

**РГБ ОД**

На правах рукописи

- 3 НОЯ 2000

Тархов Николай Сергеевич



**РАДИОТЕХНИЧЕСКАЯ АВТОНОМНАЯ АДАПТИВНАЯ  
СИСТЕМА ПРИЕМА-ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ  
НИЗКООРБИТАЛЬНЫЕ ИСЗ**

05.12.21 "Радиотехнические системы специального назначения,  
включая технику СВЧ и технологию их производства.

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула 2000

Работа выполнена в ТУЛЬСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ

Научный руководитель

- кандидат технических наук,  
доцент Луцков Ю.И.

Официальные оппоненты

- доктор технических наук,  
профессор, Басалов Ф.А.  
- кандидат технических наук,  
доцент Бульчев В.А.

Ведущая организация - Тульский филиал Коломенского  
конструкторского бюро машиностроения.

614<sup>00</sup>

Защита диссертации состоится « 06 » 07 2000г. на  
заседании диссертационного Совета К 063.47.09 в Тульском  
государственном университете (300600, г. Тула, пр. Ленина, 92 ТулГУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТулГУ.

Автореферат разослан « 05 » 06 2000 г.

Заверенный отзыв просим выслать по указанному адресу на имя  
ученого секретаря диссертационного Совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Е.В.Ларкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы:** Потребность современного общества в обмене различного рода информацией стимулирует быстрое развитие систем спутниковой связи (ССС). Однако, традиционные высокоорбитальные СССР требуют использования громоздкого и дорогостоящего оборудования земных станций (ЗС), что часто недоступно массовому потребителю. Поэтому сегодня актуальна задача создания недорогих СССР, в первую очередь для обслуживания пользователей тех регионов, которые недостаточно обеспечены услугами наземных сетей, и где их построение нерентабельно. В последнее время во многих странах проводятся работы по созданию космических СССР с использованием низкоорбитальных искусственных спутников земли (ИСЗ) - высота орбит 700-2000 км.

Системы пакетной передачи сигналов предназначены для передачи любых данных в цифровом виде с небольшими скоростями от нескольких сотен кбод до нескольких десятков кбод. Во многих применениях для этих систем не предъявляются жесткие требования по оперативности доставки сообщений. Тогда низкоорбитальная система пакетной передачи сигналов строится исходя из следующих основных принципов:

- используются ИСЗ с отсутствием коррекции положения на орбите, что позволяет отказаться от использования двигательных установок на ИСЗ;
- используется УКВ диапазон частот (130-400 МГц), что позволяет применить на ИСЗ и в земных станциях слабонаправленные антенны с коэффициентом усиления 0-3 дБ;
- используются передатчики с небольшой мощностью.

К таким системам относятся СССР "Иридиум", "Глобалстар", "Инмарсат", "Леосат" за рубежом, "Гонец", "Курьер", "Сигнал", "СПС-спутник", "Радио-М1" в России, международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие КОСПАС-САРСАТ.

Для повышения надежности, достоверности и помехоустойчивости используются различные способы: разнесение сигналов по времени и частоте, разнесенный прием, перестройка рабочей частоты и т.д. Это приводит к увеличению энергетических затрат и создает трудности в реализации автономных систем. Поэтому необходимы другие решения и методы.

При использовании автономных, подвижных объектов необходимо адаптировать энергетические возможности наземного оборудования к параметрам канала связи. Адаптивная система пакетной передачи информации позволяет в зависимости от условий прохождения по каналу связи (КС) управлять мощностью передатчика и длительностью

информационного пакета, что обеспечивает экономию энергии и повышает достоверность передаваемых сообщений.

Это обусловило выбор объекта исследования диссертации, которым является канал пакетной передачи сигналов через низкоорбитальные ИСЗ.

**Предмет исследования:** Поляризионные и амплитудные характеристики сигнала, проходящего от ИСЗ к земной поверхности, методы приема и обработки сигналов.

**Методы исследования:** Теория поляризованных электромагнитных волн, излучаемых вращающимся источником и проходящих через ионосферу, метод резонансной угловой фильтрации электромагнитных волн, моделирование на ЭВМ и натурального эксперимента с использованием теории вероятности и математической статистики.

**Целью диссертационной работы** является повышение достоверности передаваемой информации путем оптимизации параметров канала связи при ограничениях на энергетические возможности передающих устройств и предельную чувствительность приемников.

В соответствии с поставленной целью автором решаются следующие задачи:

1. Проведение классификации различного вида помех по происхождению, по физическим свойствам, по характеру воздействия на сигнал.
2. Разработка математической модели канала связи с использованием ИСЗ с учетом помех и шумов.
3. Разработка алгоритма работы канала связи с управлением мощностью передатчика в зависимости от условий прохождения сигнала с учетом действующих ограничений.
4. Разработка способа и алгоритма управления адаптивной антенной системой (решеткой).
5. Разработка модели, определяющей оптимальные параметры передающего канала по известным характеристикам канала принимаемого сигнала на основании имеющихся статистических результатов.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель канала связи с использованием ИСЗ с учетом помех и шумов.
2. На основе метода резонансной угловой фильтрации определены собственные значения и функции преобразования Карунена-Лоэва, позволяющие реализовать оптимальный прием фазоманипулированных сигналов.
3. Разработана модель канала связи с управлением мощностью передатчика.

**Практическая значимость работы** состоит в следующем :

1. Теоретические положения и выводы диссертации применены для решения практических задач.
2. Предложена методика определения длительности информационного пакета.
3. Разработан способ оптимального формирования передаваемого сигнала с учетом энергетических ограничений.
4. Полученные результаты позволяют разработать варианты технической реализации приемо-передающих устройств наземных объектов с ограниченными энергетическими ресурсами.

**На защиту выносятся:**

1. Алгоритмы и структурные схемы приемо-передающих устройств ЗС с ограниченными энергетическими ресурсами.
2. Алгоритм адаптивного согласования угла поляризации приемной антенны ЗС с углом поляризации полезного сигнала и способ передачи информационного пакета с управлением мощностью передатчика.
3. Результаты анализа воздействия различного вида помех на прохождение электромагнитной волны через ионосферу и тропосферу.
4. Результаты экспериментальных исследований каналов связи с использованием низкоорбитальных ИСЗ.
5. Совокупность зависимостей, позволяющих синтезировать наземные устройства приема-передачи с ограничением по мощности.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на II Международной конференции «Спутниковая связь» в 1996 г., г. Москва, на научных сессиях, посвященных Дню радио областного и Российского НТО им. А.С.Попова в 1997 г., 1998 г., 1999 г., 2000 г. (г. Москва, г. Тула), на Всероссийской научно-практической конференции СУЭТО-2000, научно-технических конференциях ТулГУ в 1997 г., 1998 г., 1999 г.

**Внедрение.** Результаты работы внедрены на АО Центрального конструкторского бюро аппаратостроения, о чем имеется соответствующий акт о внедрении.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 14 работ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, насчитывающего 106 наименований, 8 приложений. Общий объем диссертации составляет 155 страниц и включает 31 рисунков, 6 таблиц.

### Краткое содержание работы.

**Введение.** Во введении обосновывается актуальность проводимых исследований, дается общая постановка задачи, решаемой в диссертации, сформулирована цель работы, ее научная новизна, основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ различных радиотехнических систем приема-передачи сигналов, видов радиолиний (РЛ) для передачи сигналов с использованием различного типа ИСЗ, приведены классификация и математические модели аддитивных помех, которые воздействуют на линию связи (ЛС) как при наличии, так и в отсутствии сигнала. Проведенный анализ радиотехнических систем (РТС) передачи сигналов показывает, что для повышения надежности, достоверности и помехоустойчивости используются следующие способы: разнесение сигналов по времени (повторение сигнала через промежутки времени) и частоте (сигнал дублируется по многим частотным каналам); прием на различные антенны, разнесенные в пространстве или расположенные в одном месте, но с узкими диаграммами направленности, позволяющими разделить сигналы по углу прихода; прием на две антенны, расположенные в одном месте, но принимающие электромагнитные волны различной поляризации (поляризационное разнесение); передача сигналов с переменной скоростью в зависимости от помеховой обстановки или с дискретной перестройкой рабочей частоты по программе. Однако не все РТС эффективны в автономном режиме эксплуатации, поэтому при проектировании адаптивной системы приема-передачи сигналов учтены энергетические ограничения. Рассмотрены факторы, воздействующие на сигнал, потери в РЛ. Установлено, что наиболее существенными по своему влиянию являются аддитивные естественные помехи; самый мощный источник шумов — Солнце (до  $10^7$  °К), и при расположении на одной оси солнца, ИСЗ и земной станции связь может быть полностью нарушена. Наибольшее затухание сигнала в радиолинии вносят потери в тропосфере (гидрометеоры) и поляризационные замирания за счет эффекта Фарадея и поворота плоскости поляризации. При этом сигнал, принимаемый линейно-поляризованной антенной, будет испытывать поляризационные замирания, частота которых определяется скоростью вращения плоскости поляризации и вращением нестабилизированного в пространстве ИСЗ.

Проведен анализ и обоснован выбор вида манипуляции несущей при пакетной радиосвязи с точки зрения достоверности передачи информации, рассмотрены критерии оптимальности систем передачи и вопросы помехоустойчивого кодирования.

Во второй главе рассмотрены вопросы математического моделирования полусферической антенной решетки, системы передачи дискретной информации, канала связи с использованием ИСЗ. Предложена модель антенной решетки с полусферическим обзором из  $N$ -излучателей в виде директорных антенн типа "волновой канал".

Основной задачей сканирующей антенной системы является отслеживание траектории движения спутника для обмена информацией через него

Предложено установить несколько антенн на полусферическую поверхность таким образом, что их диаграммы направленности образовывали сферу на уровне 3 дБ. В связи с тем, что низкоорбитальные ИСЗ не стабилизированы в пространстве, используемые антенны должны иметь круговую поляризацию. Показано, что на частоте 145,825 МГц достаточно 4 антенн «волновой канал» с крестообразно расположенными излучающими элементами. Конструктивной особенностью этой антенной системы является наличие двух отдельных радиоканалов. Это сделано для того, чтобы в случае, когда первый радиоканал, подключенный к одной из антенн, принимает полезный сигнал, второй радиоканал поочередно подключается к другим антеннам.

Достоинства данной антенной системы:

- быстрое сканирование по сравнению с механическим;
- отсутствие быстро изнашивающихся механических частей;
- возможность работы при ограниченных энергоресурсах

Для спутниковых каналов связи метрового, дециметрового диапазонов при наличии отражений от земной поверхности характерно распространение сигнала по двум или немногим путям, т. е. ярко выраженная многолучевость отсутствует. В этом случае математическая модель двухлучевого распространения сигнала имеет вид:

$$u(t) = \sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k \{ A(t - kT) [\mu_{c1}(t) \cos \omega_c t + \mu_{s1}(t) \sin \omega_c t] + A(t - kT - \tau) [\mu_{c2}(t) \cos \omega_c (t - \tau) + \mu_{s2}(t) \sin \omega_c (t - \tau)] \} + \xi(t) \quad (1)$$

где  $k = (0, 1)$ ;  $A(t) = 0$  при  $t \leq 0$  и  $t > T$ ;  $T$  - длительность элемента сигнала;  $\omega_c$  - несущая частота сигнала;  $\tau \ll T$  время запаздывания между лучами (считается, что начало отсчета времени совмещено с началом прихода сигнала по первому лучу);  $\xi(t)$  - белый шум (БШ) спектральной плотности  $N_0$ ;  $\mu$  - математические ожидания векторного гауссовского процесса с взаимно независимыми компонентами.

Входные сигналы  $u(t)$  подаются на вход квадратурного расщепителя, с выхода которого сигналы попадают без задержки в тракт

обработки второго луча и с задержкой на  $\tau$  - в тракт обработки первого луча. В этих схемах сначала производится умножение на огибающую сигнала  $A(t-kT)$  с задержкой на  $\tau$  для первого и второго лучей. Результаты перемножения поступают на опорный тракт. В основных трактах сигналы проходят без изменения, а в опорных трактах они фильтруются RC-цепями с постоянными времени  $\tau'_{c1} = \tau_{\mu c1} / (1 + k_{c1})$ ,  $\tau'_{s1} = \tau_{\mu s1} / (1 + k_{s1})$ ,  $\tau'_{c2} = \tau_{\mu c2} / (1 + k_{c2})$ ,  $\tau'_{s2} = \tau_{\mu s2} / (1 + k_{s2})$ .

где  $k$  - коэффициенты усиления.

Нижняя граница вероятности ошибок в двухлучевой модели определяется:

$$p \gg 3 \left[ \frac{1 + \sqrt{2h_0^2 T / \tau}}{4h_0^2} \right]^2 \quad (2)$$

где  $h_0^2 = 2\sigma_\mu^2 E_s / N_0$ ,  $E_s$  - энергия элемента сигнала на выходе передающего устройства.

Перемещение ИСЗ относительно земной станции приводит к изменению несущей частоты сигнала и деформации спектра сигнала - эффект Доплера. Уменьшение влияния доплеровского сдвига осуществляется с помощью схемы автоматической подстройки частоты или путем изменения несущей частоты передатчика по закону, обратному доплеровскому сдвигу, а полная компенсация достигается при использовании устройств с переменной, управляемой задержкой группового высокочастотного сигнала, имитирующего процесс возникновения доплеровского сдвига, но в обратном направлении, поэтому в математической модели эффект Доплера не учитывается.

Для математической модели двухлучевого распространения сигнала определены постоянные времени фильтрации в зависимости от отношения энергии элемента сигнала к спектральной плотности БШ, коэффициента глубины замирания, коэффициента асимметрии квадратурных составляющих, коэффициента формы огибающей и длительности информационного передаваемого пакета сообщения (рис1). По результатам расчетов выбраны оптимальные параметры для решающей схемы приемника.

Ошибка оценивания параметров случайного сигнала в значительной мере определяется методом его обработки. Оптимальные фильтрационные приемники случайных сигналов используют разложение в спектр по ортогональным базисным функциям и последующую их обработку. Выбор вида базисных функций в значительной степени определяет погрешность представления при ограниченном количестве спектральных составляющих и сложность алгоритма оптимальной обработки сигнала  $\xi(t)$ . Известно, что для центрированного случайного



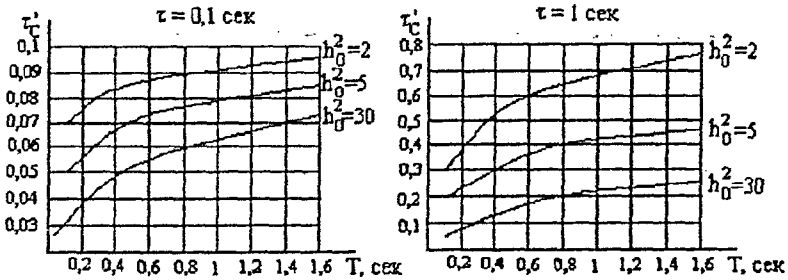


Рис.1. Зависимость постоянной времени фильтрации от длительности информационного пакета, где  $h_0^2$  - отношение сигнал/шум,  $\tau$  - временная задержка.

процесса с непрерывной корреляционной функцией  $K_\xi(t, t')$ , математическое ожидание интегральной среднеквадратической ошибки при представлении процесса  $\xi(t)$  рядом по ортогональным базисным функциям при любом фиксированном  $N$  будет минимальным, если базисные функции  $\varphi_i(t)$  удовлетворяют однородному уравнению Фредгольма второго рода

$$\lambda_i \varphi_i(t) = \frac{1}{T} \int_0^T K_\xi(t, t') \varphi_i(t') dt', \quad (3)$$

где  $\lambda_i$  - собственные значения ядра  $K_\xi(t, t')$ .

Коэффициенты разложения случайного процесса при использовании таких функций оказываются некоррелированными, а исходное разложение называется преобразованием Карунена-Лозва (ПКЛ). Данное преобразование является оптимальным для представления непрерывных сигналов по отношению к критерию среднеквадратической ошибки и обеспечивает наибольшую из всех известных концентрацию энергии спектра изображения. Применение непрерывного и дискретного ПКЛ в значительной степени ограничивается тем обстоятельством, что процедура отыскания решений уравнения (3) в конечных пределах в общем виде неизвестна (за исключением ряда частных случаев).

В то же время, теория резонансной угловой фильтрации позволяет получить решения этих уравнений. Метод решения основан на физическом моделировании исходного уравнения (3) в соответствии с явлением резонансной угловой фильтрации волновых полей многослойными структурами. Корреляционная функция случайного

сигнала (ядро уравнения)  $K_2(t, t')$  в этом случае имеет смысл углового коэффициента передачи резонансной углоизбирательной системы, а собственные функции  $\varphi(t)$  — ограниченного пространственного оптического сигнала. Метод позволил получить в явном виде аналитические выражения для собственных функций и собственных значений уравнения (3) для практически важного случая преобразования Карунена-Лозва радиосигналов со случайной фазовой манипуляцией, широко используемых в системах наземной и космической связи.

Решение дает следующие выражения для расчета собственных значений  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{2K_0}{x_0 [\beta_1^2 + \beta_2^2 - 2\alpha^2]} \quad (4)$$

и собственных функций:

$$A(x) = \frac{a_0}{\lambda} \left[ \frac{(\beta_1^2 + \alpha^2) \cos \beta_1 x_0}{\beta_1 \left[ \frac{K_0}{x_0 \lambda} + (\alpha^2 - \beta_1^2) \right]} \sin \beta_1 x + \frac{(\beta_2^2 + \alpha^2) \cos \beta_2 x_0}{\beta_2 \left[ \frac{K_0}{x_0 \lambda} + (\alpha^2 - \beta_2^2) \right]} \sin \beta_2 x \right] \quad (5)$$

Полученные результаты дают возможность разработать конкретную структуру оптимального приемника фазоманипулированных сигналов, обеспечивающего минимальную ошибку оценивания параметров случайного информационного сигнала.

В третьей главе исследованы алгоритмы и предложены варианты технической реализации адаптивной системы приема-передачи сигналов с управлением поляризацией наземной антенны и передающего устройства с управлением мощностью передатчика в зависимости от условий прохождения сигнала.

Установлено, что при движении ИСЗ угол поворота плоскости поляризации меняется как за счет флуктуаций электронной плотности ионосферы, так и за счет циклического вращения ИСЗ. Это приводит к появлению поляризационных замираний при приеме на антенну с линейной поляризацией (рис.2). Быстрые колебания вызваны вращением плоскости поляризации, медленные — вращением ИСЗ.

Структурная схема радиотехнической системы приема-передачи сигналов с ограниченными энергетическими ресурсами и управлением поляризацией наземной антенны и формированием различной длительности пакета передаваемой информации с учетом дестабилизирующих факторов представлена на рис. 3. Принимаемый сигнал с антенной системы 1 поступает на измеритель отношения сигнал / шум 2. В пороговом устройстве 3 текущее значение отношения сигнал шум  $q_{тек}$  сравнивается с пороговым значением  $q_{пор}$ . При  $q_{тек} > q_{пор}$

определяется начало и конец сеанс связи и временной интервал превышения текущего отношения сигнал / шум над пороговым. Эти значения фиксируются в микропроцессоре (МП). Одновременно с этим измеритель плоскости поляризации 10 определяет угол поляризации входного сигнала при максимальном отношении

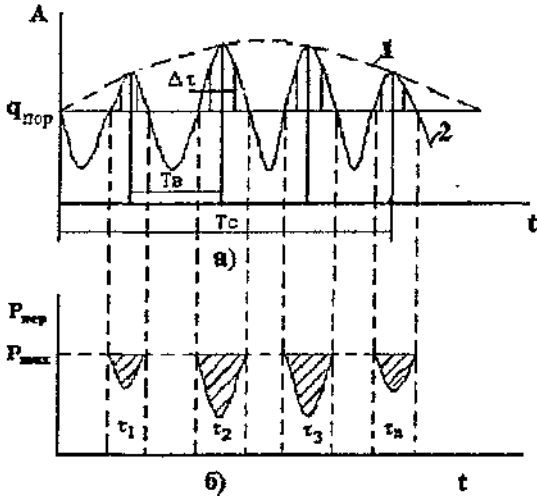
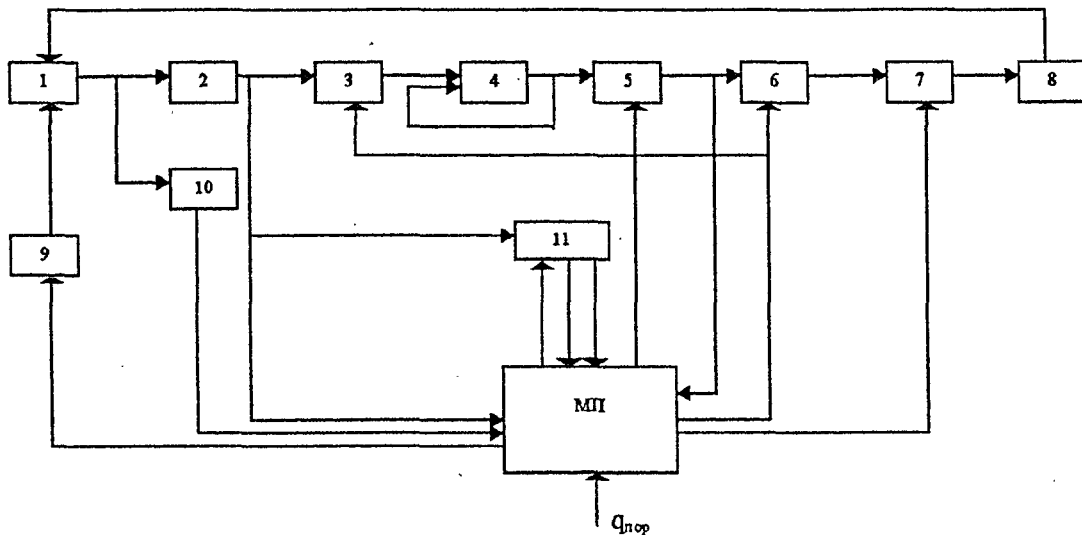


Рис. 2. Поляризационные замирания при приеме на антенну с линейной поляризацией (а) и работа передатчика с управляемой мощностью и формированием длительности информационного пакета (б), где  $T_B$  - период вращения ИСЗ,  $T_c$  - время сеанса связи,  $\Delta t$  - длительность передачи бита информации,  $\tau_1, \dots, \tau_n$  - длительности пакетов.

сигнал / шум, измеренном в 11. По результатам измерения МП вырабатывает управляющий сигнал, который подается на устройство управления поляризацией 9, где происходит согласование угла поляризации антенной системы с определенной ранее углом поляризации входного сигнала. В следующем периоде вращения ИСЗ в интервале времени превышения отношения сигнал / шум над пороговым, определенном в предыдущем периоде, осуществляет прием-передача информации с запомненным в предыдущем периоде угле поляризации. Суммирующий накопитель 4, вычислитель среднего значения



1 - антенная система

2 - измеритель отношения сигнал/шум,  $q$

3 - поворачивающее устройство

4 - суммирующий накопитель

5 - вычислитель среднего значения отношения сигнал/шум,  $q_{ср}$

7 - устройство управления мощностью передатчика

8 - передатчик

9 - устройство управления поляризацией

10 - измеритель плоскости поляризации

11 - определитель максимального значения отношения сигнал/шум,  $q_{max}$

6 - вычислитель отношения  $q_{ср}/q_{пор}$

Рис. 3. Структурная схема системы обмена информацией с ограниченными энергетическими ресурсами.

сигнал/шум 5 и вычислитель отношения  $q_{\text{сред}} / q_{\text{пор}}$  6 служат для определения коэффициентов управления времени и мощности передатчика 8 через устройство управления 7.

Нормированный коэффициент передачи энергии между двумя антеннами при линейной поляризации при рассогласовании векторов поляризации приемной передающей антенн определяется по выражению

$$\eta_n = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\psi). \quad (6)$$

где  $\psi$  - угол рассогласования векторов поляризации антенн.

Предлагаемые способ и система позволяют получить выигрыш в отношении сигнал / шум 3 дБ и более.

Траектория движения ИСЗ (рис.2, кривая 1) аппроксимируется выражением:

$$A_1 - [C_1 (\Delta t_i / T_c) - B_1]^2 = y_1, \quad (7)$$

и поляризационные замирания из за вращения ИСЗ (рис.2, кривая 2) выражением:

$$A_2 + B_2 \cos^2(\Delta t_i / T_B) = y_2 \quad (8)$$

где  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1$  - константы, соответствующие различным орбитам ИСЗ.

Тогда общая энергия передачи сообщения:

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N W_i = W_{\text{шмл}} \cdot N \quad \text{при } P - \text{const}, \tau_{\text{шмл}} - \text{const} \quad (9)$$

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N W_i = \sum_{i=1}^N W_{\text{шмл}} \frac{q_{\text{ср}}}{q_{\text{пор}}} = \sum_{i=1}^N \frac{W_{\text{шмл}}}{K_y} \quad \text{с учетом} \quad (10)$$

коэффициента управления временем передачи

где  $K_y = y_1 y_2$  или  $K_y = \frac{q_{\text{ср}}}{q_{\text{пор}}}$ , тогда

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{P \Delta \tau_{\text{шмл}}}{\left[ A_1 - \left( C_1 \frac{\Delta \tau_{\text{шмл}} i}{T_c} - B_1 \right)^2 \right] \left[ A_2 + B_2 \cos^2 \left( \frac{\Delta \tau_{\text{шмл}} i}{T_B} \right) \right]} \quad (11)$$

$A_2 = 0$  и  $B_2 = 0$  при согласовании векторов поляризации приемной и передающей антенн.

Алгоритм работы передающего устройства с управлением мощностью передатчика в зависимости от условий прохождения сигнала с учетом действующих ограничений описывается следующим образом:

1. По анализу состояния канала связи определяется минимальная допустимая скорость передачи  $V_{\text{пер.мин}}$ .

2. Прогнозируется максимальное отношение сигнал / шум и коэффициент управления времени передачи  $K_y$ .

3. По объему передаваемой информации  $N_{\Sigma}$  определяется время, необходимая для полной передачи при  $V_{\text{пер.мин}}$ .

4. Если  $N_{\text{пер}} \gg N_{\Sigma}$  - ожидание момента лучшего прохождения.

Если  $N_{\text{пер}} < N_{\Sigma}$  - определение приоритетности сообщений и передача наиболее значимых.

Если  $N_{\text{пер}} > N_{\Sigma}$  - передача полностью.

При этом мощность передатчика с учетом  $K_y$  определяется из выражения

$$P_{\text{пер}} = \frac{V_{\text{пер}} \cdot q \cdot E_{\text{ш}}}{K_y}, \quad (12)$$

где  $q$  - отношение сигнал/шум.

При использовании данного алгоритма при сеансе связи  $T_c = 15$  мин. получена экономия энергии в 1,5-2 раза в зависимости от траектории движения ИСЗ.

В зависимости от условий прохождения канала связи весь сеанс связи может разбиваться на ряд отдельных сеансов (рис.2, а) в пределах каждого из которых отношения сигнал / шум превышает пороговое значение, формируется длительность информационных пакетов, а мощность передатчика изменяется обратно пропорционально текущему значению отношения сигнал / шум, что позволяет снизить мощность передатчика и за счет этого обеспечить экономию энергии (рис.2, б, заштрихованные области).

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований. Для получения количественных характеристик линий связи с использованием низкоорбитальных ИСЗ разработаны и изготовлены 2 экспериментальные установки. Эксперименты проводились в диапазоне частот 137-146 МГц с различными орбитальными группами ИСЗ (табл.1) :

Таблица 1

Параметр ИСЗ	Рабочая частота, МГц	Высота орбиты, км	Период обращения, мин	Длитель ность периода связи, мин	Период поляриз. замирания, сек
Мир	143,625	400	87	~14	10-20
NOOA	137,62	800	142	~20	5-20
UO-11	145,825	500	98	~15	5-20

Целью первого эксперимента является исследование характера замираний при приеме на антенну с линейной поляризацией при различных высотах и координатах пролета ИСЗ. Исследования проводились с использованием антенны типа "волновой канал", содержащей 5 пассивных вибраторов.

Для экспериментальной проверки решения этой задачи, исследования линий связи через низкоорбитальные спутники разработана универсальная установка, состоящая из базовой управляющей ЭВМ, блока приводов перемещения антенны по азимуту и элевации, сменных антенн для проведения экспериментов по исследованию и оптимизации вида поляризации в зависимости от изменяющихся параметров канала связи.

Установка имеет следующие характеристики:

- перемещение по азимуту  $\pm 180^\circ$ ;
- перемещение по элевации от 0 до  $90^\circ$ ;
- скорость перемещения до 20 рад/мин;
- максимальная масса установленной антенны 100 кг;
- управляющая ЭВМ с процессором 486;
- диапазон частот (с учетом сменных антенн) от 100 МГц до 40 ГГц;
- питание от сети 380 В 50 Гц или 27В постоянного напряжения;
- потребляемая мощность 2000 Вт;
- источник бесперебойного питания обеспечивает работу установки в течении 30 минут;
- общий вес привода 190 кг;
- размеры привода 1000×800×1500 мм;
- общий вес блока управления 80 кг;
- габариты блока управления 700×500×750 мм.

Исследования проводились в диапазоне частот от 137 до 146 МГц.

Разработана программа, по которой производится расчет орбит и вырабатываются управляющие сигналы для ориентации антенн. В программе предусмотрены режимы поиска и слежения за спутником, что позволяет уточнять параметры орбиты. Кроме того, ЭВМ используется для управления приемо-передатчиком.

В результате эксперимента получены следующие результаты затухания сигналов в канале связи:

- глубина поляризационных замираний 7... 10 дБ;
- изменения амплитуды принимаемого сигнала до 10 дБ.

Установлено, что период замираний связан с изменением поляризации принимаемого сигнала и составляет от нескольких секунд до десятков секунд в зависимости от типа ИСЗ и параметров орбиты.

С помощью второй экспериментальной установки были оценены поляризационные замирания для вертикальной и горизонтальной поляризадий, регистрируемых одновременно (рис. 4). Были использованы ненаправленные полуволновые вибраторы, расположенные друг относительно друга под углом  $90^\circ$  и переключаемые с помощью р-и-п диодов.

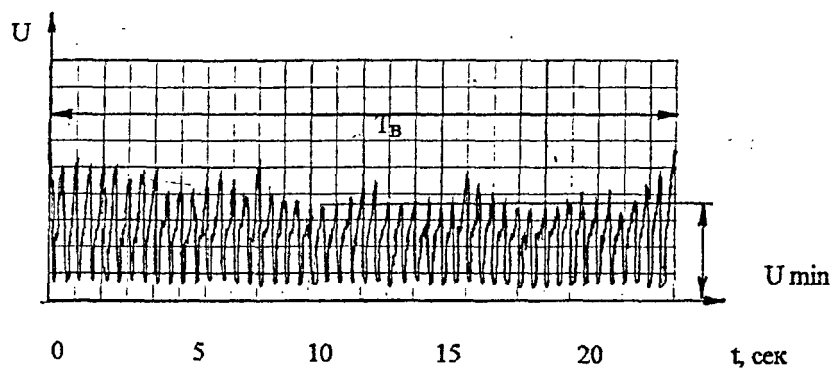
Установка имеет следующие характеристики:

- ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости -  $360^\circ$ ;
- ширина диаграммы направленности в вертикальной плоскости -  $160^\circ$ ;
- диапазон частот - 135-147 МГц;
- тип коммутатора - р-и-п диоды;
- затухание в коммутационном устройстве - 0,5 дБ;
- чувствительность регистратора - 0,15 мкВ;
- время наблюдения - 500-800 сек;
- вид регистратора - прибор Н 3030/1;
- поляризационная развязка 20 дБ.

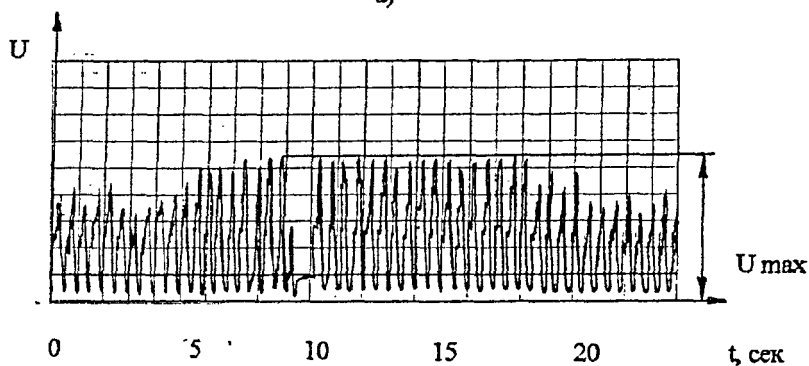
Получена зависимость математического ожидания и дисперсии прохождения канала связи от времени сеанса связи (рис.5). Сравнение статистических характеристик КС показало, что принятая модель качественно и количественно верно описывает характеристики КС – различие результатов находятся в пределах дисперсии коэффициента передачи КС.

Проведены эксперименты по передаче и приему информационного пакета при помощи орбитального комплекса "Мир" (робот-автоответчик, протокол информационного обмена АХ-25). В результате обработки 50 экспериментов по приему-передаче сигналов с использованием алгоритма работы передатчика с управлением мощностью и поляризацией наземной антенны, формированием различной длительности информационного пакета вероятность ошибки в 2 раза меньше, чем при обмене информацией без учета этого.





а)



б)

Рис. 4. Зависимости амплитуды принимаемого сигнала для вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризации, регистрируемых одновременно. Тип ИСЗ – NOOA, зимний период, дневное время.

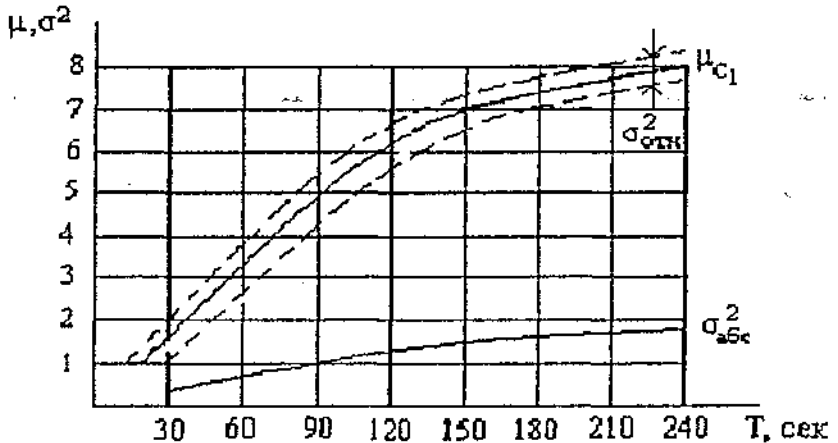


Рис. 5. Зависимость математического ожидания и дисперсии прохождения канала связи от времени сеанса связи.

Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметр	Результат
Протокол обмена	АХ 25
Длина пакета, кбит	800
Тип передаваемой информации	Случайная последовательность нулей и единиц
Время передачи, с	Не более 80, зависит от высоты орбиты
Количество передач	50
Мощность передатчика, Вт	10
Вероятность ошибки: без учета поляризационных замираний с учетом поляризационных замираний	$10^{-5}$ $4,5 \cdot 10^{-6}$
Энергия, потраченная на передачу сообщения, Дж	800
Удельная энергия передачи, Дж/бит	$10^{-3}$

#### Основные результаты работы:

1. Разработана математическая модель канала связи с использованием низкоорбитальных ИСЗ, позволяющая определить требования к основным функциональным блокам системы и оптимизировать их параметры.

2. Разработана структура оптимального приемника фазоманипулированных сигналов на основе разложения сигналов в спектр с применением преобразования Карунена-Лозва, что позволило минимизировать ошибку оценивания параметров информационного сигнала.
3. Разработаны алгоритм и методика определения длительности информационного пакета, позволяющие обеспечить минимальные энергетические затраты на передачу информационного пакета.
4. Разработаны структурная схема и алгоритмы работы системы обмена информацией с ограниченными энергетическими ресурсами, включающие способ адаптивного согласования угла поляризации приемной антенны с углом поляризации принимаемого сигнала и способ передачи информационного пакета с управлением мощностью передатчика, позволяющие существенно повысить отношение сигнал/шум на входе приемника и за счет этого достоверность передаваемой информации.
5. Проведены экспериментальные исследования основных блоков системы обмена информацией, подтвердившие правильность предложенных алгоритмов обработки.

**Содержание диссертации отражено в следующих работах:**

1. Луцков Ю.И., Тархов Н.С., Крючков С.В. Экспериментальная установка системы спутниковой связи через низкоорбитальные ИСЗ // 52 Научная сессия, посвященная Дню радио : Тез.докл. – Москва, ИПРЖ "Радиотехника"-1997. – с. 267-268.
2. Тархов Н.С., Беляков Б.В., Боровых О.А. Устройство сопряжения системы управления компьютерного узла цифровой связи с использованием низкоорбитальных ИСЗ // 14 Научная сессия, посвященная Дню радио : Тез.докл. –Тула, ОНТО РЭС им. А.С.Попова- 1997. – с. 19-20.
3. Луцков Ю.И., Тархов Н.С. Адаптивная антенная система канала связи через низкоорбитальные ИСЗ // 53 Научная сессия, посвященная Дню радио : Тез.докл. –Москва, ИПРЖ "Радиотехника"-1998. – с. 116-117.
4. Тархов Н.С. Моделирование канала связи через низкоорбитальные ИСЗ // 53 Научная сессия, посвященная Дню радио : Тез.докл. - Москва, ИПРЖ "Радиотехника"-1998. – с. 115.
5. Тархов Н.С. Экспериментальная установка для исследования каналов связи через низкоорбитальные ИСЗ // Всероссийская молодежная научная конференция "24 Гагаринские чтения" : Тез.докл. – Москва, 1998. – с. 17.

6. Луцков Ю.И., Тархов Н.С., Боровых О.А. Устройство управления адаптивной антенной системы // 15 Научная сессия, посвященная Дню радио : Тез.докл. –Тула, ОНТО РЭС им. А.С.Попова - 1998. – с. 70.
7. Тархов Н.С., Крючков С.В. Комбинированное уплотнение в автоматических радиотелефонных станциях // 15 Научная сессия, посвященная Дню радио : Тез.докл. –Тула, ОНТО РЭС им. А.С.Попова - 1998. – с. 30.
8. Тархов Н.С. Повышение достоверности передачи информации при пакетной радиосвязи с использованием ИСЗ // 54 Научная сессия, посвященная Дню радио : Тез.докл. –Москва, ИПРЖ "Радиотехника" 1999. – с. 73.
9. Тархов Н.С. Математическая модель канала связи с использованием ИСЗ // 16 Научная сессия, посвященная Дню радио : Тез.докл. –Тула, ОНТО РЭС им. А.С.Попова - 1999. – с. 10.
10. Тархов Н.С. Оптимизация характеристик системы связи через низкоорбитальные ИСЗ в условиях энергетических ограничений// 16 Научная сессия, посвященная Дню радио : Тез.докл. –Тула, ОНТО РЭС им. А.С.Попова - 1999. – с. 66.
11. Тархов Н.С. Повышение эффективности связи при использовании нестабилизированных ИСЗ с линейной поляризацией антенн // Труды 55 Научной сессии, посвященной Дню радио "Радиотехника, электроника и связь на рубеже тысячелетия", –Москва, 17-19 мая 2000 г., ИПРЖ "Радиотехника" 2000. – с. 149-150.
12. Тархов Н.С. Результаты экспериментальных исследований линий связи с использованием низкоорбитальных ИСЗ//Труды 17 Научной сессии, посвященной Дню радио–Тула, ОНТО РЭС им. А.С.Попова - 2000. – с. 42-43.
13. Покровский Ю.А., Макарецкий Е.А., Тархов Н.С. Расчет преобразования Карунена-Лозва случайных фазоманипулированных радиосигналов на основе метода резонансной угловой фильтрации// Труды 17 Научной сессии, посвященной Дню радио–Тула, ОНТО РЭС им. А.С.Попова - 2000. – с. 13-14.
14. Тархов Н.С. Автономная адаптивная система пакетной передачи информации через низкоорбитальные ИСЗ //Материалы Всероссийской научно-практической конференции "Системы управления электротехническими объектами" посвященной 70-летию Тульского государственного университета,–Тула, 25-26 мая 2000 г. , ТулГУ – с. 33-35.