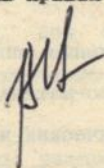


Национальная академия наук Украины  
Институт радиопизики и электроники

На правах рукописи



Иванов Виктор Кузьмич

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УК РАДИОВОЛН НАД МОРЕМ

01.04.03 - радиопизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Харьков - 1994



00778669 (0)

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени институте  
радиофизики и электроники Национальной академии наук Украины.

Официальные оппоненты :

доктор физико-математических наук, профессор

Васс Ф.Г.

доктор технических наук, профессор

Шифрин Я.С.

член-корреспондент РАН, доктор

физико-математических наук, профессор

Арманд Н.А.

Ведущее предприятие : Харьковский государственный университет

Защита состоится 28 июня 1994 г. в 14 часов

на заседании Специализированного совета Д 016.64.01 по защите  
докторских диссертаций в ИРЭ НАН Украины

/310085, г. Харьков, ул. Ак.Проскуры, 12/

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ НАН Украины

Автореферат разослан 25.05 1994 г.

Ученый секретарь Специализированного совета

доктор физико-математических наук

К.А.Лукин

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение условий распространения радиоволн в разных средах, изучение изменений, происходящих с радиосигналом при его распространении, исследование тех параметров среды, которые вызывают изменчивость параметров радиосигнала при его распространении, является важной задачей. Без ее успешного решения невозможно квалифицированное проектирование радиосистем и их эффективная эксплуатация.

В нашей стране обстоятельно изучалось распространение УК радиоволн над сушей. Вследствие большого вклада влажности в значение коэффициента преломления среды, при распространении УК над морем, в отличие от распространения над сушей, должны наблюдаться рефракционные эффекты. Ограниченные исследования были проведены в пятидесятые годы на Балтийском и Черном морях, т.е. в условиях резко отличных от океанических. Поэтому исследования по распространению УК радиоволн в Мировом океане стали актуальной задачей.

В период 1975 - 1990 годов в Институте Радиофизики и Электроники НАН Украины были проведены исследования по изучению условий распространения метровых, дециметровых и сантиметровых радиоволн в ряде районов Мирового океана. Исследования, положенные в основу диссертационной работы, выполнялись в соответствии с координационными планами Научных Советов АН СССР по комплексным проблемам "Распространение радиоволн" и "Статистическая физика" и государственной комплексной программы "Исследование и использование Мирового океана в интересах науки, народного хозяйства и обороны страны".

Научная новизна результатов, полученных в работе, состоит в

том, что в ней впервые:

- Изучены физические процессы, определяющие условия распространения СВЧ радиоволн в пограничном слое атмосферы над морской поверхностью.

- Установлена функциональная и статистическая связь между пространственно-временными параметрами коэффициента преломления атмосферы и характеристиками сигнала в пограничном слое над морем.

- Изучены приподнятые инверсионные слои и разработаны новые методы оценки их параметров.

Практическая значимость работы заключается в том, что по ее итогам разработаны алгоритмы расчета на ЭВМ поля радиоволн на акватории Мирового океана, исходя из данных стандартных гидрометеорологических измерений.

По итогам обработки метеоданных кораблей погоды и исследовательских судов созданы радиоклиматические карты Мирового океана.

Результаты исследований позволили предложить достаточно простые методы диагноза и прогноза условий радио и радиолокационной наблюдаемости. Полученные данные могут и должны использоваться как при проектировании корабельных радиосредств, так и при их эксплуатации в разных районах Мирового океана.

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается применением апробированных методов исследования, хорошим качественным и количественным согласием теоретических расчетов с экспериментальными данными, ясной и убедительной физической интерпретацией наблюдаемых эффектов.

Апробация результатов. Материалы диссертации докладывались на XII, XV и XVI Всесоюзных конференциях по распространению радиоволн, на IV Всесоюзном симпозиуме по миллиметровым волнам, на

Всесоюзной школе по распространению мк и субмм волн в атмосфере, на Всесоюзном совещании по приемному распространению радиоволн и электромагнитной совместимости, на Межведомственном семинаре "Радиометеорологические условия дальнего тропосферного распространения УКВ над поверхностью океана", на Совете по распространению радиоволн АН СССР, в 1993 году работа, основанная на материалах диссертации, принята на Международную конференцию PERS'94. Работы по материалам диссертации также опубликованы в журналах: "Известия вузов. Радиофизика", "Приборы и техника эксперимента", "Доклады АН СССР", "Приборостроение", в Трудах ИРЭ АН Украины и других межведомственных изданиях.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Изучены физические процессы, определяющие условия распространения СВЧ радиоволн в океанических условиях:

- рассмотрено влияние "средних" и флуктуационных характеристик высотного профиля коэффициента преломления атмосферы, а также волнения моря на значение множителя ослабления радиосигнала;

- разработана программа расчета поля СВЧ радиоволн в океанических условиях.

2. Разработан и создан радиорефрактометр для изучения усредненных и флуктуационных характеристик коэффициента преломления атмосферы. Проведены измерения турбулентных характеристик коэффициента преломления атмосферы в Атлантическом и Индийском океанах в различные сезоны года и установлены закономерности их распределения.

3. Показано, что по стандартным гидрометеорологическим измерениям можно рассчитать высоту приводного волновода, M-дефицит и структурную постоянную.

По многочисленным данным кораблей погоды и научно-исследовательских судов создан радиоклиматический атлас Мирового океана, что позволяет:

прогнозировать условия распространения СВЧ радиоволн в заданном районе океана в определенное время года;

выбрать оптимальные параметры радиосредств, предназначенных для работы в заданном районе океана.

4. Проанализированы процессы, определяющие различные условия формирования атмосферных волноводов на внутренних морях и акваториях океанов.

5. Показано влияние приподнятых инверсионных слоев на распространение СВЧ радиоволн. Собраны данные о приподнятых инверсионных слоях в Мировом океане. рассмотрена возможность определять наличие и высоту приподнятой инверсии по данным сигналов, принятых с ИСЗ. Разработан рефрактометр для измерения параметров приподнятых инверсий.

По теме диссертации опубликовано 28 работ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы : Диссертация содержит 206 страниц, включая рис. 78 и 9 таблиц, и состоит из введения, трех глав и заключения и списка цитированной литературы из 80 названий.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, описаны направления исследований, развиваемые в работе, названы полученные автором новые результаты и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе изучены условия распространения УК радиоволн в приземном слое над акваторией Мирового океана.

#### Методика исследований

В измерениях участвовали два судна. На одном из них размещался комплекс передающих устройств на волны 3.2 см, 10 см, 50 см и 2 м, а на втором - приемный измерительный комплекс. При расхождении судов или движении их навстречу друг другу измерялись принятые сигналы. Одновременно на приемном судне с помощью разработанного автором рефрактометра определялся высотный профиль коэффициента преломления атмосферы и его флуктуационные характеристики.

На обоих судах проводились стандартные судовые гидрометеорологические измерения /температура, влажность, давление, скорость ветра на уровне палубы и температура поверхностного слоя воды/, а также аэрологическое зондирование атмосферы.

В сантиметровом диапазоне длин волн сигнал регистрировался, при благоприятных условиях, на дистанциях до 300 км.

Особенностью разработанного рефрактометра является возможность проводить измерения коэффициента преломления одновременно в двух точках, которые могут быть разнесены в пространстве до 20 м, что необходимо как для измерения среднего высотного профиля коэффициента преломления, так и для определения статистических характеристик турбулентности среды.

Под средними значимыми характеристиками в метеорологии обычно понимают характеристики, получаемые усреднением за 30 минут. Поэтому средний высотный профиль коэффициента преломления измерялся с помощью подвижного и неподвижного датчиков рефрактометра по методике, применяемой в метеорологических

исследованиях.

#### Высвечивание энергии из приподнятого волновода

##### а) Влияние флуктуаций коэффициента преломления

Сопоставление результатов первых измерений с расчетами по Фоку показали, что радиосигналы ослабевают с расстоянием больше, чем дают расчеты, и различие возрастает с укорочением длины волны.

Причиной такого расхождения следует считать влияние флуктуаций коэффициента преломления и волнение моря, вызывающие рассеяние энергии и ее высвечивание из волновода.

Если в закрытом волноводе рассеяние энергии на неоднородностях приводит лишь к перераспределению энергии между гармониками, то в случае открытого волновода, каким является приводный волновод, рассеяние вызывает преобразование основной волны в сильно затухающие моды, энергия которых уходит в верхние слои атмосферы. Вследствие этого хорошо захваченная за счет регулярной рефракции волна приобретает значительное погонное затухание, связанное с сильным высвечиванием слабозахваченных модов.

В тропосферном волноводе слабо затухают лишь первые моды, распространяющиеся под малыми углами к поверхности. Их число определяется высотой волновода  $H_0$  и дефицитом  $\Delta M$ . Чаще всего эти величины таковы, что для УКВ радиоволн приповерхностным волноводом захватывается только первый мод. Энергия остальных быстро убывает с дистанцией и на достаточно больших расстояниях вклада в интенсивность сигнала внутри волновода практически не дает.

Для теоретического объяснения наблюдаемых дистанционных зависимостей функции ослабления в условиях волноводного

распространения над морем был проведен учет многократного рассеяния в рамках уравнения переноса излучения, из решения которого следует, что

$$V(R) \approx e^{-(\gamma_0 + \gamma_1)R}; \quad \gamma_1 = \frac{0,26 k^{3/2} C_{\epsilon_1}^2}{\alpha^{5/3} \epsilon_N^{5/3}}$$

Здесь  $R$  - дистанция,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\epsilon_N$  - вертикальный градиент регулярной составляющей диэлектрической проницаемости,  $C_{\epsilon_1}^2$  - структурная постоянная ее флуктуаций,  $\alpha$  - параметр анизотропии

неоднородностей,  $\alpha = \frac{L_{\parallel}}{L_{\perp}}$  где  $L_{\parallel}$  - вертикальный размер неоднородностей, а  $L_{\perp}$  - горизонтальный размер.

Таким образом, для оценки потерь сигнала, обусловленных турбулентностью коэффициента преломления, необходимо знать статистические характеристики этой турбулентности. Такие измерения проводились во всех экспедициях, как одновременно с измерениями поля прямого сигнала, так и независимо от них. Это позволило получить большой объем данных в разных районах Мирового океана в различные сезоны года.

#### Влияние волнения моря

Для вычисления ослабления радиоволн в приводном волноводе, обусловленного когерентным рассеянием на взволнованной поверхности моря, следует учесть, что захваченная мода имеет пространственно-периодическую структуру, образующуюся за счет многократного пространственного поворота луча и переотражения его морской поверхностью. В том случае, когда для захваченных мод перерассеяние из моды в моду отсутствует, величину полного

ослабления на веволнованной поверхности для каждой захваченной моды можно вычислить как произведение средних коэффициентов отражения на каждом переотражении. Количество актов переотражения  $K_m$  определяется отношением длины трассы распространения  $R$  к пространственному периоду  $R_m$  и зависит от параметров вертикального профиля коэффициента преломления в приводном слое.

Для погонного ослабления "m"-го мода получено следующее выражение

$$\gamma_m = 2 k^2 K_m \psi_m^2 \sigma^2$$

где  $\psi_m$  - угол скольжения "m" мода

для спектра морского волнения в форме Пирсона-Московица

$$\sigma = 0,005337 u^2$$

где  $u$  - скорость ветра.

Влияние рассеяния веволнованной поверхностью моря в волноводах испарения радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазонов весьма существенно, особенно при больших скоростях ветра. Для волны 8 мм уже при скоростях ветра 6 м/с затухание сигнала вследствие рассеяния на морской поверхности фактически компенсирует эффект загоризонтного распространения, обусловленный существованием приводного волновода.

#### Измеренные и рассчитанные значения множителя ослабления сигнала

В проведенных экспедициях были получены обширные данные о множителях ослабления сигналов на волнах 10 см и 3,2 см. Синхронно с измерениями поля прямого сигнала измерялись высоты приводных волноводов  $N_o$ ,  $N$  - дефициты, структурные постоянные  $C_N$  и коэффициенты анизотропии  $\alpha$ , а также регистрировалось волнение

моря в баллах. Это позволило :

- сопоставить экспериментально измеренные значения затухания сигналов с расчетом.

- оценить влияние  $C_N$  и  $\alpha$  на величину дополнительного затухания, вызванного высвечиванием энергии из приводного волновода.

- оценить влияние высоты волновода испарения.

- сравнить затухание сигналов на волнах 10 см и 3.2 см.

Расчеты множителей ослабления выполнены с использованием билинейной модели МСНД профиля.

Проведенные сопоставления показали, что рассчитанные и измеренные значения множителя ослабления хорошо согласуются на всем протяжении трассы, как при слабой, так и при достаточно интенсивной рефракции, если высоты корреспондирующих пунктов превышают 10 м. В случае низких корреспондирующих пунктов (4.5 - 5.5 м) согласие экспериментальных зависимостей с рассчитанными получается только при значениях коэффициентов анизотропии несколько заниженных по сравнению с измеренными. По-видимому, при малых высотах корреспондирующих пунктов возрастает роль высвечивания энергии за счет волнения моря.

Из гистограммы распределения коэффициентов анизотропии  $\alpha$ , построенной по измерениям, проведенным в разных районах Мирового океана в разные сезоны года, следует, что наиболее вероятные значения  $\alpha$  лежат в пределах 0.9 - 0.12. Такое изменение  $\alpha$  приводит к изменению дополнительного затухания сигнала на расстоянии 100 км примерно на 3 дБ. Это позволило, не проводя измерений флуктуационных характеристик коэффициента преломления и ограничиваясь только определением значений  $N_0$  и  $\Delta N$ , выбирать  $\alpha$

равным 0.07 - 0.09 в зависимости от степени волнения моря, рассчитывать зависимость множителя ослабления от расстояния, допуская при этом ошибку, не превышающую 3 дБ на 100 км.

#### Результаты метеорологических исследований

Основными задачами метеорологических исследований являлись:

- исследование пространственно-временной изменчивости параметров приводного слоя в океанах;

- выяснение возможности, на основании теоретической модели приводного слоя атмосферы, расчета высоты приводного волновода по данным стандартных гидрометеорологических измерений.

Стандартные гидрометеорологические измерения проводятся на всех судах гидрометслужбы, статистика их очень велика, в связи с чем и возник вопрос о возможности использования этих данных для составления радиоклиматических карт океанов.

Стандартные гидрометеорологические измерения проводились нами на обоих судах в стандартные синоптические сроки 4 раза в сутки штатными метеоприборами. Кроме того на судне, где располагались приемный измерительный комплекс и рефрактометр, стандартные гидрометизмерения проводились синхронно с рефрактометрическими.

Анализ таких измерений, проведенных в Атлантическом и Индийском океанах, позволил установить, что:

- высотные профили приведенного коэффициента преломления достаточно хорошо аппроксимируются линейно-логарифмическим законом,

- диапазон изменения высот  $H_0$  приводных волноводов в большинстве случаев не превышает 20 м. Лишь в некоторых тропических зонах Атлантического океана значения  $H_0$  достигали 30 - 36 м. В большинстве районов наибольшую повторяемость имеют

значения от 10 до 14 м.

- характеристики приводных волноводов в отношении пространственных и временных вариаций достаточно устойчивы. Высотные профили приведенного коэффициента преломления, измеренные одновременно на обоих судах, расстояние между которыми 150 и более километров, совпадают в пределах ошибок измерений.

Таким образом, исходные положения теории фока, а именно : линейно-логарифмический вид профиля приведенного коэффициента преломления и его неизменчивость по трассе луча в условиях океана удовлетворяются, если трасса луча не пересекается атмосферными фронтами и океаническими течениями.

Проверка возможности определения высоты приводного атмосферного волновода исходила из положений теории подобия Монина-Обухова.

Исходя из теории приводного слоя атмосферы, можно записать систему уравнений, из решения которой будут получены значения высоты приводного волновода  $N_0$  (как высоты, на которой достигается минимум) по данным метеоизмерений на двух уровнях.

Сравнение высот волноводов  $N_{0D}$ , определенных из рефрактометрических измерений, и рассчитанных  $N_{0P}$  по данным одновременно проведенных стандартных гидрометеорологических измерений, показало, что последние при этом систематически завышены. Поиск причин расхождения привели к попытке подбора значения константы  $\alpha$  в теории Монина-Обухова.

Из всего массива одновременных рефрактометрических и стандартных гидрометеорологических измерений была произведена выборка, отвечающая следующим требованиям :

- измерения проведены вдали от берегов (более 500 км).

- профили  $MND$ , измеренные рефрактометром, хорошо соответствовали линейно-логарифмическим и обладали малым разбросом точек, измеренных на разных высотах. Таких профилей отобрано 121. Для каждого отобранного случая был проведен расчет высоты волновода  $N_{op}$  по данным стандартных гидрометеозмерений в зависимости от значения параметра  $\alpha_0$  и определялась разность

$$\delta N_{oi}(\alpha_0) = N_{o3i} - N_{opi}(\alpha_0)$$

характеризующая ошибку расчета высоты волновода. Увеличение значения  $\alpha_0$  приводило к уменьшению ошибки расчета высоты волновода. Минимальная ошибка оказалась при значении  $\alpha_0 = 300$  м, которое и использовалось нами в последующих расчетах высот волноводов по стандартным гидрометеорологическим измерениям.

В последующих экспедиционных исследованиях строились корреляционные графики рассчитанных и измеренных значений. Коэффициент корреляции оказался равным 0.84, средняя абсолютная ошибка - около 2 м, относительная погрешность - примерно 20 %.

Полученные результаты позволили использовать данные кораблей погоды для составления радиоклиматических карт Мирового океана.

Во ВНИГМИ - МЦД была заимствована информация о стандартных гидрометеорологических измерениях по Мировому океану за период с 1982 по 1989 годы. Общее число наблюдений превысило 2 млн. По этим данным были рассчитаны высоты волноводов и распределены по  $10^\circ$  квадратам долготы и широты и каждый квадрат по четырем сезонам. Обеспеченность данными каждого квадрата и сезона разная: от 20 до более 2000. Полученные данные введены в память ЭВМ. При необходимости возможна быстрая выборка информации.

Возможность определения высоты волновода испарения по

стандартным гидрометрическими измерениями позволила предложить ряд оперативных методов диагноза и прогноза радиолокационной наблюдаемости корабельных РЛС, сопоставить дальности радиолокационной наблюдаемости для РЛС разных диапазонов, потенциалов и высот антенн.

Зная гистограммы распределения высот волноводов для заданного района океана и располагая данными о волнении моря, были рассчитаны 44 гистограммы дальности действия РЛС 3-х и 10-ти сантиметрового диапазонов в зависимости от высот антенн, при которых загоризонтное наблюдение целей наиболее вероятно.

Для всех районов Мирового океана, за исключением Северной Атлантики, оптимальные высоты антенн РЛС 3-х сантиметрового диапазона волн не превышают 15 м.

Построив по гистограммам высот волноводов в Северной Атлантике вероятности загоризонтного наблюдения целей для РЛС, работающих на волнах 10, 3 см и 8 мм было показано, что оптимальными являются РЛС трехсантиметрового диапазона волн. Результаты расчета сильно зависят от данных о волнении моря.

Проведенные нами исследования по распространению радиоволн УКВ диапазона в Мировом океане показали, что :

- при распространении СВЧ радиоволн над морем поле формируется в результате совместного действия различных механизмов - регулярной рефракции или атмосферного волновода, рассеяния на турбулентных флуктуациях коэффициента преломления атмосферы, рассеяния на морском волнении, дифракции и тропосферного рассеяния;

- основными параметрами, определяющими значение декремента затухания сигнала, является : высота волновода  $N_0$  и  $M$  - дефицит.

структурная постоянная и коэффициент анизотропии неоднородностей, балл волнения моря;

- при некоторой коррекции универсальной константы  $\alpha_0$  в теории подобия Монина-Обухова значение высоты приводного волновода  $N_0$ ,  $M$  - дефицита и структурной постоянной можно рассчитать с достаточной точностью из стандартных гидрометеорологических измерений.

В результате исследований :

- разработаны и изготовлены рефрактометры, позволившие исследовать коэффициент преломления атмосферы, его неоднородности и параметры турбулентности;

- на основании измерений, проведенных в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах, составлены гистограммы значений коэффициента анизотропии в приводном слое, которые могут быть использованы при расчетах множителей ослабления сигналов СВЧ диапазона;

- многочисленные данные кораблей погоды и судовых метеонаблюдений использованы для построения карт радионаблюдаемости в различных районах Мирового океана; создан банк данных о гистограммах высот волноводов в разных точках Мирового океана в различные сезоны года;

- используя материалы банка данных, были рассчитаны оптимальные частоты корабельных РЛС и оптимальные высоты антенн РЛС при их работе в Северной Атлантике;

- разработана программа расчета на ЭВМ множителей ослабления поля УКВ радиоволн в приводном слое атмосферы по данным стандартных гидрометеорологических измерений, значений коэффициента анизотропии и степени волнения моря;

- предложены методы диагноза и прогноза радио и радиолокационной наблюдаемости корабельных РЛС.

Во второй главе диссертации качественно рассмотрена физика образования приводных волноводов на внутренних морях и в прибрежных районах океанов. В отличие от волноводов испарения, возникающих вдали от берегов под влиянием солнечной радиации, волноводы, возникающие на внутренних морях и в прибрежных районах океанов, являются адвективными. Они определяются, главным образом, атмосферными фронтами, распространяющимися над морской поверхностью, а также бризовыми эффектами.

Как известно, вид  $MN$  профиля определяется, главным образом, вертикальным распределением водяных паров и зависит от скорости испарения и степени турбулентности атмосферы. В свою очередь, скорость испарения зависит, главным образом, от степени насыщения воздуха водяными парами и скорости ветра. Степень турбулентности атмосферы зависит от шероховатости поверхности, скорости ветра и вертикального градиента температуры.

Исходя из этих положений, рассмотрены процессы, возникающие в приводном слое при распространении над морем различных воздушных масс. Показано, что, если теплая воздушная масса с малой относительной влажностью перемещается с континента на море, возникает условия для образования волновода. Высоты этих волноводов могут значительно превышать волноводы испарения в океане. В ряде измерений с помощью рефрактометра, который поднимался вертолетом, нами регистрировались высоты волноводов, превышавшие 50 м. Характер  $M$  - кривых изменяется с удалением от берега. Процесс протекает следующим образом. Малоувлажненный воздух, проходя над морской поверхностью, увлажняется вследствие испарения с последней, причем его абсолютная и относительная влажность падают с высотой. Температура воздуха вследствие турбулентного обмена

теплом с водой падает, причем в нижних слоях воздуха это падение больше, чем в верхних, поэтому образуется инверсия температуры. По мере удаления от берега под влиянием ветра перемешивание слоев воздуха, находящегося на разных высотах, приводит к постепенному ослаблению инверсии и выравниванию упругости водяных паров.

Таким образом, при теплых и малоувлажненных воздушных массах береговой ветер приводит сначала к возникновению атмосферного волновода, а на значительном удалении от берега — к его ослаблению вследствие турбулентного перемешивания. С усилением ветра расстояние, на котором выравнивается распределение температуры и влажности, уменьшается.

При холодной малоувлажненной воздушной массе, перемещающейся с берега, характер процесса будет таким же, однако расстояние, на котором произойдет выравнивание температуры и влажности с высотой, уменьшается.

Если над морем перемещаются влажные воздушные массы, явление сверхрефракции не наблюдается независимо от направления ветра. Полученные выводы подкреплены измерениями зависимости от расстояния поля радиоволн 10 см и 3.2 см.

Приведенные соображения о физических процессах, происходящих при распространении над внутренними морями или в прибрежных районах океанов разных воздушных масс, объясняют специфику распространения СВЧ радиоволн над внутренними морями.

Исходя из этих положений, была разработана методика оценки балла радиолокационной наблюдаемости, нашедшая экспериментальное подтверждение.

Во второй главе диссертации рассмотрено также влияние атмосферных волноводов на частотную и временную когерентности сигнала.

В связи с использованием сложных сигналов с большой базой и схем "сжатия" импульса возник вопрос о влиянии канала связи на амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики сигнала с большой базой.

При волноводном распространении ограничения на базу сигнала возникают вследствие зависимости постоянной распространения от частоты, а если волновод многомодовый, то и за счет многолучевости. Изучение полосовых свойств канала связи при наличии волноводов были проведены на Черном море на волне 3,2 см. Измерялись частотно-временные корреляционные функции.

Располагая высокостабильным источником сигнала несущей частоты, был создан ряд дискретных частот, когерентных по отношению к несущей частоте. В приемном устройстве с помощью фазовых детекторов фазы принятых сигналов сравнивались с фазой опорного сигнала. В результате на выходе измерительного устройства была получена информация о вариациях фазы сигнала на каждой излученной частоте, о временной когерентности сигналов и разности изменений электрических длин пути в зависимости от частотных разносов.

Исследования, проведенные на загоризонтных трассах, в условиях повышенной рефракции и сверхрефракции показали, что каналы связи в этих условиях могут обеспечить прохождение широкополосных сигналов большой длительности, т.е. влиянием среды на разрешающую способность РЛС можно пренебречь.

В третьей главе диссертации рассмотрены приподнятые инверсионные слои. Как показали экспериментальные исследования ИРЭ АН Украины, приподнятые инверсионные слои являются причиной возникновения так называемых "радиоэ" на трассах "земля-самолет". Они же являются наиболее частой причиной аномально высоких

уровней сигнала за горизонтом.

Влияние приподнятых инверсий на распространение УКВ радиоволн рассмотрено методами геометрической оптики. При достаточно интенсивной инверсии лучи, входящие в слой под малыми углами, испытывают заворот, что приводит к пропаданию сигнала над инверсионным слоем, начиная с некоторого угла места. По этой причине возникают "радиотомы".

Характер искривления лучей, вошедших в инверсионный слой, зависит не только от его толщины и глубины инверсии, но и от наклона самого слоя. Чем меньше угол входа лучей в слой, тем меньше требования к параметрам инверсионного слоя, необходимые для заворота лучей и возникновения "радиотомы". Пространственная неоднородность параметров приподнятых инверсионных слоев и наклонов их нижних границ приводит к появлению замираний сигнала разной глубины и длительности на трассе "земля-самолет", если трасса сигнала пересекается приподнятой инверсией.

Отражение радиосигнала от нижней границы приподнятого инверсионного слоя при малом угле скольжения приводит к загоризонтному распространению УКВ радиоволн. Автором наблюдался сигнал ИСЗ системы "TRANZIT" при нахождении ИСЗ за горизонтом.

Таким образом, к диагнозу радиолокационной наблюдаемости надводных целей необходимо добавить диагноз радиолокационной наблюдаемости воздушных целей. Он сводится к констатации наличия или отсутствия приподнятого инверсионного слоя. Опыт показывает, что дальность действия РЛС увеличивается для целей, летящих под инверсионным слоем до 2-3 радиогоризонтов  $R_r$  и снижается для целей, летящих над инверсионным слоем до  $0.7 R_r$ .

При зондировании пограничного слоя атмосферы с помощью аэро-

зонда, вследствие инерционности датчиков и большой скорости подъема зонда, параметры инверсионного слоя искажаются, а слабые инверсионные слои остаются незамеченными. Автором был разработан специальный рефрактометр для более подробного исследования параметров приподнятых инверсий. Такие исследования были проведены на Черноморском побережье. Они показали, что параметры инверсионных слоев неустойчивы, как во времени, так и в пространстве. Была также предпринята попытка определения инверсионных слоев по вариациям уровня сигнала ИСЗ доплеровской радионавигационной системы "TRANZIT". ИСЗ этой системы находятся на почти полярных и почти круговых орбитах высотой 1100 км. Передатчики ИСЗ непрерывно излучают два когерентных сигнала на несущих частотах 150 и 400 МГц. Спиральная антенна приемника была установлена на высоте 20 м над уровнем моря. При изменении угла возвышения  $\theta$  источника наблюдается характерная двухлучевая интерференционная структура принятого сигнала. Однако, в ряде случаев наблюдается сильная квазипериодическая модуляция (СКМ) с амплитудой до 20 дБ, "период" которой гораздо меньше периода основной интерференционной структуры. Глубина модуляции и период изменяются от наблюдения к наблюдению. Было предположено, что квазипериодическая модуляция возникает потому, что на приемную антенну попадает излучение, отразившееся от приподнятого инверсионного слоя. Если такой слой существует, то возможно наличие двух дополнительных лучей, которые придут на антенну, однократно отразившись от слоя. Из расчета интенсивности принимаемого сигнала можно определить высоту  $H_i$  инверсионного слоя

$$H_i = \frac{H_a \nu_u}{\nu_m}$$

где  $H_a$  - высота антенны,  $\nu_u$  - период интерференционной структуры,  $\nu_m$  - период модуляции.

Во всех случаях, когда наблюдалась модуляция и одновременно с помощью рефрактометра измерялся профиль  $K(h)$ , значения  $H_a$  совпадали с высотами нижних границ приподнятых инверсионных слоев.

### Основные результаты и выводы

Основные результаты работы сводятся к следующему :

1. Изучено распространение УК радиоволн в приводном слое атмосферы над океаном. Исследования проведены в разных районах Атлантического, Индийского и Тихого океанов в различные сезоны года.
2. Установлено влияние флуктуаций коэффициента преломления атмосферы и волнения моря на погонное ослабление радиосигнала.
3. Показано, что множитель ослабления сигнала определяется значениями высоты волновода,  $M$  - дефицитом, структурной постоянной и коэффициентом анизотропии неоднородностей, а также баллом волнения моря.
4. Проведены измерения турбулентных флуктуаций коэффициента преломления атмосферы над океаном в разные сезоны года. Построены гистограммы коэффициента анизотропии неоднородностей.
5. Показано, что, изменив значение одной из универсальных констант в теории пограничного слоя атмосферы Монина-Обухова, можно по данным стандартных гидрометеорологических измерений рассчитать высоту приводного волновода,  $M$  - дефицит и структурную постоянную. Это позволяет, не включая РЛС, определить дальность радиолокационной наблюдаемости целей на момент гидрометеорологических измерений и

на ближайшее время.

6. По многолетним данным кораблей погоды и исследовательских судов рассчитаны распределения высот атмосферных волноводов в Мировом океане в различные сезоны года и построены радиоклиматические карты Мирового океана. Данные радиоклиматических карт занесены в банк данных.

7. Данные радиоклиматических карт, дополненные сведениями о волнении, использованы для расчета оптимальных частот корабельных РЛС и высот их антенн при работе в заданном районе океана.

8. Показано, что в прибрежных районах океанов и на внутренних морях условия распространения УК радиоволн определяются, главным образом, характером воздушных масс, распространяющихся над морем.

9. Рассмотрены физические процессы, возникающие в приземном слое над морем при прохождении воздушных фронтов. Показано, что в отличие от океанических условий, высоты возникающих атмосферных волноводов могут достигать нескольких десятков метров и их значение изменчиво в пространстве.

#### ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в работах :

1. Смирнов Ю.Н., Иванов В.К., Кошель А.Н. Дифференциальный рефрактометр для измерения флуктуаций коэффициента преломления атмосферы // Приборостроение. - Киев: Техника. - 1983. - № 35. - С. 58-61.

2. Влияние турбулентных пульсаций показателя преломления на ослабление поля в тропосферном волноводе / Иванов В.К., Фукс И.М., Фрейлихер В.Д. и др. - В сб. Труды ИРЭ АН УССР. - 1980. -

т.26.- С.18 - 30.

3.Иванов В.К., Кукушкин А.В., Островский И.Е. Оценка дальности радиолокационной наблюдаемости морских целей корабельными радиолокационными станциями десятисантиметрового диапазона по данным гидрометеорологических измерений. - В кн.: XIII Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тез. докладов. - Горький, 1981. - С.267-270.

4.Флуктуации показателя преломления атмосферы в пограничном слое над океаном / Дыбский А.В., Иванов В.К., Кивва Ф.В. и др. - В кн.: IV Всесоюзный симпозиум по миллиметровым и субмиллиметровым волнам. Тез. докл. - Харьков, 1984. - т.3. - С.5-6.

5.Иванов В.К., Островский И.Е. Определение дальности действия корабельных РЛС. - В сб.:Труды ИРЭ АН УССР. - 1982. - т.28. С.218-224.

6. Расчет дальности действия корабельных радиолокационных станций по надводным целям /Велоброва М.В., Иванов В.К., Кукушкин А.В. и др. - В сб.:Труды ИРЭ АН УССР. - 1982. - т.28. С.218-224.

7. Оперативный метод определения фактической дальности радиолокационной наблюдаемости надводных целей корабельными радиолокационными станциями десятисантиметрового диапазона /Воцман В.В., Иванов В.К., Кивва Ф.В. и др. - В сб.:Труды ИРЭ АН УССР. - 1983. - т.29. С.165-174.

8. Статистические характеристики флуктуаций коэффициента преломления атмосферы в приводном слое / Велоброва М.В., Иванов В.К., Кивва Ф.В. и др. - Харьков, 1986. - 37 с. - (Препринт/ АН УССР, ИРЭ; N 324).

9. Флуктуации показателя преломления атмосферы в пограничном слое над океаном / Дыбский А.В., Иванов В.К., Кивва Ф.В. и др. - В кн.: IV Всесоюзный симпозиум по миллиметровым и субмиллиметровым волнам. Тез. докл. - Харьков, 1984. - т.3. - С.5-6.

10. Радио и радиолокационная наблюдаемость над морем в СВЧ диапазоне / А.Л. Андреев, В.К. Иванов, И.Е. Островский и др. - В кн. IV Всесоюзный симпозиум по мм и см мм волнам. Тез. докл., Харьков, 1984. - С.7 - 8.

11. В.К. Иванов, А.Н. Кошель, Ю.Н. Смирнов Рефрактометр для измерения структуры пограничного слоя атмосферы. В кн.: Распространение и дифракция радиоволн мм и сммм диапазонов. - Киев, Наукова думка. - 1984. - С. 72 - 76.

12. Иванов В.К. Физические основы оперативного диагноза и прогноза радиолокационной наблюдаемости надводных целей : Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. - Харьков : ИРЭ АН УССР, 1975, 177 с.

13. Влияние высоты антенны РЛС на дальность радиолокационной наблюдаемости надводных целей / А.Л. Андреев, В.К. Иванов, Ф.В. Кивва и др. - В сб. Труды ИРЭ АН УССР. - 1987. - т. 32. - С.11 - 19.

14. О влиянии волновода испарения на распространение радиоволн СВЧ диапазона над морем / Н.А. Дорфман, В.К. Иванов, Ф.В. Кивва и др. - В кн. XV Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тез. докладов. - Алма-Ата, 1987. - С.276-277.

15. Андреев А.Л., Иванов В.К., Островский И.Е. Метод оперативной оценки дальности наблюдаемости надводных целей корабельными РЛС десятисантиметрового диапазона. - В кн.: XV Всесоюзная

конференция по распространению радиоволн. Тез. докл. - Алма-Ата, 1987. - С.86-87.

16. Оценка флуктуационных параметров атмосферы, определяющих высвечивание электромагнитной энергии из атмосферного волновода /А.Л.Андреев, М.В.Белоброва, В.К.Иванов и др.- В кн. : Распространение радиоволн мм и смм диапазонов.- Харьков, АН УССР, 1989.- С.5 - 19.

17. В.К.Иванов, Ф.В.Кивва, А.Н.Кошель. Рефрактометрический комплекс для измерения коэффициента преломления и метеорологических характеристик атмосферы в пограничном слое // Приборостроение. - Киев: Техника, 1989. - N 41. - С.28-33.

18. В.К.Иванов, В.Н.Лановой, В.Д.Фрейлихер // Изв. вузов. Радиофизика.- 1989.- т.32, N 2.- С.255 - 256.

19. Методика оценки распространения СВЧ радиоволн в пограничном слое атмосферы / М.В.Белоброва, В.К.Иванов, А.В.Кукушкин и др. В кн. : III Всесоюзная школа по распространению мм и смм волн в атмосфере. Тез. докладов. - Харьков, 1989.- С.205-212.

20. Влияние приподнятого инверсионного слоя на уровень поля на трассе Земля-Воздух /А.Л.Андреев, М.В.Белоброва, В.К.Иванов и др.- В кн. : Всесоюзное совещание по приземному распространению радиоволн и электромагнитной совместимости. Тез. докладов. Улан-Удэ, 1990.- С.21-22.

21. Сравнение значений радиометеорологических параметров приземного слоя атмосферы, определенных различными методами /А.Л.Андреев, В.К.Иванов, А.Н.Кошель и др. - В кн. : Всесоюзное совещание по приземному распространению радиоволн и электромагнитной совместимости. Тез. докладов. Улан-Удэ, 1990.- С.21-22.

22. Об одной возможности определения параметров приподнятой инверсии / А.Н.Богатуров, В.К.Иванов, А.С.Гурвич и др.- В кн. :

- XVI Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тез. докладов. Часть II.- Харьков, 1990.- С. 71.
23. О возможности определения отражающих слоев в тропосфере над морем по вариациям уровня радиосигналов ИСЗ / Иванов В.К., Гурвич А.С. и др. // Доклады АН СССР. - 1990. - т.315, N 4. - С.830-834.
24. Пакет программ для диагностики условий распространения ультракоротких радиоволн над морем/ М.В.Белоброва, В.К.Иванов, А.В.Кукушкин и др.- Изв. вузов. Радиофизика.- 1990.- т.33, N 12.- С. 1315 - 1319.
25. Распространение радиоволн УК диапазона над Мировым океаном / В.К.Иванов, Ф.В.Кивва, И.Е.Островский и др.- В сб.: Радиофизические исследования Мирового океана.- ИРЭ АН Украины.- С.109 - 134.
26. В.К.Иванов, Ф.В.Кивва, И.Е.Островский. Распространение радиоволн над Мировым океаном.- В кн.: XVII конф. по распространению радиоволн. Тез. докладов.- Ульяновск.- 1993.- С.201 - 203.
27. В.К.Иванов, Ф.В.Кивва, И.Е.Островский. Радиоклиматические карты Атлантического океана.- В кн.: XVII конф. по распространению радиоволн. Тез. докладов.- Ульяновск.- 1993.- С.207 - 208.
28. В.К.Иванов, Л.С.Панкратов, А.А.Снурников. Радиофизические исследования в Охотско-Тихоокеанском регионе.- В кн.: XVII конф. по распространению радиоволн. Тез. докладов.- Ульяновск.- 1993.- С.221.

Ав 30.405

Научное издание

ИВАНОВ Виктор Кузьмич

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УК РАДИОВОЛН НАД МОРЕМ

Подп. в печ. 10.05.94. Формат 60x84/16.

Бум. офс. офс. печ. Усл. печ. л. 1,8. Уч.-изд. л. 1,9.

Тираж 100 экз. Зак. 35. Бесплатно

---

Ротапринт ИРЭ НАН Украины

Харьков-85, ул. Академика Проскуры, 12