

на правах рукописи

ВЫЛЕГЖАНИН ИВАН СЕРГЕЕВИЧ



АДАПТИВНАЯ ПО ПОЛЯРИЗАЦИИ  
СЕТЬ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОСЯЗИ

Специальность 01.04.03 - радиофизика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2007

Работа выполнена на физическом факультете  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
доцент Ю. В. Березин

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Чудинов С.М.  
кандидат физико-математических наук, доцент  
Вологдин А.Г.

Ведущая организация:

Институт земного магнетизма, ионосферы и  
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова

Защита диссертации состоится «\_12\_» октября 2007 г., в 12-00, на заседании  
диссертационного совета Д 002.231.02 при ИРЭ РАН (125009, Москва,  
ул. Моховая, д.11, к.7.)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ РАН

Автореферат разослан 20 августа 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физ-мат. наук

 А.А.Потапов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Верхние слои атмосферы Земли, расположенные на высоте более 50 км, ионизируются излучением Солнца, вследствие чего там появляются свободные электроны и положительные ионы. Таким образом, ионосфера занимает область земной атмосферы на высоте от 50-60 до нескольких тысяч километров от поверхности Земли.

Электромагнитные волны декаметрового диапазона («короткие» радиоволны), излученные из какого-либо пункта А, расположенного на поверхности Земли, отражаются от ионосферы как при вертикальном, так и при наклонном падении и возвращаются на Землю в некотором пункте В. При наклонном зондировании дальность распространения даже при однократном отражении волны от ионосферы, лежит в пределах от десятков до 3000 км. Таким образом создается ионосферный канал связи, который широко используется для передачи информации.

Соответствующий анализ задачи о распространении электромагнитных волн проведен в рамках классической магнитоионной теории [13]. В результате установлено, что в ионосфере по одному направлению могут распространяться две волны, характеризующиеся своими фазовыми скоростями, поглощением и поляризацией. Эти волны принято называть обыкновенной и необыкновенной магнитоионными компонентами (МИК). При этом, как при наличии, так и отсутствии поглощения обе МИК поляризованы эллиптически, причем их коэффициенты поляризации не равны.

Таким образом, излученная в точке А монохроматическая волна, после распространения по ионосферному каналу связи (ИКС) превращается в две квазимонохроматические волны и в точке приема В возникает суммарное сильно «замирающее» электромагнитное поле со сложной пространственно-временной структурой. Эти замирания являются одной из основных причин относительно низкого качества передачи информации по ИКС. Существует понятие потенциальной помехоустойчивости передачи информации по каналу связи (минимальное значение вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$ , которое может быть достигнуто в данных физических условиях). Аналогичное понятие вводят и для максимально возможной скорости передачи сообщений  $c$ . Предельные значения параметров  $P_{\text{ош}}$  и  $c$  являются ориентирами в оценке эффективности любых методов передачи информации.

Ионосферный канал связи не требует никаких искусственных ретрансляторов – он самый дешевый из всех существующих. Также к достоинствам ионосферного канала относятся его дальность (даже при одном

скачке она составляет  $\sim 3000$  км), его относительная устойчивость и неуничтожимость даже при ядерных взрывах. Однако современный способ возбуждения в нем радиоволн обладает существенным недостатком – он не обеспечивает высокое качество и скорость передачи информации вследствие интерференции двух магнитоионных компонент, хотя физические свойства этого канала позволяют, в принципе, достичь гораздо лучших показателей.

На физическом факультете МГУ разработан особый способ возбуждения радиоволн в анизотропной ионосфере Земли – метод селективного возбуждения электромагнитных волн (СВЭМВ) [14]. Различие коэффициентов поляризации двух магнитоионных компонент одной частоты может быть использовано для их селекции. Однако такая поляризационная селекция осложняется вследствие отсутствия достоверной информации о поляризации парциальных составляющих сложного векторного поля.

При использовании метода селективного возбуждения электромагнитных волн в ионосфере возбуждается только одна магнитоионная компонента. Метод состоит из двух последовательных этапов:

1 этап – поляризационная диагностика ионосферы. На этом этапе с помощью соответствующего комплекса аппаратуры осуществляется облучение ионосферы чередующейся последовательностью импульсов с определенными поляризациями. На приемном конце осуществляется обработка принятого поля, после чего по полученным данным и определенному алгоритму определяются два коэффициента поляризации, позволяющие возбуждать в ионосфере только одну МИК;

2 этап – возбуждение в ионосферном канале связи одной электромагнитной волны. Излучение волны с коэффициентом поляризации, согласованным с обыкновенной или необыкновенной волной приводит к селективному возбуждению в ионосфере только одной МИК. Метод селективного возбуждения электромагнитных волн позволяет значительно (более чем на порядок) уменьшить интерференционные замирания на приемном конце, являющиеся основной причиной низкой пропускной способности и помехоустойчивости канала связи (энергия передатчика “закачивается” только в одну магнитоионную компоненту).

Метод селективного возбуждения электромагнитных волн в ионосфере открывает новые перспективы в разработке новых и модернизации существующих разновидностей загоризонтных радиолокаторов (ЗГРЛ), использующих отраженные от ионосферы электромагнитные волны декаметрового диапазона. В лаборатории распространения радиоволн кафедры радиофизики физического факультета Московского

Государственного Университета разработана структурная схема загоризонтного ионосферного радиолокатора, функционирующего по бистатической схеме и использующего в своей работе метод селективного возбуждения электромагнитных волн в ионосфере. Исследованы основные характеристики его работы – точность определения координат и вектора скорости лоцируемого воздушного объекта, разрешающая способность радиолокатора. Показано, что эти характеристики ЗГРЛ, использующего новые принципы возбуждения электромагнитных волн в ионосфере Земли, существенно превышают аналогичные показатели существующих ионосферных загоризонтных радиолокаторов.

Применение способа селективного возбуждения при вертикальном зондировании ионосферы позволяет создавать локальные ячейки коротковолновой радиосвязи, составленные из множества однолучевых радиолиний, обладающих высокой пропускной способностью, протяженностью до 200-500 км и обеспечивающие устойчивую радиосвязь между базовой станцией, расположенной в точке оптимального приема и любым объектом внутри ячеек радиосвязи (в том числе и с мобильными объектами). Подобные ячейки получили название зон обслуживания сети (ЗОС). Площадь одной зоны оценивается величиной от 60 до 250 тыс. кв. километров в зависимости от типа возбуждаемой волны и рабочей частоты. Локальные зоны могут быть использованы для создания региональных и глобальных сетей КВ-радиосвязи. Объединяя ЗОС, можно создавать сети КВ-радиосвязи с любой необходимой площадью обслуживания. Способ селективного возбуждения электромагнитных волн в ионосфере позволяет использовать обыкновенную и необыкновенную компоненту отраженной от ионосферы волны либо одновременно, либо последовательно – в зависимости от потребностей, что позволяет расширять возможности рассматриваемой системы КВ-радиосвязи. Для разработки этапов настройки и функционирования предлагаемой системы КВ-радиосвязи большое значение имеют результаты экспериментальных исследований частотной зависимости коэффициента оптимальной поляризации радиоволн на вертикальной радиотрассе.

Актуальность работы: обуславливается увеличением нагрузки на существующие сети связи, следствием чего являются:

- 1) Повышение требований к качеству передачи информации (увеличению пропускной способности и уменьшению вероятности ошибки).
- 2) Ужесточение требований к электромагнитной совместимости (ЭМС) и экологичности радиоэлектронных средств (РЭС), что напрямую связано с уменьшением излучаемой мощности.

Использование метода селективного возбуждения позволяет, во-первых, сократить интерференционные замирания, вследствие чего уменьшается вероятность ошибки и увеличивается пропускная способность при передаче информации. Во-вторых, селективное возбуждение позволяет

концентрировать всю излучаемую мощность только в одной МИК, что при одинаковой минимальной мощности полезного сигнала на входе приемника может обеспечить снижение излучаемой мощности как минимум в два раза.

3) Построение сети радиосвязи в КВ-диапазоне имеет ряд дополнительных преимуществ – радиус зоны обслуживания достигает нескольких сотен километров, а вследствие распространения радиоволн путем отражения от ионосферы достигается минимизация "затенения" абонентов неровностями рельефа, что часто наблюдается в тропосферных сетях.

Цель работы: обосновать возможность построения, разработать структурную схему и этапы настройки сети коротковолновой радиосвязи с высокой скоростью и помехоустойчивостью передачи информации при использовании селективного способа возбуждения электромагнитных волн в ионосфере.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие частные задачи:

1. Разработать методику расчета параметров КВ-радиоволн, распространяющихся по ионосферной линии связи, использующей селективное возбуждение электромагнитных волн в ионосфере с учетом поглощения, магнитного поля Земли и ионосферных неоднородностей;

2. Определить линейные размеры и площади зон обслуживания сети КВ-радиосвязи на поверхности Земли при селективном возбуждении электромагнитных волн в ионосфере при учете слоистой структуры ионосферы и наличии поглощения;

3. Оценить пропускную способность и вероятность ошибки при передаче информации в двоичной форме по ионосферной линии связи внутри одной зоны обслуживания сети коротковолновой радиосвязи с учетом присутствующих в ионосферном канале связи неоднородностей;

4. Провести экспериментальное исследование частотной зависимости коэффициента поляризации радиоволн, отраженных от ионосферы, при селективном возбуждении электромагнитных волн на вертикальной радиотрассе;

5. Разработать структуру и этапы настройки сети КВ-радиосвязи с селективным возбуждением электромагнитных волн в ионосфере.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Модифицирована методика расчета волновых и лучевых траекторий радиоволн в ионосфере с учетом поглощения, магнитного поля Земли и ионосферных неоднородностей.

2. Определены конфигурации и размеры зон обслуживания сети, возникающие в результате селективного возбуждения электромагнитных волн в ионосфере, при учете поглощения и слоистой структуры ионосферы, а также исследована частотная зависимость конфигурации и площадей зон обслуживания сети.

3. Проведена оценка влияния неоднородностей на пропускную способность и вероятность ошибки при передаче информации в двоичной форме в ионосферном канале связи при селективном возбуждении электромагнитных волн с учетом присутствующих в ионосфере крупномасштабных неоднородностей.

4. Определена частотная зависимость коэффициента поляризации радиоволн, отраженных от ионосферы, при селективном возбуждении электромагнитных волн на вертикальной радиотрассе.

Практическая ценность работы определяется тем, что:

1. Предлагаемая методика расчета волновых и лучевых траекторий позволяет определять параметры КВ-радиоволн, распространяющихся по ионосферной линии связи с учетом поглощения, магнитного поля Земли и ионосферных неоднородностей.

2. В результате учета поглощения и слоистой структуры ионосферы зоны обслуживания сети изменяют свою конфигурацию и размеры по сравнению с оценками, не учитывающими указанные условия. Зоны обслуживания могут служить основой создания сетей КВ-радиосвязи с любой заданной зоной покрытия.

3. Показано, что в случае селективного возбуждения электромагнитных волн в ионосфере наличие ионосферных неоднородностей не приводит к существенному изменению пропускной способности и вероятности ошибки при передаче информации в двоичной форме по ионосферной линии связи.

4. В результате экспериментального исследования частотной зависимости коэффициента поляризации радиоволн, отраженных от ионосферы, при селективном возбуждении электромагнитных волн на вертикальной радиотрассе показано, что формулой для определения коэффициента предельной поляризации можно пользоваться до значения рабочей частоты  $\sim 0,7-0,8$  от критической.

5. Предложена схема построения адаптивной по поляризации сети коротковолновой радиосвязи, представлены этапы ее настройки, произведена оценка максимального количества каналов для разрабатываемой сети.

На защиту выносятся:

1) Модифицированная методика расчета параметров декаметровых радиоволн, распространяющихся по ионосферной линии связи с учетом поглощения, магнитного поля Земли и ионосферных неоднородностей

2) Результаты исследования зон обслуживания сети коротковолновой радиосвязи при учете поглощения и слоистой структуры ионосферы; а также результаты исследования пропускной способности и вероятности ошибки при передаче информации в двоичной форме по ионосферным линиям радиосвязи при наличии крупномасштабных ионосферных неоднородностей.

3) Принцип построения сети коротковолновой радиосвязи, использующей метод селективного возбуждения электромагнитных волн в ионосфере.

### Апробация работы и публикации

Результаты работы докладывались на различных конференциях и семинарах: VIII Всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн – 2002», III Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии – 2003», IV Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии – 2005», X Всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн – 2005».

Основные результаты диссертации опубликованы в двенадцати работах [1-12].

### Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения с общим объемом в 141 страницу, включая список литературы из 114 наименований и 61 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика работы, раскрыта ее актуальность, сформулированы постановка задачи, цель исследования, решаемые частные задачи, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** диссертации на основе литературных данных кратко освещены основные методы построения траекторий декаметровых волн в ионосфере. На основе модели ионосферы IRI предложена модель возмущенной ионосферы, содержащей крупно- и среднemasштабные неоднородности.

Для предложенной модели ионосферы разработана модифицированная методика расчета параметров проходящих через ионосферу коротковолновых радиоволн. За основу расчета был взят метод, разработанный для радиолиний "спутник-Земля" [15] и предназначенный для траекторий, не имеющих точек отражения. Поскольку в этом методе для нахождения угла преломления используется итерационный процесс, расходящийся вблизи точки отражения (при углах падения более 70-80 град), было предложено альтернативное решение для нахождения угла преломления, позволившее использовать метод для траекторий, которые отражаются от ионосферы. В ходе работы был найден критерий применимости данного итерационного процесса.

Предложенная модель позволяет рассчитывать фазовое и групповое запаздывание между передатчиком и приемником; ослабление, обусловленное угловой расходимостью и поглощением радиоволн; поляризацию выходящих из ионосферы магнитоионных компонент, а также доплеровское смещение частоты.

Разработанная математическая модель отражает основные особенности распространения КВ-радиоволн, распространяющихся по ИКС, содержащем крупномасштабные (~ 300 x 50 x 50 км) и среднemasштабные (~ 30 x 10 x 10 км) неоднородности электронной концентрации.

На основе модифицированной методики расчета параметров коротковолновых радиоволн в предложенной модели ионосферы проводилось определение характеристик сети КВ-радиосвязи с селективным возбуждением электромагнитных волн в ионосфере.

**Вторая глава** диссертации посвящена исследованию размеров и площадей зон обслуживания сети коротковолновой радиосвязи, использующей селективное возбуждение электромагнитных волн в ионосфере, образующихся вокруг прямо-передающего пункта, в

зависимости от различных параметров (типа возбуждаемой магнитоионной компоненты, рабочего слоя ионосферы, рабочей частоты, состояния ионосферы).

Во второй главе диссертационной работы приведена методика расчета зон обслуживания и результаты численного моделирования. Показано, что при учете слоистой структуры ионосферы и поглощения, зоны обслуживания сети изменяют свою конфигурацию и размеры по сравнению с оценками, не учитывающими указанные параметры.

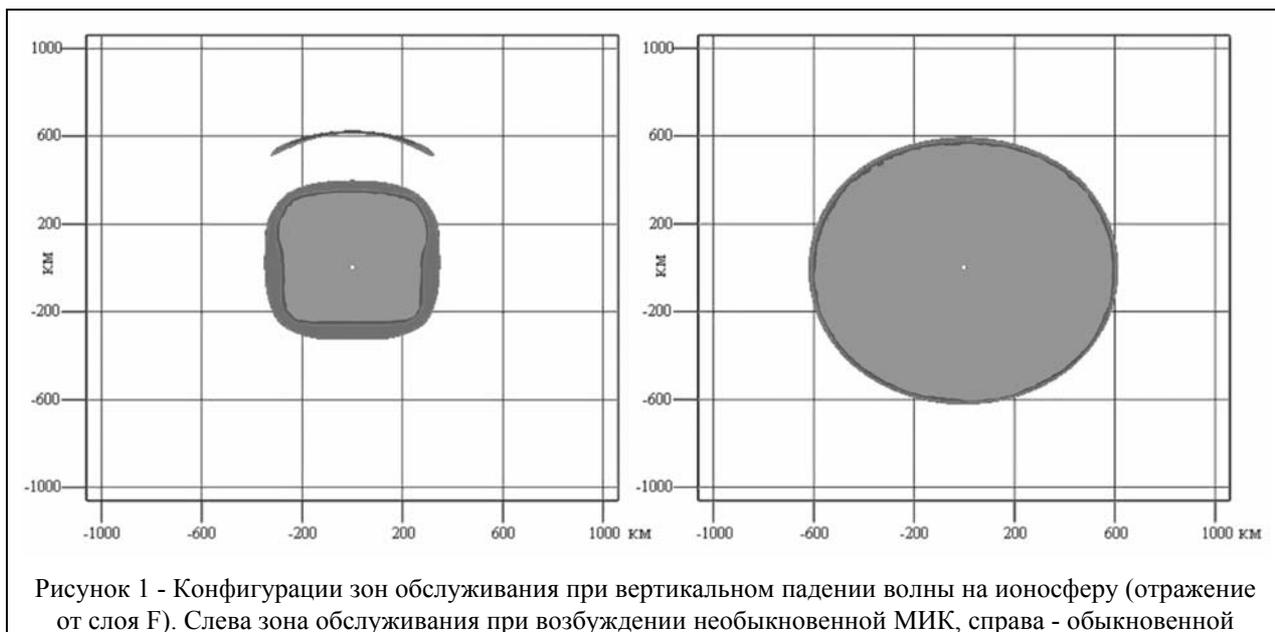
Определение зоны обслуживания как линии на поверхности Земли для некоторого фиксированного отношения мощностей МИК  $Q$  проводится при следующих условиях:

- передатчик и приемник, в которых проводится поляризационная диагностика, располагаются в одной точке (рассматривается вертикальное распространение КВ-радиоволн);

- расчет параметров КВ-радиоволн ведется по модифицированной методике для модели ионосферы, рассмотренной в Главе 1;

- антенная система представляет собой два ортогонально расположенных излучающих диполя, находящихся параллельно земной поверхности.

В Главе 2 показано, что площади и линейные размеры зон обслуживания сети при возбуждении необыкновенной характеристической волны и невозбуждении обыкновенной в значительной степени зависят от геомагнитных координат передающего пункта, что связано с изменением угла  $\gamma$  между волновым вектором  $\vec{k}$  и  $\vec{H}_{земли}$ . При приближении передающего пункта к магнитному полюсу наблюдается значительное увеличение линейных размеров и площади зон обслуживания сети. Площади и линейные размеры зон обслуживания сети при возбуждении обыкновенной характеристической волны и невозбуждении необыкновенной меньше зависят от геомагнитной широты, чем в предыдущем случае. Это же относится и к зависимости площади и линейных размеров зон обслуживания сети от отношения рабочей частоты радиолинии к критической. Типичные зоны обслуживания для рабочей частоты 7 МГц приведены на рисунке 1.



Возможна аппроксимация зон обслуживания сети зонами с простой геометрической структурой с использованием до 80% площади первоначальной зоны. Это позволяет создать на поверхности Земли сеть коротковолновой радиосвязи с приблизительно одинаковой конфигурацией отдельных зон.

Типичные площади зон обслуживания сети вокруг передающего пункта для  $Q = 1/10$  составляют 950 тыс. км<sup>2</sup> при возбуждении обыкновенной волны и 550 тыс. км<sup>2</sup> при возбуждении необыкновенной компоненты при работе со слоем F.

Основные результаты, полученные во второй главе, можно сформулировать следующим образом:

1. Применение селективного возбуждения электромагнитных волн в ионосфере позволяет создать на поверхности Земли зоны обслуживания сети с площадью порядка нескольких сотен тысяч квадратных километров.
2. Учет слоистой структуры ионосферы и поглощения позволил существенно уточнить конфигурацию зон обслуживания сети.
3. Площадь и линейные размеры зон обслуживания сети в значительной степени зависят от геомагнитной широты передатчика и типа возбуждаемой в ионосфере магнитоионной компоненты и в меньшей степени от отношения рабочей частоты к критической для конкретного слоя.

**В третьей главе** диссертации проведено исследование пропускной способности и вероятности ошибки при передаче информации в двоичной форме в пределах сети коротковолновой радиосвязи с селективным возбуждением электромагнитных волн в ионосфере.

Уменьшение вероятности ошибки, повышение пропускной способности, и скрытности передачи информации по коротковолновым линиям радиосвязи может быть достигнуто при использовании:

- параллельных каналов передачи информации;
- широкополосных сигналов;
- пространственно-временного и частотного разнеса радиосигналов;
- оптимальных видов модуляции радиоволн при передаче информации.

Все перечисленные направления не обеспечивают радикального решения задачи создания коротковолновых линий радиосвязи, обладающих возможностями однолучевого ионосферного канала, поэтому поиск новых решений, безусловно, целесообразен.

Результаты исследования влияния перемещающихся ионосферных неоднородностей на отношение сигнал/помеха и, как следствие, на пропускную способность и вероятность ошибки в ионосферном канале связи при использовании метода селективного возбуждения электромагнитных волн представлены в Главе 3.

Параметры радиосигналов для передачи информации в двоичной форме определялись из следующих условий:

1) полоса радиосигнала выбиралась с учетом выполнения соотношения, определяющего степень его расплывания при распространении в ионосфере:

$$\frac{\omega_{нес}}{\omega_{пл}} \sqrt{\frac{2n}{\lambda \cdot S}} \frac{c}{\Delta f} \gg 1 \text{ - слабое расплывание [16],}$$

где  $\omega_{нес}$  и  $\lambda$  - несущая частота и соответствующая ей длина волны,  $\omega_{пл}$  - плазменная частота,  $n$  - показатель преломления,  $S$  - путь, пройденный радиосигналом в ионосфере,  $\Delta f$  -полоса радиосигнала,  $c$  - скорость света.

2) мощность радиосигнала с поляризацией о- или е-МИК определялась как мощность соответствующей радиоволны, рассчитанная по методике, приведенной в Главе 1.

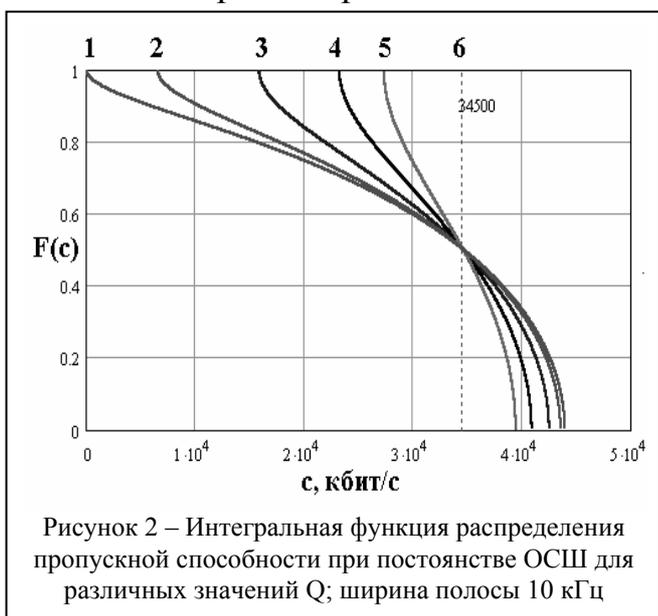
При передаче информации с помощью двухлучевого сигнала, вероятность ошибки на приемном конце радиолинии возрастает в десятки раз по сравнению со случаем приема однолучевого сигнала, что является следствием интерференции двух МИК.

При использовании метода селективного возбуждения электромагнитных волн для данной радиолинии на поверхности Земли вблизи точки оптимального приема возникает значительная зона, внутри которой отношение  $Q$  мощностей двух МИК лежит в пределах  $0 \leq Q \leq 1$ . Пропускная способность всех декаметровых линий радиосвязи, приемные пункты

которых расположены внутри зоны обслуживания сети, будет зависеть от соотношения мощностей двух МИК, т.е. от числа  $Q$ .

Оценки для пропускной способности и вероятности ошибки при передаче информации в двоичной форме показывают, что:

1) при традиционном – неселективном – способе возбуждения электромагнитных волн в анизотропном ионосферном канале на однокачковой декаметровой линии радиосвязи при равенстве отношения сигнал/шум (ОСШ) двух МИК  $Q = 1$  и рабочей полосе сигналов  $\Delta f = 10$  кГц (рисунок 2) ее пропускная способность в 10% случаев пропускная способность канала будет меньше значения  $c = 5$  кбит/с, в 20% – меньше 15 кбит/с, в 30% – меньше 25 кбит/с (что свидетельствует о невозможности стабильной работы радиосвязи на такой ИКС);



2) использование на однокачковой ионосферной радиолнии селективного способа возбуждения ЭМВ в ионосфере позволяет внутри зоны обслуживания при  $Q = 1/10$ , ОСШ = 10 и ширине полосы канала связи 10 кГц обеспечить значение пропускной способности  $c$  на уровне не ниже 23 кбит/с в 100% случаев. Уменьшение  $Q$  до  $1/20$  приводит к увеличению  $c$  до значения не ниже 28 кбит/с, которое приближается к пропускной способности однолучевого канала. Вероятность ошибки при селективном возбуждении также зависит от параметра рассеяния: при сильном рассеянии соотношение мощностей двух МИК слабо сказывается на вероятности ошибки, которая остается на уровне  $\sim 10^{-2}$ ; при малом рассеянии с уменьшением величины  $Q$  внутри зоны обслуживания вероятность ошибки резко убывает от значения  $\sim 10^{-2}$  до значения  $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ .

3) Присутствие на КВ-радиолнии крупномасштабной неоднородности в зависимости от ее параметров изменяет отношение мощностей

принимаемых МИК, что приводит к изменению интегральной функции распределения пропускной способности – за все время сеанса она находится между кривыми 1 и 2 (рисунок 2), и вероятности ошибки, которая не опускается ниже  $3 \times 10^{-2}$  (рисунок 3). В случае селективного возбуждения ЭМВ в ионосфере изменение  $Q$  в большинстве рассмотренных случаев не приводит к появлению интерференционных замираний, либо значительно сократит их длительность. Интегральная функция распределения пропускной способности во время прохождения неоднородности изменяется от кривой 5 до кривой 2 (рисунок 2) и обратно, вероятность ошибки увеличивается от  $10^{-3}$  до  $3 \times 10^{-2}$  (рисунок 3), затем опять возвращается до уровня  $10^{-3}$ .

Проведенные исследования показали, что существует большой резерв в пропускной способности и помехоустойчивости ИКС при реализации метода селективного возбуждения электромагнитных волн в ионосфере, который может быть использован для построения сети КВ-радиосвязи с высокой пропускной способностью и помехоустойчивостью при передаче информации в двоичной форме.

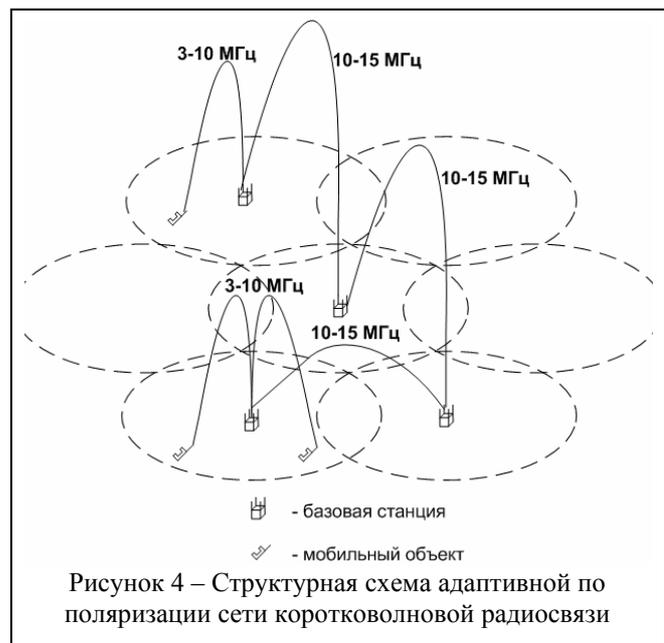
**Четвертая глава** диссертации посвящена экспериментальному исследованию частотной зависимости коэффициента поляризации радиоволн, отраженных от ионосферы при селективном возбуждении электромагнитных волн на вертикальной радиотрассе. В ходе работы было выявлено, что для конкретной радиотрассы, на которой проводилось исследование, при приближении к критической частоте наблюдается сильная зависимость среднего значения модуля и аргумента коэффициента поляризации от частоты. В то же время не обнаружена зависимость дисперсии и закона распределения (аппроксимирующей функции) от частоты.

Отмечено, что полученная зависимость средних значений модуля и аргумента коэффициента поляризации радиоволн, отраженных от ионосферы при вертикальном зондировании, от частоты не является универсальной, так как на другой вертикальной радиотрассе, расположенной в других геофизических условиях, будут и другие параметры, влияющие на поляризацию волны (гирочастота электронов и угол между волновым вектором и напряженностью магнитного поля). Поэтому при построении сети коротковолновой радиосвязи, использующей селективное возбуждение электромагнитных волн необходимо исследовать частотную зависимость коэффициентов оптимальной поляризации отдельно для каждой зоны и типа возбуждаемой компоненты.

Также при учете того, что наблюдения проводились для конкретной радиотрассы в конкретных условиях, необходимо сделать следующие

замечания. Не представляется возможным учесть все отражения радиоволн от подстилающей поверхности и окружающих объектов (зданий и пр.) и оценить влияние этих отражений на полученную частотную зависимость поляризационных параметров. Но ясно, что вклад этих отражений является частотнозависимым, так как с изменением частоты изменяется длина фазового набега волны, отраженной от какого-либо объекта. Также понятно, что хотя существует большое количество отраженных от окружающих объектов волн, все же мощность отдельной из них намного меньше мощности волны, отраженной от ионосферы и падающей вертикально вниз. Необходимо помнить, что при отражении радиоволны близи критической частоты часть ее мощности просачивается через слой, что может влиять на поляризацию отраженной волны. Поэтому для выяснения степени влияния отраженных волн на частотную зависимость поляризационных параметров целесообразно проводить наблюдения на нескольких радиотрассах.

Показано, что при построении системы радиосвязи с использованием селективного возбуждения электромагнитных волн пользоваться формулой для предельной поляризации [13], выведенной теоретически, можно в ограниченных пределах (на частотах  $\sim 0,7-0,8$  от критической). Необходимо принимать во внимание изменение средних значений параметров коэффициента поляризации с частотой, независимо от того, чем эти изменения вызваны, и проводить поляризационную диагностику для каждой рабочей частоты. В случае если для конкретной радиотрассы окажется, что в некотором частотном диапазоне зависимость модуля и аргумента коэффициента поляризации от частоты слабая, то можно выделить такой участок этой зависимости, внутри которого поляризационные параметры изменяются не больше, чем на заданное значение. В этом случае можно использовать результаты поляризационной диагностики, проведенной на одной частоте из



этого участка, для реализации селективного возбуждения электромагнитных волн на всех рабочих частотах, находящихся также внутри этого участка.

**В пятой главе** диссертации рассмотрена структурная схема предлагаемой сети коротковолновой радиосвязи (рисунок 4), а также предложены этапы настройки подобной сети.

Допустимый частотный диапазон абонентов сети КВ-радиосвязи с селективным возбуждением ЭМВ в ионосфере лежит в пределах 3-10 МГц, что при ширине одного канала связи 10 кГц и разносе частот для соседних базовых станций дает максимальное число абонентов сети порядка 100 на одну зону обслуживания. Для оцениваемого радиуса зоны в 200-500 км такое количество абонентов сравнительно мало. Однако, для ведомственного применения (министерство обороны, геологоразведка и т.п.) такая система вполне пригодна. При этом предлагаемая сеть коротковолновой радиосвязи может обеспечить высокую скорость приема и передачи информации (при низкой вероятности ошибки) и сплошную зону обслуживания с неограниченной дальностью действия.

**В заключении** формулируются основные результаты и выводы:

1. Модифицирован метод расчета траекторий КВ-радиоволн в анизотропной ионосфере. Разработан комплекс алгоритмов и программ по определению параметров поля обыкновенной и необыкновенной магнитоионных компонент для трехмерной модели ионосферы с учетом поглощения, магнитного поля Земли и присутствующих в ионосфере неоднородностей.

2. Определены зависимости площадей и размеров зон обслуживания сети КВ-радиосвязи на поверхности Земли при учете слоистой структуры ионосферы и наличии поглощения в зависимости от типа возбуждаемой компоненты, отношении рабочей частоты к критической и геомагнитной широты базовой станции. В результате учета поглощения и слоистой структуры ионосферы зоны обслуживания сети изменяют свою конфигурацию и размеры по сравнению с оценками, не учитывающими указанные условия.

3. Рассмотрено влияние ионосферных неоднородностей на пропускную способность и вероятность ошибки передачи информации по ионосферному каналу связи. Показано, что при использовании метода СВ ЭМВ пропускная способность и вероятность ошибки при передаче информации повышаются на порядок и остаются на высоком уровне даже при прохождении по линии радиосвязи крупномасштабных ионосферных неоднородностей.

4. Проведено экспериментальное исследование частотной зависимости коэффициента поляризации радиоволн, отраженных от ионосферы при

селективном возбуждении электромагнитных волн на вертикальной радиотрассе. Показано, что для реализации селективного возбуждения ЭМВ в сети КВ-радиосвязи поляризационную диагностику необходимо проводить на каждой рабочей частоте.

5. Предложена схема построения адаптивной по поляризации сети КВ-радиосвязи с селективным возбуждением электромагнитных волн в ионосфере, этапы ее настройки, приведена оценка количества абонентов предлагаемой сети.

Таким образом, в диссертационной работе показано, что предлагаемая сеть коротковолновой радиосвязи с селективным возбуждением электромагнитных волн в ионосфере может обеспечить высокую скорость приема и передачи информации (при вероятности ошибки менее  $10^{-3}$ ). Предлагаемая сеть пригодна для организации радиосвязи как для стационарных, так и для мобильных объектов.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

- 1 Березин Ю.В., Балинов В.В., Батяшин Е.В., Вылегжанин И.С., Волков О.Ю. Принципы построения загоризонтного бистатического радиолокатора с селективным возбуждением характеристических волн в ионосфере. // Информационно-измерительные и управляющие системы, №1, т.3, 2005, 70-76 стр.
- 2 Березин Ю.В., Балинов В.В., Батяшин Е.В., Вылегжанин И.С., Волков О.Ю., Определение вектора скорости воздушного объекта загоризонтным бистатическим радиолокатором с селективным возбуждением характеристических волн в ионосфере. // «Вопросы перспективной радиолокации», Изд. Радиотехника, 2003, 358-368 стр.
- 3 Березин Ю.В., Батяшин Е.В., Вылегжанин И.С. Определение координат ВО, наблюдаемого загоризонтным бистатическим радиолокатором. // Труды VIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах - 2002». стр. 74-76.
- 4 Березин Ю.В., Батяшин Е.В., Вылегжанин И.С. Определение вектора состояния ВО с помощью бистатического загоризонтного радиолокатора. // Тезисы III Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии - 2003». стр. 34-35.
- 5 Березин Ю.В., Батяшин Е.В., Вылегжанин И.С. Адаптивная антенная решетка приемного комплекса загоризонтного радиолокатора. // Тезисы III Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии - 2003». стр.36-37.

- 6 Березин Ю.В., Вылегжанин И.С. Декаметровые ионосферные линии радиосвязи с высокой пропускной способностью. // Радиотехника, №1, 2005, 6-12 стр.
- 7 Березин Ю.В., Вылегжанин И.С. Зоны помехоустойчивого приема сигнала при селективном возбуждении электромагнитных волн в ионосфере. // Радиотехника, №1, 2005, 13-18 стр.
- 8 Березин Ю.В., Вылегжанин И.С., Мешков А.Н. Сотовая система коротковолновой радиосвязи с селективным возбуждением характеристических волн в ионосфере. // Тезисы IV Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии - 2005». стр. 20-21.
- 9 Березин Ю.В., Вылегжанин И.С., Мешков А.Н., Самострелов А.Г. Топология глобальной сотовой сети коротковолновой радиосвязи, использующей селективное возбуждение характеристических волн в ионосфере. // Тезисы IV Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии - 2005». стр. 22-23.
- 10 Березин Ю.В., Вылегжанин И.С., Якушева М.А. Адаптивная по поляризации сеть коротковолновой ионосферной радиосвязи с селективным возбуждением электромагнитных волн в ионосфере. // Труды X Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», 2005. стр. 29-31.
- 11 Березин Ю.В., Вылегжанин И.С. Расчет параметров коротковолновых радиосигналов при прохождении анизотропной ионосферы, содержащей неоднородности электронной концентрации // Труды XV Международной конференции по спиновой электронике и гировекторной электродинамике, 2007 (в печати).
- 12 Березин Ю.В., Вылегжанин И.С. Экспериментальное исследование зависимости поляризации радиоволн, отраженных от ионосферы при вертикальном зондировании, от частоты // Труды XV Международной конференции по спиновой электронике и гировекторной электродинамике, 2007 (в печати).

### **ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

- 13 Гинзбург В.Л., Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967.
- 14 Березин Ю. В., Балинов В. В., Рыжов Д. Е. Способ возбуждения характеристических электромагнитных волн в ионосфере. Патент РФ № 2002276.
- 15 Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. Сборник статей под редакцией М. Кияновского. М., Наука, 1971.

16 Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М. Сов. радио, 1972.

---

Подписано в печать 15.08.07. Формат 60x84 1/16. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 2. Уч.-изд. л. 2. Тираж 100 экз. Заказ 20.

Типография ОАО "НПО "ЛЭМЗ"

127411, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 110