

В. Г. Гутник¹, М. Ю. Логвинов², Ю. Ф. Логвинов³

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины

4, ул. Искусств, Харьков, 61000, Украина

² Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина

³ Институт радиопизики и электроники А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: logvinov@ire.kharkov.ua

Характеристики рассеивающих элементов морской поверхности при распространении радиоволн под малыми углами скольжения

***Предмет и цель работы.** Статья посвящена моделированию процессов обратного рассеяния электромагнитного поля на морской поверхности применительно к миллиметровому и сантиметровому диапазонам длин радиоволн. Актуальность таких исследований определяется потребностью в моделировании характеристик радиосистем морского базирования еще на этапе проектирования. Целью работы было определение характеристик освещенных элементов подстилающей поверхности применительно к обратному рассеянию радиоволн при малых углах скольжения.*

***Методы и методология работы.** Для достижения поставленной цели использовались методы математического и статистического моделирования. Результаты моделирования сравнивались с данными экспериментальных исследований.*

***Результаты работы.** Сравнение времен жизни рассеивающих элементов морской поверхности и скоростей их перемещения с длительностями всплесков рассеянного радиосигнала и доплеровскими смещениями частоты радиосигнала при перемещении рассеивателей электромагнитного поля показало непротиворечивость результатов, полученных путем моделирования, с данными эксперимента. Получены характеристики рассеивающих элементов морской поверхности применительно к обратному рассеянию радиоволн при малых углах скольжения. Среди них вероятности освещенности рассеивающих элементов поверхности, их средние радиусы кривизны, а также локальные углы падения радиоволн на освещенные элементы поверхности.*

***Заключение.** Показано, что при скользящем распространении радиоволн возникают значительные затенения поверхности. Это приводит к тому, что электромагнитное поле рассеивается практически только на вершинах самых высоких морских волн. При этом локальные углы падения электромагнитного поля на рассеивающий элемент поверхности приближаются к 90° . При таких локальных углах падения освещенный элемент поверхности имеет очень низкую отражательную способность в обратном направлении. Ил. 7. Библиогр.: 8 назв.*

***Ключевые слова:** распространение радиоволн, морская поверхность, малые углы скольжения.*

При распространении электромагнитной волны над морской поверхностью происходит искажение характеристик излученного радиотехнической системой сигнала [1, 2]. Особенно значительные искажения распространяющегося электромагнитного поля происходят при малых углах скольжения, когда значительную часть пространства, важного для распространения радиоволн, пересекает подстилающая поверхность. Для

определения характеристик поля, в том числе и для последующего моделирования процессов распространения электромагнитного поля над поверхностью, важно знать координаты рассеивающих электромагнитное поле элементов поверхности и их характеристики, такие как, например, наклон рассеивающего радиоволну элемента поверхности, его главную и среднюю кривизну, условия освещенности и т. д.

Цель данной работы состоит в определении характеристик освещенных элементов подстилающей поверхности применительно к обратному рассеянию радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазонов при малых углах скольжения. Полученные результаты можно использовать в построении эвристической модели обратного рассеяния радиоволн.

Для решения поставленной задачи необходимо получить модель морского волнения. Для этого воспользуемся результатами работ [3, 4]. Высота профиля морского волнения определялась по выражению

$$z(x, y, t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{S_{i,j}} \Delta\omega \Delta\theta \times \\ \times \cos\left[\omega_i t + \xi_{i,j} - R_i (x \cos(\theta_j) + y \sin(\theta_j))\right],$$

где $S_{i,j}$ – дискретный отсчет двумерного спектра морского волнения; $\Delta\omega$ – ширина полосы частот между отсчетами спектра морского волнения; $\Delta\theta$ – интервал отсчета углов при дискретизации спектра морского волнения; $\xi_{i,j}$ – случайная величина, имеющая смысл начальной фазы, равномерно распределенная на интервале от 0 до 2π ; ω_i – текущая частота; t – текущее время; R_i – текущее волновое число; θ_j – текущий угол; M, N – количество дискретных отсчетов по частоте и по углу соответственно.

Ключевым моментом в создании модели цифрового профиля морского волнения является выбор максимальной учитываемой частоты (или волнового числа) спектра морского волнения. От этого будут зависеть дисперсии наклонов и радиусов кривизны элементов морского волнения. Для выбора максимальной учитываемой частоты спектра морского волнения можно использовать критерий, впервые предложенный в [5] и успешно применяемый в работах, связанных с моделированием распространения радиоволн. Его смысл состоит в следующем: начиная с некоторой частоты, вклад высокочастотных составляющих спектра морского волнения в значение величины эффективной высоты морских волн становится сравнимым с длиной радиоволны и в силу волновых свойств электромагнитного поля не может приводить к затенению поверхности. Можно выбрать мак-

симальное учитываемое волновое число (или максимальную учитываемую частоту) спектра морского волнения таким образом, что будет выполняться неравенство

$$\Delta\sigma_h = \lambda \leq \left[\int_{R_{\max}}^{\infty} R S(R) dR \right]^{1/2},$$

где $\Delta\sigma_h$ – величина прироста среднеквадратического отклонения высот морских волн за счет изменения значения максимального учитываемого волнового числа R_{\max} ; λ – длина облучающей поверхность радиоволны; $S(R)$ – одномерный спектр морского волнения в представлении волновых чисел; R – волновое число. В этом случае составляющие спектра с волновыми числами $R > R_{\max}$ обеспечивают вклад в среднеквадратическое отклонение высот $\Delta\sigma_h \leq \lambda$. Такие неравномерности не создают затенений вследствие дифракционного огибания их радиоволнами и могут не учитываться при моделировании.

При моделировании трехмерного профиля морского волнения использовался спектр Пирсона–Московитца [6]. Поверхность создавалась в том числе и в зависимости от времени. Определение затенений проводилось в геометрическом приближении.

Для верификации данных моделирования с данными экспериментов проведены исследования по определению «длительности жизни» освещенных элементов поверхности и скорости их перемещения за время жизни. Эти данные должны коррелировать с длительностями всплесков сигнала при рассеянии радиоволн на морской поверхности и с доплеровскими отклонениями частоты рассеянного поверхностью сигнала. В качестве примера на рис. 1 представлены гистограммы распределений времени жизни освещенных участков для поверхности моря при скорости ветра 8 м/с. Из рисунка видна зависимость времени жизни от угла скольжения.

Проведем сравнение полученного из модели времени жизни освещенных участков морской поверхности с экспериментальными данными о длительности всплесков уровня отраженного сигнала в приемном канале радиолокатора. Длительность всплеска радиосигнала может не совпадать с временем жизни освещенного

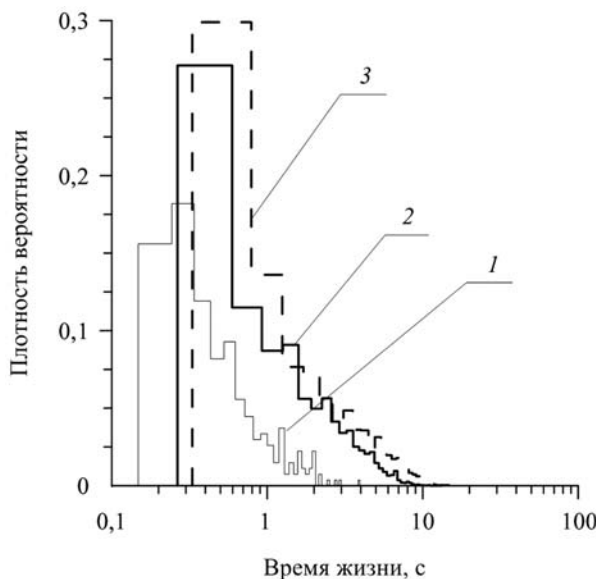


Рис. 1. Гистограммы распределений времени жизни освещенных участков морской поверхности при скорости ветра 8 м/с для некоторых углов скольжения: кривая 1 – 0,00001 рад; кривая 2 – 0,03 рад; кривая 3 – 0,05 рад

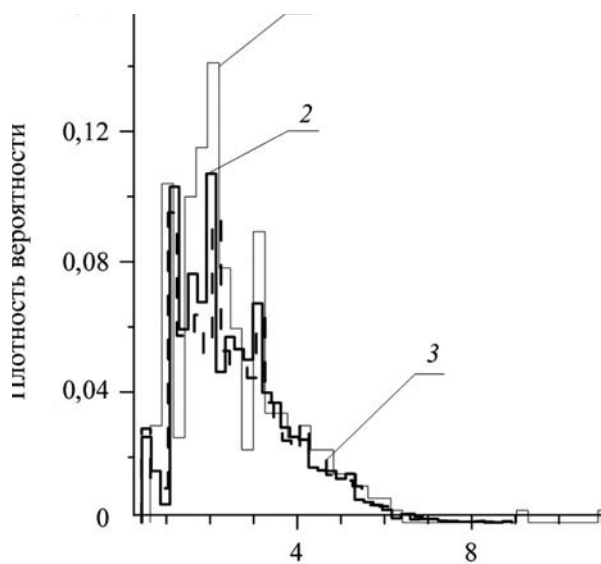


Рис. 2. Гистограммы распределений скоростей перемещения освещенных участков морской поверхности при скорости ветра 8 м/с для некоторых углов скольжения: кривая 1 – 0,00001 рад; кривая 2 – 0,03 рад; кривая 3 – 0,05 рад

участка и сравнение может проводиться по признаку совпадения порядков рассматриваемых величин.

Согласно экспериментальным данным работы [1], при скорости ветра 8 м/с и угле скольжения $\approx 1...2^\circ$ (0,017...0,035 рад) наиболее вероятные длительности всплесков составляют 0,4...0,6 с и максимальные достигают 4...5 с.

Результаты моделирования для угла скольжения 0,03 рад и скорости ветра 8 м/с показывают, что наиболее вероятные значения времени жизни освещенных областей составляют 0,25...0,5 с, максимальные значения достигают 10 с, что не противоречит результатам эксперимента.

На рис. 2 представлены гистограммы распределений радиальных скоростей освещенных участков морской поверхности для трех значений угла скольжения, которые получены из модельного эксперимента. Анализируя полученные гистограммы распределений скоростей освещенных областей для двух состояний морской поверхности, можно увидеть, что наиболее вероятные значения скорости перемещения освещенных участков практически не зависят от угла скольжения. Для морской поверхности при скорости ветра 8 м/с и угле скольжения 0,03 рад наиболее вероятное значение скорости перемещения освещенных участков составляет $\approx 1,9$ м.

Это значение в несколько раз меньше фазовой скорости энергонесущей волны, рассчитанной по формуле из [8]:

$$c = \frac{\omega}{K},$$

где ω – циклическая частота морской волны; K – волновое число морской волны. При ветре 8 м/с получаем фазовую скорость энергонесущей волны $\approx 9,82$ м/с.

Для сопоставления полученных результатов моделирования по скорости смещения освещенных участков с экспериментальными данными можно воспользоваться результатами работы [1], в которой по значениям частот Доплера для углов скольжения 0,017...0,035 рад получены эквивалентные скорости перемещений рассеивателей радиоволн. Необходимо отметить, что скорости перемещений освещенных участков морской поверхности относительно точки наблюдения могут не совпадать со скоростями перемещений рассеивателей радиоволн. Последние, учитывая различные скорости перемещения гармонических составляющих морского волнения с отличающимися частотами, могут иметь величину скорости как больше, так и меньше скорости перемещения освещенных участков. Сравнение рассматриваемых величин можно проводить в смыс-

ле совпадения порядков. Согласно работе [1], при скорости ветра 8 м/с и угле скольжения 0,017...0,035 рад эквивалентные скорости перемещений рассеивателей заключены в диапазоне 1,2...1,8 м/с. Эти значения близки к наиболее вероятной величине скорости перемещения освещенных участков в 1,9 м/с (рис. 2).

Сравнение результатов моделирования по значениям наиболее вероятного времени жизни освещенных областей и наиболее вероятной скорости освещенной области с экспериментальными данными показало непротиворечивость полученных модельных результатов экспериментальным данным. Показано, что в исследуемом диапазоне изменения углов скольжения значение скорости смещения освещенных участков морской поверхности практически не зависит от угла скольжения и по величине в несколько раз меньше фазовой скорости энергонесущей волны.

Рассмотрим наиболее распространенные в настоящее время модели рассеяния электромагнитного поля на различных поверхностях. Среди теоретических моделей обратного рассеяния электромагнитного поля от морской поверхности наибольшее распространение получили *фацетная* и *двухмасштабная* модели [2].

Фацетная модель. Ее суть заключается в представлении профиля морского волнения в виде малых плоских площадок – *фацетов*. В формировании обратного рассеяния поля участвуют только *фацеты*, ориентированные перпендикулярно к направлению распространяющегося электромагнитного поля. Для определения характеристик рассеянного поля используются законы геометрической оптики. К недостаткам такой модели можно отнести невозможность учета затенений поверхности и степени шероховатости *фацетов*. В настоящее время *фацетная* модель практически не применяется при малых углах скольжения из-за несоответствия расчетных и экспериментальных данных, в особенности при использовании коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

Двухмасштабная модель. Суть этой модели – в представлении профиля морской поверхности в виде комбинации неровностей с различными пространственными масштабами. Например, когда крупные гравитационные волны комбинируются с мелкомасштабной ве-

тровой рябью, длина волны которой близка к используемой в радаре длине радиоволны. При больших углах скольжения эта модель дает удовлетворительное качественное и количественное совпадение с данными эксперимента. При малых углах скольжения наблюдаются существенные отличия теории от экспериментальных данных. В частности, не наблюдаются предсказываемые теорией меньшие значения удельной эффективной поверхности рассеяния при горизонтальной поляризации относительно удельной эффективной поверхности рассеяния при вертикальной поляризации, характеристики расчетных и экспериментальных доплеровских спектров не совпадают, не находят объяснения и всплески интенсивности отраженных сигналов.

Кроме двух рассмотренных моделей рассеяния, в научной литературе встречается множество эмпирических моделей обратного рассеяния радиоволн. Суть таких моделей сводится, как правило, к аппроксимации экспериментальных данных по распределению амплитуд и фаз рассеянных поверхностью сигналов параметрами теоретических распределений. При этом зачастую игнорируется важнейший компонент взаимодействия электромагнитного поля и подстилающей поверхности – сама поверхность.

Радиофизическое моделирование распространения радиоволн над морской поверхностью подразумевает применение процедур по вычислению рассеянного электромагнитного поля. Теоретические модели обратного рассеяния электромагнитного поля для проведения расчетов предполагают определение таких характеристик освещенных элементов поверхности, как кривизна элемента поверхности и локальный угол падения (скольжения), при котором на освещенный элемент поверхности падает электромагнитное поле.

На рис. 3 представлена схема взаимодействия электромагнитного поля с поверхностью.

Из источника T (он же приемник R) электромагнитная волна падает на поверхность S под углом падения φ относительно нормали n к касательной плоскости в точке P , в которой определяется радиус кривизны поверхности ρ . Индексом 1 обозначено рассеяние поля вблизи вершины морской волны, индексом 2 – вблизи склона морской волны.

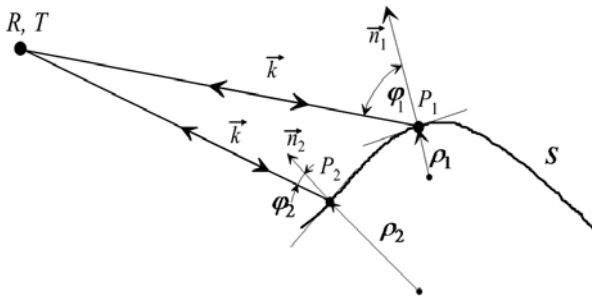


Рис. 3. Геометрия трассы

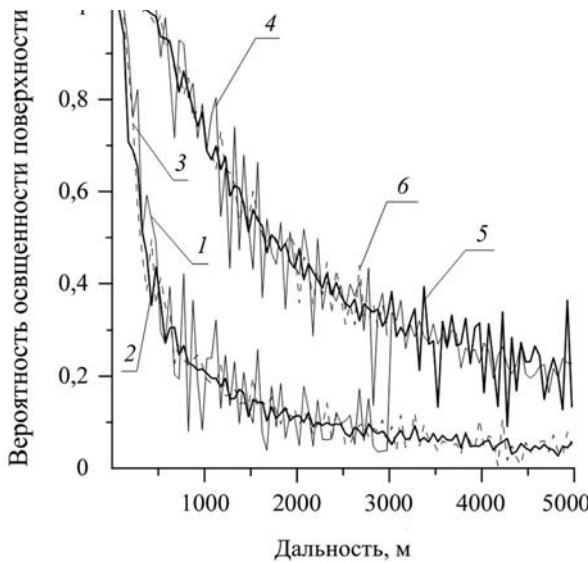


Рис. 4. Графики зависимости вероятности освещения элементов морской поверхности от дальности и степени морского волнения

Рассмотрим характеристики освещенности подстилающей поверхности, полученные из модельного эксперимента. Возьмем для примера трассу длиной 5 км. Зависимости вероятности освещения элементов морской поверхности от дальности и степени морского волнения приведены на рис. 4. На нем для высот источника (приемника) 10 м (кривые 1, 2, 3) и 50 м (кривые 4, 5, 6) представлены вероятности освещенности элементов морского волнения для длины энергонесущей волны 20 м (кривые 1 и 4), 40 м (кривые 2 и 5) и 80 м (кривые 3 и 6). Видно, что вероятность освещенности определяется в первую очередь геометрией трассы (высотой источника). Степень волнения морской поверхности влияет на разброс характеристик затенений (дисперсию освещенности), в то время как средние значения вероятности освещенности прак-

тически не зависят от степени волнения морской поверхности.

Значения полной (гауссовой) и средней кривизны поверхности в элементе рассеяния можно определить с помощью выражений [2]:

$$K = \frac{1}{\rho_1 \rho_2}, \quad H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right),$$

где K, H – полная и средняя кривизна поверхности; ρ_1, ρ_2 – наибольший и наименьший радиусы кривизны поверхности в выбранном элементе переизлучения. Указанные параметры можно определить, воспользовавшись выражениями [7]:

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}, \quad H = \frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)},$$

где E, F, G, L, M, N – коэффициенты первой и второй формы Гаусса, которые при задании поверхности в явном виде $z = f(x, y)$ равны

$$E = 1 + p^2, \quad F = pq, \quad G = 1 + q^2, \\ L = \frac{r}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}, \quad M = \frac{s}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}, \\ N = \frac{t}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}.$$

Коэффициенты p, q, r, s, t определяются как

$$p = \frac{df}{dx}, \quad q = \frac{df}{dy}, \quad r = \frac{d^2 f}{dx^2}, \\ s = \frac{d^2 f}{dx dy}, \quad t = \frac{d^2 f}{dy^2},$$

где коэффициенты p и q являются первыми производными (наклонами) выбранного элемента поверхности вдоль осей x и y выбранной декартовой системы координат; коэффициенты r и t – вторые производные по соответствующим направлениям; коэффициент s – вторая смешанная производная. Данные коэффициенты можно вычислить с помощью программ для определения производной, которыми на данный момент снабжены практически все пакеты по математической обработке данных.

Вид усредненных значений радиусов кривизны освещенных элементов поверхности в зависимости от дальности приведен на рис. 5 для

трех степеней морского волнения. Наблюдается зависимость средних значений радиусов кривизны от степени волнения моря. Наиболее высоким волнам (кривая 3) соответствует наибольшее значение средних радиусов кривизны. Из графиков на рис. 5 следует, что при малых дальностях, когда освещены не только вершины морских волн (с относительно малыми радиусами кривизны), но и области волнения вблизи склонов (где радиусы кривизны увеличены), средние радиусы кривизны имеют максимальные значения, которые уменьшаются по мере роста дальности, когда области склонов морских волн становятся затененными и освещенными остаются только области поверхности вблизи вершин морских волн с относительно малыми радиусами кривизны.

В факетной модели рассеяния электромагнитных волн необходимо знать угол падения волны на факет. Его можно определить как угол между направлением падения фронта поля и нормалью к элементу поверхности, на который падает электромагнитное поле. Если записать направляющие косинусы нормали к поверхности в выбранной точке освещенного элемента поверхности как

$$cax = \frac{-p}{\sqrt{1+p^2+q^2}},$$

$$cay = \frac{-q}{\sqrt{1+p^2+q^2}},$$

$$caz = \frac{1}{\sqrt{1+p^2+q^2}},$$

а направляющие косинусы прямой «источник – точка на освещенном участке поверхности»

$$cbx = \frac{x - x_R}{\sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2 + (z - z_R)^2}}$$

$$cby = \frac{y - y_R}{\sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2 + (z - z_R)^2}}$$

$$cbz = \frac{z - z_R}{\sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2 + (z - z_R)^2}}$$

где x, y, z – координаты точки на освещенном элементе поверхности, x_R, y_R, z_R – координаты точки источника радиоволны, то угол между

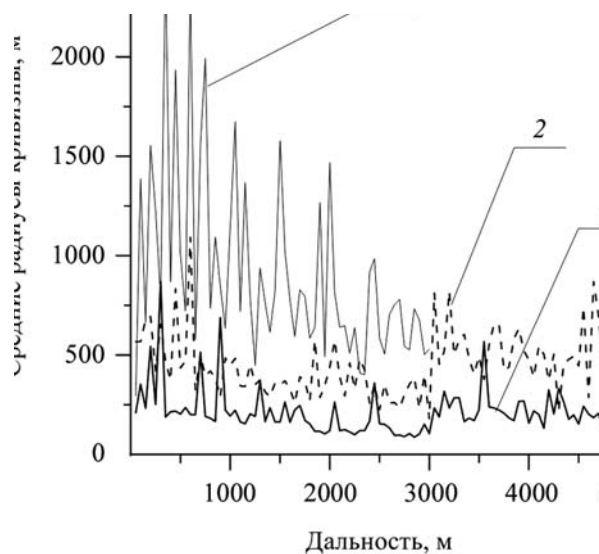


Рис. 5. Средние значения радиусов кривизны освещенных элементов поверхности в зависимости от дальности, полученные при разных значениях скорости ветра: кривая 1 – 5 м/с, кривая 2 – 10 м/с, кривая 3 – 15 м/с. Высота источника 50 м

прямой «источник – точка на поверхности» и нормалью к поверхности можно определить по выражению

$$\gamma = \pi - \arccos(cax \cdot cbx + cay \cdot cby + caz \cdot cbz)$$

Рассмотрим зависимости среднего угла падения электромагнитного поля на освещенный элемент поверхности от геометрии трассы и степени морского волнения, которые представлены на рис. 6. Штриховые кривые получены для поверхности, образованной ветром со скоростью 5 м/с, сплошные кривые – 15 м/с. Кривые, обозначенные номером 1, получены для высоты источника излучения 10 м, кривые 2 – для высоты источника 50 м. Видно, что углы падения волны на освещенные участки морской поверхности, начиная с дистанции в 1 км, практически не зависят ни от степени взволнованности моря, ни от высоты источника и составляют около 87...88°, асимптотически приближаясь к 90°.

Физически это означает, что рассеивающими электромагнитное поле элементами являются вершины морских волн, имеющие нулевые наклоны, на которые при скользющем облучении поле падает под углом, близким к 90°. На дальностях до 1 км в рассеивании поля, кроме вершин, участвуют и склоны морских волн, для которых локальные углы падения меньше.

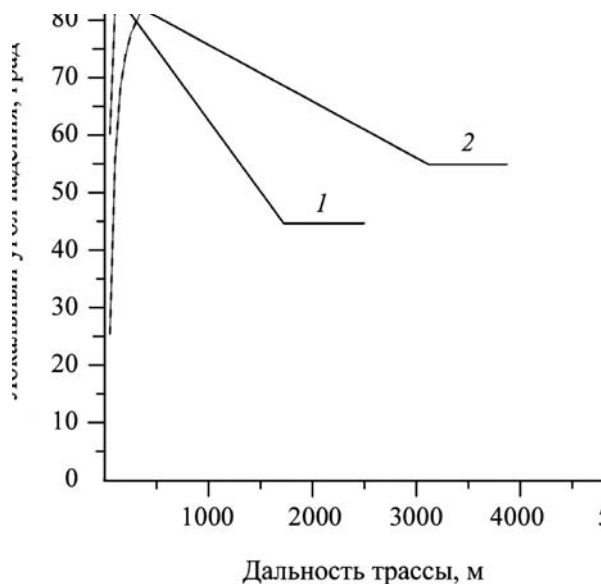


Рис. 6. Графики зависимости среднего угла падения электромагнитного поля на освещенный элемент поверхности от геометрии трассы и степени морского волнения

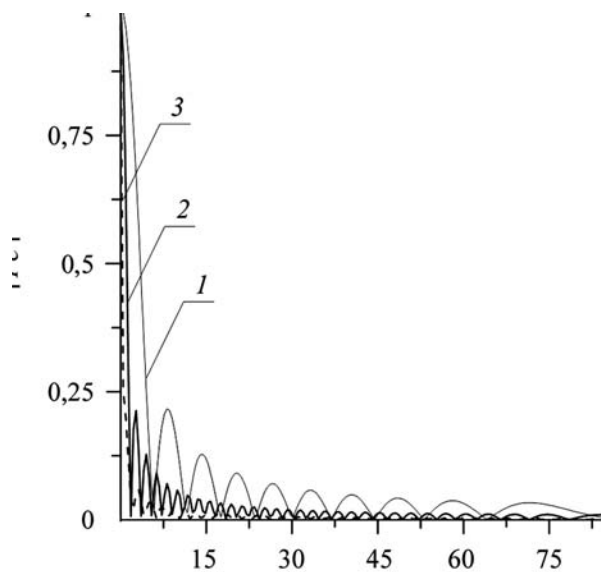


Рис. 7. Абсолютное значение нормированной диаграммы направленности в зависимости от угла падения при длине радиоволны 1 см. Кривая 1 – $S=0,01 \text{ м}^2$, кривая 2 – $S=0,1 \text{ м}^2$, кривая 3 – $S=1 \text{ м}^2$

Рассеянная освещенным элементом поверхности энергия поля, согласно [8], зависит в том числе и от площади рассеивающего элемента. Это связано с тем, что освещенный элемент поверхности имеет собственную диаграмму рассеяния, вид которой зависит от длины используемой радиоволны, площади поверхности элемента поверхности, его конфигурации, диэлектрических характеристик поверх-

ности и т. п. В простейшем случае – квадратной рассеивающей площадки и абсолютно отражающей поверхности – диаграмму рассеяния i -го элемента морского волнения можно представить в виде:

$$D_i = \sqrt{\frac{4\pi S_i}{\lambda^2}} F_i,$$

$$F_i = \frac{\sin u_i}{u_i}, \quad u_i = \frac{k\sqrt{S_i}}{2} \sin \varphi_i,$$

где $\sqrt{4\pi S_i / \lambda^2}$ – амплитуда диаграммы рассеяния; F_i – нормированная диаграмма направленности; S_i – площадь элемента рассеяния; λ – длина радиоволны; φ_i – локальный угол падения фронта электромагнитного поля на i -й элемент морской поверхности; $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число. Вид абсолютного значения нормированной диаграммы направленности в зависимости от угла падения представлен на рис. 7.

При расчетах площади факетов выбирались с учетом используемых поверхностей: для поверхности, образованной скоростью ветра около 5 м/с, шаг дискретизации составлял около 0,22 м (площадь 0,0484 м²); для поверхности, образованной скоростью ветра около 10 м/с, шаг дискретизации составлял около 0,44 м (площадь 0,1936 м²); для поверхности, образованной скоростью ветра около 15 м/с, шаг дискретизации составлял около 0,88 м (площадь 0,7744 м²). Из рис. 7 видно, что ширина основного (первого) лепестка нормированной диаграммы рассеяния обратно пропорциональна корню квадратному от площади рассеивающего элемента поверхности и для самого малого такого элемента не превышает 5° по уровню половинной мощности (кривая 1).

Уровень рассеиваемой мощности быстро падает при увеличении угла падения и при 90° практически близок к нулю. Таким образом, эффект значительного рассеяния можно ожидать при углах падения поля на элемент поверхности не более 5...7°.

Выводы. Полученные для модели морского волнения данные о времени жизни освещенных элементов поверхности и скорости их перемещения за время жизни не противоречат экспериментальным данным о длительности всплесков радиосигнала и доплеровским час-

тотам при рассеянии радиосигнала от морской поверхности.

Вероятности освещенности участков морской поверхности зависят от геометрии трассы. При этом степень взволнованности моря практически не влияет на средние значения вероятности освещенности, влияя только на дисперсию вероятности освещенности.

Средние радиусы кривизны освещенных участков морского волнения зависят от степени взволнованности моря и от геометрии трассы. На начальных участках трассы, когда освещены склоны морских волн, радиусы кривизны больше. По мере увеличения дальности трассы средние радиусы кривизны освещенных участков уменьшаются. Это объясняется ростом затенений, когда освещенными остаются только

вершины самых высоких волн морской поверхности, для которых средние радиусы кривизны меньше, чем для склонов морских волн.

Локальные углы падения электромагнитного поля на освещенные участки морского волнения практически не зависят от степени волнения. На начальных участках трасс (для практически значимых геометрий трасс – до 1 км) они быстро увеличиваются от 0 до 87...88°, асимптотически устремляясь к 90°. Это значит, что элементы морской поверхности для всей трассы, за исключением начальных участков, в рамках отражательной модели рассеяния электромагнитного поля будут при обратном рассеянии возвращать незначительную часть энергии (относительно случая надирного падения).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кулемин Г. П., Разсказовский В. Б. *Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами*. Киев: Наукова думка, 1987. 230 с.
2. Басс Ф. Г., Фукс И. М. *Рассеяние волн на статистически неровной поверхности*. Москва: Наука, 1972. 424 с.
3. Крылов Ю. М. *Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн*. Ленинград: Гидрометеоздат, 1966. 255 с.
4. Глазунов А. С., Гутник В. Г., Логвинов М. Ю., Логвинов Ю. Ф. Особенности моделирования морского волнения для радиофизических задач. *Радиофизика и электроника*. 2017. Т. 22, № 2. С. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2017.02.041>.
5. Kirichenko V. A., Logvinov Yu. F., Pedenko Yu. A., Razskazovskyy V. B. Multipath simulating model of the microwave propagation near the sea surface. *Proc. of the 4th Int. Kharkov Symp. "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves" (MSMW'2001)* (04–09 June, 2001). Kharkov, 2001. Vol. 1. P. 414–416.
6. Ле Блон П., Майсек Л. *Волны в океане*: в 2-х ч. Пер. с англ. Е. Н. Амбарцумян. Москва: Мир, 1981. Ч. 1. 478 с.
7. Смирнов В. И. *Курс высшей математики*: в 4-х т. Москва: Наука, 1974. Т. 2. 655 с.
8. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. *Устройства СВЧ и антенны*. Москва: Радиотехника, 2006. 376 с.

Стаття надійшла 06.06.2018

REFERENCES

1. Kulemin, G. P., Razskazovskyy, V. B., 1987. *Scattering of millimeter radio waves by the earth's surface at small angles*. Kiev: Naukova Dumka Publ. (in Russian).
2. Bass, F. G., Fuks, I. M., 1972. *Dispersion of waves on a statistically uneven surface*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
3. Krylov, Yu. M., 1966. *Spectral methods for studying and calculating wind waves*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
4. Glazunov, A. S., Gutnik, V. G., Logvinov, M. Yu., Logvinov, Yu. F., 2017. Features of sea wave modeling for radiophysical problems. *Radiofiz. Elektron.*, **22**(2), pp. 41–49 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2017.02.041>.
5. Kirichenko, V. A., Logvinov, Yu. F., Pedenko, Yu. A., Razskazovskyy, V. B., 2001. Multipath simulating model of the microwave propagation near the sea surface. In: *4th Int. Kharkov Symp. "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves" (MSMW'2001)*. Kharkov, Ukraine, 04–09 June 2001. Vol. 1, pp. 414–416.
6. Le Blon, P., Maysek, L., 1981. *Waves in the ocean*. Translated from English by E. N. Ambartsumyan. Moscow: Mir Publ. Pt. 1 (in Russian).
7. Smirnov, V. I., 1974. *Course of Higher Mathematics*. Moscow: Nauka Publ. Vol. 2. (in Russian).
8. Voskresenskiy, D. I., Gostyukhin, V. L., Maksimov, V. M., Ponomarev, L. I., 2006. *Microwave devices and antennas*. Moscow: Radiotekhnika Publ. (in Russian).

Received 06.06.2018

V. G. Gutnik¹, M. Yu. Lohvinov², Yu. F. Lohvinov³

¹ Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

² V. N. Karazin Kharkiv National University
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

³ O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine
12, Acad. Proskura st., Kharkov, 61085, Ukraine

CHARACTERISTICS OF SEA SURFACE SCATTERING ELEMENTS UPON RADIO WAVES PROPAGATION AT SMALL GRAZING ANGLES

Subject and purpose. The article is devoted to the simulation of the backscattering of the electromagnetic field on the sea surface in respect to the millimeter and centimeter ranges of radio wavelengths. The relevance of such studies is determined by the need to model the characteristics of sea-based radio systems at the design stage. The aim of the work was to determine the characteristics of the illuminated elements of the underlying surface in relation to the backscattering of radio waves at small grazing angles.

Methods and methodology. To achieve this goal, the methods of mathematical and statistical modeling were used. The simulation results were compared with experimental data.

Results. Comparison of the lifetimes of the sea surface scattering elements and the speeds of their movement with the durations of the scattered radio signal bursts and Doppler frequency shifts of the radio signal upon movement of the electromagnetic field diffusers showed the consistency of the results obtained from the simulation with experimental data. The characteristics of the scattering elements of the sea surface are obtained in respect to the backscattering of radio waves at small grazing angles. They include the probabilities of the illumination of the scattering elements of the surface, their average radii of curvature, as well as the local angles of incidence of the radio wave on the illuminated surface elements.

Conclusion. It is shown that with the grazing propagation of radio waves significant surface shading occurs. This leads to the fact that the electromagnetic field is scattered almost only on the tops of the highest sea waves. In this case, the local angles of incidence of the electromagnetic field on the scattering element of the surface approach 90°. At such local angles of incidence, the illuminated surface element has a very low reflectivity in the opposite direction.

Key words: *propagation of radio waves, sea surface, small grazing angles.*

В. Г. Гутнік¹, М. Ю. Логвінов², Ю. Ф. Логвінов³

¹ Радіоастрономічний інститут НАН України
4, вул. Мистецтв, Харків, 61002, Україна

² Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
4, майдан Свободи, 61022, Харків, Україна

³ Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЗСІЮВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОРСЬКОЇ ПОВЕРХНІ У ВИПАДКУ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ПРИ МАЛИХ КУТАХ КОВЗАННЯ

Предмет і мета роботи. Стаття присвячена моделюванню процесів зворотного розсіювання електромагнітного поля на морській поверхні стосовно міліметрового і сантиметрового діапазонів довжин радіохвиль. Актуальність таких досліджень визначається потребою в моделюванні характеристик радіосистем морського базування ще на етапі проектування. Метою роботи було визначення характеристик освітлених елементів підстильної поверхні для випадку зворотного розсіювання радіохвиль при малих кутах ковзання.

Методи і методологія роботи. Для досягнення поставленої мети використовувалися методи математичного та статистичного моделювання. Результати моделювання порівнювалися з даними експериментальних досліджень.

Результати роботи. Порівняння часів життя розсіювальних елементів морської поверхні і швидкостей їх переміщення з тривалістю сплесків розсіяного сигналу та доплерівськими зсувами частоти радіосигналу в умовах переміщення розсіювачів електромагнітного поля показало несуперечливість результатів, що отримані в результаті моделювання, з даними експерименту. Отримано характеристики освітлених елементів морської поверхні стосовно до зворотного розсіювання радіохвиль при малих кутах ковзання. Серед них ймовірності освітленості розсіювальних елементів поверхні, їх середні радіуси кривизни, а також локальні кути падіння радіохвилі на освітлені елементи поверхні.

Висновок. Показано, що при ковзному поширенні радіохвиль виникають значні затінення поверхні. Це призводить до того, що електромагнітне поле розсіюється практично тільки на вершинах найвищих морських хвиль. У цьому випадку локальні кути падіння електромагнітного поля на освітлений елемент поверхні наближаються до 90°. При таких локальних кутах падіння освітлений елемент поверхні має дуже низьку відбивну здатність у зворотному напрямку.

Ключові слова: *поширення радіохвиль, морська поверхня, малі кути ковзання.*