

На правах рукописи



ЗОТОВ Андрей Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА ВЫХОДНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КУРСОВОГО РАДИОМАЯКА
СИСТЕМЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОСАДКИ САМОЛЁТОВ**

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре «Конструирование и производство радиоаппаратуры» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,
Войтович Николай Иванович
- Официальные оппоненты:** **Крячко Александр Федотович,**
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ
ВО «Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборострое-
ния», заведующий кафедрой радиотехнических
и оптоэлектронных комплексов;
- Важенин Владимир Григорьевич,**
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ
ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельци-
на», доцент департамента радиоэлектроники и
связи
- Ведущая организация:** АО «Уральское проектно-конструкторское
бюро «Деталь», г. Каменск-Уральский Сверд-
ловской обл.

Защита состоится «20» июня 2017 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.11 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (Зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=268811>

Автореферат разослан «____» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зраенко Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Известно, что с момента зарождения авиации заход самолётов на посадку и посадка являются самыми сложными и ответственными этапами полёта самолёта. Многолетняя статистика авиационных происшествий показывает, что на этих этапах полета, составляющих менее 4 % общего времени полета, происходит порядка 50 % авиационных происшествий.

Основным средством повышения безопасности полётов путём обеспечения инструментального захода самолётов гражданской авиации на посадку и самой посадки являются двухчастотные радиомаячные системы (РМС) посадки метрового диапазона длин волн формата ILS (Instrument Landing System). В состав этих систем входят курсовой (КРМ), глиссадный (ГРМ) радиомаяки и бортовая аппаратура (БА) самолёта. Антенные системы радиомаяков устанавливаются относительно взлётно-посадочной полосы (ВПП) по строго определённой схеме: КРМ – на продолжении оси ВПП за её пределами, а ГРМ – на некотором расстоянии от оси ВПП.

Электромагнитное излучение антенной системой КРМ в диапазоне частот от 108 до 111,975 МГц, модулировано по амплитуде сигналами тональных частот 90 и 150 Гц. В идеальном случае поверхность, на которой разность глубин модуляции (РГМ) сигналов равна нулю, представляет собой вертикальную плоскость, проходящую через ось ВПП, образуя, так называемую, «плоскость курса».

Антенна ГРМ излучает в окружающее пространство электромагнитные волны в диапазоне частот от 328,6 до 335,4 МГц, модулированные сигналами с частотами 90 и 150 Гц. Поверхность, на которой разность глубин модуляции радиочастотных сигналов ГРМ тональными сигналами 90 и 150 Гц равна нулю, представляет собой конус, вершина которого находится в основании антенн. При этом ось данного конуса вертикальна, а его образующая наклонена на заданный угол относительно поверхности Земли, формируя, так называемую, «поверхность глиссады».

Пересечение поверхностей курса и глиссады задает в пространстве линию для захода самолёта на посадку, называемую глиссадой. Бортовая аппаратура, выполняя измерения навигационного параметра – разности глубин модуляции радиомаяков, индицирует отклонения самолёта от глиссады и тем самым обеспечивает пилота самолёта или автопилот информацией о корректировке траектории полета самолёта для его посадки.

Двухчастотный курсовой радиомаяк третьей (наиболее высокой) категории включает в себя два канала: узкий и широкий каналы, реализуемые с помощью двух независимых друг от друга передающих устройств. Антенная решетка и диаграммообразующий тракт курсового радиомаяка формирует в пространстве четыре диаграммы направленности (ДН) антенны: первая – узкая ДН суммарного вида, вторая – узкая разностного вида ($\pm 7^\circ$), третья – широкая ДН суммарного

вида, четвёртая – широкая ДН разностного вида ($\pm 40^\circ$); третья и четвёртая ДН имеют вырезы в пределах главных лепестков первой и второй ДН.

Передающее устройство узкого канала формирует в пространстве два сигнала на частоте f_1 , а передающее устройство широкого канала – два сигнала на частоте f_2 . Частоты f_1 и f_2 отстоят по разные стороны от частоты канала, выделенного для аэродрома, на несколько килогерц. На частоте f_1 излучается с первой диаграммой направленности сигнал «несущая частота плюс боковые частоты» (НБЧ) узкого канала (НБЧ УК), а со второй ДН – сигнал «боковые частоты» (БЧ) узкого канала (БЧ УК). На частоте f_2 излучается с третьей диаграммой направленности сигнал «несущая частота плюс боковые частоты» широкого канала (НБЧ ШК), а с четвёртой диаграммой направленности – сигнал «боковые частоты» широкого канала (БЧ ШК).

В результате выреза в ДН широкого канала в секторе углов $\pm 5^\circ$ напряженность поля НБЧ и БЧ ШК меньше напряженности поля НБЧ БЧ УК.

Принятый на борту самолёта суммарный сигнал проходит через входные цепи приёмника, смеситель, усилитель промежуточной частоты и поступает на вход первого линейного детектора, на выходе которого формируется огибающая суммарного сигнала. Далее сигнал поступает на входы полосно-пропускающих фильтров, которые выделяют тональные сигналы. Амплитуды напряжений выделенных колебаний нормируются схемой АРУ приёмника относительно постоянной составляющей суммарного сигнала. Выделенные нормированные тональные сигналы проходят через выпрямители, на выходе которых формируется разностное напряжение, поступающее на микроамперметр, который показывает величину тока, пропорциональную разности глубин модуляции. Коэффициент пропорциональности одинаков для всех бортовых приёмников ILS. Поэтому при лётных проверках параметров курсового и глиссадного радиомаяка значения измеряют в микроамперах, не переводя их в проценты.

Принцип формирования глиссады системы посадки метрового диапазона длин волн основан на предположении, что местность перед антенной системой радиомаяков представляет собой горизонтальную плоскость. Тогда антенна создаёт электромагнитное поле, которое можно представить в виде суммы полей самой антенны и её зеркального отображения. В этом случае глиссада захода на посадку представляет собой практически идеальный луч.

Реальная ситуация на аэродромах такова, что вместо идеального луча наблюдается некая кривая линия, поведение которой обусловлено влиянием неровностей земной поверхности и местных предметов. По мере развития авиации и расширения использования радиомаячных систем инструментальной посадки требования, предъявляемые к траектории захода самолётов на посадку, ужесточаются. Эти требования изложены в отечественных стандартах и нормах международной организации гражданской авиации ИКАО (от англ. ICAO – International Civil Aviation Organization).

В соответствие с существующими нормативными документами ввод в эксплуатацию систем посадки сопряжен со значительным объёмом дорогостоящих земляных работ, необходимых для подготовки площадок перед антенными системами радиомаяков. При этом необходимо отметить, что требования инструкций

по размещению радиомаяков на местности оказываются значительно выше, чем требования аэродромных норм годности к лётному полю. Поэтому при строительстве новых и реконструкции существующих аэродромов для размещения инструментальных систем посадки обычно требуется дополнительно выполнять большой объём земляных работ.

Ситуация особенно усугубляется, когда аэродром расположен в балочно-овражистой, предгорной и иной местности с неблагоприятной для работы радиомаяков формой рельефа местности. Как правило, в этом случае курсовой радиомаяк приходится размещать далеко за пределами концевой полосы безопасности и перед КРМ оказывается площадка с естественной формой рельефа, которая не соответствует жёстким требованиям инструкции по размещению антенной системы курсового радиомаяка. На этой части территории необходимо выполнить земляные работы по приведению её в соответствии с требованиями инструкции по размещению КРМ на местности.

Необходимо отметить, что двухчастотные радиомаяки формата ILS широко используются как на зарубежных аэродромах, так и в нашей стране достаточно давно. Однако детального анализа особенностей формирования зоны их действия с учётом влияния подстилающей поверхности в литературе не приведено. Отсутствуют также обоснование упомянутых требований к местности перед курсовым радиомаяком в нормативной документации к этой системе.

В связи с этим представляется **актуальным** выполнить комплекс теоретических и экспериментальных исследований влияния рельефа местности и, в частности, её поперечного по отношению к продолжению оси ВПП наклона местности и её клинообразной формы на основные параметры и характеристики системы посадки формата ILS. Результаты таких исследований востребованы при научно обоснованном выборе подходящей позиции для размещения курсового радиомаяка в реальных условиях местности, значительно сокращающей затраты на его устройство.

Необходимо отметить также, что поперечный наклон местности и клинообразная форма площадки перед КРМ характерны для аэродромов в предгорной, балочно-овражистой и другой местности со складчатой поверхностью, которая преобладает на территории Российской Федерации. Поэтому результаты исследований представляют интерес в масштабах всей отрасли.

В настоящей работе предложены и исследованы пути решения проблемы размещения КРМ на примере аэродрома, расположенного в предгорной местности.

Цель и задачи исследования

Основной целью работы является исследование влияния рельефа местности на выходные характеристики курсового радиомаяка системы инструментальной посадки самолётов формата ILS метрового диапазона длин волн.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

— исследовать взаимное влияние сигналов узкого и широкого каналов на формирование навигационного параметра курсового радиомаяка ILS;

- исследовать влияние поперечного наклона земной поверхности перед антенной системой курсового радиомаяка на её диаграммы направленности;
- изучить влияние угла поперечного наклона местности на поведение навигационного параметра курсового радиомаяка системы инструментальной посадки;
- исследовать структуру электромагнитного поля дифракции волн на клинообразной аэродромной поверхности и провести сравнение данных летных измерений и результатов моделирования структуры электромагнитного поля;
- получить результаты экспериментальных исследований курсового радиомаяка путем натурных наземных и летных измерений, а также сравнить экспериментальные и расчетные характеристики опытного образца системы инструментальной посадки самолётов.

Методология и методы исследования

При решении общей задачи исследования взаимного влияния сигналов узкого и широкого каналов, а также изучения влияния угла поперечного наклона местности на формирование и поведение навигационного параметра курсового радиомаяка ИЛС использованы известные методы анализа прохождения модулированных радиосигналов через радиотехнические линейные и нелинейные цепи бортовой аппаратуры приёма и обработки сигналов. Среди этих методов использованы методы, основанные на спектральном представлении и анализе узкополосных радиосигналов. При исследовании полученных выражений применялись методы математического анализа и численного моделирования на ЭВМ.

При решении задач исследования влияние поперечного наклона земной поверхности перед антенной системой курсового радиомаяка на её диаграммы направленности и структуры электромагнитного поля дифракции волн, полученных при отражении от клинообразной аэродромной поверхности, использованы методы теории дифракции и распространения радиоволн в условиях присутствия в поле излучения антенных систем поверхности земли. Среди них методы зеркальных изображений, стационарной фазы, принцип Гюйгенса-Френеля, использование формул Кирхгофа и Фраунгофера, асимптотические методы вычисления интегралов, удобные для расчета структуры поля на ЭВМ.

В работе применены методы математического анализа, теории вероятностей, численного моделирования на ЭВМ, методы наземных исследований с помощью мобильной лаборатории и лётных исследований с помощью воздушных судов – лабораторий и учебных самолётов.

При проведении экспериментальных исследований использовались методы лабораторного и натурального эксперимента, полунатурного моделирования, методы аналоговой и цифровой обработки сигналов с привлечением компьютерной обработки сигналов. При обработке результатов экспериментов применялись также методы теории вероятностей и математической статистики.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Новое решение задачи нахождения информационного параметра двухчастотного КРМ – разности глубин модуляции. Данное решение учитывает взаимное

влияние сигналов узкого и широкого каналов КРМ, в том числе, с учётом отражения радиоволн от местности перед антенной КРМ с поперечным относительно продолжения оси ВПП наклоном в соответствии с выражениями (1) – (3) автореферата.

1.1 В зоне действия КРМ сигналы узкого и широкого каналов меняются ролями в отношении «слабый» (меньший по амплитуде) и «сильный» (больший по амплитуде). Иными словами, сигнал широкого канала подавляется сигналом узкого канала в окрестности линии курса, сигнал узкого канала подавляется сигналом широкого канала в зоне наведения радиомаяка. При этом в узкой угловой рабочей зоне в окрестности направления вдоль оси ВПП сильным сигналом является сигнал узкого канала, слабым – сигнал широкого канала. За пределами узкой угловой зоны сильным сигналом является сигнал широкого канала, слабым – сигнал узкого канала. В переходной зоне сигналы узкого и широкого каналов равноценны, при этом обеспечивается плавный ход функции разности глубины модуляции при переходе из одной зоны в другую. В результате такого поведения сигналов в зоне действия КРМ устраняется влияние сигналов широкого канала, отражённых от местных предметов, на точностные характеристики КРМ, при этом самолёт обеспечивается информацией о его местоположении во всей (широкой) зоне действия КРМ.

2. Новые закономерности в поведении амплитудных и фазовых диаграмм направленности антенны для сигналов: «несущая плюс боковые» и «боковые частоты» узкого канала, «несущая плюс боковые» и «боковые частоты» широкого канала КРМ, установленного на местности с поперечным наклоном.

2.1 При наличии поперечного по отношению к оси ВПП наклона подстилающей поверхности излучающая система курсового радиомаяка не имеет фазового центра. Боковые лепестки ДН антенной системы в стороне понижения местности увеличиваются по уровню, а в стороне повышения местности, наоборот, уменьшаются по сравнению с боковыми лепестками ДН антенны, расположенной над горизонтальной плоскостью.

При этом фазовые ДН антенны курсового радиомаяка имеют вид монотонно изменяющихся функций, тогда как в случае работы антенны над горизонтальной плоскостью, фазовые ДН имеют ступенчатый вид: при переходе из одного лепестка амплитудной ДН в другой фаза изменяется скачком на 180° .

3. Поперечный наклон местности приводит к смещению линии курса относительно оси ВПП. Допустимую величину угла поперечного по отношению к продолжению оси ВПП наклона местности перед антенной курсового радиомаяка можно увеличить до 2° . При этом глиссада представляет собой практически прямую линию, составляющую с осью ВПП угол, величиной менее шести угловых минут, и линейное смещение курса на пороге ВПП составляет величину не более 0,5 м.

4. Если площадка перед антенной системой КРМ имеет клинообразный вид поверхности, то напряжённость поля в дальней зоне, рассчитываемая согласно выражений (4) – (5) автореферата, может увеличиваться в несколько раз по сравнению с напряжённостью поля, которая имела бы место при размещении источника над горизонтальной поверхностью.

4.1 Равномерные относительно угловых координат источника излучения и точки наблюдения коротковолновые (источник расположен вдали от ребра клина) асимптотические разложения строгого решения задачи дифракции сферической волны на клине с идеально проводящими гранями. Процедуры расчёта напряженности электромагнитного поля КРМ применительно к клинообразной форме местности перед антенной курсового радиомаяка.

5. Результаты наземных и лётных исследований параметров курсового радиомаяка, установленного на аэродроме в предгорной местности со сложным рельефом и сложными гидрогеологическими условиями, показали соответствие характеристик курсового радиомаяка III категории ИКАО.

5.1 Критическое влияние поперечного наклона местности перед антенным полем КРМ на требования к величине искривлений разности глубин модуляции и возможности получения характеристик по III категории норм ИКАО отсутствует.

Достоверность защищаемых положений и результатов обеспечивается качественным и количественным соответствием теоретических выводов данным, полученным экспериментально, корректностью упрощающих предположений, применяемых при построении математических моделей, использованием поверенной измерительной аппаратуры и подтверждается успешным практическим использованием в реализованных устройствах и системах.

Дополнительно достоверность основных результатов работы аргументируется их апробацией на конференциях и симпозиумах, а также публикациями в рецензируемых журналах.

Новизна защищаемых положений и результатов диссертации

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Найдены строгие и приближённые соотношения в виде квадратур для вычисления навигационного параметра — разности глубин модуляции двухчастотного радиомаяка КРМ (ГРМ). Полученные соотношения обобщают известные соотношения для линейного детектирования гармонического сигнала в присутствии помехи на случай, когда на вход линейного детектора одновременно поступает «сильный» сигнал, модулированный по амплитуде двумя низкочастотными тонами, и «слабый» сигнал с точно такой же модуляцией.

2. Установлено влияние величины угла поперечного наклона местности относительно направления продолжения оси ВПП на формирование ДН антенной системы КРМ.

3. Установлены закономерности формирования глассады в зависимости от величины угла поперечного наклона местности относительно направления продолжения оси ВПП.

4. Разработана обобщённая математическая модель формирования сигналов курсового канала системы посадки самолётов формата ILS, учитывающая дифракцию и двукратное отражение радиоволн на трассе «передающая антенна — точка наблюдения» в соответствии с выражениями (4) – (5) автореферата. Найдены коротковолновые асимптотические разложения строгого решения задачи дифракции сферической волны на идеально проводящем клине с углом раствора, близким к 180° . Решение получено в виде суммы четырёх полутеневых

волн, описываемых интегралами Макдональда. При этом приближённое решение впервые учитывает все полюса подынтегральной функции вблизи точек перевала.

5. Получены результаты экспериментальных исследований инструментальной системы посадки самолётов, подтверждающие правильность расчетов и позволяющие снизить требования к местности для размещения курсового радиомаяка.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что в ней в рамках единого методологического подхода к решению задачи исследования взаимного влияния сигналов узкого и широкого каналов на формирование навигационного параметра курсового радиомаяка ILS уточнена теория функционирования системы посадки. Данная теория обеспечивает возможность более полно учитывать различные параметры и характеристики условий формирования поля, излучаемого антенными системами системы посадки, а также факторов, вызванных влиянием поверхности земли, прилегающей к антенным системам, на выходные навигационные параметры.

Результаты диссертационного исследования, посвящённого изучению влияния угла поперечного наклона земной поверхности перед курсовым радиомаяком на диаграмму направленности антенны курсового радиомаяка ILS, а также на поведение навигационного параметра курсового радиомаяка ILS, являются оригинальными, развивают и дополняют теорию систем радионавигации самолётов.

Практическая значимость и прикладная ценность работы заключается в следующем:

1. Результаты представленных в диссертации исследований позволили решить проблему размещения антенной системы КРМ на конкретном аэродроме в предгорной местности со сложным рельефом и сложными гидрогеологическими условиями. Антенна КРМ размещена на незатопляемом участке с естественными углами наклона местности без дополнительной планировки, которая была необходима для удовлетворения требованиям инструкции по размещению существующих курсовых радиомаяков.

Полученные в работе результаты являются основой для уточнения требований к площадкам для размещения курсовых радиомаяков. Данное уточнение требований позволяет более рационально планировать земляные работы для подготовки площадок и, тем самым, удешевить и ускорить как реконструкцию существующих, так и строительство новых аэродромов.

2. Разработаны процедуры выполнения наземных измерений диаграмм направленности антенн и выходных характеристик КРМ с помощью передвижной лаборатории на базе автомобиля, включающей в себя аппаратуру для приёма и анализа сигналов системы инструментальной посадки, аппаратуру для точного определения координат лаборатории относительно центра антенны курсового радиомаяка по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и локальной контрольно-корректирующей станции (ЛККС).

3. Разработан бортовой стенд и процедуры выполнения лётных измерений диаграмм направленности антенн и выходных характеристик КРМ с помощью неспециализированного воздушного судна. Стенд включает в себя аппаратуру для

приёма и анализа сигналов системы инструментальной посадки, аппаратуру для точного определения координат воздушного судна относительно центра антенны курсового радиомаяка по сигналам ГНСС и ЛККС.

Внедрение результатов диссертации

Результаты работы были внедрены в ходе разработки курсового радиомаяка:

— на этапах эскизного, технического проектирования, разработки рабочей конструкторской документации опытного образца комплекса системы посадки формата ILS;

— при выборе позиции установки антенны курсового радиомаяка и антенн выносного контроля;

— были положены в основу разработанной программы прогностического моделирования местных предметов на аэродроме;

— при наземных и летных испытаниях комплекса опытного образца системы посадки формата ILS на аэродроме, расположенном в предгорной местности.

Результаты экспериментальных исследований включены в Акт летной проверки по программе ввода в эксплуатацию радиомаячной системы инструментального захода воздушного судна на посадку на аэродроме. По заключению акта радиомаячная система инструментального захода воздушного судна на посадку, установленная на рассматриваемом аэродроме соответствует эксплуатационным требованиям к радиомаячным системам (РМС) третьей категории ИКАО и признана пригодной для обеспечения полётов без ограничений.

Апробация работы и публикации

Экспериментальная проверка результатов теоретических исследований проходила на действующем аэродроме в ходе выполнения комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства антенн и аппаратных модулей для двухчастотного радиомаячного комплекса системы посадки метрового диапазона формата ILS III категории ИКАО для аэродромов гражданской авиации, включая аэродромы с высоким уровнем снежного покрова и сложным рельефом местности».

Настройка, проверка и испытания пространственных и точностных характеристик курсового радиомаяка проводились с помощью:

— наземных измерений мобильным стендом – передвижной лабораторией для проверки выходных характеристик курсового радиомаяка на малых высотах;

— летных измерений специализированными воздушными судами-лабораториями, оборудованных метрологически аттестованной аппаратурой летного контроля (в том числе измерительными антенно-фидерными трактами);

— летных измерений экспериментальным бортовым стендом (с собственной антенно-фидерной системой отдельной от штатной бортовой), установленным на учебных самолётах.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: на международной научно-технической конференции СВЯЗЬ-ПРОМ 2011 [7], на конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ в

2011, 2012 и 2013 годах, на 10-ой всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных НТИ-2010 [10], на 21-ой [5] и 26-й [6] международной крымской конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии».

По теме диссертации работы опубликовано 10 печатных работ, среди которых 5 статей в журналах, включённых в перечень ВАК [1-5], в том числе 2 публикации содержатся в изданиях, индексируемых международной системой цитирования Scopus, 5 – в библиографической базе данных научных публикаций РИНЦ, 2 – в электронной базе данных IEEE Xplore.

Личный вклад диссертанта

В диссертации представлены только те результаты работы, в которых автору принадлежит определяющая роль. Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем, доктором технических наук, профессором Н.И. Войтовичем. Основная часть работ опубликована в соавторстве с научным руководителем, а также с кандидатом технических наук Б.В. Ждановым. В совместных работах диссертант разрабатывал и предлагал математические модели, выполнял расчёты, разрабатывал методику, подготовку и лично участвовал в проведении наземных и летных экспериментов.

Структура и объем работы

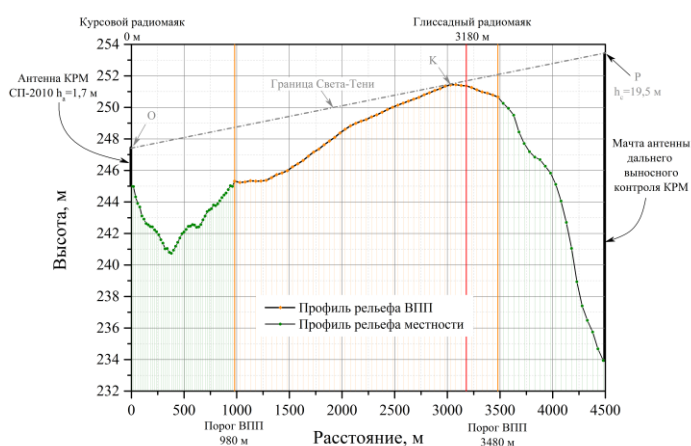
Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения, перечня сокращений, библиографического списка использованной литературы и списка иллюстративного материала. Общий объем работы составляет 178 страниц, работа содержит 62 рисунка и 3 таблицы. Список литературы включает в себя 92 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении приведён пример конкретного аэродрома и сформулированы возникающие при этом проблемы по выбору места размещения КРМ и инженерной подготовке местности перед КРМ. На рисунке 1а приведён снимок со спутника с видом на аэродром, расположенный в предгорной местности.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Лощина перед антенной курсового радиомаяка ILS (а), продольный профиль рельефа местности (б) вдоль оси ВПП от КРМ и общий вид на местность перед КРМ (в)

Аэродром расположен на границе Урала и Сибири. Взлетно-посадочная полоса и концевые полосы безопасности расположены на плато, которое в

направлении осевой линии в восточном направлении ВПП продолжается нисходящим наклоном в сторону тектонического разлома Земной поверхности. В западном направлении концевая полоса безопасности продолжается нисходящим наклоном земной поверхности в естественном состоянии. Земная поверхность в западном направлении представляет собой лощину рисунок 1а, линейно вытянутую с севера на юг с эрозионным понижением на склоне глубиной 4,5 м и длиной до 1,5 км. Лощина образовалась в результате размывающей работы временных водотоков (ливневый и талый водный сток). В южной части лощины расположено небольшое озерцо, наполняемое талыми и ливневыми водами, из которого вытекает ручей. В поперечном сечении лощина имеет форму корыта с заболоченным дном и мягко очерченными задернованными и поросшими кустарниками склонами без явно выраженных бровок.

Профиль местности вдоль оси ВПП и общий вид представлены на рисунках 1б,в. При выборе места для размещения КРМ принимались во внимание следующие два обстоятельства. Первое, Зона действия КРМ в вертикальной плоскости должна включать в себя пространство, ограниченное следующей замкнутой ломаной линией: снизу ограничиваться прямой, проходящей через центр антенной системы и точку над началом ВПП на высоте 6 м и далее прямой, идущей от этой точки под углом $0,8^\circ$ к горизонту. Сверху – ограничиваться прямой, проходящей через центр антенной системы под углом 7° к горизонту. На дальности 46,3 км от центра антенной системы – вертикальной прямой. Нормативные документы рекомендуют устанавливать КРМ таким образом, чтобы обеспечивалась прямая видимость между электрическим центром антенны и опорной точкой (точкой на высоте 15 м над началом ВПП).

Анализ показывает, что уже в случае работы КРМ над плоской земной поверхностью наиболее трудным является требование по обеспечению энергетического потенциала в точке, расположенной на высоте 6 м над началом ВПП. Размещение КРМ на данном аэродроме непосредственно за концевой полосой безопасности потребовало бы установить антенну на большой высоте. При этом КРМ оказался бы лётным препятствием.

Второе, другой причиной, затрудняющей размещение КРМ в пределах дна лощины, является то, что в весенний период лощина заполняется талой водой. В результате потребовались бы выполнить большой объём земляных работ и инженерных работ по недопущению залива водой площадки перед КРМ в пределах первой зоны Френеля (30 x 50 м) и строительству дороги для подъезда к КРМ.

Исходя из анализа гидрогеологической обстановки, на данном аэродроме представляется целесообразным разместить КРМ на короткой плоской площадке, в которую переходит западный склон лощины. Однако при этом возникает проблема инженерной подготовки местности, обусловленная существенными отличиями формы площадки перед антенной КРМ от требований нормативных документов к местности перед КРМ. Во-первых, на площадках перед курсовым маяком величина угла поперечного наклона площадки, равная $1,6^\circ$, превышает допустимую величину $0,57^\circ$ (уклоны 0,01 %). Величина угла продольного наклона площадки, равная $0,74^\circ$, превышает допустимую величину $0,57^\circ$ (уклоны 0,01 %).

Более, того продольный наклон в пределах площадки меняет свой знак, что не допустимо по установленным нормам. Инженерная подготовка площадки, с целью удовлетворения требований нормативных документов к ней, требует выполнения большого объема работ по перемещению грунта. В то же время, в литературе нет обоснования для упомянутых требований к местности перед курсовым радиомаяком. Проведенный анализ ситуации на аэродромах и нормативных требований показал несостоятельность требований к местности перед антеннами курсового радиомаяка.

В первой главе решена задача нахождения зависимости разности глубин модуляции от азимутального угла при различных соотношениях амплитуд сигналов широкого и узкого каналов b , при разных значениях разности фаз между сигналами НБЧ и БЧ в упомянутых каналах ($2\psi^{ук}$ в узком канале, $2\psi^{шк}$ в широком канале). Рассмотрено влияние сигналов узкого и широкого каналов на навигационный параметр курсового радиомаяка ILS (рисунок 2).



Рисунок 2 – Антенна курсового радиомаяка

Найдены соотношения в виде квадратур для точного вычисления $РГМ^{\Sigma}(\varphi)$ в зоне действия двухчастотного радиомаяка (КРМ или ГРМ) при любых соотношениях между комплексными амплитудами напряженностей полей сигналов узкого и широкого каналов, излучаемых антеннами с заданными диаграммами направленности (рисунок 3).

Получены соотношения для приближенного вычисления $РГМ^{\Sigma}(\varphi)$ сигналов на выходе линейного детектора. Полученные соотношения обобщают известные соотношения для случая линейного детектирования гармонического сигнала в присутствии помехи на случай, когда на вход линейного детектора одновременно поступает «сильный» сигнал, модулированный по амплитуде двумя низкочастотными тонами, и «слабый» сигнал с точно такой же модуляцией.

Показано, что «слабый» сигнал оказывается ослабленным в число раз, равное соотношению амплитуд «сильного» и «слабого» сигналов.

Глубина модуляции огибающей сигналом 90 Гц [150 Гц] представляет собой частное от деления амплитуды $M_1(\varphi)$ [$M_2(\varphi)$] на постоянную составляющую $M_0(\varphi)$:

$$\text{РГМ}^{\Sigma}(\varphi) = m_1(\varphi) - m_2(\varphi). \quad (1)$$

$$\text{где } m_1(\varphi) = \frac{M_1(\varphi)}{M_0(\varphi)}; \quad m_2(\varphi) = \frac{M_2(\varphi)}{M_0(\varphi)};$$

$$M_1(\varphi) = \frac{2}{T} \frac{1}{\Omega_0} \int_{-\pi}^{\pi} U(\varphi, \eta) \cos 3\eta d\eta = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U(\varphi, \eta) \cos 3\eta d\eta; \quad (2)$$

$$M_2(\varphi) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U(\varphi, \eta) \cos 5\eta d\eta, \quad M_0(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U(\varphi, \eta) d\eta. \quad (3)$$

Проведено сравнение результатов вычисления $\text{РГМ}^{\text{УК}}(\varphi)$ по точной и приближенной формулам для одночастотного радиомаяка. Показано хорошее совпадение результатов в случае, когда отношение амплитуды сигнала БЧ к амплитуде сигнала НБЧ меньше единицы.

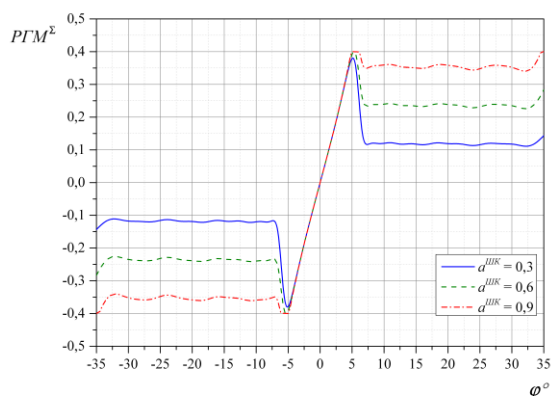


Рисунок 3 – Зависимость РГМ от азимутального угла при совместной работе УК и ШК КРМ во всей зоне действия

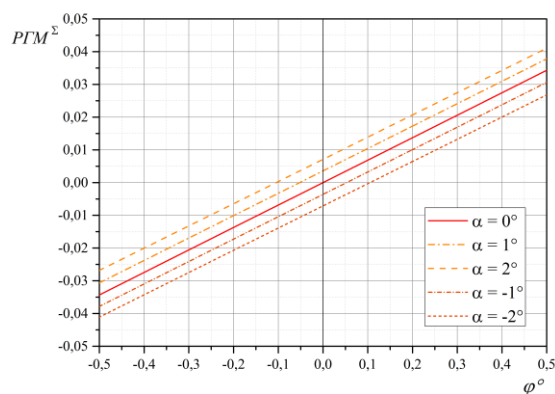


Рисунок 4 – Зависимость РГМ от азимутального угла при совместной работе УК и ШК КРМ вблизи оси ВПП

Во второй главе рассмотрено влияние подстилающей поверхности с поперечным наклоном на диаграммы направленности антенны курсового радиомаяка ILS. Исследовано влияние угла поперечного наклона местности на амплитудные и фазовые диаграммы направленности антенной решётки излучающих элементов антенны КРМ (рисунок 5).

Рассмотрено поведение зависимости разности фаз между сигналами БЧ УК и НБЧ УК, а также между сигналами БЧ ШК и НБЧ ШК, обусловленные влиянием поперечного по отношению к направлению оси ВПП наклона подстилающей поверхности во всей рабочей зоне действия КРМ. Показано, что в окрестности

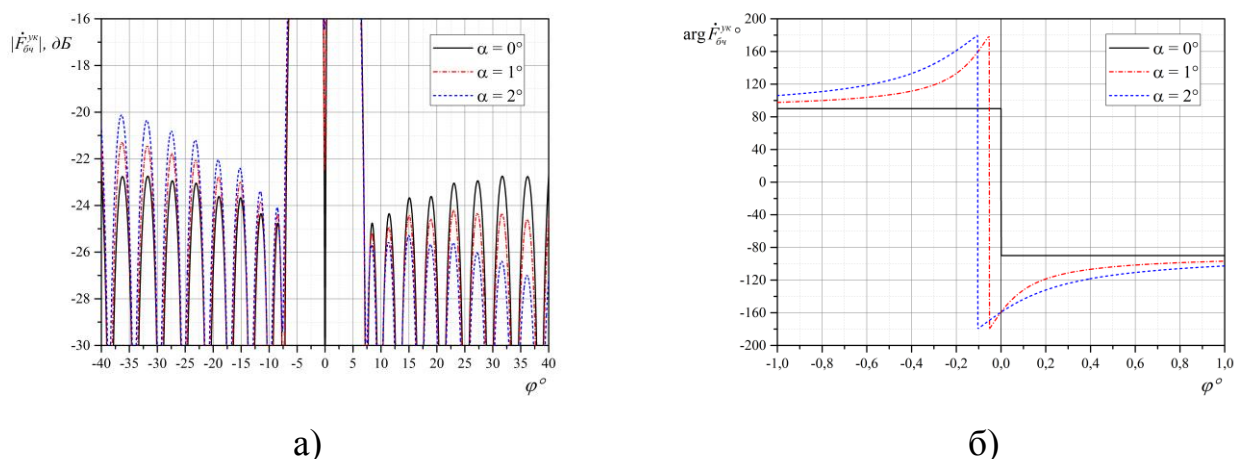


Рисунок 5 – Амплитудные (а) и фазовые (б) диаграммы направленности антенны курсового радиомаяка по сигналу «боковых частот» узкого канала

направления оси ВПП при наличии наклона местности наблюдается монотонное изменение разности фаз в отличие от скачкообразного изменения, имеющего место в случае расположения КРМ на горизонтальной плоскости.

В третьей главе рассмотрено влияние поперечного наклона местности на навигационный параметр курсового радиомаяка PLS (рисунок 4). Найдены зависимости $РГМ(\theta, \varphi)$ и траектории снижения $РГМ = 0$, формируемые при разных величинах угла поперечного наклона подстилающей поверхности, при заданных соотношениях амплитуд сигналов широкого и узкого каналов b , при заданной разности фаз между сигналами НБЧ и БЧ в упомянутых каналах ($2\psi^{yk}$ в узком канале, $2\psi^{шк}$ в широком канале).

Представлены обобщённые соотношения для вычисления параметров КРМ, учитывающие фазовые диаграммы направленности антенны КРМ для сигналов НБЧ УК, БЧ УК, НБЧ ШК, БЧ ШК.

Рассмотрено поведение зависимостей разности фаз между сигналами НБЧ УК и БЧ УК, а также между сигналами НБЧ ШК и БЧ ШК, обусловленные влиянием поперечного по отношению к направлению оси ВПП наклона подстилающей поверхности во всей рабочей зоне КРМ. Показано, что в окрестности направления оси ВПП при наличии наклона местности наблюдается монотонное изменение разности фаз в отличие от скачкообразного изменения, имеющего место в случае расположения КРМ на горизонтальной плоскости.

Влияние поперечного наклона местности проявляется в:

- смещении линии курса в узком канале,
- изменении уровня разности глубин модуляции в широком канале, причём с правой и с левой сторон от ВПП изменения уровня разности глубин модуляции происходит в противоположных направлениях,
- при совместной работе узкого и широкого канала наблюдается смещение линии курса, примерно равное смещению линии курса в УК и изменению уровня РГМ в широкой зоне, аналогичное изменению уровня РГМ в широком канале.

Показано, что траектория полёта самолёта при заходе на посадку по глиссаде с КРМ, установленным на площадке с поперечным наклоном местности

величиной до 2° , представляет собой практически прямую линию, составляющую с осью ВПП угол величиной менее шести угловых минут. При этом линейное смещение курса над порогом ВПП составляет не более 0,5 м.

Результаты представленных исследований показали допустимость поперечных наклонов местности перед антенной КРМ большей величины, чем это изложено в инструкциях по размещению КРМ на аэродроме, что может существенно снизить стоимость работ по инженерной подготовке позиций для размещения КРМ в реальных условиях аэродромов.

В четвертой главе рассмотрена дифракция волн на клиновидной аэродромной поверхности. Получены соотношения для вычисления напряженности поля источника над плоскостью и клиновидной аэродромной поверхностью. Получены коротковолновые асимптотические разложения строгого решения задачи дифракции сферической волны на клине с идеально проводящими гранями, угол раствора которого близок к 180° . Решение представлено в виде четырёх полутеневых волн, описываемых интегралами Макдональда.

Показано [6], что в случае, когда площадка перед курсовым радиомаяком имеет клиновидный вид, напряжённость поля в соответствии с формулами (4) – (5) в дальней зоне увеличена в 2,1 раза по сравнению с напряжённостью поля, которая имела бы место при размещении источника над гранью $\varphi = +\Phi$ (рисунок 6).

$$\frac{\partial |E_z|}{\partial \varphi_p} \Big|_{\varphi_p = -\Phi} = 2\sqrt{[kH]^2 + [kh]^2 - 2[kH][kh]\cos[k(S_q - s_q)]}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial |E_z|}{\partial \varphi_p} \Big|_{\varphi_p = -\Phi} \approx 2k(H - h). \quad (5)$$

Численные, наземные и лётные исследования влияние клиновидной формы аэродромной поверхности на выходные характеристики КРМ выполнены на примере аэродрома, расположенного в предгорной местности.

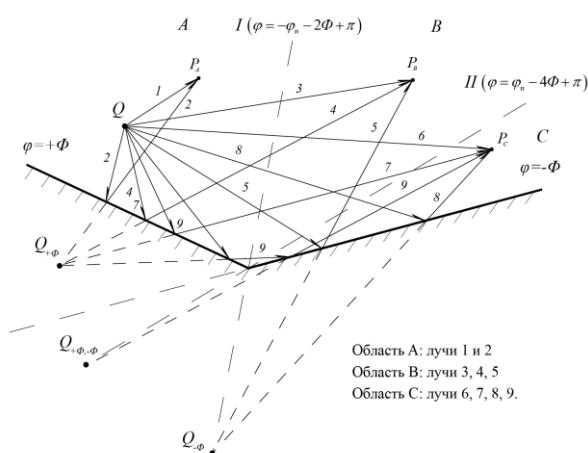


Рисунок 6 – Схема хода лучей в клиновидной области

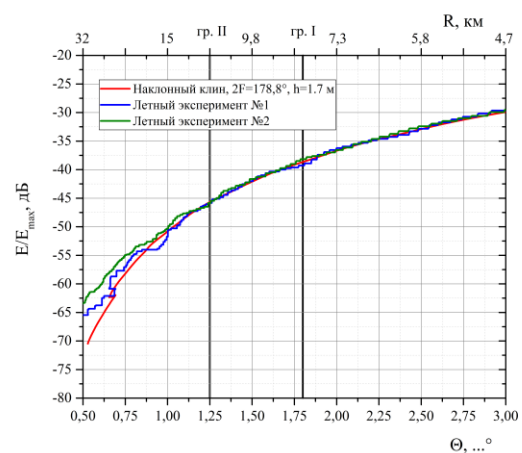


Рисунок 7 – Зависимость нормированной напряженности поля КРМ от меридионального угла θ

Результаты численного моделирования хорошо совпадают с данными летного эксперимента (рисунок 7).

КРМ с антенной в виде антенной решётки вибраторов с общим рефлектором, имеет запас мощности для обеспечения заданной напряжённости поля. Выбранной мощности передатчика достаточно для формирования необходимой по нормам напряжённости поля в контрольных точках при установке системы посадки в аэропортах с протяженными ВПП и сложным рельефом местности.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований пространственных и точностных характеристик КРМ с антенной (рисунок 2) в виде линейной антенной решётки из 17-ти излучающих элементов с общим рефлектором.

Приведены результаты наземных (рисунок 8) и летных измерений (рисунок 10). Приведено сравнение экспериментальных характеристик системы захода на посадку по приборам с расчетными данными.

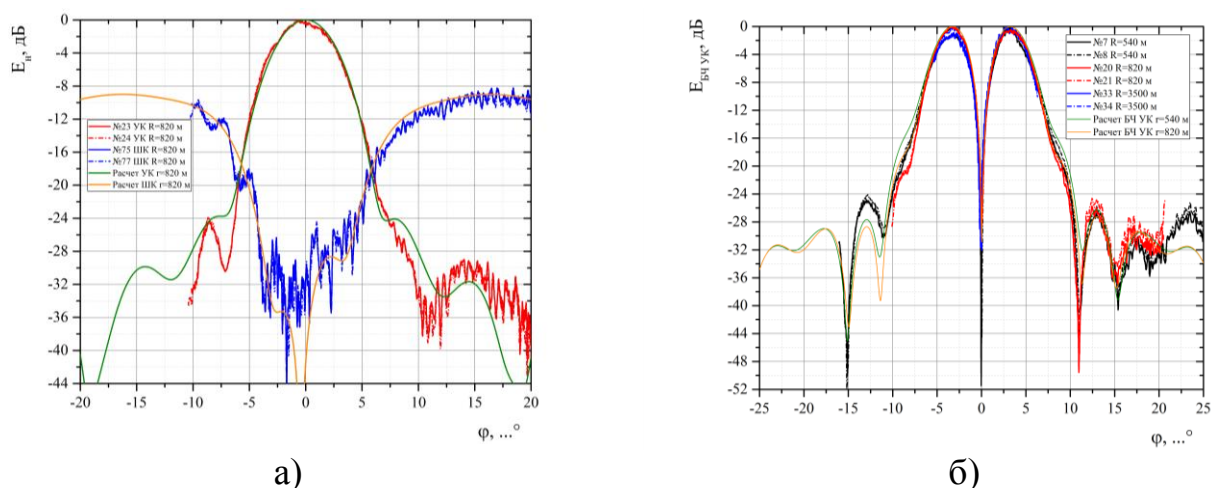


Рисунок 8 – Диаграммы направленности антенны КРМ для сигналов узкого и широкого каналов (а), диаграмма направленности для сигнала «боковых частот» узкого канала по наземным измерениям характеристик курсового радиомаяка (б)

При подготовке к испытаниям КРМ, а также в ходе наземных исследований и специальных летных проверок выполнены:

- настройка и измерение пространственных и точностных характеристик КРМ на аэродроме в соответствии со стандартами и рекомендуемой практикой ИКАО и Федеральными авиационными правилами радиотехнического обеспечения полетов государственной авиации;

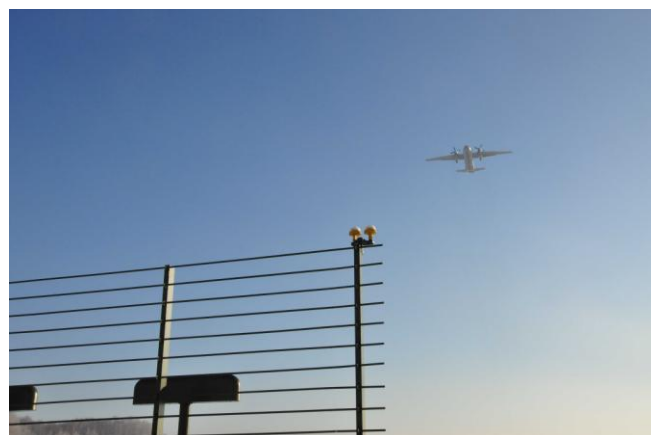
- сделаны выводы о соответствии пространственных и точностных характеристик КРМ на аэродроме требованиям норм ИКАО на радиомаячные системы захода на посадку III категории;

- измерения пространственных и точностных характеристик антенны КРМ с угловой точностью измерений местоположения, превышающую $0,01^\circ$ что для КРМ соответствует смещению линии курса не более чем 0,6 м от оси ВПП у порога ВПП на расстоянии 3500 м от КРМ;

— в ходе наземных измерений выработаны процедуры работы с оригинальным мобильным стендом, предназначенным для измерения выходных характеристик наземных угломерных радиомаяков на малых высотах (рис. 9а);



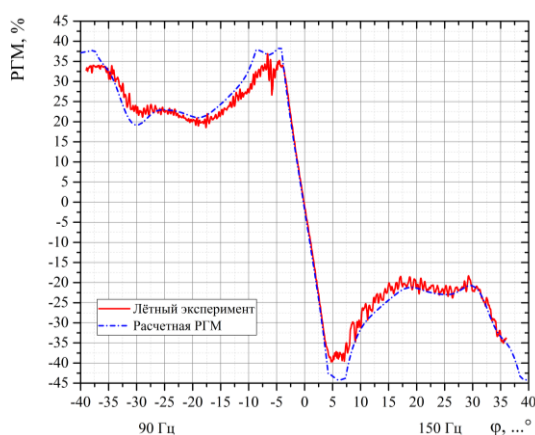
а)



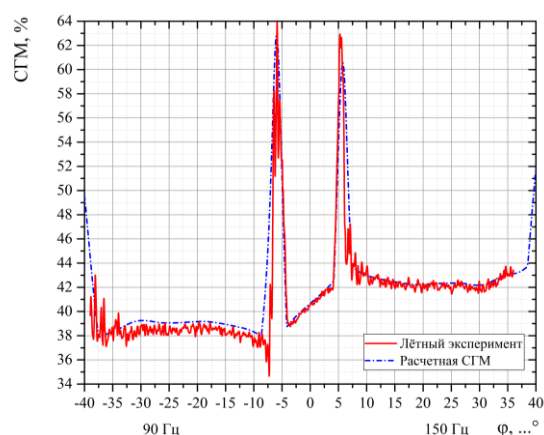
б)

Рисунок 9 – Мобильный стенд для исследований характеристик курсового радиомаяка, наземные (а), летные исследования (б)

— в ходе летных измерений выработаны процедуры работы с бортовым стендом, предназначенным для измерения выходных характеристик наземных угломерных радиомаяков при работе по сигналам бортовых антенн воздушного судна общего назначения (оборудованных только базовым комплектом антенн ILS) и работе по сигналам антенно-фидерного тракта независимого от штатных систем воздушного-судна.



а)



б)

Рисунок 10 – Зависимость разности (а) и суммы (б) глубины модуляции от азимутального угла по летным измерениям параметров курсового радиомаяка

Результаты измерений при испытаниях системы захода на посадку по приборам показали:

— отсутствие критического влияния поперечного наклона местности перед антенным полем КРМ на требования к величине искривлений разности глубин модуляции и возможность получения характеристик по III категории норм ИКАО;

— обоснованность выбора позиции размещения антенной системы которая позволила обеспечить зону действия КРМ в соответствии с требованиями ИКАО

на радиомаячные системы III категории на участке местности с поперечными и продольными наклонами, превышающими требования инструкции по эксплуатации курсовых радиомаяков;

— возможность проведения полного цикла наземной настройки КРМ с помощью мобильного стенда в соответствии с рекомендациями ИКАО к наземным испытаниям систем посадки по приборам формата ILS;

— хорошую повторяемость результатов наземных измерений и хорошее совпадение характеристик КРМ по летным и наземным измерениям;

— возможность проведения полного цикла летной настройки КРМ с помощью бортового стенда в соответствии с рекомендациями ИКАО к летным испытаниям систем посадки по приборам (ILS);

— возможность регулировки положения средней курсовой линии относительно оси ВПП с помощью электронной корректировки глубин модуляции тонов 90 и 150 Гц, сохраняя сумму глубин модуляции (СГМ) равной 40 %;

— необходимость корректировки амплитудно-фазового распределения антенной решетки с целью исключения бросков суммы глубин модуляции (участки, где величина сигнала БЧ преобладает над НБЧ при переходе от преобладающих сигналов узкого канала к преобладающим сигналам широкого канала).

В заключении подведены итоги исследования и сформулированы основные научные и практические результаты, которые можно квалифицировать как решение актуальной задачи по выполнению комплекса исследований влияния рельефа местности и, в частности, её поперечного по отношению к продолжению оси ВПП наклона местности и её клинообразной формы на основные параметры и характеристики системы посадки формата ILS, а также разработке рекомендаций по размещению курсового радиомаяка на местности, выбору параметров и характеристик курсового радиомаяка.

Основные выводы по работе состоят в следующих положениях:

1. Получены точные в виде квадратур и приближённые (на основе разложения в ряд Тейлора) соотношения для вычисления навигационного параметра – разности глубин модуляции сигнала двухчастотного курсового радиомаяка в зоне его действия при любых соотношениях между комплексными амплитудами напряжённостей полей сигналов узкого и широкого каналов.

Данные соотношения обобщают известные соотношения для случая линейного детектирования гармонического сигнала в присутствии помехи для случая, когда на вход линейного детектора одновременно поступает «сильный» сигнал, модулированный по амплитуде двумя низкочастотными тонами, и «слабый» сигнал с точно такой же модуляцией.

1.1 Показано, что система посадки самолётов формата ILS реализует при обработке сигналов двухчастотного курсового радиомаяка получение навигационной информации по сигналам, пропорциональным разности глубин амплитудной модуляции. При этом на формирование навигационной информации оказывают

взаимное влияния сигналы узкого и широкого каналов КРМ, а также отражения радиоволн от участка местности перед антенной системой КРМ.

1.2 Установлено, что в зоне действия КРМ сигналы узкого и широкого каналов меняются ролями в отношении «слабый» (меньший по амплитуде) и «сильный» (большой по амплитуде). Показано, что «слабый» сигнал оказывается ослабленным в число раз, равное соотношению амплитуд «сильного» и «слабого» сигналов. Иными словами, сигнал широкого канала подавляется сигналом узкого канала в окрестности линии курса, а сигнал узкого канала подавляется сигналом широкого канала в зоне наведения радиомаяка. При этом в узкой угловой рабочей зоне в окрестности направления вдоль оси ВПП сильным сигналом является сигнал узкого канала, слабым – сигнал широкого канала. За пределами узкой угловой зоны сильным сигналом является сигнал широкого канала, слабым – сигнал узкого канала.

В переходной зоне сигналы узкого и широкого каналов равноценны, при этом обеспечивается плавный ход функции разности глубины модуляции при переходе из одной зоны в другую.

2. Получены общие соотношения для анализа формирования поля антенной системы КРМ при её установке на поверхности с наклоном местности, поперечным относительно направления оси взлётно-посадочной полосы. При этом установлены основные закономерности поведения амплитудных и фазовых ДН для сигналов: «несущая плюс боковые» и «боковые частоты» узкого канала, «несущая плюс боковые» и «боковые частоты» широкого канала.

2.1 Показано, что в окрестности направления оси ВПП при наличии наклона местности наблюдается монотонное изменение разности фаз в отличие от скачкообразного изменения, имеющего место в случае расположения КРМ на горизонтальной плоскости. Это отличие обусловлено плавным изменением фазовых диаграмм направленности на реальной аэродромной поверхности.

2.2 При наличии поперечного по отношению к оси ВПП наклона подстилающей поверхности излучающая система КРМ не имеет фазового центра. Боковые лепестки ДН антенной системы в стороне понижения местности увеличиваются по уровню, а в стороне повышения местности, наоборот, уменьшаются по сравнению боковыми лепестками ДН антенны, расположенной над горизонтальной плоскостью. При этом фазовые ДН имеют вид монотонно изменяющихся функций, тогда как в случае работы антенны над горизонтальной плоскостью, фазовые ДН имеют ступенчатый вид: при переходе из одного лепестка амплитудной ДН в другой фаза изменяется скачком на 180° .

3. Установлено, что влияние поперечного наклона местности на характеристики курсового радиомаяка проявляется:

- в смещении линии курса в узком канале;
- в изменении уровня разности глубин модуляции в широком канале, причём с правой и с левой сторон от ВПП изменения уровня разности глубин модуляции происходит в противоположных направлениях;

— при совместной работе УК и ШК наблюдается смещение линии курса, примерно равное смещению линии курса в УК; при совместной работе узкого и широкого канала поведение уровня РГМ за пределами узкого канала, аналогично поведению уровня РГМ в широком канале.

3.1 Установлено, что траектория полёта самолёта при заходе на посадку по глиссаде с курсовым радиомаяком, размещенном на площадке с поперечным наклоном местности величиной до 2° , представляет собой практически прямую линию, составляющую с осью ВПП угол величиной менее шести угловых минут. При этом линейное смещение курса на пороге ВПП составляет величину не более 0,5 м.

3.2 Сделан вывод о том, что допустимы поперечные наклоны местности перед антенной курсового радиомаяка величиной до 2° , что существенно больше величины $0,57^\circ$ (уклон местности не более 0,01), изложенной в разделе требований к местности нормативных документов по размещению КРМ на аэродроме. Данный вывод может существенно уменьшить объём работ по перемещению грунта и соответственно снизить стоимость работ по инженерной подготовке позиций для размещения КРМ на аэродромах. В частности, основываясь на этом выводе, наклон местности перед КРМ на исследуемом аэродроме сохранён равным наклону местности в естественном состоянии.

4. Получены асимптотические разложения строгого решения задачи дифракции сферической волны на клине с идеально проводящими гранями, угол раствора которого близок к 180° . Решение представлено в виде четырёх полутеневых волн, описываемых интегралами Макдональда. Полученные разложения устраняют недостатки ранее известных разложений, заключающиеся в том, что в случае приближения геометрооптической границы света и тени к грани клина ошибка в вычислении напряжённости электрического (или магнитного) поля стремилась к бесконечно большой величине.

4.1 Для системы посадки найденное решение позволило решить задачу расчета напряженности поля над клинообразной аэродромной поверхностью. Сформирована математическая модель курсового канала системы посадки самолётов формата ILS, учитывающая отражение от плоской подстилающей поверхностью излучением зеркального изображения антенны, обобщена на случай расположения антенны КРМ на клинообразной аэродромной поверхности, при этом учитывается дифракция и двукратное отражение радиоволн на трассе передающая антенна КРМ – точка приёма на самолёте.

При этом установлено, что если площадка перед антенной системой КРМ имеет клинообразный вид поверхности, то напряжённость поля в дальней зоне может увеличиваться в несколько раз по сравнению с напряжённостью поля, которая имела бы место при размещении источника над горизонтальной поверхностью. Результаты теоретических исследований получили подтверждение данными летных измерений.

4.2 Выполнен расчет рассеянного поля в точках наблюдения, расположенных на трассе полета, на высоте 260 м, принятой в качестве стандартной правилами

лётной проверки параметров радиомаяков. Показано, что в том случае, когда площадка перед КРМ имеет клинообразный вид, напряжённость поля в дальней зоне увеличена в 2,1 раза по сравнению с напряжённостью поля, которая имела бы место при размещении источника над прилегающей к источнику гранью.

Это позволило разместить антенную систему курсового радиомаяка на незатопляемом участке с естественными наклонами без дополнительной планировки местности, которая требовалась для удовлетворения требованиям инструкции по размещению курсового радиомаяка. При этом параметры курсового радиомаяка удовлетворяют нормам III категории ИКАО.

4.3 Результаты выполненных исследований дифракции волн на клине, интересны и для других областей техники, где встречаются клиновидные области. Например, для анализа поведения глиссады на аэродромах в балочно-овражистой местности, в радиопеленгации для анализа девиационных ошибок, в акустике, в геофизике для разведки залежей рудных ископаемых, в антенной технике при учёте краевых эффектов.

5.1 Разработаны процедуры выполнения наземных измерений характеристик курсового радиомаяка, в том числе диаграмм направленности антенны, с помощью передвижной лаборатории на базе автомобиля, включающей в себя аппаратуру для приёма и анализа сигналов системы посадки, аппаратуру для определения координат передвижной лаборатории относительно радиомаяка по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем и локальной контрольно-корректирующей станции.

Результаты измерений с помощью передвижной лаборатории находятся в хорошем количественном соответствии с расчётными результатами, полученными по реальному (измеренному с помощью зонда) амплитудно-фазовому распределению токов в излучателях антенной системы курсового радиомаяка. Отклонения экспериментальных данных от расчётных в пределах главного лепестка ДН не превышает 5 %. Отклонение уровня боковых лепестков в расчёте и эксперименте не превышает 2 дБ.

Показана хорошая повторяемость результатов в 34 наземных измерениях, выполненных в летний и зимний периоды времени, а также совпадение характеристик КРМ по летным и наземным измерениям.

Данные результаты наземных измерений послужили основой для принятия решения о готовности курсового радиомаяка к лётным приёмо-сдаточным испытаниям.

5.2 Разработаны процедуры выполнения лётных измерений характеристик курсового радиомаяка, в том числе диаграмм направленности антенны, с помощью неспециализированного воздушного судна с применением локальной корректирующей станции с высоким темпом обновления информации.

Результаты лётных измерений находятся в хорошем количественном соответствии с результатами расчётов диаграмм направленности по амплитудно-фазовому распределению токов, измеренному с помощью измерительного зонда. Отклонение уровня суммарной ДН по данным лётных измерений от расчётных находится в пределах 9 %.

Полученные в работе результаты являются основой для уточнения требований нормативных документов к площадкам для размещения курсовых радиомаяков. Уточнение требований позволяет более рационально планировать земляные работы для подготовки площадок и тем самым ускорить и удешевить как реконструкцию существующих, так и строительство новых аэродромов.

Рекомендации по итогам выполненного исследования состоят в следующем:

— внести изменения в документацию на курсовой радиомаяк в раздел требования к местности перед антенной курсового радиомаяка о допустимости наклона площадки перед курсовым радиомаяком до 2° и целесообразности выполнения прогностических расчётов в случае иных отклонений от требований к местности перед КРМ;

— синтезировать антенну с иным амплитудно-фазовым распределением в излучателях КРМ с целью устранения выбросов в зависимости суммы глубин модуляции от азимутального угла в зоне действия радиомаяка;

— проанализировать существующие амплитудно-фазовые распределения курсового радиомаяка с целью выбора оптимальных значений мощности в узком и широком канале КРМ.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

— исследовать влияние рельефа местности перед антенной КРМ дециметровых длин волн на выходные характеристики КРМ;

— исследовать влияние рельефа местности в зоне захода на посадку на характеристики глиссадного радиомаяка формата ILS и глиссадного радиомаяка дециметрового диапазона длин волн.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Зотов А.В. Влияние поперечного уклона местности на информационный параметр курсового радиомаяка ILS / А.В. Зотов, Н.И. Войтович, Б.В. Жданов // Вестник Южно-Уральского государственного университета, Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. С. 71-88 (2,1 п.л. / 1,7 п.л.).

2. Зотов А.В. Диаграммы направленности антенны курсового радиомаяка ILS на поверхности с поперечным уклоном/ А.В. Зотов, Н.И. Войтович, Б.В. Жданов // Вестник Южно-Уральского государственного университета, Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. С. 5-27 (2,75 п.л. / 2,3 п.л.).

3. Zotov A.V. Asymptotic expansion of problem solution of spherical wave diffraction on wedge / A.V. Zotov, N.I. Voytovich // Proceedings of the XXXIst URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). Beijing, China (CIE), August 17-23, 2014. pp. 1-4 (0,25 п.л. / 0,18 п.л.), (Scopus).

4. Зотов А.В. Моделирование работы двухчастотной инструментальной системы посадки самолетов / А.В. Зотов, Н.И. Войтович, Б.В. Жданов // Вестник Южно-Уральского государственного университета, Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. С. 55-69 (1,7 п.л. / 1,4 п.л.).

5. Зотов А.В. Приближенное решение задачи дифракции волн на клине с идеально проводящими гранями / А.В. Зотов, Н.И. Войтович // Сборник трудов 21-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо 2011. Севастополь, 2011. С. 521-522 (0,125 п.л. / 0,08 п.л.), (Scopus).

Статьи в прочих журналах, тексты докладов в материалах конференций:

6. Зотов А.В. Дифракция волн на клинообразной аэродромной поверхности / А.В. Зотов, Н.И. Войтович // Сборник трудов 26-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо 2016. Севастополь, 2016. С. 2591-2597 (0,375 п.л. / 0,3 п.л.).

7. Зотов А.В. Коротковолновые асимптотические разложения решения задачи дифракции сферической волны на клине с идеально проводящими гранями / А.В. Зотов, Н.И. Войтович // Научные труды международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2011» в рамках 8-го Международного форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2011». Екатеринбург, 2011. С. 400-403 (0,25 п.л. / 0,17 п.л.).

8. Зотов А.В. Дифракция волн на клине в технических задачах / А.В. Зотов, Н.И. Войтович // Научный поиск: материалы третьей научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. С. 113-117 (0,31 п.л. / 0,25 п.л.).

9. Зотов А.В. Дифракция волн на клине в геометро-оптическом приближении / А.В. Зотов, Н.И. Войтович // Информационно-измерительные и управляющие системы и устройства: сборник научных трудов Приборостроительного факультета ЮУрГУ. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. С. 58-66 (0,5 п.л. / 0,35 п.л.).

10. Зотов А.В. Дифракция волн на клине / А.В. Зотов, Н.И. Войтович // Материалы X всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» в 7-и частях (3-5 декабря 2010 г.), секция «Радиотехнические и телекоммуникационные системы». Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Ч. 1. С. 339-341 (0,1875 п.л. / 0,12 п.л.).