

РАСШИРЕННЫЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ГЛАДКОСТИ

д.т.н. Г.В. Ермаков, Р.В. Воробйов
(представил д.ф.-м.н., проф. В.Ф. Клепиков)

Получен расширенный электродинамический критерий гладкости, учитывающий форму корреляционной функции статистически изотропной шероховатости и спектр излучения, который необходимо эффективно рассеять. Численное определение критерия связано с расчётами коэффициента гладкости среднестатистической канавки по ранее опубликованной методике.

Введение. При производстве параболических антенн крайне высокочастотного (КВЧ) диапазона предъявляются высокие требования к точности изготовления рефлекторов. Считается, что чем выше класс шероховатости отражающей поверхности рефлектора, тем он лучше. Однако такие рефлекторы способны фокусировать как радиоволны рабочего диапазона, так и инфракрасные (ИК) волны естественных и искусственных источников интенсивного излучения, что приводит к перегреву облучателя. Данный эффект «засветки» встречается в спутниковых системах и радиоастрономии [1].

Одним из способов борьбы с эффектом «засветки» является нанесение на отражающей поверхности рефлектора шероховатостей со строго определёнными статистическими параметрами. Такой рефлектор должен рассеивать ИК излучение с определённым спектром, не ухудшая характеристики направленности параболической антенны в рабочем диапазоне. Существующие требования к точности изготовления рефлекторов основаны на критерии Рэля и критериях, разработанных в рамках статистической теории антенн [2]. Данные критерии не включают в себя все параметры корреляционной функции шероховатостей отражающей поверхности и не зависят от спектрального состава рассеиваемого излучения.

В [3 – 5] предложен новый электродинамический критерий гладкости поверхности, покрытой V-образными, трапецидальными и гауссовыми канавками. Он основан на теории скин-эффекта, электродинамической и квантовомеханической моделях взаимодействия электромагнитных волн с полостями.

В [6 – 8] представлены расчётные и измеренные значения коэффициента отражения шероховатостей различного класса, которые подтверждают достоверность разработанного электродинамического критерия гладкости. Однако в этих работах не было представлено влияние спектрального состава рассеиваемого излучения на критерий гладкости и значение коэффициента отражения от поверхности, изготовленной по данному критерию.

Следовательно, **целью работы является** получение расширенного электродинамического критерия гладкости, учитывающего спектр рассеиваемого ИК излучения.

Результаты исследований. Пусть на шероховатую поверхность падает под углом падения θ неполяризованное излучение на рабочей длине волны λ_p и неполяризованное излучение ИК диапазона с максимальной длиной волны λ_r . Шероховатая поверхность представляет собой канавки, которые расположены статистически изотропно. Профиль среднестатистической неровности (канавки) имеет гауссову форму. Будем считать, что статистические параметры корреляционной функции шероховатой поверхности соответствуют геометрическим параметрам среднестатистической неровности. Данные условия соответствуют шероховатости, образованной на поверхности металла, в результате торцевого фрезерования. Необходимо определить максимальную глубину и ширину гауссовой канавки, при которой для λ_p поверхность является гладкой, а для λ_r шероховатой.

Любую неполяризованную волну можно разложить на две волны с ортогональными поляризациями и одинаковой среднестатистической амплитудой. Таким образом, критерием определения параметров гладкой поверхности для заданной длины волны λ_p является

$$\begin{cases} A_E|_{\lambda \geq \lambda_p} = 1 \wedge A_H|_{\lambda \geq \lambda_p} = 1; \\ A_E|_{\lambda < \lambda_p} < 1 \wedge A_H|_{\lambda < \lambda_p} < 1, \end{cases}$$

где A_E – коэффициент гладкости канавки при падении на её апертуру Е-волны; A_H – коэффициент гладкости канавки при падении на её апертуру Н-волны.

Используя методику, представленную в [3], определим параметры шероховатостей металлических поверхностей, обработанных механическим методом и гладких для падающего неполяризованного излучения с длиной волны 1 мм.

В табл. 1 представлены параметры гладкой гауссовой канавки при падении на её апертуру Н- и Е-волн.

Таблица 1

Параметры гауссовой канавки гладкой для волны с $\lambda = 1$ мм

Ме- талл	Е-волна				Н-волна			
	$D_{крЕ}/$ $L_{кр Е}$	$L_{гл},$ мкм	$D_{гл},$ мкм	$\lambda/L_{гл}$	$D_{кр Н}$ $/L_{крН}$	$L_{гл},$ мкм	$D_{гл},$ мкм	$\lambda/L_{гл}$
Al, Be, Mg, Ti	0,01	42,63	1,23	23,46	0,01	$51 \cdot 10^3$	471	0,02
	0,1	42,63	12,3	23,46	0,1	$4,85 \cdot 10^3$	430	0,21
	0,5	42,63	61,49	23,46	0,5	897	370	1,11
	1	42,63	123	23,46	1	416	332	2,4
	5	42,63	614,9	23,46	5	55,3	212	18,1
	10	42,63	$1,23 \cdot 10^3$	23,46	10	19,7	152	50,8
	100	42,63	$12,3 \cdot 10^3$	23,46	100	0,32	26,8	3120
	5,9	42,63	196	23,46	6	42,63	196	23,46

В табл. 1 были приняты следующие обозначения: $D_{крЕ(Н)}$ – ширина апертуры критической канавки при падении Е- (Н-) волны; $L_{крЕ(Н)}$ – глубина критической канавки при падении Е- (Н-) волны; $D_{гл}$ – ширина апертуры гладкой канавки; $L_{гл}$ – глубина гладкой канавки, λ – длина падающей волны.

Из табл. 1 следует, что канавка будет гладкой для падающего неполяризованного излучения, если её параметры одинаковы для Е- и Н-волн ($L_{гл} = \lambda/23,46$; $D_{гл}/L_{гл} = 4,6$).

Таким образом, аналогично критерию Рэлея, запишем полученный электродинамический критерий гладкости гауссовой канавки как

$$R_{a\gamma} \leq \frac{\lambda}{23,46} \cos \theta \quad \text{при} \quad D_{\gamma} = 4,6 R_{a\gamma}, \quad (1)$$

где $R_{a\gamma}$ – среднее арифметическое отклонение высоты шероховатости; D_{γ} – ширина апертуры гауссовой канавки; θ – угол между нормалью к поверхности и направлением падения волны.

На рис. 1 представлены модули коэффициентов отражения R_{λ} спектральных составляющих Е-, Н- и неполяризованной волны от поверхности с гауссовыми канавками, изготовленными по критерию (1). На этом же рисунке представлен модуль коэффициента отражения R_{λ} спектральных составляющих от идеально гладкой поверхности (удовлетворяющей условию $L_{гл} \gg \lambda$, $D_{гл} \gg \lambda$), рассчитанный по формуле Хэгена-Рубенса [9]:

$$R_{\lambda} = 1 - 0,365(\lambda\sigma)^{-1/2} + 0,0667(\lambda\sigma)^{-1} - 0,006(\lambda\sigma)^{-3/2} - \dots ,$$

где σ – удельная проводимость материала поверхности.

Из рис. 1 видно, что для рабочей длины волны $\lambda = 1$ мм, шероховатая поверхность имеет коэффициент отражения $R_{\lambda\text{ш}}$ такой же, как и для идеально гладкой поверхности $R_{\lambda\text{г}}$. В оптическом и ИК диапазоне максимальное отклонение $R_{\lambda\text{ш}}$ от $R_{\lambda\text{г}}$ составляет не более 3 %, что не приводит к существенному рассеянию ИК волн. Причиной этого является пологость канавок, изготовленных по критерию (1). Это говорит о неэффективности критерия для защиты облучателей параболических антенн от воздействия интенсивного ИК излучения. Коэффициент гладкости таких канавок близок к 1.

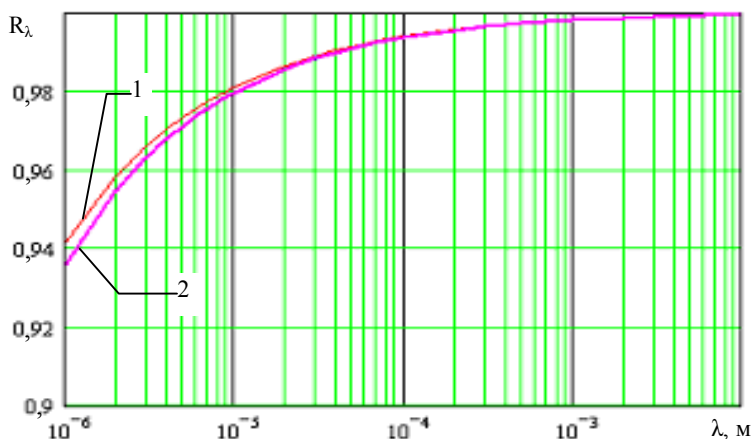


Рис. 1. Спектральный коэффициент отражения поверхности, покрытой гауссовыми канавками, изготовленными по критерию (1):
1 – идеально плоская поверхность;
2 – падение E-, H-неполяризованной волны

Для уменьшения коэффициента отражения в видимом и ИК диапазоне необходимо уменьшить коэффициент гладкости в этих диапазонах волн. Для этого следует сужать канавку. Чтобы на рабочей длине волны коэффициент отражения был равен единице для хаотической поляризации, глубина канавки должна остаться неизменной.

Из табл. 1 видно, что сужение канавки не влияет на спектральный коэффициент отражения для E-волны. Для H-волны при сужении канавки поле затухает быстрее. Следовательно, поверхность с такими канавками будет гладкой не только на рабочей длине волны, но и для более коротковолнового излучения.

Таким образом, эффективным критерием определения параметров гладкой поверхности для заданной длины волны λ_p и шероховатой для оптических и ИК волн является

$$\begin{cases} A_E \Big|_{\lambda \geq \lambda_p} = 1 \wedge A_H \Big|_{\lambda \geq \lambda_\Gamma} = 1; \\ A_E \Big|_{\lambda < \lambda_p} < 1 \wedge A_H \Big|_{\lambda < \lambda_\Gamma} < 1, \end{cases}$$

где λ_Γ – граничная (минимальная) длина Н-волны, для которой поверхность будет гладкой. Величина λ_Γ является граничной максимальной длиной волны спектра рассеиваемого излучения.

На рис. 2 и 3 представлены спектральные коэффициенты отражения Е-, Н- и неполяризованной волны от поверхности с гауссовыми канавками, изготовленными соответственно по критериям:

$$R_{a\gamma} \leq \frac{\lambda}{23,46} \cos \theta \quad \text{при} \quad D_\gamma = 0,783 R_{a\gamma}; \quad (2)$$

$$R_{a\gamma} \leq \frac{\lambda}{23,46} \cos \theta \quad \text{при} \quad D_\gamma = 0,146 R_{a\gamma}. \quad (3)$$

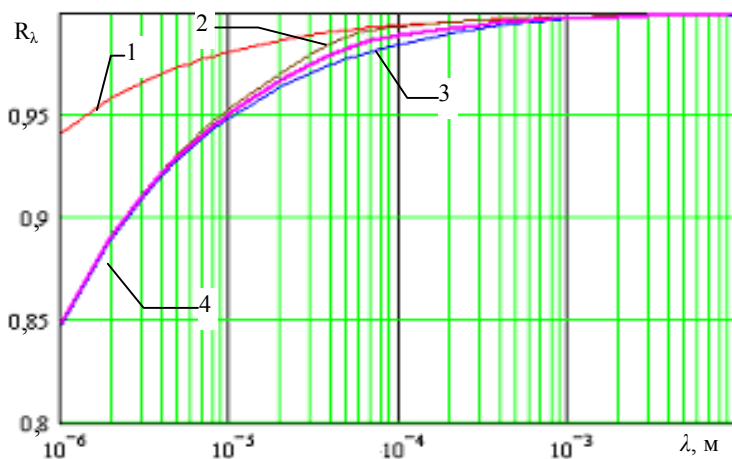


Рис. 2. Спектральный коэффициент отражения поверхности, покрытой гауссовыми канавками, изготовленными по критерию (2):
1 – идеально плоская поверхность (1); 2 – падение Е-волны;
3 – падение Н-волны; 4 – падение неполяризованной волны

Критерий (2) получен для $\lambda_\Gamma = 0,1$ мм; критерий (3) получен для $\lambda_\Gamma = 15$ мкм. Из рис. 2 и 3 видно, что при сужении канавки коэффициент отражения в оптическом и ИК диапазоне уменьшается, а для рабочих и

более длинных волн остаётся равным коэффициенту отражения от гладкой поверхности.

Несмотря на то, что при сужении канавки поверхность является гладкой для более коротких Н-волн, суммарный коэффициент отражения неполяризованного излучения существенно уменьшается в видимом и ИК диапазоне, т.е. поверхность становится более шероховатой.

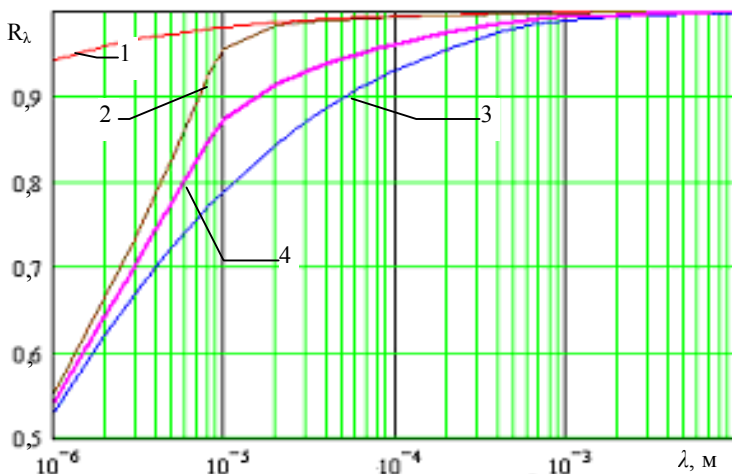


Рис. 3. Спектральный коэффициент отражения поверхности, покрытой гауссовыми канавками, изготовленными по критерию (3): 1 – идеально плоская поверхность (1); 2 – падение Е-волны; 3 – падение Н-волны; 4 – падение неполяризованной волны

Выводы. Расширенный электродинамический критерий гладкости необходим для определения технологических параметров изготовления рефлекторов параболических антенн КВЧ диапазона, устойчивых к эффекту «засветки». Данный критерий зависит не только от угла падения и длины волны полезного излучения, но и от верхней граничной длины волны интенсивного ИК излучения.

В численном виде критерий гладкости можно представить только для определённого спектра сигнала. При изменении параметров спектра необходим пересчёт критерия гладкости по методике, представленной в [3]. Согласно расширенному электродинамическому критерию гладкости на отражающую поверхность рефлектора необходимо наносить шероховатости с нестандартизированными параметрами (шаг неровности меньше её высоты) [10]. *Предметом дальнейших исследований* разра-

ботанного критерия гладкости должно стать сравнение индикатрис рассеяния шероховатыми поверхностями, изготовленными по данному критерию и по известным критериям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробйов Р.В. Эффект «засветки» Солнцем земных станций перспективных систем спутниковой связи военного назначения // *Аэрокосмическая техника и технология*. – Х.: НАУ «ХАИ». – 2001. – № 22. – С. 39 – 44.
2. Шифрин Я.С. Статистическая теория антенн // *Справочник по антенной технике*. – М.: ИПРЖР. – 1997. – С. 189 – 199.
3. Воробйов Р.В., Бутакова С.В. Электродинамический критерий гладкости поверхности с шероховатостью в виде гауссовых канавок для Е волн // *Труды 12 международной конференции “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии”*. – Севастополь, 9 – 13 сентября 2002. – С. 317 – 318.
4. Vorobjov R.V., Butakova S.V. Electrodynamic criterion of smoothness as expanded Rayleigh's criterion // *Proc. of the 27th URSI General Assembly. Maastricht, the Netherlands*. – 17-24 August 2002. – [электр. ресурс]. – CD-ROM ursiga02 (401125376 bytes) Commission F3, p0116.pdf. – 4 p.
5. Бутакова С.В., Воробйов Р.В. Электродинамический критерий гладкости // *Радиотехника*. – Х.: ХНУРЭ. – 2002. – № 124. – С. 61 – 67.
6. Воробйов Р.В., Бутакова С.В. Частотная селекция электромагнитных волн шероховатым зеркалом // *Труды 14 международной конференции “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии”*. – Севастополь, 9 – 13 сентября 2004. – С. 317 – 318.
7. Воробйов Р.В. Коефіцієнт відбиття шорстких металевих поверхонь у міліметровому діапазоні радіохвиль // *Збірник наукових праць XI ВПС*. – Х.: XI ВПС. – 2003. – Вип. 1 (9). – С. 70 – 75.
8. Vorobjov R.V. Reflectivity of rough metal surfaces over millimeter wave range // *Proc. of IVth International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT'03. Sevastopol*, 9 – 12.09. 2003. – P. 268 – 270.
9. Мучник Г.Ф., Рубашов И.Б. Методы теории теплообмена. Тепловое излучение. – М.: Высш. шк., 1974. – 272 с.
10. Суслев А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

Поступила 14.01.2005

ЕРМАКОВ Геннадий Валентинович, доктор техн. наук, доцент, доцент кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. В 1984 году окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных исследований – нестационарная электродинамика.

ВОРОБЙОВ Руслан Владимирович, преподаватель Харьковского университета Воздушных Сил. В 1997 году окончил Харьковский институт лётчиков ВВС. Область научных исследований – теория антенн, электродинамика, распространение радиоволн. E-mail: Vorbut@ukr.net .