

Градиентный метод расчета потерь направляющей электродинамической структуры с неидеальными экранирующими поверхностями

В.В. Бирюков, С.Г. Лобин

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева
603950, Россия, г. Нижний Новгород,
ул. Минина, 24

Аннотация – В работе рассматривается вопрос влияния шероховатой поверхности на распространение волн в экранированных структурах с учетом конечной проводимости металла. Представлен краткий обзор наиболее значимых моделей таких структур, и предложен новый метод расчета, в основу которого положены принцип градиентной модели шероховатой поверхности и концепция парциальных волн Бриллюэна. С помощью разработанной методики получено простое выражение для эквивалентной проводимости шероховатой поверхности, которое можно использовать в известных формулах для погонных потерь различных направляющих структур.

Ключевые слова – шероховатая поверхность проводника, концепция Бриллюэна, градиентная модель, прямоугольный волновод.

Введение

Известно, что на характеристики направляющих структур существенное влияние оказывает качество обработки экранирующих поверхностей. При этом по мере повышения частоты требования к качеству обработки этих поверхностей возрастают и становятся соизмеримыми с технологическими возможностями. В связи с этим постоянно растет интерес к изучению влияния шероховатости поверхности на распространение волн в экранированных структурах с учетом конечной проводимости металла [1–3]. Как правило, описание моделей шероховатых поверхностей проводников производят, представляя профили шероховатостей в виде простых геометрических фигур. В некоторых моделях для упрощения анализа эти фигуры располагают периодически. Оценка потерь из-за шероховатостей часто сводится к вычислению поправочных коэффициентов. В данной работе предлагается модификация градиентного метода для определения влияния шероховатости поверхности на затухание волн в экранированных структурах.

1. Существующие модели

а) Первой широко известной моделью для учета потерь, вызванных шероховатостью поверхности, стала модель Морган, представляющая собой периодическую структуру типа зуба пилы [4]. Главное предположение в этой модели заключалось в том, что ток течет по краю шероховатой поверхно-

сти, что приводит к увеличению пути, проходимо-го током, а значит, и к дополнительным потерям мощности. Морган, используя метод конечных разностей при решении задачи для своей структуры, вывел отношение потерь мощности, рассеянной в проводнике с шероховатостью ($\alpha_{\text{шер}}$), к мощности, рассеянной в проводнике с гладкой поверхностью ($\alpha_{\text{глад}}$). Позже Хаммерстад и Джонсон получили эмпирическое выражение, основанное на результатах Моргана, используя только один параметр неровности – ее среднеквадратичную высоту ($h_{\text{ср}}$) [7]:

$$K = \frac{\alpha_{\text{шер}}}{\alpha_{\text{глад}}} = 1 + \frac{2}{\pi} \arctan \left(1,4 \left(\frac{h_{\text{ср}}}{\delta} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где δ – толщина скин-слоя. Однако полученное выражение насыщается, когда значение коэффициента K достигает двух. На практике же влияние шероховатости может быть более чем в два раза.

б) Модель полусфер, предложенная Холлом, предполагает моделирование шероховатой поверхности проводника в виде полусфер, выступающих из плоскости проводника [5]. Задача рассеяния плоской волны от полусферического выступа на плоскости решается методом зеркальных отображений. В итоге поправочный коэффициент задается в следующем виде:

$$K = \left[\operatorname{Re} \eta \left\{ \frac{3\pi}{4k^2} (\alpha + \beta) \right\} \right] + \quad (2)$$

$$+ \frac{\mu_0 \omega \delta}{4} \left\{ d_{\text{пик}}^2 - \pi \left(\frac{b_{\text{основ}}}{2} \right)^2 \right\} / \left[\frac{\mu_0 \omega \delta}{4} d_{\text{пик}}^2 \right],$$

где $d_{\text{пик}}$ – расстояние между пиками шероховатостей; $b_{\text{основ}}$ – длина основания неровности, k – волновой вектор; α_1 и β_1 – коэффициенты рассеяния первого порядка (они зависят от еще одного геометрического параметра – высоты неровности), $\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon'}}$. Таким образом, этот метод

основан на трех входных параметрах и требует трех статистических измерений.

в) Схожей с вышеописанной моделью является модель «снежного кома», предложенная Хурэем. Она предполагает моделирование шероховатой поверхности в виде пирамидального набора сферических частиц (снежных комков) на поверхности проводника [6]. Задача рассеяния и поглощения решается аналогично модели полусфер, но для каждой сферы отдельно. Обязательными параметрами являются диаметры сфер и их количество N , приходящееся на площадку. Используя принцип суперпозиции, можно получить результирующие потери в подобной структуре. Поправочный коэффициент шероховатости записывается следующим образом:

$$K = \frac{\frac{\mu_0 \omega \delta}{4} d_{\text{пик}}^2 + \sum_{n=1}^N \left| \text{Re} \eta \left\{ \frac{3\pi}{4k^2} (\alpha_1 + \beta_1) \right\} \right|}{\frac{\mu_0 \omega \delta}{4} d_{\text{пик}}^2}. \quad (3)$$

Сложность этого метода связана с тем, что основные параметры модели – диаметр сфер внутри пирамидок и их количество на площадке – невозможно наблюдать при измерении.

г) Цанг с соавторами осуществил более сложный анализ проблемы шероховатости поверхности [7]. В их работе были проанализированы двумерные случайные шероховатые поверхности на основе метода малых возмущений второго порядка и численного метода моментов. Затем был выполнен расчет коэффициента поглощения мощности для шероховатости поверхности с помощью гауссовой и экспоненциальной корреляционных функций. Расчеты и анализ показали, что коэффициент, описывающий потери, зависит от трех параметров: среднеквадратичной высоты, длины корреляции и корреляционной функции. После этого данный подход был распространен на анализ шероховатости трехмерной поверхности, где высота

поверхности изменяется в обоих горизонтальных направлениях. В этой работе авторы вывели формулу для поправочного коэффициента:

$$K = 1 + \frac{2h^2}{\delta^2} - \frac{4}{\delta} \int_0^\infty \int_0^\infty W(k_x, k_y) \text{Re} \left(\sqrt{\frac{2i}{\delta^2} - k_x^2 - k_y^2} \right) dk_x dk_y, \quad (4)$$

где $W(k_x, k_y)$ – функция спектральной плотности мощности.

д) Еще в одной работе [8] предлагается подход, основанный на концепции парциальных волн Бриллюэна и позволяющий учесть случайную шероховатость поверхности произвольной формы. В соответствии с ним задача нахождения затухания собственных волн направляющих электродинамических структур с шероховатыми экранирующими поверхностями сводится к достаточно хорошо исследованному случаю структур с идеально гладкими поверхностями. Эквивалентность реальной шероховатой поверхности и гладкой поверхности достигается внесением поправки в удельную проводимость материала последней, обеспечивающей равенство коэффициентов отражения электромагнитной волны от рассматриваемых поверхностей. Средний коэффициент отражения от шероховатой поверхности и коэффициент отражения от гладкой поверхности связаны соотношением

$$\bar{\Gamma}(\theta) = \Gamma(\theta) \int_{-\infty}^{\infty} \exp(ik_0 2\xi \cos\theta) \omega(\xi) d\xi, \quad (5)$$

где $\Gamma(\theta)$ – коэффициент отражения от гладкой поверхности; θ – угол падения волны; ξ – высота шероховатости; $\omega(\xi)$ – плотность вероятности.

Тем самым найти затухание волны, вызванное шероховатостью поверхности, можно, внося поправки в удельную проводимость материала экрана.

е) В статьях Голда и соавторов описана градиентная модель, которая не предполагает наличия резкой границы между диэлектриком и проводником [9]. Шероховатость моделируется как непрерывный переход проводимости от практически нуля в диэлектрике до объемной проводимости металла. Полагая, что профиль шероховатости для большинства поверхностей имеет нормальное распределение, градиент проводимости выражается, используя один метрологический параметр шероховатости – среднеквадратичную высоту $h_{\text{ср}}$.

$$\sigma(x) = \sigma_{\text{мет}} \int_{-\infty}^x PDF du = \sigma_{\text{мет}} \int_{-\infty}^x \exp\left(\frac{-u^2}{2h_{\text{ср}}^2}\right) du. \quad (6)$$

Выражение для скин-эффекта на шероховатой поверхности выводят из уравнений Максвелла для гармонических полей при проводимости, зависящей от местоположения $\sigma(x)$. Предполагая проводник немагнитным с поверхностью в плоскости уз, приходят к дифференциальному уравнению только в одном измерении:

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} + j\omega\mu_0\sigma B_y - \frac{\partial}{\partial x} \ln \sigma \frac{\partial B_y}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

В этом выражении третье слагаемое получается из-за проводимости, зависящей от местоположения $\sigma(x)$. Без третьего слагаемого σ будет просто постоянной величиной и получится уравнение Гельмгольца, описывающее классический скин-эффект на идеально гладких поверхностях.

2. Предлагаемая модель

В данной работе предлагается модификация градиентного метода для определения влияния шероховатости поверхности на затухание волн в экранированных структурах. Любую шероховатую поверхность можно разбить на слои, приняв за начало разбиения линию, проходящую через точку максимальной глубины впадины профиля, и сделав последним слоем разбиения слой, включающий в себя точку максимальной высоты пика профиля (рис. 1). При этом эффективная проводимость каждого получившегося слоя будет находиться в интервале от проводимости металла до проводимости воздуха, изменяясь от первого слоя к N -му. Характер изменения эффективной проводимости от слоя к слою определяется профилем распределения шероховатостей.

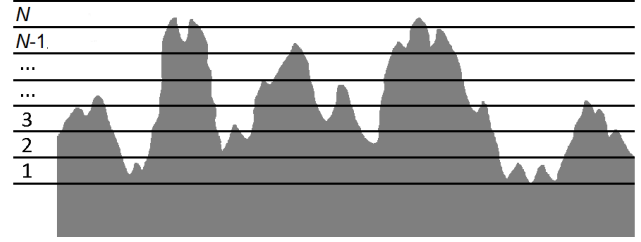


Рис. 1. Разбиение шероховатой поверхности на слои
Fig. 1. Splitting a rough surface into layers

Исследование отражения электромагнитной волны от рассматриваемой шероховатой поверхности проводится методом ориентированных графов, который позволяет учесть многократные отражения волны от границ каждого слоя. Ориентированный граф рассматриваемой многослойной структуры представлен на рис. 2.

Элементы матриц, описывающих границы между соседними слоями, находятся в соответствии с формулами Френеля:

$$\begin{aligned} \Gamma_{12} &= \frac{Z_m(\omega, \sigma) - Z_{m+1}(\omega, \sigma)}{Z_m(\omega, \sigma) + Z_{m+1}(\omega, \sigma)}, \\ \Gamma_{21} &= \frac{Z_{m+1}(\omega, \sigma) - Z_m(\omega, \sigma)}{Z_{m+1}(\omega, \sigma) + Z_m(\omega, \sigma)}, \\ \Gamma_{12} &= \frac{2Z_m(\omega, \sigma)}{Z_m(\omega, \sigma) + Z_{m+1}(\omega, \sigma)}, \\ \Gamma_{21} &= \frac{(\omega \sigma)}{Z_m(\omega, \sigma) + Z_{m+1}(\omega, \sigma)} \end{aligned} \quad (8)$$

где m – номер слоя разбиения; Γ – коэффициент отражения; T – коэффициент прохождения.

После этого можно строить матрицы рассеяния и матрицы прохождения для каждого полученного при разбиении слоя. Важным свойством матриц передачи является то, что матрица каскадного соединения ряда элементов равна произведению матриц передачи этих элементов. Таким образом,

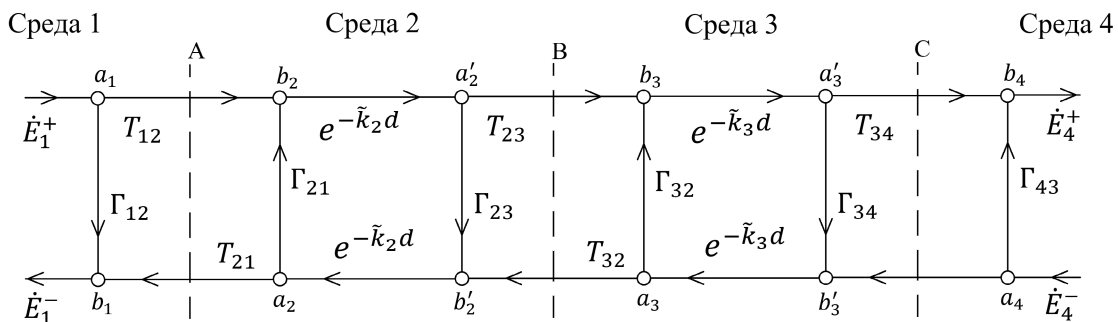


Рис. 2. Ориентированный граф модели шероховатой поверхности
Fig. 2. Oriented graph of a rough surface model

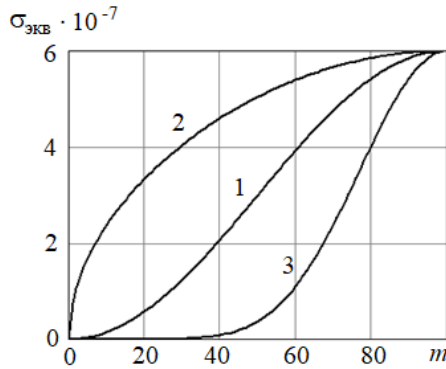


Рис. 3. Зависимость удельной проводимости от номера слоя
 Fig. 3. Dependence of the conductivity on the layer number

результатирующая матрица передачи равна произведению матриц передачи отдельных слоев.

Соответствующая ей матрица рассеяния дает коэффициент отражения волны от рассматриваемой структуры, что позволяет найти эквивалентную проводимость рассматриваемой шероховатой поверхности, то есть проводимость идеально гладкой поверхности, имеющей такой же коэффициент отражения, как и шероховатая поверхность. Такое определение эквивалентной проводимости, основанное на концепции парциальных волн Бриллюэна, представляется наиболее адекватным для экранированных направляющих структур.

В случае направляющих электродинамических структур материал экранирующих поверхностей имеет высокую удельную проводимость, что позволяет аппроксимировать зависимость коэффициента отражения от частоты и получить приближенное аналитическое выражение для эквивалентной удельной проводимости:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{4\omega\epsilon_0}{1 - \sqrt{1 - 4(1 - |S_{1,1}|)^2}} \quad (9)$$

Полученную таким образом эквивалентную проводимость можно либо подставить в известные выражения для вычисления потерь в волноводах, либо использовать при моделировании направляющих структур в САПР. В случае основной волны прямоугольного волновода можно учесть шероховатость экранирующих поверхностей, подставив эквивалентную удельную проводимость в известное выражение для коэффициента затухания:

$$\alpha = \frac{\omega \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma_{\text{экв}} \mu_0} \left[\frac{1}{2} + \frac{b}{a} \left(\frac{\pi c}{a \omega} \right)^2 \right]}}{cb \sqrt{1 - \left(\frac{\pi c}{a \omega} \right)^2}}, \quad (10)$$

где a и b – поперечные размеры волновода.

На рис. 3 в качестве примера представлен результат расчета профиля эквивалентной удельной проводимости для различных профилей шероховатостей поверхности.

С использованием предложенной методики проведен расчет потерь в прямоугольном волноводе сечением $1,1 \times 0,55$ мм при шероховатостях экранирующих поверхностей 1 мкм, 0,5 мкм и 0,1 мкм для приведенных профилей шероховатостей. Результаты расчета показаны на рис. 4–6.

Как видно из графиков, погонные потери волновода зависят не только от величины шероховатостей экранирующей поверхности, но и от их профиля.

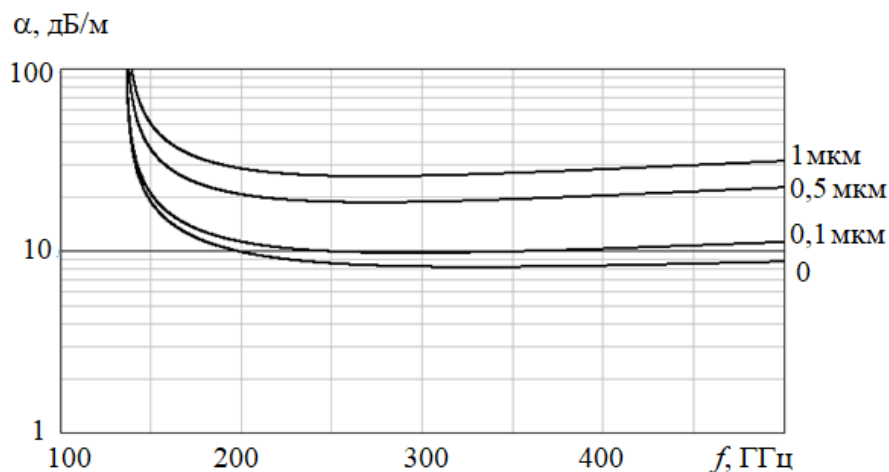


Рис. 4. Зависимость от частоты погонных потерь прямоугольного волновода сечения $1,1 \times 0,55$ мм с шероховатыми стенками 1-го профиля

Fig. 4. Dependence on the frequency of linear losses of a rectangular waveguide with a cross section of $1,1 \times 0,55$ mm with rough walls of the 1st profile

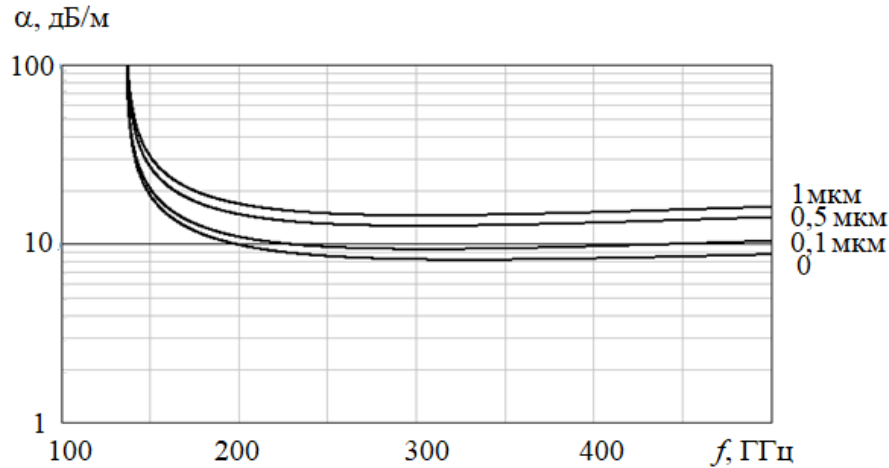


Рис. 5. Зависимость от частоты погонных потерь прямоугольного волновода сечения $1,1 \times 0,55$ мм с шероховатыми стенками 2-го профиля

Fig. 5. Dependence on the frequency of linear losses of a rectangular waveguide with a cross section of $1,1 \times 0,55$ mm with rough walls of the 2nd profile

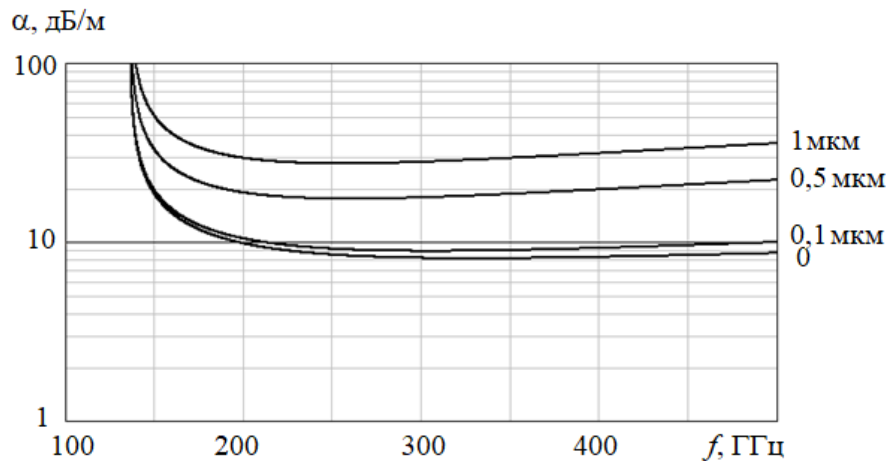


Рис. 6. Зависимость от частоты погонных потерь прямоугольного волновода сечения $1,1 \times 0,55$ мм с шероховатыми стенками 3-го профиля

Fig. 6. Dependence on the frequency of linear losses of a rectangular waveguide with a cross section of $1,1 \times 0,55$ mm with rough walls of the 3rd profile

Заключение

В данной работе рассмотрен вопрос оценки потерь в электродинамических направляющих структурах с шероховатыми экранирующими поверхностями. Представлено описание наиболее интересных подходов и предложена новая методика расчета, основанная на концепции парциальных волн Бриллюэна. С помощью разработанной методики получено простое выражение для экви-

валентной проводимости шероховатой поверхности, которое может быть использовано в известных выражениях для погонных потерь или при моделировании различных направляющих структур в САПР. Приведены результаты расчетов для прямоугольного волновода с экранирующими поверхностями с шероховатостями различного профиля. Показано, что на величину потерь влияет не только величина неровностей, но и их распределение.

Список литературы

1. Ding R., Tsang L., Braunisch H. Random rough surface effects in waveguides using mode matching technique and the method of moments // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2012. Vol. 2. № 1. P. 140-148. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2011.2175923>.
2. Бирюков В.В., Грачев В.А., Лобин С.Г. Круглый экранированный волновод с шероховатой внутренней поверхностью // Антенны. 2018. № 10. С. 54-59. DOI: <https://doi.org/10.18127/j03209601-201810-06>.
3. Gold G., Helmreich K. Surface impedance concept for modeling conductor roughness // 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. 2015. P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2015.7167013>.

4. Hammerstad E., Jensen O. Accurate models for microstrip computer-aided design // 1980 IEEE MTT-S International Microwave symposium Digest. 1980. P. 407–409. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1980.1124303>.
5. Multigigahertz causal transmission line modeling methodology using a 3-D hemispherical surface roughness approach / S. Hall [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2007. Vol. 55. № 12. P. 2614–2624. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.910076>.
6. Impact of copper surface texture on loss: A model that works / P.G. Huray [et al.] // DesignCon 2010. 2010. Vol. 1. P. 462–483.
7. Tsang L., Gu X., Braunisch H. Effects of random rough surface on absorption by conductors at microwave frequencies // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2006. Vol. 16. № 4. P. 221–223. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.872109>.
8. Бирюков В.В. Расчет потерь в прямоугольном волноводе с шероховатыми экранирующими поверхностями // Антенны. 2016. № 7. С. 53–57.
9. Lomakin K., Gold G., Helmreich K. Analytical waveguide model precisely predicting loss and delay including surface roughness // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018. Vol. 66. № 6. P. 2649–2662. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2827383>.

References

1. Ding R., Tsang L., Braunisch H. Random rough surface effects in waveguides using mode matching technique and the method of moments. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 140–148. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPM.2011.2175923>.
2. Birjukov V.V., Grachev V.A. Lobin S.G., Round shielded waveguide with a rough inner surface. *Antenny*, 2018, no. 10, pp. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.18127/j03209601-201810-06>. (In Russ.)
3. Gold G., Helmreich K. Surface impedance concept for modeling conductor roughness. *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2015.7167013>.
4. Hammerstad E., Jensen O. Accurate models for microstrip computer-aided design. *1980 IEEE MTT-S International Microwave symposium Digest*, 1980, pp. 407–409. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1980.1124303>.
5. Hall S. et al. Multigigahertz causal transmission line modeling methodology using a 3-D hemispherical surface roughness approach. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, vol. 55, no. 12, pp. 2614–2624. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.910076>.
6. Huray P.G. et al. Impact of copper surface texture on loss: A model that works. *DesignCon 2010*, 2010, vol. 1, pp. 462–483.
7. Tsang L., Gu X., Braunisch H. Effects of random rough surface on absorption by conductors at microwave frequencies. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2006, vol. 16, no. 4, pp. 221–223. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.872109>.
8. Birjukov V.V. Calculation of losses in a rectangular waveguide with rough shielding surfaces. *Antenny*, 2016, no. 7, pp. 53–57. (In Russ.)
9. Lomakin K., Gold G., Helmreich K. Analytical waveguide model precisely predicting loss and delay including surface roughness. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, vol. 66, no. 6, pp. 2649–2662. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2827383>.

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2020, vol. 23, no. 1, pp. 14–20

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.2.14-20

Received 27 April 2020
Accepted 29 May 2020

Gradient method for calculating losses in guide electrodynamic structure with imperfect shielding surfaces

Vladimir V. Biryukov, Sergey G. Lobin

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev
24, Minin Street,
Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Abstract – The paper considers the influence of a rough surface on the propagation of waves in shielded structures, taking into account the finite conductivity of the metal. A brief overview of the most significant models of such structures is presented and a new calculation method is proposed, which is based on the principle of a gradient model of a rough surface and the concept of partial Brillouin waves. Using the developed method, a simple expression is obtained for the equivalent conductivity of a rough surface, which can be used in well-known formulas for linear losses of various guide structures.

Keywords – rough surface of a conductor, Brillouin concept, gradient model, rectangular waveguide.

Информация об авторах

Бирюков Владимир Валерьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики и техники оптической связи Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия.

Область научных интересов: электродинамика и техника СВЧ.
E-mail: birukovvv@mail.ru

Лобин Сергей Геннадьевич, аспирант кафедры физики и техники оптической связи Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия.

Область научных интересов: электродинамика и техника СВЧ.
E-mail: s.lobin@live.ru

Information about the Authors

Vladimir V. Biryukov, Doctor of Technical Sciences, associate professor, professor of the Department of Physics and Optical Communication Technology of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod, Russia.

Research interests: electrodynamics and microwave technology.
E-mail: birukovvv@mail.ru

Sergey G. Lobin, postgraduate student of the Department of Physics and Optical Communication Technology, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod, Russia.

Research interests: electrodynamics and microwave technology.
E-mail: s.lobin@live.ru

Неганов, В.А.

Современная теория и практические применения антенн: монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисл. акад. Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.

Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П.

ISBN 978-5-88070-222-0

УДК 621.396.67

ББК 32.845

Современная теория
и практические применения
антенн

Издательство «Радиотехника»
Москва, 2009

Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплен примерами применения многолучевых антенн.

Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.