

## Определение потерь распространения радиолокационной волны вблизи земной поверхности

*Е.И. Минаков, Г.А. Валихин*

*Тульский государственный университет, г. Тула, Россия*

*eminakov@mail.ru*

Определение влияния подстилающей поверхности на распространение электромагнитной волны UHF- и SHF-диапазонов играет решающую роль в проектировании радиосвязных, радиолокационных, телевизионных и мобильных станций. В работе рассмотрен новый метод определения влияния земной поверхности, учитывающий отражение от земной поверхности, рассеивание и поглощение радиоволн в атмосфере. Проведены расчеты коэффициента отражения, потерь распространения радиоволны, потенциала радиосвязной и локационной станций. Показано, что для обеспечения наименьшего влияния отражающей поверхности на дальность распространения радиоволны необходимо части радиосвязной (локационной) системы располагать под углом Брюстера, поскольку модуль коэффициента отражения электромагнитной волны от поверхности при этом минимален. Установлено, что сильная изрезанность подстилающей поверхности позволяет минимизировать ее влияние на потенциальные характеристики разрабатываемых устройств. Это объясняется расфокусировкой отраженной электромагнитной волны и уменьшением ее амплитуды на приемном конце системы. Полученные результаты представляют интерес для оптимизации параметров разрабатываемых радиосвязных и локационных систем, а также при проложении радиосвязной трассы.

**Ключевые слова:** потери распространения радиолокационной волны; отражение от земной поверхности; коэффициент отражения радиоволны; комплексная диэлектрическая постоянная; угол Брюстера

**Для цитирования:** Минаков Е.И., Валихин Г.А. Определение потерь распространения радиолокационной волны вблизи земной поверхности // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 64–71. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-64-71

## Determination of Propagation Factor of a Radar Wave Near Earth Surface

*E.I. Minakov, G.A. Valikhin*

*Tula State University, Tula, Russia*

*eminakov@mail.ru*

**Abstract:** Determining the influence of the underlying surface on the propagation of an electromagnetic wave of the UHF and SHF bands plays a crucial role in the design of the radio communications, radar, television and mobile stations. In the work a new method for determining the influence of the earth surface has been considered taking into account the reflection from the earth surface, scattering and absorption of radio waves in the earth atmosphere. The reflection coefficient, the propagation factor of the radio wave, the potential of the radio communication and location station have been calculated. It has been shown that to ensure the smallest influence of the reflecting surface on the propagation distance of radio waves, it is necessary to arrange the parts of the radio communication (location) system at the Brewster angle, since the modulus of the reflection coefficient of the electromagnetic wave from the surface is minimal. It has been determined that the strong irregularity of the underlying surface also minimizes its effect on the potential characteristics of the devices being developed. It has been explained that this is due to the defocusing of the reflected electromagnetic wave and a decrease in its amplitude at the receiving end of the system. The results obtained are of interest for optimization of the parameters of the developed radio communication and location systems, as well as during the laying of the radio communication route.

**Keywords:** the propagation factor of the radar wave; reflection from the earth surface; the reflection coefficient of the radio wave; the complex dielectric constant; the Brewster angle.

**For citation:** Minakov E.I., Valikhin G.A. Determination of propagation factor of a radar wave near earth surface. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 64–71. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-64-71

**Введение.** В настоящее время в охранных и связных системах широко распространены радиосвязные передатчики и радиолокационные устройства, работающие в SHF- и UHF-диапазонах длин волн [1]. К таким устройствам относятся радиосвязные, телевизионные, мобильные, радиолокационные станции. Проектирование радиоустройств в данных диапазонах длин волн обеспечивает снижение конечной стоимости разрабатываемой техники за счет высокой доступности элементной базы и увеличение дальности распространения радиолокационной волны при заданных параметрах диаграммы направленности антенны. Относительно высокая длина электромагнитной волны позволяет применять в разрабатываемых устройствах передовые технологии цифрового диаграммообразования, улучшающие потенциальные характеристики радиосвязной и локационной станций за счет формирования узконаправленного луча диаграммы направленности на прием в широком секторе.

На распространение электромагнитной волны в SHF- и UHF-диапазонах сильное влияние оказывает ее отражение от земной поверхности – электромагнитная волна

уменьшается по амплитуде и изменяет свою фазу. Эти изменения осуществляются под воздействием следующих факторов: коэффициента отражения, неоднородности отражающей поверхности и коэффициента кривизны земной поверхности. Согласованность по фазе прямой и отраженной радиолокационной волны обеспечивает увеличение мощности на приемном конце радиосвязной (локационной) системы до 5 дБ, в то же время разность в фазе данных волн приводит к их вычитанию и потере информационного сообщения.

Цель настоящей работы – разработка метода расчета потерь распространения электромагнитной волны вблизи земной поверхности, учитывающего влияние коэффициента отражения, неоднородности отражающей поверхности и коэффициента кривизны земной поверхности. Учет потерь распространения, определенных разработанным методом при проектировании радиосвязной (локационной) системы, позволит уточнить их эксплуатационные характеристики и уменьшить расходы при вводе данных систем в эксплуатацию.

**Описание метода.** Упрощенная схема радиосвязи в условиях отражения радиолокационной волны от местности представлена на рис.1. Прямой путь радиолокационной волны осуществляется между точками  $AB$  и соответствует расстоянию  $R_d$ , отраженный – между точками  $ACB$  и соответствует расстоянию  $R_i$ . Электромагнитная волна падает на поверхность в точке  $C$  под углом скольжения  $\Psi_g$ . Высоты установки антенн передатчика в точке  $A$  и приемника в точке  $B$  обозначены на рисунке как  $h_r$  и  $h_t$  соответственно. Разница длин между прямым путем электромагнитной волны и отраженным обычно достаточно мала. Амплитуда сигнала, прошедшего по отраженному пути от передатчика к приемнику, меньше амплитуды сигнала, прошедшего прямым путем. Это объясняется меньшим коэффициентом усиления приемной антенны в его направлении и изменениями в амплитуде и фазе, которым сигнал подвергся в точке  $C$  и которые обусловлены коэффициентом отражения радиоволны от земной поверхности.

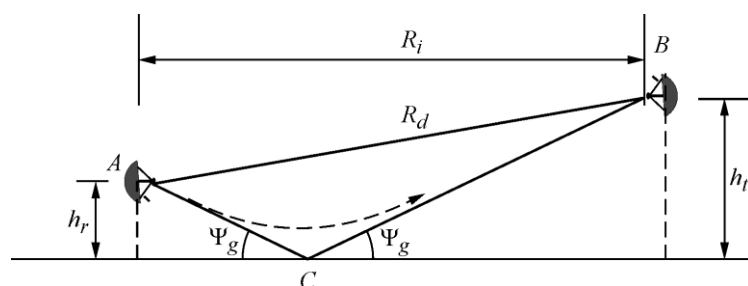


Рис.1. Упрощенная схема радиосвязи  
Fig.1. Simplified scheme of radio connection

Коэффициент отражения радиоволны от подстилающей поверхности в точке  $C$  при вертикальной и горизонтальной поляризации, согласно [2], зависит от частоты, комплексной диэлектрической постоянной отражающей поверхности  $\epsilon$ , угла скольжения электромагнитной волны  $\psi$  и описывается уравнениями

$$\Gamma_v = \frac{\epsilon \sin \psi - \sqrt{\epsilon - (\cos \psi)^2}}{\epsilon \sin \psi + \sqrt{\epsilon - (\cos \psi)^2}},$$

$$\Gamma_h = \frac{\sin \psi - \sqrt{\epsilon - (\cos \psi)^2}}{\sin \psi + \sqrt{\epsilon - (\cos \psi)^2}}.$$

Комплексная диэлектрическая постоянная отражающей поверхности зависит от длины электромагнитной волны и может быть найдена в справочной литературе. При падении радиоволны на морскую воду комплексная диэлектрическая постоянная, согласно [2], имеет вид

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' = 65 - 30,7i.$$

Зависимость модуля и фазы коэффициента отражения электромагнитной волны от морской воды от угла скольжения радиоволны для станции SHF-диапазона приведена на рис. 2.

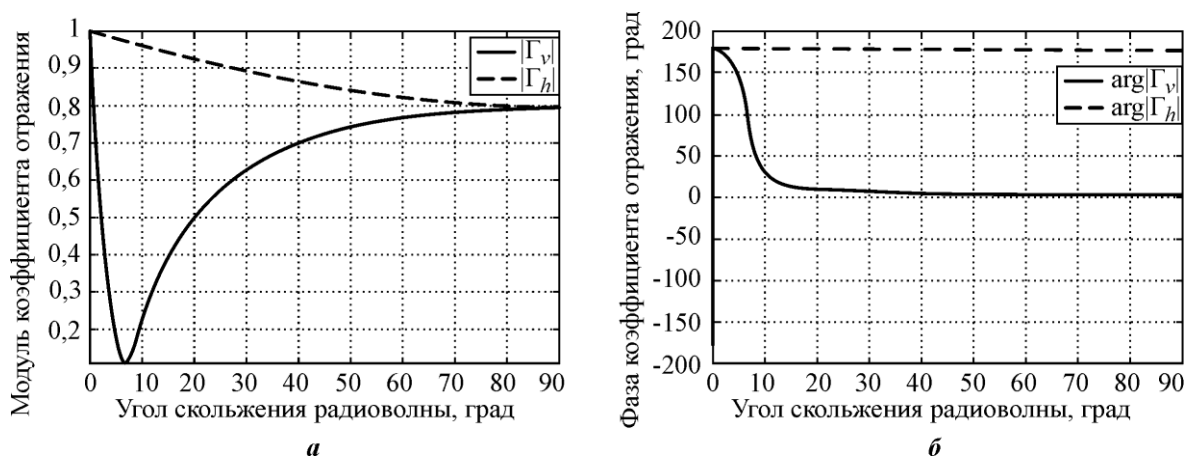


Рис.2. Зависимость модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения от угла скольжения радиоволны  
 Fig.2. Reflection coefficient's absolute value (a) and phase (b) dependency on the glancing angle

Исходя из рис. 2, максимальный коэффициент отражения и сдвиг фазы отражаемого сигнала для радиолокационной волны с вертикальной поляризацией соответствует минимальному углу скольжения волны. Модуль коэффициента отражения от земной поверхности имеет отчетливый минимум. Угол, которому соответствует данный минимум, называется углом Брюстера. Модуль коэффициента отражения радиоволны с горизонтальной поляризацией также максимален при малых углах скольжения и постепенно уменьшается при увеличении угла скольжения. Фазовый сдвиг радиоволны с горизонтальной поляризацией при всех значениях угла скольжения близок к  $180^\circ$ , что увеличивает потери при суммировании прямой и отраженной радиоволн на приемном конце.

Таким образом, для минимизации влияния земной поверхности на потенциал радиовещательной станции целесообразно использовать вертикальную поляризацию радиолокационной волны и устанавливать передатчик и приемник под заданным углом места для обеспечения угла скольжения радиоволны, равного углу Брюстера.

Отметим, что при работе радиовещательного устройства или локатора не по морской поверхности происходит дополнительное уменьшение амплитуды электромагнитной волны при ее отражении за счет неровности подстилающей поверхности [3]. В общем случае отражения от неровной поверхности вносят существенные произвольные изменения фазы и амплитуды электромагнитной волны и приводят к появлению некогерентной части отраженного сигнала. Влияние неровности отражающей поверхности на коэффициент отражения электромагнитной волны определяется следующим выражением:

$$K_n = e^{-2 \cdot \left( \frac{2\pi\sigma_r \cdot \sin \psi}{\lambda} \right)^2},$$

где  $K_n$  – коэффициент уменьшения амплитуды электромагнитной волны при ее отражении от неровной подстилающей поверхности;  $\sigma_r$  – среднее квадратическое отклонение перепада высот в области работы станции;  $\lambda$  – длина волны.

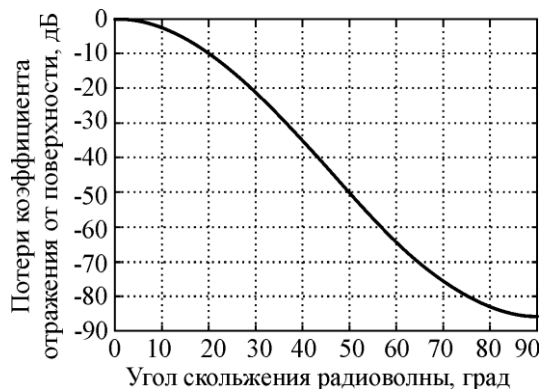


Рис.3. Зависимость падения коэффициента отражения от поверхности от угла скольжения радиоволны

Fig.3. Dependence of losses in reflection coefficient on the glancing angle

Изменения коэффициента отражения электромагнитной волны за счет неровности отражающей поверхности для среднепересеченной местности показаны на рис.3.

Радиоволна отражается от точки  $C$  и с учетом кривизны земной поверхности изменяет свой путь (см. рис.1). За счет кривизны земной поверхности отраженная энергия расфокусируется, а плотность потока мощности на приемном конце системы уменьшается. Поэтому для нахождения коэффициента отражения в сторону приемной части радиовещательной системы необходимо учесть и коэффициент кривизны земной поверхности [2]:

$$K_k = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2r_1 r_2}{r_e r \cdot \sin(\psi)}}},$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – длины дуг, проведенных по земной поверхности от проекций точки  $A$  и точки  $B$  на земную поверхность к точке  $C$  соответственно;  $r_e$  – эффективный радиус земной поверхности;  $r$  – длина дуги между проекциями точек  $A$  и  $B$  на земную поверхность.

Зависимость коэффициента кривизны земной поверхности от угла скольжения радиоволны при расстоянии между приемником и передатчиком радиовещательной системы 3 км приведена на рис. 4.

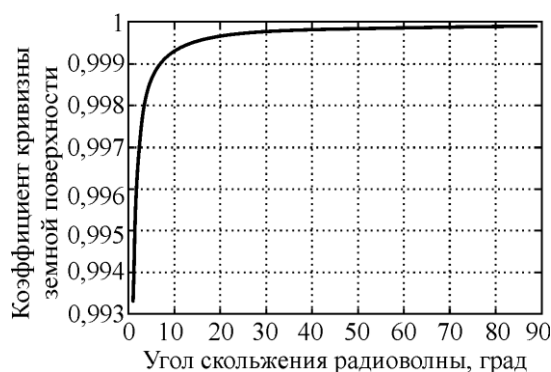


Рис.4. Зависимость коэффициента кривизны земной поверхности от угла скольжения радиоволны

Fig.4. Dependence of earth-curve coefficient on the glancing angle

минимален и, соответственно, вносит наибольшее ослабление в полный коэффициент отражения радиоволны от поверхности при малых значениях угла скольжения. Отметим, что на малых расстояниях коэффициент кривизны земной поверхности близок к единице и задачу вычисления оптимальных высот установки передающей и приемной антенн радиовещательной системы можно решать, пренебрегая им (пользуясь допущением «плоской земли»).

Распространяясь вблизи земной поверхности, энергия электромагнитной волны также подвержена потерям, связанным с их аттенуацией в атмосфере, которая возникает при наличии тумана, дождя, пыли и облаков. Энергия поглощается водяными парами в атмосфере и преобразуется в тепло. Зависимость аттенуации электромагнитной волны в атмосфере от расстояния описывается выражением

$$L = e^{-\xi\alpha R},$$

где  $\xi$  – коэффициент аттенуации, зависящий от частоты и плотности поглощающих частиц в атмосфере [4];  $R$  – расстояние.

Комплексный коэффициент отражения электромагнитной волны от подстилающей поверхности, учитывающий длину волны, угол скольжения волны, неровность подстилающей поверхности и ее кривизну, а также аттенуацию волны при ее распространении в атмосфере, имеет вид

$$|K| = |\Gamma| K_n K_k L.$$

Для определения влияния комплексного коэффициента отражения от земной поверхности на потенциал станции в формулы радиолокации и радиовещания введем множитель потерь радиоволны вблизи подстилающей поверхности:

$$P_{\text{рв}} = F^2 \frac{P_t G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2}, \quad P_{\text{рл}} = F^4 \frac{P_t G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \sigma}{(4\pi)^3 R^4},$$

где  $P_{\text{рв}}$ ,  $P_{\text{рл}}$  – мощность на приемном конце радиовещательной и радиолокационной системы соответственно;  $F$  – множитель ослабления радиоволны;  $P_t$  – мощность на передающем конце системы;  $G_{\text{пер}}$ ,  $G_{\text{пр}}$  – коэффициенты усиления антенны на передачу и прием соответственно;  $R$  – расстояние до приемника (цели).

Множитель ослабления радиоволны определяется выражением

$$F = \sqrt{1 + |K|^2 + 2|K|\cos(\alpha)}, \quad (1)$$

где  $|K|$  – модуль комплексного коэффициента отражения волны от поверхности.

Изменение фазы электромагнитной волны в ходе распространения вблизи подстилающей поверхности определяется как

$$\alpha = \Psi + \arg(\Gamma), \quad (2)$$

где  $\arg(\Gamma)$  – фаза коэффициента отражения от поверхности;  $\Psi$  – разница между набегом фазы при прямом и отраженном распространении радиоволны от радиолокатора до цели:

$$\Psi = \frac{2\pi\Delta R}{\lambda} = \frac{4\pi h_{\text{ц}} h_{\text{л}}}{\lambda R}. \quad (3)$$

Здесь  $h_{\text{ц}}$ ,  $h_{\text{л}}$  – высота цели и локатора над горизонтом соответственно.

Полученная из (1), (2), (3) зависимость множителя ослабления радиоволны SHF-диапазона с вертикальной поляризацией при ее отражении от морской поверхности от угла места на приемник (цель) представлена на рис.5.

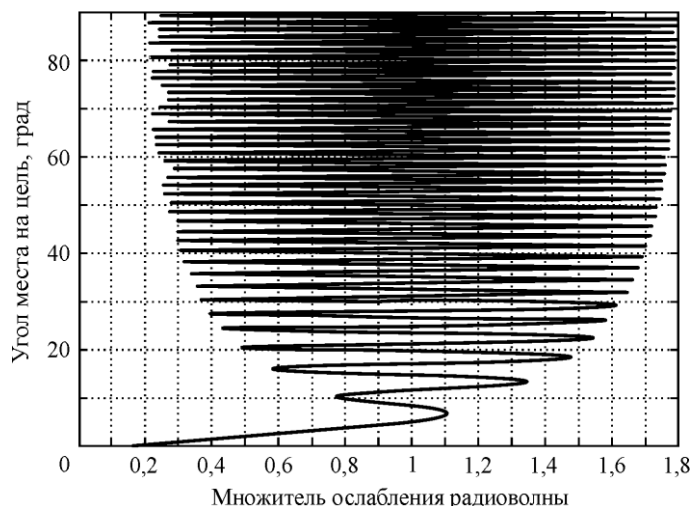


Рис.5. Зависимость множителя ослабления радиоволны от угла места на цель

Fig.5. Dependence of propagation factor on the elevation angle

**Анализ результатов.** Согласно рис.5 множитель ослабления минимален при малых углах места, а наименьшее влияние земной поверхности на распространение радиолокационной волны достигается вблизи угла Брюстера. Оптимальную высоту подвеса радиолокационной станции при этом можно определить как

$$h_{\text{п}} = R \cdot \cos(\psi_{\text{Б}}) + h_{\text{ц}}, \quad (4)$$

где  $\psi_{\text{Б}}$  – угол Брюстера.

Согласно (4) расположение передатчика на высоте, соответствующей максимуму множителя ослабления электромагнитной волны для выбранного диапазона частот, увеличивает энергетический потенциал радиолокационной станции на 10 дБ и мощность на приемном конце радиовещательной системы на 5 дБ. Это позволяет увеличить дальность обнаружения объектов радиолокационной станцией и дальность радиосвязи в два раза по отношению к распространению радиоволны в свободном пространстве. Расположение на высоте, соответствующей минимуму множителя ослабления, уменьшает энергетический потенциал радиолокационной станции на 28 дБ и мощность на приемном конце радиовещательной системы на 14 дБ, что приводит к уменьшению дальности обнаружения целей и радиосвязи в 20 раз по отношению к распространению радиоволны в свободном пространстве.

Следует отметить, что компенсация потерь, вызываемых отражением волны от отражающей поверхности путем увеличения энергетики радиолокационной или радиовещательной системы, повлечет за собой чрезмерное увеличение массогабаритных и ценовых характеристик разрабатываемой продукции.

**Заключение.** Для точного определения эксплуатационных характеристик радиолокационных и радиовещательных систем SHF- и UHF-диапазонов требуется включение в формулы радиолокации и связи множителя ослабления электромагнитной волны вблизи подстилающей поверхности. Данный множитель зависит от угла на цель, длины волны, атмосферных затуханий, кривизны и однородности подстилающей поверхности. Его минимизация может быть осуществлена расположением приемного и передающего концов радиовещательной и радиолокационной системы на высотах, обеспечивающих значение угла места на цель, близкое к углу Брюстера, а также выбором трасс радиосвязных линий с большим уровнем изрезанности подстилающей поверхности.

Расчет потенциальных характеристик радиолокационных и связных станций с учетом комплексного коэффициента отражения подстилающей поверхности, согласно предложенному методу, позволит минимизировать массу и габариты разрабатываемой продукции при выполнении заданных технических характеристик. Пренебрежение влиянием земной поверхности на распространение электромагнитных волн SHF- и UHF-диапазонов при расчете и установке радиолокационных и радиосвязных систем может повлечь за собой как серьезное уменьшение уровня сигнала на приемном конце системы, так и его полное исчезновение за счет несогласованности электромагнитной волны, прошедшей по прямому и отраженному пути.

### *Литература*

1. **Бабков В.Ю.** Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование: учеб. пособие. – М.: ГЛТ, 2013. – 222 с.
2. **Merrill I. Skolnik.** Introduction to radar systems. – 3 ed. – N.Y.: Electronic Industry Press, 2014. – 762 p.
3. **Damien Closson.** Land applications of radar remote sensing. – Rijeka: Intech, 2014. – 307 p.
4. **Грибков А.С.** Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования. – М.: Радиотехника, 2015. – 312 с.

Поступила в редакцию 09.07.2018. г.; после доработки 09.07.2018 г.; принята к публикации 27.11.2018 г.

**Минаков Евгений Иванович** – доктор технических наук, доцент кафедры радиотехники Тульского государственного университета (Россия, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92), [eminakov@mail.ru](mailto:eminakov@mail.ru)

**Валихин Глеб Алексеевич** – аспирант кафедры радиотехники Тульского государственного университета (Россия, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92), [glebvalihin@yandex.ru](mailto:glebvalihin@yandex.ru)

### *References*

1. Babkov V.Yu. *Mobile networks. Frequency-area planning: Tutorial.* Moscow, GLT Publ., 2013. 222 p. (in Russian).
2. Merrill I. Skolnik. *Introduction to Radar Systems. Third edition.* Electronic Industry Press., N.Y., 2014. 762 p.
3. Damien Closson. *Land Applications of Radar Remote Sensing.* Rijeka, Intech, 2014. 307 p.
4. Gribkov A.S. *Radio surveillance features of different objects. Research methods.* Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 312 p. (in Russian).

Received 09.07.2018; Revised 09.07.2018; Accepted 27.11.2018

### *Information about the authors:*

**Evgeny I. Minakov** – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Radioengineering Department, Tula State University (Russia, 300012, Tula, Lenin's prospekt, 92), [eminakov@mail.ru](mailto:eminakov@mail.ru)

**Gleb A. Valikhin** – PhD student of the Radioengineering Department, Tula State University (Russia, 300012, Tula, Lenin's prospekt, 92), [glebvalihin@yandex.ru](mailto:glebvalihin@yandex.ru)