

Антенны СВЧ из углекомполитных материалов

© Н. А. Дугин¹, Т. М. Заборонкова^{1,3},
Е. Н. Мясников², Г. Р. Беляев², В. Г. Лобастов³

¹ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

²ВГУВТ, г. Нижний Новгород, Россия

³ННГУ им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Предложен способ создания СВЧ-антенн из углекомполитного волокна с графеносодержащим эпоксисвязующим веществом. Созданы образцы дипольных и рупорных антенн из углекомполитных материалов. Проанализированы коэффициенты стоячей волны, диаграммы направленности и амплитудно-частотные характеристики для рупорных антенн L- и С-диапазонов и дипольных антенн на частоты от 0.2 до 1 Гц. Оценено влияние на параметры антенн разных по своей структуре углекомполитных материалов (нити и ткани). Показано, что основные характеристики композитных антенн идентичны соответствующим характеристикам металлических антенн-аналогов.

Ключевые слова: СВЧ антенны, углекомполитные материалы, графен, эпоксисвязующее, характеристики антенн, рупор, диполь, частотные диапазоны.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.48.34-40>

Введение

Необходимость применения в антенной технике новых материалов обусловлена техническими требованиями к антенным системам различного назначения. Так, например, в космических антеннах применяются углепластиковые материалы для облегчения веса и уменьшения температурного расширения, в самолетных и вертолетных антеннах также требуется уменьшение веса при сохранении прочности и функциональных параметров.

Появление углекомполитных материалов (УКМ), имеющих такие важные характеристики как: рекордное соотношение прочности к весу, низкий удельный вес, практическое отсутствие коэффициента температурного расширения, большой диапазон значений проводимости, высокая предельная прочность на разрыв, долговечность — дало импульс для проведения исследований по их применению для создания СВЧ-антенн и антенно-фидерных устройств [1].

Сначала были изготовлены образцы круглых волноводов из УКМ, выпускаемых промышленно, — нить марки Zoltek Panex 35 (50 К) — и ткань из этой нити с ячейкой 2x2 см. Для придания жесткости конструкции применялось графеносодержащее эпоксисвязующее вещество — эпоксидная смола с добавкой графена в количестве, обеспечивающем необходимую электрическую проводимость. Эти эксперименты показали работоспособность таких систем, а соответственно, принципиальную возможность создания нового поколения антенно-фидерных систем и покрытий.

Далее из УКМ были изготовлены модельные образцы антенн, соответствующие металлическим дипольным и рупорным антеннам, применявшимся в радиоастрономических исследованиях в радиоастрономической обсерватории НИРФИ. Проведены сравнительные измерения таких основных антенных параметров как коэффициенты стоячей волны (КСВ), диаграммы направленности (ДН), коэффициенты усиления (в данном случае — амплитудно-частотные характеристики (АЧХ)) [2-6]. Получено, что УКМ-антенны работоспособны, практически идентичны металлическим аналогам и даже превосходят их по ряду характеристик.

Дипольные антенны

При отработке способов создания УКМ антенн исследовались два варианта конструкций дипольных антенн: специализированные с уширенной полосой пропускания и стандартные дипольные антенны.

Специализированные дипольные антенны на частоты 200 и 600 МГц

Дипольная специализированная антенна с уширенной полосой пропускания на диапазон 600 МГц показана на рис. 1. Из-за особенности конструкции из УКМ изготавливалась только половина «усов» диполя; металлическая часть, присоединяемая к фидеру, находилась внутри расширенного корпуса вибратора (рис. 2). Рефлекторы антенн оставались металлическими.



Рис. 1. Дипольная антенна на частотный диапазон 600 МГц

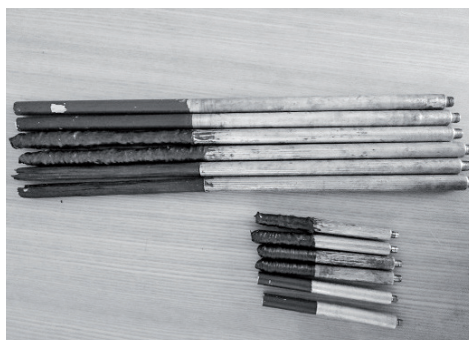


Рис. 2. Заготовки УКМ-деталей диполей на 200 и 600 МГц

УКМ-часть диполя изготавливалась из нити двумя способами: круговой намоткой и продольным креплением на тонкие металлические и фторопластовые вставки. Предполагалось, что проводимость вдоль нити больше, чем при поперечном касании нитей, и таким способом будет получена неизотропная проводимость «усов» диполя.

Измерение КСВ, ДН и АЧХ всех вариантов антенн проводилось при последовательной замене «усов» диполей в одном корпусе для исключения влияния на измеряемые параметры конструктивных особенностей разных антенных заготовок. Для примера на рис. 3а, б приведены КСВ и АЧХ дипольных антенн диапазона 200 МГц. Отметим некоторые отличия измеренных электродинамических характеристик. КСВ антенны с продольной укладкой нити на фторопластовую основу несколько хуже, чем для остальных вариантов конструк-

ций, что было подтверждено исследованиями стандартных дипольных антенн (см. ниже) и обусловлено, по-видимому, худшим контактом УКМ-металл при лабораторной технологии изготовления «усов». АЧХ всех антенн достаточно сильно «изрезаны», что определяется как особенностями фидерных линий, так и параметрами излучающих антенн.

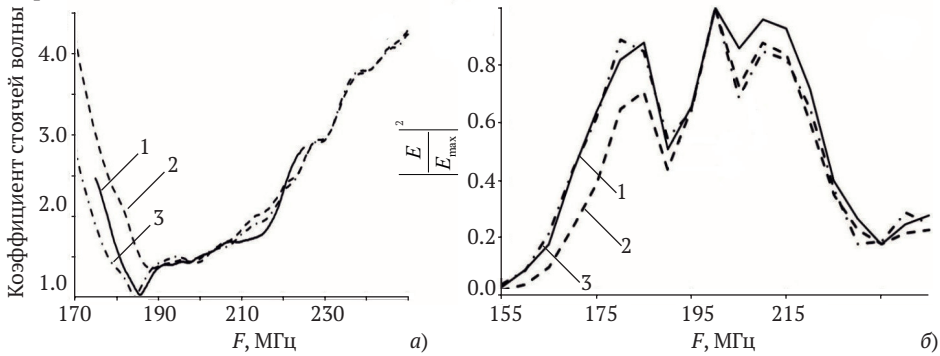


Рис. 3. КСВ (а) и АЧХ (б) дипольных антенн диапазона 200 МГц; с металлическими диполями — 1, с продольной укладкой на фторопластовую основу — 2, с круговой намоткой на дюраlevую основу — 3

На рис. 4 а, б для примера показаны ДН и АЧХ дипольных антенн диапазона 600 МГц. ДН измерялись в лабораторных условиях, тем не менее аппроксимации данных гауссовой функцией не потребовалось; для всех видов исследуемых антенн главные лепестки ДН в пределах ошибок совпадают. Амплитудно-частотные зависимости всех типов антенн качественно также хорошо совпадают. Для специализированных дипольных антенн спада коэффициента усиления (КУ) в пределах ошибок измерений не обнаружено.

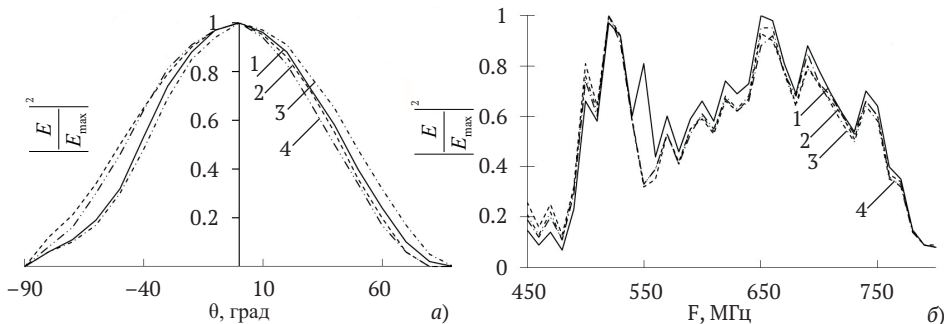


Рис. 4. ДН (а) и АЧХ (б) дипольных антенн диапазона 600 МГц, с металлическими диполями — 1, с продольной укладкой на дюраlevую основу — 2, с круговой намоткой на фторопластовую основу — 3, с круговой намоткой на дюраlevую основу — 4

Стандартные дипольные антенны на частоту 540 МГц

Следующим шагом в исследовании дипольных антенн было создание «стандартных» антенн, практически полностью выполненных из УКМ. Были выбраны металлические аналоги — облучатели зеркальных параболических антенн на частоты 540 и 104 МГц с одной центральной штангой крепления к основ-

ному зеркалу (рис. 5). «Усы» диполей изготавливались из УКМ нити и ткани по той же технологии, что и для специализированных вибраторов, рефлекторы — из УКМ ткани (рис. 6).

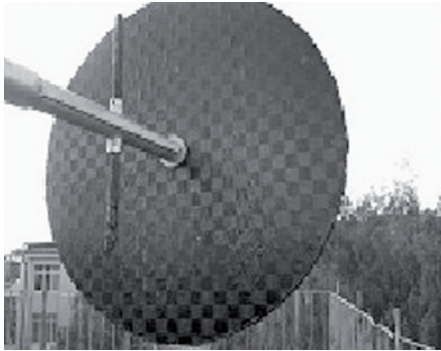


Рис. 5. Дипольная антенна на частоту 540 МГц



Рис. 6. Образцы УКМ-ткани и нити

На рис. 7а, б приведены результаты измерений КСВ и АЧХ для антенн на частоту 540 МГц в различных вариациях конструктивных элементов: металлические рефлекторы — УКМ-диполи (с круговой и продольной намоткой), УКМ-рефлекторы (ткань) — УКМ-диполи (с круговой и продольной намоткой), металлический и УКМ рефлекторы — металлический излучатель. Все рефлекторы имели круглую форму. Из приведенных графиков видно, что качественно все частотные зависимости параметров антенн в различных вариациях совпадают; однако для данной конструкции дипольной антенны наблюдается уменьшение КУ до 15 % для ряда УКМ-вариантов антенн. И в этом случае существенную роль в ошибках измерения характеристик оказывала нестабильность сопротивления контактных соединений при многократных перестановках элементов антенн.

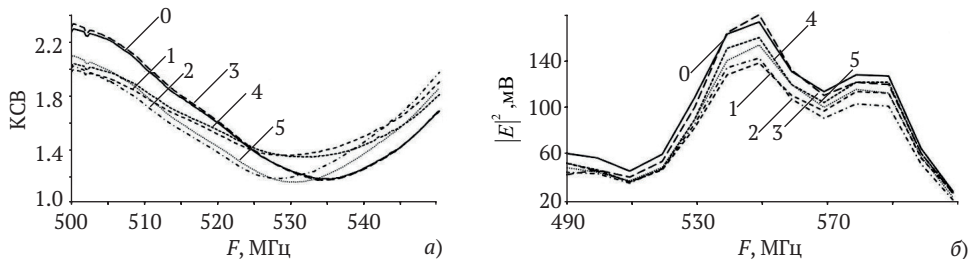


Рис. 7. КСВ (а) и АЧХ (б) дипольных антенн диапазона 540 МГц, с металлическими диполями и металлическим рефлектором — 0; с диполями из УКМ продольной укладкой и металлическим рефлектором — 1, с диполями из УКМ круговой укладкой и металлическим рефлектором — 2; с металлическими диполями и УКМ рефлектором — 3; с диполями из УКМ продольной укладкой и УКМ рефлектором — 4; с диполями из УКМ круговой укладкой и УКМ рефлектором — 5

Таким образом, для всех моделей УКМ дипольных антенн их ДН в пределах ошибок измерений совпадают с ДН металлических аналогов, КСВ УКМ антенн в рабочей частотной зоне несколько хуже по сравнению с металлическим аналогом, а коэффициенты усиления УКМ антенн в пределах ошибок измерений совпадают с КУ их металлических аналогов, что указывает на эффективность применения УКМ для создания вибраторных низкочастотных антенн.

Рупорные антенны

В лабораторных условиях были изготовлены и исследованы модельные образцы рупорных антенн из УКМ с эпоксисвязующим графеносодержащим веществом в двух СВЧ-диапазонах длин волн: в L-диапазоне (центральная частота 1.6 ГГц) и в С-диапазоне (центральная частота 5 ГГц) [3, 4]. Антенна L-диапазона была сделана из УКМ-нити методом радиальной намотки и имела поляризатор из системы встроенных штырей (рис. 8) для работы на волнах левой и правой эллиптических поляризации. Для первого изготовленного образца этой антенны (без поляризатора) впервые были исследованы основные антенные характеристики и проведено их сравнение с металлическим аналогом. Показана принципиальная возможность применения УКМ в качестве проводящих материалов при изготовлении СВЧ-устройств. Далее на рабочую частоту 5 ГГц были изготовлены два модельных образца антенны уже из разных видов УКМ-нити и ткани. В качестве металлических аналогов обоим рупорам были выбраны рупорные антенны на основе круглого волновода с запиткой из двух ортогональных диполей (рис. 8, 9). При выборе материалов также (как и в первом разделе) предполагалось, что УКМ-нить имеет более высокую проводимость вдоль волокон, а проводимость УКМ-ткани анизотропная.



Рис. 8. Рупорные антенны L-диапазона

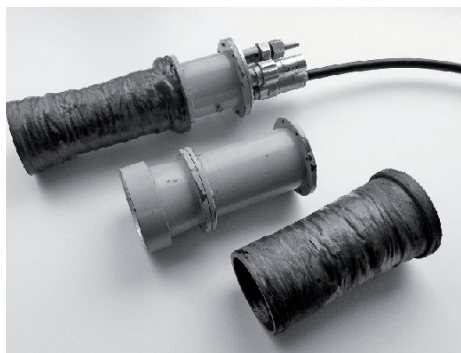


Рис. 9. Рупорные антенны С-диапазона

Результаты измерения КСВ- и ДН-антенны С-диапазона приведены на рис.10 а, б. Видно, что зависимость от частоты КСВ УКМ антенн более сглажена, у металлической антенны четко определяется резонансный характер, при этом величины КСВ в минимумах и максимумах для двух антенн примерно одинаковы. Для УКМ-антенн из разных материалов различий в КСВ практически нет. Этот эффект имеет место для всех вариантов рупорных антенн; отсю-

да можно предположить, что антенны из УКМ будут более широкополосными. Для ДН измеренные в лабораторных условиях данные аппроксимировались гауссовой функцией (сплошные линии на графиках).

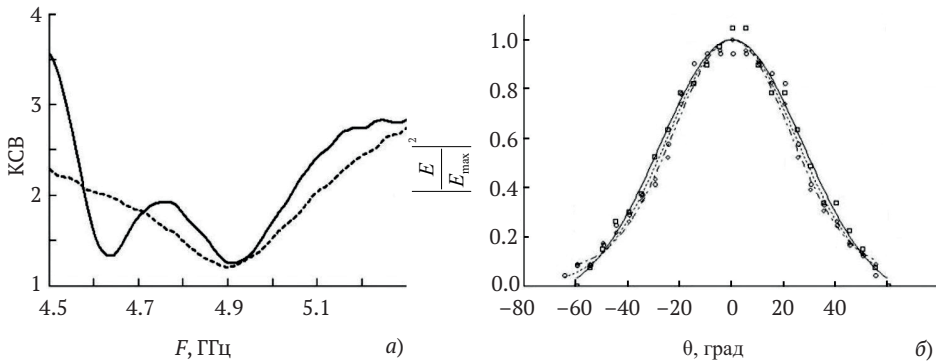


Рис.10. Параметры антенн С-диапазона: а — зависимости КСВ от частоты: металлическая антенны — сплошная линия (1), антенна из УКМ-нити — пунктир; б — ДН на частоте 5 ГГц

Результаты измерения КСВ- и ДН-антенны L-диапазона приведены в работе [2], где отмечено хорошее согласование характеристик УКМ-антенн и их металлических аналогов. Исследование поляризационных характеристик рупора L-диапазона [4] показало, что коэффициент эллиптичности УКМ-антенны в диапазоне 1.5–1.65 ГГц лежит в пределах 0.35–0.45 и в 1.5–2 раза меньше, чем у металлического аналога. Это обстоятельство предполагало возможное наличие неізотропности проводимости УКМ стенок круглого волновода. Однако теоретический анализ [6] показал, что к подобному эффекту может привести наличие небольшого омического сопротивления УКМ-нити.

Заключение

В результате проведенных исследований показано, что параметры дипольных и рупорных антенн из УКМ в пределах ошибок лабораторных измерений не отличаются друг от друга и близки к характеристикам металлических антенн-аналогов. Антенно-фидерные СВЧ-устройства из УКМ с графеносодержащими добавками работоспособны и по электромагнитным характеристикам практически идентичны металлическим аналогам, превосходя их по ряду механических параметров.

Повышение эффективности УКМ сверхвысокочастотных антенн будет достигаться более совершенной технологией изготовления проводящей поверхности устройства. Результаты исследований позволяют также заключить, что элементы диполей необходимо изготавливать по промышленной технологии в виде полых трубок либо в комплекте с фидерными линиями, либо с металлическими резьбовыми вставками для крепления к фидеру.

Предполагается, что УКМ найдут широкое применение в антенной технике для изготовления антенно-фидерных устройств, благодаря их уникальным физическим свойствам.

Исследования ведутся при финансовой поддержке Минобрнауки (госзадание № 3.2722.2017/4.6).

Л и т е р а т у р а

1. Антенно-фидерное СВЧ устройство из углекомпозиционного материала и способ его изготовления: пат. 2577918 Российская Федерация, МПК RU 2 577 918 C1 / Дугин Н. А., Заборонкова Т. М., Мясников Е. Н., Чугурин В. В.; патентообладатель НИРФИ ННГУ — № 2014136727/28, заявл. 09.09.2014, бюлл. № 8.

2. Дугин Н. А., Заборонкова Т. М., Мясников Е. Н. Антенно-волноводные СВЧ-устройства из углекомпозиционных материалов // Письма в ЖТФ. — 2016. — Т. 42, № 11. — С. 91–96.

3. Dugin N. A., Zaboronkova T. M., Myasnikov E. N. Using carbon-based composite materials for manufacturing C-range antenna devices // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. — 2016. — Vol. 5. — P. 17–23.

4. Дугин Н. А., Заборонкова Т. М., Мясников Е. Н., Беляев Г. Р. Электродинамические характеристики рупорных СВЧ антенн из графеносодержащих углекомпозиционных материалов // ЖТФ. — 2018. — Т. 88, Вып. 2. — С. 276–282.

5. Дугин Н. А., Заборонкова Т. М., Мясников Е. Н., Беляев Г. Р., Лобастов В. В. Электродинамические характеристики вибраторных СВЧ антенн из графеносодержащих углекомпозиционных материалов // Радиотехника и электроника. — 2018. — Т. 63, № 8. — С. 790–794.

6. Dugin N. A., Belyaev G. R., Zaboronkova T. M., Lobastov V. G. Polarization characteristics of graphene-containing composite horn antenna // Proceedings of the International Conference “Days on Diffraction 2018” / ed. by Motygin O. V., Kiselev A. P., Goray L. I. — St. Petersburg University, 2018. — P. 88–92.

Microwave Antennas Made of a Graphene-Containing Material

N. A. Dugin, T. M. Zaboronkova, E. N. Myasnikov,
G. R. Belyaev, V. G. Lobastov

A method for manufacturing microwave antenna made of a graphene-composite material has been developed. The resin modified by graphene powder is used as a binding substance during the manufacturing of the composite antenna. L- and C- band horn, and dipole composite antenna prototypes in the range 0.2–1 GHz were created. The following electrodynamic characteristics of carbon-based antennae were measured and analyzed: the standing-wave ratio, the radiation pattern, and the amplitude-frequency response. The measurements were performed under laboratory conditions without using an anechoic chamber for various prototypes of the indicated antennae made of carbon fiber and carbon fabric, as well as for their metal analogues. It is shown that a graphene-containing microwave antennae have almost the same main electrodynamic characteristics as similar antennae made of metal alloys. However, the carbon-based antenna had a substantially reduced weight, increased durability, and enhanced immunity to corrosion.

Keywords: microwave antennae, graphene-containing material, electrodynamic characteristics of antennae, horn antenna, dipole antenna, frequency range.