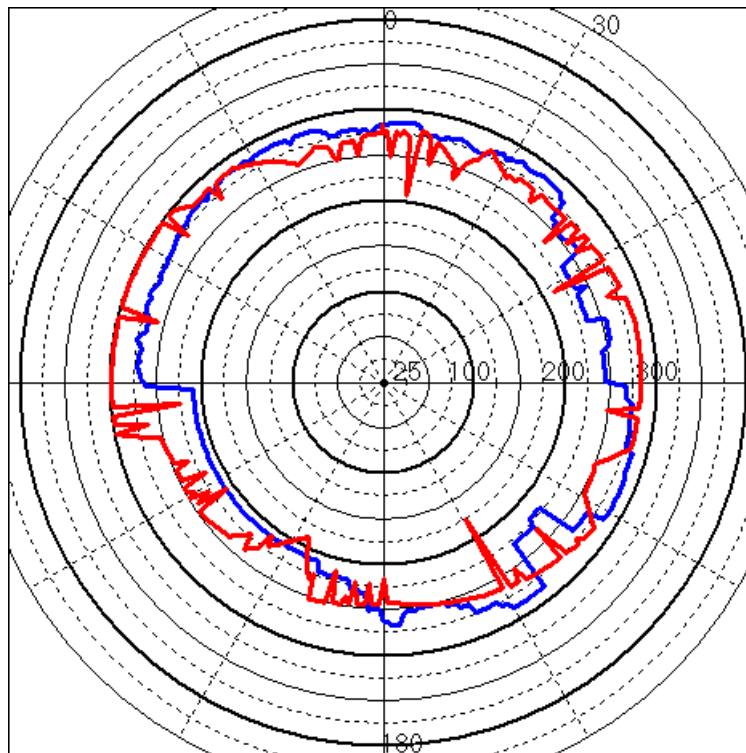


Рисунок В.2 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета ТРЛК «Утес» Санкт-Петербургского центра ОВД для высоты цели 6000м

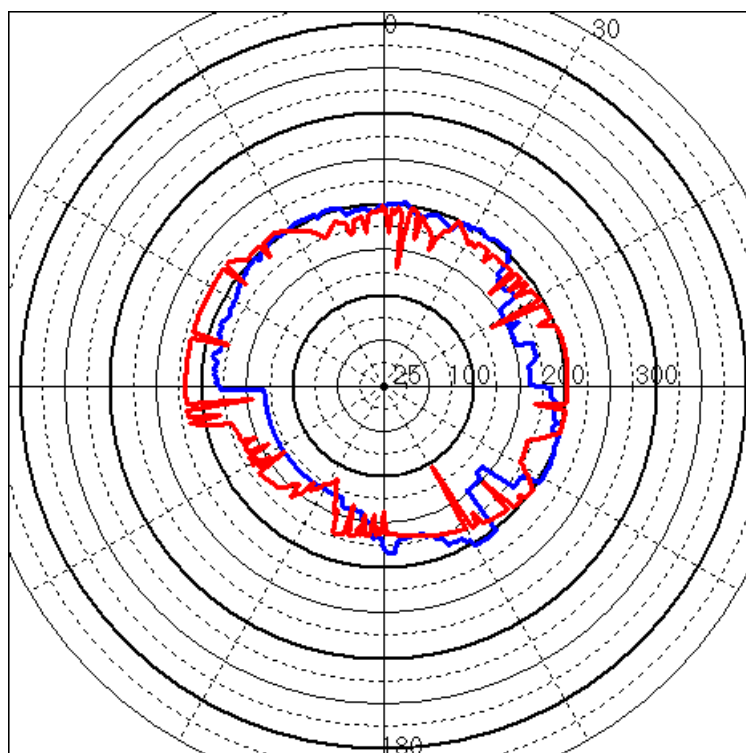


Рисунок В.3 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета ТРЛК «Утес» Санкт-Петербургского центра ОВД для высоты цели 3000м

Численные характеристики сравнения представлены в таблице В.1.

Таблица В.1

Высота цели, м	Среднее отклонение ΔX , км	СКП, км	Медиана, км
3000	22	28	19
6000	23	29	21
10000	23	28	22

МВРЛ СВК имеет координаты: 59°47'00" с.ш., 30°15'42" в.д. Сравнение расчетных зон действия, полученные с помощью рассмотренных ранее компьютерных программ, для высот 10000, 6000 и 3000м показаны на рисунках В.4, В.5 и В.6. Зоны действия, полученные расчетными методами имеют синий цвет, полученные в ходе облетов – красный.

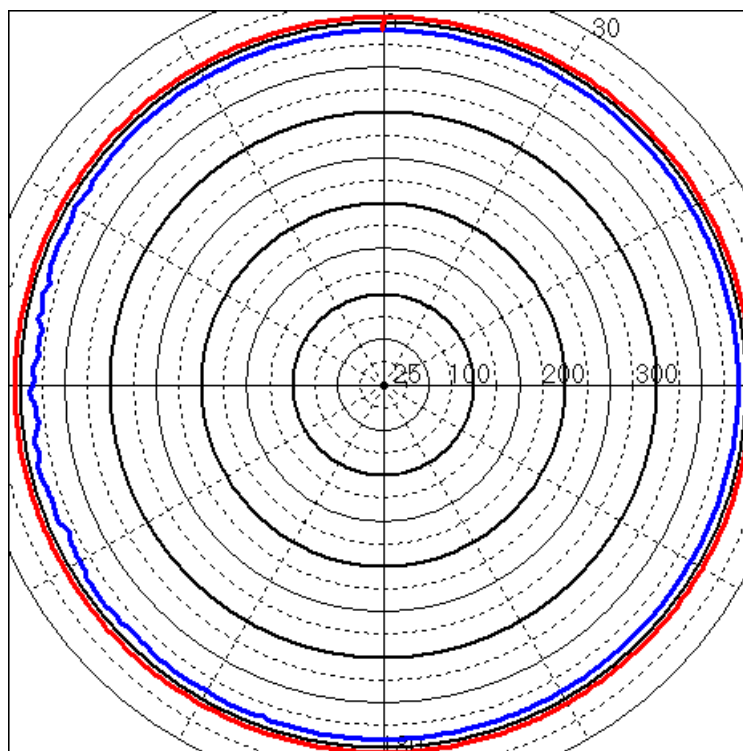


Рисунок В.4 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета МВРЛ СВК Санкт-Петербургского центра ОВД для высоты цели 10000м

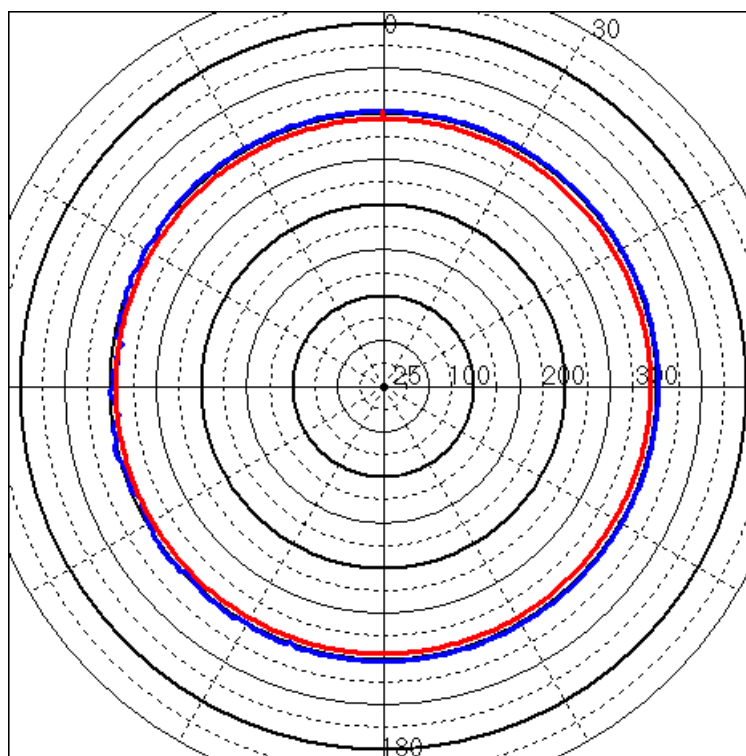


Рисунок В.5 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета МВРЛ СВК Санкт-Петербургского центра ОВД для высоты цели 6000м

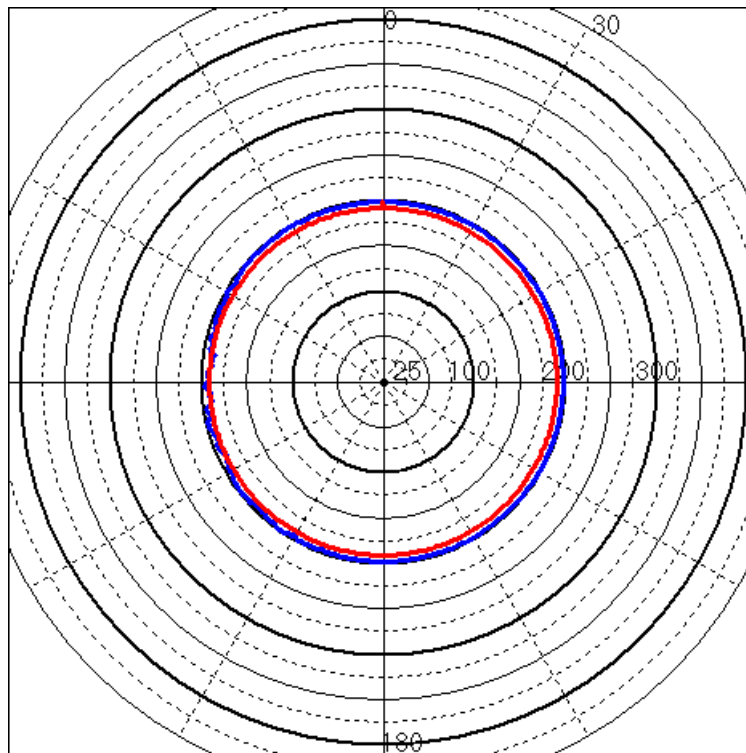


Рисунок В.6 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета МВРЛ СВК Санкт-Петербургского центра ОВД для высоты цели 3000м

Численные характеристики сравнения представлены в таблице В.2.

Таблица В.2

Высота цели, м	Среднее отклонение ΔX , км	СКП, км	Медиана, км
3000	6	6	7
6000	7	7	8
10000	15	15	14

РЛК «Лира-А10» имеет координаты: 59°46'28" с.ш., 30°15'35" в.д.

Сравнение расчетных зон действия, полученные с помощью рассмотренных ранее компьютерных программ, для высот 5700, 3300 и 1500м показаны на рисунках В.7, В.8 и В.9. Зоны действия, полученные расчетными методами имеют синий цвет, полученные в ходе облетов – красный.

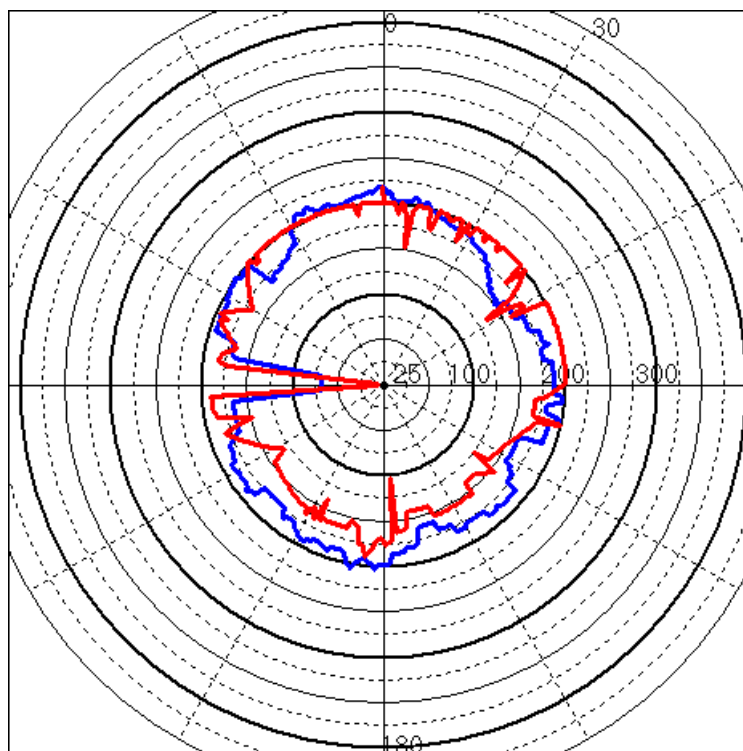


Рисунок В.7 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета РЛК «Лира-А10» Санкт-Петербургского центра ОВД для высоты цели 5700

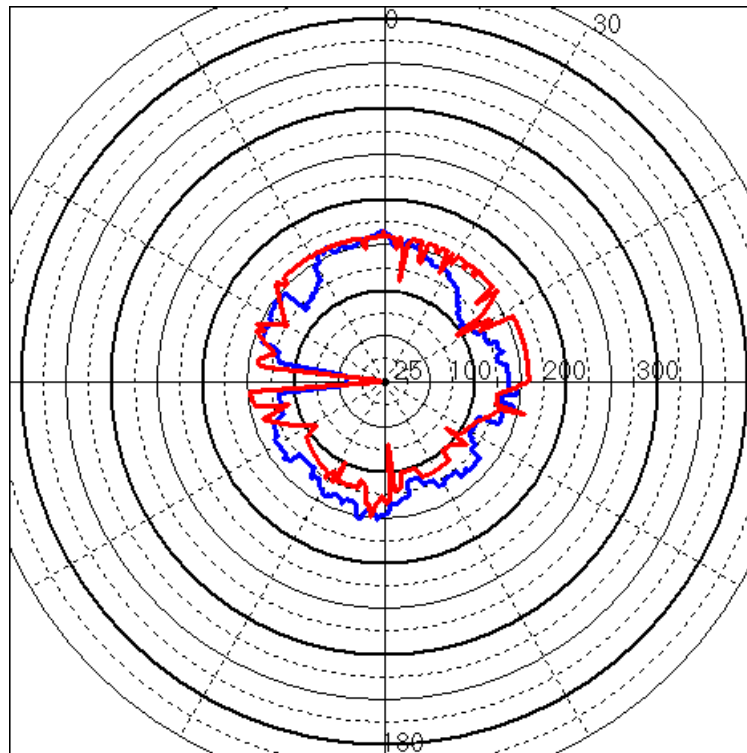


Рисунок В.8 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета РЛК «Ли́ра-А10» Санкт-Петербургского центра ОВД для высоты цели 3300

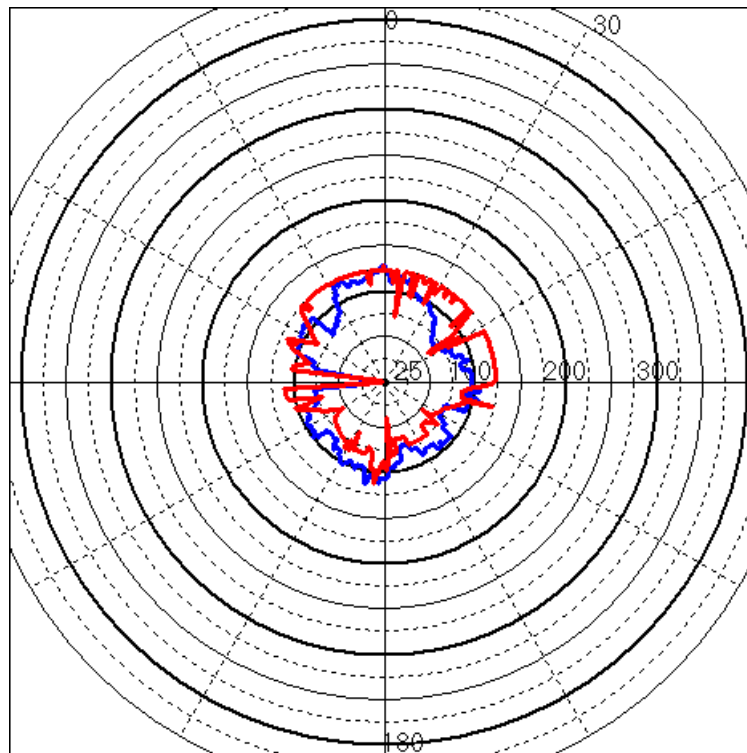


Рисунок В.9 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета РЛК «Ли́ра-А10» Санкт-Петербургского центра ОВД для высоты цели 1500

Численные характеристики сравнения представлены в таблице В.3.

Таблица В.3

Высота цели, м	Среднее отклонение ΔX , км	СКП, км	Медиана, км
1500	19	22	14
3300	19	23	16
5700	22	26	19

Рассмотрим радиолокаторы Петрозаводского центра ОВД.

РЛС 1Л118, расположенный в пос. Чална имеет координаты: $61^{\circ}53'39''$ с.ш., $34^{\circ}05'16''$ в.д. Сравнение расчетных зон действия, полученные с помощью рассмотренных ранее компьютерных программ, для высот 10000, 6000 и 3000м показаны на рисунках В.10, В.11 и В.12. Зоны действия, полученные расчетными методами имеют синий цвет, полученные в ходе облетов – красный.

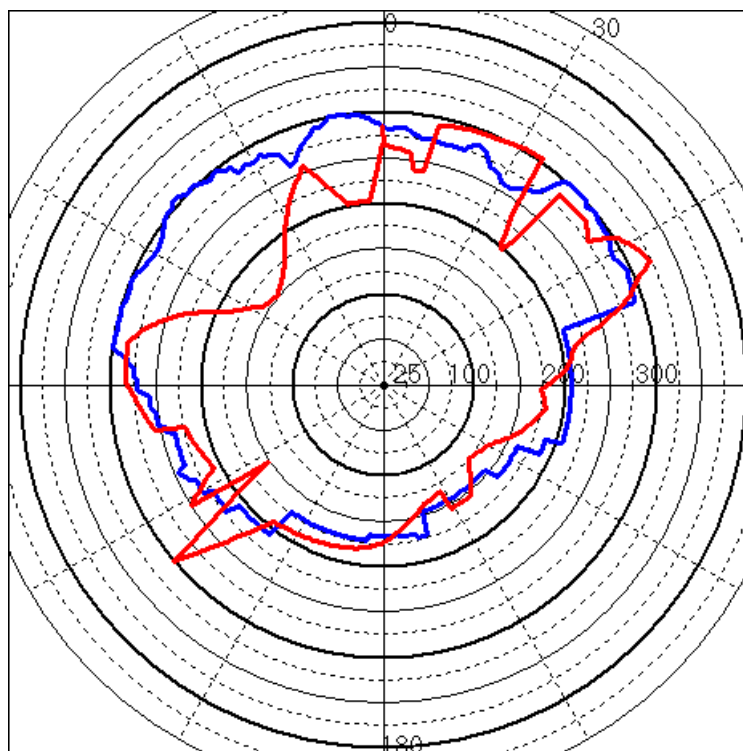


Рисунок В.10 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета РЛС 1Л118 (пос. Чална) Петрозаводского центра ОВД для высоты цели 10000м

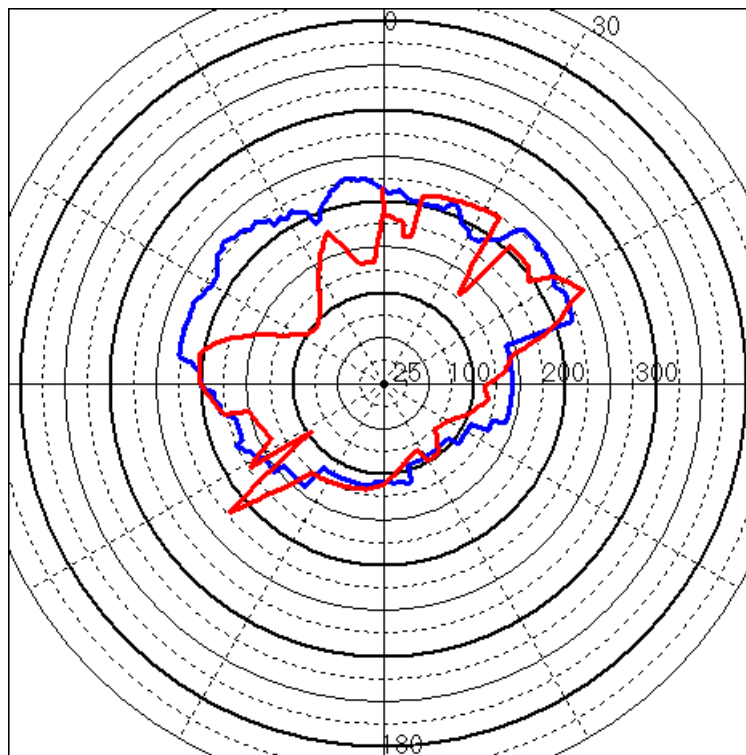


Рисунок В.11 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета РЛС 1Л118 (пос. Чална) Петрозаводского центра ОВД для высоты цели 6000м

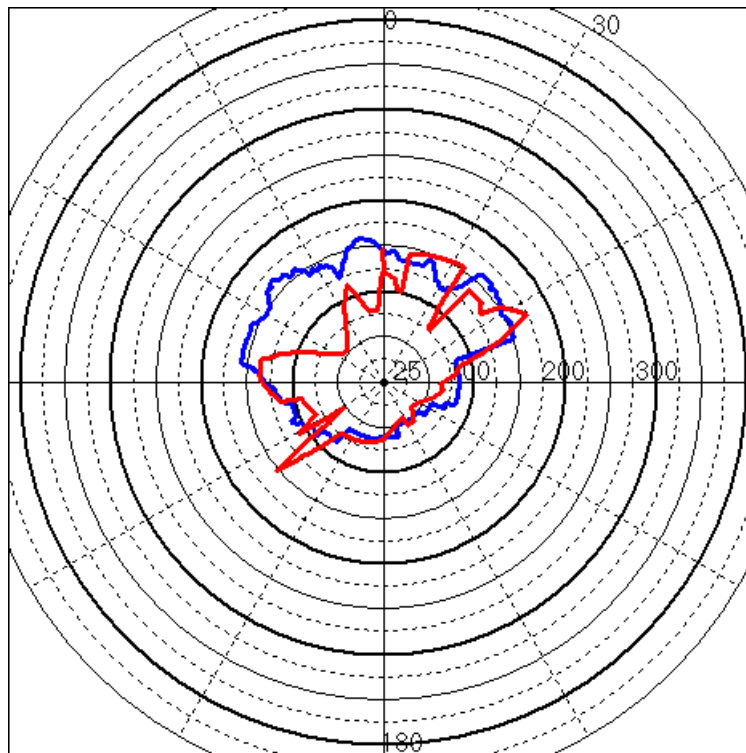


Рисунок В.12 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета РЛС 1Л118 (пос. Чална) Петрозаводского центра ОВД для высоты цели 3000м

Численные характеристики сравнения представлены в таблице В.4.

Таблица В.4

Высота цели, м	Среднее отклонение ΔX , км	СКП, км	Медиана, км
3000	26	35	16
6000	30	40	22
10000	35	45	20

РЛС 1Л118 расположен на территории аэродрома города Кемь и имеет координаты: 64°56'49" с.ш., 34°29'50" в.д.

Сравнение расчетных зон действия, полученные с помощью рассмотренных ранее компьютерных программ, для высот 10000, 6000 и 3000м показаны на рисунках В.13, В.14 и В.15. Зоны действия, полученные расчетными методами имеют синий цвет, полученные в ходе облетов – красный.

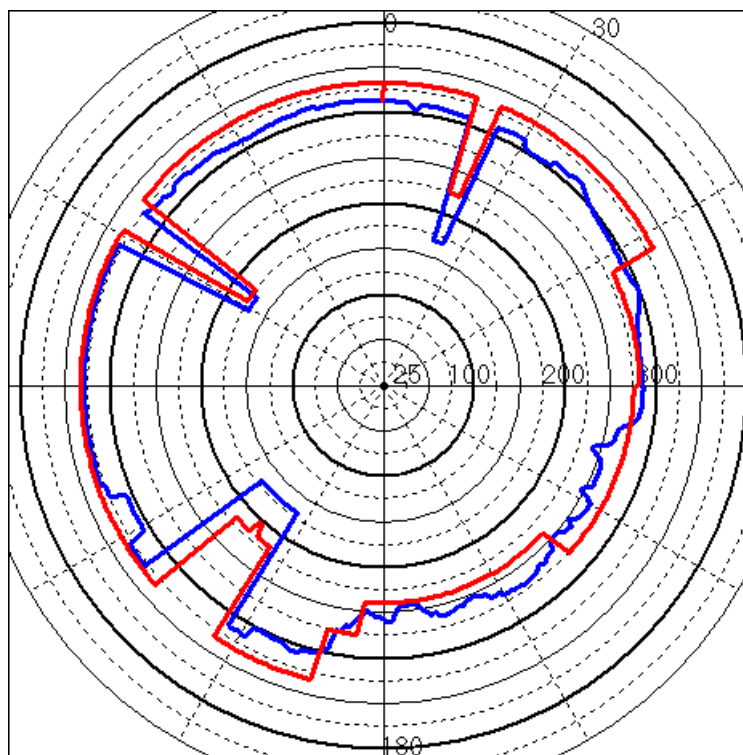


Рисунок В.13 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета РЛС 1Л118 (г. Кемь) Петрозаводского центра ОВД для высоты цели 10000м

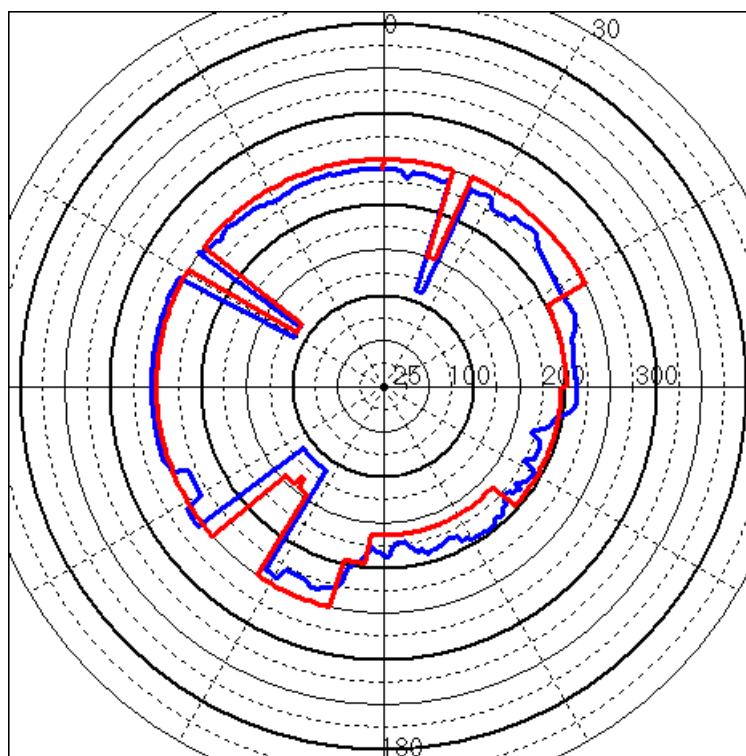


Рисунок В.14 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета РЛС 1Л118 (г. Кемь) Петрозаводского центра ОВД для высоты цели 6000м

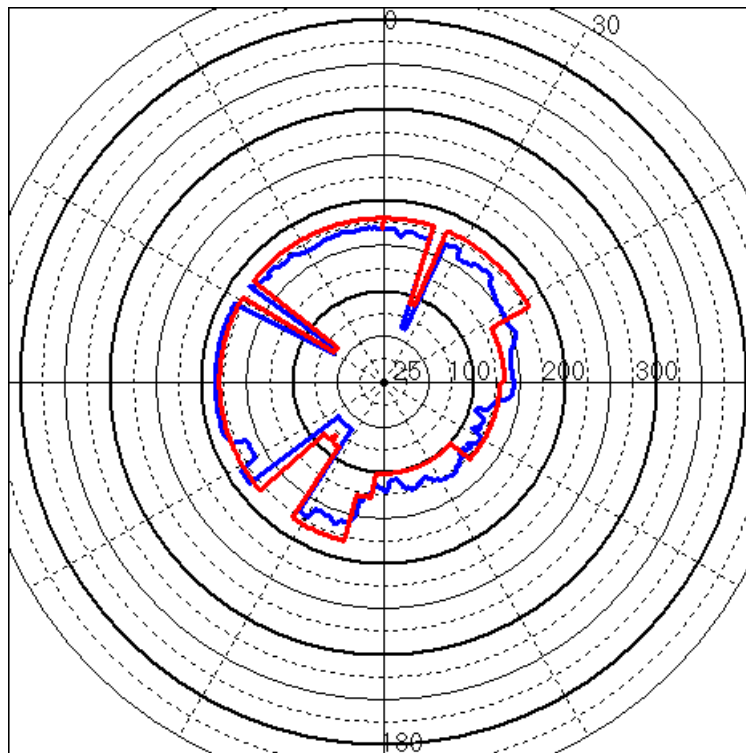


Рисунок В.15 – Сравнение расчетной зоны действия с данными облета РЛС 1Л118 (г. Кемь) Петрозаводского центра ОВД для высоты цели 3000м

Численные характеристики сравнения представлены в таблице В.5.

Таблица В.5

Высота цели, м	Среднее отклонение ΔX , км	СКП, км	Медиана, км
3000	16	25	12
6000	18	26	12
10000	22	28	19

Приложение Г

Оценка степени перекрытия местных воздушных линий РТС связи ОВЧ диапазона в Санкт-Петербургском центре ОВД

1. Оценка степени перекрытия местных воздушных линий при использовании существующих АРТР

Оценку перекрытия воздушных трасс произведем для высот полета 300м и 1000м. Первая высота соответствует минимально разрешенной высоте полета на местных воздушных трассах, вторая – максимально разрешенной. Анализируемые трассы представлены в таблице Г.1.

Таблица Г.1

№	Трасса	Протяженность, км	Примечание
1	НАТАБ – МИСГУ	277	открыта для межд. полетов
2	ЛУНОК – РАТЛА	158	открыта для межд. полетов
3	РАНВА – ГОРУГ	126	открыта для межд. полетов
4	СОРОС – НАТАБ	292	закрыта для межд. полетов
5	АБЕДО – СЕГОН	309	закрыта для межд. полетов
6	ОСАРД – УСЛАК	386	закрыта для межд. полетов
7	БЕСАБ – НАТАБ	295	закрыта для межд. полетов
8	ПЕСТО – АКАТР	327	закрыта для межд. полетов

Зоны действия можно видеть на рисунках Г.1 и Г.2. Результат расчета степени перекрытия воздушных трасс для высоты полета 300м представлен в таблице Г.2, для высоты полета 1000м – в таблице Г.3.

Коэффициент степени перекрытия местных воздушных линий зонами действия АРТР для высоты полета 300м:

$$K_{АРТР} = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i}{8} = 0.861 \quad (\text{Г.1})$$

Таблица Г.2

Номер трассы	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина трассы, км	277	158	126	292	309	386	295	327
Длина перекрытого участка, км	136	158	77	292	243	386	295	327
Степень перекрытия	0.491	1.000	0.611	1.000	0.786	1.000	1.000	1.000

Таблица Г.3

Номер трассы	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина трассы, км	277	158	126	292	309	386	295	327
Длина перекрытого участка, км	187	158	126	292	309	386	295	327
Степень перекрытия	0.675	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Коэффициент степени перекрытия местных воздушных линий зонами действия АРТР для высоты полета 1000м:

$$K_{APTP} = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i}{8} = 0.959 \quad (\text{Г.2})$$

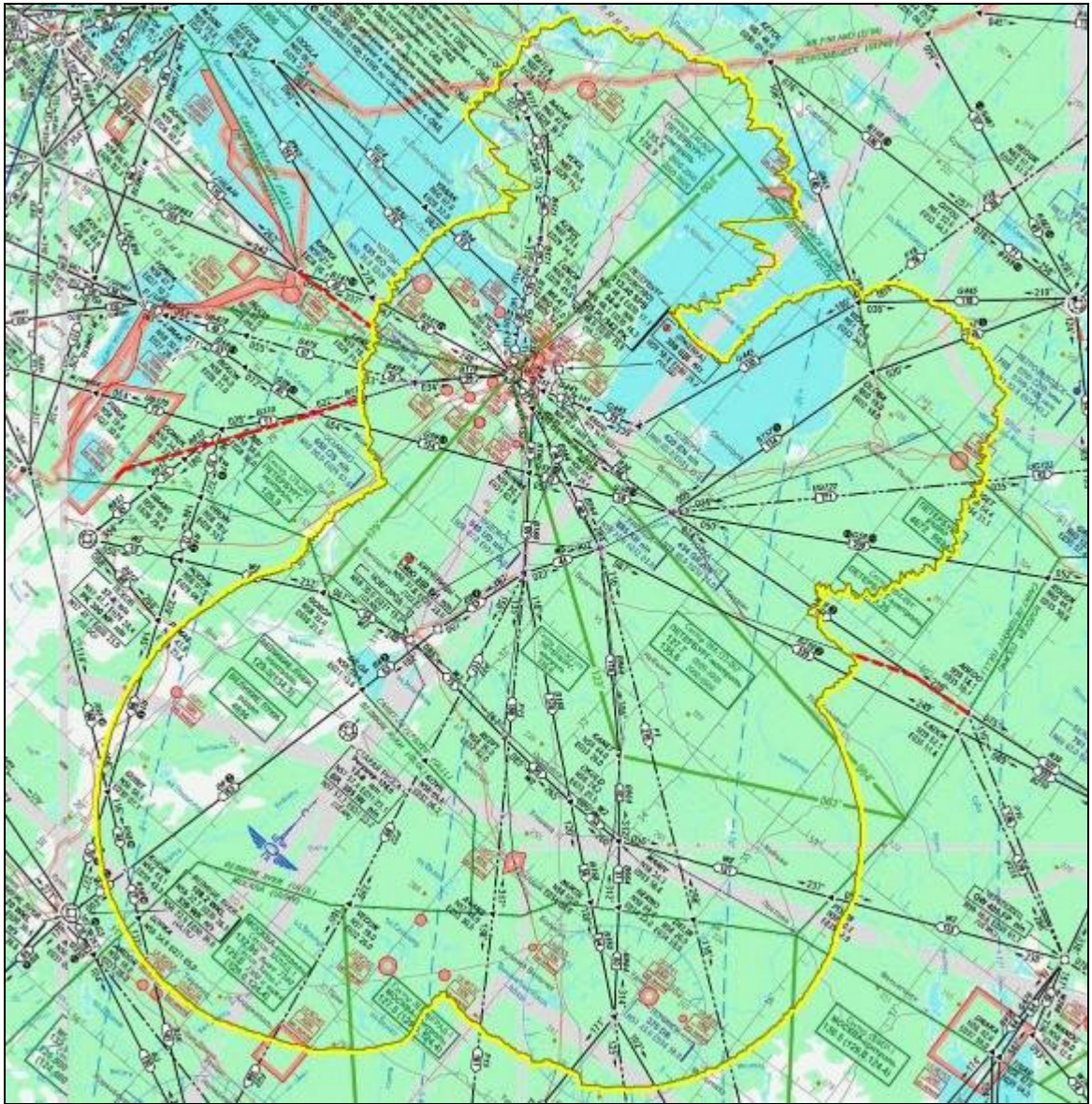


Рисунок Г.1 – Перекрытие местных воздушных трасс зонами действия АТР для
высоты полета 300м



Рисунок Г.2 – Перекрытие местных воздушных трасс зонами действия
АРТР для высоты полета 1000м

2. Оценка степени перекрытия местных воздушных линий при имитации отказа АРТР

Посмотрим на изменения в степени перекрытии трасс и коэффициенте степени перекрытия при исключении станций, расположенных в Киришах, Лодейном Поле, Новгороде, Шумилове.

Рассчитанные зоны действия представлены на рисунках Г.3, Г.4, Г.5, Г.6. Результат расчета степени перекрытия воздушных трасс представлен в таблицах Г.4, Г.5, Г.6, Г.7.

Таблица Г.4

Номер трассы	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина трассы, км	277	158	126	292	309	386	295	327
Длина перекрытого участка, км	138	158	67	292	253	386	295	327
Степень перекрытия	0.498	1.000	0.532	1.000	0.819	1.000	1.000	1.000

Коэффициент степени перекрытия местных воздушных линий зонами действия АРТР при исключении РС в Киришах:

$$K_{АРТР} = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i}{8} = 0.856 \quad (\text{Г.3})$$

Таблица Г.5

Номер трассы	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина трассы, км	277	158	126	292	309	386	295	327
Длина перекрытого участка, км	138	158	67	292	253	318	295	327
Степень перекрытия	0.498	1.000	0.532	1.000	0.819	0.824	1.000	1.000

Коэффициент степени перекрытия местных воздушных линий зонами действия АРТР при исключении РС в Лодейном Поле:

$$K_{\text{АРТР}} = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i}{8} = 0.834 \quad (\text{Г.4})$$

Таблица Г.6

Номер трассы	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина трассы, км	277	158	126	292	309	386	295	327
Длина перекрытого участка, км	138	158	67	292	253	386	295	327
Степень перекрытия	0.498	1.000	0.532	1.000	0.819	1.000	1.000	1.000

Коэффициент степени перекрытия местных воздушных линий зонами действия АРТР при исключении РС в Новгороде:

$$K_{\text{АРТР}} = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i}{8} = 0.856 \quad (\text{Г.5})$$

Таблица Г.7

Номер трассы	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина трассы, км	277	158	126	292	309	386	295	327
Длина перекрытого участка, км	138	102	67	292	253	386	295	327
Степень перекрытия	0.498	0.646	0.532	1.000	0.819	1.000	1.000	1.000

Коэффициент степени перекрытия местных воздушных линий зонами действия АРТР при исключении РС в Шумилове:

$$K_{\text{АРТР}} = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i}{8} = 0.812 \quad (\text{Г.6})$$

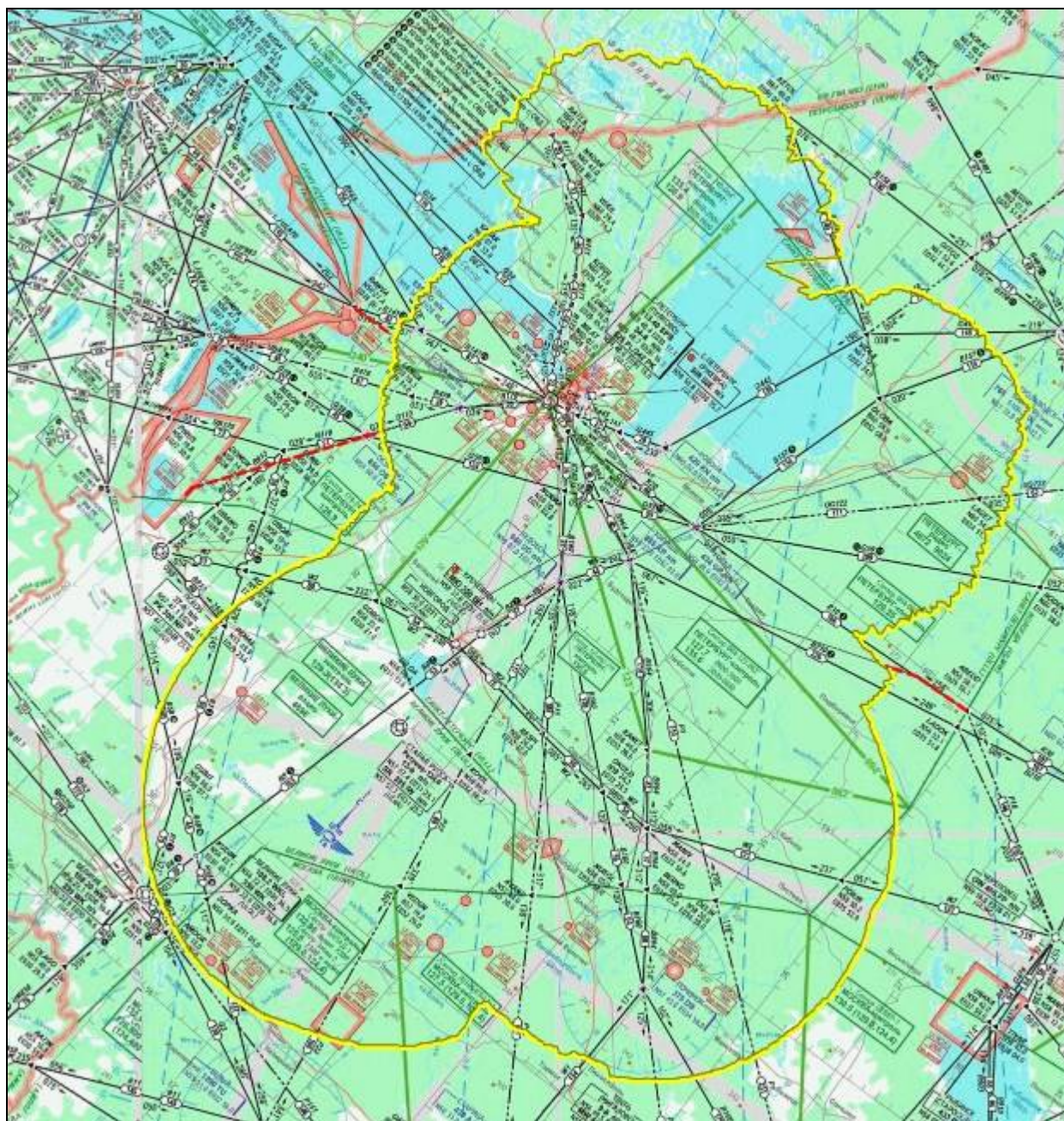


Рисунок Г.3 – Перекрытие местных воздушных трасс зонами действия АРТР при отказе ретранслятора в Киришах

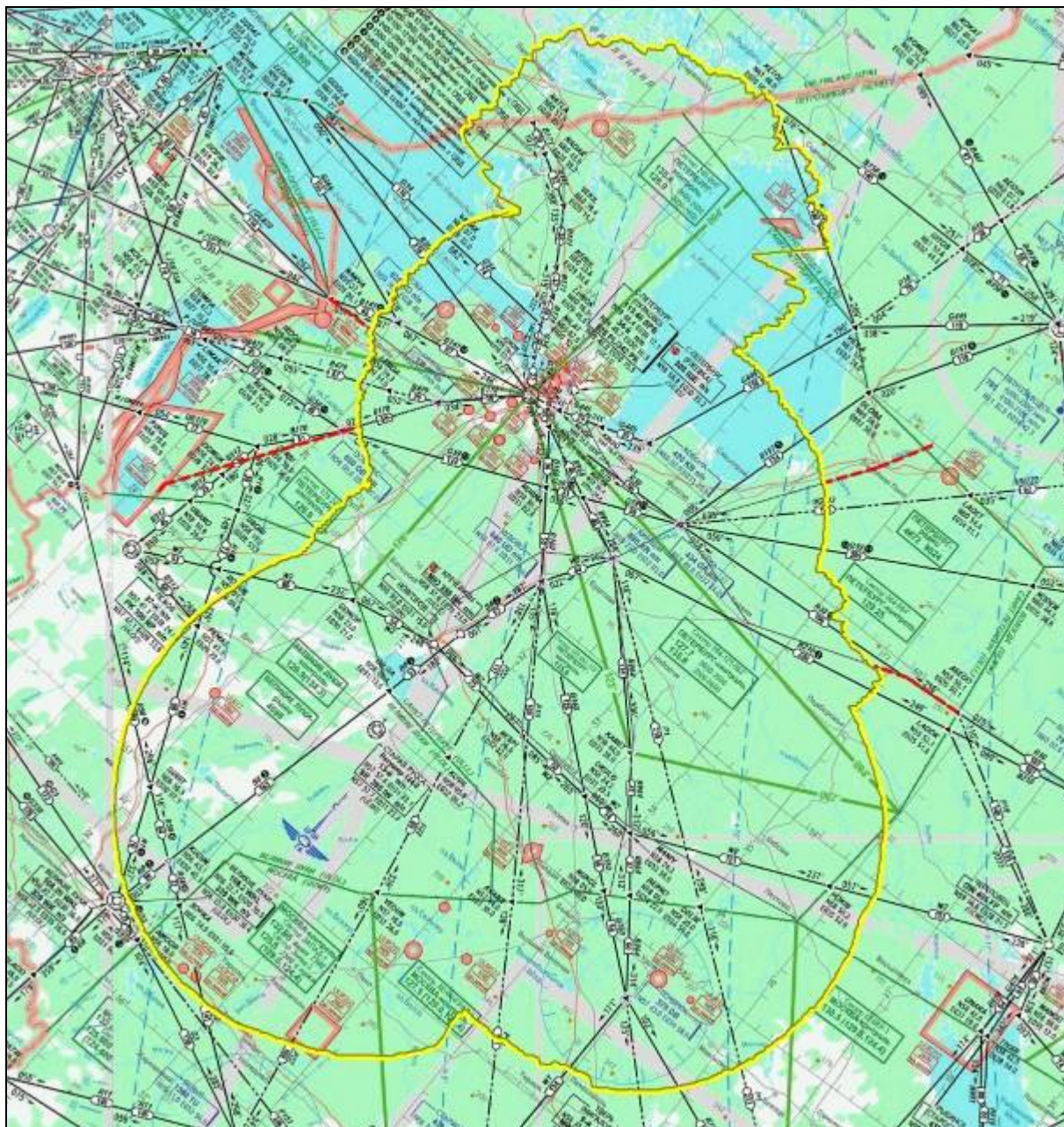


Рисунок Г.4 – Перекрытие местных воздушных трасс зонами действия АРТР при отказе ретранслятора в Лодейном Поле

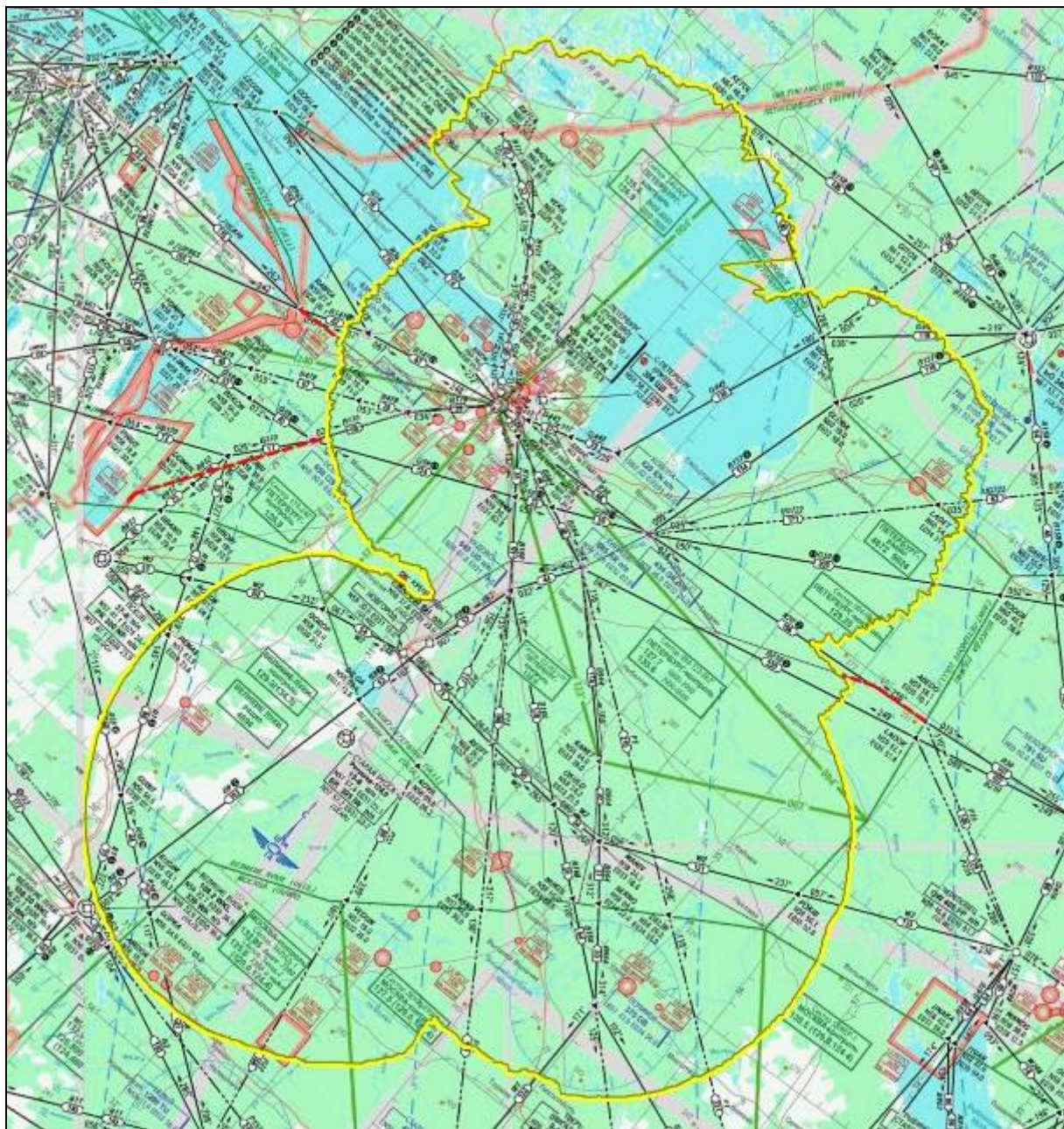


Рисунок Г.5 – Перекрытие местных воздушных трасс зонами действия АРТР при отказе ретранслятора в Новгороде



Рисунок Г.6 – Перекрытие местных воздушных трасс зонами действия АРТР при отказе ретранслятора в Шумилове