

## МНОЖИТЕЛЬ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ НАД МОРЕМ ПОД МАЛЫМИ УГЛАМИ СКОЛЬЖЕНИЯ: ПЕРЕХОДНАЯ ЗОНА

В. Б. Разказовский, Ю. Ф. Логвинов

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

Исследованы особенности поля сантиметровых и миллиметровых радиоволн над поверхностью моря в переходной области углов скольжения, ниже которой необходимо пользоваться моделью многократной дифракции Френеля на гребнях волн, а выше - приближением Кирхгофа. Показано, что в такой модели применимо многолучевое представление распространения радиоволн, проанализированы особенности зависимости когерентной и некогерентной компонент рассеянного "вперед" поля от геометрии трассы и параметров морского волнения. Ил. 7. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** дифракция, морская поверхность, малые углы скольжения.

В предыдущих наших работах [1,2] показано, что объяснить экспериментально наблюдаемые особенности электромагнитного поля СВЧ при малых углах скольжения над поверхностью раздела с большими неровностями, где из-за сильных затенений не применимы ни метод малых возмущений, ни приближение Кирхгофа, можно, представляя поле над ней как продукт многократной дифракции Френеля на клиновидных вершинах неровностей. В частности, в [1,2] и ряде цитируемых в них других работ показана применимость такого подхода к распространению сантиметровых и миллиметровых радиоволн над поверхностью моря с ветровым волнением и приведены существующие при этом требования к геометрии трассы, длине волны и силе волнения.

В работе [2] показано, что в области малых углов скольжения, где необходимо пользоваться дифракционным подходом к описанию распространения поля над поверхностью, можно выделить две зоны. В нижней, названной зоной малых высот, где взаимное влияние границ экранов (вершин морских волн) является сильным, необходимо пользоваться методами расчета многократной дифракции Френеля, для которых аналитические методы не разработаны, а численные - при их реализации даже на современных компьютерах из-за большого времени счета носят ограниченный характер. В расположенной выше зоне, являющейся переходной к области, в которой применимы методы описания поля работ [3-6], основанные на приближении Кирхгофа, можно пренебречь взаимным влиянием смежных экранов, по-прежнему рассматривая процесс переизлучения отдельным экраном как дифракцию Френеля. Это означает правомерность использования в этой переходной зоне лучевого представления при описании механизма формирования суммарного поля, переизлученного множеством неровностей поверхности. Иными словами, здесь можно говорить о многолучевом распространении при дифракционном

механизме формирования элементарных переизлученных волн. Переход от вычисления многократных к суммированию однократных интегралов Френеля снижает более чем в сотни раз вычислительные затраты и позволяет осуществлять расчет статистических характеристик по представительным ансамблям данных, в частности, получать состоятельные оценки параметров распределения поля в точке наблюдения при различной геометрии трасс и случайных координатах переизлучающих элементов.

**1. Области применимости приближений.** Граничным значением угла скольжения  $\gamma_{гр}$  в месте расположения каждого переизлучающего элемента - вершины гребня волны в применении к морской поверхности является

$$\gamma_{гр} = \sqrt{\frac{\lambda}{2d}}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - длина волны;  $d$  - среднее расстояние между экранами (в случае морского волнения - между гребнями волн).

Неравенство  $\gamma < \gamma_{гр}$  означает, что граница рассматриваемого экрана находится в области полутени по отношению к предшествующему или последующему экрану, и поле в области интегрирования над ней искажено по сравнению с имеющим место при распространении в свободном пространстве. И наоборот, при  $\gamma > \gamma_{гр}$  можно приближенно считать, что поле над границей экрана не отличается от существующего при распространении в свободном пространстве. Одновременно это неравенство согласно [3, 7, 8] означает, что к описанию дифрагированной волны применимо асимптотическое представление интеграла Френеля, при котором поле в широкой области углов дифракции может быть представлено как результат суперпозиции поля свободного пространства (плоская, сферическая или цилинд-

рическая волна) и неоднородной цилиндрической волны, источником которой служит прямолинейная граница экрана (нами рассматривается случай, когда плоскость экрана перпендикулярна трассе распространения радиоволны). Иными словами, применимо многолучевое представление формирования поля над поверхностью, при котором в отличие от работ [4-6] и других, использующих по существу метод касательной плоскости (МКП), элементарными вторичными излучателями являются не квазиплоские «фацеты», а линейные границы экранов.

Поскольку диаграммы направленности вторичного излучения фацетов и границ экранов существенно отличаются, есть основания ожидать и значительных отличий свойств суммарного поля над поверхностью для этих двух моделей явления. В частности, на аналогии и отличия свойств поля над поверхностью при этих двух моделях указано в работе [1], где оценки получены аналитическими методами с использованием ряда упрощающих предположений. Приводимые ниже результаты получены методом моделирования на ЭВМ, что позволило уточнить и дополнить ряд результатов работы [1], в первую очередь, относящихся к свойствам некогерентной составляющей поля.

Двумерная модель трассы распространения радиоволн при таком представлении показана на рис. 1.

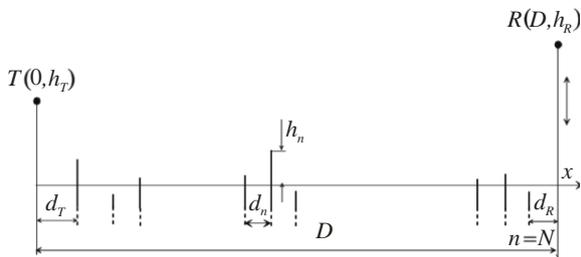


Рис. 1. Схема трассы

Для случаев малых углов скольжения, воспользовавшись результатами работ [3, 7, 8], поле  $E_m(R)$ , создаваемое каждым экраном в точке наблюдения  $R$ , представим в виде

$$E_m(R) = E_0(R)w_m(R), \quad (2)$$

где  $E_0(R)$  - поле свободного пространства в точке  $R$ , создаваемое излучателем, расположенным в точке  $T$  (в нашем случае это линейный излучатель цилиндрической волны);  $w_m(R)$  - множитель ослабления, описывающий отличия амплитуды и фазы переизлученной волны от распространяющейся в свободном пространстве.

Соответственно суммарное поле в точке наблюдения можно представить в виде

$$\begin{aligned} E(R) &= E_0(R) + \sum_{m=0}^{M-1} E_m(R) = \\ &= E_0(R)[1 + W_M(R)], \\ W(R) &= 1 + W_M(R), \\ W_M &= \sum_{m=0}^{M-1} w_m(R), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $W(R)$  и  $W_M(R)$  являются соответственно комплексными множителями ослабления полного поля и суммарного переизлученного полей в точке  $R$ . Для краткости записи в (2) и (3) используются обозначения  $W(R)$ ,  $W_M(R)$ ,  $w_m(R)$  вместо полных, например

$$w_m(R) \equiv w_m(x_m, h_m, h_T, h_R, D, \lambda).$$

В последующих расчетах всегда предполагается, что

$$\begin{aligned} \frac{h_T}{x_m} \ll 1, \quad \frac{h_R}{D - x_m} \ll 1, \quad h_{T,R} \gg \lambda, \\ d_{T,R} \gg \lambda, \quad d \gg \lambda. \end{aligned}$$

Согласно результатам [3, 7, 8] при этих условиях множитель ослабления  $w_m(R)$  может быть представлен в виде

$$w_m(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}U_m} \left( 1 + \frac{1}{i\pi U_m^2} \right) e^{i\left(\frac{\pi}{2}U_m^2 - \frac{3\pi}{4}\right)}, \quad (4)$$

$$U_m = \left( \frac{h_T - h_m}{x_m} + \frac{h_R - h_m}{D - x_m} \right) \sqrt{\frac{2x_m(D - x_m)}{\lambda D}}, \quad (5)$$

$$|U_m| > 1,$$

в котором с целью повышения точности при  $|U_m| \approx 1$  использовано два члена асимптотического ряда для интеграла Френеля (погрешность не превышает 3% при  $|U_m| \geq 0,8$ ).

Однако более жестким, чем  $|U_m| > 1$ , ограничением на представление переизлученного отдельным экраном поля в виде (4) является неравенство (1), указывающее на необходимость при меньших углах скольжения учитывать влияние на множитель ослабления (4) смежных экранов.

Для более точной оценки влияния этого фактора было проведено сравнение амплитуд суммарного поля над системой эквидистантных равновысоких экранов, полученных как методом численного счета многократной дифракции, изложенным в работе [2], так и с использованием асимптотического приближения. Результаты сравнения для 20 экранов показаны на рис. 2, из которого видно, что удовлетворительное совпадение формы зависимостей множителя ослабле-

ния существует до высот, примерно в два раза меньших, следующих из (1). Некоторого расширения в сторону малых высот области применимости многолучевого представления можно достичь введением корректирующих множителей, уменьшающих амплитуду облучения края экрана при его приближении к границе тени от края смежного экрана примерно так же, как при дифракции Френеля. С использованием результатов [9] эти корректирующие множители были выбраны в виде функций:

$$w_{Tm,Rm} = 1 - 0,5e^{-U_{Tm,Rm}\sqrt{\frac{2}{\pi} + i\frac{\pi}{2}} - 1,2U_{Rm}^2}; \quad (6)$$

$$U_{Rm} = \frac{h_R}{D - \langle x_{m+1} \rangle} \sqrt{\frac{2d \langle x_{m+1} \rangle}{\lambda (D - \langle x_m \rangle)}}, \quad (7)$$

$$U_{Tm} = \frac{h_T}{\langle x_{m-1} \rangle} \sqrt{\frac{2d \langle x_{m-1} \rangle}{\lambda \langle x_m \rangle}},$$

где  $\langle x \rangle$  означает среднее значение соответствующей координаты.

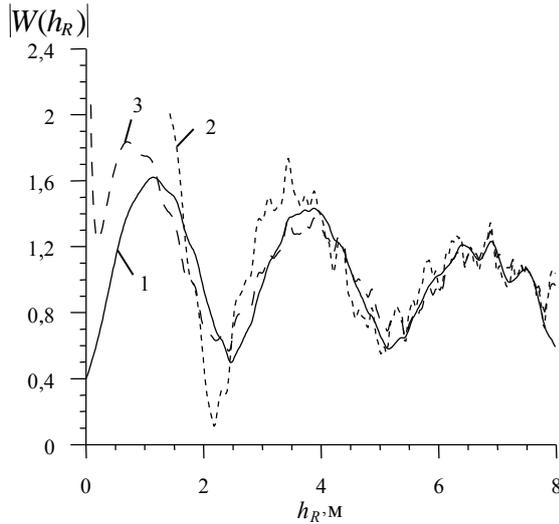


Рис. 2. Сравнение результатов расчета множителя ослабления поля при многократной дифракции Френеля и в асимптотическом приближении: 1 - многократная дифракция; 2 - асимптотическое приближение без коррекции границ тени; 3 - асимптотическое приближение с коррекцией

Заметим, что в (6), (7) используются детерминированные значения координат краев экранов в отличие от (4), где при моделировании эти величины являются случайными. Основанием для такого упрощения служит то, что при моделировании исследуется случай малых по сравнению с  $h_T, h_R$  и  $d$  флуктуаций этих величин. Так, среднеквадратическое отклонение (СКО) высот границ экранов составляло доли метра, что соответствует умеренному волнению на море. Резуль-

таты введения этих корректирующих множителей иллюстрирует кривая 3 на рис. 2. Видно, что удовлетворительное совпадение множителей ослабления полного поля при учете многократной дифракции и при замене его многолучевым описанием имеет место, начиная практически с первого интерференционного максимума.

С учетом изложенного выше моделирование поля состояло в вычислении и анализе характеристик множителя ослабления (3) с введением корректирующих множителей (6), (7)

$$W_M(R) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m(R) w_{mT} w_{mR}. \quad (8)$$

Поскольку аргументы функций  $w_m(R)$  - случайные координаты краев экранов, множитель ослабления  $W_M(R)$  также является случайной функцией координат точки наблюдения: статистические характеристики этой функции зависят от статистических свойств координат переизлучателей и геометрии трассы. Поскольку моделирование ведется применительно к морской поверхности с ветровым волнением, параметры и переменные, входящие (4), (5), задавались так, чтобы они отображали свойства последней. В частности, считалось, что координата  $x_m$  является в среднем периодической функцией со случайной составляющей, среднеквадратическое значение которой мало по сравнению с периодом  $d$

$$x_m = d_T + md + \zeta_m qd, \quad m=0,1 \dots M-1, \quad (9)$$

где  $\zeta_m$  - нормально распределенная случайная величина с дисперсией, равной единице;  $q$  - отношение среднеквадратического отклонения случайной составляющей дальности к периоду  $d$ .

Высота границы каждого экрана задавалась как случайная величина с математическим ожиданием, равным нулю

$$h_m = \xi_m \sigma, \quad (10)$$

где  $\xi_m$  - нормально распределенная случайная величина с дисперсией, равной единице;  $\sigma$  - СКО высоты экрана.

Массивы случайных чисел формировались так, чтобы все случайные величины каждой из координат границ экранов были независимыми, т. е.

$$\langle \xi_m \xi_n \rangle = 0 \quad \text{при } m \neq n,$$

$$\langle \xi_m \xi_n \rangle = 0 \quad \text{при } m \neq n,$$

где  $\langle \cdot \rangle$  означает усреднение. Значение параметров  $d, \lambda$  и геометрия трассы (параметры  $h_T, h_R, D$ ) выбирались такими, чтобы они, во-первых, соответствовали реальным условиям работы радиосистем миллиметрового и сантиметрового диапазонов над морем, во-вторых, чтобы они лежали в пределах применимости асимптотического под-

хода к описанию дифракции на системе экранов. Исходя из результатов, полученных при моделировании освещенности морской поверхности [10], можно принять, что при скорости ветра 5 - 10 м/с и углах скольжения в единицы миллирадиан среднее расстояние между освещенными гребнями волн составляет 20 - 50 м, а СКО их высот с возрастанием скорости ветра изменяется в пределах от 0,1 до 0,4 м. В то же время, согласно результатам [2], при таких скоростях ветра равномерно представление распределения над поверхностью моря радиоволн миллиметрового и коротковолновой части сантиметрового диапазонов как многократной дифракции Френеля на экранах.

В связи со сказанным выше базовой комбинацией параметров при моделировании была следующая: длина волны - 1 см; протяженность трассы  $D$  - около 5 км; высоты соответствующих пунктов  $h_R$  и  $h_T$  - 10 м; среднее расстояние между экранами - 50 м; СКО высот экранов - 0...0,4 м; количество экранов  $M$  - 100; расстояние от концов трассы до ближайших к ним экранов  $d_T, d_R$  - (детерминированная составляющая) - около 50 м.

При такой комбинации параметров выбранные значения высот соответствующих пунктов  $h_T$  и  $h_R$  были наименьшими, для которых на всей трассе выполнялись условия

$$\frac{h_T}{x_m} < 0,5\gamma_{кр}, \quad \frac{h_R}{D - x_m} < 0,5\gamma_{кр},$$

т. е. выражение (1), скорректированное с учетом введения в (4) множителей (6), (7), учитывающих влияние смежных экранов. С другой стороны, для всех экранов имело место неравенство  $U_m \geq 4$ , что означает высокую точность описания дифрагированного поля при замене интеграла Френеля его асимптотическим представлением.

Непосредственными результатами расчетов являлись либо зависимости множителя ослабления (3) от высоты точки наблюдения, либо ансамбль (массив) случайных значений  $w(R)$  при фиксированных значениях  $h_T$  и  $h_R$ , но статистически независимых ансамблях высот экранов  $\{h_m\}$ .

Следующим этапом являлось вычисление усредненных характеристик переизлученного системой экранов поля: когерентной и некогерентной составляющих, являющихся эквивалентами зеркальной и диффузной (некогерентной) компонент при описании поля над шероховатой поверхностью раздела в приближении МКП [4-6]. Когерентная составляющая  $C(R, \sigma)$  суммарного переизлученного  $M$  экранами поля и соответствующий ей коэффициент  $\Gamma(R, \sigma)$ , по своему физическому смыслу совпадающий с коэффициентом

отражения от плоской шероховатой поверхности [3-7], вычислялись как

$$C(R, \sigma) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} W_{Mn}(R, \sigma), \quad (11)$$

$$\Gamma(R, \sigma) = |C(R, \sigma)|,$$

где  $\sigma$  - СКО высот границ экранов. Здесь каждая случайная функция  $W_{Mn}(R, \sigma)$  соответствует одному из  $N$  массивов  $\{h_m\}$ , состоящему из  $M$  случайных значений высот краев экранов с постоянным для всех  $N$  массивов значением СКО высот.

Средняя плотность потока мощности некогерентной компоненты, отнесенная к той же величине для поля свободного пространства в точке  $R$ , рассчитывалась как

$$P_d(R, \sigma) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} W_{Mn}(R, \sigma) \overline{W_{Mn}(R, \sigma)} - \Gamma^2(R, \sigma), \quad (12)$$

а по ней определялось значение  $\rho_d(R, \sigma)$ , эквивалентное коэффициенту диффузного рассеяния при отражении от шероховатой поверхности:

$$\rho_d(R, \sigma) = \sqrt{P_d(R, \sigma)}. \quad (13)$$

В качестве иллюстрации на рис. 3 приведен вид зависимостей от высоты случайных функций  $|W(h_R)|$  при двух значениях СКО высот экранов, соответствующих малым ( $\sigma = 0,05$  м) и большим ( $\sigma = 0,4$  м) флуктуациям. Другие исходные данные при расчете:  $\lambda = 1$  см,  $D \cong 5$  км,  $M = 100$ .

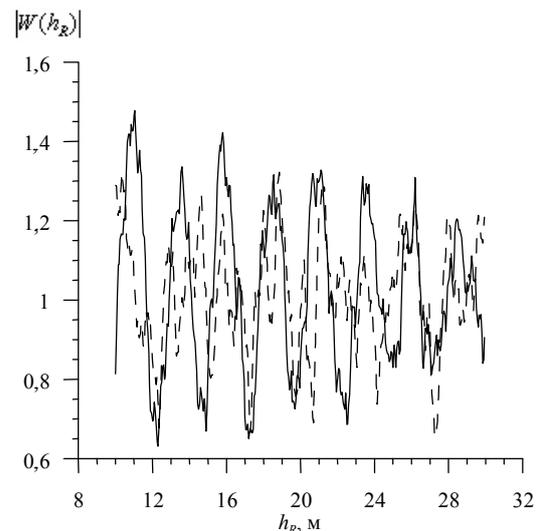


Рис. 3. Высота зависимость множителя ослабления: — СКО высот экранов 0,05 м; - - - - СКО высот экранов 0,4 м

Основной задачей моделирования было определение зависимости характеристик коге-

рентной и некогерентной составляющих вторичного поля от геометрии трассы и статистических свойств координат экранов, а также вклад в эти компоненты и в суммарное переизлученное поле различных частей трассы.

Последняя характеристика представляет особый интерес при анализе, в том числе методами статистического моделирования, особенностей работы пеленгационных систем с различными способами пространственной обработки сигналов при измерении угла места маловысотных целей или излучателей.

Рассмотрим результаты, полученные при моделировании этих характеристик переизлученного поля. Уже на начальном этапе было установлено, что случайное смещение экранов в продольном направлении, т. е. их неэквидистантность практически не влияет на характеристики когерентной и некогерентной компонент; этот вывод согласуется с результатами работы [1], полученными аналитическими методами. Более того, неэквидистантность экранов устраняет на высотных зависимостях множителя ослабления выбросы и провалы, обусловленные существованием интерференционных максимумов высокого порядка при дифракции на периодических решетках. В связи с этим основной объем данных моделирования получен для эквидистантной системы экранов со случайными высотами границ.

**2. Когерентная компонента.** Как и ожидалось на основании работы [1], зависимость этой компоненты от длины волны, дисперсии высот границ экранов и геометрии трассы (параметров  $h_T, h_R, D$ ) оказалась аналогичной полученной в работах [4-6] для шероховатой в среднем плоской поверхности с тем отличием от последней, что в случае дифракции на границах экранов вместо дисперсии высоты неровностей поверхности необходимо пользоваться дисперсией высот границ экранов. Сказанное видно из рис. 4, на котором приведены зависимости коэффициентов отражения (11) от величины

$$Q = \frac{(h_T + h_R)\sigma}{\lambda D}. \quad (14)$$

Она совпадает с известным из работ по отражению от шероховатых поверхностей [4-6] параметром Релея, рассчитанным для точки трассы, являющейся точкой стационарной фазы при отражении от плоскости  $y = 0$  (при принятом ранее условии моделирования  $\langle h_m \rangle = 0$ ). Для сравнения на рис. 4 кривой 5 показана зависимость работы [1], которая отличается от аналогичной для шероховатой поверхности, приводимой в [4-6], присутствием коэффициента 0,6.

$$\Gamma(Q) = 0,6e^{-2k^2 \sin^2 \gamma \sigma^2} = 0,6e^{-8\pi^2 Q^2}. \quad (15)$$

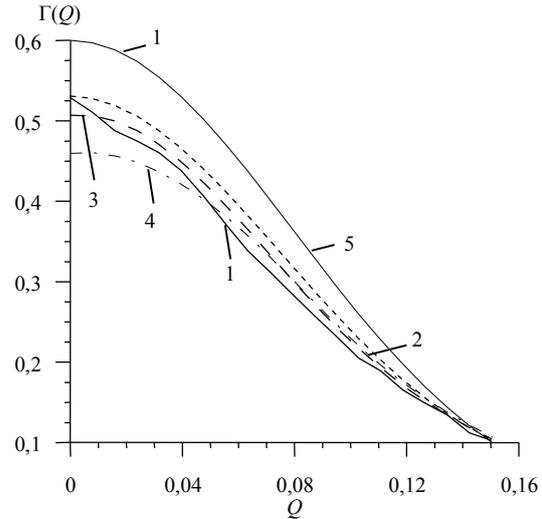


Рис. 4. Зависимость когерентной компоненты переизлученного поля от параметра Релея при разных коэффициентах использования трассы: 1 - вся трасса; 2 - область, соответствующая первой зоне Френеля; 3 - область, соответствующая 1,5 размерам первой зоны Френеля; 4 - область, соответствующая двум размерам первой зоны Френеля; 5 - теоретическая зависимость в приближении МКП

Отметим, что расчет зависимостей рис. 4 производился в предположении о постоянстве высот корреспондирующих пунктов  $h_T, h_R$  и протяженности трассы  $D$ , а переменной являлось СКО высот экранов. При фиксированном значении  $\sigma$  и изменении высоты (или обеих высот) корреспондирующих пунктов убывание коэффициента отражения становится более быстрым вследствие присутствия в (4) амплитудного множителя  $|U(x_m)|^{-1}$ . Это является одним из отличий дифракционной модели переизлучения от фазетной.

Значительный интерес, особенно с точки зрения оценки влияния диаграмм направленности антенн пеленгационных систем на подавление приема когерентной компоненты, играет изучение вклада в нее переизлучения различными участками трассы. Расчеты показали, что доминирующую роль в ее формировании (более 90% по мощности) играет участок трассы, соответствующий первой зоне Френеля на средней плоскости границ экранов (в нашем случае плоскость  $y = 0$ ). На это указывает сравнение кривых 1-4 на рис. 4.

**3. Некогерентная компонента.** В результате статистического моделирования были оценены количественные характеристики некогерентной компоненты, которые не могли быть получены аналитическими методами в работе [1]. Первой из таких характеристик является коэффициент диффузного рассеяния, рассчитываемый при статистическом моделировании по соотношениям (12), (13). Для симметричной трассы при

фиксированных значениях высот  $h_T = h_R = 10$  м его зависимости от величины  $Q$ , т. е. фактически от СКО высот экранов, показаны на рис. 5.

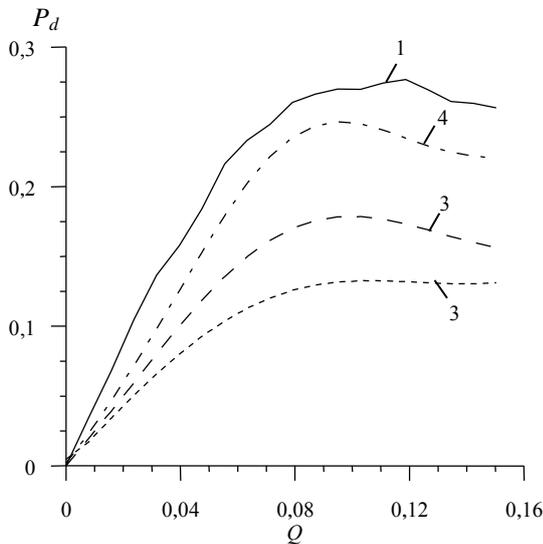


Рис. 5. Зависимость коэффициента диффузного рассеяния от параметра Релея при разных коэффициентах использования трассы: 1 - вся трасса; 2 - область, соответствующая первой зоне Френеля; 3 - область, соответствующая 1,5 размерам первой зоны Френеля; 4 - область, соответствующая 2 размерам первой зоны Френеля

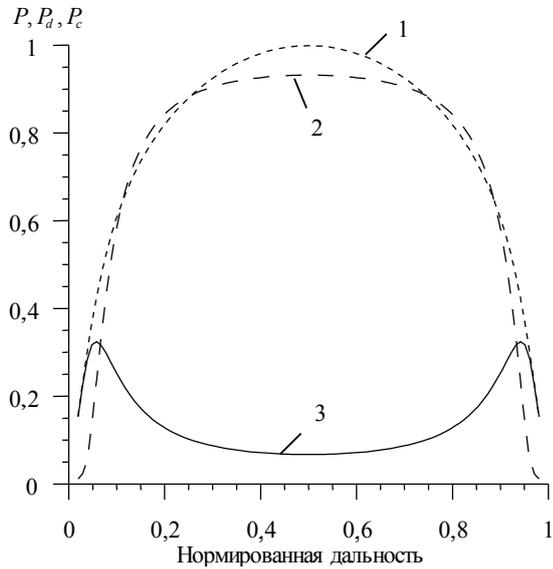
Кривым 1-4 соответствуют случаи частичного облучения трассы, совпадающие с использованными при расчете кривых рис. 4. Вид зависимости коэффициента диффузного рассеяния от параметра  $Q$  полностью аналогичен по виду и количественно близок к эмпирическим зависимостям, приводимым в работах [5, 6]. Однако существенно отличной от случая когерентной компоненты оказывается зависимость максимальных значений коэффициентов диффузного рассеяния от облучаемой части трассы: при переизлучении только из первой зоны Френеля (кривая 1) коэффициент диффузного рассеяния оказывается более чем в два раза меньше по сравнению со случаем «работы» всей трассы. Это означает, что в отличие от когерентной составляющей доминирующий вклад в нее вносит переизлучение из удаленных от точки стационарной фазы участков. Таким же свойством согласно [5, 6] обладает переизлучение при факетной модели. Отметим еще одну особенность некогерентной компоненты. При уменьшении параметра  $Q$  не за счет снижения СКО высот экранов, как это предполагалось при расчете кривых 1-4, а вследствие соответствующего изменения высот  $h_T$  и  $h_R$ , т. е. фактически угла скольжения, при  $Q \rightarrow 0$  коэффициент диффузного рассеяния имеет конечное значение. Из результатов работы [2]

видно, что некогерентная компонента не исчезает даже при угле скольжения, равном нулю, и нулевых высотах корреспондирующих пунктов. Этот вывод является принципиально важным, так как он означает присутствие влияния неровной поверхности, в частности, морской на флуктуации амплитуд, фаз и направлений прихода сигналов во всей области углов скольжения. На это обстоятельство на основании экспериментальных данных указывалось ранее в ряде работ, в частности [11-13].

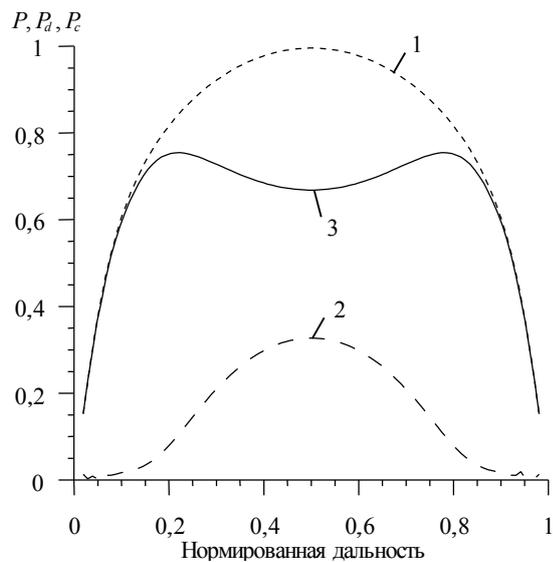
Более детальную информацию о вкладе в суммарное поле и обе его компоненты разных частей трассы можно получить из зависимостей этих характеристик для одиночного экрана в функции его положения на трассе. Результаты соответствующего расчета для симметричной трассы при  $h_T = h_R = 7$  м,  $D \approx 2,5$  м,  $d_T = d_R = 26$  м,  $d = 25$  м для  $\lambda = 1$  см и двух значений СКО высоты экранов равных 0,05 м (малые неровности) и  $\sigma = 0,2$  м (большие неровности) приведены на рис. 6 а, б. На них кривые 1 показывают распределение по дистанции полной мощности переизлучения каждого экрана  $P$ , пронормированной на ее значение для экрана в центре трассы. Кривые 2, и 3 представляют долю в переизлучении каждого экрана мощностей когерентной  $P_c$  и некогерентной  $P_d$  компонент соответственно, полученных при усреднении по 100 независимым значениям высоты экрана. По оси абсцисс отложены отношения текущей дальности к протяженности трассы, т. е.  $X = x/D$ .

Из графиков видно уже отмеченные ранее свойства: в когерентную компоненту вклад могут вносить только переизлучатели, близкие к точке стационарной фазы (при симметричной трассе это ее середина), а в некогерентную - расположенные ближе к концам. Рост СКО высот экранов приводит к соответствующему возрастанию некогерентной части переизлучения каждым экраном. Бимодальная зависимость мощности некогерентной составляющей от положения на трассе сохраняется, как показали расчеты, до значений параметра  $Q \approx 0,2$ . Для сравнения на рис. 7 показана зависимость относительного вклада в суммарную среднюю мощность участков шероховатой поверхности в разных частях трассы работы [4] в приближении МКП. Аналогичные зависимости приводятся в [4, 6] и других работах, использующих различные модификации МКП. Как видно из ее сравнения с кривыми рис. 6, дифракционная модель и МКП приводят к существенно отличающимся зависимостям распределения по дистанции интенсивности переизлучения: при дифракционной модели в области применимости лучевого представления переизлучение

сравнительно равномерно распределено по дистанции с максимумом в точке стационарной фазы, а при применении МКП доминирует вклад концевых участков.



а)



б)

Рис. 6. Зависимость характеристик поля для одиночного экрана при:  $\sigma=0,05$  м - (а);  $\sigma=0,2$  м - (б); 1 - полная мощность переизлученного поля; 2 - мощность когерентной компоненты поля; 3 - мощность некогерентной компоненты поля

При сравнении приводимых на рис. 6 и 7 графиков следует иметь в виду, что кривая рис. 7 соответствует случаю, когда параметр  $Q \gg 1$ , т. е. когерентная составляющая отсутствует; в рамках приближения МКП работ [3-6] получить оценки для более общего случая, когда присутствуют обе компоненты, не представляется возможным.

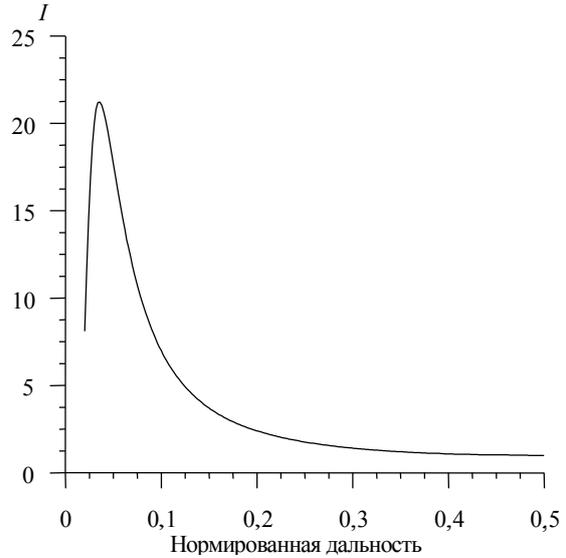


Рис. 7. Зависимость относительного вклада в суммарную среднюю мощность участков шероховатой поверхности в разных частях трассы

Однако, исходя из физики рассеяния радиоволн неровными поверхностями, в частности, из оценок, приводимых в работе [1], по мере приближения к концам трассы, сопровождающегося возрастанием углов скольжения и перемещением освещенной области с гребней волн на склоны, где локальные радиусы кривизны поверхности больше чем на гребнях волн, будет происходить постепенная смена механизма переизлучения. Как видно из результатов работ [3, 14], вначале дифракция на полуплоскости сменяется дифракцией на закругленном клине, а при дальнейшем росте угла скольжения - отражением от выпуклой (цилиндрической или эллипсоидальной) поверхности. Если при дифракции на полуплоскости согласно [3, 7, 8] амплитуда переизлученной волны обратно пропорциональна углу дифракции  $\psi$ , что и обуславливает быстрое падение интенсивности переизлучения при приближении к концам трассы (см. рис. 6), то при отражении от цилиндрической поверхности амплитуда этой волны наоборот возрастает с увеличением  $\psi$ . Это означает, что в переходной области, когда углы скольжения оказываются порядка эффективного значения наклонов неровностей, распределения мощности переизлучения по дистанции будут иметь промежуточный характер, изменяясь от вида кривых 1 рис. 6 при  $\gamma \ll \gamma_{эф}$  до вида кривой рис. 7 при  $\gamma \gg \gamma_{эф}$  (здесь  $\gamma$  - угол скольжения по отношению к средней плотности поверхности раздела;  $\gamma_{эф}$  - эффективное значение угла наклона неровностей).

**Выводы.** В целом можно отметить, что в области углов  $\gamma > \gamma_{\text{гр}}$  дифракцию на последовательности экранов можно заменить более эффективным с точки зрения вычислительных затрат асимптотическим представлением интеграла Френеля и результирующее поле представлять как сумму полей свободного пространства и элементарных вторичных излучателей в виде линейных границ экранов.

В такой модели, как и в фацетной, основной вклад в когерентную компоненту поля вносит участок трассы, соответствующий первой зоне Френеля, а в диффузную компоненту - концевые участки трассы. Однако принципиальным отличием от фацетной модели является то, что некогерентная компонента не исчезает даже при нулевых углах скольжения. Следующим отличием является то, что при дифракционной модели в области применимости лучевого представления интенсивность поля, переизлученного подстилающей поверхностью, сравнительно равномерно распределена по дистанции с максимумом в точке стационарной фазы, при применении же МКП - интенсивность поля в основном формируется концевыми участками. Рост СКО морских волн приводит к перераспределению переизлучаемой мощности: когерентная компонента уменьшается, а диффузная - возрастает.

1. Логвинов Ю. Ф., Педенко Ю. А., Разказовский В. Б. Дифракционная модель многолучевого распространения над неровной поверхностью при малых углах скольжения // Изв. вузов. Радиофизика - 1996. - 39, №5. - С.547-558.
2. Разказовский В. Б., Логвинов Ю. Ф. Множитель ослабления радиоволн при распространении над морем под малыми углами скольжения: модель многократной дифракции // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины, 2007. - 12, №1. - С.168-176.
3. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. - М.: Изд. АН СССР, 1961. - 546 с.
4. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. - М.: Наука, 1972. - 424 с.
5. Beckman P., Spizzicgino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. - London: Pergamon Press, 1963. - 303 p.
6. Barton D. K. Low-altitude tracing over rough surface. - 1 Theoretical Prediction // "EASCON'79 Rec., Arlington, Va, 1978", N.Y. - 1979. - P.224-234.
7. Уфимцев П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. - М.: Сов.радио, 1962. - 243 с.
8. Kouyoumtjian R. G., Pothak P. H. A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conduction Surface // Proc. Of IEEE. - 1974, - 62, №11. - P.448-461.
9. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / М. Е. Варганов, Ю. С. Зиновьев, Л. Ю. Астанин и др.; под ред. Л. Т. Тучкова. - М.: Радио и связь, 1985. - 236 с.

10. Кириченко В. А., Логвинов Ю. Ф. Статистические характеристики освещенных вершин морских волн для симметричных трасс при наблюдении под малыми углами скольжения // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины, 2006. - 11, №1. - С.46-54.
11. Экспериментальные исследования влияния неоднородной трассы на точность пеленгования / И. Д. Гонтарь, Ф. В. Кивва, В. Б. Разказовский и др. - Сб. научн. трудов НАН Украины, ИРЭ им. А. Я. Усикова, Харьков, 2006. - 11, №2. - С.222-228.
12. Разказовский В. Б., Величко А. Ф. Статистические характеристики ошибок пеленгования на коротких наземных трассах // Изв.вузов. Радиоэлектроника. - 1999. - 42, №4. - С.25-34.
13. Балан М. Г., Беспечный С. Б., Горбач Н. В. и др. Статистические характеристики поля сантиметровых и миллиметровых радиоволн над поверхностью моря // Изв.вузов. Радиофизика - 1982, - 25, №11. С.1260-1268.
14. Dougherty N. T., Maloney L. J. Application of Diffraction by Convex Surfaces to Irregular Terrain Situations // Radio Science. - 1964. - 68D, №2. - P.239-249.

#### MICROWAVE PROPAGATION FACTOR AT SMALL GRAZING ANGLE OVER SEA: TRANSIENT REGION

V. B. Razskazovskyy, Yu. F. Logvinov

The peculiarities of the field of centimeter and millimeter radio waves over rough sea surface are investigated in the transition region of small grazing angle, it is below than which necessary to use the model of multiple knife-edge diffraction on the wave crest, and higher Kirchgoff method is applicable.

It is shown that multipath propagation of radio wave is applicable in it, the properties of coherent and uncoherent component of the field forward scattering as function geometry of radio path and sea state is analyzed.

**Key words:** diffraction, sea surface, low grazing angles.

#### МНОЖНИК ОСЛАБЛЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ПРИ ПОШИРЕННІ НАД МОРЕМ ПІД МАЛИМИ КУТАМИ КОВЗАННЯ: ПЕРЕХІДНА ЗОНА

В. Б. Разказовський, Ю. Ф. Логвінов

Досліджено особливості поля сантиметрових і міліметрових радіохвиль над поверхнею моря в перехідній області кутів ковзання, нижче якої необхідно користуватися моделлю багаторазової дифракції Френеля на гребнях хвиль, а вище - наближенням Кирхгофа. Показано, що в ній можна застосовувати багатопробене представлення поширення радіохвиль, проаналізовані особливості залежності когерентної і некогерентної компонент розсіяного "уперед" поля від геометрії траси і параметрів морського хвилювання.

**Ключові слова:** дифракція, морська поверхня, малі кути ковзання.

Рукопись поступила 18 октября 2006 г.