



УДК 621.396.96

Л. С. Меттус, В. Н. Михайлов, А. Б. Хачатурян
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 197376

Интерференционный множитель Земли¹

Аннотация. Рассмотрена задача учета интерференционного множителя Земли, позволяющего более точно определить зону видимости радиолокационной станции при наличии отражений от подстилающей поверхности. Представлено аналитическое решение этой задачи в общем виде с учетом сферичности Земли, позволяющее получить результат в широком диапазоне дальностей и высот целей с использованием компьютерного моделирования. Получено аналитическое выражение для множителя Земли в условиях "плоского приближения" без ограничений, обычно встречающихся в литературе. Определены границы допустимости "плоского приближения Земли". На примерах дается графическая оценка погрешности всех приближений как по отношению к общему случаю сферичности Земли, так и относительно друг друга.

Ключевые слова: радиолокация, РЛС, интерференция, коэффициент отражения, подстилающая поверхность, множитель Земли

Для цитирования: Меттус Л. С., Михайлов В. Н., Хачатурян А. Б. Интерференционный множитель Земли // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 1. С. 43–49.

L. S. Mettus, V. N. Mikhailov, A. B. Khachaturian
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

Pattern Propagation Factor of the Earth

Abstract. The article is devoted to the pattern propagation factor of the Earth enabling for more precise determination of the radar station visibility range in case there are reflections from underlying surface. The article provides analytical solution in general form taking into account the Earth sphericity. It enables to obtain the results in the wide-band and altitude range of the observed objects by means of computer simulation. The article gives analytical expression for the Earth multiplier under the flat approximation assumption, free of restrictions common for research literature. Besides, the article defines boundaries in which it is permissible to view the Earth as a flat surface. In addition, the article provides examples to illustrate graphical estimate of the error of all approximations both with respect to the general case of the Earth sphericity and relative to each other.

Key words: Radar, Radar Station, Interference, Reflectivity, Underlying Surface, Pattern Propagation Factor

For citation: Mettus L. S., Mikhailov V. N., Khachaturian A. B. Pattern Propagation Factor of the Earth. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 1, pp. 43–49. (In Russian)

Введение. При построении зоны видимости радиолокационной станции (РЛС) в освещенной области большое значение имеет интерференционный множитель Земли. В литературе приводятся приближенные аналитические выражения для множителя Земли в случае ее представления как плоской поверхности ("плоское приближение")

[1]–[3]. Первое допущение, которое делается, – это условие, чтобы расстояние до объекта обнаружения (цели) R было много больше высоты установки антенны над поверхностью Земли h и высоты цели H [2]. Второе допущение требует дополнительно, чтобы $H \gg h$ [1], [3]. В [4] подробно рассмотрен расчет множителя Земли с учетом ее сферичности,

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 16-19-00172).

но он изобилует множеством номограмм, что затрудняет его практическое применение.

В настоящей статье решены две задачи: вывод аналитических выражений для интерференционного множителя Земли в общем виде с учетом сферичности Земли, позволяющих получить результат с использованием средств компьютерного моделирования, а также в условиях "плоского приближения" без отмеченных ранее ограничений. В результате определены границы допустимости "плоского приближения" Земли. Дополнительно на примерах представлена графическая оценка погрешности всех приближений как по отношению к общему случаю сферичности Земли, так и относительно друг друга.

Распространение сигнала над сферической поверхностью. На рис. 1 представлена схема двухлучевого распространения сигнала над сферической поверхностью. Антенна РЛС размещена в точке A на высоте h над поверхностью Земли, объект наблюдения расположен в точке O на высоте H . Расстояние от антенны до объекта по прямому лучу равно R , расстояние от антенны до объекта по отраженному лучу – $R_1 + R_2$. На рис. 1 введены следующие обозначения: $r_3 = k_p r$ – эквивалентный радиус Земли (k_p – коэффициент рефракции; $r = 6370$ км – радиус Земли); α – угол скольжения; ε – угол наклона прямого луча к горизонтالي; ε_0 – угол наклона

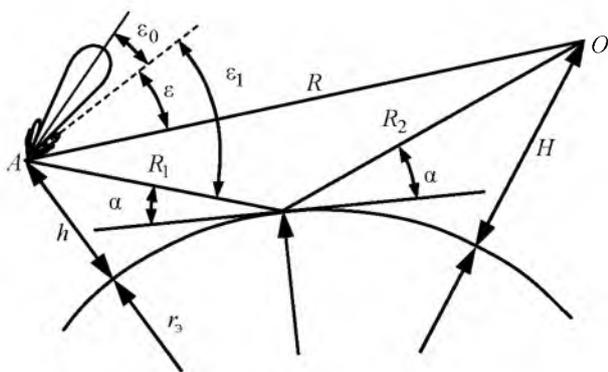


Рис. 1

направления максимального излучения к горизонтали; ε_1 – угол наклона преломленного луча к горизонтали.

Интерференционный множитель. Выражение для множителя Земли [1] может быть записано с использованием нормированной диаграммы направленности антенны (ДНА) по напряжению $g(\varepsilon)$:

$$F(\varepsilon) = \left| 1 + \rho D \frac{g(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{g(\varepsilon - \varepsilon_0)} \exp(-j\gamma) \right| \quad (1)$$

или с использованием нормированной ДНА по мощности:

$$F(\varepsilon) = \left\{ 1 + \rho^2 D^2 \frac{G(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{G(\varepsilon - \varepsilon_0)} + 2\rho D \left[\frac{G(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{G(\varepsilon - \varepsilon_0)} \right]^{0.5} \cos \gamma \right\}^{0.5}, \quad (2)$$

В (1) и (2) $\rho = k_{III} \rho_0$ – модуль коэффициента отражения (k_{III} – коэффициент шероховатости; ρ_0 – модуль коэффициента отражения для зеркальной поверхности); D – коэффициент расхождения, определяющий дополнительные потери из-за рассеяния на выпуклой поверхности (для сферической поверхности $D < 1$, для плоской $D = 1$); γ – разность фаз прямой волны, распространяющейся по траектории R , и отраженной волны, проходящей по траектории $R_1 R_2$ (рис. 1).

Разность фаз определяется как $\gamma = \psi_0 + \Delta\varphi$, где ψ_0 – изменение фазы при отражении (фазовый угол коэффициента отражения);

$$\Delta\varphi = 2\pi\delta R/\lambda \quad (3)$$

– набег фазы за счет разности расстояний прямой и отраженной волн $\delta R = (R_1 + R_2) - R$ (λ – длина волны).

Для определения набега фазы $\Delta\varphi$ (3) необходимо определить R_1 и R_2 при заданном R или ε . Связь между ε и R задается выражением (рис. 1)

$$\sin \varepsilon = \frac{-(r_3 + H)^2 + R^2 + (r_3 + h)^2}{2R(r_3 + h)}. \quad (4)$$

Значение угла ε_1 находится из выражения

$$\sin \varepsilon_1 = \frac{R_1^2 + h(2r_3 + h)}{2R_1(r_3 + h)}. \quad (5)$$

Исходя из геометрической модели (рис. 1) имеем:

$$\begin{cases} (r_3 + h)^2 = R_1^2 + r_3^2 - 2R_1 r_3 \cos(\pi/2 + \alpha) = \\ = R_1^2 + r_3^2 + 2R_1 r_3 \sin \alpha; \\ R^2 = R_1^2 + R_2^2 + 2R_1 R_2 \cos(2\alpha) = \\ = (R_1 + R_2)^2 - 4R_1 R_2 \sin^2 \alpha; \\ (r_3 + H)^2 = R_2^2 + r_3^2 - 2R_2 r_3 \cos(\pi/2 + \alpha) = \\ = R_2^2 + r_3^2 + 2R_2 r_3 \sin \alpha, \end{cases} \quad (6)$$

где α – угол скольжения.

Из второго уравнения системы (6) следует:

$$2 \sin \alpha = \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)^2 - R^2}{R_1 R_2}}.$$

Тогда от (6) перейдем к системе двух нелинейных относительно R_1, R_2 уравнений:

$$\begin{cases} R_1^2 + R_1 r_3 \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)^2 - R^2}{R_1 R_2}} = h(2r_3 + h); \\ R_2^2 + R_2 r_3 \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)^2 - R^2}{R_1 R_2}} = H(2r_3 + H). \end{cases} \quad (7)$$

Решение этой системы позволяет определить искомый набег фазы $\Delta\varphi$.

Можно упростить задачу и не решать систему (7), введя вместо R (или ε) новую переменную:

$$x = \sin \alpha = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)^2 - R^2}{R_1 R_2}}. \quad (8)$$

Тогда имеем:

$$\begin{cases} R = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4R_1 R_2 x^2}; \\ R_1 = \sqrt{x^2 r_3^2 + h(2r_3 + h) - r_3 x}; \\ R_2 = \sqrt{x^2 r_3^2 + H(2r_3 + H) - r_3 x}, \end{cases} \quad (9)$$

а связь между x и ε очевидна из (4).

Решив систему (9) с помощью численного моделирования, используя $0 \leq x \leq 1$ в качестве параметра, можно получить набег фазы (3), а также зависимость множителя Земли (2) от угла места ε . Результаты моделирования представлены далее.

Выражение для коэффициента отражения от шероховатой поверхности приводится в [1], [4], [5]

$$k_{\text{ш}} = \exp \left[-2 \left(\frac{2\pi v \sin \alpha}{\lambda} \right)^2 \right] = \exp \left[-2 \left(\frac{2\pi v x}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (10)$$

где v – среднеквадратическое отклонение распределения неровностей подстилающей поверхности.

Коэффициент расхождения в [4] определяется как

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2hH\beta}{r_3 R_H \operatorname{tg}^3 \alpha}}},$$

где $\beta = h'H'/(hH) \leq 1$ – отношение разностей пути при плоской и сферической земной поверхности (h' и H' – высоты размещения антенны и объ-

екта в "плоском приближении" соответственно); R_H – наземная дальность.

Тогда с учетом (8):

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2hH\beta}{r_3 R_H} \left(\frac{1}{x^2} - 1 \right)^{3/2}}}. \quad (11)$$

Графики зависимостей $\rho_0(\alpha)$ и $\Psi_0(\alpha)$ для различных поляризаций и подстилающих поверхностей приведены в [1], [4], [5], однако пользоваться ими в инженерных расчетах неудобно.

В [6] дается аналитическое выражение для комплексного коэффициента отражения $\bar{\rho}$ как функции относительной диэлектрической проницаемости ζ , удельной проводимости подстилающей поверхности σ , угла скольжения α и длины волны λ :

$$\bar{\rho} = \frac{(\zeta_1 - j\eta_1) \sin \alpha - \sqrt{\xi - j\eta}}{(\zeta_1 - j\eta_1) \sin \alpha + \sqrt{\xi - j\eta}},$$

где $\xi = \zeta - \cos^2 \alpha$; $\eta = 60\lambda\sigma$; $\zeta_1 = 1$, $\eta_1 = 0$ или $\zeta_1 = \zeta$, $\eta_1 = \eta$ для горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно. Тогда модуль и фазу коэффициента отражения можно представить в аналитическом виде:

$$\rho_0 = \frac{c^2 + d^2}{\sqrt{g^2 + f^2}}; \quad (12)$$

$$\Psi_0 = -\operatorname{arctg}(f/g) \pm n\pi, \quad (13)$$

где $c = \zeta_1 \sin \alpha - Aa$, $d = \eta_1 \sin \alpha + Ab$; $g = (\zeta_1^2 + \eta_1^2) \times \sin^2 \alpha - A$; $f = 2A \sin \alpha (a\eta_1 + b\zeta_1)$, n – целое число (обычно 0 или 1 исходя из физических соображений), причем $A = \sqrt{\zeta^2 + \eta^2}$; $a = \cos[k\pi - 0.5 \operatorname{arctg}(\eta/\zeta)]$ ($k=0$ или 1 (обычно 0)); $b = \sin[k\pi - 0.5 \operatorname{arctg}(\eta/\zeta)]$.

Область применимости решения. Рассмотренное решение задачи использует методы геометрической оптики и применимо для освещенной (интерференционной) области. Область полутени (дифракционная) подробно рассмотрена в [4], здесь же приводятся границы применимости интерференционных формул.

Рассмотрим граничные случаи перехода в область полутени. Уменьшение расстояния до цели приводит к увеличению угла скольжения α и, как следствие, уменьшению коэффициента отражения

от шероховатой поверхности. В результате при некотором критическом угле скольжения лепестковая структура поля практически разрушается, и необходимые расчеты можно проводить по формулам для свободного пространства. Критический угол скольжения согласно [4] определяется из выражения

$$\sin \alpha_{\max} = x_{\max} = \min \{ \lambda / (5v), 1 \}.$$

С другой стороны, увеличение расстояния до цели приводит к уменьшению угла скольжения, угла места цели и переходу в область полутени, где интерференционные формулы становятся неприменимыми. В [4] приведены границы для наземной дальности R_H и угла скольжения α , в пределах которых справедливо интерференционное приближение

$$R_H \leq \sqrt{2r_3} \times \left(\sqrt{h + 0.283 \sqrt{r_3 \lambda^2 / \pi^2}} + \sqrt{H + 0.283 \sqrt{r_3 \lambda^2 / \pi^2}} \right) - 2p \sqrt[3]{\frac{r_3^2 \lambda}{\pi}};$$

$$\alpha \geq p \sqrt[3]{\frac{\lambda}{\pi r_3}}$$

или с учетом (8):

$$x \geq \sin \left(p \sqrt[3]{\frac{\lambda}{\pi r_3}} \right),$$

где $p = 0.75$ для высот $h, H \leq 2.5 \sqrt[3]{r_3 \lambda^2 / \pi^2}$ и уменьшается для больших высот.

Радиолокационная дальность R и наземная дальность R_H связаны соотношением:

$$R^2 = (h + r_3)^2 + (H + r_3)^2 - 2(h + r_3)(H + r_3) \cos(R_H / r_3).$$

Граничное значение угла места ε можно получить, используя (4).

"Плоское приближение". Рассмотрим далее случай плоской поверхности как предельный при $r_3 \rightarrow \infty$. Система уравнений (4) при $r_3 \rightarrow \infty$ приобретает вид

$$\begin{cases} R_1 \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)^2 - R^2}{R_1 R_2}} = 2h; \\ R_2 \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)^2 - R^2}{R_1 R_2}} = 2H. \end{cases}$$

Перемножив их, получим:

$$(R_1 + R_2)^2 - R^2 = 4hH.$$

Тогда набег фазы

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{R^2 + 4hH} - R \right) = \frac{2\pi R}{\lambda} \left(\sqrt{1 + \frac{4hH}{R^2}} - 1 \right)$$

представляется как функция дальности R до объекта при других фиксированных параметрах.

Учитывая, что при $r_3 \rightarrow \infty$ $\sin \varepsilon = (H - h) / R$, возможно другое представление набега фазы как функции угла места:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(H - h)}{\lambda \sin \varepsilon} \left(\sqrt{1 + \frac{4hH}{(H - h)^2} \sin^2 \varepsilon} - 1 \right), \quad (14)$$

при условии, что $H \neq h$ или $\varepsilon \neq 0$.

Если $R \gg h$ и H , получаем приближение [2]

$$\Delta\varphi \cong \frac{4\pi h H}{\lambda R} = \frac{4\pi h H}{\lambda(H - h)} \sin \varepsilon. \quad (15)$$

Если дополнительно выполняется условие $H \gg h$, то получим приближение [1], [3]

$$\Delta\varphi \cong \frac{4\pi h}{\lambda} \sin \varepsilon. \quad (16)$$

Интерференционный множитель для (14) при условиях $\rho = D = 1$, $\psi_0 = \pi$ и $G(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) = G(\varepsilon - \varepsilon_0)$ определяется как

$$F(\varepsilon) = 2 \left| \sin \left[\frac{\pi(H - h)}{\lambda \sin \varepsilon} \left(\sqrt{1 + \frac{4hH}{(H - h)^2} \sin^2 \varepsilon} - 1 \right) \right] \right|, \quad (17)$$

для приближения (15) он имеет вид

$$F(\varepsilon) = 2 \left| \sin \left[\frac{2\pi h H}{\lambda(H - h)} \sin \varepsilon \right] \right|, \quad (18)$$

а для приближения (16):

$$F(\varepsilon) = 2 \left| \sin \left(\frac{2\pi h}{\lambda} \sin \varepsilon \right) \right|. \quad (19)$$

Сравним результаты численного моделирования выражений для множителя Земли с учетом ее сферичности (1)–(13) и упрощенных выражений (17)–(19) для "плоской" Земли при следующих исходных данных: $\lambda = 2$ м, $h = 40$ м, $\varepsilon_0 = 0$, $k_p = 4/3$, ширина главного лепестка ДНА $\Delta\varepsilon = 20^\circ$, $k_{III} = \rho_0 = D = 1$, $k_{III} = \rho_0 = D = 1$, $\psi_0 = 180^\circ$, характерных для зеркального отражения.

В (2) входит нормированная ДНА G как функция углов ε и ε_1 , что требует ее задания. В рассмотренном случае ДНА аппроксимировалась взвешенной суммой трех функций вида $\sin x/x$ так, что уровень первого бокового лепестка не превышал -23 дБ.

Сравнение результатов. Результаты сравнения при высотах цели H , равных 100 и 10 м, представлены на рис. 2, где кривая 1 получена с использованием выражений (1)–(13) для сферической Земли, кривая 2 – выражения (17) для плоской Земли, кривые 3, 4 получены по (18) и (19) соответственно.

Как следует из рисунка, кривая 2 имеет хорошее приближение к кривой 1 за исключением области малых углов места, где влияние сферичности Земли проявляется в наибольшей степени. На рис. 2, в кривая 4 существенно расходится с кривыми 1 и 3, что объясняется невыполнением условия $H \gg h$. Согласно [1] интерференционный множитель для плоской Земли при угле места $\varepsilon_0 = 0$ имеет нулевое значение, что и показывают кривые 3 и 4. В то же время кривая 1 имеет нулевое значение при положительном угле места, соответствующем переходу в область полутени.

На рис. 2, б, г разрыв кривой 1 и нулевое значение кривой 2 в области малых углов места определяются критическим углом места, соответствующим переходу в область тени.

Учет сферичности Земли указывает на существенные погрешности формул (17)–(19) в области углов места, примыкающих к нулю. Из рис. 2, в, г также следует, что точность приближения снижается по мере роста абсолютного значения угла места.

Рис. 3–7 построены для точного (учитывающего сферичность Земли) решения и иллюстрируют влияние на значения интерференционного множителя различных параметров при фиксированных значениях: $h = 40$ м, $\varepsilon_0 = 0$, $k_p = 4/3$, ширина главного лепестка ДНА $\Delta\varepsilon = 20^\circ$, $D = 1$. Так, на рис. 3 показано влияние на угломестную зависимость интерференционного множителя Земли длины облучающей волны.

Рис. 4 иллюстрирует влияние на интерференционный множитель высоты цели при длине волны $\lambda = 2$ м.

Рис. 5 и 6 отображают зависимость множителя Земли от фазы и модуля коэффициента отражения. На рис. 5 представлены зависимости интерференционного множителя для разных значений фазы коэффициента отражения при постоянном значении его модуля, а на рис. 6 – для различных значений модуля при постоянной фазе.

Рис. 7 иллюстрирует влияние на интерференционный множитель шероховатости поверхности.

На рис. 8 представлена угломестная зависимость интерференционного множителя для модели поверхности моря, дающей зеркальное отражение.

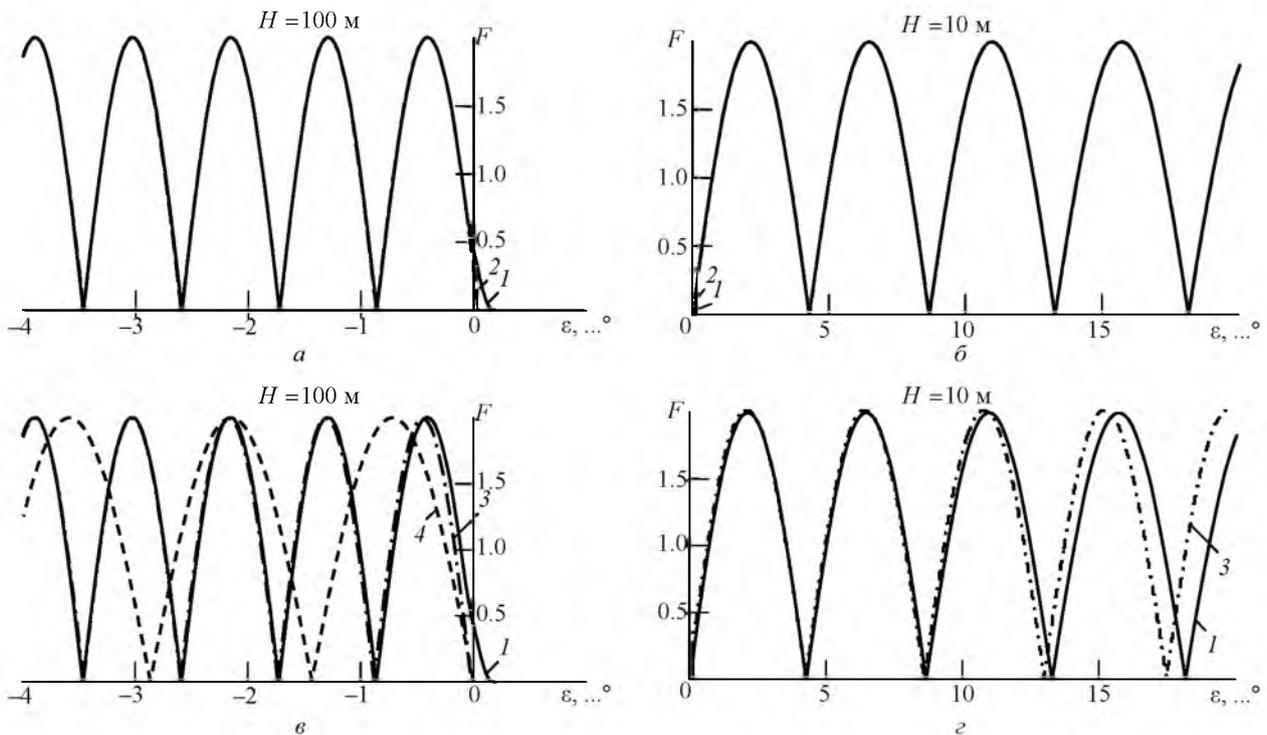


Рис. 2

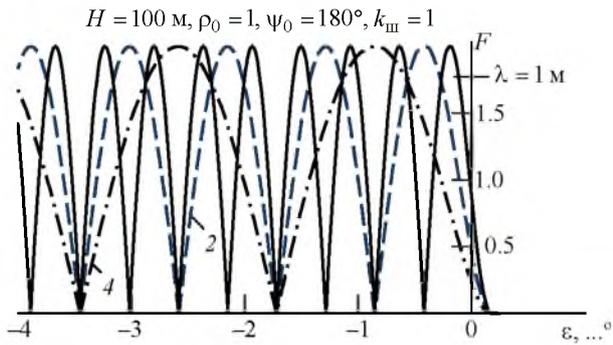


Рис. 3

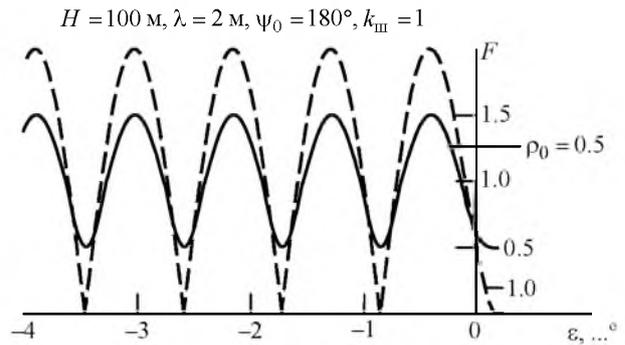


Рис. 6

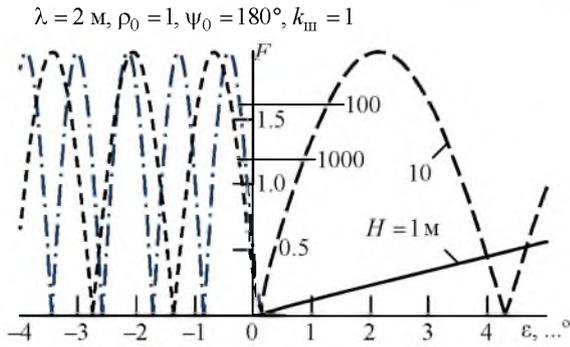


Рис. 4

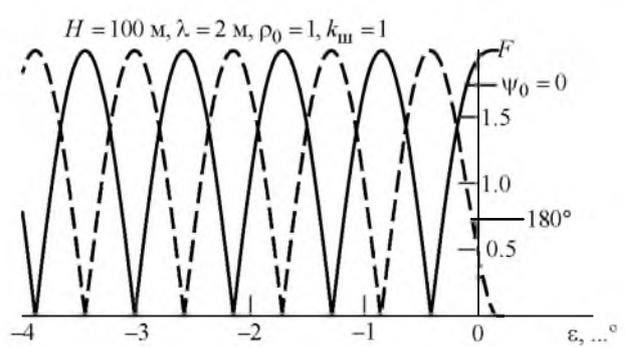


Рис. 7

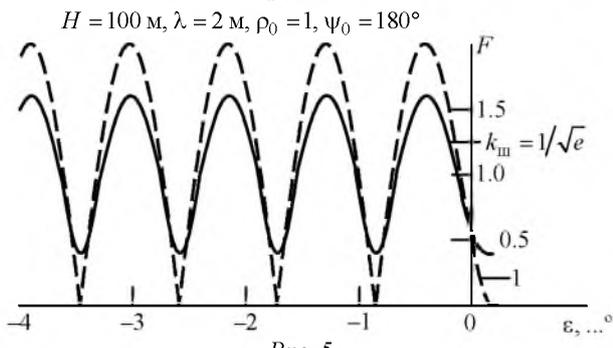


Рис. 5

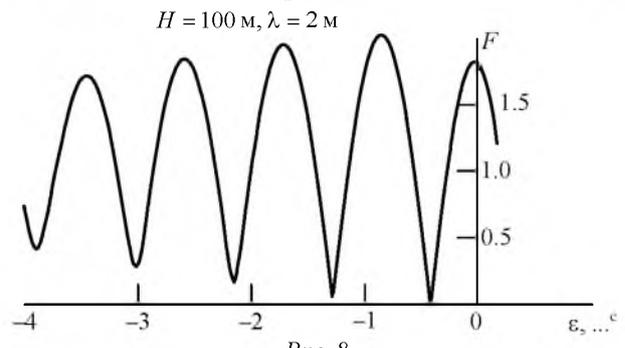


Рис. 8

Поляризация излучения горизонтальная. Указанная поверхность в этом случае характеризуется тремя параметрами: среднеквадратическим отклонением распределения неровностей подстилающей поверхности $\nu = 1$ (что соответствует трехбалльному волнению [1]); относительной диэлектрической проницаемостью $\zeta = 80$ и удельной проводимостью $\sigma = 2$ (что характерно для морской воды [3]).

Зависимости построены в случае, когда параметры, характеризующие земную поверхность: коэффициент расхождения для сферической поверхности D (11), коэффициент шероховатости $k_{\text{ш}}$ (10), модуль коэффициента отражения для зеркальной поверхности ρ_0 (12), его фаза ψ_0 (13), определяются как функции угла скольжения α или величины x .

Выводы. В настоящей статье приведен вывод аналитических выражений для множителя Земли с учетом ее сферичности (1)–(13). С их помощью осуществлено численное моделирование интерференционного множителя Земли. Полученный результат сравнивается с известными упрощенными выражениями для плоской Земли (17), (18). Показано, что упрощенные выражения дают хорошее приближение к значениям множителя, учитывающим сферичность Земли во всем интервале изменения угла места цели за исключением области его малых значений. Сравнение с упрощенным выражением (19) допустимо только при высотах цели, существенно превышающих высоту установки антенны РЛС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по радиолокации: пер. с англ.: в 4 т. / под ред. М. Скольника; под общ. ред. К. Н. Трофимова. Т. 1 / под ред. Я. С. Иццоки. М.: Сов. радио, 1976. 456 с.
2. Радиотехнические системы / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Академия, 2008. 590 с.
3. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Сов. радио, 1970. 560 с.
4. Голев К. В. Расчет дальности действия радиолокационных станций. М.: Сов. радио, 1962. 202 с.
5. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / сокр. пер. с англ.; под ред. А. И. Сапгира. М.: Сов. радио, 1977. Вып. 1. 352 с.
6. Справочник по основам радиолокационной техники / под ред. В. В. Дружинина. М.: Воениздат, 1967. 768 с.

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2017 г.

Меттус Леонид Сергеевич – кандидат технических наук (1980), инженер НИИ "Прогноз" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – разработка радиолокационных систем с повышенной помехозащищенностью, многодиапазонные многопозиционные радиолокационные комплексы. Тел.: +7 (812) 234-27-32.

Михайлов Вячеслав Николаевич – инженер по специальности "Радиотехника" (2000, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), ассистент кафедры радиотехнических систем указанного университета, научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация, эвристические алгоритмы, цифровая обработка сигналов. E-mail: VNMikhailov@etu.ru

Хачатурян Алёна Борисовна – кандидат технических наук (2014), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – статистическая теория связи, широкополосные системы радиолокации, радионавигации и передачи данных; теория сигналов. E-mail: khachaturyan.al@gmail.ru

REFERENCES

1. Radar handbook; ed. by M. I. Skolnik. New York, McGraw-Hill Book Co., 1970, 455 p.
2. Kazarinov U. M. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio Engineering Systems]. Moscow, *Akademiya*, 2008, 590 p. (In Russian)
3. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* [Theoretical Basics of Radar]; ed. by Ya. D. Shirman. Moscow, *Sov. radio*, 1970, 560 p.
4. Golev K. V. *Raschet dal'nosti deistviya radiolokatsionnykh stantsii* [Calculation of Radar Range Capability]. Moscow, *Sov. radio*, 1962, 202 p. (In Russian)
5. White D. R. J. A handbook series of electromagnetic interference and compatibility. Vol. 1. Electrical noise and electromagnetic interference specification. Germantown, Md., Don White Consultants, 1971.
6. *Spravochnik po osnovam radiolokatsionnoi tekhniki* [Guide to Foundations of Radar Technology]; ed. by V. V. Druzhinina. Moscow, *Voenizdat*, 1967, 768 p. (In Russian)

Received November, 11, 2017

Leonid S. Mettus – Ph.D. in engineering (1980), engineer for "Prognosis" Research Institute of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: development of radar systems with increased noise immunity, multi-range multi-position radar systems. Phone: +7 (812) 234-27-32.

Vjacheslav N. Mikhailov – Dipl.-engineer on radio engineering (2000, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"), assistant of Radio Engineering Systems Department of named university, the scientist of "Prognosis" Research Institute. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: radar detection and location, heuristic algorithms and digital signal processing. E-mail: VNMikhailov@etu.ru

Alena B. Khachaturian – Ph.D. in engineering (2014), assistant professor of Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 20 scientific publications. Area of expertise: statistical communication theory; broadband radar, navigation and data systems; signal theory. E-mail: khachaturyan.al@gmail.ru