

Антенна Фабри–Перо на основе электрически перестраиваемой щелевой антенны и двухслойной частотно-селективной поверхности

А. М. Сосунов[✉], А. Г. Алтынников, Т. К. Легкова, Р. А. Платонов, А. Е. Комлев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] amsosunov@etu.ru

Аннотация

Введение. Ряд работ в области конструирования антенн Фабри–Перо направлен на достижение широкой полосы рабочих частот, однако не всегда удается добиться сравнительно одинакового коэффициента усиления внутри нее. В данной статье описана конструкция антенны Фабри–Перо, в которой для расширения полосы частот использовалась перестраиваемая щелевая антенна. Одним из критериев при разработке антенного устройства являлась высокая стабильность коэффициента усиления – его изменения не должны превышать 1 дБ в заявленной полосе.

Цель работы. Разработка антенны Фабри–Перо для частотного диапазона 4.9...5.5 ГГц с высокой стабильностью коэффициента усиления внутри рабочей полосы частот.

Материалы и методы. В конструкции разрабатываемой антенны в качестве перестраиваемых элементов использовались тонкопленочные сегнетоэлектрические конденсаторы. Диэлектрическим материалом при разработке антенны служил металлизированный армированный фторопласт. Параметры сегнетоэлектрических элементов измерялись с использованием резонансной методики, в то время как параметры диэлектрического материала определялись с помощью метода Николсона–Росса–Вейра.

Результаты. Рабочая полоса частот разработанной антенны составила 4.9...5.5 ГГц. Были изготовлены и экспериментально исследованы образцы сегнетоэлектрических конденсаторов и фольгированного диэлектрического материала, на основе которых был создан прототип перестраиваемой щелевой антенны. Результаты моделирования показали, что коэффициент усиления разработанной антенны Фабри–Перо составил не менее 10 дБ. Изменение коэффициента усиления внутри рабочей полосы частот не превысило 0.7 дБ.

Заключение. Разработана Антенна Фабри–Перо на основе электрически перестраиваемой щелевой антенны и двухслойной частотно-селективной поверхности. Рабочая полоса частот разработанной антенны составила 4.9...5.5 ГГц, что соответствует полосе частот сетей Wi-Fi. Оптимизация конструктивных параметров антенны позволила добиться высокого коэффициента усиления при его малом изменении в заданном частотном диапазоне.

Ключевые слова: антенна Фабри–Перо, щелевая антенна, сегнетоэлектрический конденсатор, фольгированный ламинат, политетрафторэтилен, тонкая пленка

Для цитирования: Антенна Фабри–Перо на основе электрически перестраиваемой щелевой антенны и двухслойной частотно-селективной поверхности / А. М. Сосунов, А. Г. Алтынников, Т. К. Легкова, Р. А. Платонов, А. Е. Комлев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 6. С. 16–26. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-16-26

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках Государственного задания № 075-01438-22-07 от 28.10.2022 г. (FSEE-2022-0019).

Статья поступила в редакцию 15.10.2023; принята к публикации после рецензирования 29.11.2023; опубликована онлайн 29.12.2023

Fabry–Perot Antenna Based on an Electrically Tunable Slot Antenna and a Two-Layer Frequency-Selective Surface

Alexey M. Sosunov✉, Andrey G. Altynnikov, Tatiana K. Legkova,
Roman A. Platonov, Andrey E. Komlev

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ amsosunov@etu.ru

Abstract

Introduction. One of the directions in Fabry–Perot antenna design consists in increasing its operation frequency range. In the present work, we set out to develop a Fabry–Perot antenna with a smooth gain pattern across a wide frequency range. To that end, a tunable slot antenna based on a thin-film ferroelectric varactor was used. The major development criterion was a high uniformity of the gain pattern, not exceeding 1 dB in the given frequency band.

Aim. To develop a Fabry–Perot antenna for the 4.9...5.5 GHz frequency range with a high gain uniformity within the operating frequency band.

Materials and methods. The antenna under development was based on thin-film ferroelectric capacitors as tunable elements. Fluoroplastic plates metallized on both sides were used as a dielectric material for manufacturing a frequency selected surface and a slot antenna. The parameters of ferroelectric elements were measured using a resonance technique, while the parameters of the dielectric material were determined using the Nicholson–Ross–Weir method.

Results. The developed antenna has an operating frequency band of 4.9...5.5 GHz. Samples of ferroelectric capacitors and foiled dielectric material were manufactured and experimentally investigated. A tunable slot antenna was fabricated, and its characteristics were measured. The simulation results show that the gain value of the developed Fabry–Perot antenna is not less than 10 dB in the operation frequency range. Variations in the gain value within the operating frequency band do not exceed 0.7 dB.

Conclusion. A Fabry–Perot antenna based on an electrically tunable slot antenna and a two-layer frequency-selective surface was developed. The operating frequency band of the developed device ranges within 4.9...5.5 GHz, which corresponds to the frequency band of Wi-Fi networks. Optimization of the antenna design parameters made it possible to achieve higher gain values under their minor variations in the operation frequency band.

Keywords: Fabry–Perot antenna, slot antenna, ferroelectric capacitor, foiled laminate, polytetrafluoroethylene, thin film

For citation: Sosunov A. M., Altynnikov A. G., Legkova T. K., Platonov R. A., Komlev A. E. Fabry–Perot Antenna Based on an Electrically Tunable Slot Antenna and a Two-Layer Frequency-Selective Surface. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 6, pp. 16–26. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-16-26

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The study was carried out within the framework of the state assignment No. 075-01438-22-07 of 28.10.2022 (FSEE-2022-0019).

Submitted 15.10.2023; accepted 29.11.2023; published online 29.12.2023

Введение. Активное развитие беспроводных сетей и их широкое использование в повседневной жизни делает актуальным внедрение антенн с высоким коэффициентом усиления [1–3]. Их использование позволяет существенно повысить скорость передачи данных в беспроводных сетях различных стандартов связи, особенно в широко используемых сетях Wi-Fi и 5G. Классическими вариантами таких антенн являются волноводные рупорные антенны [4], антенные решетки [5] и линзовые антенны [6, 7].

Однако все они имеют ряд недостатков. В частности, рупорные и линзовые антенны характеризуются большими габаритами, особенно в низких частотных диапазонах. Антенные решетки имеют сложную конструкцию и высокую стоимость, что ограничивает их более широкое применение. Отдельный класс антенных устройств с высоким коэффициентом усиления – антенны на основе объемных резонаторов, в частности на основе резонатора Фабри–Перо (ФП). Данные антенны являются простым и

Антенна Фабри–Перо на основе электрически перестраиваемой щелевой антенны

17

и двухслойной частотно-селективной поверхности

Fabry–Perot Antenna Based on an Electrically Tunable Slot Antenna and a Two-Layer Frequency-Selective Surface

эффективным решением при выборе антенн с высоким коэффициентом усиления. Их основное достоинство – простота конструкции, обусловленная использованием простейшего излучательного элемента в качестве источника излучения и, как правило, пассивной частотно-селективной поверхности (ЧСП), выполняющей роль полупрозрачного зеркала. Такая антенна демонстрирует высокую направленность и коэффициент усиления, сравнимый с антенными решетками, при значительно более простой конструкции. Это антенна резонансного типа, так что в классическом варианте ее исполнения она является узкополосной, поэтому расширение ее рабочей полосы частот – одно из направлений исследований в области конструирования антенн данного типа. Один из способов преодоления указанного недостатка – использование нескольких излучающих элементов, каждый из которых рассчитан на определенный поддиапазон частот [8]. Таким образом можно сконструировать антенну ФП, работающую в одной или нескольких полосах частот. Однако данное решение существенно усложняет конструкцию антенны, так как возникает необходимость добавления цепей управления с СВЧ-ключами для переключения между источниками в процессе работы антенны. Так же можно использовать паразитные излучательные элементы, локализованные рядом с излучающей антенной, для расширения полосы частот. Например, в [9] в качестве источника излучения используется щелевая антенна с несколькими паразитными элементами, локализованными в одной плоскости. Более компактная реализация данного принципа представлена в [10]. Еще одним вариантом расширения полосы частот является использование управляемых полупроводниковых емкостных элементов и формирование антенны ФП с частотной перестройкой [11, 12]. Использование данных подходов, как правило, приводит к увеличению габаритов разрабатываемой антенны и к существенной неоднородности коэффициента усиления антенны внутри заявленной полосы частот, которая может превышать 3 дБ. Неоднородность частотной зависимости коэффициента усиления антенны ФП определяется несколькими факторами. Макси-

мальный коэффициент усиления будет достигаться при соблюдении условия синфазности падающих на ЧСП волн с волнами, отраженными в противоположном направлении. При фиксированном расстоянии между ЧСП и нижним зеркалом антенны ФП, а также использовании неперестраиваемой ЧСП в конструкции антенны данное условие не может быть реализовано сразу во всей полосе частот. Еще одним фактором является однородность частотной зависимости фазы и амплитуды коэффициента отражения ЧСП. В связи с этим при проектировании антенны ФП, работающей в широком частотном диапазоне, целесообразно использовать многослойную ЧСП, что позволит оптимизировать зависимость коэффициента отражения для выбранной полосы частот. Следующим фактором является частотная зависимость коэффициента усиления антенны, используемой в качестве источника излучения. Учет всех этих факторов позволит минимизировать неоднородность в частотной зависимости коэффициента усиления антенны ФП, что будет показано в данной статье на примере антенны ФП, спроектированной для работы в диапазоне 4.9...5.5 ГГц, соответствующем полосе частот для сетей Wi-Fi.

Материалы и методы. Конструирование частотно-перестраиваемой антенны ФП на основе сегнетоэлектрических конденсаторов проводилось в несколько этапов. Вначале исследовались характеристики сегнетоэлектрических элементов и диэлектрического материала для получения основных электрофизических параметров, которые далее использовались при моделировании характеристик антенны.

Сегнетоэлектрические конденсаторы на основе тонкой пленки твердого раствора титаната бария-стронция состава $Ba_{0.3}Sr_{0.7}TiO_3$ служили в качестве управляемых элементов для частотной перестройки разрабатываемой антенны. Данный материал обладает высокой управляемостью и относительно малыми потерями в широком частотном диапазоне, что делает его перспективным для применения в устройствах СВЧ-техники [13]. Тонкие сегнетоэлектрические пленки толщиной 700 нм были получены методом магнетронного распыления в кислороде. В качестве подложки использовались пла-

стины сапфира (Al_2O_3 , г-срез) толщиной 0.5 мм. Давление рабочего газа равнялось 2 Па, температура подложки 800 °С. Далее для формирования электродов на пленку сегнетоэлектрика методом термального испарения был нанесен слой меди толщиной 1 мкм. В рамках данной технологической операции использовался подслои хрома для улучшения адгезии.

При экспериментальном исследовании параметров сегнетоэлектрических элементов применялась резонансная методика измерения. Измерения проводились на частоте ~2 ГГц. Экспериментальная зависимость емкости, нормированной на номинальное значение, от прикладываемого управляющего напряжения приведена на рис. 1. Добротность сегнетоэлектрического конденсатора составляет ~60.

В качестве диэлектрического материала для изготовления щелевой антенны был взят фольгированный армированный фторопласт (ФФ), фторопласт-4Д, изготовленный прессованием слоев лакоткани и облицованный с обеих сторон медной электролитической гальваностойкой фольгой толщиной 0.035 ± 0.003 мм. Лакоткань (стеклоткань) в свою очередь состоит из нескольких слоев стекловолокна с многократной пропиткой каждого слоя фторопластовой эмульсией (суспензией водной) марки Ф-4Д (Ф-4ДС) с последующим спеканием каждого слоя. Толщина листа 0.5 ± 0.15 мм. Для определения значений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь полученного материала использовался метод Николсона–Росса–Вейра, измерения проводились

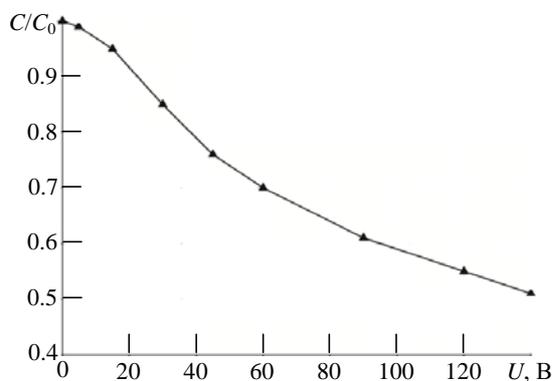


Рис. 1. Зависимость емкости сегнетоэлектрического конденсатора, нормированная к начальному значению, от управляющего напряжения

Fig. 1. Dependence of the ferroelectric capacitor capacity (normalized to the initial value) on the control voltage

на измерительном стенде, собранном на основе ВАЦ Планар Кобальт С4420 и волноводной линии [14]. Исследование показало, что на частоте ~10 ГГц диэлектрическая проницаемость материала составляет 2.5 ± 0.2 , а тангенс угла диэлектрических потерь – 0.001.

Экспериментальное исследование характеристик перестраиваемой щелевой антенны проводилось с использованием ВАЦ Планар Кобальт С4420. Моделирование характеристик как антенны ФП, так и элементов антенны проводилось в специализированных программных пакетах электродинамического моделирования с помощью метода конечных элементов.

Результаты. Рассмотрим результаты исследования антенны ФП на основе частотно-перестраиваемой щелевой антенны и двухслойной ЧСП, спроектированной на частотный диапазон 4.9...5.5 ГГц. Трехмерный вид с разнесенными частями предлагаемого устройства представлен на рис. 2.

Частотно-перестраиваемая щелевая антенна. В предлагаемой конструкции антенны ФП в качестве источника излучения использовалась щелевая антенна. Ее основные достоинства – простота, малые потери и гальваническая развязка между излучающим элементом и питающей линией. Щелевая антенна является антенной резонансного типа, поэтому обладает узкой рабочей полосой частот. Расширить рабочий диапазон частот можно за счет формирования частотно-перестраиваемой антенны на ее

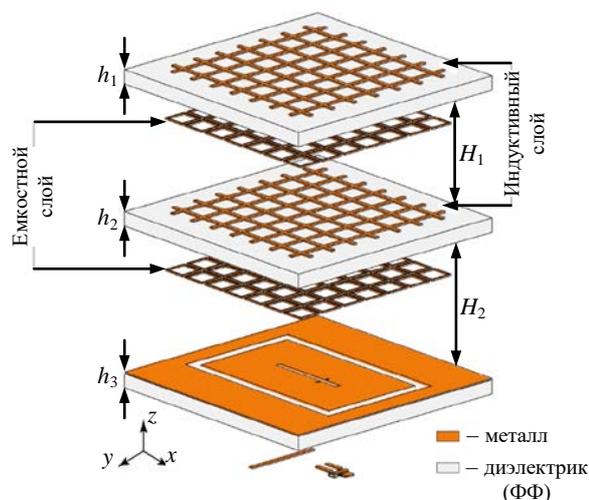


Рис. 2. Трехмерный вид с разнесенными частями предлагаемой антенны ФП

Fig. 2. Explosion view of the proposed Fabry-Perrot antenna

основе. Один из наиболее эффективных методов частотной перестройки заключается в интеграции перестраиваемого полупроводникового варактора непосредственно в апертуру антенны [15]. Однако локализация перестраиваемого элемента непосредственно в щели ведет к искажению ее диаграммы направленности. Другим недостатком является то, что варактор и цепь развязки для подачи управляющего напряжения расположены на верхней стороне печатной платы. Это несколько ограничивает возможность использования данной антенны в конструкции антенны ФП, так как затрудняет минимизацию ее размеров за счет использования диэлектрического заполнения между источником излучения и частотно-селективной поверхностью. Чтобы избежать этих недостатков, предложена новая конструкция электрически перестраиваемой щелевой антенны. В отличие от существующих вариантов используются 2 перестраиваемых сегнетоэлектрических конденсатора, расположенных на нижней поверхности печатной платы. Непосредственно в щелевой линии отсутствуют какие-либо элементы, поэтому искажение диаграммы направленности сведено к минимуму. Топология щелевой антенны и цепи смещения постоянного тока представлена на рис. 3. Для развязки в цепи смещения использовался резистор номиналом 100 кОм.

Был проведен расчет топологии щелевой антенны с диапазоном частотной перестройки 4.9...5.5 ГГц. В качестве перестраиваемых эле-

ментов применялись сегнетоэлектрические конденсаторы номиналом 0.4 пФ. Параметры конденсаторов, а также параметры материала ФФ, служившего материалом подложки, приведены ранее. Далее был изготовлен прототип антенны (рис. 4) и исследованы его характеристики. Результаты измерения частотной зависимости коэффициента отражения при различных значениях емкости сегнетоэлектрического конденсатора приведены на рис. 5.

Из рисунка видно, что при изменении емкости сегнетоэлектрических конденсаторов с 0.4 до 0.2 пФ достигается эффективная перестройка рабочей частоты в выбранном диапазоне частот.

Частотно-селективная поверхность. В антеннах ФП частотно-селективная поверхность, выполняющая функцию полупрозрачного зеркала, изготавливается в виде однослойной или многослойной структуры. Выбор количества слоев определяется ее топологией и заданной шириной полосы рабочих частот. В рамках описываемой работы для достижения высокой однородности частотной зависимости коэффициента усиления антенны ФП была разработана ЧСП, состоящая из двух слоев. Использование однослойной ЧСП существенно упростило бы конструкцию антенны ФП, однако, как показало моделирование, одного слоя недостаточно для минимизации изменения коэффициента отражения и его фазы в выбранном частотном диапазоне. В качестве материала для слоев ЧСП был выбран ФФ толщиной 0.5 мм. При формирова-

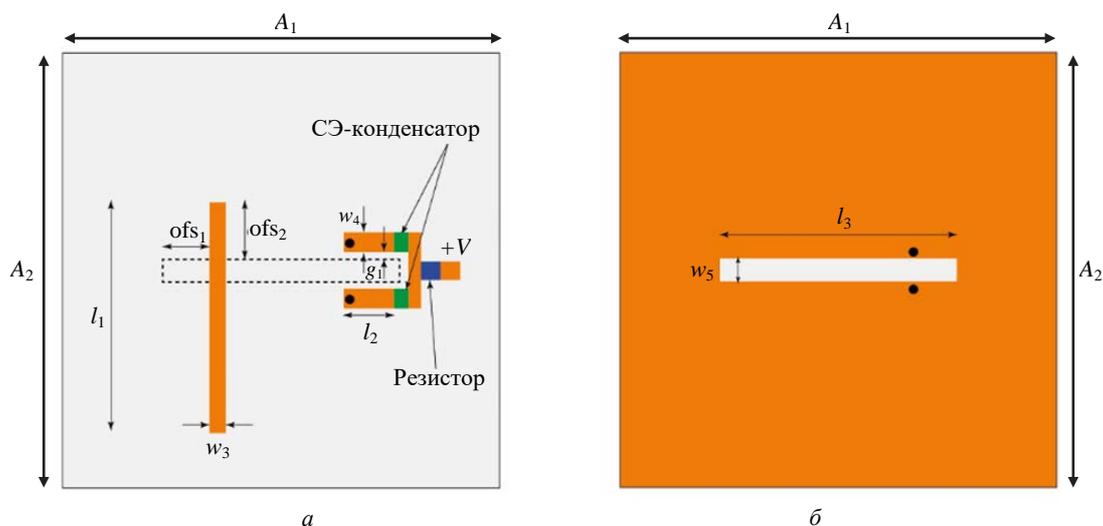


Рис. 3. Топология перестраиваемой щелевой антенны: *a* – нижний слой; *b* – верхний слой

Fig. 3. Topology of a tunable slot antenna: *a* – bottom layer; *b* – top layer

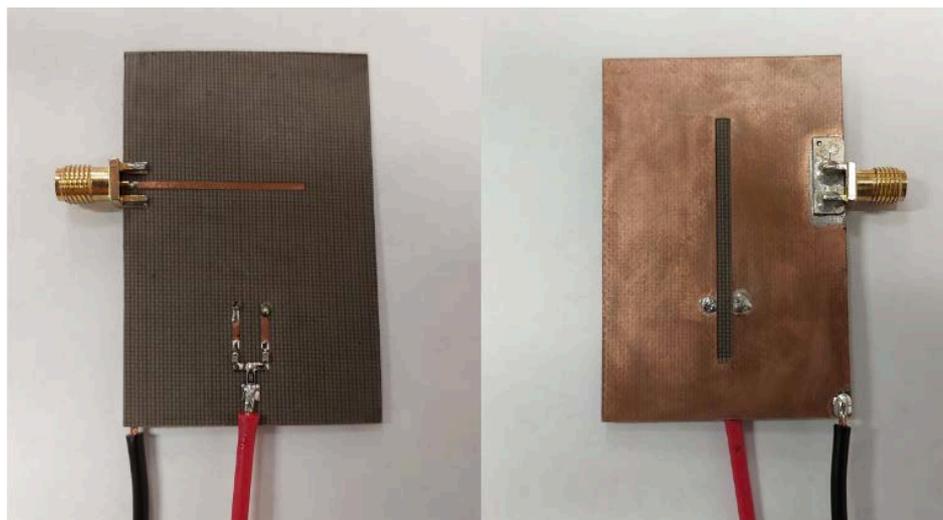


Рис. 4. Фотография прототипа перестраиваемой щелевой антенны на основе сегнетоэлектрических конденсаторов

Fig. 4. A prototype of a tunable slot antenna based on ferroelectric capacitors

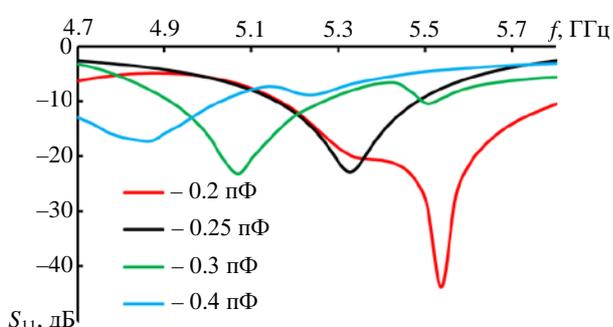


Рис. 5. Частотная зависимость $|S_{11}|$ щелевой антенны при различных значениях емкости сегнетоэлектрических конденсаторов

Fig. 5. Frequency dependence of the $|S_{11}|$ of a slot antenna at different capacitance values of ferroelectric capacitors

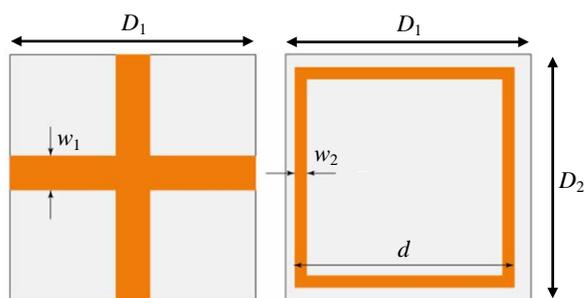


Рис. 6. Конструкция ЧСП и топология используемых элементарных ячеек

Fig. 6. The topology of the frequency selective surface elementary cells

нии топологии ячеек каждого из слоев ЧСП использовался широко применяемый подход, когда ячейки на одной из поверхностей слоя представляют собою индуктивные элементы, а ячейки на противоположной поверхности слоя являются емкостными [16]. Топология ячеек, ис-

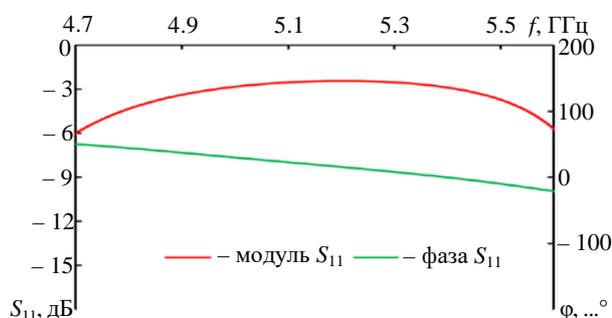


Рис. 7. Результаты моделирования частотных зависимостей модуля и фазы коэффициента отражения ЧСП

Fig. 7. Simulation results of frequency dependencies of the module and argument of reflection coefficient of the frequency selective surface

пользованных в ЧСП, приведена на рис. 6. На рис. 7 показана частотная зависимость коэффициента отражения ЧСП, которая далее была использована в конструкции антенны ФП. Из рисунка видно, что параметры ЧСП были подобраны таким образом, что изменение коэффициента отражения в частотном диапазоне 4.9...5.5 ГГц не превышало 1 дБ.

Характеристики антенны ФП. Конструкция разработанной антенны ФП приведена на рис. 2, а ее геометрические размеры – в таблице. Расстояние от излучателя до частотно-селективной поверхности составляет 28 мм. Данный параметр подбирался таким образом, чтобы изменение коэффициента усиления антенны внутри рабочей полосы было минимальным. Результаты моделирования диаграммы направленности антенны ФП представлены на рис. 8. Частотные зависимости коэффициента

Геометрические параметры предложенной антенны ФП
 Dimensional parameters of the proposed Fabry–Perrot antenna

Параметр	Значение, мм	Параметр	Значение, мм
$D_1 = D_2$	10.2	h_2	0.5
w_1	1.4	h_3	0.5
w_2	0.5	l_1	29
d	9.5	w_3	1.38
A_1	90	ofs ₁	7.2
A_2	100	ofs ₂	8
l_3	33	w_4	1.5
w_5	2	l_2	7.2
g_1	0.5	H_1	28
h_1	0.5	H_2	3.5

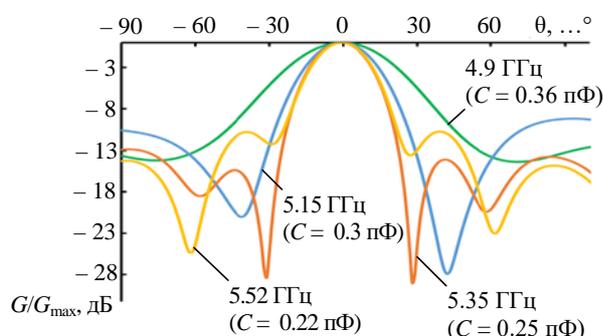


Рис. 8. Диаграммы направленности разработанной антенны ФП, нормированные на максимальное значение

Fig. 8. Radiation patterns of the proposed Fabry-Perrot antenna, normalized to the maximum value

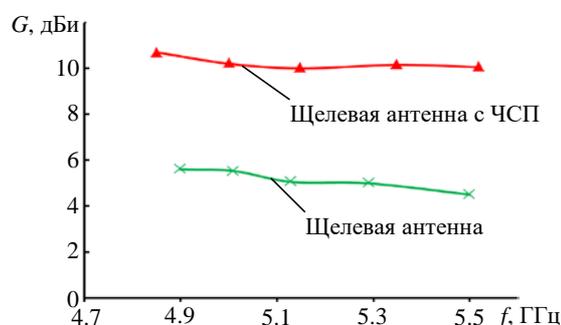


Рис. 9. Частотные зависимости коэффициента усиления перестраиваемой щелевой антенны и антенны ФП на ее основе

Fig. 9. Frequency dependencies of the gain of the tunable slot antenna and the Fabry-Perrot antenna

усиления перестраиваемой щелевой антенны в сравнении с коэффициентом усиления антенны ФП приведены на рис. 9.

Заключение. В статье представлена конструкция антенны ФП на основе частотно-перестраиваемой щелевой антенны. Перестраиваемая щелевая антенна и двухслойная ЧСП были использованы для расширения рабочей полосы и достижения высокой однородности по коэффициенту усиления внутри нее. Рабочая полоса частот разработанной антенны составляет 4.9...5.5 ГГц. Для реализации частотной перестройки щелевой антенны были использо-

ваны тонкопленочные сегнетоэлектрические конденсаторы. Были изготовлены и экспериментально исследованы образцы сегнетоэлектрических конденсаторов и фольгированного диэлектрического материала, на основе которых был изготовлен прототип перестраиваемой щелевой антенны. Полученные данные использовались при моделировании характеристик антенны ФП. Результаты моделирования показывают, что разработанная антенна ФП обеспечивает усиление не менее 10 дБ. Изменение коэффициента усиления внутри рабочей полосы частот не превышает 0.7 дБ.

Авторский вклад

Сосунов Алексей Михайлович – электродинамическое моделирование антенны ФП с использованием метода конечных элементов; оформление иллюстраций; написание и редактирование статьи.

Алтыниников Андрей Геннадиевич – разработка конструкции перестраиваемой щелевой антенны; проведение измерений прототипа частотно-перестраиваемой щелевой антенны; написание и редактирование статьи.

Легкова Татьяна Константиновна – электродинамическое моделирование ЧСП; обработка результатов измерений характеристик частотно-перестраиваемой щелевой антенны.

Платонов Роман Андреевич – проведение измерений электрических свойств материала; обработка результатов измерений электрических свойств материала; редактирование статьи.

Комлев Андрей Евгеньевич – изготовление экспериментальных образцов фольгированного диэлектрического материала и сегнетоэлектрических конденсаторов; редактирование статьи.

Author's contribution

Alexey M. Sosunov, electrodynamic modeling of the FP antenna using the finite element method; design of illustrations, writing and editing an article.

Andrey G. Altyinnikov, tunable slot antenna design; tunable slot antenna prototype measurement; writing and editing an article.

Tatiana K. Legkova, electrodynamic modeling of the FSS; processing of the results of measurements of the characteristics of the frequency-tunable slot antenna.

Roman A. Platonov, carrying out measurements of the electrical properties of the material; processing of the results of measurements of electrical properties of the material; editing an article.

Andrey E. Komlev, fabrication of experimental samples of composite dielectric and ferroelectric materials; editing an article.

Список литературы

1. Wideband high gain fractal antenna for wireless applications / A. Desai, T. Upadhyaya, R. Petel, S. Bhatt, P. Mankodi // Progress in Electromagnetics Research Let. 2018. Vol. 74. P. 125–130. doi: 10.2528/PIERL18011504
2. Elsheakh D. M., Nermeen A. E., Esmat A. A. Ultra wide bandwidth high gain Vivaldi antenna for wireless communications // Progress in Electromagnetics Research Let. 2017. Vol. 69. P. 105–111. doi: 10.2528/PIERL17060507
3. Marno V. R., Odendaal J. W., Joubert J. J. High-gain directional antenna for WLAN and WiMAX applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Let. 2016. Vol. 16. P. 286–289. doi: 10.1109/LAWP.2016.2573594
4. Marno V. R., Odendaal J. W., Joubert J. J. Compact low-cross-polarization horn antennas with serpentine-shaped taper // IEEE Trans. Antennas Propag. 2004. Vol. 52, № 10. P. 2510–2516. doi: 10.1109/TAP.2004.834423
5. Mohammad N., Faisal M. A. Design, simulation and analysis of a high gain small size array antenna for 5G wireless communication // Wireless Personal Communications. 2021. Vol. 116. P. 2761–2776. doi: 10.1007/s11277-020-07819-9
6. Platonov R. A., Altyinnikov A. A., Kozyrev A. B. A Tunable Beamforming Ferroelectric Lens for Millimeter Wavelength Ranges // Coatings. 2020. Vol. 10, № 2. P. 180. doi: 10.3390/coatings10020180
7. Wideband High-Gain Double-Sided Dielectric Lens Integrated with a Dual-Bowtie Antenna / G. H. Lee, S. Kumar, H. C. Choi, K. W. Kim // IEEE Antennas Wireless Propag. Let. 2021. Vol. 20. P. 293–297. doi: 10.1109/LAWP.2020.3048165
8. Konstantinidis K., Feresidis A., Hall P. Dual-slot feeding technique for broadband Fabry–Perot cavity antennas // IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2015. Vol. 9, iss. 9. P. 861–866. doi: 10.1049/iet-map.2014.0530
9. Ultra-Wideband and High Gain Fabry-Perot Cavity Antenna Using Frequency Selective Surface and Parasitic Patch / Z. Li, J. Ma, B. Shi, L. Peng // 12th Intern. Symp. on Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE). Hangzhou, China, 3 Dec. 2018. Hangzhou Dianzi University, 2018. P. 1–3. doi: 10.1109/ISAPE.2018.8634123
10. A compact wideband circular polarized Fabry-Perot antenna using resonance structure of thin dielectric slabs / Nguyen-Trong Nghia, Huy Hung Tran, Truong Khang Nguyen, Amin M. Abbosh // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 56333–56339. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872571
11. A Frequency Reconfigurable Fabry-Perot Cavity Antenna / L. Ji, Z. Pei, L. Zhang, J. Li // IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, Canada, 5 July 2020. IEEE, 2020. P. 337–338. doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9330231
12. High Gain and Wide Bandwidth Fabry-Perot Frequency-Reconfigurable Antenna for Multiple LTE Radio Wireless Communication / T. K. Nguyen, M. T. Phan, R. Borowiec, A. Narbudowicz // IEEE Ninth Intern. Conf. on Communications and Electronics (ICCE), Phu Quoc Island, Vietnam, 13 Jan. 2021. IEEE, 2020. P. 260–264. doi: 10.1109/ICCE55644.2022.9852085
13. Characterization of the properties of barium-strontium titanate films and controlled elements based on them in the frequency range of 1–60 GHz / A. G. Altyinnikov, A. G. Gagarin, A. V. Tumarkin, I. V. Kotel'nikov // Technical Physics Let. 2019. Vol. 45. P. 540–543. doi: 10.1134/S1063785019060026

14. Исследование свойств композитного материала для СВЧ-применений на основе PTFE с различной концентрацией и размером частиц керамического наполнителя / А. Б. Козырев, А. Е. Комлев, А. М. Сосунов, А. Г. Алтынников, Р. А. Платонов // J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023. Т. 26, № 2. С. 16–24. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-16-24

15. Nader B., Sarabandi K. A varactor-tuned dual-band slot antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, no. 2. P. 401–408. doi: 10.1109/TAP.2005.863373

16. Latif S. I., Shafai L., Sharma S. K. Bandwidth enhancement and size reduction of microstrip slot antennas // IEEE Trans. Antennas Propag. 2005. Vol. 53. P. 994–1003. doi: 10.1109/TAP.2004.842674

Информация об авторах

Сосунов Алексей Михайлович – магистр по специальности "Электроника и нанoeлектроника" (2020), аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – устройства СВЧ; методики измерения СВЧ-параметров.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: amsosunov@etu.ru

Алтынников Андрей Геннадиевич – кандидат технических наук (2010), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 70 научных работ. Сфера научных интересов – нелинейные материалы; устройства СВЧ; антенны; тонкие пленки.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: agaltynnikov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5932-2504>

Легкова Татьяна Константиновна – магистр по специальности "Электроника и нанoeлектроника" (2021), аспирантка кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 5 научных работ. Сфера научных интересов – антенны; метаматериалы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: legkova_tk@mail.ru

Платонов Роман Андреевич – кандидат технических наук (2018), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 48 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика; устройства СВЧ; антенны.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: raplatonov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4556-629X>

Комлев Андрей Евгеньевич – кандидат технических наук (2011), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники; плазма.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aekomlev@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>

References

1. Desai A., Upadhyaya T., Petel R., Bhatt S., Mankodi P. Wideband High Gain Fractal Antenna for Wireless Applications. Progress in Electromagnetics Research Let. 2018, vol. 74, pp. 125–130. doi: 10.2528/PIERL18011504

2. Elsheakh D. M., Nermeen A. E., Esmat A. A. Ultra Wide Bandwidth High Gain Vivaldi Antenna for Wireless Communications. Progress in Electromagnetics Research Let. 2017, vol. 69, pp. 105–111. doi: 10.2528/PIERL17060507

3. Marno V. R., Odendaal J. W., Joubert J. J. High-Gain Directional Antenna for WLAN and WiMAX Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Let.* 2016, vol. 16, pp. 286–289. doi: 10.1109/LAWP.2016.2573594

4. Marno V. R., Odendaal J. W., Joubert J. J. Compact Low-Cross-Polarization Horn Antennas with Serpentine-Shaped Taper. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2004, vol. 52, no. 10, pp. 2510–2516. doi: 10.1109/TAP.2004.834423

5. Mohammad N., Faisal M. A. Design, Simulation and Analysis of a High Gain Small Size Array Antenna for 5G Wireless Communication. *Wireless Personal Communications.* 2021, vol. 116, pp. 2761–2776. doi: 10.1007/s11277-020-07819-9

6. Platonov R. A., Altyinnikov A. A., Kozyrev A. B. A Tunable Beamforming Ferroelectric Lens for Millimeter Wavelength Ranges. *Coatings.* 2020, vol. 10, no. 2, p. 180. doi: 10.3390/coatings10020180

7. Lee G. H., Kumar S., Choi H. C., Kim K. W. Wideband High-Gain Double-Sided Dielectric Lens Integrated with a Dual-Bowtie Antenna. *IEEE Antennas Wireless Propag. Let.* 2021, vol. 20, pp. 293–297. doi: 10.1109/LAWP.2020.3048165

8. Konstantinidis K., Feresidis A., Hall P. Dual-Slot Feeding Technique for Broadband Fabry–Perot Cavity Antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation.* 2015, vol. 9, iss. 9, pp. 861–866. doi: 10.1049/iet-map.2014.0530

9. Li Z., Ma J., Shi B., Peng L. Ultra-Wideband and High Gain Fabry-Perot Cavity Antenna Using Frequency Selective Surface and Parasitic Patch. 12th Intern. Symp. on Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE), Hangzhou, China, 3 Dec. 2018. Hangzhou Dianzi University, 2018, pp. 1–3. doi: 10.1109/ISAPE.2018.8634123

10. Nguyen-Trong Nghia, Huy Hung Tran, Truong Khang Nguyen, Amin M. Abbosh. A Compact Wide-

band Circular Polarized Fabry-Perot Antenna Using Resonance Structure of Thin Dielectric Slabs. *IEEE Access.* 2018, vol. 6, pp. 56333–56339. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872571

11. Ji L., Pei Z., Zhang L., Li J. A Frequency Reconfigurable Fabry-Perot Cavity Antenna. *IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, Canada, 5 July 2020.* IEEE, 2020, pp. 337–338. doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9330231

12. Nguyen T. K., Phan M. T., Borowiec R., Narbudowicz A. High Gain and Wide Bandwidth Fabry-Perot Frequency-Reconfigurable Antenna for Multiple LTE Radio Wireless Communication. *IEEE Ninth Intern. Conf. on Communications and Electronics (ICCE).* Phu Quoc Island, Vietnam, 13 Jan. 2021. IEEE, 2020, pp. 260–264. doi: 10.1109/ICCE55644.2022.9852085

13. Altyinnikov A. G., Gagarin A. G., Tumarkin A. V., Kotelnikov I. V. Characterization of the Properties of Barium–Strontium Titanate Films and Controlled Elements Based on Them in the Frequency Range of 1–60 GHz. *Technical Physics Let.* 2019, vol. 45, pp. 540–543. doi: 10.1134/S1063785019060026

14. Kozyrev A. B., Komlev A. E., Sosunov A. M., Altyinnikov A. G., Platonov R. A. Research into the Properties of a Composite Material for Microwave Applications Based on PTFE with Different Concentrations and Particle Sizes of Ceramic Filler. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2023, vol. 26, no. 2, pp. 16–24. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-16-24 (In Russ.)

15. Nader B., Sarabandi K. A Varactor-Tuned Dual-Band Slot Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* 2006, vol. 54, no. 2, pp. 401–408. doi: 10.1109/TAP.2005.863373

16. Latif S. I., Shafai L., Sharma S. K. Bandwidth Enhancement and Size Reduction of Microstrip Slot Antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2005, vol. 53, pp. 994–1003. doi: 10.1109/TAP.2004.842674

Information about the authors

Alexey M. Sosunov, Master in Electronics and Nanoelectronics (2020), Postgraduate Student of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: microwave devices; methods of measuring microwave parameters. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: amsosunov@etu.ru

Andrey G. Altyinnikov, Cand. Sci. (Eng.) (2010), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 70 scientific publications. Area of expertise: nonlinear materials; microwave devices; antennas; thin films. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: agaltyinnikov@etu.ru <https://orcid.org/0000-0001-5932-2504>

Tatiana K. Legkova, Master in Electronics and Nanoelectronics (2021), Postgraduate Student of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: microwave devices; methods of measuring microwave parameters.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: legkova_tk@mail.ru

Roman A. Platonov, Cand. Sci. (Eng.) (2018), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 48 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics; microwave devices; antennas.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: raplatonov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4556-629X>

Andrey E. Komlev, Cand. Sci. (Eng.) (2011), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: technology of electronic equipment materials; plasma.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aekomlev@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>
