

На правах рукописи

УДК 621.376

КЕЛИН ТИМУР ГЕОРГИЕВИЧ

**Анализ и синтез подсистем обмена данными в
радионавигационных системах автоматических зависимых
наблюдений**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и
устройства радионавигации, радиолокации и телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2001

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Калмыков В.В.
Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Рыжков А.В.
- кандидат технических наук,
Кудинов А.Т.
Ведущая организация Московский Научно-исследовательский
Институт Приборной Автоматики

1576447
Келин Т.Г.
Анализ и синтез под-
систем обмена данным
2001 0.00

я "13" февраль 2002г. в
заседании диссертационного совета
техническом Университете им.

а, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им.

комиться в библиотеке МГТУ им.

_____ 2001г.

вета,



Власов И.Б.

и 1,25 п.л. Тир. 100 экз.

1576447

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1576447

Анализ и синтез
Келин Т.Г.

Актуальность темы. Быстрый рост количества транспортных средств, увеличение скорости их движения и дальности перевозок, а также широкое развертывание парка средств малой авиации, используемых самыми различными службами (силовыми структурами, пожарной охраной, службами медицинской помощи, ликвидации последствий стихийных бедствий и сельскохозяйственными службами и др.) делает весьма острой проблему контроля их местонахождения и определения параметров движения.

Традиционные средства контроля движения – радиолокация и радиопеленгация – не позволяют в полном объеме решить эти задачи по ряду причин, среди которых главными являются:

- наличие на территории страны обширных регионов, не охваченных федеральными службами радиолокационного и радионавигационного контроля;
- плохая наблюдаемость наземных объектов и легких летательных аппаратов с помощью радиолокаторов, обусловленная их малыми геометрическими размерами, свойствами материалов, используемых в их конструкциях, а также сложностью селекции сигналов, отраженных от маловысотных низкоскоростных объектов, на фоне мешающих отражений от местных предметов и земной поверхности;
- сложность и дороговизна традиционных средств управления движением, делающие нереальным оснащение ими в обозримом будущем всех подвижных объектов (ПО), подлежащих контролю.

С учетом сказанного ясна актуальность поиска нетрадиционных методов решения рассматриваемой проблемы, которые были бы в значительной мере свободны от указанных недостатков. Анализ мировых тенденций развития данной области техники показывает, что одним из наиболее перспективных путей решения проблемы управления движением объектов является использование спутниковых радионавигационных систем (СРНС) «ГЛОНАСС» (Россия) и/или GPS (Global Positioning System – Глобальная система позиционирования) «Navstar» (США).

Технико-экономические показатели серийно выпускаемой бортовой навигационной аппаратуры потребителей (НАП) СРНС позволяют использовать ее для оперативного определения текущих координат, высоты и скорости ПО любых типов и классов. Наличие на борту большинства ПО средств радиосвязи обеспечивает возможность передачи полученной от НАП координатной информации на диспетчерский пункт и другим потребителям, реализуя тем самым технологию автоматических зависимых наблюдений (АЗН). Таким образом, в настоящее время имеются необходимые научно-технические предпосылки для создания принципиально новых комплексов диспетчерского контроля и управления движением.

Такие международные организации, как ICAO (International Civil Aviation

tion Organization - Международная организация гражданской авиации), ИМО (International Maritime Organization - Международная морская организация), IEC (International Electrotechnical Commission – Международная электротехническая комиссия) далеко продвинулись в разработке нормативной базы для довольно сложных систем управления движением объектов, использующих технологию АЗН, однако развертывание аппаратуры, удовлетворяющей стандартам и рекомендациям международных организаций для систем АЗН локального покрытия (например, в масштабах города), требует значительных затрат и в большинстве случаев экономически нецелесообразно. Это, в свою очередь, препятствует развитию отрасли, эффективному управлению движением транспортных средств и обуславливает необходимость проведения поиска и исследования эффективных видов модуляции, протоколов множественного доступа и разработки радиосредств передачи дискретной информации, ориентированных на работу в составе систем АЗН локального покрытия.

Актуальность данной работы определяется тем, что внедрение радионавигационных систем АЗН, использующих СРНС, позволяет решить задачу определения с высокой точностью координат объектов, которые не могут наблюдаться с помощью обычных методов радиолокации. Кроме того, создание систем АЗН с заданными техническими характеристиками может быть выполнено лишь при правильном выборе каналообразующей аппаратуры и протоколов множественного доступа к радиоканалу, исходя из характерной для данного случая совокупности параметров сопровождаемых объектов и радиообстановки.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является анализ и синтез подсистем обмена данными в радионавигационных системах АЗН локального покрытия, использующих для организации радиоканала штатные радиосредства с аналоговыми видами модуляции, предназначенные для обмена речевой информацией. Для этого проведен анализ и осуществлен выбор эффективных видов модуляции и алгоритмов обработки сигналов в низкочастотном тракте, а также протоколов множественного доступа к таким радиоканалам.

При этом особое внимание уделено вопросам построения математических моделей систем передачи дискретной информации и сетевых протоколов множественного доступа к радиоканалам, позволяющих проводить исследование и определение основных вероятностно-временных характеристик радиосетей систем АЗН с оценкой качества их функционирования для широкого класса помех.

Внедрение радионавигационных систем АЗН, использующих СРНС, позволяет определить с высокой точностью координаты и параметры движения объектов, которые не могут наблюдаться с помощью обычных методов радиолокации.

В работе решаются следующие основные задачи:

1. Проведена классификация систем АЗН и сформулированы общие требования к радиотехническим системам передачи дискретной информации (РСПДИ) и методам множественного доступа к радиоканалам в системах АЗН локального покрытия.

2. Проведен анализ спектральной и энергетической эффективности различных видов модуляции и алгоритмов обработки сигналов в РСПДИ систем АЗН с передачей данных на поднесущей. Отмечена возможность использования для передачи данных штатных радиостанций с аналоговыми видами модуляции, установленных на подвижных объектах и предназначенных для обмена речевыми сообщениями.

3. Исследована помехоустойчивость и разработаны математические модели систем передачи данных на поднесущей. Предложены алгоритмы оптимальной обработки сигналов и оценена их эффективность.

4. Проведен анализ протоколов случайного множественного доступа с учетом специфики их использования для управления информационными радиосетями систем АЗН. Полученные результаты позволяют оценить характеристики радиосетей систем АЗН с учетом пространственного распределения абонентов, запаздывания передачи и эффекта захвата.

5. Предложен способ повышения пропускной способности радиосетей систем АЗН за счет управления интенсивностью передачи пакетов и мощностью сигнала в зависимости от пространственного положения подвижных объектов.

6. На основе полученных в работе результатов разработан модем-контроллер, предназначенный для передачи навигационной и телеметрической информации на поднесущей с подвижных объектов на диспетчерский пункт при эксплуатации в составе системы АЗН.

7. Проведены лабораторные и натурные исследования систем передачи дискретной информации с двойными видами модуляции. Представлены экспериментальные результаты.

Методы исследований. При решении поставленных задач в работе использован аппарат математического анализа, теории вероятностей и случайных процессов, теории массового обслуживания, вычислительной математики и программирования. Основные теоретические результаты проверены путем статистического и имитационного моделирования с использованием современных средств вычислительной техники, а также экспериментально.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые результаты, выносимые на защиту:

- анализ отечественных и зарубежных радионавигационных систем АЗН, позволивший сформулировать требования к подсистемам передачи данных, входящим в состав систем АЗН, а также анализ путей повышения их эффективности;

- выбор видов модуляции и исследование помехоустойчивости цифровых каналов передачи данных систем АЗН на поднесущей с учетом особенности использования штатных радиосредств (радиостанций с частотной или амплитудной модуляцией, предназначенных для передачи речевых сообщений);
- синтез алгоритмов оптимальной и квазиоптимальной обработки сигналов с выхода частотного и амплитудного детектора; выигрыш в помехоустойчивости от использования этих алгоритмов подтвержден результатами компьютерного моделирования;
- разработанные автором требования к выбору протокола множественного доступа и исследование характеристик информационных сетей систем АЗН с учетом пространственного распределения абонентов, запаздывания передачи и эффекта захвата;
- разработанные автором и защищенные патентом РФ способ и устройство управления пакетной передачей данных по радиоканалу, позволяющие повысить пропускную способность радиосетей систем АЗН за счет управления интенсивностью и мощностью передачи пакетов в зависимости от пространственного положения абонентов;
- разработанный автором с учетом результатов работы модем-контроллер РМ-12, предназначенный для передачи навигационной и телеметрической информации с подвижных объектов на диспетчерский пункт при эксплуатации в составе системы АЗН;
- методика и результаты экспериментальных исследований помехоустойчивости систем с двойными видами модуляции, а также результаты трассовых испытаний образцов каналообразующей аппаратуры, использующей двойные виды модуляции, в информационной радиосети системы АЗН.

Практическая ценность работы. Разработан программный комплекс моделирования систем передачи дискретной информации с двойными видами модуляции, предназначенный для определения вероятности ошибки при различных типах различителей в низкочастотном тракте (оптимальный в гауссовском шуме, оптимальный для случая независимых отсчетов, асимптотически оптимальный) и различных типах детекторов сигнала на несущей (амплитудный, частотный) в условиях ограничения полосы канала, затенений трассы распространения сигнала, интерференционных замираний, сдвига частоты и действия внутрисистемных помех. Проведена оптимизация различителя сигналов с частотной манипуляцией с непрерывной фазой (ЧМНФ) в низкочастотном тракте для рассмотренных типов детекторов на несущей.

Разработана методика расчета характеристик радиосетей с учетом пространственного распределения абонентов и эффекта захвата на примере радиосети, работающей под управлением протокола множественного доступа ALOHA.

Даны рекомендации по использованию результатов расчета для управления трафиком радиосетей систем АЗН путем адаптации интенсивности пе-

редачи пакетов и/или мощности сигнала в зависимости от местоположения абонента относительно диспетчерского пункта, что позволяет обеспечить не зависящую от расстояния «подвижный объект - диспетчерский пункт» среднюю скорость передачи и, как следствие, фиксированную точность сопровождения.

Разработан модем-контроллер РМ-12, предназначенный для передачи навигационной и телеметрической информации с подвижных объектов на диспетчерский пункт при эксплуатации в составе системы АЗН. Модем-контроллер РМ-12 является составной частью экспериментального стенда, позволяющего в лабораторных условиях, согласно приведенным в работе методикам, оценить помехоустойчивость систем передачи дискретной информации с двойными видами модуляции.

Разработанное программное обеспечение, экспериментальный стенд, методики и рекомендации могут быть использованы при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Реализация и внедрение результатов исследований. Результаты исследований использованы при выполнении НИР по теме ЛО13594 «Разработка комплекса технологий в области проведения трассовых измерений с использованием спутниковых радионавигационных систем» (шифр «Трасса»), проводившейся в НИИ РЛ МГТУ в 1996 г., а также внедрены в разработки Пилотажно-исследовательского центра Летно-исследовательского института им. М.М. Громова, что подтверждено соответствующими документами. На основании проведенных автором исследований в НИИ РЛ МГТУ была выпущена инженерная записка «Техническое обеспечение организации использования воздушного пространства и контроля за полетами воздушных судов над городом Москвой» («Московское небо»).

Апробация результатов. Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: на Международном форуме информатизации МФИ-99 "Телекоммуникационные и вычислительные системы" (г. Москва, 1999 г.), на научно-технической конференции МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2000 г.), на Международном форуме информатизации МФИ-2000 "Телекоммуникационные и вычислительные системы" (г. Москва, 2000 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 3 статьи в журналах "Вестник МГТУ", Серия "Приборостроение", №4 2000 г., №4 2001 г. и "Мобильные системы" №8 1999 г. Результаты работы включены в отчеты по вышеперечисленным НИР, а также отражены в тезисах указанных выше докладов на конференциях. Получено положительное решение на выдачу патента РФ по заявке на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 202 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков, 13 таблиц и список

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых в диссертационной работе вопросов, указывается цель и направления исследований, определяется общий подход к рассматриваемым задачам организации обмена данными в радионавигационных системах АЗН, обосновывается преимущество выбранного подхода, аргументированы научная новизна и ценность результатов.

В первой главе приведена классификация систем АЗН по типу контролируемых объектов (воздушные, морские и речные суда, наземные объекты) и по размеру зоны обслуживания (глобального, регионального и локального покрытия).

На основе анализа архитектуры построения систем АЗН сформулированы требования к основным элементам систем локального покрытия, применяющихся для обеспечения диспетчерского контроля и управления внутригородскими перевозками и движением легких летательных аппаратов: к радиоканалу «подвижный объект – диспетчерский пункт» и к информационной радиосети, позволяющей подвижным объектам коллективно использовать этот радиоканал. Проведен анализ используемых в системах АЗН комплексов передачи дискретной информации отечественного и зарубежного производства, рассмотрены их основные характеристики, позволяющие определить эффективность используемых видов модуляции и методов демодуляции.

Показано, что в силу ряда объективных причин при построении систем АЗН локального покрытия целесообразно задействовать УКВ-каналы речевой радиосвязи с аналоговой частотной или амплитудной модуляцией, которыми в большинстве случаев располагает абонент, используя ретрансляторы или без них. В качестве решения, реализующего передачу данных по указанным радиоканалам, представлены системы передачи данных с двойными видами модуляции (с поднесущей), использующие стандартные, серийно выпускаемые радиостанции.

Проведен обзор протоколов множественного доступа к радиоканалу, используемых для управления радиосетями систем АЗН. Особое внимание уделено протоколам неконтролируемого множественного доступа ALOHA и протоколам с проверкой состояния канала МДКН.

Отмечено, что характеристики радиосети требуют уточнения с учетом пространственного распределения абонентов, а также эксплуатационных параметров передатчика радиомодема совместно с алгоритмом доступа, который реализует выбранный протокол, т.к. для протоколов случайного множественного доступа с проверкой состояния канала каждый абонент помимо передатчика должен иметь приемник, фиксирующий состояние канала по

критерию «занят – свободен». При анализе протоколов этого типа следует учитывать время переключения режимов «прием – передача» штатной радиостанции.

Глава 2 диссертационной работы посвящена анализу эффективности систем передачи дискретной информации с двойными видами модуляции (с поднесущей).

Показано, что для передачи на поднесущей целесообразно использовать частотную манипуляцию с непрерывной фазой с индексом 0,5 ($\text{ЧМНФ}_{0,5}$), что обусловлено ее эффективной работой при ширине полосы канала, сравнимой со скоростью передачи двоичной информации, а также высокой энергетической эффективностью. Получены алгоритмы и разработаны структурные схемы формирователя и когерентного различителя сигналов с $\text{ЧМНФ}_{0,5}$.

Для сравнительной оценки эффективности различных систем передачи дискретной информации при работе в каналах с ограниченной полосой была разработана модель, позволяющая получить зависимости проигрыша в помехоустойчивости системы как функции ширины полосы канала для заданной вероятности ошибки.

Проведено статистическое моделирование для ряда значений отношения сигнал-шум в канале и ширины полосы канала B , показало, что для при $B \geq 1.1R$ (R - скорость передачи посылок) использование систем с $\text{ЧМНФ}_{0,5}$ является более эффективным по сравнению с обычной четырехкратной ФМ и с четырехкратной ФМ со сдвигом. Для указанных видов модуляции заметные ухудшения возникают при приближении ширины полосы канала к ширине основного лепестка спектральной плотности мощности. В связи с тем, что основной лепесток в спектральной плотности мощности при $\text{ЧМНФ}_{0,5}$ шире чем при четырехкратной ФМ со сдвигом и обычной четырехкратной ФМ, качество приема $\text{ЧМНФ}_{0,5}$ начинает ухудшаться раньше при дальнейшем сужении полосы канала, однако помехоустойчивость системы с четырехкратной ФМ со сдвигом и обычной четырехкратной ФМ становится при такой ширине полосы канала неудовлетворительной.

Во второй главе была также рассмотрена структурная схема модели системы передачи дискретной информации с двойными видами модуляции « $\text{ЧМНФ}_{0,5}$ -ЧМ» и « $\text{ЧМНФ}_{0,5}$ -АМ» при некогерентном детектировании ЧМ или АМ и когерентной обработке $\text{ЧМНФ}_{0,5}$. При анализе этих систем средствами статистического моделирования были получены кривые зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал-шум в канале (рис. 1). Анализ результатов моделирования показал, что радиомодемы с двойными видами модуляции « $\text{ЧМНФ}_{0,5}$ -ЧМ» и « $\text{ЧМНФ}_{0,5}$ -АМ» пригодны для использования в радиоканалах с высоким отношением сигнал-шум (для обеспечения вероятности ошибки $P_{\text{ош}} = 10^{-3}$ отношение сигнал-шум должно составлять 15 дБ при $\text{ЧМНФ}_{0,5}$ -ЧМ и 17 дБ при $\text{ЧМНФ}_{0,5}$ -АМ) и могут рассматриваться как обес-

нованное решение для обеспечения физического уровня услуг передачи дискретной информации в системах АЗН.

Для повышения помехоустойчивости радиосистем с двойными видами модуляции «ЧМНФ_{0.5}-ЧМ» и «ЧМНФ_{0.5}-АМ» были предложены оптимальные алгоритмы различения сигналов в низкочастотном тракте, для чего были получены аналитические выражения для отношения правдоподобия для сигналов на выходе некогерентных частотного и амплитудного детекторов при входном воздействии аддитивной смеси сигнала и белого гауссовского шума. Сложная, особенно в случае с ЧМ, структура различителя с необходимостью измерения дисперсии входного шумового процесса ограничивает его практическое использование, поэтому были рассмотрены алгоритмы различения в классе асимптотически оптимальных. Такие алгоритмы основываются на использовании нелинейной обработки смеси до когерентного различителя.

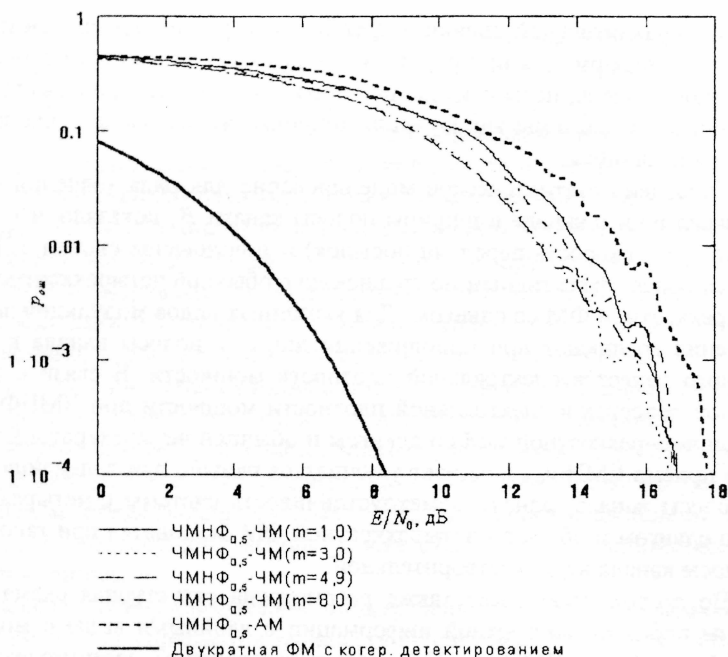


Рис. 1. Кривые зависимостей вероятности ошибки от отношения сигнал-шум в канале для ЧМНФ_{0.5}-ЧМ с оптимальным в гауссовском шуме различителем ЧМНФ при разных индексах ЧМ, для ЧМНФ_{0.5}-АМ и для случая противоположных сигналов при когерентной обработке

С использованием статистик смеси сигнала и шума на выходе некогерентных частотного и амплитудного детекторов были найдены нелинейности, реализующие асимптотически оптимальную обработку смеси, и разработаны структурные схемы асимптотически оптимальных различителей. Вид нели-

нейности, включенной на входе когерентного ЧМНФ-различителя, для сигнала V , полученного с выхода амплитудного детектора с линейной характеристикой:

$$f_{AM}(V) = (V^2 - 2\sigma^2) / (4\sigma^4),$$

где σ - дисперсия входного гауссовского процесса; для сигнала v , полученного с выхода амплитудного детектора с квадратичной характеристикой:

$$f_{AM}(v) = (v - \sigma^2) / (2\sigma^4);$$

для сигнала y с выхода частотного детектора:

$$f_{FM}(y) = \frac{1 + a^2 [2(a + y)^2 + 3] + 2y(3a - y)}{2[1 + (a - y)^2]},$$

где $y = \frac{\dot{\theta}}{\sqrt{-\rho_0''}}$, $a = \frac{\Delta\omega}{\sqrt{-\rho_0''}}$, $\sqrt{-\rho_0''} = \sqrt{\frac{2}{\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 S^*(\Omega) d\Omega}$, $\dot{\theta}$ - производная фазы (мгновенная частота), получаемая на выходе частотного детектора, $\Delta\omega$ - сдвиг относительно частоты настройки, $S^*(\Omega)$ - спектральная плотность.

В результате моделирования показано, что использование различителей с полученными нелинейностями дает выигрыш в помехоустойчивости до 2 дБ.

В третьей главе проведен выбор протокола множественного доступа к рассматриваемым информационным радиосетям систем АЗН.

Отмечено, что протоколы неконтролируемого случайного доступа «синхронный АЛОНА» и «несинхронный АЛОНА», являющиеся наиболее простыми в технической реализации, могут быть использованы в радиосетях систем АЗН, причем для реализации протокола «синхронный АЛОНА» можно задействовать единый синхросигнал, поставляемый бортовыми НАП СРНС. Для этих протоколов получены зависимости средней нормированной скорости передачи от нормированного трафика и характеристики «задержка передачи – скорость передачи».

Рассмотрено влияние эффекта захвата, состоящего в избирательном приеме абонентом одного из группы одновременно поступающих на его вход сигналов, на среднюю скорость в радиосетях с неконтролируемым множественным доступом, работающих под управлением протокола АЛОНА. В сетях, основанных на передаче данных простыми сигналами, эффект захвата проявляется в успешном приеме сигнала, мощность которого превышает на требуемую величину суммарную мощность остальных конкурирующих сигналов. Соотношение мощностей определяется типом модема, используемого в канале.

Получено уравнение, связывающее распределение плотности средней скорости передачи $S(r)$ от распределения плотности трафика $G(r)$ и пара-

метра q , характеризующего захват и зависящего от типа модема:

$$S'(r)G(r) = G'(r)S(r) - 4\pi r q^2 S(r)G(r)G(qr).$$

В общем виде это уравнение решить не удастся, поэтому были рассмотрены два частных случая.

Для постоянной плотности трафика $G(r) = G_0$ найдена зависимость распределения плотности средней скорости передачи:

$$S(r) = G_0 \exp \left[-2 \left(\frac{qr}{r_1} \right)^2 \right],$$

и выражение для полной средней скорости передачи:

$$S = \frac{1}{2q^2} \left\{ 1 - \exp \left[-2 \left(\frac{qr}{r_1} \right)^2 \right] \right\}. \quad (1)$$

Показано, что при идеальном захвате ($q = 1$) полная средняя скорость равна 0,5.

Получена аналитическая зависимость плотности трафика при постоянной плотности средней скорости передачи для случая идеального захвата. Показано, что при идеальном захвате полная средняя скорость передачи также равна 0,5. Для произвольного значения параметра q получена нижняя оценка плотности распределения трафика:

$$G(r) \geq \exp \left[\frac{1}{q^2} \ln \left(\frac{S_0}{1 - 2\pi S_0 q^4 r^2} \right) \right],$$

где $S_0 = G(0)$.

При постоянной средней скорости передачи радиосеть имеет ограниченную зону действия; найдены радиус зоны действия для идеального захвата: $r_0 = 1/\sqrt{2\pi S_0}$, верхняя оценка радиуса зоны действия произвольного захвата: $r_0 \leq \frac{1}{q^2 \sqrt{2\pi S_0}}$ и полной средней скорости передачи для произвольного захвата:

$$S = \pi r_0^2 S_0 \leq \frac{1}{2q^4}. \quad (2)$$

Разработана математическая модель системы передачи информации и получены зависимости вероятности ошибки от отношения мощностей ближнего и дальнего абонентов для фиксированного уровня шума в радиоканале, при котором достигается значение вероятности ошибки 10^{-3} , позволяющая оценить значения параметра q , характеризующего захват, для видов модуляции: «двукратная ФМ» с когерентной обработкой ($q = 2,8$), «ЧМНФ_{0,5}-ЧМ» ($q = 2,2$) и «ЧМНФ_{0,5}-АМ» ($q = 2,6$) при некогерентном детектировании ЧМ

или АМ и когерентной обработке ЧМНФ_{0,5}.

Значения полной средней скорости передачи в случае постоянной плотности трафика из (1) для ЧМНФ_{0,5}-ЧМ $S=0,10$; для ЧМНФ_{0,5}-АМ $S=0,07$; для двукратной ФМ $S=0,06$. Оценки значений полной средней скорости передачи в случае постоянной плотности средней скорости передачи из (2) для ЧМНФ_{0,5}-ЧМ $S=0,02$; для ЧМНФ_{0,5}-АМ $S=0,01$; для двукратной ФМ $S=0,01$. Оценка полной средней скорости передачи для радиосетей с указанными видами модуляции и методами детектирования позволяет утверждать, что неидеальный захват приводит к уменьшению полной средней скорости передачи для случаев постоянной плотности трафика и постоянной плотности средней скорости передачи.

Полученные результаты можно использовать для нахождения характеристик радиосетей систем АЗН и управления их трафиком путем адаптации интенсивности передачи пакетов и/или мощности сигнала в зависимости от местоположения абонента относительно диспетчерского пункта, что позволит обеспечить не зависящую от дальности абонента до диспетчерского пункта среднюю скорость и, как следствие, фиксированную точность сопровождения в системах АЗН.

Проведен анализ поведения сети с протоколами неконтролируемого случайного множественного доступа при неоднородном трафике, показавший, что для протокола «несинхронный АЛОНА» различие в длительностях пакетов уменьшает среднюю скорость передачи в сети тем сильнее, чем больше отношение этих длительностей, поэтому если длительности пакетов отличаются в несколько раз, то предпочтительным решением является разбиение длинных пакетов на несколько коротких. В случае протокола «синхронный АЛОНА» при разных вероятностях передачи пакетов от групп абонентов возможно увеличение средней скорости передачи в сети. В радиосетях систем АЗН неоднородный трафик может создаваться абонентами, имеющими в своем составе в качестве источника информации не только НАП СРНС, но и дополнительное телеметрическое оборудование, а также в системах АЗН локального покрытия, где трафик от каждого ПО может зависеть от скорости изменения его координат.

Проанализированы характеристики протоколов случайного множественного доступа с контролем состояния радиоканала типа МДКН. Для реализации алгоритмов доступа таких протоколов абонентский комплект помимо передатчика должен быть оснащен приемником, фиксирующим состояние радиоканала по критерию «занят – свободен».

На основании анализа зависимостей средней скорости передачи от нормированного трафика и нормированной задержки распространения a , а также характеристик «задержка передачи – скорость передачи» для несинхронных вариантов протоколов «ненастойчивый МДКН» и «1-настойчивый МДКН» указаны условия эффективной работы по критерию средней скорости

передачи. В радиосетях с низким уровнем трафика ($G < 1$) большая средняя скорость передачи будет достигнута при использовании протокола «1-настойчивый МДКН», в случае же высокого уровня трафика ($G > 1$) применение протокола «ненастойчивый МДКН» оказывается более эффективным в диапазоне значений нормированной задержки распространения от 0 до 0,8.

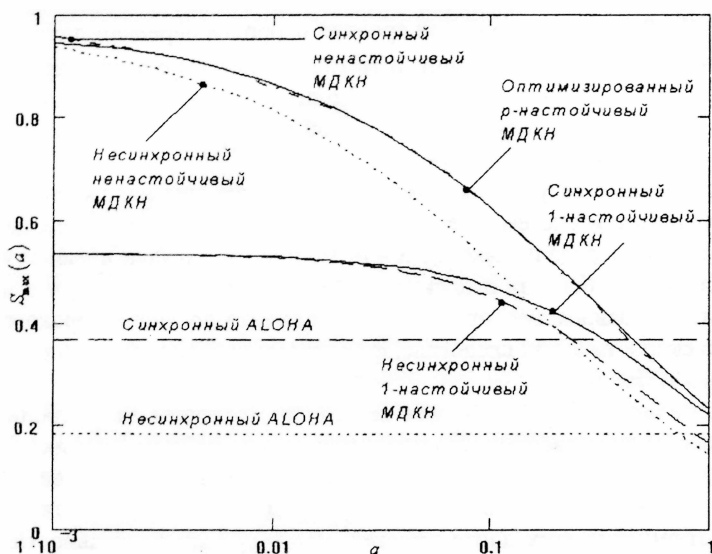


Рис. 2. Зависимость емкости канала $S_{\max}(a)$ от значения задержки распространения a для различных протоколов случайного множественного доступа

Отмечена возможность использования в радиосетях систем АЗН синхронного p -настойчивого протокола МДКН, причем для синхронизации можно использовать единый, поставляемый бортовой НАП СРНС, синхросигнал. Для этого протокола получена аналитическая зависимость средней скорости передачи от нормированного трафика, нормированной задержки распространения и параметра алгоритма доступа p , и для каждой пары значений G и a найдено такое значение параметра $p = p_{opt}$, при котором средняя скорость достигает своего максимального значения.

В результате сравнительного анализа емкости канала с различными протоколами случайного множественного доступа показано, что значение задержки распространения не оказывает влияние на емкость канала с протоколами ALOHA, в то время как для протоколов МДКН с увеличением задержки распространения a растет длительность периода уязвимости, что неминуемо приводит к уменьшению емкости канала; емкость канала с протоколами «не-

настойчивый МДКН» и «*p*-настойчивый МДКН» в большей степени зависит от a нежели с «1-настойчивым МДКН»; при больших значениях a ($a > 0,3$) протокол «синхронный АЛОНА» дает выигрыш по сравнению с любым протоколом МДКН, этот результат является следствием того, что решения о свободном состоянии канала, принятые с задержкой, приводят к уменьшению средней скорости в канале (рис. 2).

Глава 4 содержит техническое описание модем-контроллера РМ-12, при построении которого были использованы результаты, полученные автором в Главах 2 и 3 диссертационной работы, а также описание и анализ экспериментальных исследований систем передачи дискретной информации с двойными видами модуляции.

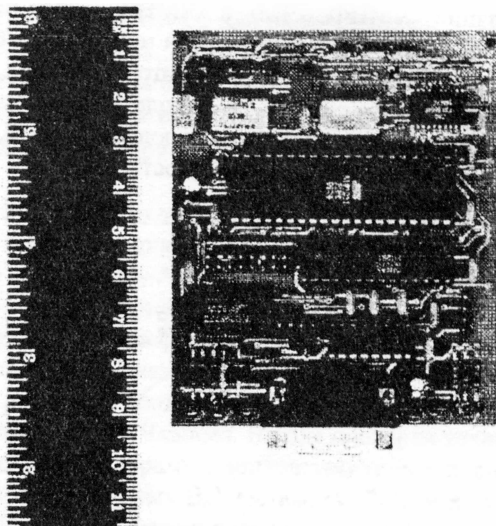


Рис. 3. Внешний вид модем-контроллера РМ-12

Модем-контроллер РМ-12, внешний вид которого приведен на рис. 3, разработанный автором при выполнении работ по теме ЛО13594 в НИИРЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, предназначен для передачи цифровой информации со скоростями 1200, 2400 или 4800 бит/с по стандартным узкополосным радиоканалам с АМ, ЧМ или модуляцией с одной боковой полосой (классы излучения АЗЕ, F3Е и J3Е соответственно) в дуплексном, полудуплексном или симплексном режиме. Одним из предполагаемых применений модем-контроллера является передача навигационной и телеметрической информации с подвижных объектов на диспетчерский пункт при работе в составе системы АЗН. Возможным вариантом использования модем-контроллера РМ-12 является также совместная эксплуатация с НАП СРНС, работающей в режиме

дифференциальных измерений, для обеспечения радиоканала передачи дифференциальных поправок.

Модем-контроллер используется совместно с любой дуплексной, полу-дуплексной или симплексной речевой радиостанцией, обеспечивающей классы излучения АЗЕ, JЗЕ или FЗЕ, имеющей стандартные звуковые вход и выход, возможность управления режимом «прием-передача» и, при необходимости, выход порогового шумоподавителя радиостанции. Подключение модем-контроллера к оконечному оборудованию данных обеспечивается по стыку С2 (RS-232-C).

На основе модем-контроллера РМ-12 для экспериментального исследования помехоустойчивости систем передачи дискретной информации с двойными видами модуляции «ЧМНФ_{0.5}-ЧМ» и «ЧМНФ_{0.5}-АМ» при некогерентном детектировании ЧМ или АМ и когерентной или квазикогерентной обработке ЧМНФ_{0.5} был разработан и создан лабораторный стенд, позволяющий снять зависимости вероятности ошибки на выходе квазикогерентного различителя ЧМНФ_{0.5}, содержащегося в модем-контроллере РМ-12, от отношения сигнал шум в канале для различных типов радиостанций с ЧМ или АМ.

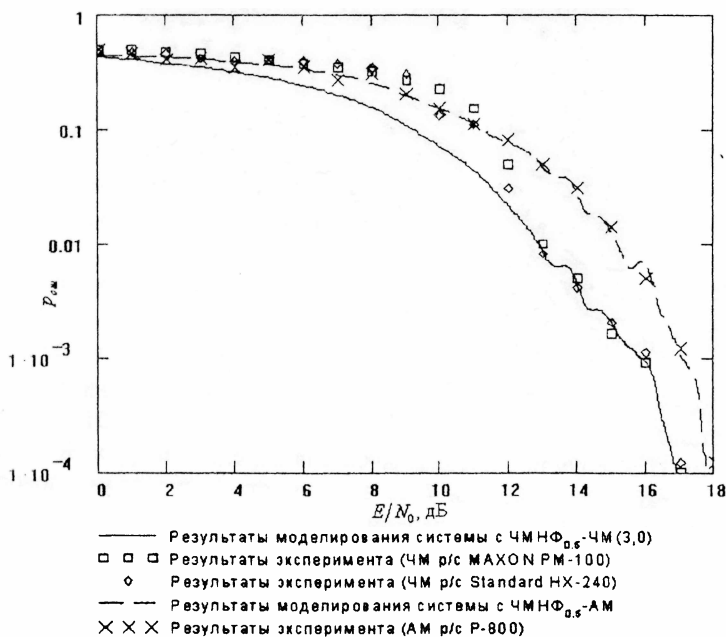


Рис. 4. Кривые зависимостей вероятности ошибки от отношения сигнал-шум в канале для ЧМНФ_{0.5}-ЧМ и для ЧМНФ_{0.5}-АМ, полученные в результате моделирования и экспериментально для различных типов радиостанций

Анализ результатов (рис. 4), полученных в ходе эксперимента, показал, что в случае радиостанций с ЧМ ярче, по сравнению с результатами моделирования, выражен пороговый эффект, что объясняется неточным соответствием схмотехнического решения частотного детектора радиостанции и структурной схемы, вычисляющей мгновенную частоту. При отношениях сигнал-шум больших 12 дБ экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными методом статистического моделирования т.е. рассматриваемые системы сигналов при детектировании «некогерентный частотный детектор – оптимальный в гауссовском шуме когерентный различитель ЧМНФ_{0,5}» обеспечивают приемлемую вероятность ошибки 10^{-3} лишь при отношениях сигнал-шум 15 дБ и более. Также видно, что зависимость имеет пороговую область (в районе 12 дБ).

Результаты эксперимента с АМ радиостанцией практически полностью совпадают с результатами моделирования т.е. система сигналов при детектировании «некогерентный амплитудный детектор – оптимальный в гауссовском шуме когерентный различитель ЧМНФ_{0,5}» обеспечивает приемлемую вероятность ошибки 10^{-3} при значении отношения сигнал-шум примерно 17 дБ.

В целом, экспериментальные результаты подтверждают предположение о возможности использования радиомодемов с двойными видами модуляции «ЧМНФ_{0,5}-ЧМ» и «ЧМНФ_{0,5}-АМ» для обеспечения физического уровня услуг передачи дискретной информации в системах АЗН.

Один из возможных вариантов построения системы АЗН, разработанных в НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана, был испытан в реальных условиях при активном содействии Национального Аэроклуба России им. В.В. Чкалова. В ходе проверки технических возможностей экспериментальных образцов аппаратуры точность определения координат и высоты контролируемых ВС составила 10-30 м в обычном режиме навигации или 5-10 м в дифференциальном режиме, скорости - 0,05-0,1 м/с и 0,005-0,01 м/с соответственно.

Экспериментальная аппаратура обеспечивает надежный контроль движения самолета ЯК-18Т и вертолета МИ-2 над всей территорией Москвы в пределах московской кольцевой автодороги. Максимальная дальность действия РСПДИ по результатам облета – 80 км при использовании радиостанции с частотной модуляцией и мощностью бортового передатчика 10 Вт.

В заключении отражены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты и выводы

Настоящая диссертационная работа посвящена анализу и синтезу подсистем обмена данными в радионавигационных системах АЗН локального

покрытия, включая исследование методов модуляции и демодуляции в каналах с передачей данных на поднесущей применительно к радиосредствам для обмена речевыми сообщениями, а также протоколов множественного доступа к радиоканалам.

Ниже представлены основные результаты работы.

1. Создание подсистем обмена данными в системах АЗН локального покрытия с применением штатных радиосредств с амплитудной или частотной модуляцией, предназначенных для обмена речевой информацией, требует применения двойных видов модуляции, т.е. использования передачи цифровых сообщений на поднесущей.

2. Достичь высокой эффективности использования полосы частот и энергетики канала можно за счет использования в качестве вида модуляции поднесущей ЧМНФ_{0,5}. Этот вид модуляции позволяет более эффективно использовать полосу частот по сравнению с четырехкратной ФМ и четырехкратной ФМ со сдвигом практически при той же энергетической эффективности.

3. Результаты, полученные при анализе систем с видами модуляции «ЧМНФ_{0,5}-ЧМ» и «ЧМНФ_{0,5}-АМ» с некогерентным детектированием ЧМ или АМ и когерентной обработкой ЧМНФ_{0,5} средствами статистического моделирования показывают, что такие системы пригодны для передачи данных, но при более высоких значениях отношения сигнал-шум в радиоканале по сравнению с оптимальными методами передачи на несущей. Так для обеспечения вероятности ошибки $P_{ош} = 10^{-3}$ отношение сигнал-шум должно составлять 15 дБ при ЧМНФ_{0,5}-ЧМ и 17 дБ при ЧМНФ_{0,5}-АМ.

4. Синтезированы алгоритмы оптимальной обработки сигнала с ЧМНФ_{0,5} на выходе некогерентного амплитудного или частотного детектора радиостанции. Сложность технической реализации, связанная с необходимостью оценок параметров смеси сигнала и шума, не позволяет использовать эти алгоритмы, поэтому предложено реализовать асимптотически оптимальную обработку, состоящую в использовании нелинейного преобразования смеси сигнала и шума на входе ЧМНФ_{0,5} детектора. В результате проведенного статистического моделирования показано, что выигрыш от применения асимптотически оптимальных алгоритмов может достигать 2 дБ.

5. Наблюдение за многими объектами в системе АЗН требует организации коллективного доступа абонентов к радиоканалу, для чего предлагается работа всех абонентских передатчиков в пакетном режиме на одной частоте под управлением протоколов случайного множественного доступа, допускающих возможность возникновения конфликтных ситуаций, при которых передаваемые пакеты взаимно искажаются.

Простота технической реализации обуславливает целесообразность использования протоколов неконтролируемого случайного доступа «синхронный ALOHA» и «несинхронный ALOHA», учитывая, что для реализации про-

15446447

токола «синхронный ALOHA» в радиосетях систем АЗН можно использовать единый синхросигнал, поставляемый бортовыми НАП СРНС.

6. В системах АЗН происходит естественная дифференциация абонентов по мощности при их различном удалении от диспетчерского пункта, поэтому характеристики протоколов множественного доступа были уточнены с учетом эффекта захвата, состоящего в избирательном приеме абонентом одного из группы одновременно поступающих на его вход сигналов, и пространственного распределения абонентов. Для этого была построена геометрическая модель и получено уравнение, связывающее плотности распределения трафика и средней скорости. В общем виде это уравнение решению не поддается, поэтому были рассмотрены два практически важных частных случая: постоянная плотность трафика и постоянная плотность средней скорости передачи. Получены аналитические выражения для оценок полной средней скорости. Отмечено, что при постоянной плотности средней скорости радиосеть имеет ограниченную зону действия.

Средствами статистического моделирования получены зависимости вероятности ошибки от отношения мощностей ближнего и дальнего абонентов при фиксированном уровне шума в радиоканале для систем с поднесущей и с «двукратной ФМ», позволяющие оценить значения параметра q , характеризующего захват. Проведенный анализ позволяет утверждать, что в общем случае эффект захвата оказывает сложное влияние на характеристики радиосети и требует обязательного учета при проектировании.

7. Для получения заданных характеристик радиосетей разработаны процедуры адаптации интенсивности передачи пакетов и/или мощности сигнала в зависимости от местоположения абонента относительно диспетчерского пункта. Управление интенсивностью или мощностью в зависимости от навигационных данных может быть использовано при работе системы АЗН в условиях застройки или пересеченного рельефа местности. На этот способ и реализующее его устройство было получено положительное решение на выдачу патента РФ по заявке на изобретение.

8. При сопровождении ПО, имеющих в своем составе в качестве источника информации не только навигационное, но и дополнительное, например телеметрическое, оборудование, а также в системах, где трафик от каждого ПО может зависеть от скорости изменения его координат, возникает задача анализа радиосети с неоднородным трафиком. Для протокола «несинхронный ALOHA» различие в длительностях пакетов уменьшает среднюю скорость передачи в сети тем сильнее, чем больше отношение этих длительностей, поэтому предпочтительным решением является разбиение длинных пакетов на несколько коротких. В случае протокола «синхронный ALOHA» при разных вероятностях передачи пакетов от групп абонентов возможно увеличение средней скорости передачи в сети.

9. Для несинхронных вариантов протоколов «ненастойчивый МДКН» и

«1-настойчивый МДКН» получены зависимости нормированной средней скорости S от нормированного трафика G и нормированной задержки распространения a (включающей время выхода передатчика радиостанции на режим) и характеристики «задержка передачи – скорость передачи». В радиосетях с низким уровнем трафика ($G < 1$) большая средняя скорость будет достигнута при использовании протокола «1-настойчивый МДКН», в случае же высокого уровня трафика ($G > 1$) применение протокола «ненастойчивый МДКН» оказывается более эффективным в диапазоне значений нормированной задержки распространения от 0 до 0,8.

Синхронный протокол « p -настойчивый МДКН» также может быть использован в радиосетях систем АЗН, причем для синхронизации можно использовать единый, поставляемый бортовой НАП СРНС, синхросигнал. Для этого протокола получена аналитическая зависимость нормированной средней скорости передачи от нормированного трафика, нормированной задержки распространения и параметра процедурной характеристики p ; для каждой пары значений G и a было найдено такое значение параметра $p = p_{opt}$, при котором средняя скорость передачи достигала своего максимального значения.

10. Сравнительный анализ емкости канала с различными протоколами случайного множественного доступа показал, что значение задержки распространения a не оказывает влияние на емкость канала с протоколами АЛОНА, в то время как для протоколов МДКН с увеличением задержки распространения a растет длительность периода уязвимости, что неминуемо приводит к уменьшению емкости канала; емкость канала с протоколами «ненастойчивый МДКН» и « p -настойчивый МДКН» в большей степени зависит от a нежели с «1-настойчивым МДКН»; при больших значениях a ($a > 0,3$) протокол «синхронный АЛОНА» дает выигрыш по сравнению с любым протоколом МДКН, этот результат является следствием того, что решения о свободном состоянии канала, принятые с задержкой, приводят к уменьшению средней скорости в канале.

11. Анализ методов модуляции, обработки сигналов и протоколов множественного доступа позволил создать модем-контроллера РМ-12, который предназначен для обмена навигационными данными при работе в составе системы АЗН, реализуя приведенные в диссертационной работе алгоритмы обработки сигналов в низкочастотном тракте, а также процедурные характеристики ряда протоколов случайного множественного доступа для обеспечения доступа в информационную радиосеть. Возможным вариантом применения модем-контроллера РМ-12 является также совместная эксплуатация с НАП СРНС, работающей в режиме дифференциальных измерений, для обеспечения радиоканала передачи дифференциальных поправок.

12. С использованием модем-контроллера РМ-12 был разработан лабо-

раторный стенд и получены результаты экспериментальных исследований помехоустойчивости систем с двойными видами модуляции «ЧМНФ_{0,5}-ЧМ» и «ЧМНФ_{0,5}-АМ». Эксперименты проведены с применением штатных речевых радиостанций различных типов. Результаты эксперимента соответствуют данным, полученным при статистическом моделировании.

13. Трассовые испытания экспериментальных образцов аппаратуры подтверждают возможность использования каналаобразующей аппаратуры с двойными видами модуляции в информационных радиосетях систем АЗН. Аппаратура обеспечивала надежный контроль движения легких летательных аппаратов над территорией с радиусом до 80 км при использовании бортовой радиостанции с частотной модуляцией и мощностью передатчика 10 Вт.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. **Применение** сотовых систем связи для контроля и диспетчеризации подвижных объектов / В.В. Калмыков, Т.Г. Келин, В.Б. Пудловский и др. // Мобильные системы. – 1999. – № 8. – С. 39-42.
2. **Калмыков В.В., Келин Т.Г., Себекин Ю.Н.** Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации с двойной частотной модуляцией // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. – 2000. – №4. – С. 57-67.
3. **Келин Т.Г.** Исследование характеристик цифровых радиосетей с учетом явления захвата // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. – 2001. – №4. – С. 43-54.
4. **Заявка** 2000129865/09 РФ, МПК Н 04 L 7/00. Способ и устройство управления передачей данных по радиоканалу / В.В. Калмыков, Т.Г. Келин, Ю.Н. Себекин (РФ). Заявлено 30.11.2000 // Бюллетень изобретений. – 2001. – №23.
5. **Келин Т.Г., Себекин Ю.Н.** Оценка помехоустойчивости систем передачи дискретной информации с поднесущей // Телекоммуникационные и вычислительные системы: Тез. докладов Международного форума информатизации МФИ-99. – М., 1999. – С. 207-208.
6. **Келин Т.Г.** Исследование характеристик радиосетей для систем автоматических зависимых наблюдений (АЗН) // Телекоммуникационные и вычислительные системы: Тез. докладов Международного форума информатизации МФИ-2000. – М., 2000. – С. 174-175.
7. **Келин Т.Г., Себекин Ю.Н.** Исследование помехоустойчивости цифровых систем с модуляцией поднесущей // Тез. докладов научно-технической конференции; В 2 ч. – М., 2000. – Ч. 1. – С. 86-87.