

- servis v seti Internet: Tr. Vserossiyskoy konferentsii – MGU, RGU, IVT RAN, 2006* [Scientific service on the Internet: Proceedings of the All-Russian Conference - Moscow State University, Russian State University, ICT RAS, 2006], pp. 47-49.
26. *Kalyaev I.A., Levin I.I. Rekonfiguriruyemye multikonveyernye vychislitel'nye sistemy dlya resheniya potokovykh zadach* [Reconfigurable multi-pipeline computing systems for solving streaming problems], *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technologies and computing systems], 2011, No. 2, pp. 12-22.
27. *Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Shmoilov V.I. Reconfigurable Multipipeline Computing Structures* Published by Nova Science Publishers, Inc. (New York, USA). 2012, 345 p. ISBN: 978-1-61942-854-6.
28. NITS SE i NK. Tertsius-2. © Copyright 2004-2018. ООО "NITS super-EVM i neyrokomp'yuterov" [Research Center for SE and NK. Tertsius-2. © Copyright 2004-2018. LLC "Research Center for Super-Computers and Neurocomputers"]. Available at: <http://superevm.ru/index.php?page=tertsius-2> (accessed 15 September 2023).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Левин Илья Израилевич – Южный федеральный университет; e-mail: iilevin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634361608; зав. кафедрой интеллектуальных и многопроцессорных систем; д.т.н.; профессор.

Сорокин Дмитрий Анатольевич – НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров; e-mail: jotun@inbox.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79508668253; начальник отдела; к.т.н.

Касаркин Алексей Викторович – e-mail: kav589@mail.ru; тел.: +79045065636; научный сотрудник; к.т.н.

Levin Ilya Izrailevich – Southern Federal University, Taganrog, Russia; e-mail: iilevin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634361608; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Sorokin Dmitriy Anatolyevich – Supercomputers and Neurocomputers Research Center; e-mail: jotun@inbox.ru; Taganrog, Russia; phone: +79508668253; chief of department; cand. of eng. sc.

Kasarkin Alexey Viktorovich – e-mail: kav589@mail.ru; phone: +79045065636; research scientist; cand. of eng. sc.

УДК 621.396.96:551

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-162-178

В.Т. Лобач, А.Н. Бакуменко

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ФЛУКТУАЦИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПРИ МАЛЫХ НЕРОВНОСТЯХ ОТРАЖАЮЩЕЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Работа посвящена исследованиям отражений электромагнитных полей от поверхностей, удовлетворяющих ограничениям метода Кирхгофа. Анализ известных в области дифракции волн работ позволяет сделать вывод о том, что решения задач дифракции волн статистически неровными поверхностями в той или иной мере упрощается принятием упрощающих гипотез. Среди основных упрощений следует назвать: ограничение площадок облучения и, как следствие, фиксация амплитудных множителей интегрируемых выражений, отказ от учета изменчивости локальных значений коэффициента отражения Френеля, решение однопозиционной задачи дифракции волн в условиях совмещения точек излучения и приема, изотропный характер пространственной структуры отражающей поверхности. В работе решается задача оценки интенсивности флуктуаций напряжения радиолокационного сигнала, отраженного мелкомасштабной взволнованной морской поверхностью, без принятия перечисленных упрощающих гипотез. На основе общего решения для полей рассеяния основных поляризацій, полученных в рамках метода Кирхгофа, анализируются аналитические решения для интенсивности флуктуаций комплексной амплитуды

поля и мощности некогерентной составляющей отраженного сигнала. Соотношения, полученные для случая малых высот неровностей поверхности, показывают их отличия от известных результатов. Получены функциональные зависимости интенсивности флуктуаций комплексной амплитуды поля и мощности некогерентной составляющей от электрических параметров отражающей поверхности, от величины пространственного разнесения передающей и приемной антенн, от длины волн и длины гребней морских волн, от ширины диаграммы направленности антенны (ДНА) и от величины наклонов поверхности. Пространственное разнесение передающей и приемной антенн снижает величину мощности некогерентной составляющей. Влияние разнесения ослабевает по мере расширения ДНА и увеличения высоты полета. По мере увеличения длины морских волн и длины гребней морских волн степень их влияния на величину мощности некогерентной составляющей ослабевает. Ослабевает она также по мере расширения ширины ДНА и с уменьшением длины радиоволны. Показано, что в декаметровом диапазоне радиоволн, учет наклонов поверхности приводит к изменению интенсивности флуктуаций отраженного сигнала на единицы процентов лишь при длинах морских волн, приближающихся по величине к длине радиоволны.

Интенсивность флуктуаций; дифракция волн; морская поверхность; модель рассеяния сигнала; длина волны, длина гребня морской волны.

V.T. Lobach, A.N. Bakumenko

INTENSITY OF REFLECTED SIGNAL VOLTAGE FLUCTUATIONS AT SMALL IRREGULARITIES OF THE REFLECTING SEA SURFACE

The work is devoted to the study of reflections of electromagnetic fields from images corresponding to the limitations of the Kirchhoff method. An analysis of wave work known in the field of diffraction allows us to conclude that solutions to problems of diffraction of wave characteristics by uneven surfaces are reduced to one degree or another when deriving simplifying hypotheses. Among the main simplifications are: limitation of radiation areas and, as a theory, fixation of multipliers of integrated expressions, refusal to take into account the variability of local indicators of the Fresnel reflection coefficient, solution of a single-position problem of wave diffraction in conditions of combining points and reception, isotropic nature of the spatial structure of the reflecting surface. The work solves the problem of estimating the range of voltage fluctuations of a radar signal reflecting a small-scale rough sea surface, without accepting the main simplifying hypotheses. Based on the general solution for the scattering fields of the main polarizations obtained within the Kirchhoff method, analytical solutions for the intensity of fluctuations of the complex amplitude of the field and the power of the incoherent component of the reflected signal are analyzed. The relations obtained for the case of small heights of surface irregularities show their differences from the known results. Functional dependences of the intensity of fluctuations of the complex amplitude of the field and the power of the incoherent component on the electrical parameters of the reflecting surface, on the magnitude of the spatial separation of the transmitting and receiving antennas, on the wavelength and length of sea wave crests, on the width of the antenna radiation pattern (APP) and on the magnitude of the surface inclinations were obtained. Spatial separation of the transmitting and receiving antennas reduces the amount of power of the incoherent component. The effect of diversity weakens as the beam expands and the flight altitude increases. As the length of sea waves and the length of sea wave crests increase, the degree of their influence on the power of the incoherent component weakens. It also weakens as the width of the bottom expands and with a decrease in the radio wavelength. It is shown that in the decimeter range of radio waves, taking into account the slopes of the surface leads to a change in the intensity of fluctuations of the reflected signal by a few percent only at sea wavelengths approaching the radio wave length.

Fluctuation intensity; diffraction wave; sea surface; signal scattering model; wavelength; the length of the crest of a sea wave.

Введение. При решении задач обнаружения, распознавания и селекции объектов на фоне подстилающей морской поверхности, а также при радиолокации самой морской поверхности, необходимо знание статистических характеристик радиосигналов, отраженных этой поверхностью. Исследование подобных характеристик должно проводиться в неразрывной связи с физической природой отражения электромагнитных волн и с учетом механизмов формирования отражающей водной поверхности.

За последние десятилетия достигнут значительный прогресс в разработке теоретических принципов и аппаратуры для дистанционного (неконтактного) исследования характеристик земной и водной поверхностей. В общей проблеме исследования Мирового океана важное место занимают задачи, связанные с созданием методов и технических средств неконтактного определения параметров морского волнения. Неуклонное стремление к повышению безопасности полетов гидросамолетов привело к формированию требований об обязательном инструментальном определении и регистрации на борту всех навигационных параметров, в том числе специфической для такого типа самолетов информации о параметрах водной поверхности.

Радиолокационные способы измерения параметров морского волнения с борта летательного аппарата, эффективность которых практически не зависит от метеорологических условий, имеют несомненные преимущества и позволяют проводить оперативные измерения на больших акваториях океана.

Постановка задачи. Несмотря на то, что вопросам исследования характеристик радиосигналов, отраженных от статистически неровной поверхности, и радиолокационным методам измерения параметров морской поверхности посвящено значительное число работ, вряд ли можно считать завершенными исследования в этой области. Радиолокационные методы измерения параметров морского волнения должны базироваться на теории рассеяния радиоволн на статистически неровной (морской) поверхности. Значительный вклад в развитие этой теории внесли советские учёные [1–17], зарубежные исследователи [23–27] и др.

Систематизация и анализ известных в области дифракции волн работ [1–6] позволяет сделать вывод о том, что наиболее разработанными теоретическими методами решения задач дифракции волн статистически неровными поверхностями являются методы Кирхгофа и малых возмущений. Известен целый ряд работ, посвященных исследованиям отражений электромагнитных полей от поверхностей, удовлетворяющих ограничениям этих методов [4, 1]. Однако постановка задачи в известных работах в той или иной мере упрощается принятием одной или нескольких упрощающих гипотез. Среди основных упрощений следует назвать: ограничение площадок облучения и, как следствие, фиксация амплитудных множителей интегрируемых выражений, отказ от учета изменчивости локальных значений коэффициента отражения Френеля, решение однопозиционной задачи дифракции волн в условиях совмещения точек излучения и приема, изотропный характер пространственной структуры отражающей поверхности. В связи с этим, представляется целесообразным решение задачи дифракции электромагнитных волн взволнованной морской поверхностью, в условиях ограничения перечисленных упрощающих гипотез.

В общем случае стохастический характер полей рассеяния функционально определен статистическими неоднородностями пространственно-временной структуры геометрической формы $z=h(x,y)$ и комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon(x,y)$ отражающей поверхности. В силу независимости случайных

величин h и ε анализ статистических характеристик полей как функций пространственно-временных неоднородностей могут проводиться раздельно. Практически, в большинстве случаев, размеры разрешаемого (облучаемого) участка поверхности значительно превышают радиус корреляции поверхности, и число локальных участков когерентного отражения может быть весьма велико. Результат же некогерентного сложения этих "локальных" случайных полей, в силу центральной предельной теоремы теории вероятности может быть описан нормальным законом распределения плотности вероятности. Таким образом, в статистическом смысле исчерпывающими статистическими характеристиками отраженного поля являются среднее поле и моменты второго порядка.

Наряду со средним значением комплексной амплитуды поля и связанной с ним мощностью регулярной составляющей сигнала на входе приемной антенны [19], значительный интерес представляет второй центральный момент амплитуды поля и мощность флуктуирующей составляющей сигнала.

Описание модели рассеяния сигнала. Пусть из точки $A(0,0,z_0)$ (рис. 1.) поверхность S , уравнение которой $z = h(x,y)$, облучается электромагнитной волной. Плоскость $z=0$ является средней для поверхности S , $z_0 \gg h$. Направление на элементарную площадку поверхности с точкой $M(x,y,h)$ определяется углами α , β . Диаграмма направленности излучающей антенны аппроксимируется функцией $G_1(\alpha, \beta)$. Рассматриваемая область ограничена неровной поверхностью S и полусферой достаточно большого радиуса, расположенной в полупространстве $z > 0$. На поверхности S имеется разрешаемая площадка S_0 , определяемая диаграммой направленности антенны $G_1(\alpha, \beta)$ и расстоянием до источника излучения R_1 . Будем предполагать, что на всей замкнутой поверхности, поле отлично от 0 только на площадке S_0 . Для расчета поля на поверхности S_0 , следуя работам [2, 3] и другим, будем предполагать, что рассеивающая поверхность S_0 гладкая в каждой ее точке. Поле можно представить в виде падающего поля и поля отраженного от плоскости, касательной к поверхности в данной ее точке. Значение напряженности поля отраженной волны будем находить по законам зеркального отражения, что допустимо для таких неровностей, радиус кривизны которых значительно больше длины облучающей волны, а затенение одних элементов поверхности другими отсутствует. Перечисленные требования имеют место при выполнении условий

$$4\pi r_x \cos \varphi \gg \lambda; 4\pi r_y \cos \varphi \gg \lambda; \operatorname{tg} \eta_x < 0,2; \operatorname{tg} \eta_y < 0,2,$$

где r_x и r_y – локальные радиусы кривизны поверхности, а η_x и η_y – углы наклона поверхности в направлении координатных осей Ox и Oy ; φ – угол между направлением облучения и нормалью n^0 к поверхности $h(x,y)$ в точке M .

Определим интенсивность флуктуаций (второй момент) комплексной амплитуды напряжения на выходе приемной антенны основной поляризации, пользуясь результатами работы [19].

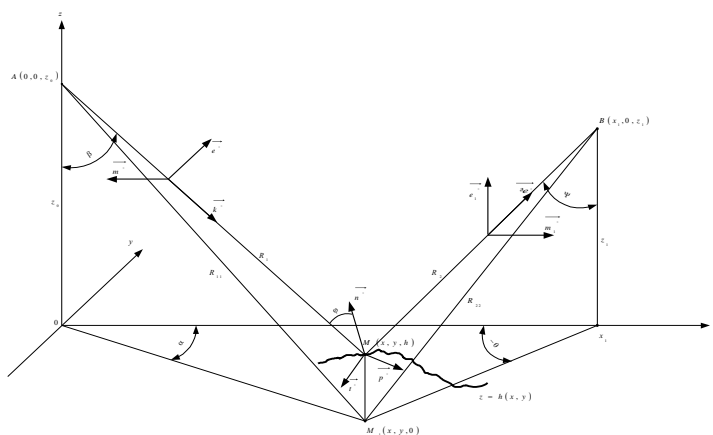


Рис. 1. Геометрия радиолокационного зондирования отражающей

Амплитуда напряжения на выходе приемной антенны связана с амплитудой напряженности электрического поля соотношением [2]

$$\dot{U} = \dot{E} h_q G_2(\psi, \theta),$$

где

$$\dot{E} = \frac{ikQ_1}{4\pi z_0 z_1 D} \iint G_1(\alpha, \beta) \cos \beta \cos \psi \exp \left\{ ik \left[h(x, y) (\cos \beta + \cos \psi) - (R_{11} + R_{22}) \right] \right\} \left(A + D \frac{\partial h}{\partial x} + P \frac{\partial h}{\partial y} \right) dx dy.$$

$G_2(\psi, \theta)$ – диаграмма направленности приемной антенны;

$$h_q = \sqrt{\frac{A_{эф} R_{np}}{120\pi}} - \text{действующая высота приемной антенны. } A_{эф} - \text{эффективная}$$

площадь антенны; R_{np} – активное сопротивление приемной антенны.

Здесь при горизонтальной поляризации излучения [19]

$$A_r = \frac{i}{2} \left(\frac{\sin 2\beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} c_2 - \frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}} \cos \beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} b_1 - \frac{2 \cos^2 \beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} a_2 \right);$$

$$\begin{aligned} \frac{D_r}{P_r} = & +i0,5 \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \left[\frac{\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin 2\beta}{(\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}})^2} b_1 - \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin 2\beta}{(\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}})^2} a_2 - \frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin \beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} b_1 - \frac{\sin 2\beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} a_2 + \right. \\ & \left. + \frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin^2 \beta}{(\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}})^2} c_2 - \frac{2 \cos^2 \beta}{\sqrt{\dot{\epsilon}} + \cos \beta} c_2 \right] + i0,5 \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \left[\frac{2(1-\dot{\epsilon}) \sin \beta}{\dot{\epsilon} \sqrt{\dot{\epsilon}}} (a_1 + b_2) - \frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}} \cos \beta}{1 + \cos \beta \sqrt{\dot{\epsilon}}} c_1 \right]; \end{aligned}$$

При вертикальной поляризации

$$A_b = \frac{i}{2} \left(-\frac{b_1 2\sqrt{\dot{\epsilon}} \cos \beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} - \frac{a_2 2 \cos^2 \beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} + \frac{c_1 \sqrt{\dot{\epsilon}} \sin 2\beta}{1 + \cos \beta \sqrt{\dot{\epsilon}}} - \frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin^2 \beta (\cos \beta - \sqrt{\dot{\epsilon}})}{(\dot{\epsilon} - 1) (\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}})} (b_1 + a_2) \right);$$

$$\frac{D_b}{P_b} = +i \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \left[\frac{b_1 \sqrt{\dot{\epsilon}} \sin 2\beta}{(\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}})^2} - \frac{a_2 \sqrt{\dot{\epsilon}} \sin 2\beta}{(\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}})^2} - \frac{b_1 2\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin \beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} - \frac{a_2 \sin 2\beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{c_1 2\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin^2 \beta}{(1 + \sqrt{\dot{\epsilon}} \cos \beta)^2} - \frac{c_1 2\sqrt{\dot{\epsilon}} \cos^2 \beta}{1 + \sqrt{\dot{\epsilon}} \cos \beta} + \\
 & \left. + \frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin 2\beta (\cos^2 \beta - \dot{\epsilon}) - 4\dot{\epsilon} \sin^3 \beta}{(\dot{\epsilon} - 1)(\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}})^2} (b_1 + a_2) \right] 0,5 \\
 & + i0,5 \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \left[\frac{2 \cos \beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} c_2 - \frac{2(1 - \dot{\epsilon}) \sin \beta}{\dot{\epsilon} \sqrt{\dot{\epsilon}}} (a_1 + b_2) \right]; \\
 & a_1 = -\cos \psi \sin(\theta - \alpha); \quad b_1 = \sin \psi \sin \beta - \cos \psi \cos \beta \cos(\theta - \alpha); \\
 & c_1 = \sin \psi \cos \beta + \cos \psi \sin \beta \cos(\theta - \alpha); \quad a_2 = bc_1 - b_1 c = \cos(\theta - \alpha); \\
 & b_2 = a_1 c - ac_1 = \cos \beta \sin(\theta - \alpha); \quad c_2 = ab_1 - a_1 b = \sin \beta \sin(\theta - \alpha). \\
 & M_{2оп} [\dot{U}_{оп} (U'_{оп})^*]^2 = \left(\frac{kQ}{2\pi Z_0^2} \right) \iint_D G^2(x, y) \cos^2 \beta dx dy \iint_D G^2(x', y') \cos^2 \beta' \times \\
 & \times \exp[ik(R'_{11} - R_{11}) + ik(R'_{22} - R_{22})] dx' dy' \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-2ik(h' \cos \beta' - h \cos \beta)] \times \\
 & \times \left(\dot{A} + \dot{D} \frac{\partial h}{\partial x} + \dot{P} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \left(\dot{A}^* + \dot{D}^* \frac{\partial h'}{\partial x} + \dot{P}^* \frac{\partial h'}{\partial y} \right) W_6 \left(h, h', \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h'}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h'}{\partial y} \right) dh dh' \times \\
 & \times d \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) d \left(\frac{\partial h'}{\partial x} \right) d \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) d \left(\frac{\partial h'}{\partial y} \right), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $Q_1 = \sqrt{60 P_a G_o}$; P_a – мощность электромагнитных колебаний, поступающих в передающую антенну; G_o – коэффициент усиления передающей антенны.

Поскольку распределение вероятностей ординат и наклонов поверхности $h(x, y, t)$ подчиняются гауссовой статистике, независимыми оказываются $h(x, y, t)$ и $\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}$. Тогда многомерный закон распределения вероятностей W_6 записывается в

виде произведения двумерных гауссовых законов с нулевыми средними, дисперсиями $\sigma_h^2, \sigma_{\gamma_x}^2, \sigma_{\gamma_y}^2$ и корреляционными функциями $\rho_h, \rho_{\gamma_x}, \rho_{\gamma_y}$. Учитывая сказанное, равенство (1) принимает вид

$$\begin{aligned}
 & M_{2оп} [\dot{U}_{оп} (U'_{оп})^*]^2 = \left(\frac{kQ}{2\pi Z_0^2} \right)^2 \iint_D G^2(x, y) \cos^2 \beta dx dy \iint_D G^2(x', y') \cos^2 \beta' \times \\
 & \times \exp[ik(R'_{11} - R_{11}) + ik(R'_{22} - R_{22}) - 2(k\sigma_h)^2 (\cos^2 \beta + \cos^2 \beta' - 2\rho_h \cos \beta \cos \beta')] \times \\
 & \times \left[|\dot{A}|^2 + |\dot{D}|^2 \sigma_{\gamma_x}^2 \rho_{\gamma_y} \right] dx' dy'.
 \end{aligned}$$

Следуя методике [18], и учитывая среднее значение комплексной амплитуды поля [19] интенсивность флуктуаций (второй момент) комплексной амплитуды напряжения на выходе приемной антенны основной поляризации запишем в виде

$$\begin{aligned}
M_{2\text{II}}^0 = M_2 \left[\dot{U}_{\text{II}} \left(\dot{U}'_{\text{II}} \right)^* \right] - M \left[\dot{U}_{\text{II}} \right] M^* \left[\dot{U}'_{\text{II}} \right] = & \left(\frac{kQ}{2\pi z_0^2} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G^2(x, y) G^2(x', y') \times \\
& \times \cos^2 \beta \cos^2 \beta' \exp \left[ik(R'_{11} - R_{11}) + ik(R'_{22} - R_{22}) \right] \left\{ \left| \dot{A} \right|^2 \exp \left[-2k^2 \sigma_h^2 (\cos^2 \beta + \cos^2 \beta' - \right. \right. \\
& \left. \left. - 2\rho_h \cos \beta \cos \beta') \right] - \left| \dot{A} \right|^2 \exp \left(-2k^2 \sigma_h^2 \cos^2 \beta - 2k^2 \sigma_h^2 \cos^2 \beta' \right) + \left[\left| \dot{D} \right|^2 \sigma_{\rho_x}^2 \rho_{\rho_x} + \left| \dot{P} \right|^2 \sigma_{\rho_y}^2 \rho_{\rho_y} \right] \times \right. \\
& \left. \times \exp \left[-2k^2 \sigma_h^2 (\cos^2 \beta + \cos^2 \beta' - 1\rho_h \cos \beta \cos \beta') \right] \right\} dx dy dx' dy'. \quad (2)
\end{aligned}$$

Дальнейшее решение равенства (2) требует принятия упрощающих предположений относительно параметра $\sigma_s^2 = (2k\sigma_h)^2 \cos \beta \cos \beta'$.

Интенсивность флуктуаций напряжения сигнала при малых неровностях отражающей поверхности. Полагая $\sigma_s^2 \ll 1$, ограничимся в (2) двумя членами разложения экспоненты по параметру σ_s :

$$\begin{aligned}
& \exp \left[-2k^2 \sigma_h^2 (\cos^2 \beta + \cos^2 \beta') + (2k\sigma_h)^2 \rho_h \cos \beta \cos \beta' \right] - \exp \left[-2k^2 \sigma_h^2 (\cos^2 \beta + \cos^2 \beta') \right] \cong \\
& \cong \exp \left[(2k\sigma_h)^2 \rho_h \cos \beta \cos \beta' \right] \exp \left[-2k^2 \sigma_h^2 (\cos^2 \beta + \cos^2 \beta') \right].
\end{aligned}$$

Учитывая также, что радиус корреляции поверхности l_h значительно меньше высоты z_0 , везде в (2) кроме $[(R'_{11} - R_{11}) + (R'_{22} - R_{22})]$ совместим точки $\{x', y'\}$ и $\{x, y\}$.

$$\begin{aligned}
M_{2\text{OII}}^0 = & \left(\frac{kQ}{2\pi z_0^2} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_4(x, y) \cos^4 \beta \exp \left[ik(R'_{11} - R_{11}) + ik(R'_{22} - R_{22}) \right] \times \\
& \times \left\{ \left| \dot{A} \right|^2 \rho_h (2k\sigma_h \cos \beta)^2 \exp \left(-4k^2 \sigma_h^2 \cos^2 \beta \right) + \left[\left| \dot{D} \right|^2 \sigma_{\rho_x}^2 \rho_{\rho_x} + \left| \dot{P} \right|^2 \sigma_{\rho_y}^2 \rho_{\rho_y} \right] \times \right. \\
& \left. \times \left[1 - (2k\sigma_h \cos \beta)^2 (1 + \rho_h) \right] \right\} dx dy dx' dy'.
\end{aligned}$$

Окончательно, учитывая малость σ_s , упростим к виду

$$\begin{aligned}
M_{2\text{OII}}^0 = & \left(\frac{kQ}{2\pi z_0^2} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_4(x, y) \cos^4 \beta \exp \left[ik(R'_{11} - R_{11}) + ik(R'_{22} - R_{22}) \right] \left[\left| \dot{A} \right|^2 \times \right. \\
& \left. \times \rho_h (2k\sigma_h \cos \beta)^2 \exp \left(-4k^2 \sigma_h^2 \cos^2 \beta \right) + \left[\left| \dot{D} \right|^2 \sigma_{\rho_x}^2 \rho_{\rho_x} + \left| \dot{P} \right|^2 \sigma_{\rho_y}^2 \rho_{\rho_y} \right] \right] dx dy dx' dy'. \quad (3)
\end{aligned}$$

Из геометрии задачи (рис. 2) следует

$$R'_{11} - R_{11} + R'_{22} - R_{22} \approx \frac{(x' - x)(x' + x) + (y' - y)(y' + y)}{z_0} \left(1 + \frac{\Delta z}{2z_0} \right) - \Delta x \frac{x' - x}{z_0} - \Delta y \frac{y' - y}{z_0}.$$

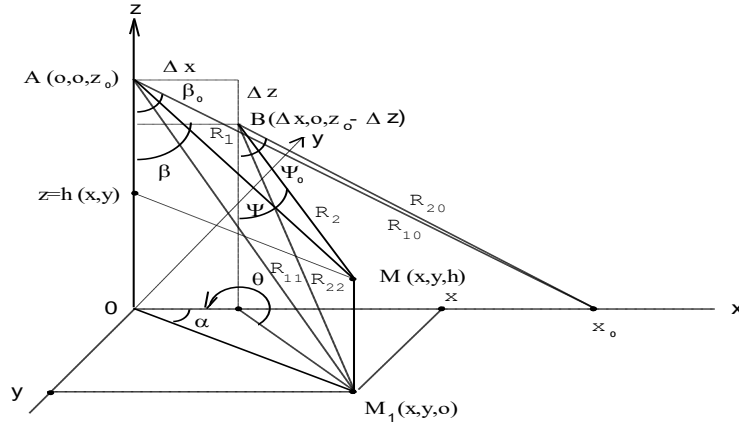


Рис. 2. Геометрия задачи

Положим $x' - x = u$; $y' - y = v$; $dx' - du$; $dy' = dv$, а корреляционные функции аппроксимируем выражениями

$$\rho_h = \exp\left(-\frac{u^2}{l_{hx}^2} - \frac{v^2}{l_{hy}^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{v}{\Lambda_y}\right);$$

$$\rho_{yx} = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{l_{yx}^2}\right); \quad \rho_{yy} = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{l_{yy}^2}\right).$$

Тогда (3) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} M_{20П}^0 &= \left(\frac{kQ}{2\pi z_0^2}\right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y) \cos^4 \beta \left\{ |A|^2 \sigma_s^2 \exp(\sigma_s^2) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} 0,25 \exp\left(d - \frac{u^2}{l_{hx}^2} - \frac{v^2}{l_{hy}^2}\right) \times \right. \\ &\times \left[\exp(ip_x u + ip_y v) + \exp(ip_x u - ip_y v) + \exp(-ip_x u + ip_y v) + \exp(-ip_x u - ip_y v) \right] dudv + \\ &+ |D|^2 \sigma_{yx}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(d - \frac{u^2 + v^2}{l_{yx}^2}\right) dudv + |P|^2 \sigma_{yy}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(d - \frac{u^2 + v^2}{l_{yy}^2}\right) dudv \left. \right\} dx dy, \end{aligned}$$

где

$$p_x = \frac{2\pi}{\Lambda_x}; \quad p_y = \frac{2\pi}{\Lambda_y}; \quad d = \frac{ik}{z_0} \left[(u^2 + v^2) \left(1 + \frac{\Delta z}{2z_0}\right) + u \left(2x - \Delta x + \frac{x\Delta x}{z_0}\right) + v \left(2y - \Delta y + \frac{y\Delta y}{z_0}\right) \right].$$

Определим первое слагаемое последнего равенства, полагая $l_{hx} = l_{hy} = l$:

$$\begin{aligned} M_{21}^0 &= \left(\frac{kQ}{4\pi z_0^2}\right)^2 (2k\sigma_h)^2 \exp(-4k^2\sigma_h^2) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G^4(x, y) |A|^2 \cos^4 \beta \exp(4k^2\sigma_h^2 \sin^2 \beta) \times \\ &\times \exp \left[\frac{i2ku}{z_0} \left(1 + \frac{\Delta z}{2z_0}\right) x + \frac{i2kv}{z_0} \left(1 + \frac{\Delta z}{2z_0}\right) y \right] dx dy \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(u^2 + v^2) \left(\frac{ik}{z_0} + \frac{ik\Delta z}{2z_0^2} - \frac{1}{l_h^2} \right) \times \end{aligned}$$

$$\times \exp\left(-\frac{ik\Delta x}{z_0}u - \frac{ik\Delta y}{z_0}v\right) \left[\exp(ip_x u + ip_y v) + \exp(ip_x u - ip_y v) + \exp(-ip_x u + ip_y v) + \exp(-ip_x u - ip_y v) \right] dudv \quad (4)$$

Преобразуем множитель $|\dot{A}|^2$:

$$\begin{aligned} |\dot{A}|^2 &= \left[\frac{1}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}} \cos^2 \beta - \cos \beta \right] \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}} \right)^* \cos^2 \beta - \cos \beta \right] = \\ &= \left[\cos^2 \beta - \operatorname{Re} \left(\frac{2}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}} \right) \cos^3 \beta + \left| \frac{1}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}} \right|^2 \cos^2 \beta \right]. \end{aligned}$$

Решим внутренний интеграл равенства (4) учитывая малость параметра $\left| \frac{1}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}} \right|^2$ и принимая, при $0 < \beta < 40^\circ$, аппроксимацию $\cos^2 \beta = \exp\left(-0,7 \frac{x^2 + y^2}{z_0^2}\right)$, а также аппроксимацию диаграммы направленности вида

$$\begin{aligned} G(\alpha, \beta) = G(x, y) &\approx \exp\left\{-1,38 \left[\frac{(x-x_0)^2 \cos^2 \beta_0 + y^2}{\theta_a^2 z_0^2} \right]\right\}, \\ \dot{E} &= \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi r \exp\left[-f_1 r^2 + ir \frac{2k\rho}{z_0} \left(1 + \frac{\Delta z}{2z_0}\right) \cos(\varphi - \alpha)\right] dr d\varphi - \\ &- \alpha_0 \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi r \exp\left[-f_2 r^2 + ir \frac{2k\rho}{z_0} \left(1 + \frac{\Delta z}{2z_0}\right) \cos(\varphi - \alpha)\right] dr d\varphi, \end{aligned}$$

где

$$f_1 = \frac{5,5 - 2,8k^2 \sigma_h^2 \theta_a^2 + 2,4\theta_a^2}{Z_0^2 \theta_a^2}; \quad f_2 = f_1 + \frac{0,4\theta_a^2}{Z_0^2 \theta_a^2}; \quad \alpha_0 = \operatorname{Re} \left(\frac{2}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}} \right);$$

$$\rho^2 = u^2 + v^2; u = \rho \cos \alpha; v = \rho \sin \alpha; r^2 = x^2 + y^2; x = r \cos \varphi; y = r \sin \varphi; dx dy = r dr d\varphi.$$

Пользуясь табличными интегралами [20, 21], получим

$$\begin{aligned} H &= \frac{\pi}{f_1} \exp\left[-\frac{k^2}{z_0^2 f_1} \left(1 + \frac{\Delta z}{2z_0}\right)^2 (u^2 + v^2)\right] - \frac{\alpha_0 \pi}{f_2} \exp\left[-\frac{k^2}{z_0^2 f_1} \left(1 + \frac{\Delta z}{2z_0}\right)^2 (u^2 + v^2)\right]; \\ M_{21}^0 &= \frac{\zeta_1}{f_1} \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi \eta \left[\frac{\zeta_1}{f_1} \exp(-\delta_1 \eta^2) - \frac{\alpha_0 \zeta_1}{f_2} \exp(-\delta_2 \eta^2) \right] \{ \exp[-ir_{11} \eta \cos(\gamma - \gamma_{11})] + \\ &+ \exp[-ir_{12} \eta \cos(\gamma - \gamma_{12})] + \exp[-ir_{21} \eta \cos(\gamma - \gamma_{21})] + \exp[-ir_{22} \eta \cos(\gamma - \gamma_{22})] \} d\eta d\gamma, \quad (5) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \eta^2 &= u^2 + v^2; \quad u = \eta \cos \gamma; \quad v = \eta \sin \gamma; \quad dudv = \eta d\eta dy; \quad r_{kn} = a_k^2 + b_k^2; \\ a_k &= r_{kn} \cos \gamma_{kn}; \quad b_k = r_{kn} \sin \gamma_{kn}; \quad \operatorname{tg} \gamma_{kn} = \frac{b_k}{a_k}; \quad k=1,2; \quad n=1,2; \\ a_1 &= \frac{k\Delta x}{z_0} - p_x; \quad a_2 = \frac{k\Delta x}{z_0} + p_x; \quad b_1 = \frac{k\Delta y}{z_0} - p_y; \quad b_2 = \frac{k\Delta y}{z_0} + p_y; \\ \delta_{1,2} &= \frac{k^2}{z_0^2 f_{1,2}} + \frac{1}{l_h^2} - i \left(\frac{k}{z_0} + \frac{k\Delta z}{2z_0^2} \right) \cong \frac{k^2}{z_0^2 f_{1,2}}; \quad \varsigma_1 = \left(\frac{kQ}{2\pi z_0^2} \right)^2 \frac{\pi}{4} (2k\sigma_h)^2 (-4k^2\sigma_h^2). \end{aligned}$$

Используя табличные интегралы, выражение (5) преобразуем к виду

$$\begin{aligned} M_{21}^0 &= \frac{\varsigma_1 \pi}{\delta_{1,2} f_1} \sum_{k=1}^2 \sum_{n=1}^2 \exp \left\{ - \frac{(5,5+2,4\theta_a^2) [k^2 (\Delta x^2 + \Delta y^2) + z_0^2 (p_x^2 + p_y^2)]}{4z_0^2 k^2 \theta_a^2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{[(-1)^k \Delta x p_x + (-1)^n \Delta y p_y] (5,5+2,4\theta_a^2)}{2z_0 k \theta_a^2} \right\} - \frac{\pi \alpha_0}{\delta_{2,2} f_2} \sum_{k=1}^2 \sum_{n=1}^2 \varsigma_1 \times \\ &\times \exp \left\{ - \frac{(5,5+2,8\theta_a^2) [k^2 (\Delta x^2 + \Delta y^2) + z_0^2 (p_x^2 + p_y^2)]}{4z_0^2 k^2 \theta_a^2} - \frac{[(-1)^k \Delta x p_x + (-1)^n \Delta y p_y] (5,5+2,8\theta_a^2)}{2z_0 k \theta_a^2} \right\}. \end{aligned}$$

При широкой диаграмме направленности $\theta_a \geq 1,6$ показатели степени экспонент малы, что позволяет при разложении их в ряд ограничиться первыми двумя членами

$$\begin{aligned} M_{21}^0 &= \left(\frac{Q}{2z_0} \right)^2 (2k\sigma_h)^2 \exp \left[- \frac{(\Delta x^2 + \Delta y^2) (5,5+2,4\theta_a^2)}{4z_0^2 \theta_a^2} - \frac{(p_x^2 + p_y^2) (5,5+2,4\theta_a^2)}{4k^2 \theta_a^2} \right] \times \\ &\times \exp(-4k^2\sigma_h^2) \left\{ 1 - \alpha_0 \exp \left[- \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{10z_0^2} - \frac{p_x^2 + p_y^2}{10k^2} \right] \right\}. \end{aligned}$$

Очевидно, что в декаметровом диапазоне радиоволн

$$\exp \left(- \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{10z_0^2} - \frac{p_x^2 + p_y^2}{10k^2} \right) = 1, \text{ тогда окончательно запишем}$$

$$\begin{aligned} M_{21}^0 &= \left(\frac{Q}{2z_0} \right)^2 (2k\sigma_h)^2 \exp(-4k^2\sigma_h^2) \left[1 - \operatorname{Re} \left(\frac{2}{\sqrt{\epsilon}} \right) \right] \times \\ &\times \exp \left\{ - \frac{(5,5+2,4\theta_a^2) [k^2 (\Delta x^2 + \Delta y^2) + z_0^2 (p_x^2 + p_y^2)]}{4k^2 z_0^2 \theta_a^2} \right\}. \end{aligned}$$

Определим мощность флуктуирующей составляющей сигнала на выходе приемной антенны по формуле

$$P_{H1} = \frac{M_{21}^0}{2R_{IP}} = \frac{P_a G_0^2 \lambda^2}{64\pi^2 z_0^2} (2k\sigma_h)^2 \exp(-4k^2\sigma_h^2) \left[1 - \operatorname{Re}\left(\frac{2}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}}\right) \right] \times \\ \times \exp\left[-\frac{(\Delta x^2 + \Delta y^2)(5,5 + 2,4\theta_a^2)}{4z_0^2\theta_a^2} - \frac{(p_x^2 + p_y^2)(5,5 + 2,4\theta_a^2)}{4k^2\theta_a^2} \right]. \quad (6)$$

Полученное соотношение отличается от известных [15] наличием функциональной зависимости P_H от электрических параметров отражающей поверхности $\dot{\varepsilon}$ и от величины пространственного разнесения передающей и приемной антенн $(\Delta x^2 + \Delta y^2) = \Delta r^2$. Отметим, что в декаметровом диапазоне радиоволн в диэлектрической проницаемости $\dot{\varepsilon} = \varepsilon - i\varepsilon'$ морской поверхности преобладает мнимая составляющая, а модуль составляет величину $|\dot{\varepsilon}| = (60 \div 250)\lambda$. В таких условиях влиянием множителя $\left[1 - \operatorname{Re}\left(\frac{2}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}}\right) \right]$ можно пренебречь, но в случае отражения от земной поверхности это недопустимо, поскольку указанный множитель меньше единицы. Пространственное разнесение передающей и приемной антенн снижает величину P_H . Влияние разнесения Δr ослабевает по мере расширения диаграммы направленности θ_a и увеличения высоты полета z_0 . Уменьшение P_H на 5% имеет место при $\theta_a = 1,6$, $\Delta r/z_0 = 0,2$ и пропорционально возрастает по мере роста $\Delta r/z_0$. Следует также учитывать влияние на величину P_H отношений λ/Λ_x и λ/Λ_y . По мере увеличения длины морских волн и длины гребней морских волн степень их влияния на величину P_H ослабевает. Ослабевает она также по мере расширения ширины диаграммы направленности антенны θ_a и с уменьшением длины радиоволны λ . Оценим степень влияния λ/Λ_x на величину P_H , принимая $\Lambda_y = 2,5\Lambda_x$. График зависимости ошибки смещения ΔP_H от λ/Λ_x при различных значениях ширины диаграммы направленности антенны приведен на рис. 3, из которого следует, что по мере сближения длин поверхностной и радиоволн смещенность оценки P_H резко возрастает.

При $\theta_a = 2,5$; $\lambda = 7,5 M$; $\Lambda_y = 3\Lambda_x$ максимальная погрешность ΔP_H в интервале длин волн $15 < \Lambda_x < 90 M$ составляет $\pm 5\%$ (относительно точки, соответствующей $\Lambda_x = 22 M$).

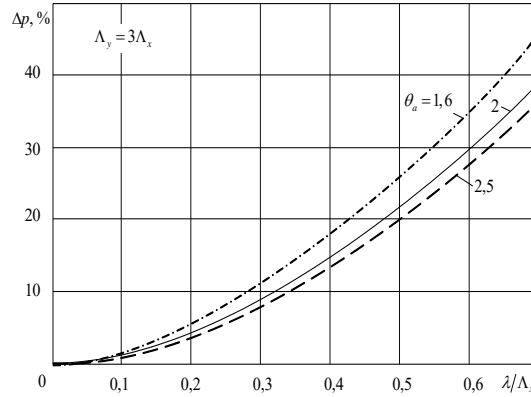


Рис. 3. График зависимости ошибки смещения при различных значениях ширины диаграммы направленности антенны

Для оценки влияния наклонов поверхности на интенсивность амплитуды поля вычислим второе и третье слагаемые в выражении (4).

$$M_{22}^0 = \left(\frac{kQ}{2\pi z_0^2} \right)^2 \int \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{D}|^2 \sigma_{yx}^2 G^4(x, y) \cos^4 \beta dx dy \int \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(d - \frac{u^2 - v^2}{l_{yx}^2} \right) dudv;$$

$$M_{23}^0 = \left(\frac{kQ}{2\pi z_0^2} \right)^2 \int \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{P}|^2 \sigma_{yx}^2 G^4(x, y) \cos^4 \beta dx dy \int \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(d - \frac{u^2 + v^2}{l_{yx}^2} \right) dudv$$

где

$$\begin{aligned} \dot{D} = \dot{D}_{оп} = \dot{D}_r = \dot{D}_B = i \frac{\cos \alpha}{2} \left[\frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin 2\beta}{(\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}})^2} - \frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin \beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} + \frac{\sin 2\beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} \right] \approx \\ \approx i \cos \alpha \sin \beta \left(\frac{3 \cos \beta}{\sqrt{\dot{\epsilon}}} - 1 \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{P} = \dot{P}_{оп} = \dot{P}_r = \dot{P}_B = -i \frac{\sin \alpha}{2} \left[\frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin 2\beta}{(\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}})^2} - \frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}} \sin \beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} + \frac{\sin 2\beta}{\cos \beta + \sqrt{\dot{\epsilon}}} \right] \approx \\ \approx -i \sin \alpha \sin \beta \left(\frac{3 \cos \beta}{\sqrt{\dot{\epsilon}}} - 1 \right); \end{aligned}$$

$$|\dot{D}|^2 = \cos^2 \alpha \sin^2 \beta \left(1 - \frac{6}{\sqrt{|\dot{\epsilon}|}} \cos \beta \cos \frac{\delta}{2} + \frac{9 \cos^2 \beta}{|\dot{\epsilon}|} \right);$$

$$|\dot{P}|^2 = \sin^2 \alpha \cos^2 \beta \left(1 - \frac{6}{\sqrt{|\dot{\epsilon}|}} \cos \beta \cos \frac{\delta}{2} + \frac{9 \cos^2 \beta}{|\dot{\epsilon}|} \right);$$

δ – аргумент комплексной диэлектрической проницаемости $\dot{\epsilon}$.

В декаметровом диапазоне радиоволн $\delta \cong \frac{\pi}{2}$; $|\dot{\epsilon}| > 600$, поэтому

$$|\dot{D}|^2 = \cos^2 \alpha \sin^2 \beta; \quad |\dot{P}|^2 = \cos^2 \alpha \sin^2 \beta.$$

Полагая также $\sigma_{yx} = \sigma_{xy} = \sigma_y$ и $l_{yx} = l_{xy} = l_y$, получим

$$\begin{aligned} M_{22}^0 + M_{23}^0 &= \left(\frac{kQ\sigma_y l_y}{2\sqrt{\pi}z_0^2} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G^4(x, y) \sin^2 \beta \cos^4 \beta \exp \left[-\frac{k^2 l_r^2}{4z_0^2} \times \right. \\ &\quad \left. \times (4x^2 + 4y^2 - 4x\Delta x - 4y\Delta y + \Delta x^2 + \Delta y^2) \right] dx dy. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что $\sigma_y = \frac{2\pi\sigma_h}{\Lambda_x}$; $l_h \approx 0,5\Lambda_x$, полагая $k^2 l_y^2 \gg \frac{5,5}{\theta_a^2} + 1,6$ и используя при $0 < \beta < 50^\circ$ аппроксимацию $\sin^2 \beta \cos^4 \beta \cong 0,8 \frac{x^2 + y^2}{z_0^2} \exp \left(-1,6 \frac{x^2 + y^2}{z_0^2} \right)$,

равенство (7) преобразуем к виду

$$M_{22}^0 + M_{23}^0 \cong \left(\frac{Q\lambda^2}{2z_0\Lambda_x^2} \right)^2 (2k\sigma_h)^2 0,02 \exp \left[\frac{\pi^2 \Lambda_x^2}{z_0^2 \lambda^2} (\Delta x^2 + \Delta y^2) \right]. \quad (8)$$

Из равенства (8) следует, что в декаметровом диапазоне радиоволн, для которого справедливо рассматриваемое приближение $\left(\sigma_h < \frac{\lambda}{12} \right)$, влиянием наклонов

поверхности на интенсивность флуктуаций отраженного сигнала можно пренебречь, так как доля слагаемых $M_{22}^0 + M_{23}^0$ в общей сумме M_2^0 составляет единицы процентов лишь при длинах морских волн, приближающихся по величине к длине радиоволны. При $\frac{\lambda}{\Lambda_x} < 0,7$ вклад наклонов поверхности в интенсивность отра-

женного сигнала составляет доли процента. По мере увеличения пространственного разнесения Δr влияние наклонов поверхности усиливается, не являясь все же преобладающим.

Мощность флуктуирующей (некогерентной) составляющей напряжения на выходе приемной антенны определим как

$$\begin{aligned} P_H &= \frac{M_2^0}{2R_{np}} = \frac{M_{21}^0 + M_{22}^0 + M_{23}^0}{2R_{np}} = \frac{P_a G_0^2 \lambda^2}{64\pi^2 z_0^2} (2k\sigma_h)^2 \left\{ \exp(-4k^2 \sigma_h^2) \left[1 - \operatorname{Re} \left(\frac{2}{\sqrt{\dot{\epsilon}}} \right) \right] \times \right. \\ &\quad \left. \times \exp \left[-\frac{(\Delta x^2 - \Delta y^2)(5,5 + 2,4\theta_a^2)}{4z_0^2 \theta_a^2} - \frac{(p_x^2 - p_y^2)}{4z_0^2 \theta_a^2} \right] + 0,02 \left(\frac{\lambda}{\Lambda_x} \right)^4 \exp \left[\frac{\pi^2 \Lambda_x^2}{z_0^2 \lambda^2} (\Delta x^2 + \Delta y^2) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Если $\sigma_h \leq \frac{\lambda}{4}$, то в выражении (2), при разложении экспоненты в ряд по параметру малости σ_h , достаточно учесть три члена ряда

$$\begin{aligned}
 M_{211}^0 &= \left(\frac{kQ}{4\pi z_0} \right)^2 (2k\sigma_h)^2 \exp(-4k^2\sigma_h^2) \iint_{-\infty}^{\infty} G^4(x, y) |A|^2 \cos^4 \beta \exp[-(2k\sigma_h)^2 \frac{x^2 + y^2}{z_0^2} + \\
 &+ \frac{i2k}{z_0} \left(1 + \frac{\Delta z}{2z_0} \right) ux + \frac{i2k}{z_0} \left(1 + \frac{\Delta z}{2z_0} \right) vy \Big] dx dy \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[\frac{ik}{z_0} \left(1 + \frac{\Delta z}{2z_0} \right) (u^2 + v^2) - \frac{(u^2 + v^2)}{l_h^2} \right] \times \\
 &\times \left[\exp(ip_x u + ip_y v) + \exp(ip_x u - ip_y v) + \exp(-ip_x u + ip_y v) + \exp(-ip_x u - ip_y v) \right] \times \\
 &\times \left\{ 1 + \frac{1}{8} (2k\sigma_h)^2 \exp \left(-\frac{u^2 + v^2}{l_0^2} \right) \left[\exp(ip_x u + ip_y v) + \exp(ip_x u - ip_y v) + \exp(-ip_x u + ip_y v) + \right. \right. \\
 &+ \left. \left. \exp(-ip_x u - ip_y v) \right] \right\} \exp \left(-\frac{ik\Delta x}{z_0} u - \frac{ik\Delta y}{z_0} v \right) dudv = M_{21}^0 + \frac{A\pi z_0^2}{k^2} (2k\sigma_h)^2 \frac{3}{2} (1 - \alpha_0) \times \\
 &\times \left[-\frac{(\Delta x^2 + \Delta y^2)(5,5 + 2,4\theta_a^2)}{4z_0^2 \theta_a^2} - \frac{(p_x^2 + p_y^2)(5,5 + 2,4\theta_a^2)}{4k_0^2 \theta_a^2} + 1 \right] \approx \left(\frac{Q}{2z_0} \right)^2 (2k\sigma_h^2) \exp(-4k^2\sigma_h^2) \times \\
 &\times \left[1 - \operatorname{Re} \left(\frac{2}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}} \right) \right] \left[1 + \frac{3}{8} (2k\sigma_h)^2 \right] \exp \left[-\frac{(\Delta x^2 + \Delta y^2)(5,5 + 2,4\theta_a^2)}{4z_0^2 \theta_a^2} - \frac{(p_x^2 + p_y^2)(5,5 + 2,4\theta_a^2)}{4k_0^2 \theta_a^2} \right].
 \end{aligned}$$

Представляя $1 + \frac{3\sigma_h^2}{8}$ как разложение в ряд экспоненты с малым аргументом, окончательно получим

$$\begin{aligned}
 M_{211}^0 &= \left(\frac{Q}{2z_0} \right)^2 (2k\sigma_h)^2 \exp(-2,5k^2\sigma_h^2) \left[1 - \operatorname{Re} \left(\frac{2}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}} \right) \right] \times \\
 &\times \exp \left[-\frac{(\Delta x^2 + \Delta y^2)(5,5 + 2,4\theta_a^2)}{4z_0^2 \theta_a^2} - \frac{(p_x^2 + p_y^2)(5,5 + 2,4\theta_a^2)}{4k_0^2 \theta_a^2} \right]. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Из равенства (10) следует, что интенсивность флуктуаций сигнала при $\sigma_h \leq \lambda/12$ также мало зависит от пространственного разнесения Δr . Увеличение высоты неровностей в этих границах ослабляет значимость множителя $\exp(-4k^2\sigma_h^2)$, снижая постоянный коэффициент в показателе степени с 4 до 2,5, результатом чего становится возрастание интенсивности флуктуаций M_{211}^0 . Дальнейшее увеличение высоты неровностей поверхности σ_h требует иного подхода к решению задачи.

Заключение. В декаметровом диапазоне радиоволн в диэлектрической проницаемости $\dot{\varepsilon} = \varepsilon - i\varepsilon'$ морской поверхности преобладает мнимая составляющая, а модуль составляет величину $|\dot{\varepsilon}| = (60 \div 250)\lambda$. В таких условиях её влиянием можно пренебречь, но в случае отражения от земной поверхности это недопустимо. Пространственное разнесение передающей и приемной антенн снижает величину P_H . Влияние разнесения Δr ослабевает по мере расширения диаграммы на-

правленности θ_a и увеличения высоты полета z_0 . Уменьшение P_H на 5% имеет место при $\theta_a = 1,6$, $\Delta r/z_0 = 0,2$ и пропорционально возрастает по мере роста $\Delta r/z_0$. Следует также учитывать влияние на величину P_H отношений λ/Λ_x и λ/Λ_y .

По мере увеличения длины морских волн и длины гребней морских волн степень их влияния на величину P_H ослабевает. Ослабевает она также по мере расширения ширины диаграммы направленности антенны θ_a и с уменьшением длины радиоволны λ . По мере сближения длин поверхностной и радиоволн смещенность оценки P_H возрастает.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Никольский В.В.* Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1973.
2. *Зубкович С.Г.* Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. – М.: Сов. радио, 1968.
3. *Семенов А.А.* Теория электромагнитных волн. – М.: Изд-во МГУ, 1968.
4. *Бреховских Л.М.* Дифракция волн на неровной поверхности // ЖЭТФ. – 1952. – Вып. 3 (9).
5. *Исакович М.А.* Рассеяние волн от статистически шероховатой поверхности // ЖЭТФ. – 1952. – Вып. 3 (9).
6. Распространение ультракоротких радиоволн / под ред. В.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954.
7. *Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
8. *Жуковский А.П.* Случайное электромагнитное поле и его моменты распределения при отражении волн от протяженной шероховатой поверхности // Известия вузов. Радиофизика. – 1969. – Т. XII, № 10.
9. *Басс Ф.Г., Бочаров В.Г.* К теории рассеяния электромагнитных волн на статистически неровной поверхности // Радиотехника и электроника. – 1958. – Т. 3, № 2. – С. 180-186.
10. *Басс Ф.Г.* Распространение радиоволн над статистически неровной поверхностью // Известия вузов. Радиофизика. – 1961. – Т. 4. – С. 476-483.
11. *Розенберг А.Д., Островский И.Е., Калмыков А.И.* Сдвиг частоты при рассеянии радиоизлучения взволнованной поверхностью моря // Известия вузов. Радиофизика. – 1960. – Т. 9. – С. 234-240.
12. *Фукс И.М.* К теории рассеяния радиоволн на взволнованной поверхности моря // Известия вузов. Радиофизика. – 1966. – Т. 9, № 5. – С. 876-885.
13. *Жуковский А.П., Оноприенко Е.И., Чижов В.И.* Теоретические основы радиовысотометрии. – М.: Советское радио, 1979. – 320 с.
14. *Басс Ф.Г.* К теории комбинационного рассеяния волн на неровной поверхности // Известия вузов. Радиофизика. – 1961. – Т. 4. – С. 521-536.
15. *Гарнакерьян А.А., Сосунов А.С.* Радиолокация морской поверхности. – Ростов-на-Дону: Изд-во. РГУ, 1978. – 140 с.
16. *Альперт Я.Л., Гинзбург В.Л., Фейнберг Е.Л.* Распространение радиоволн. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 884 с.
17. *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. – М.: Наука, 1966. – 404 с.
18. *Лобач В.Т.* Статистические характеристики радиолокационных сигналов, отраженных от морской поверхности. – М.: Радио и связь, 2006. – 250 с.
19. *Лобач В.Т.* Влияние изменчивости локального коэффициента отражения на статистические характеристики отраженного электромагнитного поля в условиях ограниченного пространственного разнесения точек излучения и приема // Антенны. – 2003. – № 6.
20. *Градштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Наука, 1971. – 1108 с.

21. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
22. Загородников А.А. Корреляционная функция флуктуаций амплитуды РЛ сигнала, рассеянного морской поверхностью // Радиотехника и электроника. – 1969. – Т. XIV, № 10.
23. Beckman P., Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rought Surfaces. – Pergamon Press. 1963.
24. Moore R.K., Fung A.K. Radar Determination of wind at sea // Proceedings of the IEEE. – 1979. – Vol. 67, No. 11. – P. 1504-1521.
25. Johnson J.W, Weissman D.E. Two - frequency microwave resonance measurements from an aircraft a quantitative estimate of the directional ocean surface spectrum // Radio Science. – 1984. – Vol. 19, No. 13. – P. 841-854.
26. Keller W.C., Wright J.W. Microwave scattering and the straining of wind generated waves // Radio Science. – 1975.
27. Katz I. Angle Dependence of Radar Terrian Return // I. Res. Nat. Bur. Stand. – 1960. – No. 5. – P. 483-486.

REFERENCES

1. Nikol'skiy V.V. Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and radio wave propagation]. Moscow: Nauka, 1973.
2. Zubkovich S.G. Statisticheskie kharakteristiki radiosignalov, otrazhennykh ot zemnoy poverkhnosti [Statistical characteristics of radio signals reflected from the earth's surface]. Moscow: Sov. radio, 1968.
3. Semenov A.A. Teoriya elektromagnitnykh voln [Theory of electromagnetic waves]. Moscow: Izd-vo MGU, 1968.
4. Brekhovskikh L.M. Difraktsiya voln na nerovnoy poverkhnosti [Diffraction of waves on an uneven surface], *ZhETF* [JETP], 1952, Issue. 3 (9).
5. Isakovich M.A. Rasseyanie voln ot statisticheski sherokhovatoy poverkhnosti [Wave scattering from a statistically rough surface], *ZhETF* [JETP], 1952, Issue 3 (9).
6. Rasprostranenie ul'trakorotkikh radiovoln [Propagation of ultrashort radio waves], ed. by V.A. Shillerova. Moscow: Sov. radio, 1954.
7. Bass F.G., Fuks I.M. Rasseyanie voln na statisticheski nerovnoy poverkhnosti [Wave scattering on a statistically uneven surface]. Moscow: Nauka, 1972, 424 p.
8. Zhukovskiy A.P. Sluchaynoe elektromagnitnoe pole i ego momenty raspredeleniya pri otrazhenii voln ot protyazhennoy sherokhovatoy poverkhnosti [Random electromagnetic field and its moments of distribution when waves are reflected from an extended rough surface], *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [News of universities. Radiophysics], 1969, Vol. XII, No. 10.
9. Bass F.G., Bocharov V.G. K teorii rasseyaniya elektromagnitnykh voln na statisticheski nerovnoy poverkhnosti [On the theory of scattering of electromagnetic waves on a statistically uneven surface], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 1958, Vol. 3, No. 2, pp. 180-186.
10. Bass F.G. Rasprostranenie radiovoln nad statisticheski nerovnoy poverkhnost'yu [Propagation of radio waves over a statistically uneven surface], *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [News of universities. Radiophysics], 1961, Vol. 4, pp. 476-483.
11. Rozenberg A.D., Ostrovskiy I.E., Kalmykov A.I. Sdvig chastoty pri rasseyanii radioizlucheniya vzvolnovannoy poverkhnost'yu morya [*Izvestiya vuzov. Radiofizika* [News of universities. Radiophysics], 1960, Vol. 9, pp. 234-240.
12. Fuks I.M. K teorii rasseyaniya radiovoln na vzvolnovannoy poverkhnosti morya [On the theory of scattering of radio waves on the rough surface of the sea], *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [News of universities. Radiophysics], 1966, Vol. 9, No. 5, pp. 876-885.
13. Zhukovskiy A.P., Onoprienko E.I., Chizhov V.I. Teoreticheskie osnovy radiovysotometrii [Theoretical foundations of radio altimetry]. Moscow: Sovetskoe radio, 1979, 320 p.
14. Bass F.G. K teorii kombinatsionnogo rasseyaniya voln na nerovnoy poverkhnosti [On the theory of Raman scattering of waves on an uneven surface], *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [News of universities. Radiophysics], 1961, Vol. 4, pp. 521-536.
15. Garnaker'yan A.A., Sosunov A.S. Radiolokatsiya morskoy poverkhnosti [Sea surface radar]. Rostov-on-Don: Izd-vo. RGU, 1978, 140 p.

16. Al'pert Ya.L., Ginzburg V.L., Feynberg E.L. Rasprostranenie radiovoln [Propagation of radio waves]. Moscow: GITTL, 1953, 884 p.
17. Rytov S.M. Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku [Introduction to statistical radiophysics]. Moscow: Nauka, 1966, 404 p.
18. Lobach V.T. Statisticheskie kharakteristiki radiolokatsionnykh signalov, otrazhennykh ot morskoy poverkhnosti [Statistical characteristics of radar signals reflected from the sea surface]. Moscow: Radio i svyaz', 2006, 250 p.
19. Lobach V.T. Vliyanie izmenchivosti lokal'nogo koeffitsienta otrazheniya na statisticheskie kharakteristiki otrazhennogo elektromagnitnogo polya v usloviyakh ogranichenogo prostranstvennogo razneseniya toчек izlucheniya i priema [The influence of variability of the local reflection coefficient on the statistical characteristics of the reflected electromagnetic field under conditions of limited spatial separation of emission and reception points], *Antenny* [Antennas], 2003, No. 6.
20. Gradshcheyn I.S., Ryzhik I.M. Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy [Tables of integrals, sums, series and products]. Moscow: Nauka, 1971, 1108 p.
21. Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam [Handbook of Special Functions], ed. by M. Abramovitsa, I. Stigan. Moscow: Nauka, 1979, 832 p.
22. Zagorodnikov A.A. Korrelyatsionnaya funktsiya fluktuatsiy amplitudy RL signala, rasseyannogo morskoy poverkhnost'yu [Correlation function of fluctuations in the amplitude of a radar signal scattered by the sea surface], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 1969, Vol. XIV, No. 10.
23. Beckman P., Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. Pergamon Press. 1963.
24. Moore R.K., Fung A.K. Radar Determination of wind at sea, *Proceedings of the IEEE*, 1979, Vol. 67, No. 11, pp. 1504-1521.
25. Johnson J.W., Weissman D.E. Two - frequency microwave resonance measurements from an aircraft a quantitative estimate of the directional ocean surface spectrum, *Radio Science*, 1984, Vol. 19, No. 13, pp. 841-854.
26. Keller W.C., Wright J.W. Microwave scattering and the straining of wind generated waves, *Radio Science*, 1975.
27. Katz I. Angle Dependence of Radar Terrian Return, *I. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1960, No. 5, pp. 483-486.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Лобач Владимир Тихонович – Южный федеральный университет; e-mail: vtlobach@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185233270; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

Бакуменко Алексей Николаевич – e-mail: baku@sfedu.ru; тел.: 89886031853; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; ассистент.

Lobach Vladimir Tikhonovich – Southern Federal University; e-mail: vtlobach@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185233270; the department of radio engineering & telecommunication systems; associate professor.

Bakumenko Alexey Nikolaevich – e-mail: baku@sfedu.ru; phone: +79886031853; the department of radio engineering & telecommunication systems; assistant professor.