

УДК 535.42

Отражательная способность металлизированных углепластиковых антенн

¹ Николенко А. С., ¹ Копосова Е. В., ¹ Паршин В. В., ¹ Серов Е. А.

¹ *Институт прикладной физики Российской академии наук*
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия
nikolenko@ipfran.ru, ev_koposova@mail.ru, parsh@appl.sci-nnov.ru,
serov@appl.sci-nnov.ru

Получено: 9 февраля 2019 г.

Отрецензировано: 20 февраля 2019 г.

Принято к публикации: 3 марта 2019 г.

Аннотация: *Представлены результаты исследования отражательной способности металлизированных углепластиковых панелей для антенн спутниковых радиометров ММ и СубММ диапазонов. Исследовались потери на отражение панелей с наклеенной полосами металлизированной полиимидной пленкой и влияние нахлеста между полосами пленки на величину потерь на отражение. Численный расчет на основе рассмотрения задачи рассеяния плоской волны на реальной структуре нахлеста показал, что для поляризации электрического поля вдоль и поперек нахлеста, потери на отражение на частоте 200 ГГц различаются на ~ 13 %.*

Ключевые слова: *антенны, ММ и СубММ диапазон, потери на отражение, дифракция, резонатор Фабри — Перо.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Николенко А. С., Копосова Е. В., Паршин В. В., Серов Е. А. Отражательная способность металлизированных углепластиковых антенн // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 1. С. 52—59.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Николенко, А. С. Отражательная способность металлизированных углепластиковых антенн / А. С. Николенко, Е. В. Копосова, В. В. Паршин, Е. А. Серов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 1, № 1. — С. 52—59.

Reflectivity of carbon-fiber metallized antennas

A. S. Nikolenko¹, E. V. Kuposova¹, V. V. Parshin¹, and E. A. Serov¹

¹ *Federal Research Center Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences "IAP RAS"*

*46, Ul'yanov Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation
nikolenko@ipfran.ru, ev_kuposova@mail.ru, parsh@appl.sci-nnov.ru,
serov@appl.sci-nnov.ru*

Received: February 9, 2019

Peer-reviewed: February 20, 2019

Accepted: March 3, 2019

Abstract: *The results of reflectivity study of metalized carbon-fiber panels for antennas of satellite radiometers in the MM and SubMM ranges are presented. The panels reflection losses with metalized polyimide film strips pasted on them and the effect of overlap between the film strips on the reflection losses were investigated. A numerical calculation based on consideration of the problem of plane wave scattering at the real overlap structure showed that for the electric field polarization along and across the overlap, the reflection loss at frequency 200 GHz differs by ~ 13 %.*

Keywords: *antennas, MM and SubMM range, reflection loss, diffraction, Fabry–Perot resonator.*

For citation (IEEE): A. S. Nikolenko et al. "Reflectivity of carbon-fiber metallized antennas," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 52–59, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.1.05

1. Введение

Внимание к исследованиям отражательной способности (потерь на отражение (далее ПО)) вызвано созданием спутниковых и наземных телескопов ММ и СубММ диапазонов с высокочувствительными охлаждаемыми до криогенных температур приемниками. Потери в антенне или, другими словами, ее собственное излучение, могут существенно увеличить шумовую температуру такого приемного модуля. Поэтому первой информацией для расчета шумовых характеристик антенн, работающих на высокочувствительные охлаждаемые приемники, является величина потерь на отражение и соответственно вносимая шумовая температура.

Например, для высокочистого «идеального» золота на частоте 100 ГГц коэффициент отражения $R = 0,999$, соответственно коэффициент

излучения или ПО $P = I - R = 0,001$. Тогда для температуры 300 К получаем 0,3 К шумовой температуры, вносимой за одно отражение. Учитывая, что обычно в тракте не менее трех-пяти отражателей, получаем более 1 К вносимой нестабильной шумовой температуры. Ситуация с реальными отражателями на порядок [1, 2] хуже.

Принимая во внимание, что, например, для проектов по исследованию реликтового излучения («Planck», «Herschel», «Миллиметр») заявлялось измерение анизотропии излучения на уровне $\Delta T/T \sim 10^{-6}$ К [3], поэтому уменьшению потерь при отражении и, особенно, поляризационным характеристикам антенн уделяется особое внимание.

Сегодня углепластик — популярный, сверхлегкий конструкционный материал для антенн ММ и СубММ диапазонов (рис. 1). Собственно, углепластиковая панель — это слои из склеенных параллельно расположенных угольных волокон (6 или 8 слоев с поворотом каждого слоя на 60° или 45°). Две такие пластины, разделённые сотовой структурой из фольги, образуют прочную и в целом механически изотропную конструкцию, т.н. «сэндвич» — фото на рис. 1. Такая конструкция обеспечивает в целом механическую изотропность, но ПО, когда напряженность электрического поля E параллельна волокнам верхнего слоя, составляют 3—4 %, и около 30 %, когда E поперек, что совершенно неприемлемо. Потому отражающая поверхность углепластика металлизирована [1, 2]. В основном применяются тонкие слои алюминия или золота, нанесенного на полиимидную пленку, которая наклеивается на углепластик.

Однако проведенные исследования такой металлизации выявили, что даже охлажденные до 80 К отражатели имеют ПО, превышающие расчетные, в несколько раз, что приводит к существенному увеличению шумовой температуры криогенно охлаждаемых высокочувствительных приемных модулей. Эта ситуация достаточно подробно изложена в [4,5]. Мы же остановимся на другом аспекте проблемы металлизации.

Металлизация криволинейных поверхностей (реальный профиль антенны — параболический) углепластика осуществляется путем наклеивания металлизированной полиимидной пленки. Полиимидная пленка прочна, химически инертна, выдерживает большие температуры (до 600 °С), но не эластична. Поэтому для металлизации криволинейных отражателей используется довольно узкая полиимидная лента (рис. 1). Естественно возникает вопрос о влиянии стыков между лентами в виде зазора или нахлеста.

В настоящей работе исследовались ПО панелей с наклеенной полосками металлизированной полиимидной пленкой, влияние нахлеста реального профиля на величину потерь на отражение и деполяризацию.

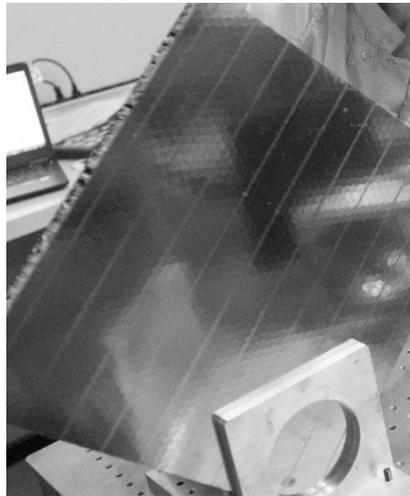


Рис. 1. Фото антенного рефлектора с наклеенной полосками металлизированной полиимидной плёнкой.

Fig. 1. Photo of antenna reflector with metalized polyimide film strips pasted on

2. Экспериментальное измерение потерь на отражение

Исследуемые образцы представляют собой углепластиковые «сэндвичи», с наклеенными внахлест полиимидными лентами шириной 30 мм, толщиной 30 мкм, металлизированными золотом толщиной $\sim 0,3$ мкм, имеющих размер перекрытой области ~ 300 мкм. Ленты приклеены золотением к углепластику (ранее было выявлено, что форма стыка между лентами в виде нахлеста вносит меньшие, по сравнению с зазором, ПО). Профиль нахлеста приведен на рис. 2.

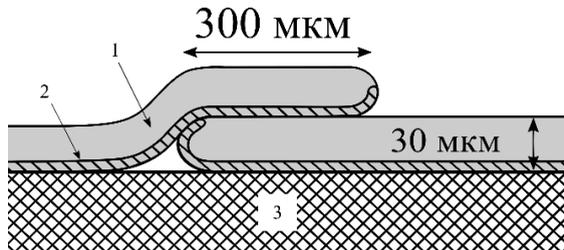


Рис. 2. Профиль нахлеста используемый для расчета ПО. 1 — полиимидная полоса, 2 — золотое напыление 0,3 мкм, 3 — углепластиковая подложка.

Fig. 2. Overlap profile used for calculations. 1 – polyimide strip, 2 – gold plating 0,3 mkm, 3 – carbon fiber substrate

Для измерений ПО использовался спектрометр на основе высокодобротного квазиоптического резонатора Фабри — Перо. Методика измерений подробно описана [6, 7]. Образец устанавливался с возможностью перемещения перпендикулярно оси резонатора и вращения вокруг его оси. Резонаторный спектрометр позволяет также проводить измерения ПО под углом 45° , для E и H поляризаций [7] на основе которых можно рассчитать ПО и деполяризацию для антенн реальной формы.

Измерения проводились при расположении пятна засветки на нахлесте и на поверхности без неоднородностей для двух направлений поляризации электрического поля E — параллельно и перпендикулярно нахлесту в нескольких местах вдоль него на частотах от 50 ГГц до 200 ГГц. Диаметры пятна засветки резонатора для этих частот равны 26 мм и 13 мм соответственно. На рис.3. приведены зависимости ПО для частот 115 ГГц и 190 ГГц, для двух направлений поляризации E , при смещении пятна засветки от центра перехлеста (координата «0» на оси абсцисс) в обе стороны. Координата «12» соответствует положению пятна засветки на месте без перехлеста. Видно, что для поперечной стыку поляризации E нахлест является неоднородностью, которая существенно меняет ПО по сравнению с его величиной на однородной поверхности. Для параллельной поляризации — влияние нахлеста несущественно.

Частотная зависимость ПО от поверхности без неоднородностей приведена на рис.4. Нижняя кривая — теоретический расчет для чистого золота по формуле Хагена — Рубенса:

$$\frac{P}{P_0} = 1 - R = 2\sqrt{\frac{f}{\sigma}},$$

где P/P_0 — потери на отражение, R — коэффициент отражения, f — частота, σ — проводимость на постоянном токе. Отсюда была рассчитана проводимость отражателя: $\sigma \approx 2,25 \times 10^7$ [Ом·м] $^{-1}$ (табличное значение для золота: $\sigma = 4,5 \times 10^7$ [Ом·м] $^{-1}$).

Отсутствие поляризационных эффектов при измерении на участках панелей без неоднородностей указывает, что заявленная толщина слоя золота 0,3 мкм достаточна, чтобы исключить влияния анизотропии верхнего слоя углепластика. Однако измеренные ПО почти в два раза больше расчетных, исходя из проводимости на постоянном токе. Это можно объяснить как недостаточной толщиной слоя золота, так и отличием структуры металлизации от «толстого» металла.

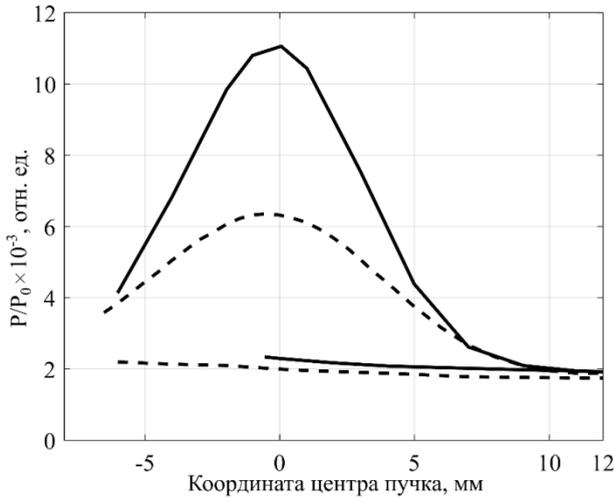


Рис. 3. Результаты измерений потерь на отражение для двух поляризаций электрического поля — вдоль (нижние кривые) и поперек (верхние) нахлеста. Сплошные кривые — 190 ГГц, пунктир — 115 ГГц.

Fig. 3. Results of the reflection loss measurements for two polarizations of electric field-along (lower curves) and across (upper) overlap. Dashed curve – 190 GHz, dotted – 115 GHz

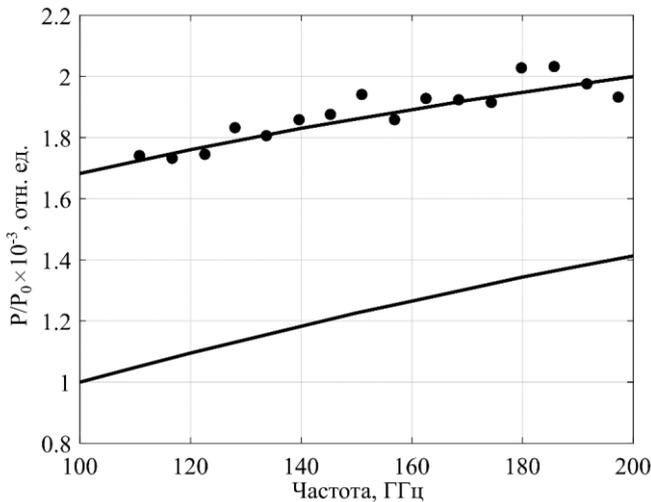


Рис. 4. Результаты измерений потерь на отражение на поверхности без перехлеста (точки). Внизу расчет для чистого золота.

Fig. 4. Results of reflection loss measurement at the surface without overlap (dots). Curve below is the calculation for pure bulk gold

3. Численный расчет дифракционных потерь

Численный расчет основан на рассмотрении задачи рассеяния плоской волны на реальной структуре нахлеста методом интегрального уравнения с помощью авторской компьютерной программы, визуализирующей результаты [8]. Плотность поверхностного тока, возбуждаемого падающей волной, состоит из двух частей — плотности тока на плоской поверхности и на неоднородности. Именно вклад последнего приводит к появлению дифракционных гармоник, которые соответственно приводят к уменьшению коэффициента отражения в зеркальном направлении. Для расчета вклада гармоник, путем разложения поля плоской волны по гармоникам, была численно решена задача дифракции волны на плоской металлической ($\sigma = 2,2 \times 10^7$ [Ом·м]⁻¹) поверхности с линейными неоднородностями и размерами реальной антенны. Численный эксперимент проводился для двух ширин нахлестов — 300 и 150 мкм на частотах 50, 120, 165 и 200 ГГц. Результаты приведены в таблице.

Таблица. Результаты численного расчета потерь на отражения.

Table. Results of reflection loss numerical calculation

Ширина нахлеста		50 ГГц	120 ГГц	165 ГГц	200 ГГц
300 мкм	R_E	0,99897	0,9983	0,9979	0,9976
	R_H	0,99896	0,9982	0,9978	0,9973
	$(1 - R_E) \times 10^{-3}$	1,03	1,7	2,1	2,4
	$(1 - R_H) \times 10^{-3}$	1,04	1,8	2,2	2,7
150 мкм	R_E	0,99897	0,9984	0,998	0,9978
	R_H	0,99897	0,9983	0,998	0,9977
	$(1 - R_H) \times 10^{-3}$	1,03	1,6	2,0	2,2
	$(1 - R_E) \times 10^{-3}$	1,03	1,7	2,0	2,3

4. Заключение

Получены частотные зависимости потерь на отражение образцов отражателей антенн, предназначенных для спутниковых радиометров диапазона 50—200 ГГц.

На основе экспериментальных результатов и численными расчетами получено, что на 50 ГГц и 200 ГГц различие в потерях на отражение для поляризации электрического поля E вдоль и поперек нахлеста шириной 300 мкм различаются на ~ 1 % и ~ 13 % соответственно, которое необходимо учитывать при приеме шумового сигнала. Для нахлеста шириной 150 мкм различие существенно меньше: <1 % и ~ 4.5 % соответственно.

Список литературы

1. Parshin V. V. Antenna Reflectors Reflectivity at 100–350 GHz and 80K. В кн. : Proceedings of 30th ESA Antenna Workshop on Antennas for Earth Observation, Science, Telecommunication and Navigation Space Missions (ESA/ESTEC). 2008. С. 353—356.

2. Parshin V. V. Precise measurements of Materials and Media in the MM/SubMM Ranges. В кн. : Conference book of The 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2012. С. 598—602.
3. Stute T. The Telescope Reflectors for the ESA Plank Mission. В кн. : Proceedings of 28th ESA Antenna Workshop on Space Antenna Systems and Technologies (ESTEC). 2005. С. 619—626.
4. Serov E. A., Parshin V. V., Bubnov G. M. Reflectivity of Metals in the Millimeter Wavelength Range at Cryogenic Temperatures // IEEE Tr. on MTT 2016. Т. 64, № 11. С. 3828—3838.
5. Паршин В. В., Серов Е. А., Бубнов Г. М., Вдовин В. Ф., Кошелев М. А., Третьяков М. Ю. Криовакуумный резонаторный комплекс // Известия ВУЗов. «Радиофизика», 2013 Т. 56, № 8—9. С. 614—621.
6. Паршин В. В. Резонаторные методы исследования газов и конденсированных сред в ММ и СубММ диапазонах. В кн. : 20-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2010 (Севастополь, 13—17 сент. 2010 г.). 2010. С. 21—27.
7. Parshin V. V. Precise resonator methods investigation of dielectrics and metals at 40 GHz – 500 GHz frequency range and in 4 K – 900 K temperature interval. В кн. : Proceedings of Millimeter Waves (GSMM) & ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications (GSMM). 2016. С. 109—112.
8. Копосова Е. В. Омические потери при рассеянии плоской электромагнитной волны на металлической гофрированной поверхности // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 5. С. 389—400.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-02-00832 А.

Информация об авторах

Николенко Андрей Сергеевич, старший лаборант-исследователь отдела микроволновой диагностики атмосферы ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-6340-9079.

Копосова Елена Викторовна, старший научный сотрудник отдела нелинейных геофизических процессов ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Паршин Владимир Владимирович, старший научный сотрудник отдела микроволновой диагностики атмосферы ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Серов Евгений Александрович, научный сотрудник отдела микроволновой диагностики атмосферы ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Information about the authors

Andrei S. Nikolenko, senior assistant-researcher of the Department of Physics of the atmosphere and microwave diagnostics at IAP RAS, Russian Federation. ORCID 0000-0002-6340-9079.

Elena V. Koposova, senior researcher of the Department of Physics of the atmosphere and microwave diagnostics at IAP RAS, Russian Federation.

Vladimir V. Parshin, senior researcher of the Department of Physics of the atmosphere and microwave diagnostics at IAP RAS, Russian Federation.

Eugene A. Serov, researcher of the Department of Physics of the atmosphere and microwave diagnostics at IAP RAS, Russian Federation.