

**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: [logvinov@ire.kharkov.ua](mailto:logvinov@ire.kharkov.ua)**МОДЕЛЬ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ СИЛЬНЫХ ЗАТЕНЕНИЯХ**

Важность модели распространения радиоволн над морской поверхностью при сильных затенения обусловлена практической значимостью этой задачи и потребностями фундаментальной науки для изучения физических процессов при распространении волн. В основе используемых в настоящее время расчетов электромагнитного поля над морской поверхностью с ветровыми волнами при малых углах скольжения лежит гипотеза о том, что неровности (морские волны) являются следствием возмущения в среднем плоской границы раздела и характеризуются малыми наклонами. Однако такие условия распространения радиоволн довольно редко встречаются на практике. Нами исследован альтернативный этому случай, соответствующий существованию сильных затенений, исключающих отражение от квазиплоских, близких к горизонтальным, элементов поверхности. Полученные результаты позволяют существенным образом переосмыслить физические процессы при рассеянии радиоволн в условиях сильных затенений. Методом численного моделирования определены координаты и кривизна незатененных элементов, которые являются вершинами волн, показано, что переизлученное ими поле представляется результатом действия дифракции Френеля и отражений от выпуклых цилиндрических (в исследуемом двумерном случае) поверхностей. Для радиоволн  $K_c$ -диапазона (длина волны 8 мм) оценены распределения мощности переизлучения по длине трассы, угловые спектры волн, приходящих в апертуру приемной антенны, знание которых необходимо для анализа работы пеленгационных радиосистем. В работе получены и проанализированы особенности распределения по длине трассы и углам прихода в точку приема мощностей когерентной и некогерентной компонент переизлученного поверхностью моря поля, существенно влияющие на точность систем измерения угловых координат источников излучения, в том числе использующих современные методы спектрального оценивания. Ил. 7. Табл. 1. Библиогр.: 12 назв.

**Ключевые слова:** особенности распространения над морем, миллиметровые радиоволны, малые высоты, сильные затенения поверхности.

Известно, что при углах скольжения, меньших или сравнимых с шириной диаграмм направленности антенн, существенное влияние на характеристики радиосистем оказывает явление, получившее в научно-технической литературе название многолучевого распространения радиоволн [1, 2]. В нашей работе исследуется один из часто встречающихся на практике случаев распространения над морем радиоволн миллиметрового и коротковолновой части сантиметрового диапазонов, когда существуют следующие условия:

– распространение происходит над поверхностью моря с ветровыми волнами, причем в исследуемом диапазоне радиочастот можно не учитывать частотную дисперсию диэлектрической постоянной воды и считать ее равной  $|\varepsilon| = 80$ ;

– длина радиоволны существенно меньше значения эффективной высоты морских волн и их среднего пространственного периода:

$$\lambda \ll \sigma_H; \quad (1)$$

$$\lambda \ll L, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина радиоволны;  $\sigma_H$  – среднеквадратическое значение высоты неровностей, создаваемых ветровыми волнами;  $L$  – средняя длина ветровых морских волн;

– угол скольжения  $\gamma_0$  по отношению к средней поверхности воды, определяемый как

$$\gamma_0 = \frac{h_T + h_R}{D}, \quad (3)$$

удовлетворяет условиям

$$\gamma_0 \ll 1; \quad (4)$$

$$\gamma_0 \ll \eta_{\max} \approx \frac{\sigma_H}{L}, \quad (5)$$

где  $h_T$ ,  $h_R$  – высоты точечного источника излучения и точки наблюдения;  $\eta_{\max}$  – максимальное значение наклона неровностей поверхности. Согласно [2] неравенства (4) и (5) означают, что сильные затенения поверхности обусловлены ее же неровностями.

Из-за сложной и недетерминированной формы границы раздела сред строгие методы расчета поля для рассматриваемых условий оказываются практически неприменимы, поскольку наблюдается нулевая вероятность совпадения формы, заложенной в расчет и реально существующей в месте практического действия системы поверхности моря. Таким образом, при разработке методов расчета поля используются ряд модельных предположений. Наибольшее распространение получила гипотеза о в среднем плоской границе раздела, на которую наложены неровности с различными пространственно-временными характеристиками. Одним из следствий такого подхода является постулирование априори присутствия в переизлученном поле детерминированной, когерентной с облучающим полем составляющей, соответствующей по своим свойствам зеркальному отражению от плоской границы раздела. Однако правомерность его использования не очевидна в условиях сильных затенений и

в других случаях, когда вторичное поле формируется небольшим числом переизлучающих элементов сильно деформированной волнением морской поверхности. Предложенная нами модель, рассматриваемая ниже, не использует этих положений как априорных. Она разрабатывалась применительно к особенностям работы над морем систем миллиметрового диапазона радиоволн с дальностями действия в единицы километров при небольших, примерно до 20 м, высотах точки наблюдения, начиная практически от нулевых высот источника излучения.

**1. Методика моделирования.** Сначала проанализируем особенности формы переизлучающих элементов поверхности при таких условиях облучения и наблюдения. Для наглядности воспользуемся количественными оценками модельных характеристик для одного из конкретных вариантов трассы, близкой по своим параметрам к практически используемым. Геометрия трассы следующая: дистанция между позициями излучателя и точки наблюдения 2 000 м, высоты излучателя и точки наблюдения равны и составляют в разных модельных экспериментах 5, 10 и 20 м. Состояние моря характеризуется длиной волны  $\Lambda_m$ , соответствующей максимуму спектра волнения, которая для моделирования принималась равной 20 м (скорость ветра около 4,7 м/с), 40 м (скорость ветра около 6,7 м/с) и 80 м (скорость ветра

около 9,4 м/с). Форма поверхности представлялась как сумма гармонических составляющих с амплитудами, соответствующими спектру Пирсона-Московитца, причем моделировался только двумерный случай, т. е. поверхности морских волн представлялись как цилиндры с осями, перпендикулярными плоскости распространения радиоволны. Параметры пространственного спектра волн задавались в соответствии с принципами, изложенными в работе [3]. Граничная длина волны, являющаяся условной границей между рельефообразующими волнами и мелкомасштабными неровностями (условно будем называть эту составляющую рябью), задавалась равной  $\Lambda_m/16$ . Сделанные по результатам моделирования оценки показали, что при таком выборе граничной длины волны при всех используемых нами исходных данных среднеквадратическое значение высоты мелкомасштабных неровностей не превышает 4 см. Поскольку исследуется случай сильных затенений, считается, что освещенными могут оставаться только вершины волн. Их координаты находили с помощью численного дифференцирования формы поверхности; оставляли только не затененные со стороны обоих корреспондирующих пунктов и в дальнейшем рассчитывали именно их параметры как характеристики переизлучающих элементов морской поверхности. Полученные значения параметров приведены в таблице.

Характеристики переизлучающих элементов поверхности

$\Lambda_m$ , м	$h_{T,R}$ , м	$N_L$	$\rho$ , м	$H$ , м	$d$ , м
20	5	77,0	7,96	0,16	24,9
	10	153	8,95	0,13	12,6
	20	295	12,4	0,094	6,71
40	5	38,9	23,8	0,32	49,6
	10	82,3	17,7	0,25	23,2
	20	140	20	0,19	13,2
80	5	18	39,5	0,66	95,5
	10	40	33,3	0,5	48,6
	20	71	47,7	0,4	27

В ней, кроме введенных ранее обозначений  $\Lambda_m$ ,  $h_{T,R}$ , используются следующие:  $N_L$  – среднее для 20 независимых реализаций формы поверхности количество освещенных (не затененных) вершин,  $\rho$  – среднее для тех же реализаций значение радиусов кривизны вершин,  $H$  – средняя высота вершин относительно близкого к нулю математического ожидания ординат полученной цифровым моделированием поверхности,  $d$  – среднее расстояние между освещенными гребнями морских волн.

Принципиальной особенностью используемого нами подхода к моделированию рассеяния радиоволн такой поверхностью является основанная на расчетных оценках гипотеза, что вследствие сильных затенений морской поверхности существующими на ней ветровыми волнами, освещенными как со стороны излучателя, так и точки наблюдения, остаются только выпуклые вершины волн, в то время как склоны волн и впадины полностью затенены. Грубой оценкой применимости такой гипотезы является неравенство означающее, что склоны морских волн самозатеняются:

$$\psi_0 < \eta, \quad (6)$$

где  $\eta$  – эффективное значение наклонов морских волн. Более строгие оценки, учитывающие влияние полутеней, особенно в области впадины между волнами, приведены в работе [4]: получены соотношения, связывающие степень затенения со скоростью приводного ветра, и показано, что условия сильных затенений уверенно выполняются при скорости ветра более 4...5 м/с.

Приводимые в таблице данные о радиусах кривизны гребней морских волн позволяют оценить значение граничного угла скольжения, соответствующего равенству модулей амплитуд переизлученных радиоволн, рассчитанных в приближении дифракции Френеля и геометрической оптики. Воспользовавшись зависимостями, приводимыми в работах [5, 6], получим для этого угла следующее выражение:

$$\psi = 3 \sqrt{\frac{\lambda}{\pi^2 \rho}}, \quad (7)$$

где  $\psi$  – граничное значение угла скольжения, рад. Подставляя в него из таблицы, например для  $\Lambda_m = 40$  м крайние значения радиуса кривизны 17,7 и 23,8 м, получим для длины радиоволны 0,8 см соответствующие углы скольжения  $\psi$ : 35,7 и 32,4 мрад. Как показывают оценки, в центральной области трассы углы скольжения обычно меньше этой величины и только на краях могут существенно ее превышать. Из таблицы видно также, что слабое волнение ( $\Lambda_m = 20$  м), соответствующее скорости ветра около 5 м/с, из-за малой высоты морских волн находится на границе области применимости к описанию рассеяния приближения дифракции Френеля. С другой стороны, при  $\Lambda_m = 80$  м становится малым количество освещенных вершин гребней, из-за чего трудно обеспечить необходимую статистическую достоверность оценок. При всех состояниях моря четко видно, что уменьшение высоты корреспондирующих пунктов сопровождается уменьшением среднего числа освещенных гребней волн и увеличением среднего расстояния между ними.

В связи с изложенным для анализа и обобщения нами в большинстве случаев используются данные для  $\Lambda_m = 40$  м. Заметим, что именно такое волнение, соответствующее скорости ветра 5...10 м/с, характерно для прибрежных районов, заливов и подобных им акваторий.

Перейдем теперь непосредственно к исследованию переизлученного поля. Учитывая, что в рассматриваемом случае плоскость падения (она же плоскость переизлучения) перпендикулярна соответствующим склонам гребней, при облучении волной с поляризацией, лежащей либо

в плоскости падения, либо перпендикулярной ей, деполяризация отсутствует. Другими словами, можно считать, что переизлученная волна сохраняет поляризацию падающей. Это позволяет для этих двух поляризаций решать задачу рассеяния в скалярном виде.

Переизлученную закругленным краем гребня волну, следуя [1, 5], будем представлять в виде суммы волн, соответствующих дифракции Френеля (это так называемая краевая волна  $U_K$ ), и отраженной от поверхности цилиндра в приближении геометрической оптики  $U_C$ . Геометрия задачи для отдельного закругленного гребня волны схематически представлена на рис. 1, из которого ясны используемые в дальнейшем обозначения геометрических параметров.

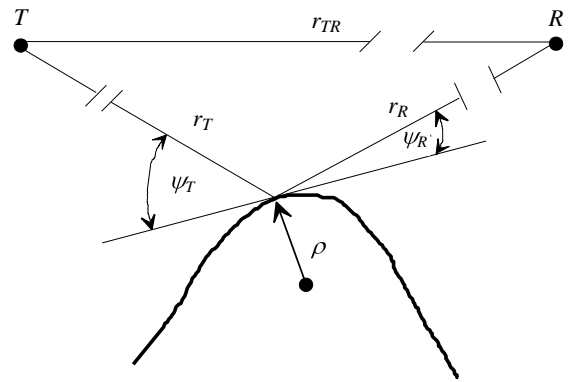


Рис. 1. Схематичное изображение переизлучения радиоволны закругленным гребнем морской волны

Будем считать, что выполняются условия (1), (2), (4), (5). При сделанных допущениях комплексные амплитуды краевой и отраженной от поверхности цилиндра волн в точке наблюдения, нормированные на амплитуду поля свободного пространства в той же точке, могут быть записаны в виде [1, 2, 5]

$$\dot{V}_K(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi i}} \exp\left(i \frac{\pi}{2} u^2 - \frac{3}{4} \pi\right); \quad (8)$$

$$u = \sin \psi \sqrt{\frac{k}{\pi} \frac{r_T r_R}{r_T + r_R}}; \quad (9)$$

$$\dot{V}_C(R) = F_{VH}(\psi) q(\psi) \sqrt{\frac{\rho(r_T + r_R) \sin \frac{\psi}{2}}{2r_T r_R}} \times \exp(ik(r_T + r_R - r_{TR})), \quad (10)$$

где  $\dot{V}_K(R)$  и  $\dot{V}_C(R)$  – нормированные комплексные амплитуды краевой и отраженной волн;  $u$  – параметр дифракции;  $F_{VH}(\psi)$  – коэффициенты Френеля для волны рассматриваемой поляризации;  $q(\psi)$  – коэффициент, учитывающий влия-

ние мелкомасштабной шероховатости поверхности цилиндра. Согласно работе [1]

$$F_V(\psi) = \frac{\sin \psi - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}}; \quad (11)$$

$$F_H(\psi) = \frac{\varepsilon \sin \psi - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}}{\varepsilon \sin \psi + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}}; \quad (12)$$

$$q(\psi) = \exp(-2k^2 \sigma_h^2 \sin^2 \psi). \quad (13)$$

Здесь  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость воды (при всех расчетах считалось  $\varepsilon = 80$ );  $\sigma_h$  – среднеквадратическая высота мелкомасштабных неровностей; с учетом изложенных ранее при обосновании выбора границы раздела мелкомасштабной и крупномасштабной составляющих волнения соображений для расчетов использовались значения  $\sigma_h = 0; 0,01$  и  $0,02$  м. Для каждого переизлучателя (гребня волны) при всех сочетаниях перечисленных параметров (поляризации и  $\sigma_h$ ) рассчитывались комплексные амплитуды поля в точке наблюдения на заданных высотах с учетом обоих механизмов переизлучения (краевая волна, отражение от цилиндрической поверхности) при вертикальной и горизонтальной поляризациях и трех вышеприведенных значениях высоты мелкомасштабных неровностей.

**2. Результаты моделирования.** Результаты расчета переизлученного гребнями волн поля с использованием изложенной методики иллюстрирует рис. 2.

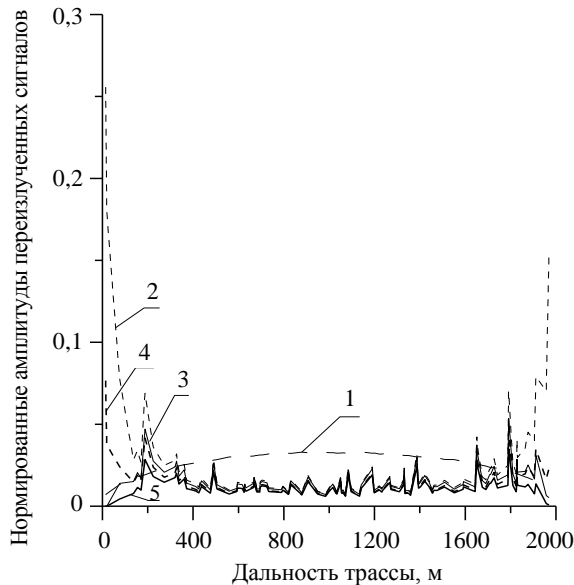


Рис. 2. Распределение по дистанции амплитуд волн, переизлученных гребнями (краевые волны, и волны, отраженные цилиндрами, при двух значениях высот неровностей для горизонтальной и вертикальной поляризации)

На нем для случая  $\Lambda_m = 40$  м,  $h_{T,R} = 10$  м приведены в функции дальности нормированные на значение поля свободного пространства эффективные значения амплитуд переизлученных волн различной природы при гладкой (без мелкомасштабной составляющей) поверхности и при ее наличии с  $\sigma_h = 2$  см. Кривая 1 – краевая волна (т. е. только дифракции Френеля на гребнях), 2 – отражения от цилиндров (горизонтальная поляризация, высота шероховатостей 0 см); 3 – отражения от цилиндров (горизонтальная поляризация, высота шероховатостей 2 см); 4 – отражения от цилиндров (вертикальная поляризация, высота шероховатостей 0 см); 5 – отражения от цилиндров (вертикальная поляризация, высота шероховатостей 2 см).

Как видно из рис. 2, зависимости для полей волн, отраженных от гладких цилиндрических гребней, обладают теми же характерными особенностями, что и полученные в работах [1, 2, 7–9] в рамках приближения касательной плоскости: для них характерно резкое возрастание интенсивности переизлучения элементов, расположенных на концевых участках трассы. Картина резко меняется при учете мелкомасштабных неровностей, практически полностью устраняющих этот эффект, что хорошо видно из сравнения кривых 2 ( $\sigma_h = 0$ ) и 3 ( $\sigma_h = 2$  см). К подобному эффекту приводит и учет влияния вертикальной поляризации за счет быстрого уменьшения модуля коэффициента Френеля при росте угла скольжения свыше угла Брюстера (кривые 2 и 4). В центральной части трассы (дистанции от 400 до 1 600 м) интенсивность всех отражений практически совпадает. В отличие от отраженных волн, вклад краевых волн монотонно возрастает при приближении к середине трассы (более полный анализ показывает, что их вклад максимален из области, окружающей точку стационарной фазы); на это обстоятельство ранее указывалось в наших работах [3, 4, 6]. Еще одной особенностью является сильная зависимость интенсивности отраженных волн (в отличие от краевых) от радиусов кривизны облучаемых гребней, что приводит к явно выраженной нестационарности зависимостей амплитуд элементарных волн и суммарного поля всех рассеивателей от координат точки наблюдения, т. е. ее положения по дистанции и высоте.

С точки зрения влияния на работу радиосистем, в частности, осуществляющих точное измерение угловых координат источников излучения, которые находятся на малых высотах над поверхностью, существенное влияние оказывает степень когерентности поля, переизлученного поверхностью раздела [8, 9]. Влияние на нее различных частей трассы и особенностей физики переизлучения иллюстрирует рис. 3.

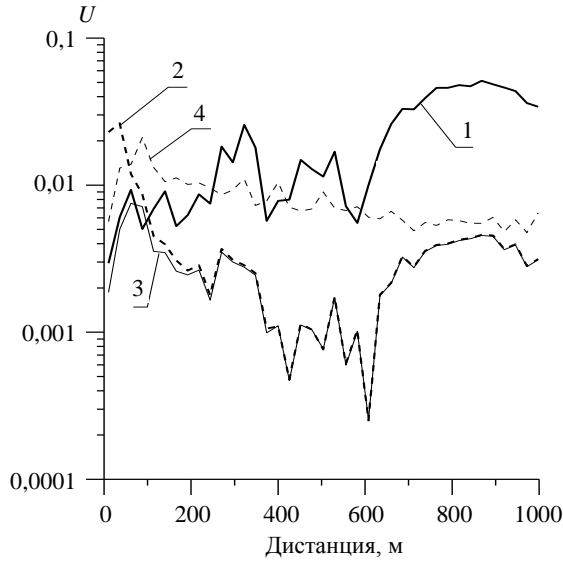


Рис. 3. Распределение по дистанции нормированных эффективных значений напряженности когерентной составляющей и суммарного переизлученного поля

На нем приведены усредненные по 20 реализациям формы поверхности значения комплексных амплитуд поля, амплитуды когерентной компоненты и усредненные эффективные значения, характеризующие суммарное действие обеих компонент. Для анализа использовались те же первичные поля, что и на рис. 2. Кривая 1 рис. 3 показывает амплитуду когерентной составляющей, формируемой суммарным полем краевых волн и переизлучением от цилиндрических элементов, 2 – когерентная составляющая суммы волн, отраженных цилиндрическими участками гребней при горизонтальной поляризации в случае гладкой поверхности (когда  $\sigma_h = 0$ ), 3 – то же, что и кривая 2, но при влиянии мелкомасштабной составляющей ( $\sigma_h = 2$  см), 4 – некогерентная составляющая при отражении поля горизонтальной поляризации от гладких ( $\sigma_h = 0$ ) цилиндров. Из графиков видно, что наибольший вклад в когерентную составляющую вносит центральный участок трассы, т. е. участок, окружающий точку зеркального отражения от средней (плоской) поверхности раздела (кривые 1–3). В то же время концевые участки трассы являются основными источниками некогерентной составляющей.

По таким же первичным данным о полях, создаваемым каждым отдельным переизлучателем, для последующего моделирования углового спектра рассчитывалось суммарное переизлученное поле как дискретная функция высоты. При этом для расчета задавались 3 фиксированных значения высоты точечного излучателя (5, 10 и 20 м) и равные им высоты центров вертикальных эквидистантных решеток, из 64 приемных элементарных слабонаправленных антенн каждая.

Расстояние  $d$  по высоте между их фазовыми центрами задавалось равным 2 см, а ширина их диаграмм направленности гауссовской формы считалась равной (по уровню  $-3$  дБ)  $23^\circ$ , что соответствует размеру апертуры, равному  $d$  при используемой для моделирования длине волны 8 мм. Комплексная амплитуда принятой каждой элементарной антенной поля определялась как сумма переизлучений всех элементов поверхности, незатененных по отношению к точке излучения и приема. Упрощающим предположением было допущение, что для всех 64 точек апертуры приемной антенны переизлучающие элементы поверхности (гребни волн) остаются неизменными, т. е. сохраняются их координаты и радиусы кривизны поверхности. Амплитуда принятого каждой элементарной антенной сигнала рассматривалась с учетом диаграммы направленности (считалось, что оси всех элементарных антенн горизонтальны) и угла прихода переизлучения от каждого освещенного гребня морского волнения. Пример зависимости амплитуды принятого сигнала от высоты элемента антенной решетки для  $\Lambda_m = 20$  м при высоте излучателя и центра апертуры антенны 20 м приведен на рис. 4. На нем кривые 1 и 2 получены для поверхности со среднеквадратической высотой мелкомасштабной составляющей неровностей 0 и 2 см при горизонтальной поляризации облучения. Кривые 3 и 4 – то же, что кривые 1 и 2, но при вертикальной поляризации облучения. По высотной зависимости комплексной амплитуды традиционным для спектрального анализа методом с использованием преобразования Фурье рассчитан пространственный спектр приходящего в приемную антенну поля:

$$G(\xi_m) = d \sum_{n=0}^{N-1} \dot{U}(h_n) W(h_n) \exp(-i\xi_m h_n); \quad (14)$$

$$\xi_m = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_m; \quad (15)$$

$$h_n = h_{R0} - \frac{N-1}{2}; \quad (16)$$

$$W(h) = K \cos\left(\frac{2\pi h}{N-1}\right), \quad (17)$$

где  $\dot{U}(h_n)$  – комплексная амплитуда поля в точке, соответствующей координате фазового центра элемента приемной антенной решетки с номером  $n$ ;  $h_n$  – его высота;  $h_{R0}$  – высота центра линейной вертикальной антенной решетки с эквидистантными, идентичными приемными антеннами;  $\xi_m$  – волновое число  $m$ -й пространственной гармоники приходящего поля;  $\theta_m$  – угол прихода  $m$ -й гармоники относительно горизонтальной оси

координат;  $W(h_n)$  – «оконная» функция для ослабления влияния скачка поля, соответствующего границе линейной апертуры (используется при расчете пространственного спектра поля).



Рис. 4. Зависимость амплитуды сигнала от номера  $n$  и высоты центра элементарной приемной антенны вертикальной линейной антенной решетки

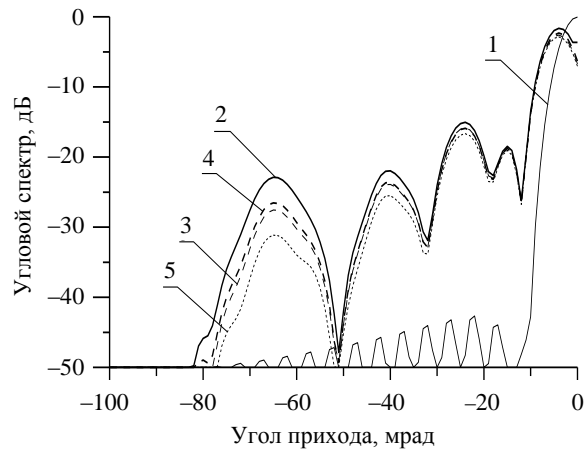
В исследуемом нами случае переизлучение поля поверхностью раздела (это подтверждается, в частности, последующими расчетами) для всей области углов прихода выполняется неравенство  $|\theta_m| \ll 1$ . Это позволяет заменить  $\sin \theta_m \approx \theta_m$ , что существенно упрощает графическое представление и анализ пространственных спектров и делает правомерным применительно к ним название «угловые спектры», которое мы и будем применять в дальнейшем. Заметим также, что при выполнении для ближайшего к точке приема переизлучателя расстояния  $r_{\min}$  до точки приема

$$r_{\min} \gg \frac{(Nd)^2}{\lambda}, \quad (18)$$

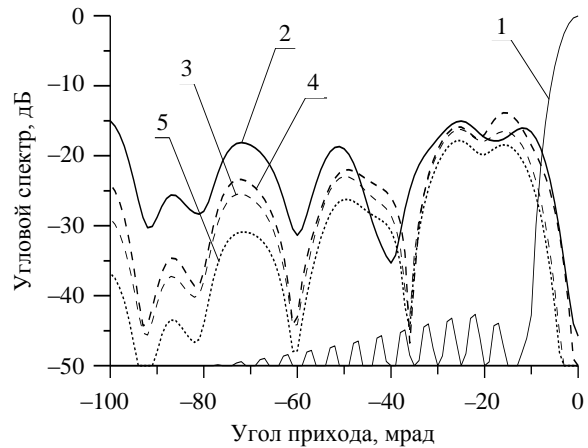
являющегося условием пребывания всех переизлучателей в так называемой дальней зоне антенны, (14) с точностью до обозначений совпадает с выражением для диаграммы направленности линейной антенной решетки, например работы [10]. Это означает, что рассчитанная по (14) форма пространственного спектра в функции угла  $\theta_m$  совпадает с зависимостью принятого антенной сигнала при ее сканировании по углу в вертикальной плоскости.

Далее представлены и проанализированы результаты моделирования спектров, относящихся как к отдельным реализациям поверхности, так и усредненным по 20 реализациям; в последнем случае более четко проявляется присутствие в переизлученном сигнале когерентной составляющей. На всех графиках по оси ординат отложены

интенсивности спектральной плотности в децибелах, а по оси абсцисс – углы прихода в миллирадианах. Отрицательные углы прихода на графиках соответствуют физике явления: все переизлучающие элементы поверхности находятся ниже прямой, соединяющей излучатель и точку наблюдения, которая при принятом для моделирования условий  $h_{R0} = h_T$  является горизонтальной. На рис. 5 кроме угловых спектров переизлученного поля для наглядности приведены также угловые спектры точечного источника излучения, показывающие, в частности, что при использованной для спектральной обработки функции окна уровень боковых лепестков ниже 42 дБ.



а)



б)

Рис. 5. Угловые спектры над поверхностью моря с ветровыми волнами с  $\Lambda_m = 40$  м: а) – высота излучателя и центра приемной антенны 5 м; б) – высота излучателя и центра приемной антенны 20 м

Кривая 1 соответствует полю свободного пространства; кривая 2 – горизонтальная поляризация облучения, мелкомасштабные неровности поверхности отсутствуют; кривая 3 – то же, что и

кривая 2, но при среднеквадратическом значении высоты мелкомасштабных неровностей 2 см; кривые 4 и 5 – то же, что и для кривых 3 и 4, но при вертикальной поляризации облучения. Из графиков видно следующее:

- область наиболее интенсивных отражений имеет угловую ширину в вертикальной плоскости 10...20 мрад при высоте соответствующих пунктов 5 м, возрастающую до 30...40 мрад при увеличении этой высоты до 20 м;

- максимум интенсивности приходится на область, окружающую направление зеркального отражения от отсутствующей в используемой модели в явном виде плоскости, соответствующей некоторой средней высоте переизлучающих элементов;

- количество лепестков углового спектра и положение их максимумов не отражают количество переизлучающих элементов неровной поверхности;

- присутствие мелкомасштабных неровностей поверхности приводит к снижению интенсивности переизлучения, причем наиболее сильно ослабляются отражения от участков трассы, соответствующих наибольшим средним углам скольжения.

К аналогичному эффекту приводит использование вертикальной поляризации за счет уменьшения коэффициентов Френеля для отражения от морских волн при углах скольжения порядка или более угла Брюстера.

Спадание спектральной плотности при углах прихода, близких к горизонту, особенно сильно выраженное на графиках, относящихся к высотам соответствующих пунктов 20 м, имеет простое объяснение. Как следует [1, 8, 9], при углах падения, соответствующих концевой области трассы, вследствие малости наклонов квазиплоских элементов («фасетов») отражения от них в направлениях, близких к горизонту, практически отсутствуют. Краевые волны, обусловленные дифракцией Френеля на гребнях, также имеют малую амплитуду из-за близких к 90° значений углов дифракции.

Во всех применяемых на практике радиотехнических системах измерение угловых координат производится не по мгновенному значению принятого сигнала, а после его накопления, причем часто в течение времени, сравнимого с временем корреляции флуктуаций поля, распространяющегося над морской поверхностью. Для оценки возникающих эффектов рассмотрим влияние некогерентного и когерентного накопления на форму угловых спектров. Предполагается, что при некогерентном накоплении результирующий

угловой спектр является результатом сложения мощностей спектральных плотностей для каждого направления прихода, а при когерентном вычислении спектра предварительно производится сложение комплексных амплитуд полей в каждой из 64 точек апертуры синтезируемой антенны. В обоих вариантах использовалось по 20 независимых массивов значений комплексных амплитуд, соответствующих такому же числу независимых реализаций формы модельной поверхности моря.

На рис. 6 приведен пример угловых спектров при некогерентном накоплении для длины волны максимума спектра морского волнения  $\Lambda_m = 40$  м при значениях высоты соответствующих пунктов 5 (кривая 1), 10 (кривая 2) и 20 м (кривая 3) и при среднеквадратической высоте мелкомасштабных неровностей 2 см.

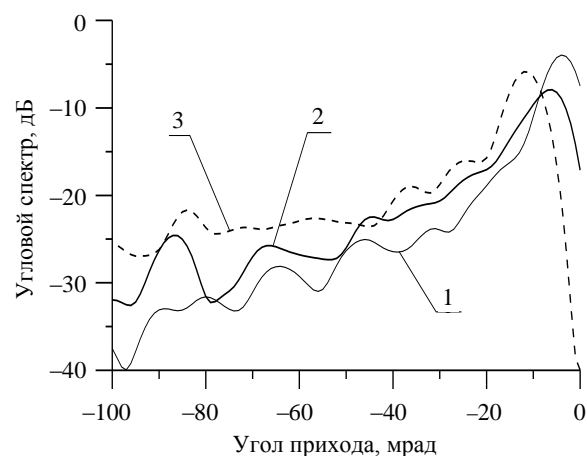


Рис. 6. Угловой спектр при накоплении квадратов амплитуд гармоник сигнала («некогерентное» накопление)

Спектр характеризуется максимумом в направлении на область поверхности непосредственно под излучателем и практически монотонным убыванием по мере удаления от нее в сторону отрицательных углов. Эти свойства согласуются с результатами работ [8, 9].

Существенно отличаются от них угловые спектры при когерентном накоплении, примеры которых приведены на рис. 7. На нем кривые 1 и 2 получены для поверхности со среднеквадратической высотой мелкомасштабной составляющей неровностей 0 и 2 см при горизонтальной поляризации облучения. Кривые 3 и 4 – то же, что кривые 1 и 2, но при вертикальной поляризации облучения. Из графиков видно, что при волнении, соответствующем  $\Lambda_m = 20$  м, всегда выражен максимум в направлении прихода «зеркального» отражения от поверхности раздела, в особенности когда отсутствует мелкомасштабная составляющая неровностей.

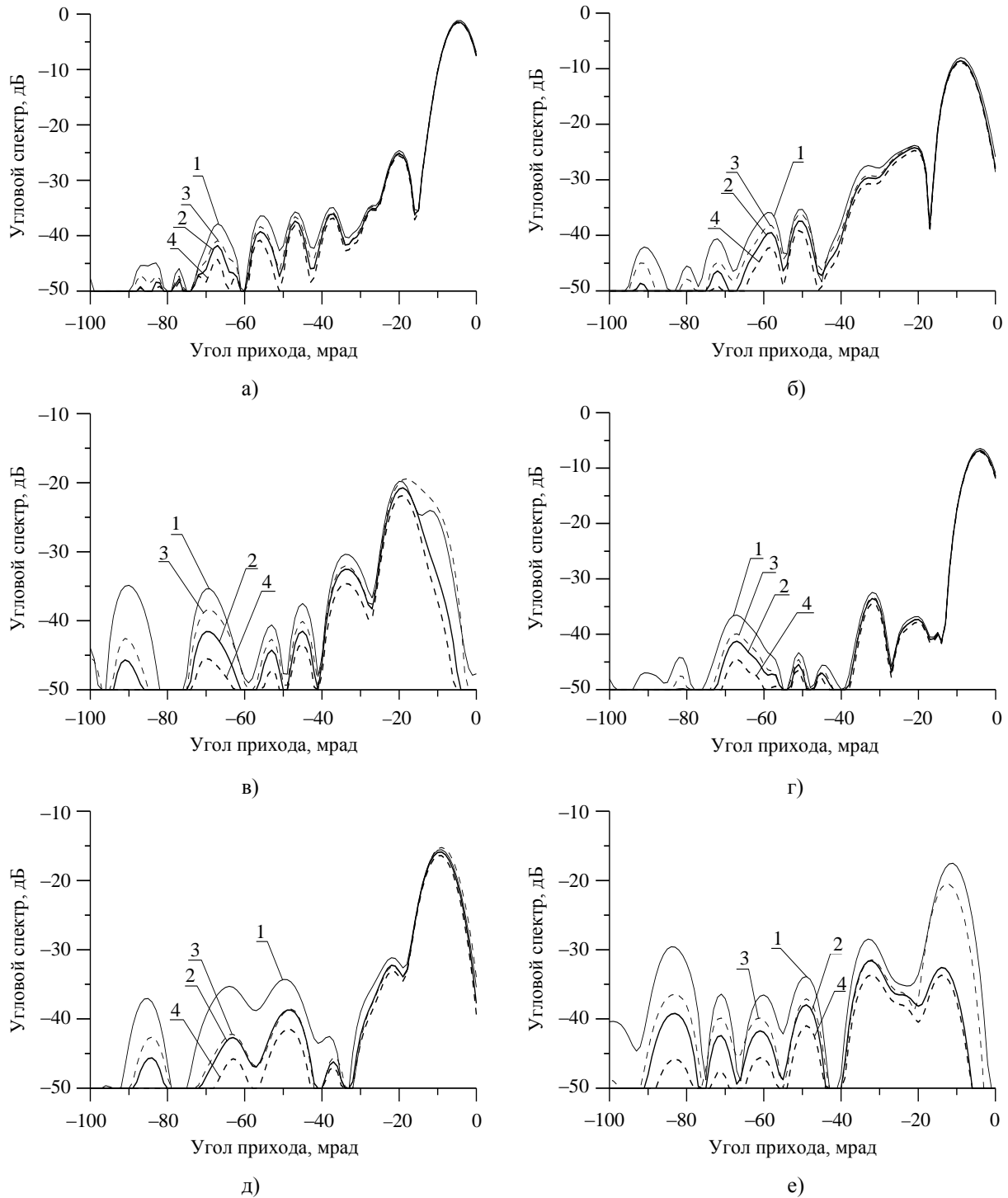


Рис. 7. Угловой спектр при когерентном накоплении сигнала для 20 независимых случайных реализаций формы поверхности моря: а) – сила волнения соответствует  $\Lambda_m = 20$  м,  $h_{TR} = 5$  м; б) – сила волнения соответствует  $\Lambda_m = 20$  м,  $h_{TR} = 10$  м; в) – сила волнения соответствует  $\Lambda_m = 20$  м,  $h_{TR} = 20$  м; г) – сила волнения соответствует  $\Lambda_m = 40$  м,  $h_{TR} = 5$  м; д) – сила волнения соответствует  $\Lambda_m = 40$  м,  $h_{TR} = 10$  м; е) – сила волнения соответствует  $\Lambda_m = 40$  м,  $h_{TR} = 20$  м

В частности, при  $\Lambda_m = 20$  м и высоте корреспондирующих пунктов 5 м интенсивность спектральной составляющей, соответствующей «зеркальной компоненте», менее чем на 2 дБ отличается от поля свободного пространства.

Усиление волнения до  $\Lambda_m = 40$  м и увеличение высоты корреспондирующих пунктов сопровождается ослаблением этой составляющей. Так, при  $\Lambda_m = 40$  м и высотах корреспондирующих пунктов 20 м ее уровень оказывается на 20 дБ ниже



уровня поля свободного пространства. Влияние перехода на вертикальную поляризацию и учет мелкомасштабной составляющей неровностей морской поверхности незначительно (на единицы децибел) снижают интенсивность спектральных составляющих с направлений, близких к зеркальному, и практически исключают ее приход под углами ниже 40...50° относительно горизонта. Аналогичный эффект создает использование вертикальной поляризации облучающего поля.

Перечисленные выше особенности распространения поля миллиметровых радиоволн над морской поверхностью необходимо учитывать при исследовании его влияния на работу систем измерения угловых координат излучателей и радиолокационных целей, в том числе использующих современные методы спектрального оценивания.

**Выводы.** Разработан и подтвержден результатами компьютерного моделирования метод расчета поля миллиметровых и сантиметровых волн над поверхностью моря с ветровыми волнами при существовании сильных затенений. Показано существенное влияние дифракции на гребнях волн на поле в непосредственной близости от поверхности, где вследствие этого явления интенсивность поля заметно превосходит уровень, предсказываемый в рамках общепринятых интерференционных представлений. Отмечено существенное снижение в переизлученном поле вклада концевых участков трассы под влиянием мелкомасштабных неровностей поверхности (ряби). Проанализированы особенности распределения по длине трассы и углам прихода в точку приема мощностей когерентной и некогерентной компонент переизлученного поверхностью моря поля, существенно влияющие на точность систем измерения угловых координат источников излучения, в том числе использующих современные методы спектрального оценивания [11, 12].

Отмечено, что при возрастании угла скольжения результаты расчетов по предложенной модели сближаются с получаемыми в рамках приближения касательной плоскости.

#### Библиографический список

1. Фейнберг Е. П. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности / Е. П. Фейнберг. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 546 с.
2. Басс Ф. Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф. Г. Басс, И. М. Фукс. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
3. Разказовский В. Б. Эвристическая модель поля миллиметровых и сантиметровых радиоволн над взволнованной морской поверхностью при сильных затенениях / В. Б. Разказовский, Ю. Ф. Логвинов // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 4. – С. 23–31.
4. Разказовский В. Б. Множитель ослабления радиоволн при распространении над морем под малыми углами скольжения: модель многократной дифракции / В. Б. Раз-

- казовский, Ю. Ф. Логвинов // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2007. – 12, № 1. – С. 168–176.
5. Kouyoumjian R. G. Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an edge in a Perfectly Conducting Surface / R. G. Kouyoumjian, P. H. Pathak // Proc. IEEE. – 1974. – 62, N 11. – P. 1448–1461.
6. Разказовский В. Б. Множитель ослабления радиоволн при распространении над морем под малыми углами скольжения: переходная зона / В. Б. Разказовский, Ю. Ф. Логвинов // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2007. – 12, № 1. – С. 177–184.
7. Dougherty H. T. Application of Diffraction by Convex Surfaces to Irregular Terrain Situation / H. T. Dougherty, L. J. Maloney // Radio Science J. Res. NBP/USNC-URSI. – 1964. – 68D, N 2. – P. 239–250.
8. Barton D. K. Low-Altitude Tracking Over Rough Surfaces. Theoretical Prediction / D. K. Barton // IEEE Eascon-79. – Washington, D.C., 1979. – P. 224–234.
9. Beckman P. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces / P. Beckman, A. Spizzichino. – L.: Pergamon press, 1963. – 303 p.
10. Антенные решетки / под ред. Л. С. Бененсона. – М.: Сов. радио, 1966. – 367 с.
11. Разказовский В. Б. Влияние многолучевого распространения на определение угла места маловысотного излучателя методом Root-MUSIC // В. Б. Разказовский, Ю. Ф. Логвинов, Ю. А. Педенко // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), № 3. – С. 34–42.
12. Комбинированные пеленгаторы точечных источников шумовых излучений на основе адаптивных решетчатых фильтров / Д. И. Леховицкий, Д. В. Атаманский, В. В. Джус, Г. А. Жуга // II Междунар. радиоэлектронный форум. Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития. – Х., 2005. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска.

Рукопись поступила 06.02.2013 г.

V. B. Razskazovskiy, Yu. F. Logvinov

#### MODEL OF MULTIPATH PROPAGATION OF MILLIMETER RADIO WAVES ABOVE MARINE SURFACE AT STRONG SHADING

Importance of model of distribution of radio waves above a marine surface at strong shading conditioned by practical meaningfulness of this task and necessities of fundamental science for the study of physical processes at distribution of waves. The existent methods of calculation the radio waves propagation above sea surface use a model on the average flat interfacial area air – water with disturbances that are wind waves. However such terms of distribution of radio waves rarely enough meet in practice. We are investigating of the case of very small grazing angles and marine wave of such high, when the slopes of waves and intervals between them are shaded, and the electromagnetic field have interaction only with their tops. In the point of interaction with them radio waves because of small angle of grazing and great curvature of surface for description of the reradiated field the approaching of geometrical optics can not be used. Coordinates and curvature of the unshaded elements that are the tops of the marine waves were calculated by the method of numeral modeling. It is shown that the radiated from them electromagnetic field is a sum of Fresnel diffracted and specular reflected waves from cylindrical (in our two-dimensional case) surfaces. These were appraised for the radio waves of  $K_a$ -band (8-mm wavelength): the power distribution of reradiating on length of route, the angular spectrum of waves coming to the aperture of receiving antenna were appraised. Knowledge of these is needed for the analysis of work of direction-finding radio systems. In-process got and analysed to the

feature of distribution on length of route and on the corners of arrival pithily reception of powers coherent and non-coherent component by the radiated by the surface of sea the fields substantially influencing on exactness of the systems of measuring of angular coordinates of radiants, including using the modern methods of spectral evaluation.

**Key words:** features of distribution above a sea, millimetric radio waves, small heights, strong shading of surface.

В. Б. Разказовський, Ю. Ф. Логвінов

## МОДЕЛЬ БАГАТОПРОМЕНЕВОГО ПОШИРЕННЯ МІЛІМЕТРОВИХ РАДІОХВИЛЬ НАД МОРСЬКОЮ ПОВЕРХНЕЮ ПРИ СИЛЬНИХ ЗАТІНЕННЯХ

Важливість моделі поширення радіохвиль над морською поверхнею при сильних затіненнях обумовлено практичною значущістю цієї задачі і потребами фундаментальної науки для вивчення фізичних процесів при поширенні хвиль. У основу використуваних сучасних методів розрахунку електромагнітного поля над морською поверхнею з вітровими хвилями при малих кутах ковзання закладено гіпотезу, що нерівності (морські хвилі) є наслідком збурення в середньому

плоскої межі розділу і їм властиві малі нахили. Проте такі умови поширення радіохвиль досить рідко зустрічаються на практиці. Нами досліджений альтернативний цьому випадок, що відповідає існуванню сильних затінь, що виключають відбиття від квазіплоских, близьких до горизонтальних, елементів поверхні. Отримані результати дозволяють істотним чином переглянути фізичні процеси, що відбуваються при розсіянні радіохвиль в умовах сильних затінь. Методом числового моделювання визначено координати і кривизну незатінених елементів, якими є вершини хвиль, визначено, що перевипромінюване ними поле є результатом дії дифракції Френеля і відбиття від опуклих циліндричних (у досліджуваному двовимірному випадку) поверхонь. Для радіохвиль  $K_d$ -діапазону (довжина хвилі 8 мм) оцінено розподілення потужності перевипромінювання по довжині траси, кутові спектри хвиль, що приходять до апертури приймальної антени, знання яких потрібне для аналізу роботи пеленгаційних радіосистем. У роботі отримано і проаналізовано особливості розподілу по довжині траси і кутах приходу до точки прийому потужностей когерентної і некогерентної компонент перевипромінюваного поверхнею моря поля, що істотно впливають на точність систем вимірювання кутових координат джерел випромінювання, у тому числі таких, у яких застосовано сучасні методи спектрального оцінювання.

**Ключові слова:** особливості поширення над морем, міліметрові радіохвилі, малі висоти, сильні затінення поверхні.