

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ ВОЛН

УДК 621.371(260).029.65

## МНОЖИТЕЛЬ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ НАД МОРЕМ ПОД МАЛЫМИ УГЛАМИ СКОЛЬЖЕНИЯ: МОДЕЛЬ МНОГОКРАТНОЙ ДИФРАКЦИИ

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](mailto:vadimr@ire.kharkov.ua)*

В приближении многократной дифракции Кирхгофа на полуплоскостях численным методом исследованы особенности множителя ослабления СВЧ радиоволн над поверхностью моря с ветровым волнением при малых углах скольжения и малых высотах над поверхностью. Показано, что такая модель позволяет объяснить наблюдаемые в эксперименте особенности поля при высотах, сравнимых с высотой морских волн, в частности, существенно более высокие значения множителя ослабления, чем предсказываемые при использовании метода касательной плоскости. Ил. 8. Табл. 2. Библиогр.: 18 назв.

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

Необходимость и правомерность привлечения представлений о дифракционном механизме, подобном дифракции на полуплоскости, для объяснения особенностей структуры электромагнитного поля на трассах с явно выраженными неровностями рельефа (холмы, горные гряды) или препятствиями (строения, земляные насыпи, лесополосы и т. п.) известны давно, и методы практических расчетов для этих случаев рассмотрены, например, в работах [1-3]. В последнее время делаются попытки применить модель многократной дифракции для расчета множителя ослабления поля на линиях сотовой связи в условиях городской застройки (например, [4, 5]).

Наряду с этим накопление экспериментальных данных о свойствах поля СВЧ при малых углах скольжения и малых, в единицы метров и менее, высотах над морской и равнинной поверхностями показало, что многие особенности как флуктуаций, так и средних значений поля в этих условиях не могут быть объяснены в рамках теорий, использующих метод малых возмущений (ММВ) или приближение Кирхгофа (метод касательной плоскости (МКП)). Одним из противоречий является то, что коэффициент отражения, выражающий амплитуду зеркальной составляющей переизлученного поверхностью поля, в эксперименте возрастает до значений, близких к единице, при уменьшении угла скольжения, в то время как согласно выводам [6, 7], начиная с углов скольжения порядка значений эффективных наклонов неровностей, должно происходить его монотонное уменьшение из-за затенений поверхности неровностями. С другой стороны, при малых, порядка высоты волн высотах над поверхностью моря, как показано, например, в [8, 9], уровни поля существенно превышают рассчитанные методами работ [6, 7], и для достижения согласия

теории с экспериментом приходится вводить в расчет характеристики неровностей, не соответствующие реально существовавшим во время проведения опытов. Невозможность объяснить в рамках теории, основанной на ММВ и МКП, особенности флуктуаций фаз при распространении сантиметровых волн над равнинной сухопутной трассой стимулировала появление концепции о роли дифракционных механизмов; одна из таких моделей рассмотрена в работе [10].

На основании анализа обширных экспериментальных данных, полученных в наших исследованиях по распространению сантиметровых и миллиметровых волн над морем и суши и результатов упомянутых выше работ нами в [11-13] сформулирована концепция о том, что в области высот в единицы метров над морской поверхностью с волнением для описания поля необходимо использовать дифракционную модель. Позже на основе анализа свойств морской поверхности в работах [14, 15] методами моделирования получены параметры неровностей, являющиеся исходными для расчетов характеристик электромагнитного поля вблизи поверхности.

**1. Области применимости приближений.** Рассмотрим вначале оценки границ применимости различных приближенных методов описания поля. Нижняя граница строгой применимости МКП определяется двумя критериями:

- отсутствием затенений частей поверхности раздела, участвующей в формировании переизлученного в точку наблюдения поля, ее же неровностями;

- ограничением на минимальное значение угла скольжения при отражении от выпуклого элемента неровностей. Согласно [6], количественным критерием первого может служить неравенство

$$\psi_1 \geq \gamma_{эф}, \quad (1)$$

где  $\psi_1$  - угол скольжения;  $\gamma_{эф}$  - эффективное значение угла наклона неровностей. Обозначение величин в этом и последующих выражениях поясняются рис. 1.

Строгое определение  $\gamma_{эф}$  является непростой самостоятельной задачей (см., например, [16, 17]). Для нашего случая на основании этих работ будем принимать его равным 0,02 рад, что близко к наклону крупных энергонесущих волн.

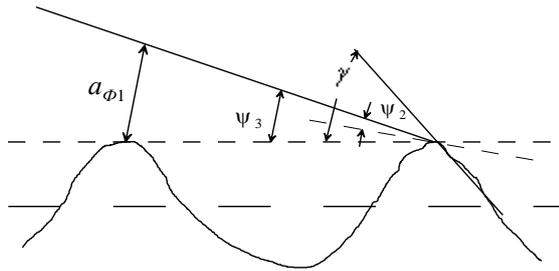


Рис. 1. Схема трассы

Критерием второго ограничения является неравенство работы [18]

$$\sin \psi \gg \sin \psi_2 = \sqrt[3]{\frac{\lambda}{2\pi\rho_{кр}}}, \quad (2)$$

где  $\psi_2$  - угол скольжения луча по отношению к плоскости, касательной к неровности в точке отражения;  $\lambda$  - длина радиоволны;  $\rho_{кр}$  - радиус кривизны поверхности в точке отражения. Как показывают оценки, при интересующих нас малых углах скольжения освещенными по отношению к обоим корреспондирующим пунктам остаются только окрестности вершин наиболее высоких волн [14, 15], поэтому правомерно рассматривать отражение облучающей волны именно от этих выпуклых элементов неровностей. Методом моделирования морского волнения получены оценки  $\rho_{кр}$  вершин волн [14, 15], учитывающие длинноволновую часть спектра морского волнения; при скорости ветра около 6 м/с и развитом волнении они лежат в пределах примерно 20-30 м. Приняв  $\rho_{кр} = 25$  м, получим для длины волны 1 см значение  $\psi_2 = 0,04$  рад. Таким значениям  $\psi_1$  и  $\psi_2$  при протяженности трассы, например 5 км, соответствует при симметричной трассе сумма высот источника и приемника около 200 м.

Приведенные выше значения радиусов кривизны соответствуют "сглаженному" профилю морских волн, в то время как для ветровых волн уже при скорости ветра более 4-5 м/с характерно появление островерхих гребней с углом при вершине около 120°, а при дальнейшем воз-

растании скорости ветра начинается их обрушивание. Радиусы кривизны вершин таких гребней значительно меньше приведенных выше значений, существенно большими окажутся граничные значения углов скольжения по критерию (2). В дополнение к неравенствам (1) и (2), являющимся ограничениями области применимости МКП, рассмотрим критерии пригодности упрощений, применяемых при использовании модели многократной дифракции на полуплоскостях. Первым из них является критерий, приводимый в работах [2, 7, 12], при выполнении которого правомерна замена закругленной у всех природных поверхностей кромки вершины (в случае морских волн - гребня волны) клиновидной

$$\rho_{кр} < C \sqrt{\frac{\pi r_T^3 r_R^3}{\lambda r_{TR}^3}}, \quad (3)$$

где  $\rho_{кр}$  - радиус кривизны цилиндрической поверхности, образующей границу гребня;  $r_T$ ,  $r_R$  - расстояния от гребня до излучателя  $T$  и до точки наблюдения  $R$  соответственно;  $r_{TR}$  - расстояние между этими точками по прямой. В рассматриваемом нами случае очень малых углов скольжения и малых углов дифракции можно принимать  $r_{TR} \approx r_T + r_R$ . Выбор значения коэффициента  $C$  зависит от глубины погружения точки наблюдения в тень и от допустимого отличия точного значения множителя ослабления, учитывающего закругленность границы препятствия, от приближенного при замене этого препятствия полуплоскостью. В исследуемом нами случае представляет интерес такая геометрия задачи, когда край каждого из экранов фактически находится в области полутени от предыдущего, так как при погружении в тень он перестает влиять на результирующее поле. Исходя из расчетных зависимостей работы [2], выбрано значение  $C = 8 \cdot 10^{-3}$ , при котором разница между точным и приближенным значениями множителя ослабления на границе геометрической тени, т. е. при ослаблении 6 дБ, не превышает 1 дБ.

Оценками по критерию (3) следует пользоваться с учетом соотношения угла скольжения с углом

$$\psi_3 = \arctg \frac{a_{\phi 1}}{d} \approx \sqrt{\frac{\lambda}{2d}}, \quad (4)$$

где  $a_{\phi 1}$  - радиус первой зоны Френеля на расстоянии  $d$  между экранами. Неравенство  $\psi > \psi_3$  означает, что влияние соседних гребней на поле, переизлученное рассматриваемым гребнем, незначительно. Это позволяет, во-первых, использовать лучевое описание поля в точке наблюдения, представляя его как сумму элементарных волн, переизлученных независимо всеми гребня-

ми, во-вторых, при пользовании выражением (3) подставлять в него расстояние от гребня до точек излучения и приема. Как показано в работе [12], это приводит к значениям радиусов кривизны неровностей (3) в сотни метров, что реализуется даже при волнении типа зыби.

Обратное неравенство  $\psi < \psi_3$  означает, что поле в месте расположения рассматриваемого гребня формируется при сильном влиянии всех предшествующих гребней. Простейшей гипотезой о поле, облучающем вершину, строго справедливой только для области достаточно глубокой тени, является представление его полем цилиндрической волны, переизлученной ближайшим гребнем. Соответственно в (3) должны подставляться расстояния до соседних гребней. Приняв их, например, равными 50 м, получим из (3) для длины волны 1 см условие  $\rho_{кр} < 17,7$  м, которое обеспечивается для ветровых волн. Очевидно, в промежуточной области в окрестностях границы тени критические значения радиусов кривизны будут иметь промежуточные значения, что служит основанием для замены при расчетах гребней волн полуплоскостями.

Наконец, должно выполняться условие достаточно сильного ослабления дифрагировавшего на гребне поля, облучающего поверхность впадины между волнами. Для количественной оценки будем считать, что ближайшая к рассматриваемому гребню половина интервала между волнами должна находиться в области, где дифракционное ослабление превышает 10 дБ. Это условие означает, что на удалении от гребня равном половине длины морской волны, которую примем равной  $\Lambda_m$  (длина волны максимума спектра установившегося морского волнения [17]), расстояние от границы геометрической тени до точки на поверхности впадины должно составлять примерно 0,47 радиуса первой зоны Френеля. Принимая расчетную высоту гребня морской волны равной среднеквадратической высоте морских волн  $\sigma_h$ , получим неравенство

$$0,47 \sqrt{\lambda \Lambda_m} < \sigma_h - \frac{\Lambda_m}{2} \psi. \quad (5)$$

Используя приводимые в работах [16, 17] зависимости  $\sigma_h$  и  $\Lambda_m$  от скорости ветра, можно получить оценку для ее величины, при которой выполняется неравенство (5)

$$U_{10} > \frac{37,5 \sqrt{\lambda}}{1 - 75 \psi}. \quad (6)$$

Здесь  $U_{10}$  - скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью моря, м/с;  $\lambda$  - длина волны, м;  $\psi$  - угол скольжения, рад. Например, задавшись

$\lambda = 10^{-2}$  м и  $\psi = 10^{-3}$  рад, получим  $U_{10} > 4,02$  м/с; такой скорости ветра соответствует среднеквадратическое значение высоты волн около 10 см.

Таким образом, в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн даже при слабом волнении можно использовать дифракционный подход к описанию поля на малых высотах. В области, где не выполняются неравенства (5) и (6), вклад переизлучения той части поверхности, которая фактически находится в зоне полутени, может оказаться сравнимым по интенсивности с полем многократной дифракции. Существующие на сегодня методы расчета поля над шероховатыми поверхностями не позволяют получить количественные оценки этого эффекта. Предполагая, что выполняются неравенства (3), (5) и (6), будем заменять реальную поверхность с ветровыми волнами системой параллельных полуплоскостей с горизонтальными прямолинейными границами, перпендикулярными направлению распространения волны. Поскольку наибольший интерес представляют особенности поля в вертикальной плоскости, будем рассматривать двумерный случай. Решать задачу дифракции будем в приближении Кирхгофа, т. е. считать поле на теневой стороне экрана равным нулю. Основанием для такого приближения, используемого авторами большинства работ по многократной дифракции, в частности [1, 3-5, 10], является то, что расстояния между границами экранов и до точки наблюдения во много раз (более 100) превышают длину волны, а углы дифракции очень малы (единицы миллирадиан).

**2. Метод расчета поля вблизи поверхности.** Модель для двумерного случая представления поля в точке приема как продукта многократной дифракции и приближения Кирхгофа на множестве полуплоскостей представлена в виде, показанном на рис. 2.

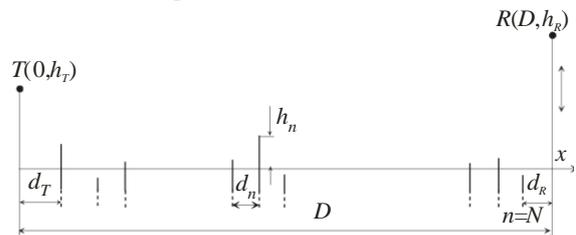


Рис. 2. Схема трассы с многократной дифракцией

На рисунке высоты излучателя  $h_T$ , приемника  $h_R$  и всех границ экранов отсчитываются от оси X, положение которой выбрано так, чтобы по отношению к ней выполнялось условие

$$\sum_{n=1}^N h_n = 0. \quad (7)$$

В общем случае экраны не предполагались эквидистантными и равновысокими, в широких пределах могли варьироваться и расстояния от крайних экранов до концов трассы. При численном интегрировании нами использовался подход, примененный в работе [4], позволяющий без существенного снижения точности ограничить область интегрирования по высоте отрезком, равным малому числу диаметров первой зоны Френеля в месте расположения соответствующей полуплоскости. При этом для исключения артефактов, возникающих из-за наличия второй (в нашем случае верхней) границы интегрирования, под интеграл вводится дополнительный множитель типа функции Гаусса, формирующий плавное спадание поля на верхнем пределе интегрирования (суммирования). Использование такого приема позволило, например, обеспечить выполнение расчета поля при дифракции на 20 экранах с погрешностью менее единиц процентов за время порядка десятков минут на компьютере средней мощности.

При геометрии трассы, когда обеспечивалось выполнение критерия (4), для расчета поля использовалось асимптотическое приближение, при котором поле в точке  $R$  (приемник) представлялось суммой полей цилиндрических волн, переизлученных границами всех экранов. Ранее в работе [12] для этой области ряд интересных зависимостей получен аналитическими методами, численный метод позволил уточнить ряд из них.

**3. Анализ результатов.** Рассмотрим результаты расчета поля вблизи поверхности. Для выяснения основных закономерностей с целью упрощения и ускорения вычислений рассматривалась система эквидистантных равновысоких экранов, расстояние между которыми варьировались в пределах от 10 до 50 м, что соответствует применительно к задаче распространения радиоволн над морем волнению в прибрежной зоне при силе ветра 3-7 м/с. Расчетная длина радиоволны была принята равной 1 см, полная длина трассы  $D = 550$  м, а высоты корреспондирующих пунктов лежали в пределах 0-4 м. Это соответствовало максимальному значению угла скольжения 14,5 мрад (около  $0,8^\circ$ ) и позволяло охватить частично и область применимости асимптотического приближения.

На рис. 3 приведены типичные зависимости множителя ослабления  $W(h_R)$  от высоты точки наблюдения при нескольких значениях высоты точки излучения  $h_T$  и двух значениях числа экранов:  $N = 10$  и  $N = 20$ .

Напомним, что множителем ослабления поля называется величина

$$W(h_R) = \frac{|E_R(h_R)|}{|E_0(h_R)|}, \quad (8)$$

где  $|E_0(h_R)|$  - абсолютная величина (модуль) поля свободного пространства в точке приема;  $|E_R(h_R)|$  - абсолютная величина поля в той же точке с учетом влияния условий распространения, в нашем случае дифракции на множестве экранов. Значения параметров, при которых рассчитаны кривые, приведены под рисунком.

Для сравнения на этом же графике показан множитель ослабления, рассчитанный по [16], который имел бы место при распространении не над системой экранов, а над средней плоской шероховатой поверхностью со среднеквадратической высотой неровностей 10 см.

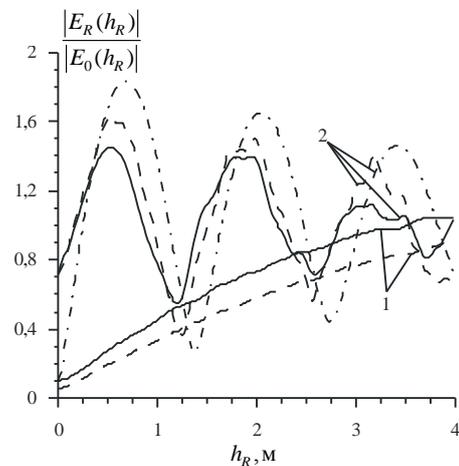


Рис. 3. Зависимость множителя ослабления от высоты точки наблюдения при дифракции на 10 экранах (сплошная кривая), 20 экранах (штриховая кривая) и при интерференции на плоской шероховатой границе раздела с  $\sigma_n = 10$  см (штрихпунктир). Длина волны 1 см, расстояние между экранами 50 м, длина трассы 550 м: 1-  $h_T = 0$  м; 2-  $h_T = 2$  м

Анализ результатов численных расчетов позволяет сделать ряд выводов о свойствах множителя ослабления, иллюстрируемых графиками рис. 3. Во-первых, начиная примерно с  $N = 4$  (на рисунке приведены кривые для  $N = 10$  и  $N = 20$ ) при изучавшемся диапазоне изменения расстояний между экранами и длине волны, возрастание числа экранов не приводит к существенному изменению вида множителя ослабления при близкой к нулю высоте источника излучения; этот вывод согласуется с результатами работы [4]. Во-вторых, в области высот, соответствующих условию (4), высотная зависимость множителя ослабления подобна той, которая имеет место при интерференционном механизме над плоской поверхностью раздела. В третьих, при высотах точки наблюдения, близких к нулевым, множитель ослабления при дифракции существенно превышает значения, следующие из расче-

тов для интерференции над плоской поверхностью, что объясняет экспериментальные данные работ [8,9] без неоправданных искусственных приемов, например, существенного завышения среднеквадратической высоты неровностей.

Область малых высот представляет в нашем случае особый интерес. В качестве количественного критерия "малой высоты" будем использовать условие, что точка наблюдения находится ниже верхней границы полутени (т. е. на границе первой зоны Френеля), образуемой ближайшим к ней (к точке наблюдения) экраном

$$h \leq h_{RL} = a_{\phi 1} - d_R \frac{h_T}{D - d_R} = \sqrt{\frac{\lambda d_R}{2}} - d_R \frac{h_T}{D - d_R}. \quad (9)$$

Для приведенных на рис. 3 графиков значения  $h_{RL}$  составляют около 0,5 м для кривых 1 и 0,3 м для кривых 2. Эта область зависимостей множителя ослабления от высоты точки наблюдения показана на рис. 4 для высот точки излучения 0 м, 0,5 м и 2 м.

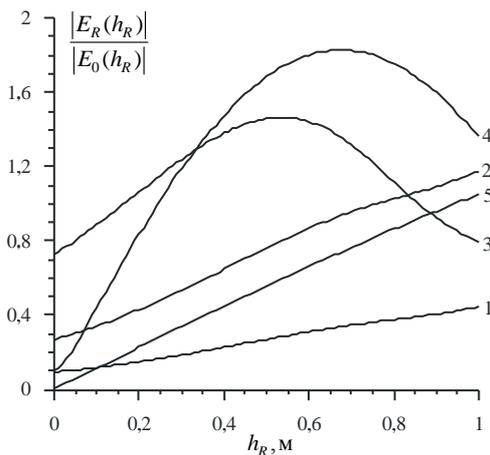


Рис. 4. Зависимости множителя ослабления от высоты точки наблюдения при интерференционном и дифракционном механизмах распространения радиоволн. Длина волны 1 см, длина трассы 550 м, расстояние между экранами 50 м, число экранов 10: 1 - дифракционный механизм,  $h_T = 0$  м; 2 - дифракционный механизм,  $h_T = 0,5$  м; 3 - дифракционный механизм,  $h_T = 2$  м; 4 - интерференционный механизм с  $\sigma_h = 10$  см и  $h_T = 2$  м; 5 - интерференционный механизм с  $\sigma_h = 10$  см и  $h_T = 0,5$  м

На этом же рисунке кривыми 4 и 5 показаны зависимости множителя ослабления для условий, когда на всей трассе имеет место интерференционное формирование высотной структуры поля. Из графиков видно, что в области малых высот при дифракционном механизме происходит существенное возрастание напряженности поля по сравнению с интерференционным случаем; на уровне вершин неровностей это превышение в нашем примере составляет около десяти раз.

Рассмотрим далее влияние на множитель ослабления расстояния от точки наблюдения до ближайшего к ней экрана и высоты последнего; очевидно, при симметричной трассе таким же будет и влияние положения первого экрана по отношению к точке излучения. Расчеты показали, что определяющим при этом является положение края экрана относительно геометрической границы тени, создаваемой предшествующей системой экранов. Ниже этой границы влияние экрана мало, но выше ее - быстро возрастает, и при высоте над границей тени порядка радиуса первой зоны Френеля (с фокусом в точке наблюдения) нижняя область множителя ослабления практически определяется дифракцией на этом экране. Сказанное видно из рис. 5.

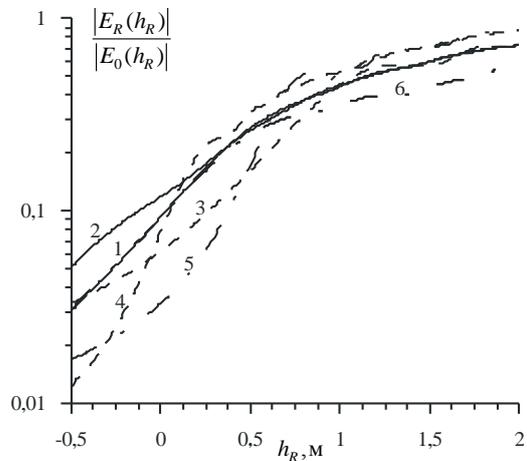


Рис. 5. Влияние на высотную зависимость множителя ослабления положения на трассе и высоты одного из экранов (или отдельного экрана),  $h_T = 0$  м

Параметры кривых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер кривой	Номер экрана с варьируемыми параметрами	Расстояние от экрана с варьируемыми параметрами до точки наблюдения, м	Высота экрана, м
1	10	50	0
2	10	50	-0,5
3	10	50	0,5
4	10	10	0
5	10	10	0,5
6	5	300	0,5

На нем при дифракции на 10 экранах для длины волны 1 см и дальности трассы 550 м приведены зависимости множителя ослабления от высоты точки наблюдения при изменении расстояния от нее до ближайшего экрана (расстояние  $d_R$  рис. 2) и от его высоты, а также от высоты экрана в центре трассы (экран № 5). Расстояния между всеми экранами были одинаковыми и при расчетах при-

нимались равными 50 м. Кривая 1 рис. 5 соответствовала случаю, когда границы всех экранов и точка излучения лежали на одной прямой, совмещенной с осью абсцисс, кривая 2 - когда граница ближайшего к точке наблюдения экрана, отстоящего от нее на 50 м, была на 50 см ниже оси абсцисс, т. е. границы геометрической тени. Видно, что при этом в области границы тени и ниже нее имеет место возрастание уровня поля по сравнению с исходной ситуацией (кривая 1). При превышении кромкой этого экрана общей геометрической границы тени (в рассматриваемом примере на 50 см - кривая 3) появляется дополнительное ослабление поля в области, соответствующей полутени и тени от этого экрана, выше которой наблюдаются осцилляции, характерные для дифракции на полуплоскости. Все эти особенности выражены тем более резко, чем меньше расстояние от последнего экрана до точки наблюдения. Сказанное видно из сравнения кривых 1, 3 и 4, 5. Кривые 4 и 5 соответствуют высотам экрана 0 м и 50 см при расстоянии от него до точки наблюдения 10 м.

Значительно слабее проявляется влияние экрана, расположенного в средней части трассы. Так при высоте экрана №5 равном 50 см (кривая 6 рис. 5) в области высот точки наблюдения, ниже ее, множитель ослабления практически совпадает с исходным (кривая 1). Более детальный анализ показывает, что при близких к нулю высотах источника излучения влияние экранов, расположенных в средней части трассы, становится существенным, когда их высота приближается к значению радиуса первой зоны Френеля для трассы излучатель-экран-точка наблюдения.

Рис. 6 дополняет рис. 5, представляя зависимости множителя ослабления от высоты тех же двух экранов (последнего, т. е. №10 и №5 в средней части трассы) при ее изменении в пределах от -50 см до +100 см для двух значений высоты точки наблюдения (0 и 50 см). Из сравнения кривых 1 и 3 с кривыми 2 и 4 хорошо видно возрастание крутизны зависимости множителя ослабления от высоты экрана при приближении к нему точки наблюдения, а также практически полное отсутствие влияния экрана в средней части трассы при таком же изменении его высоты (кривые 5 и 6).

Доминирующее влияние ближайшей вершины неровности (в случае морского волнения гребня волны) на сигнал в низкорасположенной точке приема означает, в частности, что именно особенности движения и изменения высоты этого гребня будут определять характеристики флуктуаций принятого сигнала, а не результат сложения множества элементарных волн, как это имеет место в области углов скольжения, где применимы приближения работ [6, 7].

Напомним, что все, сделанные выше выводы, относятся к случаю малой высоты источника излучения, удовлетворяющей условию (9). Когда с ростом высот корреспондирующих пунктов длина продольной оси первой зоны Френеля в плоскости границ экранов становится меньше длины области, занятой системой экранов, начинает ослабевать роль концевых участков и возрастать влияние экранов, входящих в первую и ближайшие к ней зоны Френеля на плоскости, в которой лежат границы экранов (здесь, как указывалось в начале, рассматривается система эквидистантных равновысоких экранов).

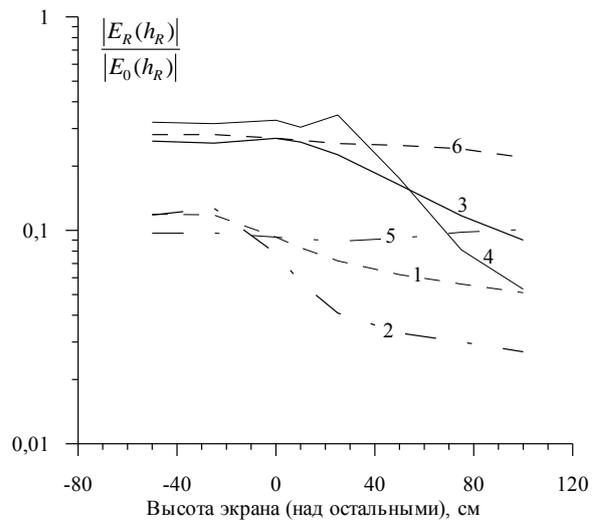


Рис. 6. Зависимость множителя ослабления от высоты экранов, расположенных в разных частях трассы,  $h_T = 0$  м

Параметры кривых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер кривой	Номер экрана, изменяющего свою высоту	Расстояние от последнего экрана до точки наблюдения, м	Высота точки наблюдения, м
1	10	50	0
2	10	10	0
3	10	50	0
4	10	50	0,5
5	5	10	0,5
6	5	50	0,5

Одновременно, как уже отмечалось при описании рис. 3, вид высотной зависимости приближается к характерному для интерференции поля свободного пространства с зеркально отраженным от эквивалентной плоской границы раздела - плоскости границ экранов. Расчеты многократной дифракции для высот точки излучения 4 м, обеспечивающих выполнение неравенства (4), показали, что исключение концевых участков про-

тяженностью 200 и 120 м не приводит к существенному изменению высотной зависимости множителя ослабления (отмечено даже незначительное его возрастание). Подобие высотных зависимостей множителей ослабления при интерференционном механизме и многократной дифракции позволяет ожидать, что при существенном отличии высот точек излучения и наблюдения основное влияние на поле будет оказывать участок трассы, прилегающий к низкорасположенному пункту.

На реальных трассах протяженностью в несколько километров при высоте одного из корреспондирующих пунктов более 10 м, что соответствует практическим условиям работы многих радиосистем, к распространению над значительной частью трассы правомерно применять лучевые методы описания поля над поверхностью, представляя его как результат интерференции полей свободного пространства и отраженного поверхностью, т. е. многолучевой подход. И только к конечному участку трассы, прилежащему к низкорасположенному пункту, для которого, в особенности с учетом сферичности Земли, углы скольжения становятся менее ограничиваемых условием (2), следует применять дифракционное описание. Отмеченное ранее превращение при определенной геометрии трассы высотной структуры поля, являющегося продуктом многократной дифракции, в структуру, совпадающую с интерференционной, является аргументом в пользу такого комбинированного метода описания. Результаты его применения к трассе длиной 1,5 км, первые 500 м которой формируют интерференционную структуру поля, являющуюся "входной" для конечного участка трассы с дифракционным механизмом (экраны эквидистантные, равновысокие, количеством 20 штук), показаны на рис. 7.

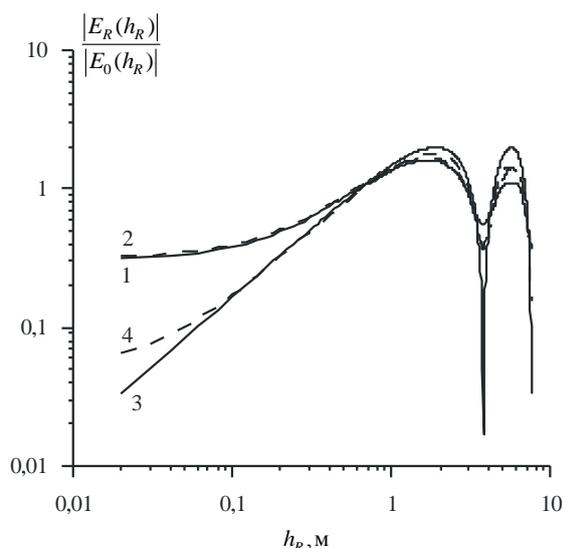


Рис. 7. Множитель ослабления на трассе с интерференционным и дифракционным участками. Длина волны 1 см, число экранов 20, расстояние между экранами 50 м, дли-

на трассы 1500 м. 1 - составная трасса, гладкая поверхность; 2 - составная трасса,  $\sigma_h=10$  см; 3 - плоская гладкая поверхность; 4 - плоская поверхность,  $\sigma_h=10$  см

Считалось, что начальный участок трассы представляет собой плоскую гладкую или шероховатую поверхность, формирующую интерференционную высотную структуру поля на границе первого из 20 экранов. На рис. 7 кривые 1 и 2 показывают значения множителя ослабления на такой составной трассе в функции высоты точки наблюдения, а кривые 3 и 4 - его значения, которые имели бы место, если бы на всей трассе граница раздела оставалась бы плоскостью. Высота источника излучения принималась равной 2 м, а среднеквадратическая высота неровностей составляла 0 м (гладкая поверхность) или 10 см. Из рис. 7 видно, что выше первого интерференционного максимума сохраняется интерференционная высотная структура, а в области малых высот, соответствующих условию (4), значения множителя ослабления на порядок и более превышают предсказываемые интерференционной моделью. Эффект возрастания поля вблизи поверхности под влиянием дифракционного механизма, фактически являющегося вариантом "усиления препятствием" из работ по распространению радиоволн в гористой местности (см., например, работы [1, 3]), иллюстрирует рис. 7. Из него видно, что наличие вблизи от точки наблюдения участка с дифракционным механизмом распространения приводит к существенному (при принятых для расчета данных в 5...10 раз) возрастанию уровня поля вблизи нулевых высот.

Сравним высотные зависимости множителя ослабления, полученные в рамках рассматриваемой модели с экспериментальными данными. Для этого воспользуемся результатами работы [9], в которой исследовались в том числе и высотные зависимости множителя ослабления. Опыты проводились над морем со средним значением среднеквадратического отклонения высот морского волнения около 0,1 м на дистанции 14,5 км. На рис. 8 представлены расчетные и экспериментальные зависимости множителя ослабления для длины волны 3,2 см.

Этот рисунок взят из работы [9] и дополнен тремя расчетными штрих- и штрихпунктирными кривыми. Сплошные кривые рис. 8 представляют собой рассчитанные по интерференционным формулам значения множителя ослабления. Данные, относящиеся к эксперименту, показаны значками и соединены между собой тонкими линиями, что означает измерения в течение одного дня, т. е. в подобных условиях. Из рис. 8 видно, что интерференционная зависимость множителя ослабления для эквивалентного радиуса кривизны Земли 8500 км лежит вне области экспериментальных значений и дает по сравнению с

данными эксперимента более низкие значения множителя ослабления (тонкая сплошная кривая рис. 8). Лучшее совпадения с экспериментом дает кривая множителя ослабления, полученная по интерференционной формуле для плоской Земли (утолщенная сплошная кривая рис. 8), но для дистанций 14,5 км кривизны Земли нельзя пренебрегать (заход за линию горизонта на данной дистанции составляет около 12,4 м).

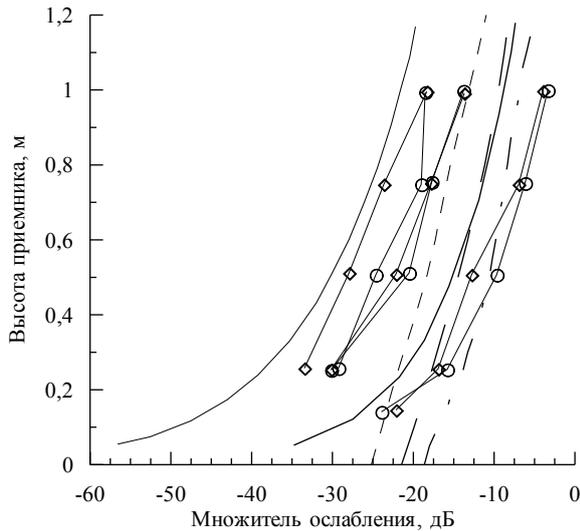


Рис. 8. Высотные зависимости множителя ослабления для дальности 14,5 км, длина волны 3,2 см, высота источника 13 м. —○— горизонтальная поляризация, данные эксперимента; —◇— вертикальная поляризация, данные эксперимента; ——— расчетная интерференционная кривая для эквивалентного радиуса Земли 8500 км; ——— расчетная интерференционная кривая для плоской Земли; - - - расчетная дифракционная кривая для плоской Земли; — — — расчетная дифракционная кривая для эквивалентного радиуса кривизны 8500 км; — — — расчетная кривая для комбинированной (интерференционный и дифракционный механизм формирования поля) трассы с эквивалентным радиусом Земли 8500 км

Гораздо лучшее соответствие эксперименту дают кривые множителя ослабления, полученные для дифракционного или смешанного интерференционно-дифракционного механизма формирования поля. Штриховые и штрихпунктирные кривые рис. 8 показывают высотную зависимость множителя ослабления для плоской Земли при дифракции на 50 экранах. Экраны располагались через 30 м (среднеквадратическое отклонение положения экранов 3 м), их высоты были распределены по нормальному закону с  $\sigma_h = 0,1$  м. Расстояние между последним экраном и приемником составляло около 30 м. Экраны располагались на трассе ближе к приемнику, т. е. первый экран располагался на дальности около 1300 м, последний - 1470 м. Штриховая линия с длинными штрихами показывает высотную зависимость множителя ослабления для дифракционного механизма распространения радиоволн и

получена для тех же условий, что и штрихпунктирная, но с учетом кривизны Земли для эквивалентного радиуса 8500 км. И, наконец, высотная зависимость множителя ослабления, показанная штрихпунктирной линией с короткими штрихами, получена для смешанного механизма. Поле над первым экраном получено как результат интерференции и дальше идет расчет дифракции на последовательности 50 экранов. При этом учитывается и кривизна Земли для стандартной рефракции. Все три дифракционные кривые лежат в области изменения экспериментальных данных. Необходимо также отметить, что расчеты с дифракционным механизмом формирования поля, в отличие от интерференционного, не дают нулевых значений множителя ослабления на нулевой высоте (см. рис. 8).

**Выводы.** Таким образом, проанализированы особенности множителя ослабления поля на высотах, сравнимых с неровностями поверхности, путем представления поля как продукта дифракции на множестве непрозрачных экранов (полуплоскостей) с границами, перпендикулярными направлению распространения радиоволн. Показано, что применение такого подхода правомерно в области малых углов скольжения и малых высот одного из корреспондирующих пунктов, т. е. в области полутени, когда не выполняются предпосылки методов касательной плоскости и малых возмущений; их использование приводит к результатам, противоречащим существующим экспериментальным данным. Основные результаты анализа численными методами следующие.

– Множитель ослабления поля с уменьшениями высоты точки наблюдения в зоне полутени убывает значительно медленнее, чем при интерференционном представлении поля над поверхностью, оставаясь существенно отличным от нуля на границе геометрической тени и ниже ее. Это свойство сохраняется и в том случае, когда участку трассы с дифракционным механизмом предшествует участок с интерференционным механизмом формирования поля. При этом в результате действия дифракционного механизма множитель ослабления в области полутени оказывается значительно выше, чем без учета дифракционного участка трассы, даже в случае, когда интерференционный множитель ослабления на границе первого экрана равен нулю.

– При малой высоте обоих корреспондирующих пунктов (условием малости является неравенство (9), начиная с числа экранов равного 4...5, дальнейшее их увеличение слабо влияет на вид высотной зависимости множителя ослабления во всей области полутени.

– На множитель ослабления в области полутени сильное влияние оказывает удаленность от точки наблюдения и высота ближайшего к ней

экрана; те же параметры экранов, находящихся в средней части трассы, оказывают существенно более слабое влияние, чем крайние. Это, в частности, означает, что в реальных условиях распространения, например, над поверхностью моря с ветровыми волнами свойства флуктуаций сигналов при приеме в точке на малой высоте над поверхностью будут, в первую очередь, зависеть от особенностей пространственно-временной структуры неровностей на расстояниях порядка длины энергонесущей морской волны от антенны.

– В области, выше границы полутени, зависимость множителя ослабления от высоты по форме становится подобной интерференционной, сближаясь с ней при дальнейшем росте высот. Подобно случаю действия интерференционного механизма формирования поля здесь возрастает роль экранов, входящих в первые зоны Френеля на плоскости, в которой лежат границы экранов. О дальнейшей плавной трансформации структуры поля в интерференционную со всеми характерными для нее свойствами свидетельствуют расчеты с использованием асимптотического приближения для описания поля дифракции, в частности, результаты нашей работы [12]. Этот вывод объясняет, почему ряд результатов, например, расчетные зависимости для коэффициента отражения от шероховатой поверхности работ [6, 7] удается использовать для описания экспериментальных данных в области малых высот, где они не применимы по причинам, изложенным в начале статьи.

1. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолоний. - М. Связь. 1979. - 296 с.
2. Dougherty H. T., Maloney L. J. Application of Diffraction by Convex Surfaces to Irregular Terrain Situation // Radio Science Jom. of Res. NBP/USNC-URSI. - 1964. - 68D, №2. - P.239-250.
3. Троцкий В. Н. Дифракция УКВ на горных хребтах // Распространение радиоволн. - М.: Наука, 1975. - С.154-187.
4. Walfisch, Bertoni H. L. A theoretical Model of UNF Propagation in Urban Environments // IEEE Trans. Antennas Propagat. - 1988. - 36, № 12. - P.1788-1796.
5. Tzarass C., Saunders S. R. An Improved UTD Solution for Multiple-Edge Transition Zone Diffraction // IEEE Trans. on Ant. and Prop. - 2001. - 49, №12. - P.1688-1682.
6. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. - М.: Наука, 1972. - 424 с.
7. Barton D. Low-Altitude Tracking over rough Surfaces. 1. Theoretical prediction. "EASCON'79, October 9-11, Arlington, VA". Conf. Proc. - 1979. - 2, - P.224-234.
8. Zerner S. P., O'Dowd W. M., Dyer F. B. Forward-Scatter of Microwave near Surface of the Ocean. - "Int. IEEE/AP-S Symp. Program. and Dig., Atlanta, Ga, 1974", New-York. - 1974. - P.8-10.
9. Кириченко В. А., Логвинов Ю. Ф., Педенко Ю. А., Разказовский В. Б. Закон распределения флуктуаций множителя ослабления миллиметровых и сантиметровых радиоволн над морем // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 1998. - 3, №3. - С.68-77.
10. Полищук Ю. М. Дифракция Френеля на  $n$  полуплоскостях со статистически неровными границами. Малые неровности // Радиотехника и электроника. - 1971. - 16, №5. - С.675-684.

11. Разказовский В. Б. Модели и моделирование рассеяния ММ волн поверхностью Земли // "IV Всесоюз. шк. по распр. ММ и СубММ волн в атмосфере. (3-10 сентября 1991)": Тез. докл. - Н. Новгород: НИРФИ. - 1991. - С.59-64.
12. 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.
13. Разказовский В. Б. Дифракция на полуплоскости с неровным краем в задаче распространения радиоволн над поверхностью при малых углах скольжения. - Изв. вуз. Радиофизика. - 1997. - 40, №8. - С.965-979.
14. Логвинов Ю. Ф. Влияние затенений на статистические характеристики зеркальных элементов при многолучевом распространении над морем // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 1997. - 2, №1. - С.64-68.
15. Логвинов Ю. Ф. Статистические характеристики морской поверхности при малых углах скольжения для случая обратного рассеяния радиоволн // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2003. - 8, №1. - С.34-41.
16. Переслегин С. В. Связь СВЧ-рассеяния от морской поверхности с пространственно-временными характеристиками развитого волнения // Физика атмосферы и океана. - 1975. - 11, №5. - С.481-489.
17. Караев В. Ю., Баландина Г. Н. Модифицированный спектр волнения и дистанционное зондирование // Исследование Земли из Космоса. - 2000. - № 5. - С.1-12.
18. Фейнберг Е. П. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. - М.: Изд. АН СССР, 1961. - 546 с.

## MICROWAVE PROPAGATION FACTOR AT SMALL GRAZING ANGLE OVER SEA: THE MODEL OF MULTIPLE KNIFE-EDGE DIFFRACTION

V. B. Razskazovskyy, Yu. F. Logvinov

The peculiarities of the microwave propagation factor over disturbed sea surface have been investigated by numerical method using the multiple knife-edge diffraction model. The case of low grazing angles and small height of the receiver over the surface has been considered. It has shown that such a model allows explaining experimentally observed peculiarities of the field at the receiver height compared with that of the sea waves, in particular, essentially higher values of the propagation factor than the ones predicted through Kirchhoff approximation.

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

## МНОЖИТЕЛЬ ОСЛАБЛЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ПРИ ПОШИРЕННІ НАД МОРЕМ ПІД МАЛИМИ КУТАМИ КОВЗАННЯ: МОДЕЛЬ БАГАТОРАЗОВОЇ ДИФРАКЦІЇ

В. Б. Разказовський, Ю. Ф. Логвінов

У наближенні багаторазової дифракції Кірхгофа на напівплощині чисельним методом досліджені особливості множника ослаблення НВЧ радіохвиль над поверхнею моря з вітровим хвилюванням при малих кутах ковзання і малих висотах над поверхнею. Показано, що така модель дозволяє пояснити експериментальні особливості поля при висотах, що дорівнюють висотам морських хвиль, зокрема, істотно більш високі значення множника ослаблення, ніж ті, що дає використання методу дотичної площини.

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

*Рукопись поступила 19 июня 2006 г.*