

На правах рукописи

Волков Олег Юрьевич

**СЕЛЕКТИВНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ВОЛН
В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ
ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ КАНАЛОВ СВЯЗИ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова на кафедре фотоники и физики микроволн физического факультета.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
доцент Ю.В.Березин;
доктор физико-математических наук,
профессор А.П.Сухоруков.

Официальные оппоненты: ПОЖИДАЕВ Виктор Николаевич
доктор физико-математических наук
ИРЭ имени В.А.Котельникова РАН,
главный научный сотрудник лаб. 201
(Математических методов радиофизики);
ЗАХАРОВ Виктор Иванович,
кандидат физико-математических наук
МГУ имени М.В.Ломоносова,
доцент кафедры физики атмосферы
физического факультета.

Ведущая организация: Учреждение российской академии наук
Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн
имени Н.В.Пушкова РАН.

Защита диссертации состоится " 8 " февраля 2013 года, в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники имени В.А.Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, к. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ имени В.А.Котельникова РАН.

Автореферат разослан " ___ " декабря 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



А.А.Потапов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Ионосферный канал широко используется для передачи информации на расстояния от десятков до тысяч километров. При этом применяются декаметровые радиоволны, хорошо отражающиеся от различных слоев ионосферы, расположенных на высотах $100 \div 400$ км. Ионосфера находится во внешнем магнитном поле Земли, она неоднородна в пространстве, анизотропна, ее электромагнитные характеристики меняются во времени под воздействием регулярных и случайных геофизических факторов, поэтому законы распространения электромагнитных волн в ней весьма сложны.

Повысить помехоустойчивость принимаемой информации можно:

- обрабатывая поляризованное двухлучевое поле в точке приема пространственно-поляризационным фильтром;
- применяя методы спектральной обработки;
- используя на радиолинии метод селективного возбуждения характеристических волн (СВХВ) в анизотропной ионосфере.

Суть метода СВХВ заключается в излучении волны с такой поляризацией, при которой в ионосфере возбудится только одна волна. Для определения искомой поляризации предусмотрена специальная процедура — поляризационная диагностика ионосферного канала связи.

Первые экспериментальные исследования метода были начаты еще в 1992 г. Однако, выполненные работы имеют ряд существенных недостатков. В них не было получено больших статистических объемов информации об эффективности работы методов поляризационной диагностики и СВХВ. Эксперимент проводился или при наличии разделения волн по времени группового запаздывания отраженных от ионосферы импульсных сигналов, или при приеме их смеси. Для второго случая не представлялось возможным измерить соотношение мощностей волн при СВХВ, и качество работы метода определялось на основе косвенных признаков. Предложенный в литературе алгоритм поляризационной диагностики не дает полной информации о характеристических волнах, в частности, он не позволяет определить поляризацию и относительную мощность (затухание) этих волн, что позволяет дополнительно увеличить помехозащищенность канала связи, применяя поляризационное согласование приемного устройства с поляризацией выбранной волны на приемном конце радиолинии, а также использовать обе волны как два канала

передачи информации. Поэтому целесообразно было продолжить исследования в этом направлении, что и является темой настоящей диссертационной работы.

В современном мире возрастает потребность в обмене информацией между электронными устройствами. Для передачи цифровой информации по каналам связи используется специальное кодирование. В последние годы предложено расширение класса рабочих сигнальных структур для ионосферных каналов пространственно-временными кодовыми конструкциями, такими как MISO, SIMO, MIMO. Однако современные сигнально-кодовые конструкции обеспечивают ожидаемую высокую эффективность лишь при определенных параметрах канала связи, что подтверждает актуальность работ в области помехоустойчивости передачи информации.

Цель работы

В рамках физического и математического экспериментов исследовать эффективность методов поляризационной диагностики и селективного возбуждения характеристических волн в анизотропной ионосфере Земли и получить статистически достоверные оценки качества их работы.

Научная новизна

1. Предложена математическая модель многолучевого ионосферного канала связи с поляризационно-чувствительными коэффициентами передачи и с ее помощью установлена зависимость эффективности работы методов поляризационной диагностики и селективного возбуждения характеристических волн от параметров канала.

2. Экспериментально получены статистически достоверные оценки эффективности работы методов поляризационной диагностики и селективного возбуждения характеристических волн в анизотропной ионосфере.

3. Показано, что при использовании методов поляризационной диагностики и селективного возбуждения характеристических волн в ионосфере надежность передачи информации по однокачковому ионосферному каналу связи возрастает в 10-100 раз, а его пропускная способность приближается к потенциально возможной в данных физических условиях.

Практическая значимость

1. Создан многофункциональный аппаратный комплекс, обеспечивающий проведение научных исследований отраженных от ионосферы эллиптически поляризованных электромагнитных полей.

2. Разработан и экспериментально проверен модифицированный метод поляризационной диагностики анизотропного ионосферного канала связи.

3. Разработаны и экспериментально проверены алгоритмы, обеспечивающие функционирование однокачковой адаптивной по поляризации линии декаметровый радиосвязи с селективным возбуждением волн в ионосфере.

На защиту выносятся

1. Математическая модель многолучевого ионосферного канала связи с поляризационно-чувствительными коэффициентами передачи.

2. Модифицированный метод поляризационной диагностики ионосферного канала связи, позволяющий выбрать решение, обеспечивающее наилучшее качество передачи информации в данных физических условиях.

3. Экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность разработанного метода селективного возбуждения характеристических волн в анизотропном ионосферном канале связи на основе поляризационной диагностики.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на заседаниях кафедр "Фотоники и физики микроволн" и "Физики атмосферы", Всероссийских и Международных научных конференциях и семинарах: "По дифракции и распространению волн", Москва, 12–15 января 1998 г.; "Волновые явления в неоднородных средах", Красновидово, 25–30 мая 1998 и 22–27 мая 2000 г.; "Физика и применение микроволн", Красновидово, 24–30 мая 1999 и Звенигород, 21–27 мая 2001 г.; "Радиолокация и связь — перспективные технологии", Москва, 14–16 декабря 2001 г.; "Международная конференция по Спиновой электронике и Гировекторной электродинамике", Москва, Фирсановка, 16–18 ноября 2001 и 19–21 ноября 2003 г.; "Волны-2010", Звенигород, 24–29 мая 2010 г.; "Радиолокация и радиосвязь", Москва, 15–19 ноября 2010 г.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 9 статей, одно учебное пособие и 11 тезисов докладов, список которых приведен в конце реферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 119 страницах, содержит 26 рисунков, 5 таблиц. Список цитируемой литературы включает 89 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована основная задача исследования, указана научная новизна и практическая значимость работы, защищаемые положения.

В главе 1 – "Свойства радиоволн, отраженных от ионосферы" – на основе литературных данных проанализированы основные свойства радиоволн, отраженных от анизотропной ионосферы Земли и описаны принципы создания ионосферных линий связи, характерной особенностью которых является наличие в точке приема нескольких лучей, прошедших по разным траекториям. В случае односкачковой ионосферной радиолинии в точке приема будут присутствовать две магнито-ионные компоненты — две характеристические волны (ХВ) с различным доплеровским сдвигом частот. В условиях многоскачковой радиотрассы в точку приема будут приходить четыре или более ХВ. Суперпозиция этих волн приводит к глубоким замираниям амплитуды суммарного сигнала, тем самым снижая достоверность передачи информации по ионосферному каналу связи.

Одним из способов увеличения пропускной способности ионосферного канала связи (ИКС) является метод селективного возбуждения характеристических волн (СВХВ) в ионосфере. В случае односкачкового распространения волн между пунктами передачи и приема, наблюдающемся на радиотрассах протяженностью до 3000 км, метод обеспечивает однолучевое распространение радиоволны при согласовании поляризации падающего на ионосферу электромагнитного поля с поляризацией одной из двух ХВ.

Применение метода СВХВ на односкачковой двухлучевой ионосферной линии радиосвязи позволяет снизить вероятность ошибки при передаче информации в 10 и более раз; при этом пропускная способность первоначально двухлучевой радиолинии также возрастает приблизительно на порядок.

В разделе 1.1 кратко изложена структура ионосферы и ее основные свойства (анизотропия, эффект Доплера).

Разделы 1.2 и 1.3 посвящены поляризации радиоволн, распространяющихся по ионосферному каналу связи.

В разделах 1.4 и 1.5 изложены вопросы помехоустойчивости передачи информации по ионосферным каналам связи, показана зависимость скорости передачи информации и вероятности ошибки от параметров канала, а также перспективы применения метода СВХВ с целью увеличения пропускной способности и надежности передачи информации.

В разделе 1.6 сформулированы основные результаты первой главы.

В главе 2 – "Математическая модель анизотропного ионосферного канала связи и метод селективного возбуждения характеристических волн" – рассмотрена математическая модель поляризационно-чувствительного многоскачкового ионосферного канала. Получены формулы, определяющие многолучевое электромагнитное поле на приемном конце многоскачковой радиолинии в анизотропном ионосферном канале.

На основе модели ИКС показана возможность селективного поляризационного возбуждения электромагнитных волн на односкачковой ионосферной линии связи. Изложен метод селективного возбуждения характеристических волн, включая процесс поляризационной диагностики ИКС, обработки принятой информации и вычисления оптимальных фазоров излучаемого поля. Этот метод обеспечивает создание в ионосферном канале однолучевых линий радиосвязи, обладающих пропускной способностью, близкой к потенциальной в данных физических условиях.

Рассмотрены два различных случая поляризационной диагностики ИКС. Первый – наиболее простой, когда существует возможность проведения диагностики ионосферного канала связи с помощью импульсных радиосигналов и отдельного приема двух характеристических волн. Второй – когда диагностика канала проводится узкополосным сигналом и обрабатывается информация о смеси двух характеристических волн. Для обоих случаев приводятся соотношения, позволяющие выполнить проверку эффективности метода селективного возбуждения характеристических волн в физическом эксперименте при вертикальном и наклонном зондировании ионосферы.

Изложена постановка и результаты математического эксперимента, посвященного определению качества работы методов поляризационной диагностики и селективного возбуждения характеристических волн в анизотропной ионосфере. Предложенный метод поляризационной диагностики ионосферы обеспечивает решение обратной задачи диагностики с точностью до 5% при соблюдении определенного требования на длительность сеанса поляризационной диагностики. Результаты поляризационной диагностики анизотропного ионосферного канала связи позволяют реализовать метод селективного возбуждения одной из характеристических волн в ионосфере. При этом мощность второй характеристической волны уменьшается на порядок и более, – в зависимости от отношения сигнал/шум в канале связи.

Описанный метод и разработанная система алгоритмов поляризационной диагностики могут быть использованы при проектировании однолучевых ли-

ний декаметровый радиосвязи в односкачковом ионосферном канале. Их применение способствует улучшению качества работы радиосистем, использующих отраженные от ионосферы радиоволны, в частности систем связи, навигации, загоризонтной радиолокации. Метод обеспечивает уменьшение мощности одной ХВ по сравнению с другой в 10 и более раз, может существенно уменьшить интерференционный фединг суммарного поля в точке приема.

В разделе 2.1 предложена математическая модель поляризационно-чувствительного многоскачкового ионосферного канала. Считается, что поле в ионосферном канале связи можно представить в виде суммы трех компонент:

$$\vec{E}_{output}(t) = \vec{E}_0(t) + \vec{E}_s(t) + \vec{E}_d(t) + \vec{E}_{noise}(t), \quad (1)$$

где $\vec{E}_0(t)$ – детерминированная компонента поля, $\vec{E}_s(t)$ – рассеянная поляризованная компонента поля, $\vec{E}_d(t)$ – рассеянная деполаризованная компонента, $\vec{E}_{noise}(t)$ – аддитивный шум. Параметры канала \mathfrak{P}_0 , \mathfrak{P}_s и \mathfrak{P}_d – средние мощности детерминированной, рассеянной и деполаризованной составляющей векторного поля (1) связаны между собой следующими соотношениями:

$$\beta^2 = \frac{\mathfrak{P}_0}{\mathfrak{P}_s + \mathfrak{P}_d}, \quad q = \frac{\mathfrak{P}_0 + \mathfrak{P}_s}{\mathfrak{P}_0 + \mathfrak{P}_s + \mathfrak{P}_d}, \quad (2)$$

где β^2 – степень рассеяния, а q – степень поляризации компоненты поля.

$$\vec{E}_{output} = \mathbf{K}\vec{E}_{input} + \vec{E}_{noise}. \quad (3)$$

Учитывая, что в ионосферном канале связи распространяется N магнито-ионных компонент

$$\mathbf{K} = \sum_{n=1}^N \mathbf{K}_n$$

и (3) примет вид:

$$\vec{E}_{output} = \sum_{n=1}^N \mathbf{K}_n \vec{E}_{input} + \vec{E}_{noise}, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{K}_n = \left[\vec{\epsilon}_n \left(\exp(i\Omega_n t) \sqrt{\frac{\beta^2}{1 + \beta^2}} + s_n(t) \sqrt{q - \frac{\beta^2}{1 + \beta^2}} \right) + \vec{d}_n(t) \sqrt{1 - q} \right] (\vec{k}_n)^T, \quad (5)$$

$$\vec{\epsilon}_n = a_{n1} \vec{e}_{n1} + a_{n2} \vec{e}_{n2}, \quad a_{n1} a_{n1}^* + a_{n2} a_{n2}^* = 1;$$

$$\vec{d}_n = b_{n1}(t) \vec{e}_{n1} + b_{n2}(t) \vec{e}_{n2}, \quad \langle b_{n1}(t) b_{n1}^*(t) + b_{n2}(t) b_{n2}^*(t) \rangle = 1;$$

a_{n1}, a_{n2} — комплексные числа; $b_{n1}(t), b_{n2}(t)$ — статистически независимые комплексные случайные процессы; $\vec{e}_{n1} \perp \vec{e}_{n2}$ — единичные вектора; n — номер характеристической волны. Вектор \vec{e}_n определяет поляризацию волны n .

В разделе 2.2 в рамках предложенной модели изложен метод селективного возбуждения характеристических волн. Показано, что существует некая поляризация излучаемого поля E_{input} , скалярное произведение которой с вектором \vec{k}_n , входящим в (5) будет равно нулю $(\vec{k}_n, \vec{E}_{input}) = 0$, что соответствует отсутствию возбуждения волны с номером n и поле в точке приема будет одноручевым.

В разделе 2.3 описан метод поляризационной диагностики ионосферного канала связи короткими импульсными сигналами, когда есть возможность осуществить раздельный прием и измерение параметров импульсов, соответствующих двум магнитоионным компонентам. В этом случае, решение задачи диагностики можно определить через коэффициенты передачи ионосферного канала связи, то есть через комплексные напряжения, измеренные на одной из приемной антенн (например ξ) при X и Y диагностике соответственно. Два решения соответствуют отсутствию возбуждения волны с номером $n = 1, 2$:

$$P_n = -\frac{K_{nx}}{K_{ny}} = -\frac{E_{output, n\xi}|_X}{E_{output, n\xi}|_Y} e^{i(\Omega_n(t+\Delta t)(t+\Delta t) - \Omega_n(t)t)} \cong -\frac{E_{output, n\xi}|_X}{E_{output, n\xi}|_Y}, \quad (6)$$

где Δt — интервал времени между моментом излучения поля X и Y антеннами при проведении поляризационной диагностики.

Для более точного определения фазора P_n необходимо усреднить правую часть формулы (6) по N измерениям, т.е. найти

$$P_n = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{E_{output, n\xi}|_X}{E_{output, n\xi}|_Y}. \quad (7)$$

В разделе 2.4 изложен модифицированный метод поляризационной диагностики ионосферного канала связи с помощью узкополосных сигналов. Идея метода состоит в минимизации функции мощности

$$\begin{aligned} \langle s(P, W) \rangle = & (G_{00} + |P|^2 G_{11} + |W|^2 G_{22} + |WP|^2 G_{33} + \\ & + 2\text{Re}(PG_{10} + WG_{20} + WG_{21}P^* + WPG_{30} + WPG_{31}P^* + \\ & + WPG_{32}W^*)) / ((1 + WW^*)(1 + PP^*)), \end{aligned} \quad (8)$$

где $G_{ij} = \langle K_i K_j^* \rangle$, $K_0 = K_{x\xi}$, $K_1 = K_{y\xi}$, $K_2 = K_{x\eta}$ и $K_3 = K_{y\eta}$ — компоненты тензора \mathbf{K} модели (3).

Минимизируя выражение (8) по параметрам P и W , получим два решения для оптимального фазора P . Кроме того, использование выражения (8)

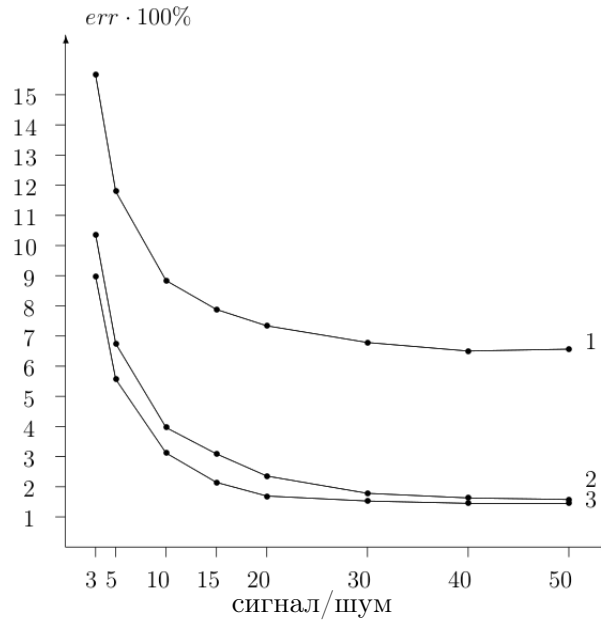


Рис. 1. Ошибка в определении фазора по результатам поляризационной диагностики от отношения сигнал/шум в ионосферном канале связи; кривые 1-3 соответствуют значениям β^2 , равным 10, 100 и 1000.

позволяет определить более мощную ХВ и оценить значение эффективности метода СВХВ для каждого полученного решения.

В разделе 2.5 рассмотрена схема работы однолучевой линии коротковолновой радиосвязи, использующей методы поляризационной диагностики и селективного возбуждения характеристических волн в ионосфере. Приводятся формулы расчета параметров модели ионосферного канала связи, входящие в выражение (5).

В разделе 2.6 приведена методика проведения численного эксперимента по моделированию работы ионосферной линии радиосвязи с селективным возбуждением характеристических волн.

В разделе 2.7 изложены результаты численного моделирования работы ионосферной линии радиосвязи с селективным возбуждением характеристических волн.

На рис. 1 представлено семейство зависимостей ошибки определения фазора

$$err = |P - P_{opt}| / |P_{opt}| \quad (9)$$

в функции отношения сигнал/шум по параметру β^2 для значений 10, 100 и 1000. Здесь P — решение, получаемое в результате процедуры поляризационной диагностики, а P_{opt} — значение, получаемое теоретически из параметров модели. Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что разработанные алгоритмы поляризационной диагностики анизотропного ионосферного

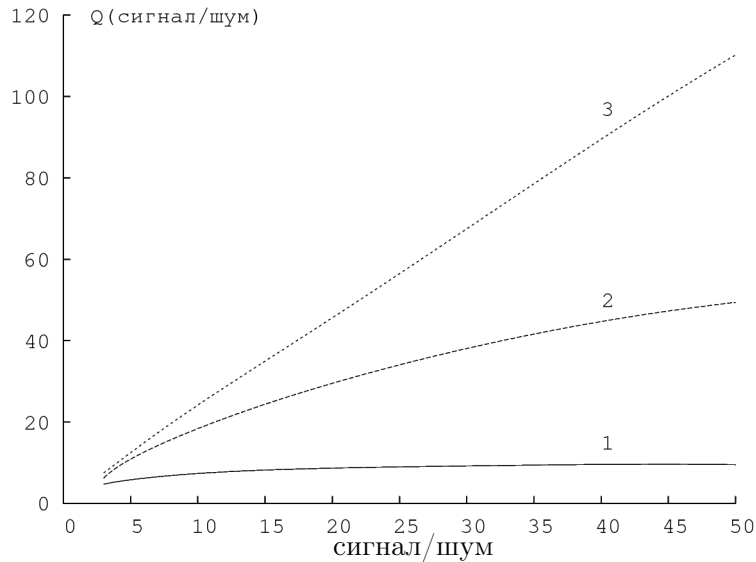


Рис. 2. Зависимость качества селективного возбуждения Q от отношения сигнал/шум в ионосферном канале связи; кривые 1-3 соответствуют значениям параметра β^2 , равным 10, 100 и 1000 соответственно.

канала позволяют получить решение обратной задачи для истинного фазора поля очень близким к оптимальному P_{opt} . В свою очередь, найденные решения для фазора обеспечивают высокое качество возбуждения одной ХВ на конкретной ионосферной трассе (рис. 2).

Алгоритм решения обратной задачи поляризационной диагностики основан на анализе величины мощности поля, состоящего из суммы двух ХВ, измеренной на определенном интервале времени — периоде поляризационной диагностики ионосферного канала T . Амплитуда суммы двух ХВ флуктуирует с разностной частотой $\Omega_i = |\Omega_1 - \Omega_2|$, где $\Omega_{1,2}$ — частоты двух ХВ.

Качество поляризационной диагностики определяется соотношением длительности сеанса диагностики T и величины периода доплеровского смещения разностной частоты в ионосфере $T_i = 2\pi/\Omega_i$. Была измерена зависимость относительной ошибки в определении фазора $|P - P_{opt}|/|P_{opt}|$ в канале связи как функции длительности сеанса T поляризационной диагностики. Полученные результаты свидетельствуют о том, что используемый алгоритм решения обратной задачи поляризационной диагностики позволяет получить удовлетворительную точность при $T \geq 0,5T_i$ ($T_i = 50$ с).

В разделе 2.8 сформулированы основные результаты второй главы.

В главе 3 — "Экспериментальное исследование селективного возбуждения характеристических волн в ионосфере" — приведено описание структуры и алгоритмов работы импульсного автоматизированного когерентного радиолокатора, предназначенного для комплексных исследований радиоволн, от-

раженных от ионосферы.

Измеренная информация о векторе принятого поля позволяет решить множество задач, связанных с распространением декаметровых волн в анизотропном ионосферном канале связи, разработкой и исследованием адаптивных антенных систем и т.п.

Результаты измерений квадратурных компонент отраженного от ионосферы векторного поля позволяют определять:

- статистические и поляризационные характеристики магнитоионных компонент поля, отраженного от ионосферы;
- распределения отношения мощностей ХВ во времени;
- поляризацию излучаемого поля, согласованную с поляризацией 1 и 2 ХВ на входе в ионосферу в данных условиях эксперимента;
- оценки эффективности поляризационной диагностики и селективного возбуждения характеристических волн в анизотропной ионосфере.

Созданный аппаратный комплекс позволил выполнить большой цикл экспериментальных исследований эффективности предложенного метода возбуждения электромагнитных волн в ионосфере.

В разделе 3.1 описан экспериментальный аппаратный комплекс для импульсного зондирования ионосферы. Приводятся технические характеристики, блок-схема установки (рис. 3), описано программное обеспечение.

Высокочастотное напряжение от ГСС (6) поступает на фазовращатель и аттенюатор — ФАТ. Блок ФАТ представляет собой перераспределитель мощности между X и Y каналами передающего комплекса и регулируемую линию задержки, включенную в цепь канала Y . Линия задержки позволяет изменять фазу напряжения в Y канале относительно фазы в X канале в интервале от 0 до 360 градусов.

Блок управления (16) формирует короткие импульсы (длительностью 100 или 400 мкс), поступающие независимо на X и Y передатчики (3, 4). Это позволяет излучать электромагнитное поле произвольной наперед заданной поляризации, если подавать модулирующие импульсы одновременно на оба передатчика и установить необходимые параметры поляризации при помощи блока ФАТ. Кроме того, установка позволяет излучать импульсы электромагнитного поля с линейной поляризацией, ориентированной в направлении излучающей антенны X (1) или Y (2).

Отраженное от ионосферы электромагнитное поле, принятое ξ и η антеннами (7, 8), поступает на коммутатор (9), переключающий напряжения с приемных антенн на измерительный приемник (10). Кроме того, коммутатор

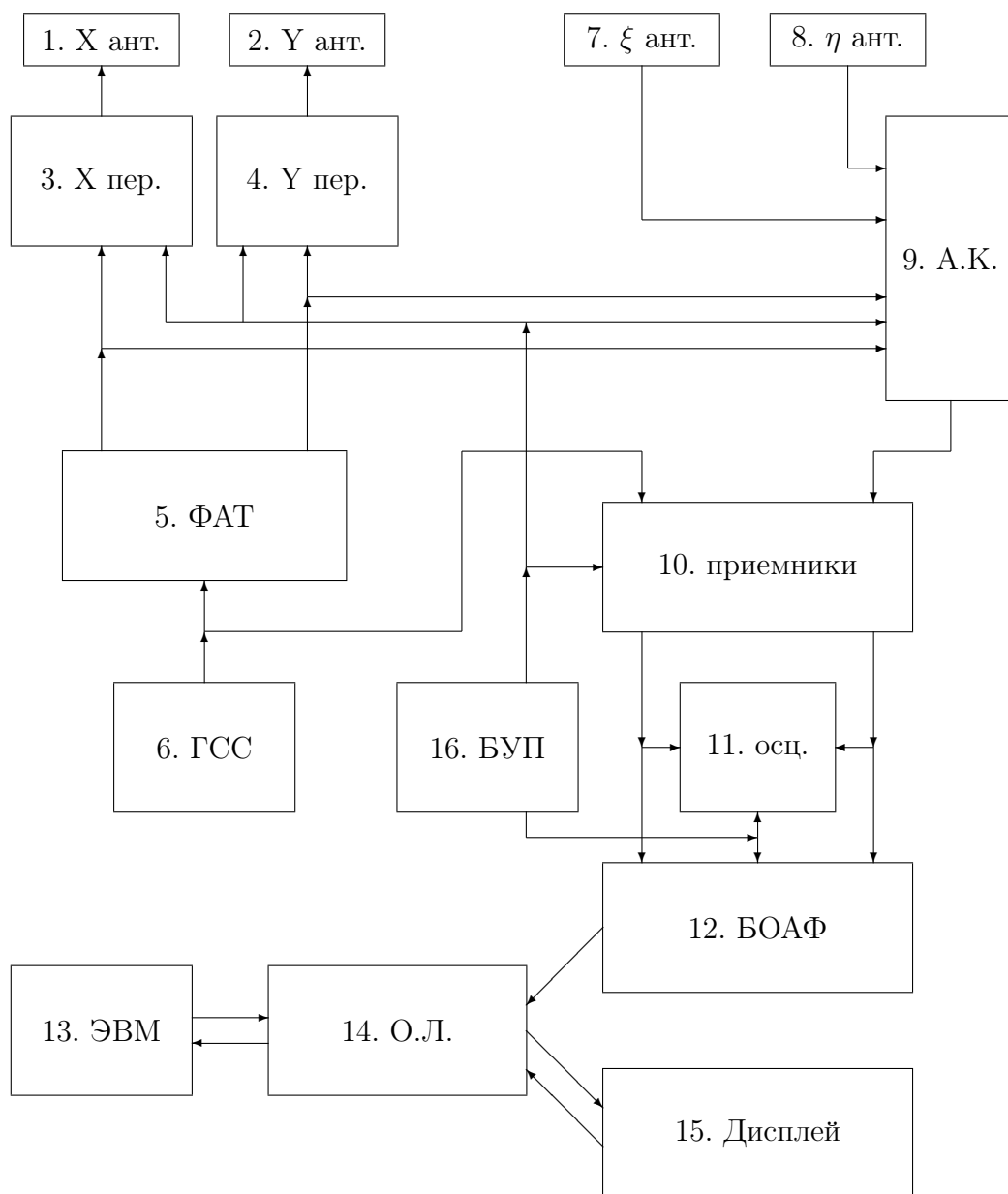


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки 1, 2 – передающие антенны; 3, 4 – передатчики; 5 – фазовращатель и аттенюатор; 6 – генератор стандартных сигналов; 7, 8 – приемные антенны; 9 – антенный коммутатор; 10 – опорный и измерительный приемники; 11 – осциллограф; 12 – блок обработки амплитуды и фазы; 13 – регистрирующая ЭВМ; 14 – оптоволоконная линия передачи информации; 15 – дисплей.

обеспечивает возможность подачи напряжений с контрольных точек ФАТ на измерительный приемник для контроля параметров излученного поля. Переключение режимов работы коммутатора (9) проводится путем подачи соответствующих управляющих импульсов, вырабатываемых блоком управления (16). Напряжение принятых сигналов, снимаемое с выхода коммутатора (9), поступает на вход измерительного приемника, где с помощью гетеродина преобразуется к промежуточной частоте. С помощью этого же гетеродина отдельным радиоприемником преобразуется к промежуточной частоте и опорное напряжение генератора высокой частоты (6). Эти два напряжения промежуточной частоты поступают на осциллограф (11) для визуального наблюдения и в БОАФ (12) — для преобразования амплитуды и фазы принятых сигналов в цифровую форму. Фазы сигналов измеряются относительно фазы опорного напряжения (ГСС).

Огибающая измеряемого напряжения имеет прямоугольную импульсную форму. Для задания момента времени, в который нужно производить оцифровку сигнала, используются стробы, вырабатываемые БУП (16) и поступающие в БОАФ (12) и на осциллограф (11). По картине на экране осциллографа проводят совмещение стробов и импульсного сигнала, тем самым задавая момент измерения амплитуды и фазы. Амплитуда и фаза, представленные в цифровой форме, передаются по оптоволоконной линии (14) в ЭВМ (13), где и запоминаются для последующей обработки.

Блок управления (16) может в одном цикле работы установки изменять длительность излучаемого импульса, что позволяет при определенном положении стробов и выборе соответствующего режима работы получать информацию о двух характеристических волнах и информацию о суммарном сигнале. Для этого, стробы 1 и 2 устанавливаются на середины принимаемых импульсов отдельных компонент. При излучении удлиненного импульса, длительностью в 400 мкс, принимаемые сигналы перекрываются во времени — появляется возможность измерить сумму двух характеристических волн (рис. 4).

Кроме того, установка позволяет измерять уровень шума. При этом в специально выделенном интервале времени в каждом цикле измерения приемная часть работает как обычно, но зондирующие импульсы не излучаются.

В разделе 3.2 изложена методика экспериментальных исследований селективного возбуждения характеристических волн.

В разделах 3.3 и 3.4 приводится описание работы экспериментального комплекса в режимах диагностики ионосферного канала связи и селективно-

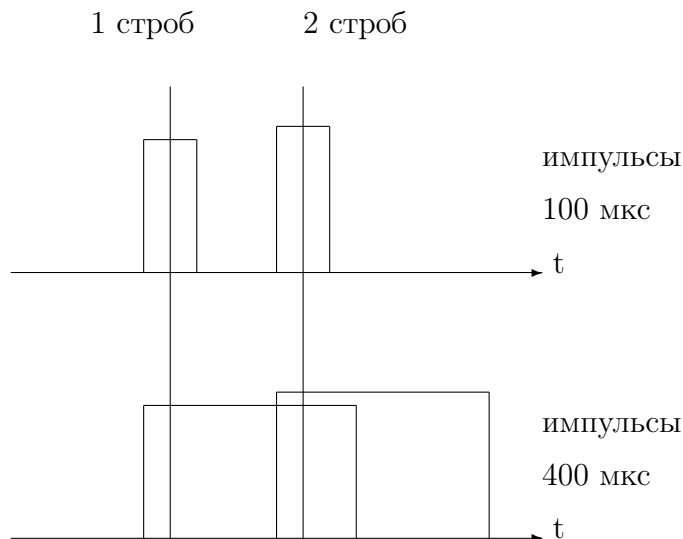


Рис. 4. Схема установки стробов в режиме диагностики (цикл на 16 измерений)

го возбуждения характеристических волн.

В разделе 3.5 сформулированы основные результаты третьей главы.

В главе 4 – "Анализ результатов экспериментальных исследований селективного возбуждения характеристических волн в ионосфере" – показано, что:

- предлагаемый метод поляризационной диагностики анизотропной ионосферы на вертикальной радиотрассе позволяет определить необходимые для реализации СВХВ поляризационные параметры излучаемой волны с точностью не хуже 15% в 90% случаев;
- применение метода СВХВ в анизотропной ионосфере на вертикальной радиотрассе позволяет увеличить в ионосферном канале связи отношение мощностей двух ХВ до 70-80 раз в 80% случаев; при этом практически полностью устраняются интерференционные замирания амплитуды отраженного от ионосферы суммарного поля в пункте приема ионосферной линии декаметрового радиосвязи, что обеспечивает достижение ее потенциальной пропускной способности в данных физических условиях;
- метод СВХВ обеспечивает на односкачковой ионосферной радиотрассе увеличение достоверности передачи информации в 10–100 раз (вероятность ошибки снижается с $P_{err} \sim 10^{-2}$ до $P_{err} \sim 10^{-4}$);
- большой объем выполненных наблюдений — число обработанных независимых реализаций значений отраженного от слоя F2 электромагнитного поля ($N = 200 \div 2000$), обеспечивает статистическую достоверность полученных экспериментальных результатов.

Результаты выполненных экспериментов открывают новые перспективы для усовершенствования традиционных и создания новых декаметровых линий радиосвязи и других радиосистем, использующих отраженные от ионосферы радиоволны.

В разделе 4.1 приводятся поляризационные и статистические параметры характеристических волн, отраженных от слоя F2 ионосферы для серии экспериментальных исследований, проводимых с помощью описанной в главе 3 установки.

В разделе 4.2 приводятся экспериментальные распределения мощности двух характеристических волн при облучении слоя F2 ионосферы линейно поляризованным полем.

В эксперименте отношение мощностей Q двух ХВ оценивалось как отношение средних мощностей проекций векторов $\vec{E}(t)$ электромагнитных полей на одну и ту же приемную антенну (ξ или η):

$$Q_{\xi,\eta} = \frac{\langle E_{1\xi,\eta} E_{1\xi,\eta}^* \rangle}{\langle E_{2\xi,\eta} E_{2\xi,\eta}^* \rangle}. \quad (10)$$

Кроме того, вычислялось отношение средних мощностей векторных полей характеристических волн используя параметр Стокса I_{st} . В этом случае

$$Q_v = \frac{I_{1st}}{I_{2st}} = \frac{\langle E_{1\xi} E_{1\xi}^* \rangle + \langle E_{1\eta} E_{1\eta}^* \rangle}{\langle E_{2\xi} E_{2\xi}^* \rangle + \langle E_{2\eta} E_{2\eta}^* \rangle}, \quad (11)$$

где I_{1st} и I_{2st} – параметры Стокса для 1 и 2 волн соответственно.

При использовании оценок (10) и (11) считалось, что волна с номером 1 является более мощной, по сравнению с волной 2 (не идентифицируя какая это волна — обыкновенная или необыкновенная). Таким образом, по определению, параметр Q всегда ≥ 1 .

На рис. 5 приведены интегральные функции распределения параметра Q , полученные на основе экспериментальных измерений отраженного от ионосферы поля \vec{E} (в сторону ионосферы излучалось линейно поляризованное поле). Всего было обработано 400 сеансов длительностью по 80 сек.

Из анализа представленных функций распределения следует, что в 80% случаев $Q < 5$, а в половине случаев $Q < 2,5$. Это позволяет утверждать, что преимущественного возбуждения какой-либо одной характеристической волны при излучении поля одной линейной антенной с произвольной ориентацией относительно магнитного поля Земли в условиях проведенного эксперимента не наблюдалось.

В разделе 4.3 оценивается квазиоптимальное время поляризационной диагностики слоя F2 ионосферы. Показано, что период времени $T = 30$ —

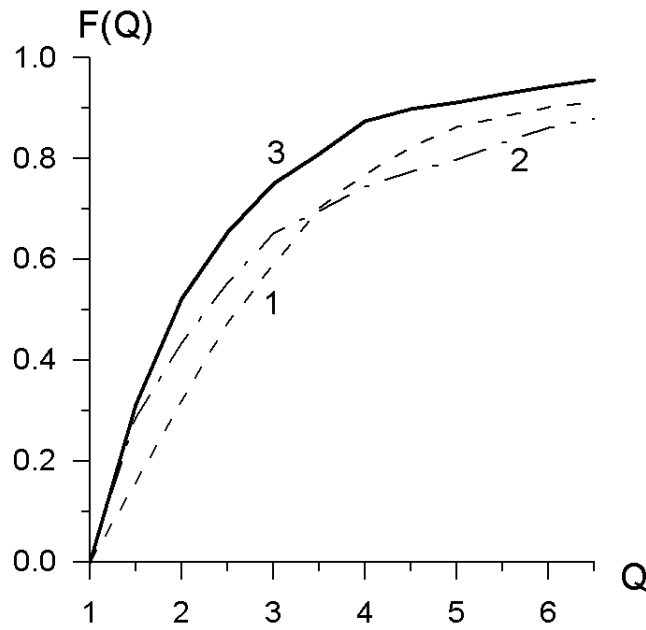


Рис. 5. Экспериментальные интегральные распределения параметра Q при излучении линейно поляризованного поля (1 – измерение на ξ антенне, 2 – на η антенне, 3 – измерение векторного поля).

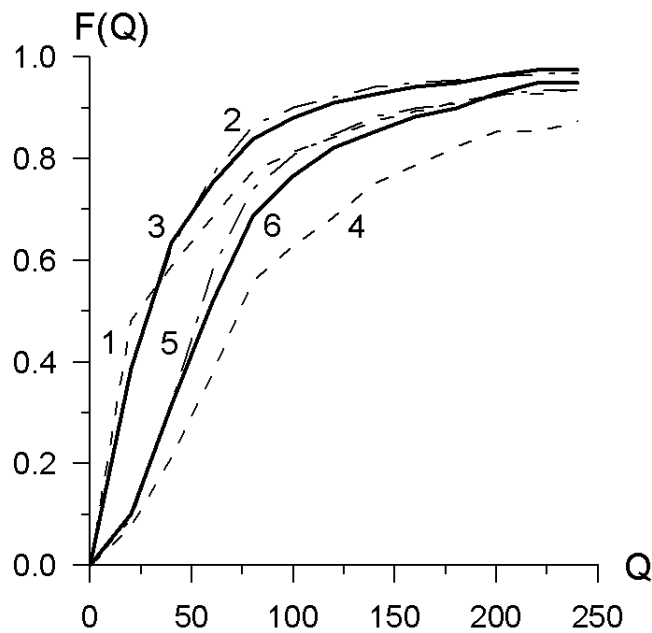


Рис. 6. Экспериментальные интегральные распределения параметра Q при селективном возбуждении поочередно первой и второй характеристической волны (кривые 1-3) и при селективном возбуждении характеристической волны, обеспечивающей максимальное качество СВХВ (4-6); 1 и 4 – измерение на ξ антенне, 2 и 5 – на η антенне, 3 и 6 – измерение векторного поля.

40 секунд является оптимальным для проведения поляризационной диагностики и обеспечивает приемлемую точность решения задачи.

В разделе 4.4 рассматривается вопрос о качестве селективного возбуждения характеристических волн в слое F2 ионосферы.

Поляризационная диагностика ИКС позволяет получить два решения относительно фазоров поля, соответствующих возбуждению обыкновенной или необыкновенной характеристической волны. В данных конкретных условиях одна характеристическая волна может возбуждаться лучше другой. На рис. 6 приведены интегральные распределения плотности вероятности значений параметров Q_ξ , Q_η и Q_v , характеризующих качество возбуждения одной характеристической волны по сравнению с другой при произвольном выборе возбуждаемой волны (кривые 1-3) и при возбуждении наиболее мощной ХВ (кривые 4-6). Информация о мощности характеристических волн получается при проведении поляризационной диагностики предложенным в работе модифицированным методом. Видно, что по сравнению с излучением линейно поляризованного поля (рис. 5) параметр Q лежит в более широком интервале значений: от единиц, до нескольких десятков, при наиболее вероятных значениях $Q \approx 10 \div 40$ для случая возбуждения произвольной волны. При целенаправленном возбуждении наиболее мощной ХВ наиболее часто встречаются значения Q в интервале от 20 до 80.

Статистические объемы безвозвратных выборок при построении зависимостей $F_{exp}(Q)$ для случая произвольного выбора возбуждаемой волны в сеансе СВХВ составили 400 сеансов. Для случая целенаправленного возбуждения наиболее мощной ХВ выборка составила 200 сеансов.

Из анализа представленных на рис. 6 экспериментальных распределений величин Q_ξ , Q_η и Q_v при СВХВ видно, что наиболее вероятное значение параметра Q лежит в диапазоне $20 \div 40$ если возбуждать одну характеристическую волну случайным образом, а если возбуждать "наилучшую" ХВ, то это значение возрастает до $50 \div 70$, причем в 90% случаев $Q > 20$.

В разделе 4.5 оценивается эффективность метода селективного возбуждения характеристических волн в слое F2 ионосферы. Для этого вводится параметр $\gamma = Q_{СВХВ}/Q_0$, где $Q_{СВХВ}$ и Q_0 – значения Q , полученные после и до применения метода СВХВ в данном сеансе наблюдения, причем значение $Q_{СВХВ}$ берется для целенаправленного возбуждения "лучшей" из двух возможных ХВ.

На рис. 7 изображены интегральные функции распределения значений параметра γ . Значения $F(\gamma)$ определены по результатам измерений полей ХВ

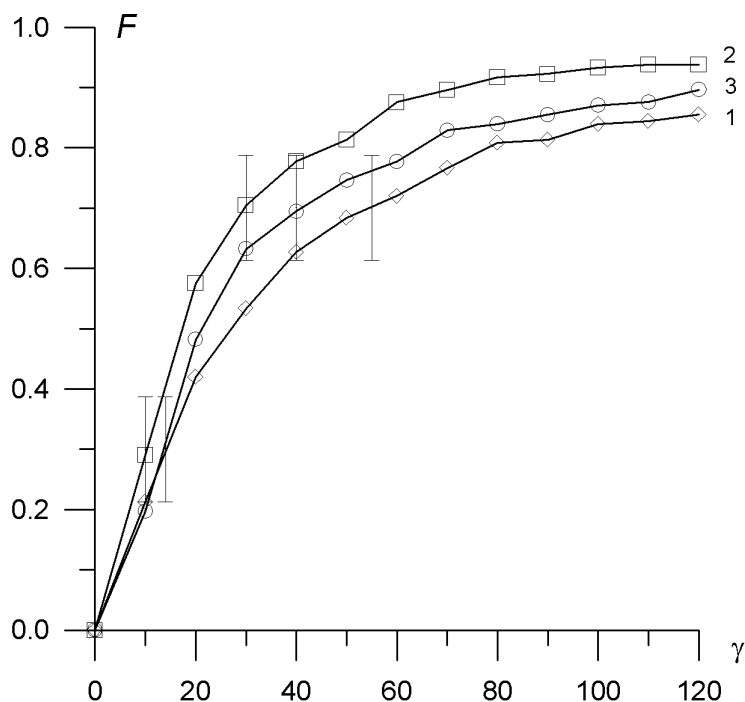


Рис. 7. Экспериментальная интегральная функция распределения плотности вероятности значений параметра $\gamma = Q_{CBXB}/Q_0$, характеризующего эффективность метода СВХВ в слое F2 ионосферы, вычисленного по результатам измерений мощностей ХВ на ортогональных линейных ξ, η антеннах (кривые 1,2) и мощности векторного поля этих волн (кривая 3).

на ξ, η антеннах (10), а также при приеме векторных полей (11) характеристических волн. Доверительные интервалы отложены при уровне значимости 0,9.

Представленные результаты свидетельствуют об очень важном факте — применение метода СВХВ позволяет в 80% случаев увеличить отношение Q в 10 – 100 раз (коэффициент $\gamma = 10 \div 100$, рис. 7). В результате применения метода СВХВ с целенаправленным возбуждением "лучшей" ХВ значения параметра Q достигают нескольких десятков. Столь сильное увеличение Q практически полностью устраняет интерференционный фединг отраженного от ионосферы поля в пункте приема. Это обстоятельство обеспечивает достижение потенциальной пропускной способности конкретной ионосферной линии радиосвязи — максимальной скорости и минимальной вероятности ошибки при передаче информации в данных физических условиях.

В разделе 4.6 сформулированы основные результаты четвертой главы.

Основные результаты работы:

1. Предложена математическая модель поляризационно-чувствительного ионосферного канала. С ее помощью исследована зависимость эффективности работы методов диагностики и селективного возбуждения волн от прини-

маемых полей и параметров канала. Показана целесообразность применения этих методов при создании однолучевых линий радиосвязи в односкачковом ионосферном канале.

2. Разработан метод поляризационной диагностики анизотропного двухлучевого ионосферного канала, позволяющий получить два возможных решения задачи диагностики и определить поляризацию и относительную мощность каждой характеристической волны, то есть выбрать решение, обеспечивающие наилучшее качество передачи информации в конкретных физических условиях. Показано, что при использовании селективного способа возбуждения электромагнитных волн в анизотропной ионосфере вероятность ошибки при передаче информации по односкачковому каналу связи снижается в $10 \div 100$ раз (становится менее 10^{-4}), а его пропускная способность приближается к потенциальной в данных физических условиях для однолучевого канала (порядка $15 \div 20$ кбит/сек).

3. Разработана методика проведения и обработки результатов экспериментальных исследований эффективности диагностики и селективного возбуждения волн при вертикальном зондировании ионосферы.

4. Создан многофункциональный аппаратный комплекс, обеспечивающий проведение научных исследований отраженных от ионосферы векторных электромагнитных полей. Выполнен цикл экспериментальных исследований при вертикальном зондировании слоя F2 ионосферы и получены статистически достоверные оценки эффективности методов диагностики и селективного возбуждения характеристических волн.

5. Применение методов поляризационной диагностики и селективного возбуждения характеристических волн в ионосфере открывает новые возможности для улучшения качества работы радиотехнических средств, использующих отраженные или проходящие через ионосферу электромагнитные волны декаметрового диапазона. В частности, применение этих методов позволяет создать сеть декаметровой радиосвязи с высокой надежностью, помехозащищенностью и скоростью передачи информации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях:

1. Балинов В. В., Березин Ю. В., Волков О. Ю. Односкачковая ионосферная линия связи с селективным возбуждением характеристических волн. // Известия академии наук, серия физическая. 1999, №12, с. 2433-2436.
2. Балинов В. В., Березин Ю. В., Волков О. Ю. О возможности селективного возбуждения характеристических волн на двухскачковой ионосферной радиотрассе. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2000, №1, с. 22-24.
3. Березин Ю. В., Балинов В. В., Батяшин Е. В., Вылегжанин И. С., Волков О. Ю. Определение вектора скорости воздушного объекта загоризонтым бистатическим радиолокатором с селективным возбуждением характеристических волн в ионосфере. // Вопросы перспективной радиолокации. — М.: Радиотехника, 2003, с. 358-368.
4. Березин Ю. В., Волков О. Ю. Поляризация диагностика и селективное возбуждение электромагнитных волн в анизотропной ионосфере. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2004, №1, с. 53-57. // Вопросы перспективной радиолокации. — М.: Радиотехника, 2003, с. 380-387.
5. Березин Ю. В., Балинов В. В., Волков О. Ю., Бунин А. Л. Экспериментальные исследования эффективности работы адаптивного поляризационного фильтра при приеме двухлучевого электромагнитного поля, отраженного от слоя F2 ионосферы. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2004, №3, с. 53-59. // Вопросы перспективной радиолокации. — М.: Радиотехника, 2003, с. 369-379.
6. Березин Ю. В., Балинов В. В., Волков О. Ю., Давыдов В. А. Алгоритмы управления пространственно-поляризационной диаграммой направленности адаптивной антенной решетки с угловой и поляризационной селекцией радиоволн. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2005, №1, с. 40-49.
7. Березин Ю. В., Балинов В. В., Волков О. Ю., Давыдов В. А. Эффективность алгоритмов управления линией космической радиосвязи, оснащенной адаптивной антенной решеткой с угловой и поляризационной селекцией электромагнитных волн. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2005, №1, с. 50-56.

8. 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. 2005, №1, с. 70-76.

9. Волков О. Ю. Математическая модель ионосферного канала связи с поляризационно-чувствительными коэффициентами передачи. // Известия вузов. Радиофизика. 2011, №1, с. 9-15.

Учебное пособие:

Арсеньян Т. И., Балинов В. В., Волков О. Ю., Сухарева Н. А. Распространение радиоволн в ионосфере. Учебное пособие. — М.: Физический факультет МГУ. 2012, 35 с.

Тезисы докладов:

1. Волков О. Ю. Аппаратура для экспериментальных исследований селективного возбуждения характеристических волн в ионосфере на наклонной радиотрассе. // Труды XI Всероссийской школы-конференции по дифракции и распространению волн, Москва, 1998, с. 194-195.

2. Балинов В. В., Березин Ю. В., Волков О. Ю. О возможности однолучевого приема на двухскачковой ионосферной радиотрассе. // Труды VI Всероссийской школы-семинара "Волновые явления в неоднородных средах", Красновидово, 1998, с. 74-76.

3. Балинов В. В., Березин Ю. В., Волков О. Ю. Моделирование работы односкачковой ионосферной линии связи с применением метода селективного возбуждения характеристических волн. // Труды VII Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн", Красновидово, 1999, т. 2, с. 153-156.

4. Березин Ю. В., Волков О. Ю. Поляризационные характеристики отраженных от ионосферы радиоволн. // Труды VII Всероссийской школы-семинара "Волновые явления в неоднородных средах", Красновидово, 2000, т. 2, с. 90-91.

5. Березин Ю. В., Волков О. Ю. Параллельные каналы передачи информации на ионосферных линиях радиосвязи. // Труды VIII Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн", Звенигород, 2001, т. 2, с. 124-125.

6. Березин Ю. В., Балинов В. В., Волков О. Ю. Перспективы использования метода селективного возбуждения электромагнитных волн в анизотропной ионосфере. // Сборник трудов десятой Международной конференции по

Спиновой электронике и Гировекторной электродинамике, Москва, 2001, с. 189-195.

7. Березин Ю. В., Балинов В. В., Волков О. Ю. Модель поляризационно-чувствительного многолучевого канала связи. Труды молодежной научно-технической конференции "Радиолокация и связь — перспективные технологии", Москва, 2001, с. 32-33.

8. Березин Ю. В., Волков О. Ю. Результаты экспериментальных исследований селективного возбуждения электромагнитных волн в анизотропной ионосфере. // Сборник трудов XII Международной конференции по Спиновой электронике и Гировекторной электродинамике, Москва, 2003, с. 528-530.

9. Березин Ю. В., Балинов В. В., Бунин Ю. В., Волков О. Ю. Поляризационная фильтрация векторного электромагнитного поля в ионосферном канале связи. // Сборник трудов XII Международной конференции по спиновой электронике, Москва, 2003, с. 534-536.

10. Волков О. Ю. Математическая модель ионосферного канала связи с поляризационно-чувствительными коэффициентами передачи. // Труды школы-семинара "Волны-2010", Звенигород, 2010, секция 10, с. 6-7.

11. Волков О. Ю. Математическое моделирование метода селективного возбуждения характеристических волн в ионосферном канале связи. // Электронное издание трудов IV Всероссийской конференции "Радиолокация и радиосвязь", Москва, 2010, с. 462-464.

Заказное. Подписано в печать 17.12.2012. Формат 60x90/16

Бумага офсетная №2. Печать трафаретная

Гарнитура «Таймс»

Усл.печ.л. 1,0

Тираж 110 экз. Заказ №7997

Отпечатано в типографии «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское шоссе, дом 36

+7 (499) 788-78-56

<http://www.autoreferat.ru>