

Научная статья

УДК 631.396.67

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14411>

АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЕК ГОЛОМБА ИЗ МЕДНЫХ И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

М. П. Фараджева ¹ ✉, А. В. Приходько ¹, О. И. Коньков ²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

✉ faradzheva_mp@spbstu.ru

Аннотация. Исследованы особенности поведения амплитуды электромагнитных волн (профиля стоячей волны), отраженных антенными решетками, которые представляют собой линейки Голомба разных порядков, изготовленные из меди и ВТСП-структур. Измерены зависимости указанной амплитуды от расположения отражающих антенных решеток по отношению к источнику возбуждения волн и приемному устройству, а также от температуры. Анализ полученных данных выявил отсутствие провалов в профиле амплитуды стоячей волны для линеек Голомба 3-го и 4-го порядков. Показано, что для линеек Голомба на основе ВТСП-структур наблюдаемое увеличение амплитуды принимаемого сигнала при их охлаждении связано с переходом таких структур в сверхпроводящее состояние.

Ключевые слова: линейка Голомба, антенная решетка, наноструктура, высокотемпературный сверхпроводник

Для цитирования: Фараджева М. П., Приходько А. В., Коньков О. И. Антенные решетки на основе линеек Голомба из медных и сверхпроводящих элементов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 4. С. 147–157. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14411>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14411>

ANTENNA ARRAYS BASED ON THE GOLOMB RULERS MADE OF COPPER AND SUPERCONDUCTING ELEMENTS

M. P. Faradzheva ¹ ✉, A. V. Prikhod'ko ¹, O. I. Kon'kov ²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

✉ faradzheva_mp@spbstu.ru

Abstract: The features of the amplitude behavior of the electromagnetic waves (the profile of a standing wave) reflected by antenna arrays have been studied. These arrays are Golomb rulers of different orders made of copper and HTSC structures. The dependences of the amplitude on

the array's arrangement with respect to the excitation source and the receiving device, as well as on the temperature. An analysis of obtained results revealed no dips in the standing wave amplitude profile for the 3rd and 4th order Golomb rulers. It was shown that for the Golomb rulers based on HTSC structures, an observed increase in the amplitude of the received signal on their cooling was associated with the transition to the superconducting state.

Keywords: Golomb ruler, antenna array, nanostructure, high temperature superconductor

For citation: Faradzheva M. P., Prikhod'ko A. V., Kon'kov O. I. Antenna arrays based on Golomb rulers made of copper and superconducting elements, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 14 (4) (2021) 147–157. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14411>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Интерес, проявляемый в настоящее время к структуре электромагнитного поля в промежуточной и ближней зонах излучающих устройств, связан с решением целого комплекса вопросов, например, «провалы» сигналов сотовой и аналогичной связи в ближней зоне, электромагнитная экология с расчетом геометрии санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки вблизи передающих центров. Возникают проблемы как повышения эффективности передающих, так и чувствительности приемных устройств [1].

Однако получить четкий ответ на вопрос, как с расстоянием r меняются электромагнитные поля произвольных излучателей, пока не удастся. Известны лишь общие соображения [2], в частности, что в зоне Френеля (ближняя зона) на монотонное убывание амплитуды волны по закону $U \sim 1/r$ накладывается осциллирующее затухающее колебание. Ближняя зона антенны представляет собой область, в которой еще не сформировано поле излучения и не установлен баланс энергий электрического и магнитного полей. С другой стороны, ближняя зона антенны с большой апертурой (зона дифракции Френеля) определяется зависимостью амплитуды волны U от расстояния, отличной от $U \sim 1/r$, и возможностью фокусировки излучения на заданном расстоянии [3]. Измерение в поле ближней зоны оказывается довольно трудным, поскольку не создан эталонный метод калибровки. Международная электротехническая комиссия в настоящее время работает над изданием стандарта по измерению электромагнитных полей высокой частоты (от 9 кГц до 300 ГГц), особенно в поле ближней зоны [4].

В последнее время возник интерес к использованию неэквидистантных активных фазированных антенных решеток (АР) [5, 6].

Неэквидистантные линейные АР уменьшают количество элементов антенны без заметной потери разрешения и в то же время поддерживают низкий уровень боковых лепестков. Один из возможных вариантов неэквидистантной линейной АР — это линейка Голомба [7]. Антенны в виде линеек Голомба с определенной конфигурацией можно встретить, например, на базовых станциях сотовой связи стандарта CDMA и в радиотелескопах [8, 9].

Качественный скачок обеспечивается созданием СВЧ-устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Согласно проведенным оценкам, только использование пассивных сверхвысокочастотных устройств на основе ВТСП позволяет снизить шумовую температуру на два порядка, а значит поднять чувствительность и селективность при уменьшении мощности сигнала и уменьшении искажений [10, 11].

Использование ВТСП-материалов, обладающих очень низким поверхностным сопротивлением, низкими потерями, приводящее к повышению эффективности антенн, стимулировало в последнее время исследования электрически малых пассивных антенн (ЭСА, *англ.* Electrical Small Antenna (ESA)). Такие антенны требуют наличия внешнего облучателя, по сути представляют собой отражающий экран и обычно используются в сочетании с линзами или отражателями. Основы функционирования пассивных малых антенн, в том



числе сверхпроводящих, представлены в работе [12].

Подробное описание современного состояния сверхпроводящей электроники применительно к отражающим и поглощающим экранам отражено в работе [13].

Целью данной работы является разработка новых методов построения неэквидистантных пассивных антенных решеток на основе ВТСП-наноструктур в различных конфигурациях (порядках) линейки Голомба.

Методика измерений

В связи с указанной выше целью, нами проведены исследования амплитуды электромагнитной волны (профиля стоячей волны) в зависимости от расположения отражающей антенной решетки относительно источника волнового возбуждения и приемного устройства. Детали технической части эксперимента с применением микроволнового источника возбуждения описаны в статье [14], представлены на рис. 1 и доказали свою эффективность при анализе результатов микроволновых исследований [15, 16].

Экспериментальный метод основан на измерении относительной мощности электромагнитного поля в ближней и средней зонах для отражающего элемента – образца 3 (см. рис. 1, *a*) в зависимости от координаты x отражающей АР по отношению к источнику возбуждения волн и приемному устройству. Исследовали профили стоячих волн с интерференцией прямых и отраженных от поверхностей образцов сигналов; последние посылались от излучающей щели в волноводе на частоте 45,26 ГГц.

Установка для проведения микроволновых исследований в 8-миллиметровом диапазоне длин волн (45,26 ГГц) состоит из волновода 1, кремниевой антенны 2, повышающей эффективность излучающей щели ($0,5 \times 10$ мм) в стенке волновода, держателя с образцом 3 и рупорной антенны 4. Смещение образца, расположенного на держателе, по координате x вдоль источника 1 возбуждающего электромагнитного поля осуществляется с шагом 1 мм. Рупорная антенна 4 расположена против щели на расстоянии 150 мм. Образцы устанавливали в держатель нормально к оси x и перемещали вдоль этой оси.

Исследованные неэквидистантные линейные антенные решетки с пространственным возбуждением [32] выполнены в виде линеек Голомба различных порядков (см. рис. 1, *b*, поз. 3-1 – 3-5) [17]. Это были линейки Голомба 1-го – 4-го порядков с наибольшим расстоянием между крайними элементами решетки: длиной 0, 1, 3 и 6 линейных размера элемента (далее используется сокращение л.р.э.) соответственно. Для линейки 4-го порядка 3-5 применялись промежутки между элементами (в л.р.э.): 1, 3 и 2. Исследовали

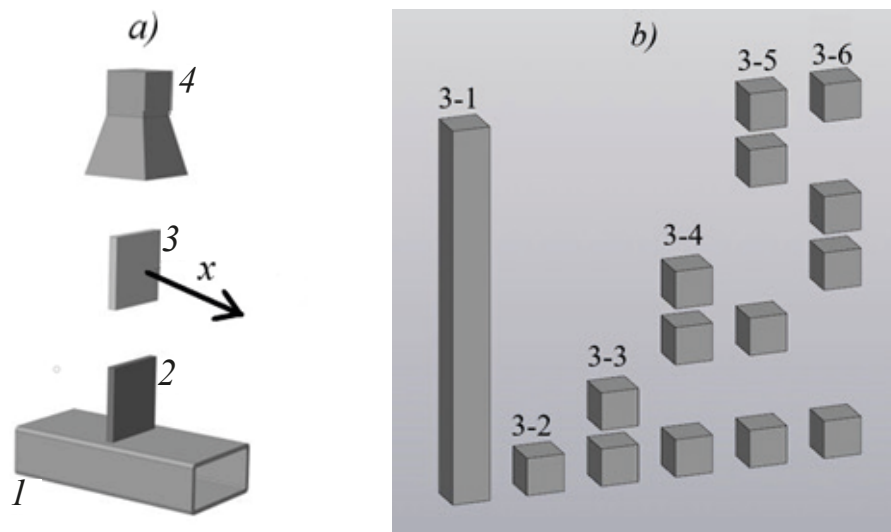


Рис.1. Блок-схема эксперимента (*a*) и использованные образцы 3 (*b*):

1 – волновод, 2 – кремниевая антенна, 3 – образец, 4 – приемный рупор; 3-1 – сплошная стержневая антенна, 3-2 – 3-5 – линейки Голомба 1-го, 2-го, 3-го и 4-го порядков соответственно, 3-6 – неэквидистантная стержневая антенна (не является линейкой Голомба, см. пояснение в тексте);
 x – координата смещения образца

также неэквидистантную линейную антенну 3-6 с промежутками 2, 1 и 3 л.р.э., которая не является линейкой Голомба, так как имеет равные расстояния между первым и третьим, а также между третьим и четвертым элементами. В качестве эталона использовали линейный вибратор – вертикальную стержневую антенну (см. рис. 1, *b*, поз. 3-1), составленную из 6 элементов, а также медный экран размером 24×24 мм.

Исследуемые решетки составлялись следующим образом: основу конструкции антенн составлял базовый элемент – куб размером $4 \times 4 \times 4$ мм; линейный вибратор – прямоугольный параллелепипед размером $24 \times 4 \times 4$ мм, составленный из 6 базовых элементов. Антенны в виде линеек Голомба также составлялись из таких элементов, в соответствии с порядком линеек от 2-го до 4-го. Например, антенна в виде линейки Голомба 4-го порядка длиной 6 л.р.э. с промежутками в 1, 3 и 2 л.р.э. представляла собой линейную структуру, составленную из 4 элементов, расстояния между которыми составляли 4, 12 и 8 мм (соответственно 1, 3 и 2 л.р.э.).

Антенна в виде линейки Голомба 1-го порядка длиной 1 л.р.э. представляла собой одиночный базовый элемент.

Базовые элементы конструкции АР изготавливались из меди, прессовались из ВТСП-порошка состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и из нанопорошка того же состава (наноВТСП).

Образцы ВТСП-порошка указанного состава 1-2-3 изготавливались по стандартной керамической технологии. Образцы наноВТСП состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ формовались из нанопорошка, синтезированного глицин-нитратным методом, описанным в работах [19]. Преимуществами предлагаемого метода синтеза являются возможность приготовления $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в виде наноструктурированных порошков с различным соотношением размеров частиц и получение из них высокотемпературной сверхпроводящей керамики, обладающей рядом позитивных характеристик:

- образцы оптимально насыщены кислородом;
- имеют примерно заданную плотность;
- готовы в один этап спекания;
- не требуют высоких энерго- и трудозатрат.

Для фиксации элементов в составе антенны их приклеивали клеем БФ-2 к полоске из пенопласта.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты измерения профиля стоячей волны при комнатной температуре для эталонного медного экрана. При $x = 0$ амплитуда принимаемого сигнала близка к нулевой, что согласуется с данными по диаграмме направленности отражающей плоскости (приведены нормированные значения амплитуды измеряемого сигнала).

Для медного экрана, при увеличении расстояния x от источника, амплитуда сигнала сначала резко возрастает, а далее в целом снижается по закону более слабому, чем $1/x$; при этом наблюдаются осцилляции амплитуды с периодом 12 – 13 мм.

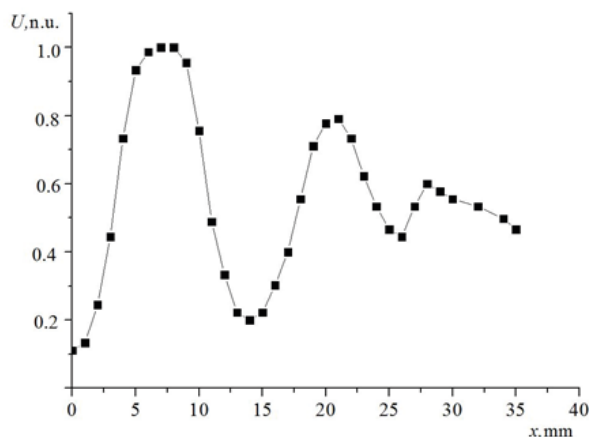


Рис. 2. Профиль стоячей волны медного экрана при комнатной температуре (экспериментальная зависимость нормированных значений амплитуды сигнала от расстояния до волнового источника)



Такое поведение амплитуды противоречит общепринятому положению о резком спаде амплитуды электромагнитного поля в ближней зоне, но согласуется с рассчитанной в работе [20] зависимостью амплитуды от расстояния в ближней зоне по закону более слабому, чем $U \sim 1/x$.

Осцилляции, наблюдаемые в нашем эксперименте, объясняются интерференцией волн, излучаемых источником возбуждения антенны (облучателем) и самой антенной в месте расположения приемного устройства.

На рис. 3 представлено сравнение полученных результатов измерения профиля стоячей волны для линейного вибратора и линеек Голомба на основе ВТСП-материалов (температура комнатная); амплитуды нормированы. Профили стоячей волны линеек Голомба на основе меди имеют те же особенности, за исключением того, что амплитуда сигнала примерно в 1,5 раза выше. Это связано с тем, что при комнатной температуре удельное сопротивление меди ($1,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см) меньше, чем у используемого ВТСП — порядка $5 \cdot 10^{-5}$ Ом·см.

Анализ рис. 3 показывает следующее:

для сплошной стержневой антенны наблюдается ярко выраженная интерференционная картина, аналогичная картине медного экрана, но падения амплитуды сигнала при увеличении расстояния не наблюдается;

для антенн в виде линеек Голомба, по мере увеличения порядка линейки, наблюдается изменение профиля стоячей волны, амплитуда интерференции уменьшается, а затем и вовсе пропадает для линеек 3-го и 4-го порядков в используемых условиях эксперимента;

для неэквидистантной стержневой антенны, не являющейся линейкой Голомба, интерференционная картина (хотя и довольно слабая) сохраняется;

для всех антенн наблюдаются интерференционные минимумы при $x = 0$, 12 – 15 и 22 – 25 мм; эти минимумы возникают при взаимодействии волн, распространяющихся прямо от излучателя к рупору и отраженных от образцов (в применяемой геометрии эксперимента).

При $x = 0$ амплитуда принимаемого сигнала во всех рассмотренных случаях (отражающий экран, базовый элемент и линейки Голомба из меди и ВТСП), близка к нулевой, что согласуется с данными по диаграмме направленности отражающей плоскости и стержневой антенны.

Обнаруженное отсутствие осцилляций амплитуды принимаемого сигнала линеек Голомба 3-го и 4-го порядков (см. рис. 3) связано со сложной интерференцией полей, излучаемых каждым из элементов антенны. Наличие неэквидистантности расположения элементов антенны, когда расстояние между элементами никогда не повторяется, как раз и приводит к необнаружению явной интерференционной картины. В то же время для неэквидистантной стержневой антенны, которая не является линейкой Голомба, интерференционная картина обнаруживается.

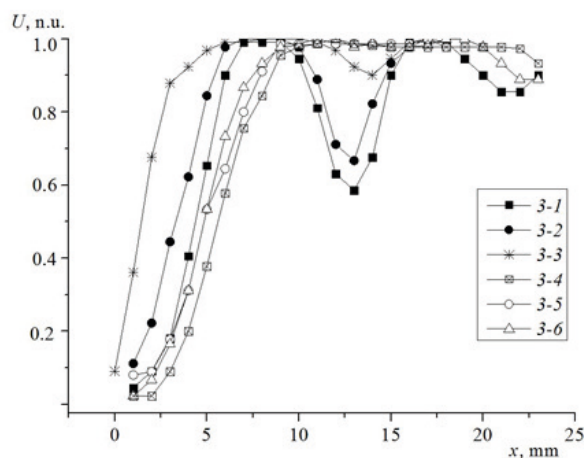


Рис. 3. Профили амплитуды стоячей волны для исследованных образцов (номера кривых соответствуют номерам позиций на рис. 1, б)

Для наших экспериментальных условий расчет параметров диаграммы направленности сложной антенны, составленной из кубических элементов, при наличии неэквидистантности расположения элементов антенны, представляет собой весьма сложную задачу и выходит за рамки данной статьи.

На рис. 4 приведены экспериментальные данные по температурной зависимости профиля стоячей волны антенны в виде линейки Голомба 4-го порядка, изготовленной из различных материалов. Для линеек Голомба других порядков результаты аналогичны.

Измерения выполнены для линеек Голомба 4-го порядка в точке, расположенной в зоне наибольшей амплитуды U принимаемого сигнала (при $x = 5$ мм). Наблюдается слабый рост интенсивности принимаемого сигнала со снижением температуры для элемента, изготовленного из меди, что согласуется с ростом проводимости металлов при охлаждении.

Для элемента, изготовленного из ВТСП-порошка состава 1-2-3, наблюдается зависимость $U(T)$, характерная для таких материалов. При высоких температурах, выше точки сверхпроводящего перехода, как уже указано, удельное сопротивление используемого ВТСП выше, чем у меди; соответственно, и амплитуда отраженного сигнала меньше. При охлаждении наблюдается достаточно резкий рост интенсивности принимаемого сигнала в температурном диапазоне перехода ВТСП в сверхпроводящее состояние (98 – 82 К) [21]. При температурах ниже 82 К уровень принимаемого сигнала уже не зависит от температуры.

Для элемента, изготовленного из порошка наноВТСП, наблюдается в целом аналогичная зависимость, но с некоторыми особенностями. Сверхпроводящий переход растянут, и на кривой $U(T)$, в области этого перехода, наблюдается два участка: на интервале 98 – 95 К и при температуре ниже 80 К, что может быть связано с двухфазностью отожженного порошка наноВТСП [22]. Увеличение температуры перехода этих керамيك в сверхпроводящее состояние приблизительно до 96 К, по-видимому, связано с уменьшением размера частиц (примерно в двадцать раз), по сравнению с таковым для керамик, изготовленных по обычной керамической технологии.

В нашем эксперименте наблюдается рост амплитуды принимаемого сигнала примерно в 10 раз при охлаждении и переходе в сверхпроводящее состояние. Это гораздо меньше, чем снижение удельного сопротивления материала при таком переходе (более, чем в 10^5 раз [23]). Такое различие можно объяснить фактическими условиями эксперимента, а именно – использованием органического связующего при изготовлении из порошка базового кубического элемента. Связующее не только уменьшает объемную долю сверхпроводящей фазы, которая в исходном порошке составляет порядка 80 %, но

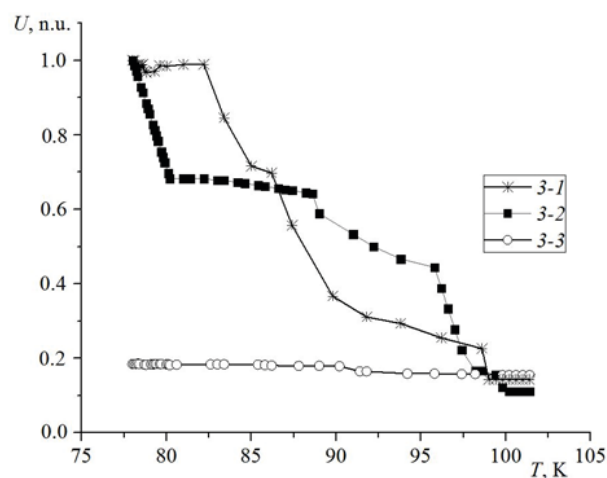


Рис. 4. Температурные зависимости амплитуды принимаемого сигнала для антенн в виде линеек Голомба 4-го порядка, изготовленных из стандартного порошка ВТСП 1-2-3 (3-1), наноВТСП (3-2) и меди (3-3) в области перехода используемых ВТСП в сверхпроводящее состояние (75 – 105 К)



и обволакивает гранулы сверхпроводящего порошка, что уменьшает размеры однородных связанных сверхпроводящих областей. Кроме того, поскольку мы исследуем отражение электромагнитной волны, в эксперименте проявляются свойства только тонкого поверхностного скин-слоя, толщина которого для условий сверхпроводимости вообще нулевая. В свою очередь, дефектность поверхности используемых элементов по отношению к объему повышена, а значит и сверхпроводящие свойства ухудшены [24].

При низких температурах, ниже 80 К, сопротивление материала в сверхпроводящем состоянии должно быть нулевым, но это выполняется только для постоянного тока. В случае же микроволнового поля, использованного в эксперименте, сопротивление материала отлично от нуля и зависит от частоты электромагнитных колебаний. Это объясняется существованием в материале, кроме электронов сверхпроводимости, еще и прочих носителей тока. Эти носители под действием микроволнового поля ускоряются и рассеивают энергию в виде джоулевого тепла. Соответственно, ухудшены и отражающие свойства, а это и наблюдается в эксперименте.

Заключение

В работе представлены результаты исследования амплитуды электромагнитных волн (профиля стоячей волны) в зависимости от расположения отражающей антенной решетки – линейки Голомба, изготовленной на основе меди и ВТСП-структур, относительно источника возбуждения и приемного устройства. Исследованы антенные решетки в виде линеек Голомба 1-го, 2-го, 3-го и 4-го порядков, длиной 0, 1, 3 и 6 линейных размеров элемента, изготовленных из кубических элементов на основе меди и прессованных порошков ВТСП.

Расчет параметров диаграммы направленности исследованных сложных антенн, составленных из кубических элементов, да еще и при наличии неэквидистантности расположения элементов антенны, представляет собой весьма сложную задачу, что подчеркивает необходимость проведения экспериментов.

Установленные в работе особенности поведения линеек Голомба, в том числе изготовленных на основе сверхпроводящих элементов, имеют большие перспективы для использования в микроволновой радиотехнике.

Отсутствие провалов в профиле амплитуды стоячей волны для линеек Голомба 3-го и 4-го порядков, и, скорее всего, также для линеек более высоких порядков, позволит создавать антенны с отсутствием провалов сигнала в ближней и средней зонах антенн в реальных условиях эксплуатации. Это указывает на преимущества использования массивов Голомба для изготовления антенн, обеспечивающих сохранение постоянства амплитуды сигнала в ближней зоне.

Как отсутствие провалов на профиле амплитуды стоячей волны для линейки Голомба 4-го порядка, так и одновременное наличие таких провалов на соответствующем профиле для неэквидистантной стержневой антенны (она не является линейкой Голомба, но имеет ту же длину и то же количество элементов, как линейка Голомба) и на профилях для линеек Голомба более низких порядков, позволят управлять отражательными свойствами антенн путем сдвига и переключения элементов антенн.

Использование сверхпроводящих элементов в конструкции позволит не только повысить эффективность антенны, но и управлять ее характеристиками за счет выбора температурного режима работы, а значит и удельного сопротивления составляющих элементов и их отражательных свойств.

Особенно актуальными будут такие свойства при разработке новых материалов, обладающих сверхпроводимостью при комнатной температуре [25, 26].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скрынников В.** Научный обзор: проблемы обеспечения электромагнитной совместимости современных и перспективных радиосистем сотовой связи (Часть 2) // Технологии и средства связи. 2017. № 1 (118). С. 28–36.
2. **Марков Г. Т., Сазонов Д. М.** Антенны. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: «Энергия», 1975. 528 с.

3. **Фейнберг Е. Л.** Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. 2-е изд. М.: Наука. Физматлит, 1999. 496 с.
4. IEC [6 October 2000] IEC Committee Draft (CD) 85/214/CD: Measurement and evaluation of high frequency (9 kHz to 300 GHz) electromagnetic fields with regard to human exposure. https://www.iec.ch/ords/f?p=103:38:516335895086782:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1278,20,8559.
5. **Цян Г., Иян Л., Луценко В. И., Юн Д.** Неэквидистантные двумерные антенные решетки, синтезированные с использованием латинских квадратов и циклических разностных множеств // Радиофизика и электроника. 2019. Т. 24. № 1. С. 12–23.
6. **Бахрах Л. Д., Зайцев Д. Ф., Сигов А. С.** Новые аспекты применения нанотехнологии в аппаратуре АФАР: нанофотоника и опто-MEMS // Антенны. 2009. № 6 (145) С. 84–85.
7. **Wolfram S.** Idea makers: personal perspectives on the lives & ideas of some notable people. USA: Wolfram Media Inc., 2016. 250 p.
8. **Berngardt O. I., Voronov A. L., Grkovich K. V.** Optimal signals for spectral measurements at EKB SuperDARN radar: Theory and experiment // Radio Science. 2015. Vol. 50. No. 6. Pp. 486–500.
9. **Berngardt O. I., Voronov A. L., Grkovich K. V.** Optimal signals for spectral measurements at EKB SuperDARN radar: Theory and Experiment // arXiv.org > physics > arXiv:1409.6053, 1–21, DOI: 10.1002/2014RS005589.
10. **Черноплеков Н. А.** Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения // Вестник Российской академии наук. 2001. Т. 71. № 4. С. 303–319.
11. **Мухортов Вл. М., Следков В. А., Мухторов Вас. М.** Высокотемпературные сверхпроводники в современной аппаратуре связи (перспективы применения и состояния исследований). Часть 2 // Микросистемная техника. 2002. № 9. С. 11–18.
12. **Hansen R. C., Collin R. E.** Small antenna handbook. USA, Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 346 p.
13. **Braginski A. I.** Superconductor electronics: Status and outlook // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2019. Vol. 32. No. 1. Pp. 23–44.
14. **Коньков О. И., Приходько А. В.** Микроволновые исследования отражающих экранов на основе массивов Костаса // Письма в Журнал технической физики. 2000. Т. 26. № 6. С. 27–31.
15. **Мастеров В. Ф., Приходько А. В., Коньков О. И., Теруков Е. И.** СВЧ свойства системы Cu – C // Письма в Журнал технической физики. 1995. Т. 21. № 1. С. 66–71.
16. **Prichodko A. V., Shatkovski E. V., Yastrebov S. G.** The studies of the effect of photostimulated changes in thin carbon films // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1994. Vol. 15. No. 3. Pp. 579–584.
17. Проблемно-ориентированная информационно вычислительная система, <http://poivs.tsput.ru/ru/Math/NumberTheory/Different/RulerGolomb>.
18. **Киселев А. А.** Высокотемпературная сверхпроводимость. Фундаментальные и прикладные исследования. Выпуск 1. Ленинград: Машиностроение, 1990. 686 с.
19. **Faradzheva M. P., Prikhodko A. V., Konkov O. I., Faradzhev Sh. P.** The nanosecond studies of granular carbon nanostructures based on high temperature superconductors // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1124. P. 081004.
20. **Ерохин Г. А., Кочержевский В. Г., Петровский А. А.** Структура ближнего поля проволочных антенн // Журнал радиоэлектроники. 1999. № 3. С. 2–2.
21. **Flores-Livas J. A., Boeri L., Sanna A., Profeta G., Arita R.** A perspective on conventional high-temperature superconductors at high pressure: Methods and materials // Physics Reports. 2020. Vol. 856. 29 April. Pp. 1–78.
22. **Гаджимагомедов С. Х., Палчаев Д. К., Рабаданов М. Х., Шабанов Н. С., Палчаев Н. А., Мурлиев Э. К., Эмиров Р. М., Мурлиева Ж. Х.** Керамические материалы на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, полученные из нанопорошков // Письма в Журнал технической физики. 2016. Т. 42. № 1. С. 9–16.
23. **Palchayev D. K., Gadzhimagomedov S. Kh., Murlieva Zh. Kh., Rabadanov M. Kh., Emirov R. M.** Structure and conductivity of nanostructured YBCO ceramics // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 941. P. 012076.
24. **Мейлихов Е. З.** Структурные особенности ВТСП-керамик и их критический ток и вольт-амперная характеристика // Успехи физических наук. 1993. Т. 163. Вып. 3. С. 27–54.



25. Snider E., Dasenbrock-Gammon N., McBride R., Debessai M., Vindana H., Ven-Catasamy K., Lawler K. V., Salamat A., Dias R. P. Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride // *Nature*. 2020. Vol. 586. No. 7829. Pp. 373–377.

26. Drozdov A. P., Kong P. P., Minkov V. S., et al. Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures // *Nature*. 2019. Vol. 569. No. 7757. Pp. 528–531.

REFERENCES

1. Skrynnikov V., Scientific review: Problems of ensuring electromagnetic compatibility of modern and perspective cellular radio systems (Part 2), *Tekhnologii i sredstva svyazi* [Technologies and Communication Facilities]. (1(118)) (2017) 28–36 (in Russian).

2. Markov G. T., Sazonov D. M., *Antennы* [Antennas], 2nd edition., revised and enlarged, “Energiya” Publishing, Moscow, 1975.

3. Feinberg E. L., *Rasprostraneniye radiovoln vdol zemnoy poverkhnosti*. 2-ye izd. [Radiowave propagation along the Earth’s surface, 2nd edition], Nauka, Fizmatlit, Moscow, 1999 (in Russian).

4. IIEC [6 October 2000] IEC Committee Draft (CD) 85/214/CD: Measurement and evaluation of high frequency (9 kHz to 300 GHz) electromagnetic fields with regard to human exposure. https://www.iec.ch/ords/f?p=103:38:516335895086782:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1278,20,8559.

5. Tsyun G., Iyan L., Lutsenko V. I., Yun D., Nonequidistant two-dimensional antenna arrays synthesized using Latin squares and cyclic difference sets, *Radiofizika i Elektronika*. 24 (1) (2019) 12–23 (in Russian).

6. Bakhrakh L. D., Zaytsev D. F., Sigov A. S., *Novyye aspekty primeneniya nanotekhnologii v apparature AFAR: nanofotonika i opto-MEMS* [New aspects of using nanotechnology in the active phased arrays equipment: Nanophotonics & Opto-MEMS], *Antennas*. 6 (145) (2009) 84–85 (in Russian).

7. Wolfram S., *Idea makers: personal perspectives on the lives & ideas of some notable people*, Wolfram Media Inc., USA, 2016.

8. Berngardt O. I., Voronov A. L., Grkovich K. V., Optimal signals for spectral measurements at EKB SuperDARN radar: Theory and experiment, *Radio Science*. 50 (6) (2015) 486–500.

9. Berngardt O. I., Voronov A. L., Grkovich K. V., Optimal signals for spectral measurements at EKB SuperDARN radar: Theory and Experiment // *arXiv.org > physics > arXiv:1409.6053*, 1–21, DOI: 10.1002/2014RS005589.

10. Chernoplekov N. A., Superconducting technologies: Current state and prospects of practical application, *Bulletin of the RAS*. 71 (4) (2001) 303–319 (in Russian).

11. Muhortov V. I., Sledkov V. A., Muhortov V. S., High temperature superconductivity for wireless communication application. Part II, *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystems Engineering]. (9) (2002) 11–18 (in Russian).

12. Hansen R. C., Collin R. E., *Small antenna handbook*, John Wiley & Sons, Inc., USA, Canada, 2011.

13. Braginski A. I., Superconductor electronics: Status and outlook, *J. Supercond. Nov. Magn.* 32 (1) (2019) 23–44.

14. Kon’kov O. I., Prikhod’ko A. V., Microwave experiment on a Costas-array reflecting screen, *Tech. Phys. Lett.* 26 (3) (2000) 236–238.

15. Masterov V. F., Prikhod’ko A. V., Kon’kov O. I., Terukov E. I., Microwave properties of the Cu – C system, *Tech. Phys. Lett.* 21 (1) (1995) 30–32.

16. Prikhodko A. V., Shatkovski E. V., Yastrebov S. G., The studies of the effect of photostimulated changes in thin carbon films, *Int. J. Infrared Milli. Waves*, 15 (3) (1994) 579–584.

17. Problem Oriented Data Processing System. <http://poivs.tsput.ru/ru/Math/> Number Theory/ Different/ RulerGolomb.

18. Kiselev A. A., *Vysokotemperaturnaya sverkhprovodimost. Fundamentalnyye i prikladnyye issledovaniya* [High temperature superconductivity. Fundamental & applied research], Mashinostroyeniye, Leningrad, 1990 (in Russian).

19. Faradzheva M. P., Prikhodko A. V., Konkov O. I., Faradzhev Sh. P., The nanosecond studies of granular carbon nanostructures based on high temperature superconductors, *J. Phys. Conf. Ser.* 1124

(2018) 081004.

20. Erokhin G. A., Kocherzhevsky V. G., Petrovsky A. A., Struktura blizhnego polya provolochnykh antenn [The structure of wire antennas' nearfield], Zhurnal Radioelektroniki [Journal of Radio Electronics]. (3) (1999) 2 (in Russian).

21. Flores-Livas J. A., Boeri L., Sanna A., et al., A perspective on conventional high-temperature superconductors at high pressure: Methods and materials, Phys. Rep. 856 (29 April) (2020) 1–78.

22. Gadzhimagomedov S. K., Palchayev D. K., Rabadanov M. K., et al., $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ -based materials manufactured from nanopowders, J. Tech. Phys. Lett. 42 (1) (2016) 4–7.

23. Palchayev D. K., Gadzhimagomedov S. Kh., Murlieva Zh. Kh., et al., Structure and conductivity of nanostructured YBCO ceramics, J. Phys. Conf. Ser. 941 (2017) 012076.

24. Meilikhov E. Z., Structural features, critical currents and current-voltage characteristics of high temperature superconducting ceramics, Phys. Usp. 36 (3) (1993) 129–151.

25. Snider E., Dasenbrock-Gammon N., McBride R., et al., Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride, Nature. 586 (7829) (2020) 373–377.

26. Drozdov A. P., Kong P. P., Minkov V. S., et al., Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures, Nature. 569 (7757) (2019) 528–531.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФАРАДЖЕВА Мислимат Пиралиевна — кандидат технических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

faradzheva_mp@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-9754-3965

ПРИХОДЬКО Александр Владимирович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

aleks@physics.spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-9015-4251

КОНЬКОВ Олег Игоревич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

oleg-1705@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-2223-1067

THE AUTHORS

FARADZHEVA Mislimat P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

faradzheva_mp@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-9754-3965

PRIKHOD'KO Aleksandr V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

aleks@physics.spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-9015-4251



KON'KOV Oleg I.

Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences

26, Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia

oleg-1705@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-2223-1067

*Статья поступила в редакцию 30.09.2021. Одобрена после рецензирования 25.11.2021.
Принята 25.11.2021.*

Received 30.09.2021. Approved after reviewing 25.11.2021. Accepted 25.11.2021.