

11.1

Исследование влияния согласующего слоя на характеристики сканирующей антенны на основе многослойного диэлектрика

© А.В. Станковский, Е.А. Стригова, С.В. Поленга, Ю.П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
E-mail: stankovskiy_a@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 21 марта 2024 г.

Принято к публикации 29 марта 2024 г.

Приведены результаты исследования влияния согласующих слоев на коэффициент отражения S_{11} сканирующей антенны на основе многослойных диэлектрических структур. Рассмотрено использование согласующих слоев различной конфигурации в составе сканирующей антенны для минимизации обратных потерь. Показано, что двухслойная структура позволяет достичь более широкополосного согласования (на 7.4% по уровню S_{11} не более -13 dB), чем однослойная. Уровень S_{11} для отклоняющей структуры с двумя согласующими слоями составил не более -13 dB в полосе частот 10.7–12.7 GHz, для сканирующей антенны — не более -17 dB.

Ключевые слова: антенная система, согласующий слой, механоэлектрическое сканирование, искусственный диэлектрик.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.14.58304.19888

В настоящее время активно разрабатываются и совершенствуются спутниковые системы связи с использованием низкоорбитальных, среднеорбитальных и высокоэллиптических космических аппаратов. Основной частью наземного терминала данных спутниковых систем является низкопрофильная антенна с широкоугольным сканированием. Одним из возможных способов реализации сканирующих антенн являются антенные системы с широкоугольным механоэлектрическим сканированием на основе диэлектрических материалов [1]. Для управления положением луча в пространстве в подобных антеннах используются механически вращающиеся диэлектрические структуры с переменным показателем преломления, размещаемые над апертурой антенны. Сканирование в угломестной плоскости достигается путем осевого поворота двух отклоняющих структур на одинаковый угол в противоположных направлениях. Однако такой способ сканирования характеризуется наличием отражений на границе раздела внешней среды и отклоняющей структуры. В оптических линзах для уменьшения отражения от их поверхности широкое применение нашли согласующие (просветляющие) слои [2,3]. Наиболее распространенным является способ интерференционного просветления с использованием одного либо нескольких слоев просветляющего покрытия [4,5]. Суть данного метода заключается в том, что минимальная толщина просветляющего слоя равна $T_i = \lambda_i/4$ (где λ_i — длина волны в диэлектрическом материале, из которого реализован соответствующий слой), в результате чего отраженные от поверхностей линзы и просветляющего слоя волны складываются в противофазе. В настоящей работе рассматривается влияние согласующих слоев с различной конфигурацией на характеристики сканирующей

антенны на основе многослойной диэлектрической структуры.

В оптических системах для отклонения излучения используются клиновидные линзы (призмы). Отклоняющая система на основе многослойного диэлектрика с линейно изменяющимся коэффициентом заполнения может рассматриваться как плоская линза. Исходя из принципа электродинамического подобия интерференционное просветление может быть использовано в радиодиапазоне [6–9].

На рис. 1, *a* представлена отклоняющая структура m на основе диэлектрических пластин треугольной формы с двумя просветляющими слоями (1 и 2), в качестве диаграммообразующей схемы используется упрощенная модель антенны, имеющей на выходе плоский фазовый фронт. Угол наклона диаграммы направленности (ДН) составляет 30° . На рис. 1, *b* представлена модель сканирующей антенной системы, состоящей из двух идентичных отклоняющих структур m , расположенных одна над другой; количество рядов в отклоняющих структурах зависит от размера апертуры облучателя с учетом принципа зонирования, описанного в [1]. Относительная диэлектрическая проницаемость материала для отклоняющей структуры равна $\epsilon_m = 4$.

Используя упрощение $n = \sqrt{\epsilon}$ для сред с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 1$, применяемое в интерференционном просветлении выражение для одного согласующего слоя можно привести к виду

$$\epsilon_1 = \sqrt{\epsilon_s \epsilon_m} \Leftarrow n_1 = \sqrt{n_s n_m}, \quad (1)$$

где $\epsilon_s = 1$ и ϵ_m — относительные диэлектрические проницаемости внешней среды и материала отклоняющей структуры, n_s и n_m — коэффициенты преломления

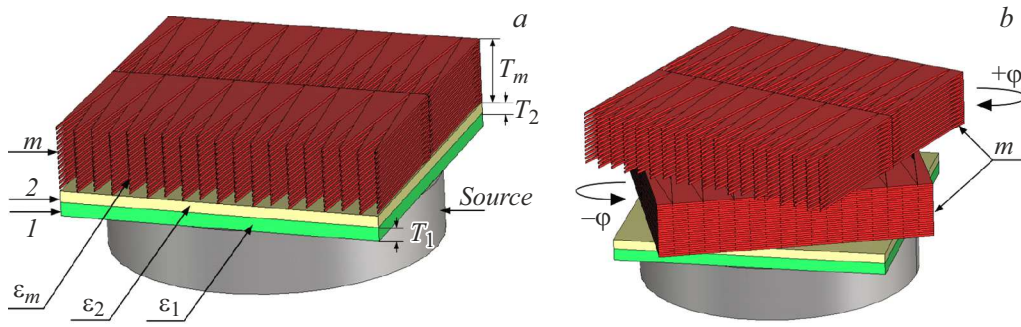


Рис. 1. *a* — отклоняющая структура на основе многослойного диэлектрика; *b* — сканирующая система с двухслойным просветлением. Пояснение в тексте.

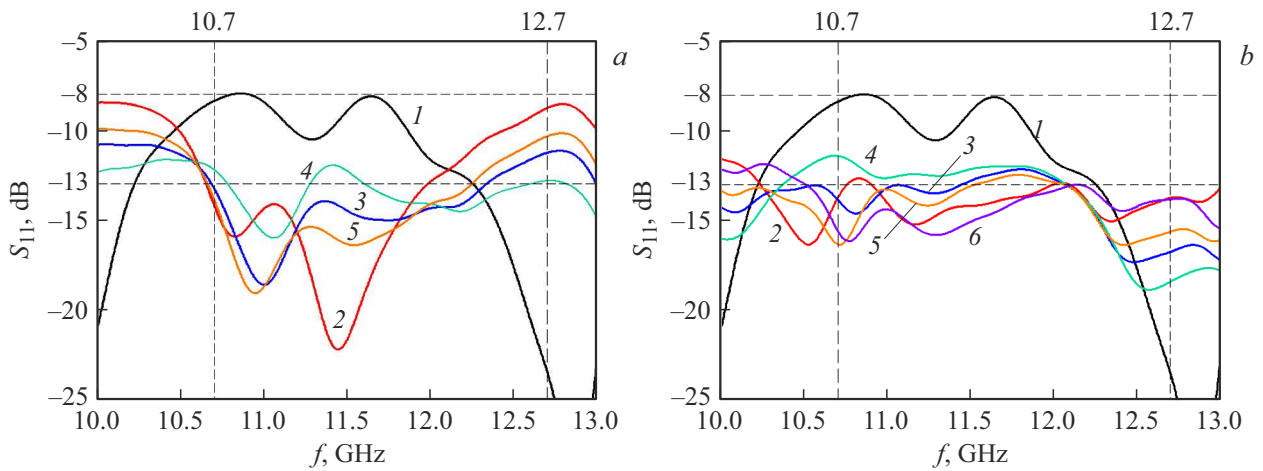


Рис. 2. Зависимости S_{11} от частоты. *a* — при однослойном просветлении, *b* — при двухслойном просветлении. Номера кривых соответствуют номерам вариантов в таблице.

Параметры согласующих слоев

Номер варианта	Один слой			Два слоя			
	ϵ_{av}	ϵ_1	$T_1, \text{ mm}$	ϵ_1	$T_1, \text{ mm}$	ϵ_2	$T_2, \text{ mm}$
1	—	—	0	—	0	—	0
2	4	2	4.5	1.6	5.1	2.5	4
3	2.5	1.6	5.1	1.36	5.5	1.84	4.7
4	2	1.4	5.4	1.26	5.7	1.6	5.1
5	2.9	1.7	4.9	1.43	5.4	2	4.5
6	2.9	—	—	1.3	5.6	2	4.5

соответствующих сред [2]. При добавлении второго согласующего слоя первый слой будет выполнять роль согласующего между слоями ϵ_s и ϵ_2 , а второй — между слоями ϵ_1 и ϵ_m . Тогда, составив систему уравнений, ϵ_1 и ϵ_2 можно вычислить по следующим формулам:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \sqrt{\epsilon_s \epsilon_2} = \sqrt[3]{\epsilon_s^2 \epsilon_m}, \\ \epsilon_2 = \sqrt{\epsilon_1 \epsilon_m} = \sqrt[3]{\epsilon_s \epsilon_m^2}. \end{cases} \quad (2)$$

Приведенные формулы справедливы для однородных сред. Рассматриваемая отклоняющая структура из искус-

ственного диэлектрика имеет различные коэффициенты заполнения, а эффективная диэлектрическая проницаемость в ней изменяется линейно от ϵ_{eff}^{\max} до ϵ_{eff}^{\min} (от 4 до 1). Следовательно, отражение в разных областях такой структуры также будет различным. Кроме того, при осуществлении сканирования отклоняющие структуры будут вращаться. Это приводит к тому, что значение ϵ_m в формулах (1) и (2) необходимо заменить на некоторое среднее значение ϵ_{av} между ϵ_{eff}^{\min} и ϵ_{eff}^{\max} . На рис. 2, *a* и *b* приведены зависимости коэффициента отражения S_{11} отклоняющей структуры от частоты для однослойного и двухслойного просветления при различных значениях ϵ_{av} и соответствующих им значениях ϵ_1 , ϵ_2 , T_1 и T_2 . Для электродинамического анализа предлагаемых структур использовался метод конечных элементов. При этом на границах счетного объема были установлены открытые граничные условия. Параметры согласующих слоев приведены в таблице. Использовались следующие варианты значений ϵ_{av} : максимальное значение ϵ_{eff}^{\max} (вариант 2), среднее арифметическое (вариант 3), среднее геометрическое (вариант 4) и среднее квадратическое (варианты 5 и 6). Для нахождения оптимальной конфигурации просветляющего слоя исследовалось влия-

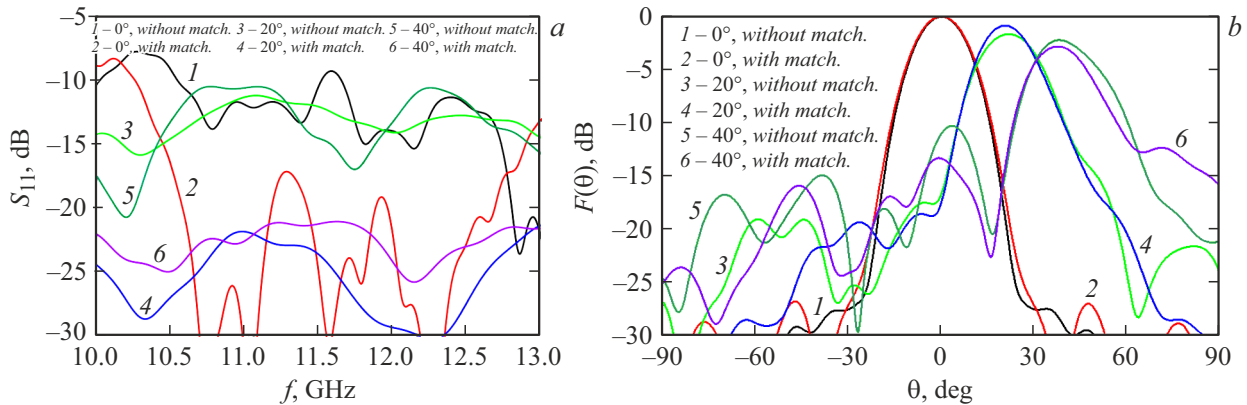


Рис. 3. *a* — зависимости от частоты коэффициента отражения S_{11} сканирующей антенны для параметров, соответствующих варианту 6 в таблице, при различных углах наклона ДН; *b* — диаграммы направленности сканирующей антенны.

ние параметров просветляющих слоев (толщины, относительной диэлектрической проницаемости, количества слоев) на направленные характеристики и согласование рассматриваемых структур. Вариант 6 получен методом оптимизации варианта 5 по критерию минимизации S_{11} в полосе частот 10.7–12.7 GHz. Толщина слоя 1 увеличена на 0.2 mm, а ϵ_1 уменьшена на 0.13 (рис. 1, *a*). Кривым 1 на рис. 2 (вариант 1 в таблице) соответствует структура без согласующего слоя.

При добавлении любого из рассмотренных вариантов согласующих слоев коэффициент отражения S_{11} отклоняющей структуры снижается в полосе частот 10.7–12.7 GHz. Однако при однослойном просветлении согласование является более узкополосным, S_{11} не превышает -13 dB в полосе частот 10.7–12.3 GHz (13.9%). При двухслойном просветлении полоса рабочих частот увеличивается, S_{11} составляет не более -13 dB в полосе частот 10.5–13 GHz (21.3%).

На рис. 3, *a* приведены зависимости от частоты коэффициента отражения S_{11} сканирующей антенны (рис. 1, *b*) без согласования и с согласованием (двухслойным просветлением) для параметров, соответствующих варианту 6 в таблице, при различных углах наклона ДН. Такой вариант показал возможность достижения S_{11} на 8 dB меньше в полосе рабочих частот по сравнению с S_{11} антенны без согласующего слоя для случая, когда ДН не отклонена. На рис. 3, *b* приведены ДН сканирующей антенны для положений 0, 20 и 40°. Видно, что при использовании согласующего слоя на 1.5 dB снижается уровень боковых лепестков, при этом на 0.5 dB снижается и коэффициент направленного действия (КНД) антенны. Следует отметить, что при наклоне ДН до 30° снижения КНД не наблюдается.

Таким образом, полученные в ходе проведенного исследования результаты показывают возможность улучшения характеристик согласования, а следовательно, и коэффициента стоячей волны по напряжению в сканирующей антенне на основе многослойного диэлектрика за счет применения просветляющих слоев. Просветляю-

щий слой, как и сама отклоняющая структура, может быть реализован в виде плоскостойкого искусственного диэлектрика. В этом случае условие среднего геометрического показателя преломления просветляющего слоя может выполняться по всей поверхности линзы. Дополнительные тепловые потери, возникающие при использовании просветляющих слоев, составляют 0.0075 dB и не зависят от угла поворота отклоняющих структур. Улучшение коэффициента усиления с учетом этих потерь составляет порядка 0.3 dB при углах наклона ДН до 30°.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-10205).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.V. Stankovsky, S.V. Polenga, A.D. Nemshon, Ye.A. Litinskaya, A.M. Alexandrin, K.V. Lemberg, Yu.P. Salomatov, in *2017 Radiation and scattering of electromagnetic waves (RSEMW)* (IEEE, 2017), p. 45–48. DOI: 10.1109/RSEMW.2017.8103559
- [2] И.В. Гребенщиков, А.Г. Власов, Б.С. Непорент, Н.В. Суйковская, *Просветление оптики. Уменьшение отражения света поверхностью стекла* (Гостехиздат, М.—Л., 1946).
- [3] Г.В. Розенберг, *Оптика тонкослойных покрытий* (Физматлит, М., 1958).
- [4] И.С. Гайнутдинов, Е.А. Несмелов, И.Б. Хайбуллин, *Интерференционные покрытия для оптического приборостроения* (Фэн, Казань, 2002).
- [5] Э.С. Путилин, Л.А. Губанова, *Изв. вузов. Приборостроение*, **54** (3), 75 (2011).
- [6] J.R. Costa, M.G. Silveirinha, C.A. Fernandes, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, **7**, 781 (2008). DOI: 10.1109/LAWP.2008.2008403

- [7] Е.М. Гришина, *Рабочие камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок для модификации диэлектриков*, канд. дис. (Саратов. гос. техн. ун-т, Саратов, 2009).
- [8] T. Morita, S.B. Cohn, IRE Trans. Antennas Propag., **4** (1), 33 (1956). DOI: 10.1109/IRETAP.1956.6366295
- [9] Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев, *Устройства СВЧ и антенны* (Радиотехника, М., 2006).