

Анализ возможности использования графена в конструкции единичных элементов отражательных решеток

А. Г. Черевко, Ю. В. Моргачев

В конструкциях малых спутников (вес около 320 кг) для уменьшения массогабаритных характеристик в качестве развертываемых антенн широко применяются гибкие отражательные антенные решетки (OAP). В структуре современных гибких отражательных антенных решеток в качестве проводящего материала используются металлы. Графен обладает уникальными свойствами, которые подходят для гибких антенных систем, – механическая устойчивость, низкая удельная масса и стоимость. В работе впервые рассмотрена возможность использования графена в качестве проводящего материала в конструкции единичных элементов отражательной антенной решетки ГГц-диапазона: микрополоскового элемента, микрополоскового элемента с кольцом и микрополоскового элемента с линией задержки. Минимальные значения амплитуды падающей волны и диапазон изменения фаз для каждого элемента составил -4.08 дБ и 327.6 градусов, -19.63 дБ и 684.73 градусов, -6.24 дБ и 526 градусов соответственно. Проведено сравнение полученных характеристик единичных элементов с аналогичными серебряными элементами. Сравнение характеристик с аналогами показало, что графеновые единичные элементы OAP обладают удовлетворительными характеристиками.

Ключевые слова: отражательная антенная решетка, графен, гибкая электроника.

1. Введение

На протяжении последних 10 лет развивается область малых спутников (вес около 320 кг), для которых активно изучаются конструкции легких и легко разворачиваемых антенн [1]. В настоящий момент внимание переключилось с обычных пантографических механизмов (рис. 1) на разработку гибких мембран, натягиваемых самоустойчивым каркасом.

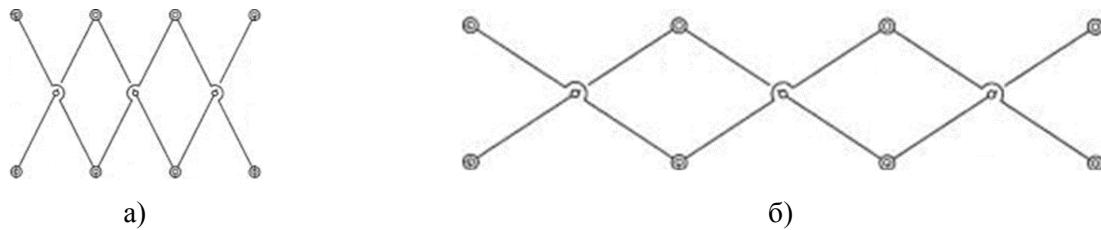


Рис. 1. Сложенный (а) и разложенный (б) пантографический механизм

Обычно мембрана представляет собой подложку, поддерживающую антенные элементы и их питающую сеть – как правило, матрицу с микрополосковыми линиями [2]. Такой дизайн имеет ряд недостатков: низкий КПД, сложная питающая конструкция, что приводит к низкой надежности и высокой стоимости. Данными недостатками не обладают рефлекторные антенны и отражательные антенные решетки (OAP). Зеркала рефлекторных антенн имеют форму параболоида вращения, из-за чего требуются различные сложные механизмы развора-

чивания, которые будут обеспечивать необходимую форму рефлектора. Отражательная антennaя решетка лишена данного недостатка, т.к. является плоской.

Область разворачиваемых мембранных антенн развивается достаточно давно. Работая над наиболее сложными применениями мембранных конструкций, Национальное управление по аeronавтике и исследованию космического пространства (NASA) было первым, кто с 1958 года начал работу над технологией создания сверхлегкой структуры из тонкой ткани. Проект «Эхо», в котором был разработан космический ретранслятор на основе полиэфирной пленки с алюминиевым напылением (1960–1964 гг.) [3] и эксперимент (1996 г.) над надувной антенной на основе пленки биаксиально ориентированного полиэтилентерефталата (BoPET) – это тонкие структуры, успешно выведенные на орбиту NASA. В 2013 году Европейское космическое агентство (ЕКА) успешно запустило Alphasat – большой геостационарный спутник связи I-4 с размахом солнечной батареи 40 м и отражателем диаметром 12 м. В декабре 2019 года Индийская организация космических исследований (ISRO) разместила на орбите 3.6-метровую радиальную ребристую антенну RISAT-2BR1 для наблюдения за Землей. Задачи разработки легких конструкций, шарнирных механизмов и конструкции новой сетки были решены в этой миссии. В работе [4] проведена оценка конструкции Большой развертываемой антенны (LDA) диаметром 35 м для космической миссии NASA NEXRAD (NIS), а в работе [5] представлена новая концепция дизайна гибридной лунной надувной конструкции для лунной базы. Также в представленных работах проведено подробное исследование методов разработки систем с малой массой, конструктивным дизайном с высокой жесткостью, термостойкостью конструкций, контролем вибрации и образования складок на мембране, точными формами антенн, механизмом развертывания и т.д. В [6] представлен обзор конструкций мембранных антенных систем и методов управления ими, рассматривается устранение морщин, разработка технологии мембранных зеркал и проектирование мембрально-оптических систем управления гибкими структурами. Усовершенствования механической архитектуры, используемой для развертывания больших антенн, рассмотрены в обзоре [7]. Большие развертываемые параболические и планарные антенные системы, а также методы их развертывания представлены в [8]. Высказанное указывает на высокий уровень заинтересованности антеннами данного типа.

Отражательные антенные решетки на мембране активно изучаются. В статье [9] представлены результаты моделирования отражательной антеннной решетки L-диапазона, имеющей размеры 10 на 6 метров, на основе пленки из полиимида. Проанализировано влияния провисания и образования складок конструкции. DARPA разработали отражательную антеннную решетку диаметром 2.25 метра на основе полиимидной пленки, которая разворачивается при выведении спутника на нужную орбиту. 3-д модель данного спутника с развернутой мембранный отражательной антеннной решеткой представлена на рис. 2. Спутник с данной антенной был запущен 29 июля 2021 года.



Рис. 2. 3D-модель спутника с развернутой отражательной антеннной решеткой на основе пленки из полиимида

Коллектив из Монреаля (Канада) рассмотрел возможность разработки ОАР, работающей на частоте 5.8 ГГц, в качестве подложки которой использовалась ткань [10]. Данная антенна состоит из 225 элементов. Авторы видят следующие достоинства, доступные только при использовании гибких материалов в качестве подложки отражательной антенной решетки:

1. Переносимая походная антенная система, которая может быть легко развернута и использована для спутниковой связи в отдаленных районах, пустынях и любых подобных ситуациях.

2. Прием спутникового телевизионного сигнала в походных условиях.

3. Краткосрочные наблюдения за погодой в составе метеорологических радаров С-диапазона на фиксированных наземных станциях.

4. Использование в составе развивающегося проекта «Google's Loon Project». Google сообщил, что более 4.3 млрд человек во всем мире до сих пор не имеют доступа к Wi-Fi. Google стремится получать от этого проекта около 10 миллиардов долларов в год. Проект Loon создан для того, чтобы предоставить доступ к Wi-Fi людям в отдаленных районах с помощью высотных воздушных шаров. Эти полиэтиленовые пластиковые шары летают на высоте 20 км над Землей в стратосфере слое. Они имеют антенны Wi-Fi диапазона (5.8 ГГц) для связи на большом расстоянии друг с другом или для связи между воздушным шаром и наземной станцией. Благодаря легким, портативным и гибким характеристикам гибких ОАР они могут быть легко развернуты в проекте Loon, где параболическая антенна является тяжелой для установки.

В настоящий момент в области малых спутников (класс ESPA или весом около 320 кг) существует необходимость уменьшения массогабаритных характеристик разворачиваемых антенн. Для достижения этих целей целесообразно рассмотреть в качестве проводящего материала графен. Рассмотрение графена в конструкции таких антенн в ГГц-диапазоне частот, по информации авторов, производится впервые. До этого графен рассматривался только в конструкции отражательных антенных решеток ТГц-диапазона [11, 12] из-за совершенно других свойств – изменения импеданса в зависимости от прикладываемого напряжения. Проводимость чернил на основе графена ниже, чем у медных или алюминиевых чернил, которые наиболее часто используются при разработке гибких антенн. Тем не менее, графеновые чернила обладают рядом важных преимуществ, таких как низкая стоимость [13] и удельная масса, химическая стабильность (не ржавеют) [14], механическая гибкость [15], сопротивление усталости [16] и экологичность [17]. Также графеновые чернила обладают более низкой температурой затвердевания [14], что позволяет использовать их при нанесении на более широкий диапазон подложек, чем традиционные металлические чернила [18]. Исходя из представленных достоинств целесообразно рассмотреть возможность применения графеновых чернил для конструирования гибких отражательных антенных решеток.

2. Основная часть

Отражательные антенные решетки являются аналогами рефлекторных антенн. В своей структуре они также имеют облучающую антенну, которая создает излучение, падающее на поверхность отражательной антенной решетки. Поверхность отражательной антенной решетки состоит из большого количества единичных элементов. Изменение геометрических размеров нанесенного рисунка на поверхности единичного элемента приводит к изменению фазы отраженного сигнала (рис 3).

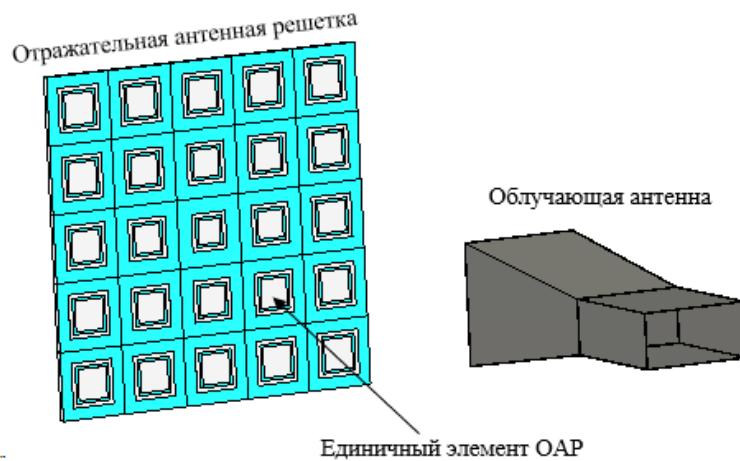
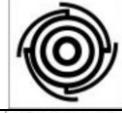
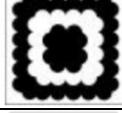
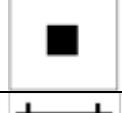
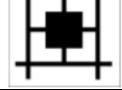
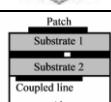
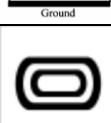


Рис. 3. Структура отражательной антенной решетки

Излучающие элементы ОАР рассеивают падающую волну с определенной фазовой задержкой для достижения желаемой формы диаграммы направленности. Главными характеристиками, на которые обращают внимание при разработке единичного элемента отражательной антенной решетки, являются: зависимость фазы отраженного сигнала от размера элемента (т.к. необходимо достичь изменения фазы в 360 градусов для корректной работы ОАР) и зависимость амплитуды отраженной волны (коэффициент отражения, $|S_{11}|$) от изменения размера нанесенного рисунка, т.к. высокие потери в единичных элементах могут привести к низкому КПД ОАР. Поэтому для сравнения эффективности внедрения графена будут разработаны три дизайна единичных элементов ОАР, в качестве проводящего материала которых используются графеновые чернила и серебряные чернила. Выбраны данные элементы будут на основании табл. 1.

Таблица 1. Типы элементов отражательных антенных решеток

№	Форма элемента	Дизайн	Частота, ГГц	Фазовое смещение, градус	Ширина диапазона, %	Ссылка
1	Диполи I-формы		12.5	800	16	[19]
2	Крест и петли		30	465	25.16	[20]
3	Линии фазовой задержки		8.5	1000	16.47	[21]
4	Меандр		10	500	26	[22]
5	МП-элемент		32	310	5	[23]
6	МП-элемент и решетка		13.5	600	20	[24]

7	МП-элемент с кольцом		10	450	30	[25]
8	МП-элемент с линией задержки		32	450	13	[23]
9	Паразитные диполи		2.05	360	7.8	[26]
10	Параллельные диполи		15	1000	32.53	[27]
11	Феникс		10	360	29	[28]
12	Фрактал		13.58	500	15.24	[29]
13	Щелевая связь		20	360	14	[30]
14	Эллиптические кольца		11	420	18.18	[31]

Примечание: МП – микрополосковый.

Ширина частотного диапазона рассчитывается на основании падения коэффициента усиления ОАР на 1 дБ.

Анализируя обзор, представленный выше, можно отметить, что большое количество параметров отражательных антенных решеток в настоящий момент изучены. Поэтому можно говорить о том, что характеристики итоговых отражательных антенных решеток зависят от параметров единичных элементов, из которых они состоят. Наиболее важными параметрами являются: простота изготовления, возможность достижения необходимого фазового сдвига в 360 градусов и линейная зависимость фазы отраженной волны от размера элемента. Наиболее подходящими под эти параметры являются элементы под номерами 5, 7 и 8 из табл. 1. Несмотря на отсутствие возможности достижения необходимого сдвига фаз, элемент № 5 активно используется при конструировании ОАР из-за своей простоты, однако он имеет нелинейную зависимость фазы отраженного сигнала от размера элемента. Элемент № 7 позволяет достигать необходимого фазового сдвига и обладает простотой конструкции, однако так же имеет нелинейную зависимость фазы от размера элемента. Элемент № 8 обладает необходимым фазовым сдвигом и имеет линейную зависимость фазы от размера линии задержки. Поэтому сравнение графенового и металлического исполнения дизайна элементов 5, 7 и 8 позволит оценить возможность использования графена в однорезонансных (№ 5), мультирезонансных (№ 7) элементах и элементах с линией задержки (№ 8). 3D-модели данных элементов представлены на рис. 4.

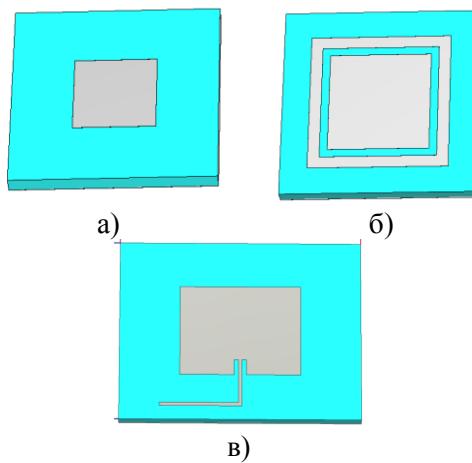


Рис. 4. Дизайн единичных элементов отражательной антенной решетки:

а) микрополосковый элемент, б) микрополосковый элемент с кольцом, в) микрополосковый элемент с линией задержки

Рабочая частота была выбрана равной 6 ГГц, что соответствует С-диапазону. Данный диапазон активно используется для спутниковой передачи данных, широковещательного телевидения, радиорелейной телекоммуникации и многих других приложений. Для обеспечения диаграммы направленности с низким уровнем боковых лепестков ширина и длина исследуемых элементов составляет 25 мкм. В качестве подложки использовался материал полимида, из которого обычно изготавливаются мембранные ОАР. Данная подложка может быть изготовлена с большим диапазоном толщин и размеров. В соответствии с [32] при моделировании диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь полимида пленки устанавливались 3.5 и 0.002 соответственно. Толщина нанесенного слоя графеновых и серебряных чернил составляет 7 мкм [33, 34]. Проводимость графеновых чернил была установлена 43000 См/м [34–36], а серебряных – $1.6 \cdot 10^6$ См/м [33]. Получение параметров осуществлялось с помощью моделирования, используя порты Флеке. Компьютерное моделирование проводилось на основе методик, развитых в [37–39].

Рассмотрим зависимость фазы и амплитуды отраженного сигнала для микрополоскового элемента (№ 5 в табл. 1), изготовленного из графена и серебра (рис. 5).

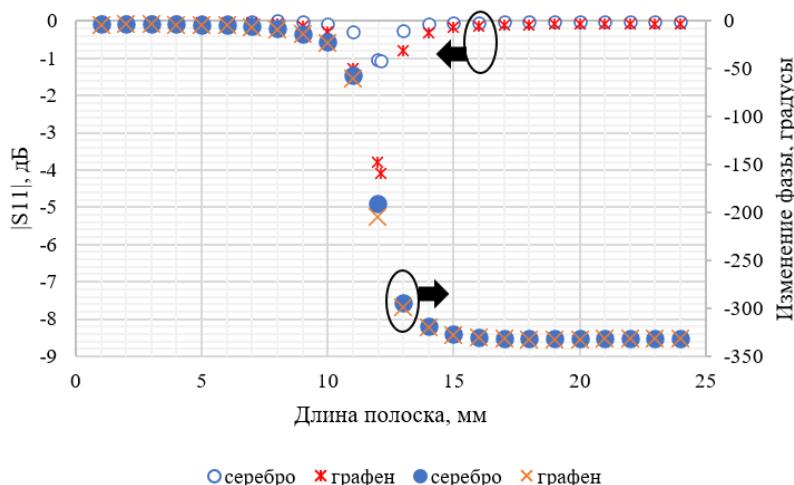


Рис. 5. Зависимость амплитуды (основная ось) и фазы (дополнительная ось) волны, падающей на единичный микрополосковый элемент (№ 5 в табл. 1) отражательной антенной решетки на частоте 6 ГГц

Итоговые изменения фаз составляют 327.86 градусов и 327.6 градусов для серебряного и графенового микрополосков соответственно. Минимальная амплитуда отраженного сигнала соответствует -1.06 дБ для серебряного и -4.08 дБ для графенового вариантов.

Как можно заметить, в обоих случаях не достигается изменение фазы на 360 градусов. Однако это отличие незначительно влияет на итоговую фазовую ошибку [23]. Для того чтобы увеличить возможное изменение фазы, применяется дизайн мультирезонансных элементов. Примером такого дизайна является микрополосковый элемент с кольцом. Зависимости амплитуды и фазы падающей волны на единичных элемент отражательной антенной решетки в виде микрополоскового элемента с кольцом (№ 7 в табл. 1) на частоте 6 ГГц представлены на рис. 6.

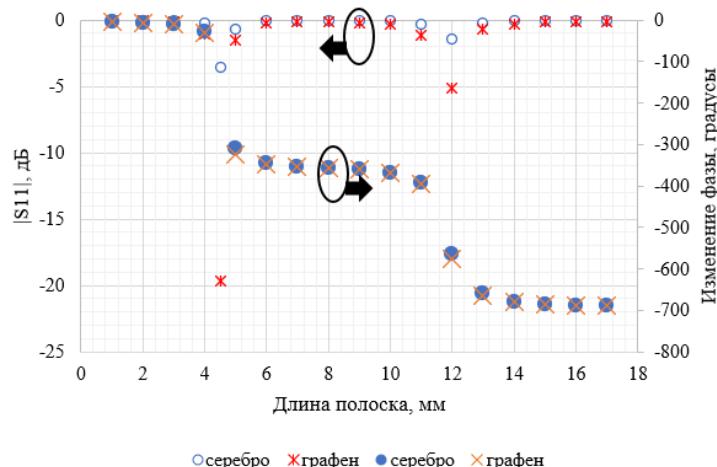


Рис. 6. Зависимость амплитуды (основная ось) и фазы (дополнительная ось) волны, падающей на единичный микрополосковый элемент с кольцом (№ 7 в табл. 1) отражательной антенной решетки на частоте 6 ГГц

Как можно заметить, из-за наличия двух резонансов возможно изменение фазы отраженного сигнала до 680 градусов. Изменение фазы графенового варианта составляет 684.73 градуса, а серебряного – 684.36 градуса. Минимальные амплитуды составили -3.6 дБ для серебряного и -19.63 дБ для графенового элементов. Данные величины соответствуют первому минимуму $|S11|$ на рис. 6. Таким образом, область от 5 до 18 мкм соответствует удовлетворительным значениям амплитуды отраженной волны и позволяет достичь изменения фазы в 360 градусов.

Дизайны элементов на основе линии задержки позволяют получить линейное изменение фазы от длины линии задержки. Рассмотрим зависимость фазы и амплитуды отраженного сигнала для микрополоскового элемента с линией задержки (№ 8 в табл. 1), изготовленного из графена и серебра (рис. 7).

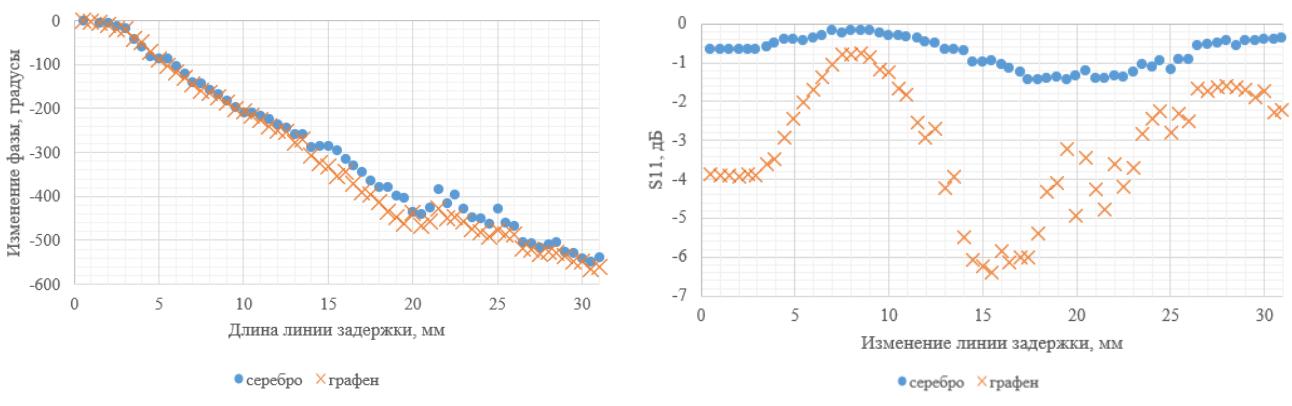


Рис. 7. Зависимость фазы (а) и амплитуды (б) волны, падающей на единичный микрополосковый элемент с линией задержки (№ 8 в табл. 1) отражательной антенной решетки на частоте 6 ГГц

Относительное среднеквадратическое отклонение не превышает 13.7 % и 17.5 % при линейной интерполяции для серебра и графена соответственно. Оно было посчитано по формуле:

$$\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}},$$

где y_i – фактическое значение;

\hat{y}_i – значение интерполирующей функции;

\bar{y}_i – среднее значение.

Нами получено, что для обеспечения линейности графеновый и серебряный элементы должны иметь разные дизайны.

Проведем анализ зависимости величины минимума $|S11|$ от величины проводимости наносимого материала. В настоящей работе использовалась проводимость 43000 См/м, достигаемая трафаретной технологией печати, представленной в [34–36]. Однако проводимость графена может принимать большие значения в зависимости от состава чернил (71300 См/м в работе [40]) и используемой технологии, например, для графеновой пленки – 10^6 См/м. На основе конструкции микрополоскового элемента № 5 была получена зависимость амплитуды отраженной волны от размера элемента при различных значениях проводимости – 43000 См/м, 71300 См/м, 10^5 См/м и 10^6 См/м. Результаты представлены на рис. 8.

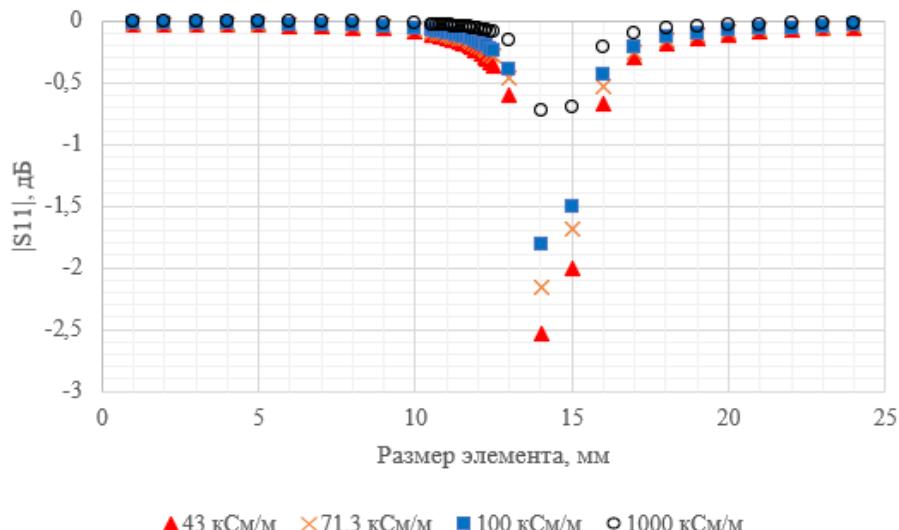


Рис. 8. Зависимость амплитуды отражённой волны от размера элемента при различных проводимостях материала

Минимальное значение амплитуды отражённой волны ($\min(|S11|)$) в зависимости от размера элемента для всех проводимостей находится в районе 14 мм, для 43000 См/м оно составило -2.53 дБ, 71300 См/м – -2.16 дБ, 10^5 См/м – -1.82 дБ и 10^6 См/м – -0.73 дБ. График данной зависимости представлен на рис. 9.

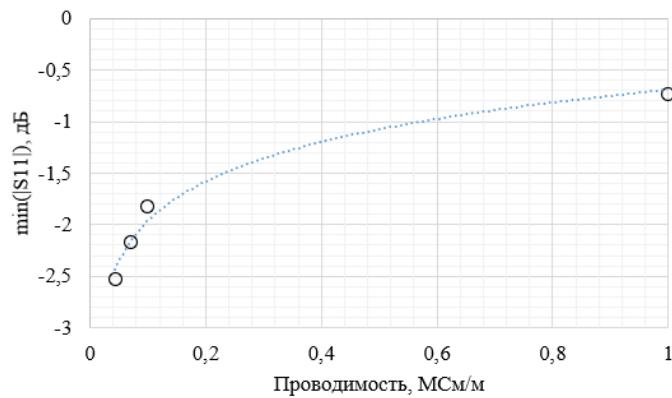


Рис. 9. Зависимость минимального значения амплитуды отраженной волны от проводимости материала

При анализе была проведена интерполяция логарифмической зависимостью с СКО 13.5 %, представленная на рисунке пунктирной линией. Этот анализ показывает, что графен может заменить металл в конструкции гибких отражательных антенных решеток в будущем при увеличении проводимости.

Дизайн серебряного элемента предложен в работе [23]. Как видно из рисунка, при этом дизайне существует небольшой скачок в изменении фазы при длине линии задержки, равной 23 мм, что объясняется рассогласованием импеданса линии задержки и микрополоскового элемента. Для соблюдения корректности сравнения нами повторен этот дизайн. Как можно заметить, скачок фазы для графенового элемента меньше, чем для серебряного. Для графенового элемента амплитуда отражённой волны не падает ниже -6.24 дБ. Таким образом, этот дизайн обладает удовлетворительным минимальным значением амплитуды отраженной волны и производит необходимый фазовый сдвиг. Хотя типичное минимальное значение амплитуды отраженной волны составляет -1 дБ, сравнение полученных результатов с известными (рис. 10) показывает, что минимальное значение амплитуды отраженной волны ($\min(S_{11})$) является приемлемым для дизайнов № 5 и № 8 в графеновом исполнении для всего диапазона размеров, а дизайн № 7 в графеновом исполнении возможно использовать в диапазоне длины микрополоскового элемента от 5 до 18 мкм.

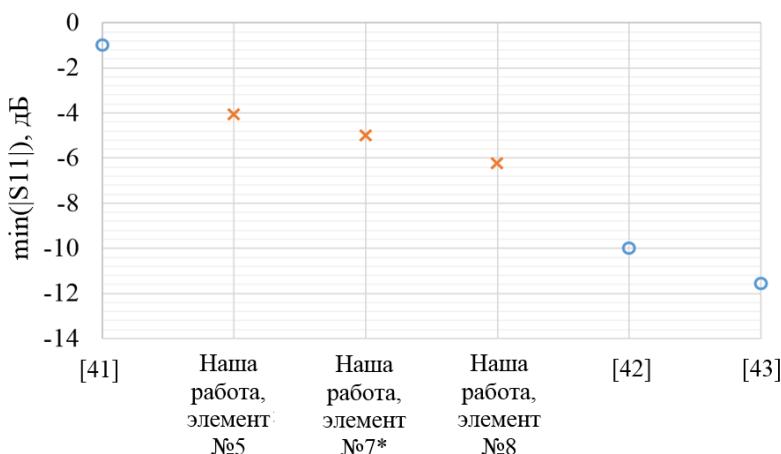


Рис. 10. Минимальное значение амплитуды отраженной волны: [41] – конструкция изготовленной металлической ОАР с элементами типа двойной бабочки с кольцом; [42] – единичный элемент с варактором; [43] – единичный элемент, выполненный на экологичной подложке

3. Заключение

В работе рассмотрены характеристики графеновых единичных элементов ОАР. Проведено сравнение полученных характеристик графеновых единичных элементов с характеристиками таких же серебряных элементов. Анализ показал, что минимальное значение амплитуды падающей волны у графеновых элементов меньше, чем у серебряных, однако диапазоны изменения фазы почти не отличаются. Наилучшие характеристики показал дизайн на основе линии задержки с минимальным значением $S11 = -6.24$ дБ и линейным диапазоном изменения фазы, равным 526 градусов. Анализ литературы показал, что минимальное значение параметра $S11$ данного элемента является удовлетворительным. Сравнение характеристик элементов в графеновом и серебряном исполнении показывает, что ОАР на основе графеновых элементов будут более надежными, устойчивыми к температурным воздействиям и более легкими, что делает их перспективными для носимой электроники и применения в космической области. Это обосновывает необходимость дальнейшего изучения возможностей использования графена в конструкции отражательных антенных решеток.

Литература

1. *Chandra A. et al.* Inflatable membrane antennas for small satellites // 2020 IEEE Aerospace Conference. 2020. P. 1–8.
2. *Li H., Wang B. Z., Shao W.* Novel Broadband Reflectarray Antenna with Compound-Cross-Loop Elements for Millimeter-wave Application // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2007. V. 21, № 10. P. 1333–1340.
3. Echo 1, 1A, 2 Quicklook. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.archive.org/web/20100527211747/http://samadhi.jpl.nasa.gov/msl/QuickLooks/echoQL.html> (дата обращения: 20.09.2021).
4. *Joseph H. Y.* Antenna Arraying Techniques in the Deep Space Network. NJ: John Wiley & Sons. 2003. 163 p.
5. *Dronadula R., Benaroya H.* Hybrid lunar inflatable structure // Acta Astronautica. 2021. V. 179. P. 42–55.
6. *Ruggiero E. J., Inman D. J.* Gossamer Spacecraft: Recent Trends in Design, Analysis, Experimentation, and Control // Journal of Spacecraft and Rockets. 2006. V. 43, № 1. P. 10–24.
7. *Santiago-Prowald J., Baier H.* Advances in deployable structures and surfaces for large apertures in space // CEAS Space Journal. 2013. V. 5, № 3–4. P. 89–115.
8. *Qi X. et al.* Design and optimization of large deployable mechanism constructed by Myard linkages // CEAS Space Journal. 2013. V. 5, № 3–4. P. 147–155.
9. *Maria A. et al.* Reflectarray membrane study for deployable SAR antenna // 3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009.
10. *Tahseen M. M., Kishk A. A.* Flexible and Portable Textile-Reflectarray Backed by Frequency Selective Surface // IEEE Antennas and Wireless Prop. Let. 2018. V. 17, № 1. P. 46–49.
11. *Carrasco E., Perruisseau-Carrier J.* Reflectarray Antenna at Terahertz Using Graphene // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2013. V. 12. P. 253–256.
12. *Черевко А. Г., Моргачев Ю. В.* Моделирование плазмонного одиночного графенового отражательного модуля терагерцового диапазона // ИнтерЭкспо Гео-Сибирь XV Международный научный конгресс: сборник материалов в 9 Т. Новосибирск, 2019. Т. 9. С. 66–71.
13. *Akbari M. et al.* Fabrication and Characterization of Graphene Antenna for Low-Cost and Environmentally Friendly RFID Tags // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2016. V. 15. P. 1569–1572.
14. *Scidà A. et al.* Application of graphene-based flexible antennas in consumer electronic devices // Materials Today. 2018. V. 21, № 3. P. 223–230.

15. *Wang W. et al.* High-performance printable 2.4 GHz graphene-based antenna using water-transferring technology // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2019. V. 20, № 1. P. 870–875.
16. *Lamminen A. et al.* Graphene-Flakes Printed Wideband Elliptical Dipole Antenna for Low-Cost Wireless Communications Applications // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2017. V. 16. P. 1883–1886.
17. *Kumar J. et al.* Graphene: A possible low-cost eco-friendly solution for antenna applications // *IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, 2017.
18. *Huang X. et al.* Binder-free highly conductive graphene laminate for low cost printed radio frequency applications // *Applied Physics Letters*. 2015. V. 106 (20). 203105.
19. *Wu W. W., Qu S. W., Zhang X. Q.* Single-layer reflectarray with novel elements for wideband applications // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2014. V. 56, № 4. P. 950–954.
20. *Li H., Wang B. Z., Shao W.* Novel Broadband Reflectarray Antenna with Compound-Cross-Loop Elements for Millimeter-wave Application // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2007. V. 21, № 10. P. 1333–1340.
21. *Derafshi I., Komjani N., Mohammadirad M.* A Single-Layer Broadband Reflectarray Antenna by Using Quasi-spiral Phase Delay Line // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2015. V. 14. P. 84–87.
22. *Zhao J.J. et al.* Design of a broadband reflectarray using meander-shaped elements // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2011. V. 54, № 2. P. 500–503.
23. *Payam N., Yang F., Elsherbeni A. Z.* Reflectarray antennas: theory, designs, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2018. 424 p.
24. *Qotolo S. F., Hassani H. R., Naser-Moghadas M.* A novel broadband reflectarray antenna with lattice stubs on square element for Ku-band application // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2015. V. 57, № 11. P. 2699–2702.
25. *Qin-Y. L., Yong-Chang J., Gang Z.* A Novel Microstrip Rectangular-Patch/Ring- Combination Reflectarray Element and Its Application // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2009. V. 8. P. 1119–1122.
26. *Long L. et al.* Novel Broadband Planar Reflectarray with Parasitic Dipoles for Wireless Communication Applications // *IEEE Antennas and Wireless Prop. Let.* 2009. V. 8. P. 881–885.
27. *Yoon J. H. et al* Broadband Microstrip Reflectarray with Five Parallel Dipole Elements // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2015. V. 14. P. 1109–1112.
28. *Tian C., Jiao Y.-C., Liang W.-L.* A Broadband Reflectarray Using Phoenix Unit Cell // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2014. V. 50. P. 67–72.
29. *Xue F. et al.* A broadband KU-band microstrip reflectarray antenna using single-layer fractal elements // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2016. V. 58, № 3. P. 658–662.
30. *Venneri F. et al.* Aperture-Coupled Reflectarrays with Enhanced Bandwidth Features // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2008. V. 22, № 11–12. P. 1527–1537.
31. *Li R.H. et al.* A Novel Element for Broadband Reflectarray Antennas // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2011. V. 25, № 11–12. P. 1554–1563.
32. *Henry D. et al.* Long-Range Wireless Interrogation of Passive Humidity Sensors Using Van-Atta Cross-Polarization Effect and Different Beam Scanning Techniques // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017. V. 65, № 12. P. 5345–5354.
33. *Del Barrio S. C. et al.* Screen- printed silver- ink antennas for frequency- reconfigurable architectures in LTE phones // *Electronics Letters*. 2014. V. 50, № 23. P. 1665–1667.
34. *Cherevko A. G. et al.* Graphene Antenna on a Biodegradable Substrate for Frequency Range of Cellular Operators // XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), 2018.
35. *Черевко А.Г. и др.* Оценка критического радиуса изгиба графеновых антенн // *Вестник СибГУТИ*. 2019. № 4. С. 88–92.

36. Черевко А.Г. и др. Графеновая антенна на биоразлагаемой подложке для диапазона сотовых операторов // Труды XIV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Новосибирск. 2018. Т. 4. С. 103–105.
37. Черевко А. Г., Моргачев Ю. В. Особенности моделирования графеновых антенн терагерцового диапазона // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 8. С. 215–219.
38. Черевко А. Г., Моргачев Ю. В. Моделирование разворачиваемой экологической спиральной конической логарифмической графеновой антенны для спутниковой связи // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т. 8, № 2. С. 62–68.
39. Черевко А. Г., Моргачев Ю. В. Графеновая антенна на биоразлагаемой подложке для частотного диапазона GSM-1800 // Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2018», 20 – 24 ноября 2018 г., Москва. С. 734–737.
40. Pan K. et al. Sustainable production of highly conductive multilayer graphene ink for wireless connectivity and IoT applications // Nature Communications. 2018. V. 9. № 1.
41. Fu W., Wang H., Zhang X. Generating dual-polarized orbital angular momentum radio beams with dual-bowtie cell // AIP Advances. 2019. V. 9. № 11. P. 115004.
42. Daud M. A. et al. Capacitive Loading Effect of Dual Element Reconfigurable Reflectarray Unit Cell // IEEE 14th Malaysia International Conference on Communication (MICC), 2019.
43. Ismail M. Y., Malik H. I., Mokhtar M. H. Performance Improvement of Reflectarray Antennas using Organic Substrate Materials // Journal of Physics: Conf. Ser. 2020. V. 1529. P. 032099.

*Статья поступила в редакцию 02.09.2021;
переработанный вариант — 25.09.2021.*

Черевко Александр Григорьевич

к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой физики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 269-39-20, e-mail: cherevko@mail.ru.

Моргачев Юрий Вячеславович

инженер лаборатории «Физические основы телекоммуникаций» СибГУТИ, тел. (383) 269-39-23, e-mail: morgachev.yury@gmail.com.

Analysis of the possibility of using graphene in the design of reflectarray unit cells

A. Cherevko, Y. Morgachev

Flexible reflectarrays are widely used as deployable antennas in the design of small satellites (weight about 320 kg) to reduce the weight and size characteristics. Modern flexible reflectarray antenna use metals as the conductive material. Graphene has unique properties that are suitable for flexible antenna systems - mechanical stability, low specific gravity and cost. This paper is the first to consider the possibility of using graphene as a conductive material in the design of unit cell elements of a reflectarray antenna in the GHz range: a patch element, a patch element with a ring, and a patch element with a delay line. The minimum values of the incident wave amplitude and the phase variation range for each element were -4.08 dB and 327.6 degrees, -19.63 dB and 684.73 degrees, -6.24 dB and 526 degrees, respectively. The comparison of the obtained characteristics of unit cell elements with similar silver elements is carried out. Comparison of the characteristics with the literature analogs showed that the graphene unit cell elements of the reflectarray antenna have satisfactory characteristics.

Keywords: reflectarray antenna, graphene, flexible electronics.