

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ ВОЛН

УДК 537.877:621.3.029.64

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ САНТИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН В ВОЛНОВОДЕ ИСПАРЕНИЯ НАД ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

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

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

В предыдущих исследованиях распространения сантиметровых радиоволн численным методом пошагового разбиения рассеяние от взволнованной морской поверхности учитывалось в приближении касательной плоскости. Такой подход не позволяет учесть возникновение затенений освещенной поверхности и отклонение распределения вероятности высоты морской поверхности от нормального закона. В данной работе рассмотрены методы учета этих эффектов и получены зависимости множителя ослабления от высоты и расстояния при наличии волновода испарения. Показано, что затенения оказывают существенно большее влияние на распространение сантиметровых радиоволн в волноводе испарения по сравнению с учетом негауссовости. Полученные результаты позволяют повысить точность прогнозирования распространения радиоволн в нижней тропосфере. Ил. 3. Библиогр.: 24 назв.

Ключевые слова: распространение радиоволн, волновод испарения, параболическое уравнение, численные методы.

Широкое использование различных радиотехнических систем на судах и прибрежных радиолокационных станциях обуславливает повышенное внимание к задачам анализа и прогнозирования распространения радиоволн над морем. В частности, для повышения эффективности работы антенн, расположенных на малых высотах, большой интерес представляет прогнозирование распространения радиоволн в волноводе испарения с учетом его случайно-неоднородной структуры. Волновод испарения обусловлен высоким градиентом влажности вблизи морской поверхности. Основные параметры волновода – это его высота, т. е. такая высота z_0 , на которой производная $dM(z)/dz|_{z=z_0} = 0$ (типичные значения – 2–30 м) и M -дефицит, т. е. разность значений приведенного коэффициента преломления M на высоте z_0 и на поверхности моря (обычно до 10 M -единиц). Такие параметры волновода позволяют эффективно захватывать радиоволны в диапазоне короче 10 см. На сегодняшний день широкое распространение получили системы прогнозирования распространения радиоволн, основанные на численном решении параболического уравнения пошаговым методом [1]. Данный метод позволяет эффективно рассчитывать распределение электромагнитного излучения вдоль трассы при наличии как высотной, так и дистанционной зависимости коэффициента преломления, а также учитывать неоднородность свойств подстилающей поверхности вдоль трассы распространения. Однако с повышением частоты излучения все более существенное влияние на распространение радиоволн над морем начинают оказывать турбулентные флуктуации коэффи-

циента преломления атмосферы и взволнованное состояние морской поверхности, которые приводят к высвечиванию энергии из волновода, уменьшая его эффективность [2]. В работе [3] мы подробно рассмотрели вопрос учета влияния статистическинеоднородных флуктуаций коэффициента преломления атмосферы на распространение радиоволн в волноводе испарения. В настоящей работе мы опишем методику учета влияния морского волнения на распространение радиоволн сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона в волноводе испарения и оценим степень влияния на распространение сантиметровых радиоволн в волноводе испарения двух дополнительных факторов, учитывающих:

- затенения излучения, распространяющегося под малыми углами скольжения к поверхности;
- негауссовость статистики морского волнения.

1. Отражение от взволнованной морской поверхности. Учет рассеяния от взволнованной морской поверхности в рамках приближения параболического уравнения для среднего поля осуществляется введением эффективного коэффициента отражения шероховатой поверхности, т. е. такого коэффициента отражения, при котором поле над гладкой поверхностью будет таким же, как поле над шероховатой поверхностью. Для высокочастотного диапазона радиоволн эффективный коэффициент отражения (эффективный импеданс) от взволнованной поверхности моря может быть получен в приближении метода малых возмущений [4, 5]. С уменьшением длины волны излучения условия применимости метода малых возмущений начинают нарушаться и решение находится в рамках приближения ка-

сательной плоскости. Так как мы рассматриваем распространение СВЧ-радиоволн внутри волновода испарения, то дальнейший анализ необходимо проводить в рамках приближения касательной плоскости. Эффективный коэффициент отражения представляет собой произведение коэффициента отражения Френеля и коэффициента, учитывающего шероховатость подстилающей поверхности ρ . В предположении, что функция распределения вероятности высоты поверхности моря имеет гауссов характер, Исаковичем [6] и позже Аментом [7] было получено выражение для коэффициента, учитывающего шероховатость подстилающей поверхности

$$\rho_A = \exp\left(-\frac{1}{2}(2q\sigma_\xi)^2\right), \quad (1)$$

где $q = k \sin(\alpha)$; k – волновое число радиоволны; α – угол скольжения; σ_ξ – среднеквадратичное отклонение высоты. Немного позже в исследованиях Берда [8] было показано, что экспериментально измеряемый коэффициент отражения больше, чем предсказываемый с учетом коррекции по Аменту в области больших значений $2q\sigma_\xi$. Основываясь на этих результатах, Миллер, Браун и Вег [9] (*MBV*) предположили, что отклонение от среднего уровня морской поверхности ξ является случайной величиной

$$\xi = H \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda_s} x\right), \quad (2)$$

где H – гауссова случайная величина; Λ_s – характеристическая длина волны и x – случайная величина, равномерно распределенная в интервале $(-\Lambda_s/4, \Lambda_s/4)$. Таким образом, получается, что случайные возвышения поверхности ξ имеют плотность распределения вероятности следующего вида:

$$p(\xi) = \frac{1}{2\pi^{3/2}\sigma_\xi} \times \exp\left(-\frac{\xi^2}{8\sigma_\xi^2}\right) K_0\left(\frac{\xi^2}{8\sigma_\xi^2}\right), \quad (3)$$

где K_0 – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка или функция Макдональда. В соответствии с приближением касательной плоскости интенсивность рассеянного поля определяется характеристической функцией, соответствующей функции распределения вероятности. Таким образом, эта модель морской поверхности приводит к следующему виду коэффициента, учитывающего шероховатость подстилающей поверхности ρ_{MBV} :

$$\rho_{MBV} = \exp\left(-\frac{1}{2}(2q\sigma_\xi)^2\right) I_0\left(\frac{1}{2}(2q\sigma_\xi)^2\right). \quad (4)$$

На сегодняшний день *MBV*-модель получила наиболее широкое распространение при расчетах множителя ослабления радиоволн над морем. В частности, она используется в программных комплексах *AREPS*, *TEMPER* и др. Однако при сопоставлении экспериментальных данных по распространению радиоволн СВЧ-диапазона над взволнованной поверхностью с теоретическими вычислениями в ряде работ [10, 11] было отмечено, что расчетные уровни сигналов превышают наблюдаемые в эксперименте. В то же время в работах [12, 13] указывалось на несоответствие статистики морской поверхности, заложенной в *MBV*-модели, экспериментальным данным, и нефизичность функции распределения (3). Также в работе [14] проводилась численная оценка точности решений, получаемых с помощью выражений *MBV* и Амента. Для этого использовался метод моментов и многосеточное итерационное приближение [15]. Было отмечено, что *MBV*-модель дает хорошее приближение при значениях параметра шероховатостей Рэллея более 2,5, а приближение Амента – при меньших чем 1,5.

Поэтому в работе [11] было предложено учитывать затенения одних участков морской поверхности другими, что существенно при скользящих углах распространения. С другой стороны, в работе [16] была предложена методика учета негауссовости морского волнения, что более существенно проявляется при увеличении скорости ветра. В следующих разделах мы проведем оценку влияния этих эффектов на распространение радиоволн СВЧ-диапазона в волноводе испарения.

2. Учет затенений морской поверхности. При распространении радиоволн в волноводе отражение волны от морской поверхности происходит под малыми скользящими углами. В такой ситуации углы падения волны сопоставимы с углами наклона морской поверхности и происходит затенение одних частей поверхности другими. В результате снижается точность приближения касательной плоскости (предполагается, что поверхность полностью освещена и затенения отсутствуют). Проблема учета затенений от неровной поверхности была рассмотрена Бассом и Фуксом [17] с помощью теории выбросов случайных функций. Статистическая функция освещенности была выражена в виде бесконечного ряда, из которого в предположении либо малых, либо сильных затенений получаются компактные выражения. В дальнейшем вопросы учета затенений были рассмотрены в статьях Вагнера [18], Смита [19] и Бурьела [20]. Для объяснения экспериментальных данных, полученных в ходе эксперимента в бассейне, Смит и другие [21] предприняли попытку модификации коэффициента, учитывающего влияние неровности поверхности (4), с целью учета затенений. В работах [22, 23] было

отмечено, что наблюдается эффект частотного сдвига в интерференционной картине при ориентации трассы распространения вдоль направления ветра. Для учета этого эффекта в выражение для когерентной компоненты поля было введено расстояние, учитывающее разность между средним значением морской поверхности и средним значением освещенной части морской поверхности, что внесло дополнительный фазовый сдвиг в коэффициент отражения и позволило воспроизвести частотный сдвиг в интерференционной картине. При этом величина средней высоты освещенной части морской поверхности определялась с помощью метода статистических испытаний и геометрической оптики, что является неудобным для практического использования из-за достаточно больших вычислительных затрат. Более теоретически обоснованная модель учета затенений была представлена в работе Фабро и Бурьела [11], в которой для учета затенений вводится функция распределения вероятности освещенной высоты, записываемая следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{p}(\alpha, \xi) &= \\ &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} p_{\gamma}(\gamma) S(\alpha; \xi, \gamma) d\gamma}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_{\xi, \gamma}(\xi, \gamma) S(\alpha; \xi, \gamma) d\xi d\gamma} p_{\xi}(\xi), \end{aligned} \quad (5)$$

где p_{γ} и p_{ξ} – плотность распределения вероятности наклонов и высоты; $p_{\xi, \gamma}$ – совместная плотность распределения вероятностей высот и наклонов поверхности; $S(\alpha; \xi, \gamma)$ – статистическая функция освещенности точки поверхности с высотой h и наклоном γ , наблюдаемой под углом скольжения α . В знаменателе двойной интеграл соответствует условию нормировки вида $\int_{-\infty}^{\infty} p(\alpha; \xi) d\xi = 1$. В прямом направлении и для любого некоррелированного случайного процесса использование формул Вагнера и Смита, как показано в работе [20], приводит к

$$\begin{cases} \hat{p}_W = p_{\xi}(\xi) \frac{2\Lambda}{1 - \exp(-2\Lambda)} e^{-2\Lambda[1 - F(\xi)]}, \\ \hat{p}_S = p_{\xi}(\xi) (1 + 2\Lambda) [F(\xi)]^{2\Lambda}, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$F(\xi') = \int_{-\infty}^{\xi'} p_{\xi}(\xi) d\xi; \quad (7)$$

$$\Lambda(\alpha, \sigma_s) = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \int_{\operatorname{tg} \alpha}^{\infty} (\gamma - \operatorname{tg} \alpha) p_{\gamma}(\gamma) d\gamma. \quad (8)$$

Предполагая гауссову статистику высоты и наклонов морской поверхности, получаем

$$\begin{cases} \Lambda(\alpha, \sigma_s) = \Lambda(v) = \frac{\exp(-v^2) - v\sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(v)}{2v\sqrt{\pi}}, \\ v = \frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\sqrt{2}\sigma_{\gamma}}, F(\xi) = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\xi}{\sqrt{2}\sigma_{\xi}}\right). \end{cases} \quad (9)$$

Тогда с учетом выражений (6) и (9) коэффициент, учитывающий влияние неровности поверхности, принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho_{sh}(\alpha) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2q\xi} p_s(\alpha; \xi) = \\ &= \frac{1 + 2\Lambda}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2q\sqrt{2}\sigma_{\xi}h - h^2} w(h) dh. \end{aligned} \quad (10)$$

При этом интеграл в (10) должен вычисляться численно. Анализ плотности распределения вероятности (6) показал, что она может быть аппроксимирована гауссовой функцией

$$\hat{p}(h; \alpha) \cong \frac{1}{\hat{\sigma}_h \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(h - \hat{m}_h)^2}{2\hat{\sigma}_h^2}\right], \quad (11)$$

где средняя высота и дисперсия освещенной высоты для выражений Смита принимают вид

$$\begin{cases} \hat{m}_h(v) = \frac{1 + 2\Lambda}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} h e^{-h^2} w(h) dh, \\ \hat{\sigma}_h^2(v) = \frac{1 + 2\Lambda}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (h - \hat{m}_h)^2 e^{-h^2} w(h) dh, \end{cases} \quad (12)$$

где $h = \xi' / (\sqrt{2}\sigma_{\xi})$ – нормированная высота; $w(h) = [1 - \operatorname{erfc}(h)/2]^{2\Lambda}$.

Таким образом, имеем следующий коэффициент, учитывающий влияние неровности поверхности с учетом затенений:

$$\rho_{sh}(\alpha) = \exp\left(-\frac{1}{2}(2q\hat{\sigma}_{\xi})^2\right) e^{-jQ\hat{m}_{\xi}}, \quad (13)$$

где $\hat{m}_{\xi} = \sigma_{\xi} \sqrt{2}\hat{m}_h$; $\hat{\sigma}_{\xi} = \sigma_{\xi} \sqrt{2}\hat{\sigma}_h$.

Полученный коэффициент (13) с учетом затенений отличается от коэффициента (1) наличием фазового множителя, учитывающего изменение оптического расстояния за счет изменения средней высоты морской поверхности при учете затенений, и использованием дисперсии освещенной высоты.

Для проверки точности решения, получаемого согласно вышеприведенной методике учета затенений (13), в работе [13] использовался метод статистических испытаний (Монте-Карло). Как показало сопоставление с эталонным решением, вышеописанный метод учета затенений повышает точность определения положений минимумов интерференционной картины по сравнению с приближением касательной плоскости. Однако существует отличие от эталонного решения, получаемого методом статистических испытаний в величине уровней сигналов в минимумах

и максимумах, что, по мнению авторов метода, вызвано пренебрежением эффектами дифракции при расчете граничных условий. Также необходимо отметить, что алгоритм учета затенений является неустойчивым при больших скоростях ветра, приводящих к большим неровностям и при больших частотах излучения.

3. Учет негауссовости статистики морской поверхности. Как отмечалось выше, модель *MBV* (2) предполагает, что морская поверхность представляет собой синусоиду с нормально распределенной амплитудой и равномерно распределенной фазой. Тогда плотность распределения вероятности высоты имеет вид (3). Однако из экспериментальных данных, которые, в частности, были получены в ходе *Rough Evaporation Duct (RED)* эксперимента [12, 24] на плавучей платформе возле побережья Гавайских островов, плотность распределения вероятности высоты морской поверхности имеет вид, близкий к гауссовому [16]. Также были проанализированы плотности распределения вероятности амплитуд и фаз морских волн, которые отличались от тех, которые были заложены в *MBV*-модель. Гауссова плотность распределения вероятности высоты также вытекает из центральной предельной теоремы теории вероятности в предположении, что морская поверхность является суммой фурье-гармоник со случайной фазой. Таким образом, несоответствие статистики морской поверхности, заложенной в модель, может приводить к переоценке величины сигнала в точке приема и, соответственно, к некорректности модели *MBV*. Объяснением отличия между экспериментальными данными Берда и коэффициентом отражения Амента может служить тот факт, что в результате нелинейного взаимодействия морских волн статистика морской поверхности имеет отличия от гауссового вида.

Рассмотрим один из возможных путей учета негауссовости статистики морской поверхности [12]. В соответствии с приближением касательной плоскости интенсивность когерентно рассеянного поля выражается через характеристическую функцию шероховатой поверхности

$$\Phi(q) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{jq\xi} p(\xi) d\xi. \quad (14)$$

Разлагая экспоненту в ряд, получаем представление $\Phi(q)$ в виде

$$\Phi(q) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n}{n!} (jq)^n, \quad (15)$$

где коэффициенты разложения μ_n – моменты случайной величины ξ

$$\mu_n = \langle \xi^n \rangle = j^{-n} \Phi^{(n)}(0). \quad (16)$$

Если ξ – гауссова случайная величина, то все ее центральные моменты определяются через стандартное отклонение σ_ξ

$$\mu_{2n} = \frac{(2n)!}{2^n n!} \sigma_\xi^{2n}, \quad \mu_{2n+1} = 0. \quad (17)$$

Степенной ряд (15) выражает характеристическую функцию через моменты, которые могут быть определены экспериментально. Однако для практического использования такой подход малопригоден из-за медленной сходимости степенного ряда. Более быстрая сходимость может быть получена для класса случайных функций с плотностью распределения вероятности, близкой к гауссовой.

Рассмотрим производящую функцию семи инвариантов $K(q)$ случайной поверхности ξ

$$K(q) \equiv \ln \Phi(q) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\kappa_n}{n!} (jq)^n, \quad (18)$$

где κ_n – куммулянты.

$$K^{(n)} = \kappa_n = i^{-n} \frac{d^n}{dq^n} \ln \Phi(q) |_{q=0}. \quad (19)$$

При условии, что $\mu = \langle \xi \rangle = 0$, получаем

$$\begin{aligned} \kappa_0 &= 0, \kappa_1 = 0, \\ \kappa_2 &= \mu_2 = \sigma_\xi^2, \kappa_3 = \mu_3, \\ \kappa_4 &= \mu_4 - 3\mu_2^2, \kappa_5 = \mu_5 - 10\mu_2\mu_3 \dots \end{aligned} \quad (20)$$

Для гауссовой случайной величины куммулянты $\kappa_n \equiv 0$ при $n > 2$. Тогда для приближения касательной плоскости получаем коэффициент отражения

$$\begin{aligned} R &= S e^{K(2q)} = \\ &= S \exp[-2q^2 \sigma_\xi^2] \times \\ &\times \exp[(4/3)(jq \sigma_\xi)^3 (\mu_3 \sigma_\xi^3)] \times \\ &\times \exp[(2/3)(jq \sigma_\xi)^4 (\mu_4 \sigma_\xi^4)] \dots, \end{aligned} \quad (21)$$

где S – коэффициент отражения Френеля. Первый множитель $\exp[-2q^2 \sigma_\xi^2]$ описывает отражение от чисто гауссовой поверхности. Нелинейные волновые взаимодействия могут вносить асимметрию в плотность распределения вероятности возвышений поверхности. Такая асимметрия воздействует только на фазу рассеянного поля, и члены в (21), соответствующие нечетным куммулянтам, не влияют на интенсивность поля. Однако значение фазы существенно сказывается на положении минимумов и максимумов интерференционной картины. На интенсивность сигнала оказывают влияние члены, соответствующие четным куммулянтам. При малых значениях $(\sigma_\xi q)$ влияние отклонения от гауссовости на интенсивность сигнала оказывается небольшим, однако

если распространение происходит внутри волновода в условиях многократного переотражения, то

суммарный эффект, по мнению авторов методики [16], может оказаться достаточно существенным.

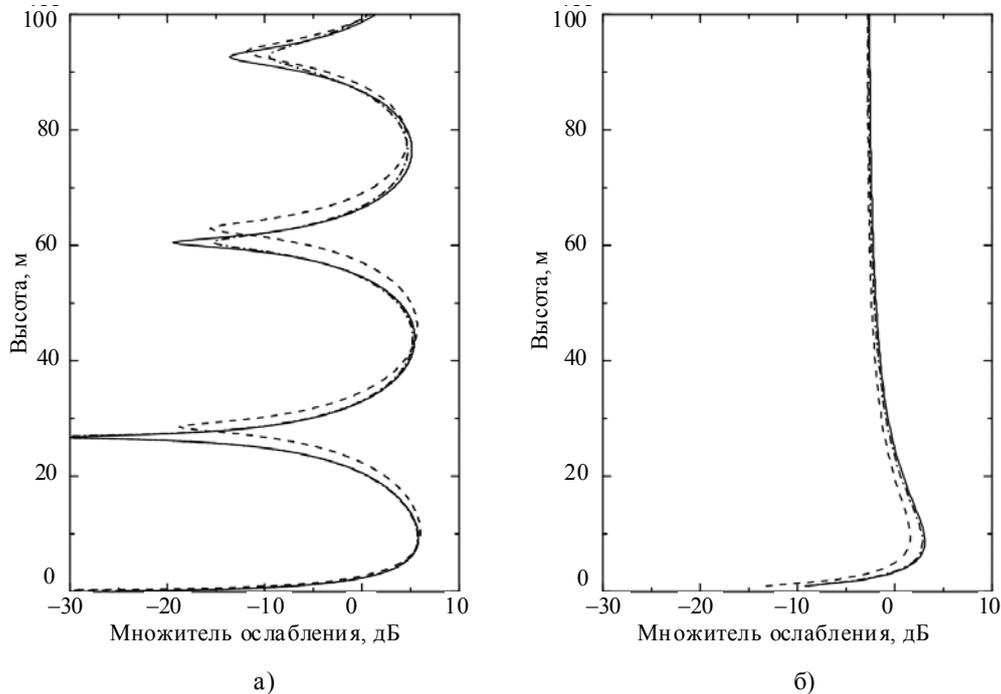


Рис. 1. Высотная зависимость множителя ослабления на расстоянии: а) – 10 км; б) – 100 км

Выводы. Результаты численного расчета множителя ослабления радиоволн, распространяющихся над морской поверхностью, представлены на рис. 1–3. Множитель ослабления показывает, на сколько децибел изменится поле при распространении в волноводе по сравнению с распространением в свободном пространстве. Все расчеты проведены с помощью метода пошагового разбиения, подробное описание которого приведено в работе [1]. Параметры расчета, такие как расстояние между фазовыми экранами и шаг дискретизации по высоте, выбирались на основании методик, приведенных там же, и для частоты 7 ГГц составляли 100 и 0,3 м соответственно. Наряду со стандартной моделью *MBV* (на рис. 1–3 приведена сплошной линией) мы приводим зависимости, полученные по вышеописанным методикам, учитывая затенения (12), (13) (на рис. 1–3 приведена штриховой линией) и негауссовость статистики морской поверхности (21) (на рис. 1–3 приведена штрихпунктирной линией). На рис. 1 и 2 показаны высотная и дистанционная зависимости множителя ослабления в волноводе испарения высотой 15 м при высоте передающей антенны с горизонтальной поляризацией 7 м и частоте радиоизлучения 7 ГГц. Скорость ветра составляет 7 м/с. Высотные зависимости приведены для двух удалений приемника: 10 и 100 км. Дистанцион-

ные зависимости приведены для приемника, расположенного на высотах 10 и 30 м. На рис. 3 частота радиоволн была понижена до 5 ГГц, параметры волновода и передающей антенны такие же, как и на предыдущих рисунках, приемник находится на высоте 10 м, а скорость ветра соответствует 7 и 5 м/с.

Вертикальный профиль приведенного коэффициента преломления имел логарифмический вид и вычислялся по формуле [1]

$$M(z) = M(0) + 0,125(z - z_{ED} \ln(z/z_0)), \quad (22)$$

где $M(z)$ – значение приведенного коэффициента преломления на высоте z ; $M(0) = 330 M$ -ед.; z_{ED} – высота волновода испарения; $z_0 = 1,5 \times 10^{-4}$ м – параметр шероховатости.

Величина параметров асимметрии и эксцесса для моделирования отклонения морской поверхности от гауссовой соответствует максимумам в распределениях этих параметров, полученных из данных *RED*-эксперимента и приведенных в работе Христова [16].

Анализ высотной зависимости показывает изменение положения минимумов в интерференционной картине для случая учета затенений и для случая учета негауссовости. Однако учет затенений оказывает более существенное влияние и приводит к смещению положения экстремумов интерферен-

ционной картины на 2–3 м, тогда как негауссовость приводит к изменениям не более чем на 1 м.

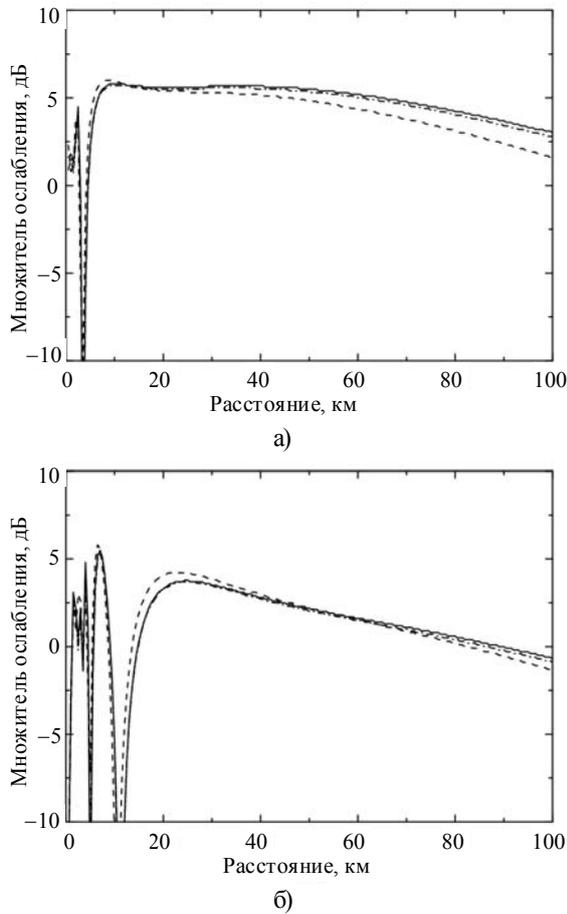


Рис. 2. Дистанционная зависимость множителя ослабления на высоте: а) – 10 м; б) – 30 м

Такое изменение за счет затенений наблюдается и в экспериментальных данных, в частности, в работе [21]. Обращает на себя внимание и изменение глубины минимумов интерференционной картины. Объяснением этих эффектов служит тот факт, что при затенении одних участков поверхности другими отражение происходит, в основном, от плоскостей, приподнятых относительно средней высоты морской поверхности за счет большего освещения более высоких участков. За счет уменьшения «освещенной» части морской поверхности, что соответствует меньшей дисперсии освещенной высоты относительно случая полностью освещенной поверхности, происходит изменение глубины минимумов в интерференционной картине.

На рис. 1 и 2 видно, что по мере удаления от передатчика наблюдается более сильное ослабление сигнала внутри волновода при учете затенений и негауссовости. Величина дополнительного погонного затухания составляет менее 0,1 дБ/км при учете негауссовости и порядка

0,2–0,3 дБ/км при учете затенений. Сопоставление рис. 2 и 3 показывает, что с увеличением частоты эффекты, обусловленные затенениями и негауссовостью, оказывают более существенное влияние. Влияние этих эффектов возрастает при увеличении скорости ветра (рис. 3), что также вытекает из общих физических соображений.

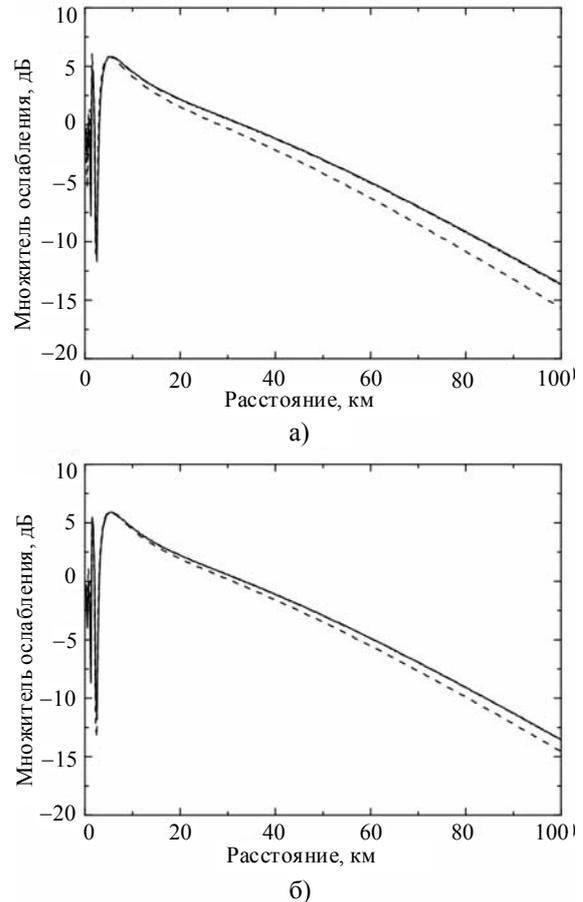


Рис. 3. Дистанционная зависимость множителя ослабления для скорости ветра: а) – 7 м/с; б) – 5 м/с

На основании полученных зависимостей множителя ослабления от расстояния и высоты можно сделать вывод, что при волноводном распространении в первую очередь необходимо учитывать эффекты затенений, так как, по крайней мере, в рассмотренных ситуациях, они оказывают более существенное влияние на распространение радиоволн сантиметрового диапазона, чем негауссовость. Учет этих эффектов приводит к уменьшению уровня сигнала внутри волновода испарения, что уменьшает тенденцию переоценки теоретически рассчитанных уровней сигнала внутри волновода испарения по сравнению с экспериментальными данными [10].

Необходимо отметить, что для достаточно эффективного учета негауссовости необходима более строгая методика определения парамет-

ров асимметрии и эксцесса в зависимости от скорости ветра. Недостатком алгоритма учета затенений является неустойчивость, которая проявляется при относительно большой взволнованности морской поверхности или при повышении частоты, т. е. при увеличении фазового сдвига в коэффициенте отражения. Указанный недостаток должен быть устранен при развитии более совершенных методов учета затенений.

1. Levy M. Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation. – London, U.K.: The Institution of Electrical Engineers, 2000. – 338 p.
2. Кукушкин А. В., Фрейлхер В. Д., Фукс И. М. // Изв. вузов. Радиофизика. – 1987. – 30, № 7. – С. 811–823.
3. Иванов В. К., Шалыпин В. Н., Левадный Ю. В. Рассеяние ультракоротких радиоволн на тропосферных флуктуациях в волноводе испарения // Изв. вузов. Радиофизика. – 2009 (в печати).
4. Barrick D. E. Theory of HF and VHF propagation across the rough sea. Part 1. The effective surface impedance for a slightly rough highly conducting medium at grazing incidence // Radio Sci. – 1971. – 6, no. 5. – P. 517–526.
5. Barrick D. E. Theory of HF and VHF propagation across the rough sea. Part 2. Application to HF and VHF propagation above sea // Radio Sci. – 1971. – 6, no. 5. – P. 527–533.
6. Исакович М. А. Рассеяние волн от статистически шероховатой поверхности // ЖЭТФ. – 1952. – 23, № 3(9). – С. 305–314.
7. Ament W. S. Toward a theory of reflection by rough surface // Proc. IRE. – 1953. – 41, no. 1. – P. 142–146.
8. Beard C. I. Coherent and incoherent scattering of microwaves from the ocean // IRE Trans. Antennas and Propag. – 1961. – 9, no. 5. – P. 470–475.
9. Miller A. R., Brown R. M., Vegh E. A new derivation for the rough surface reflection coefficient and for the distribution of sea wave elevations // NRL Report 8744, Naval Research Laboratory, Washington, D.C. – 1983. – 4 p.
10. Hitney H. Evaporation duct propagation and near-grazing angle scattering from a rough sea // IGARSS Proc. – 1999. – 5. – P. 2631–2633.
11. Fabro V., Borlier C., Comdes P. C. Forward propagation modeling above Gaussian rough surfaces by the parabolic wave equation: introduction of shadowing effect // Progress in Electromagnetic Research. – 2005. – 58. – P. 243–269.
12. Hristov T. S., Friehe C. A. EM propagation over the ocean: Analysis of RED experiment data // 12th Conf. Interactions of the Sea and Atmosphere. – 2003. – P. 1–4.
13. Barrick D. E. Grazing behavior of scatter and propagation above any rough surface // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 1998. – 46, no. 1. – P. 73–83.
14. Freund D. E., Woods N. E., Ku H.-C., Awadallah R. S. Forward radar propagation over rough sea surface: A numerical assessment of the Miller-Brown approximation using a horizontally polarized 3-GHz line source // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 2006. – 54, no. 4. – С. 1292–1304.
15. Donohue D. J., Ku H.-C., Thompson D. R. Application of iterative moment-method solutions to ocean surface radar scattering // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 1998. – 46, no. 1. – P. 121–132.
16. Hristov T. S., Anderson K. D., Friehe C. A. Scattering properties of the ocean surface: The Miller-Brown-Vegh model revisited // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 2008. – 52, no. 4. – P. 1103–1109.
17. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние радиоволн на статистически неровной поверхности. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
18. Wagner R. J. Shadowing of randomly rough surfaces // J. Acoust. Soc. Am. – 1966. – 41, no. 1. – P. 138–147.
19. Smith B. G. Geometrical shadowing of a random rough surface // IEEE Trans. Ant. and Prop. – 1967. – 13, no. 5. – P. 384–388.
20. Bourlier C., Bergnic G., Saillard J. Monostatic and bistatic statistical shadowing functions from one-dimensional stationary random rough surface according to the observation length. Part I. Single scattering // Waves in Random Media. – 2002. – 12, no. 2. – P. 145–174.
21. Smith J. R., Russell S. J., Brown B. E. et al. Electromagnetic forward scattering measurements over a known, controlled sea surface at grazing // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 2004. – 42, no. 6. – P. 1197–1207.
22. Smith J. R., Mirotznik M. S. Rough Surface Scattering Models // IGARSS Proc. IEEE International. – 2004. – 5. – P. 3107–3110.
23. Smith J. R., Mirotznik M. S. High Frequency Forward Scattering Models with Shadowing Correction // Antennas and Propagation Society International Symposium Proc. – 2005. – 4A. – P. 64–67.
24. Anderson K. D., Paulus R. A. Rough Evaporation Duct (RED) Experiment // Proc. of the Battlespace Atmospheric and Cloud Impact on Military Operations, Fort Collins, Colorado. – 2000. – P. 1–11.

SIMULATION OF MICROWAVE PROPAGATION IN EVAPORATION DUCT OVER ROUGH SEA SURFACE

Yu. V. Levadnyi, V. K. Ivanov, V. N. Shalyapin

Previous investigations of microwave propagation by the numerical split-step parabolic equation method used Kirchhoff approximation to take into account rough sea surface scattering. Those approaches ignored effects of self-shadowing sea surface and deviation of sea surface height probability distribution from a normal law. Methods for taking into account these effects are considered in the paper. Height and distance dependencies of propagation factor for microwaves in the presence of evaporation duct are calculated. It is shown that shadowing influences on microwave propagation in the evaporation duct are more significant than the effect of non-gaussianity. Obtained results make it possible to improve accuracy of the microwave propagation forecast in the low troposphere.

Key words: microwave propagation, evaporation duct, parabolic equation, numerical methods.

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ САНТИМЕТРОВИХ РАДІОХВИЛЬ У ХВИЛЕВОДІ ВИПАРЮВАННЯ НАД СХВИЛЬОВАНОЮ МОРСЬКОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Ю. В. Левадний, В. К. Іванов, В. М. Шалыпін

У попередніх дослідженнях поширення сантиметрових радіохвиль чисельним методом покрокового розподілу розсіяння від схвильованої морської поверхні враховувалося у наближенні дотичної площини. Такий підхід не дозволяє ураховувати утворення затінення освітленої поверхні та відхилення розподілу ймовірності висоти морської поверхні від нормального закону. У роботі розглянуто методи врахування цих ефектів та отримано залежності множника послаблення від висоти та відстані за наявності хвильоводу випарювання. Показано, що затінення більш суттєво впливають на поширення сантиметрових радіохвиль у хвильоводі випарювання, ніж врахування негауссовості. Отримані результати дозволяють підвищити точність прогнозування поширення радіохвиль у нижній тропосфері.

Ключові слова: поширення радіохвиль, хвильовід випарювання, параболічне рівняння, чисельні методи.

Рукопись поступила 15 декабря 2008 г.