

В. К. Иванов, Ю. В. Левадний, В. Н. Шаляпин

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: ivanov@ire.kharkov.ua*

Рассмотрены вопросы распространения радиоволн см и мм диапазонов над морем в прибрежных районах. Волноводы, возникающие в прибрежных районах, в основном являются адвективными с изменяющимися по мере удаления от берега параметрами (высотой волновода и M -дефицитом), а их мощность значительно превосходит мощность волноводов испарения. Проведены расчеты структуры поля в зоне прямой видимости и полутени при различных метеорологических условиях методом численного решения параболического уравнения с пошаговым разбиением и использованием преобразования Фурье. Сопоставление расчетов с экспериментальными данными демонстрирует хорошее согласие. В результате исследований показано, что интерференционная структура поля в см диапазоне является устойчивой и ее искажения происходят только при очень сильной рефракции. В мм диапазоне радиоволн искажение интерференционной структуры возникает даже при слабой рефракции. При сильной рефракции и одновременном изменении радиометеорологических параметров вдоль трассы распространения происходит разрушение интерференционной структуры. Ил. 12. Табл. 1. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: параболическое уравнение, прибрежная зона, атмосферный волновод.

В последние годы происходит интенсивное освоение мм диапазона радиоволн в радиолокации, радиосвязи, дистанционном зондировании и т. д. В первую очередь это связано с повышением разрешающей способности и помехозащищенности при наблюдении низколетящих целей, обеспечением электромагнитной совместимости радиотехнических систем, уменьшением их габаритов и веса, а также созданием широкополосных линий связи. Несмотря на значительное ограничение работы радиотехнических систем мм диапазона по дальности вследствие ослабления радиоволн в осадках и газах атмосферы, они находят все более широкое применение. Вопросы ослабления радиоволн в осадках и газах атмосферы довольно хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально [1, 2].

Исследование условий распространения радиоволн мм диапазона ведется с 1950-х гг. [3–8]. В основном, в работах исследуется влияние многолучевого распространения радиоволн на характеристики радиолокационных систем. Наибольшее внимание уделяется вопросам измерения точности углов прихода, времени запаздывания и угломерных характеристик радиотехнических систем. В работе [5] проанализированы, систематизированы и обобщены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в мире, а также представлены основные количественные оценки и эмпирические закономерности.

Расчеты поля прямого сигнала методами геометрической оптики (интерференция прямого и отраженного лучей) не репрезентативны при наличии мощных приземных волноводов или приповерхностных инверсионных слоев. В работе [9] предпринята попытка оценки поля в зоне интер-

ференции с помощью параболического уравнения. В области интерференции и полутени основной вклад в уровень поля дает большое количество мод высших порядков, которые затухают с расстоянием, но не являются локализованными в волноводном канале. Определение комплексных постоянных распространения нелокализованных мод представляет собой довольно сложную вычислительную задачу, тем более что сумма этих мод сходится лишь за счет интерференции экспоненциально больших по абсолютной величине членов, поэтому необходимо использовать другие методы. В частности, в освещенной области наиболее эффективным оказывается метод стационарной фазы. В работе [10] в освещенной области при наличии инверсий интенсивность поля рассчитывается именно этим методом, применяемым непосредственно к интегралам по траекториям.

Описанные методы не используются для оценки поля в прибрежной зоне, где, как правило, коэффициент преломления атмосферы изменяется как с высотой, так и с дистанцией от берега, т. е. существует неоднородность параметров коэффициента преломления вдоль трассы распространения [11].

В последние годы широкое развитие и применение получил метод численного решения параболического уравнения с пошаговым разбиением и использованием преобразования Фурье, позволяющий оценивать уровни сигналов с учетом неоднородности коэффициента преломления по высоте и вдоль трассы распространения.

1. Численное решение параболического уравнения методом пошагового разбиения. В двухмерной декартовой системе координат с осями x и z , направленными вдоль дальности и высоты, стандартное параболическое уравнение

для электрической (горизонтальная поляризация) или магнитной (вертикальная поляризация) компонент поля имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial u}{\partial x} + k^2 [n^2 - 1]u = 0. \quad (1)$$

Здесь $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число в вакууме; λ – длина волны; n – коэффициент преломления; $u(x, z) = \psi(x, z)e^{-ikx}$, где ψ – электрическая или магнитная компонента поля.

Метод пошагового разбиения с использованием преобразования Фурье для решения уравнения (1) был предложен в 1973 г. Хардином и Таппертом в задачах подводной акустики. Общий вид решения этим методом выглядит следующим образом [12]:

1. Разложение волны в угловой спектр с помощью преобразования Фурье.

2. Умножение на множитель, связанный с расходимостью в свободном пространстве на одном шаге вычисления.

3. Обратное фурье-преобразование в координатное представление.

4. Умножение на дополнительный множитель, учитывающий набег фазы в среде (рефракция).

$$u(x + \Delta x, z) = e^{-ikm(x, z)\frac{\Delta x}{2}} F^{-1} \left(e^{ik\sqrt{k^2 - p^2}} F[u(x, z)] \right), \quad (2)$$

где F и F^{-1} – прямое и обратное преобразования Фурье; Δx – шаг по дистанции; $p = k \sin(\theta)$ – функция угла распространения θ ; $m(x, z) = n(x, z) - 1 + z/a_e$ – модифицированный коэффициент преломления; a_e – радиус Земли.

Вид преобразования Фурье в выражении (2) определяется граничными условиями. При граничных условиях Дирихле используется синусное преобразование, а при граничных условиях Неймана – косинусное преобразование. Для поверхностей с конечной проводимостью и учета морского волнения используется линейная комбинация синусного и косинусного преобразований Фурье [13].

Отражение радиоволн от взволнованной морской поверхности может быть учтено в рамках метода касательной плоскости [14]. Для этого используется понятие эффективного коэффициента отражения, который выражается как произведение коэффициента отражения Френеля R и множителя ρ , учитывающего ослабление когерентной компоненты поля из-за неровности морской поверхности:

$$R_{eff} = \rho R. \quad (3)$$

Для модели Миллера, Брауна и Вега [18] коэффициент ρ имеет вид

$$\rho = \exp\left(-\frac{1}{2}(2p\sigma_\xi)^2\right) J\left(\frac{1}{2}(2p\sigma_\xi)^2\right), \quad (4)$$

где σ_ξ – среднеквадратичное отклонение высоты морской поверхности; J – функция Бесселя.

2. Методика проведения экспериментальных исследований. Для сопоставления результатов расчета напряженности поля нами использованы результаты экспериментальных исследований [3]. Исследования распространения см и мм радиоволн проводились в Черном море, район между Карадагом и мысом Меганом, в летне-осенний период (август-октябрь). На рис. 1 приведена карта района проведения исследований и нанесен курс корабля. Методика проведения исследований была следующей.



Рис. 1. Карта района проведения исследований

На берегу, на платформе, которая могла перемещаться вдоль мачты, установленной у уреза воды, были размещены источники излучения радиоволн длиной 32; 8,1; 6,8 и 4 мм. Приемный пункт находился на судне, в кормовой части которого была установлена 15-м мачта с откосом, по которому перемещалась тележка с приемными антеннами. Таким образом, при снятии высотных разрезов высота приемных антенн изменялась от 1 до 16 м. Амплитуда принятого сигнала, изменяющаяся с высотой приемных антенн, фиксировалась фотографированием экранов специальных отметчиков, горизонтальные развертки которых были синхронизированы с высотой антенн приемников. Измерения проводились отдельно для каждой длины волны как при подъеме, так и при спуске тележки. Одновременно с записью сигнала на каждом кадре фиксировались метки высоты приемных антенн (штрихи на горизонтальной развертке). Крайняя правая метка соответствует высоте приемной антенны 15,8 м. Для оценки влияния высоты передатчика на структуру поля

все высотные разрезы снимались при четырех высотах передающих антенн $h_{П}$: 2,3; 6; 12 и 18 м.

Во время измерений корабль перемещался по заданной трассе со скоростью 10 узлов. Для снижения флуктуаций сигнала из-за «рыскания», сноса и качки судна ширина диаграммы направленности передающей и приемной антенн выбиралась достаточно большой. Параметры антенн приведены в таблице, где α_H и α_E – ширина диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскости; D – коэффициент усиления антенны.

Параметры антенн

λ , мм	Передающие			Приемные		
	$\alpha_H, ^\circ$	$\alpha_E, ^\circ$	D	$\alpha_H, ^\circ$	$\alpha_E, ^\circ$	D
32	17,5	12,7	100	17,5	12,7	100
8,1	7	5	390	11	8	300
6,8	7	5	390	11	8	300
4	7	5	390	11	8	300

Во время опыта высотные разрезы поля измерялись через каждые 2–3 мин, длительность съемки одного разреза поля не превышала 30 с. При указанной ранее скорости судна расстояние между соседними высотными разрезами соответствует примерно 500 м. Продолжительность одного опыта при дистанции 18...20 км составляла 1 ч. Одновременно с радиоизмерениями проводились измерения температуры, давления, влажности атмосферы, скорости ветра в слое атмосферы 0...20 м, а также измерения температуры воды. Такие измерения проводились на суше и на корабле в начале и в конце галса.

Синхронные измерения сигналов на мм и см волнах позволяют сравнить условия распространения радиоволн этих диапазонов и выявить особенности, характерные для мм диапазона.

На рис. 2 и 3 приведены примеры высотных разрезов напряженности поля на расстоянии 5,8 и 16,7 км соответственно. Приведенные измерения проводились при слабом волнении моря. С увеличением волнения интерференционная структура нарушается. На рис. 4 приведены примеры высотных разрезов при волнении моря 3 балла на расстоянии 3,5 км от берега при высоте передающих антенн 6 м. Форма лепестков поля на волне 32 мм остается четкой, минимумы глубокие. Интерференционная структура поля на волне 6,8 мм хорошо прослеживается, но минимумы поля неглубокие. На волне 4 мм остались только следы лепестков, глубина минимумов мала и случайные флуктуации сигнала искажают лепестковую структуру высотных разрезов поля. При усилении морского волнения структура поля разрушается и на более длинных волнах мм диапазона.

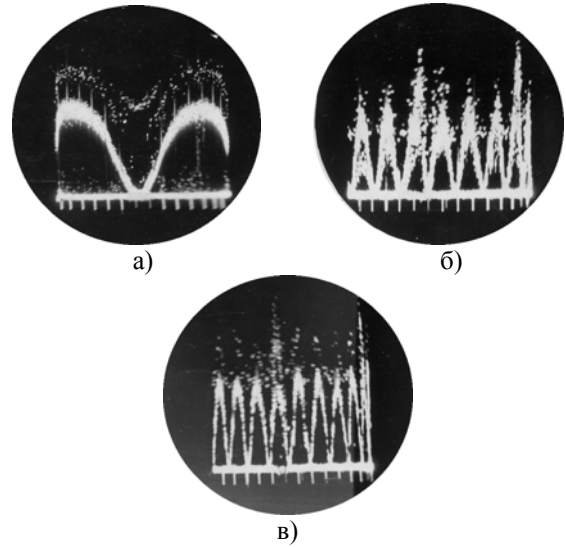


Рис. 2. Высотные разрезы напряженности поля на расстоянии 5,8 км при высоте антенн передатчиков 12 м для волн: а) – 32 мм; б) – 8,1 мм; в) – 6,8 мм

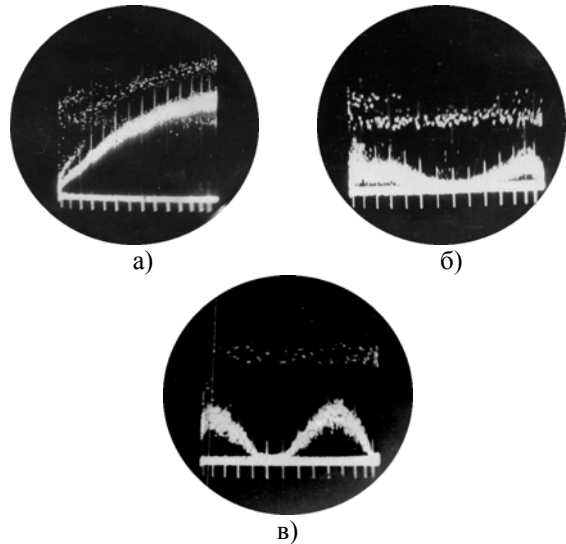


Рис. 3. Высотные разрезы напряженности поля на расстоянии 16,7 км при высоте антенн передатчиков 12 м для волн: а) – 32 мм; б) – 8,1 мм; в) – 6,8 мм

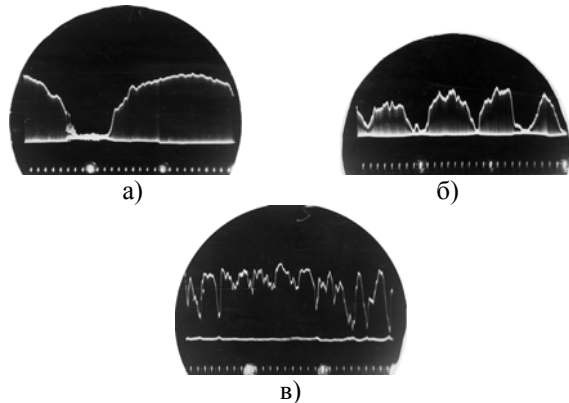


Рис. 4. Высотные разрезы напряженности поля на расстоянии 3,5 км при высоте антенн передатчиков 6 м для волн: а) – 32 мм; б) – 6,8 мм; в) – 4 мм

Из фотографий видно, как изменяется с расстоянием количество и место максимумов лепестков для каждой волны. Всего за время исследований было проведено около 100 измерений структуры поля на указанных длинах волн, высотах передающих антенн и при различных уровнях рефракции. Результаты проведенных измерений показывают, что во время опытов рефракция была выше стандартной и изменялась главным образом от значений, соответствующих «плоской земле», до суперрефракции. Только в нескольких опытах в конце проведения исследований уровень рефракции был близок к стандартному.

3. Анализ экспериментальных данных.

Основной нашей задачей является исследование влияния уровня рефракции и ее изменения с дистанцией на структуру поля радиоволн см и мм диапазонов в зоне прямой видимости и полутени, а также оценка возможности расчета поля прямого сигнала с использованием численных методов решения параболического уравнения. С этой целью были проведены расчеты поля радиоволн на волнах 32; 8,1 и 6,8 мм по измеренным вертикальным профилям модуля приведенного коэффициента преломления $M(z)$ в начале и конце трассы, а также проведено сопоставление с экспериментальными радиофизическими измерениями при различных метеорологических условиях.

На рис. 5 приведены расположения максимумов лепестков на волне 32 и 8,1 мм соответственно при слабой рефракции и резком изменении градиента коэффициента преломления по дистанции и результаты расчета структуры поля по измеренным профилям $M(z)$, показанным на рис. 6. Характерно поведение высоты максимума второго лепестка на волне 8,1 мм. Примерно до 10 км экспериментальные данные укладываются на расчет для «плоской земли», а затем резко отклоняются от этой прямой. На больших расстояниях начинают проявляться максимумы первого лепестка. Следовательно, ни один лепесток не располагается ниже «плоской земли». Аналогичное поведение высоты максимума первого лепестка на волне 32 мм. Некоторое отличие рассчитанных и экспериментальных данных, на наш взгляд, можно объяснить упрощенной моделью изменения параметров $M(z)$ по дистанции, используя линейную зависимость. Из теоретических и экспериментальных исследований известно, что изменение радиометеорологических параметров с расстоянием происходит по логарифмическому закону [3]. Само распределение высот волноводов в высокой степени зависит от очертания берега и структуры береговой черты, влияющей на направление и скорость ветра над морем.

Это приводит к тому, что закономерности распространения СВЧ-сигнала зависят не только от атмосферных условий, но и от направления трассы распространения.

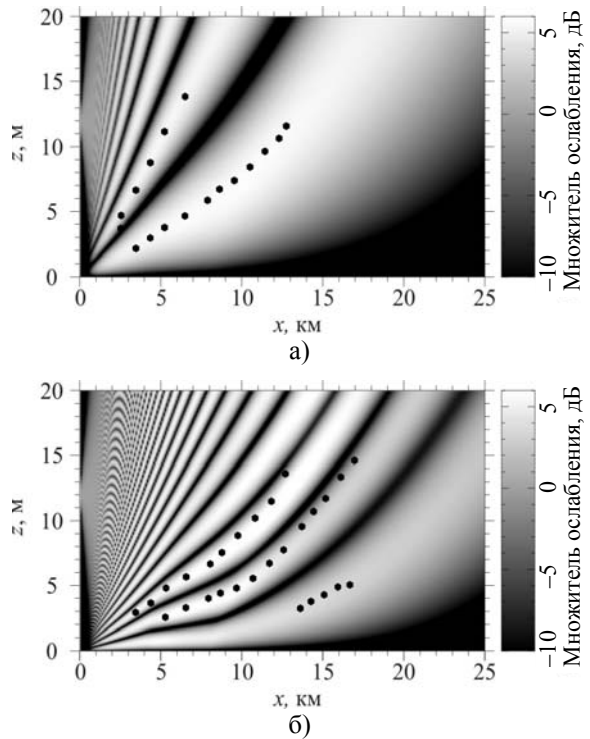


Рис. 5. Структура поля в зоне прямой видимости при высоте антенн передатчиков 12 м для радиоволн с длиной волны: а) – 32 мм; б) – 8,1 мм

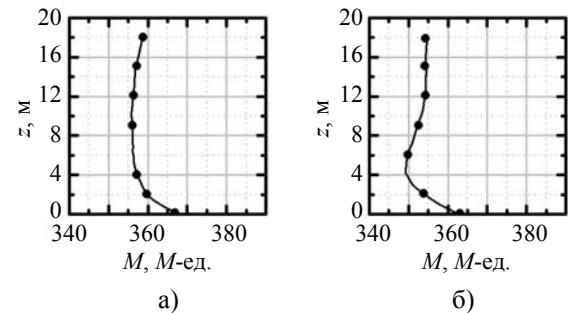


Рис. 6. Вертикальные профили модуля приведенного коэффициента преломления для случая слабой степени рефракции на расстоянии от берега: а) – 1 км; б) – 11 км

Поведение высот максимумов лепестков с повышением рефракции отличается от наблюдаемого при слабой рефракции. На рис. 7 приведены экспериментально измеренные высоты максимумов лепестков на волнах 32 и 8,1 мм соответственно, наложенные на результаты расчетов по измеренным вертикальным профилям $M(z)$, показанным на рис. 8, для случая высокой степени рефракции. Высота расположения передающих антенн равна 12 м.

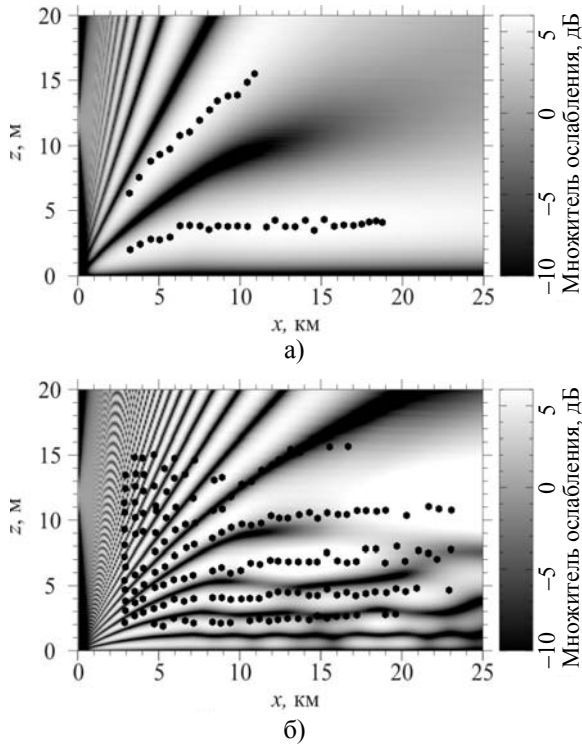


Рис. 7. Структура поля в зоне прямой видимости при высоте антенн передатчиков 12 м для радиоволн с длиной волны: а) – 32 мм; б) – 8,1 мм

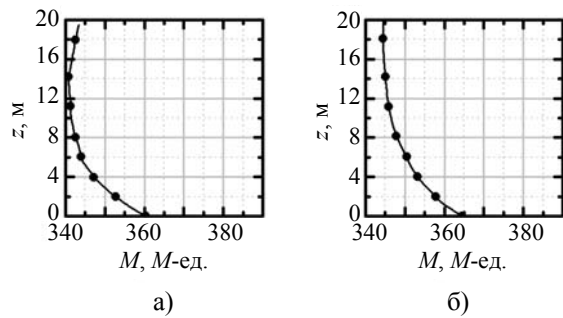


Рис. 8. Вертикальные профили модуля приведенного коэффициента преломления для случая сильной степени рефракции на расстоянии от берега: а) – 1 км; б) – 21 км

Для данного высотного профиля $M(z)$ и плавного изменения градиента коэффициента преломления по дистанции для 32 мм радиоволн наблюдается хорошее совпадение с расчетами. Для 8,1 мм радиоволн совпадение удовлетворительное. Как видно из рис. 7, а высоты максимумов первого лепестка начиная с расстояния 6 км остаются практически неизменными и расположены значительно ниже высот, рассчитанных для случая «плоской земли». Высоты максимумов второго лепестка, хотя и растут на всем измеренном участке трасы, но также остаются ниже значений, рассчитанных для «плоской земли». Расположение высот максимумов радиоволн с длиной 8,1 мм, измеренных синхронно с см диапазоном, приведены на рис. 7, б. Высоты 2, 3 и 4

5-го максимумов поля остаются неизменными от 7–8 и до 20 км. Максимумы первого лепестка находятся ниже 1,8 м – минимальной высоты приемной антенны. Нижние лепестки приплюснуты. На больших расстояниях лепестки деформируются. На рис. 9 приведена фотография экрана индикатора при снятии высотных разрезов поля на расстояниях 5,8; 11,7 и 20,8 км, где видны узкие нижние лепестки и более широкие верхние. Фотография экрана, полученная при снятии разреза на расстоянии 20,8 км, свидетельствует об искажении лепестковой структуры поля.

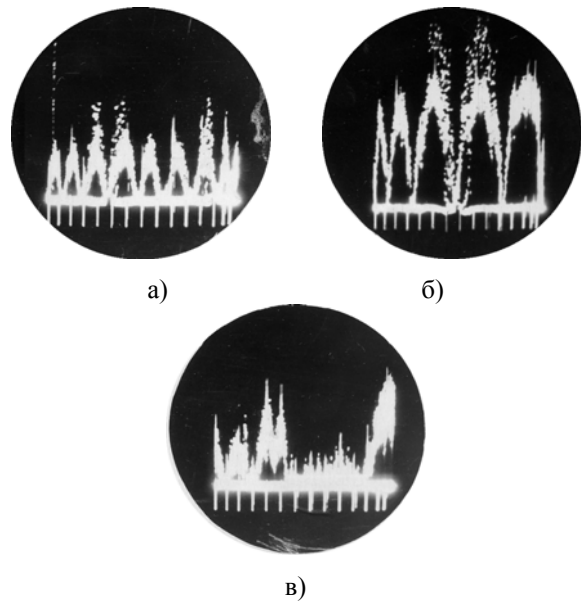


Рис. 9. Высотные разрезы напряженности поля для волны 8,1 мм при высоте антенн передатчиков 12 м на расстояниях: а) – 5,8 км; б) – 11,7 км; в) – 21 км

Общее совпадение измеренных и рассчитанных высот максимумов лепестков хорошее, но имеются некоторые искажения экспериментально измеренных высот за счет неучтенных изменений градиентов по дистанции и увеличения чувствительности к изменениям градиента коэффициента преломления с ростом частоты сигнала.

При еще большем уровне рефракции распределение структуры поля изменяется еще сильнее. На рис. 10 показан пример зависимости измеренных высот максимумов от расстояния и результаты расчета структуры поля для 32 и 8,1-мм радиосигналов по измеренным вертикальным профилям коэффициента преломления, приведенным на рис. 11. Видно, что в этом случае имеет место захватывание четырех лепестков. Высоты трех из них показаны на рис. 9, а. Высота первого лепестка не показана, так как она была ниже 1,8 м – высоты, до которой опускались приемные антенны. Расчеты указывают, что максимумы первого лепестка находятся на высоте 1 м.

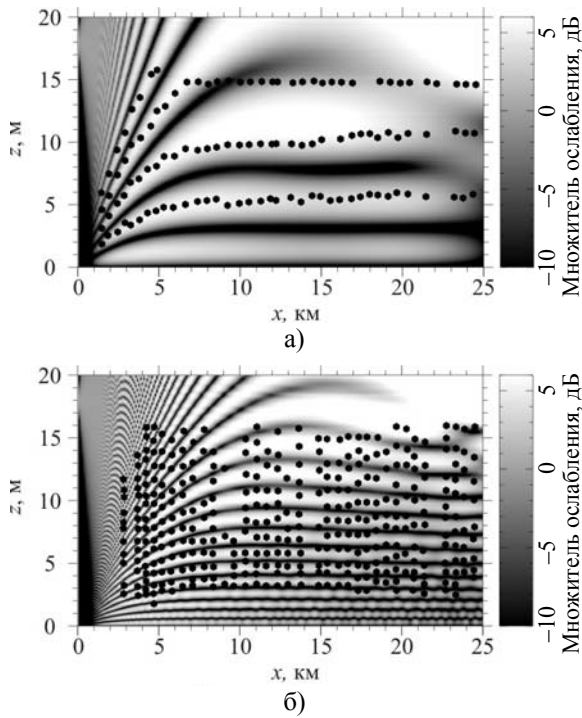


Рис. 10. Структура поля в зоне прямой видимости при высоте антенн передатчиков 18 м для радиоволн с длиной волны: а) – 32 мм; б) – 8,1 мм

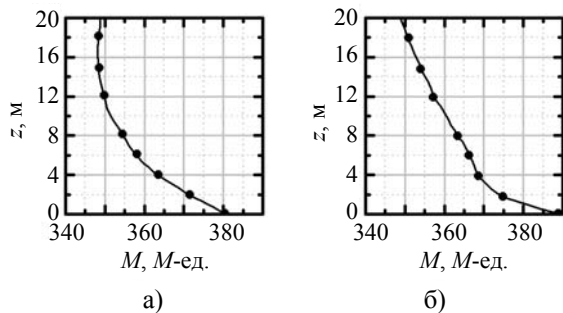


Рис. 11. Вертикальные профили модуля приведенного коэффициента преломления для случая очень сильной степени рефракции на расстоянии от берега: а) – 1 км; б) – 25 км

Рассмотрим подробнее картину поля, измеренную на волне 8,1 мм. Опыт проводился при высоте передающей антенны 18 м. В этом случае трудно определить, к какому лепестку относятся высоты измеренных максимумов, так как их количество велико (в соответствии с расчетами для данного случая рефракции – 13 лепестков) и уже с малых расстояний они отклоняются от расчетов для плоской земли. В 8,1-мм диапазоне, ввиду большого количества лепестков, методика измерения максимума лепестков не позволяла определить, к какому из лепестков принадлежит измеренный максимум. Таким образом, укорочение длины волны приводит к увеличению количества «захватываемых» и прижатых к поверхности воды лепестков.

Наблюдаются искажения лепестковой структуры поля двух типов. Первая группа иска-

жений характеризуется тем, что на волне 8,1 и 6,8 мм первый лепесток прижимается к поверхности воды, а второй сдвигается вверх. По-видимому, это связано с различием градиентов коэффициента преломления ниже 8 м и выше этой высоты. В результате такой деформации лепестков на некотором участке высот приемной антенны сигнал практически отсутствует даже при слабой рефракции. Второй тип искажений относится к случаю сильной рефракции: вместе с изменением градиента $M(z)$ с расстоянием происходит разрушение лепестковой структуры начиная с близких расстояний, и это происходит тем быстрее, чем сильнее рефракция и ниже высота передающего устройства. На рис. 12 приведен пример разрушения лепестковой структуры в случае высокой степени рефракции и расположении антенны передатчика на высоте 2,3 м, а также результаты расчета для указанного опыта по профилям $M(z)$, показанным на рис. 8.

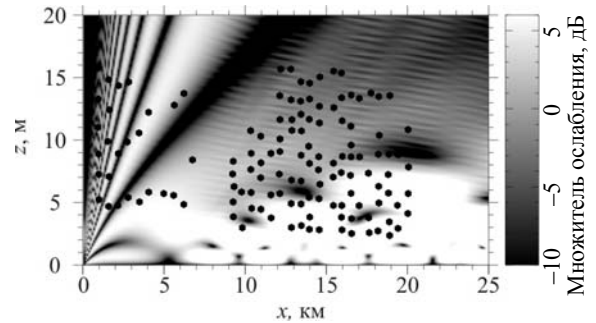


Рис. 12. Структура поля в зоне прямой видимости для радиоволн с длиной волны 6,8 мм при высоте антенны передатчика 2,3 м

На рис. 12 приведены высоты всех максимумов, измеренных на волне 6,8 мм. На расстоянии 1...1,6 км наблюдаются четкие правильной формы лепестки, затем имеется участок трассы, на котором высотные разрезы поля имеют только 1–2 максимума поля или даже совсем их не имеют. На последующих участках трассы распространения появляются максимумы и минимумы поля, количество которых увеличивается и которые можно проследить на некотором участке трассы. Такие случаи являются как бы переходными от случая «захватывания» лепестков, когда на всей трассе структура поля повторяется, к случаю разрушения лепестковой структуры. Наличие переходного участка между областью с правильной лепестковой структурой поля и областью с изрезанным характером поля, обладающего малым количеством максимумов, является частым для волн 6,8 и 8,1 мм. В этом же опыте расчеты и измерения максимумов лепестков для волны 8,1 мм при высоте передающей антенны 12 м (см. рис. 7, б) имеют хорошее согласие, и лепестковая структура наблюдается вплоть до расстояния 20 км. На волне 32 мм переход от обычной интерференционной структуры поля к неправильной проис-

ходит непрерывно. Еще одно отличие волн 32 мм от волн 6,8 и 8,1 мм в характере искажений лепестковой структуры заключается в том, что случаям медленных изменений структуры поля с расстоянием на волне 32 мм соответствуют быстрые изменения на волнах 6,8 и 8,1 мм. При медленных изменениях структуры поля на волнах 6,8 и 8,1 мм на волне 32 мм структура поля является более устойчивой.

Выводы. Расчеты структуры поля см и мм радиоволн методом численного решения параболического уравнения с пошаговым разбиением и использованием преобразования Фурье в области прямой видимости и полутени показали хорошее согласие с экспериментальными данными. Отличие заключается в небольших отклонениях структуры поля, связанных с неучтенными изменениями вертикального профиля $M(z)$ по дистанции, определяемого метеорологическими условиями, характером и направлением движения воздушных масс, а также особенностями геоморфологии побережья.

На мм волнах наблюдается искажение лепестковой структуры. Даже при нормальной рефракции наблюдается сужение и прижатие к поверхности моря первого лепестка и сдвиг последующих лепестков вверх. При сильной рефракции и изменении профиля коэффициента преломления вдоль трассы распространения происходит разрушение лепестковой структуры начиная с близкого расстояния.

1. *Recommendation* ITU-R P. 838-3. Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-1!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-1!!PDF-E.pdf). R-REC-P.838-3-200503-1!!PDF-E.
2. *Мальшенко Ю. И.* Оценка воздействия дождей на параметры РЛС микроволнового диапазона с учетом метеостатистических сведений о продолжительности выпадения дождей / Ю. И. Мальшенко, Ю. В. Левадный // *Радиофизика и электрон.* – 2011. – 2(16), № 3. – С. 67–77.
3. *Исследование* поля прямого сигнала на волнах 32; 8,1; 6,8; 4 миллиметра при распространении над морем: отчет по НИР «Резеда»; научн. рук. А. Я. Усиков. – Х., 1955. – 170 с.
4. *Modloch A.* Overwater propagation of millimeter waves / A. Modloch // *IEEE Trans. on Anten. and Prop.* – 1969. – 17, N 1. – P. 82–85.
5. *Кулемин Г. П.* Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами рассеяния / Г. П. Кулемин, В. Б. Разказовский – К.: Наук. думка, 1987. – 230 с.
6. *Брауде С. Я.* Деформация лепестковой структуры поля сантиметровых и миллиметровых радиоволн при распространении в приводном волноводе / С. Я. Брауде, И. Е. Островский // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 1997. – 2, № 4. – С. 446–449.
7. *Разказовский В. Б.* Многолучевое распространение над морем / В. Б. Разказовский, Ю. А. Педенко // *Зарубежная радиоэлектрон.* – 1996. – № 7. – С. 29–39.
8. *Разказовский В. Б.* Распространение сантиметровых и миллиметровых радиоволн под малыми углами скольжения: Модель многократной дифракции на экранах / В. Б. Разказовский, Ю. Ф. Логвинов // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 2008. – 51, № 8. – С. 700–710.
9. *Ott R. H.* Roots of the modal equation for em wave propagation in a tropospheric duct / R. H. Ott // *J. of Mathematical Physics.* – 1980. – 21, N 5. – P. 1256–1266.

10. *Белоброва М. В.* 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. – 33, № 12. – С. 1315–1319.
11. *Брауде С. Я.* Распространение ультракоротких радиоволн над морской поверхностью / С. Я. Брауде, В. К. Иванов, И. Е. Островский // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 1996. – 1, № 2. – С. 171–186.
12. *Levy M.* Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation / M. Levy. – L.: The Institution of Electrical Engineers, 2000. – 338 p.
13. *Dockery D.* An improved impedance-boundary algorithm for Fourier split-step solutions of the parabolic wave equation / D. Dockery, J. Kuttler // *IEEE Trans. on Antennas and Propagation.* – 1996. – 44, N 12. – P. 1592–1599.
14. *Miller A. R.* New Derivation for the Rough Surface Reflection Coefficient and for the Distribution of Sea-Wave Elevations / A. R. Miller, R. M. Brown, E. Vegh // *IEE Proc., Part H.* – 1984. – 131, N 2. – P. 114–116.

V. Ivanov, Yu. Levadnyi, V. Shalyapin

MILLIMETER WAVE PROPAGATION IN COASTAL AREA

The problems of centimeter and millimeter waves propagation over the sea in coastal area are considered. Ducts in the coastal area are usually advective and are sufficiently stronger than evaporation ducts. Their parameters (duct height and M -difference) depend on the distance to the shore. The field structure in the line of sight and the half-shadow regions were calculated by means of split-step parabolic equation Fourier method. The comparison of the calculations and experimental data have shown good agreement. It was also shown that interference structure of the centimeter wave field is stable and its distortion is possible only for very strong refraction. The distortion of interference structure for millimeter waves happens even for weak refraction and the interference structure are being destroyed for simultaneous strong refraction and changing radiometeorological parameters.

Key words: parabolic equation, coastal zone, atmospheric waveguide.

В. К. Иванов, Ю. В. Левадный, В. Н. Шалыпин

ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ МІЛЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ В ПРИБЕРЕЖНІЙ ЗОНІ

Розглянуто питання поширення радіохвиль см і мм діапазонів над морем в прибережних районах. Хвилеводи, що виникають в прибережних зонах, в основному є адвективними з мінливими при віддаленні від берега параметрами (висотою хвилеводу і M -дефіцитом), а їх потужність значно перевершує потужність хвилеводів випаровування. Проведено розрахунки структури поля в зоні прямої видимості й півтіні при різних метеорологічних умовах методом числового рішення параболического рівняння з покроковим розбиванням і використанням перетворення Фур'є. Зіставлення розрахунків з експериментальними даними демонструє гарний збіг. У результаті досліджень показано, що інтерференційна структура поля в см діапазоні є стійкою і її спотворення відбуваються тільки за умов дуже сильної рефракції. У мм діапазоні радіохвиль спотворення інтерференційної структури виникає навіть при слабкій рефракції. При сильній рефракції й одночасній зміні радіометеорологічних параметрів уздовж траси поширення відбувається руйнування інтерференційної структури.

Ключові слова: параболическі рівняння, прибережна зона, атмосферний хвилевід.

Рукопись поступила 30.06.11 г.