

Экспериментальное исследование спиральных антенн с различными вариантами дополнительного замедления

Д.П. Табаков^{1, 2} , М.А. Малахов^{2, 3}

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара,
ул. Л. Толстого, 23

² Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244

³ АО «НИИ «Экран»
443022, Россия, г. Самара,
пр. Кирова, 24

Аннотация – Обоснование. Работа направлена на развитие и исследование плоских спиральных антенн с дополнительным замедлением. Использование замедляющих структур позволяет изменить рабочий частотный диапазон антенн и их электродинамические характеристики. Рассмотрены три варианта реализации замедляющей структуры: планарная диэлектрическая пластина, планарная металлодиэлектрическая пластина с металлизированными отверстиями, планарная металлодиэлектрическая пластина с металлическими штырьками. Результаты измерений параметров образцов сравнивались с эталонным образцом антенны. **Цель.** В работе осуществляется измерение электрических параметров плоских спиральных антенн с дополнительным замедлением. Производится определение коэффициента стоячей волны, ширины диаграммы направленности и коэффициента усиления для практической оценки степени влияния конструктивных решений построения замедляющих пластин на функционирование антенны. **Методы.** Планарные замедляющие пластины установлены непосредственно перед излучающей структурой. Пластины реализованы в виде многослойной структуры из диэлектрических подложек с переменной диэлектрической проницаемостью. В конструкции металлодиэлектрических пластин предусмотрены дополнительные элементы: металлизированные отверстия и металлические штырьки. В основе эксперимента лежат строгие методики проведения измерений и количественные методы оценки результатов исследований. Параметры антенных приборов измерялись в одинаковых условиях на одних и тех же рабочих местах, что обеспечивает достоверность и стабильность измерений. **Результаты.** Предложенные варианты конструкции замедляющих пластин обеспечивают лучшее согласование и увеличение коэффициента усиления в нижней части рабочего диапазона, наблюдается уменьшение нижней рабочей частоты антенны. При этом лучшее согласование обеспечивает планарная диэлектрическая пластина, а замедляющая пластина с металлизированными отверстиями оказывает наименьшее влияние на равномерность диаграммы направленности. Использование подобных конструкций при диаметре спирали более полутора длин волн требует тщательного согласования конструкции слоев пластины (их формы и толщины; последовательности, градиента изменения диэлектрической проницаемости; размера и расположения дополнительных замедляющих элементов). **Заключение.** С практической точки зрения показано, что планарные диэлектрические и металлодиэлектрические пластины обеспечивают замедление электромагнитных волн в плоских спиральных антеннах и позволяют сместить рабочий диапазон в область более низких частот без увеличения габаритных размеров.

Ключевые слова – спиральная антенна; дополнительное замедление; планарная диэлектрическая пластина; антенные измерения; радиотехнические измерения.

Введение

Дополнительное замедление электромагнитных волн в плоских спиральных антеннах позволяет сместить рабочий частотный диапазон в область более низких частот без изменения основной конструкции антенны. Наиболее часто встречающийся в практике способ замедления волн – разнообразие модификации спирального излучателя. В первую очередь это методы, основанные на увеличении длины проводника, вписанного в определенные габариты. Например, когда внешние витки спирали выполнены в виде меандровой полосковой линии [1] или за счет деформации фор-

мы спирали в целом [2]. В других исследованиях авторы вводят для спирали третье измерение, обеспечивая увеличение длины излучающей линии за счет пространственного колебания проводника по гармоническому закону [3]. Также может быть модифицирован проводник спирали, например за счет изменения его ширины по ступенчатому профилю [4] или введением в конструкцию проводника резонансных элементов – «дресселей», обеспечивающих резонанс на заданных частотах, подавление нежелательного излучения и улучшение согласования [5]. Другой распространенный способ – комбинирование спиралей разных типов: логарифмической и архимедовой [6].

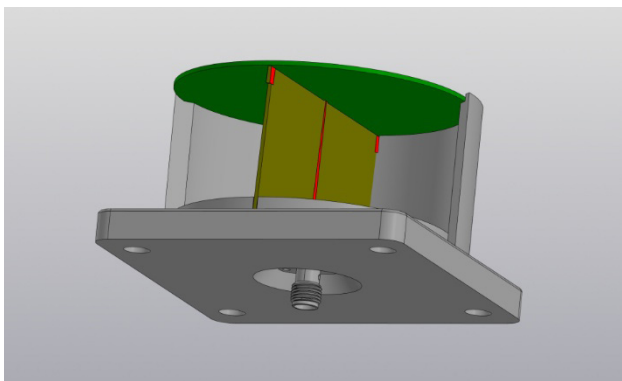


Рис. 1. Общий вид антенного прибора. Образец 0
 Fig. 1. General view of the antenna device. Sample 0

Модификации подвергаются подложки спиральных антенн: увеличивается диэлектрическая проницаемость [7], осуществляется геометрическое преобразование, например в виде перехода на полусферу [8], или интеграция метаматериалов и киральных структур [9].

Альтернативное направление конструктивных изменений спиральных антенн с целью улучшения функциональных параметров – введение замедляющих элементов за и перед излучающей структурой. Например, это использование оригинальных конических питающих линий [10], размещение внутри резонатора металлических пластин определенной формы, положения и размера [11] или установка над антенной крестообразной диэлектрической надстройки [12] и др.

Одним из перспективных способов замедления видится применение замедляющих пластин (ЗП) – диэлектрических и металлодиэлектрических планарных линз, имеющих многослойную структуру и расположенных непосредственно перед спиральной антенной. Такие ЗП в теории позволяют расширить частотный диапазон антенны, сохраняют ее конформность, обеспечивают защиту спирали и точек контактирования с питающей линией от внешних воздействий. Кроме того, технология изготовления ЗП является серийнопригодной и легко масштабируется.

Известно, что использование диэлектрических и металлодиэлектрических пластин и линз, как объемных [13], так и плоских [14], позволяет улучшить параметры антенных систем.

В настоящей работе представлены три варианта построения плоской спиральной антенны с дополнительным замедлением в виде замедляющей пластины. Первый вариант – планарная диэлектрическая пластина (образец 1), второй – планарная металлодиэлектрическая пластина с

Внешний слой ЗП $\epsilon=2,2$
Центральный слой ЗП $\epsilon=5,0$
Внутренний слой ЗП $\epsilon=10,0$
Плата спиральной антенны $\epsilon=2,2$

Рис. 2. Схема расположения ЗП относительно платы спиральной антенны

Fig. 2. Layout of the LP relative to the spiral antenna board

металлизированными отверстиями (образец 2), третий – планарная металлодиэлектрическая пластина с металлическими штырьками (образец 3). Приведены результаты измерений антенных параметров модифицированных антенн и их сравнение с характеристиками эталонной антенны (образец 0). Показаны преимущества и недостатки применения ЗП, определены направления дальнейших исследований.

1. Постановка задачи

Образец 0 представляет собой эталонный антенный прибор (рис. 1), излучающая структура которого выполнена на базе плоской спиральной антенны. Конструктивно прибор состоит из корпусных деталей (цилиндрического корпуса, основания), питающей линии (фидера) и спиральной антенны, выполненной в виде печатного проводника на подложке из фольгированного диэлектрика.

Образцы 1–3 имеют конструктивную модификацию в виде ЗП. В проведенных исследованиях ЗП выполнена трехслойной с базовой диэлектрической проницаемостью слоев, равной 10; 5 и 2,2 соответственно, толщина слоев равна толщине платы спиральной антенны (рис. 2).

В образцах 2 и 3 введены дополнительные замедляющие элементы (рис. 3). В Образце 2 в диэлектрических слоях предусмотрены металлизированные отверстия, расположенные вдоль витков спирального излучающего элемента, имитирующих металлические «штырьки». Количество и расположение элементов определено в соответствии с результатами математического моделирования. Излучающий элемент антенны представляет собой двузаходную архимедову спираль, каждый заход которой имеет 12 витков. Основным параметром рассматриваемой структуры будем считать диаметр D спирали. При известном диаметре D структуру можно описать относительными параметрами. Диаметр отверстий перед металлизацией составляет $0,005D$. В образце 3 «штырьки» выполнены в виде проволоки, монтированной в отверстия. Диаметр отверстий в этом варианте

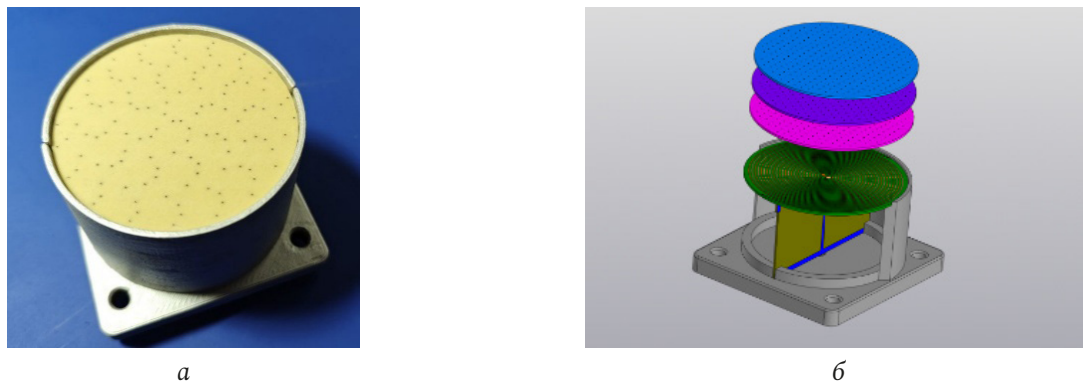


Рис. 3. Опытный образец (а) и трехмерная модель (б) макета плоской спиральной антенны с замедляющей пластиной
Fig. 3. A prototype (a) and a three-dimensional model (b) of a layout of a flat spiral antenna with a loading plate

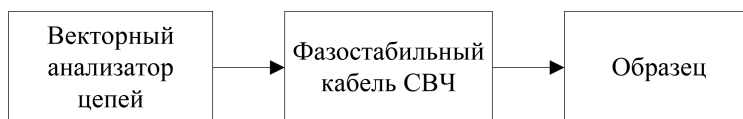


Рис. 4. Схема соединения Образца со средствами испытаний для проверки КСВ
Fig. 4. Connection diagram of the Sample with test equipment for SWR verification

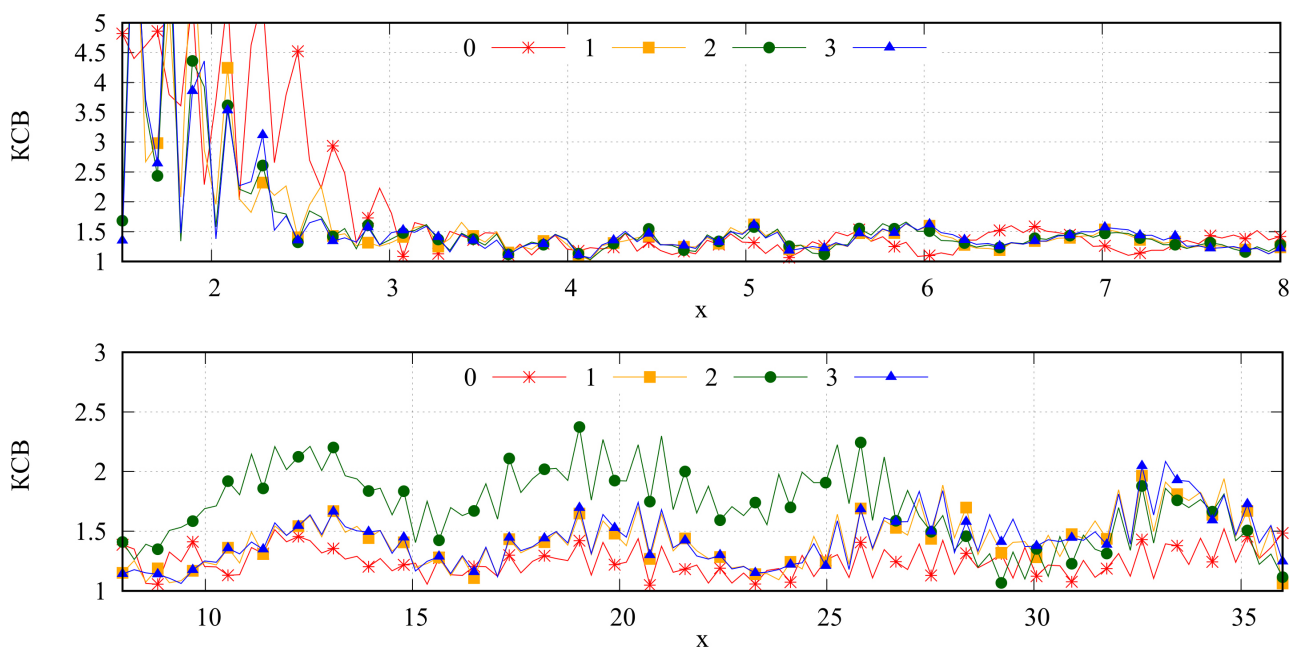


Рис. 5. Результаты измерения КСВ в диапазоне $x = 1,6...8$ (сверху) и $x = 8...36$ (снизу), номер кривой соответствует номеру антенны
Fig. 5. SWR measurement results are in the range of $x = 1,6...8$ (top) and $x = 8...36$ (bottom), the curve number corresponds to the antenna number

конструкции составляет $0,008D$. Координаты отверстий соответствуют первому варианту. Толщина слоев ЗП, как и толщина печатной платы, составляет $0,016D$, высота цилиндрической полости равна $0,44D$, при этом внутренняя поверхность цилиндра оклеена поглотителем толщиной $0,016D$. На экране, находящемся в нижнем основании цилиндрической полости, поглотитель отсутствует. Далее под x будем понимать отношение диаметра спирали к длине волны излучения λ , т. е. $x = D/\lambda$.

Сравнение образцов производится на основе измерения коэффициента стоячей волны, ширины диаграммы направленности и коэффициента усиления.

2. Измерение КСВ

Все испытания образцов производились в нормальных климатических условиях, характеризующихся параметрами:

- температура среды от 15 до 35 °C;

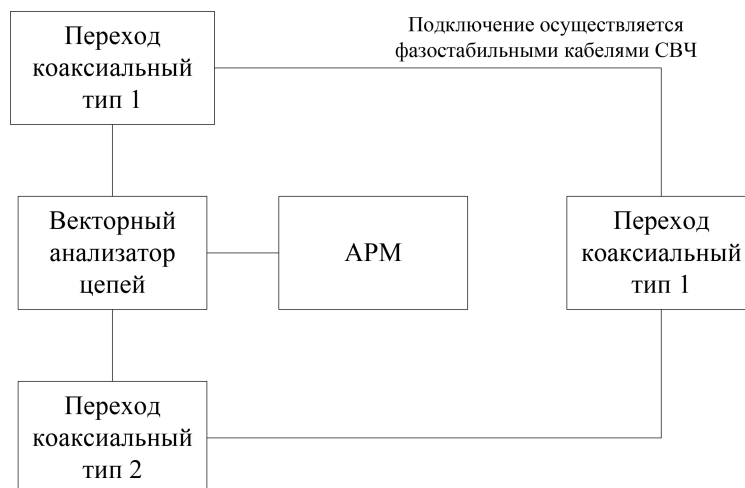


Рис. 6. Схема соединения при калибровке векторного анализатора цепей
 Fig. 6. Connection diagram for calibration of a vector circuit analyzer

- относительная влажность воздуха от 45 до 75 %;
- атмосферное давление от $8,6 \cdot 10^4$ до $10,6 \cdot 10^4$ Па (от 645 до 795 мм рт. ст.).

Для измерения КСВ использовался векторный анализатор цепей, который позволяет учесть фазовую составляющую сигналов. Подключение образцов осуществлялось фазостабилизированным кабелем.

Порядок проведения измерений:

- включить и подготовить к работе векторный анализатор цепей в соответствии с требованиями эксплуатационной документации на него;
- произвести калибровку анализатора в рабочем диапазоне частот образца на уровне мощности выходного сигнала 0 дБм (1 мВт);
- соединить вход образца со средствами испытаний согласно схеме, приведенной на рис. 4;
- произвести проверку КСВН образца в его рабочем диапазоне частот. При измерении КСВ перед образцом на расстоянии менее 2 м не должны находиться предметы, отражающие электромагнитные волны.

Результаты измерений приведены на рис. 5.

Испытания показывают, что все три модифицированные антенны с дополнительным замедлением имеют меньшее значение КСВ в низкочастотном диапазоне, в особенности в интервале $x \approx 2...3$, что свидетельствует о лучшем согласовании излучающей поверхности с окружающим средой пространством. В интервале до $x \approx 3...8$ все образцы демонстрируют идентичные характеристики, далее наблюдается значительное отклонение КСВ образца 2. Также здесь можно заметить волнообразное поведение КСВ, особенно в верхней части. Вероятно, подобное поведение

обусловлено конструкцией антенны, в частности наличием цилиндрической полости, обладающей собственными резонансами, увеличивающими значение КСВ. При этом дополнительные пластины с высокой диэлектрической проницаемостью увеличивают добротность этого цилиндрического резонатора.

3. Измерение диаграммы направленности и коэффициента усиления

Для проведения антенных измерений необходимо провести следующие подготовительные работы:

- соединить средства испытаний для проведения калибровки согласно схеме, приведенной на рис. 6. Включить и подготовить к работе векторный анализатор цепей согласно эксплуатационной документации на него. Включить программное обеспечение, установленное на автоматизированном рабочем месте (АРМ) и необходимое для управления антенным измерительно-вычислительным комплексом (АИВК). Произвести калибровку анализатора согласно эксплуатационной документации;
- закрепить исследуемый образец на платформе опорно-поворотного устройства (ОПУ). Установить измерительную антенну в рабочее положение на антенной мачте. Направление излучения (приема) должно быть встречным. Высота установки измерительной антенны и исследуемого образца должна быть одинаковой и составлять $1,75 \pm 0,25$ м;
- измерительную антенну необходимо расположить относительно испытуемого образца на одной линии с соблюдением вертикальной поля-

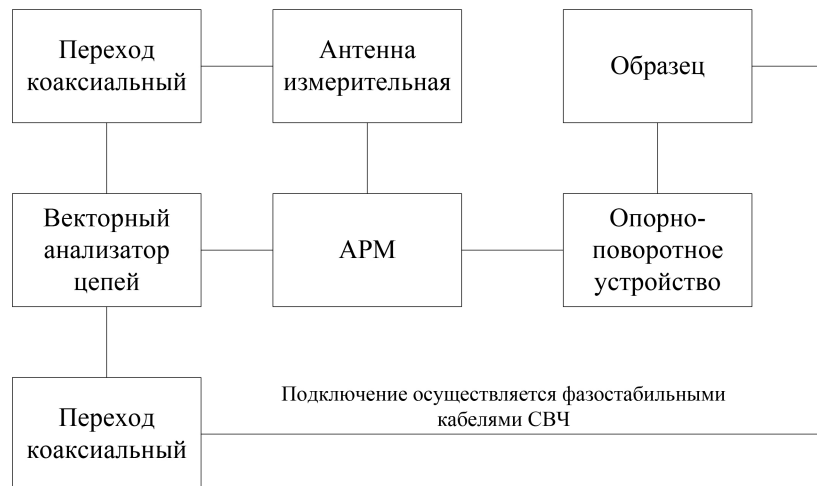


Рис. 7. Схема соединения исследуемых образцов со средствами испытаний
Fig. 7. Connection diagram of the studied Samples with the test equipment

ризации. Установить расстояние $3,0 \pm 0,3$ м между ними. Высоту установки и расстояние контролировать при помощи лазерного дальномера;

- соединить исследуемый образец и измерительную антенну со средствами испытаний согласно схеме, приведенной на рис. 7.

Для измерения ширины диаграммы направленности образцов выполняется следующая последовательность действий:

- при помощи ПО запустить измерение ШДН антенны по азимуту согласно эксплуатационной документации на АИВК. Диапазон измерений по азимуту не менее 120° , шаг измерений 2° ;
- определить ШДН по азимуту;
- при помощи ПО запустить измерение ШДН антенны по углу места согласно эксплуатационной документации на АИВК. Диапазон измерений по углу места не менее 60° , шаг измерений 2° ;
- определить значение ШДН по углу места.

Для измерений коэффициента усиления:

- при помощи ПО запустить измерение трехмерной диаграммы направленности согласно эксплуатационной документации на АИВК. Диапазон измерений по азимуту 120° , по углу места 60° , шаг измерений 2° ;
- определить максимальное значение КУ.

В результате измерений на каждой частоте получаются массивы значений для вертикальной и горизонтальной составляющей коэффициента усиления $K_{i,j}^{(v)}$ и $K_{i,j}^{(h)}$ соответственно (i – индекс угла места, j – индекс азимута). Общее значение КУ в заданном направлении можно определить по формуле

$$K_{i,j} = \sqrt{(K_{i,j}^{(v)})^2 + (K_{i,j}^{(h)})^2}.$$

Общую неравномерность коэффициента усиления можно определить следующим образом:

$$d[\text{дБ}] = \max(|\min K_{i,j}[\text{дБ}] - K[\text{дБ}]|,$$

$$|\max K_{i,j}[\text{дБ}] - K[\text{дБ}]|),$$

$$K_{i,j}[\text{дБ}] = 20 \lg K_{i,j},$$

здесь $\min K_{i,j}[\text{дБ}]$, $\max K_{i,j}[\text{дБ}]$ и $K[\text{дБ}]$ – минимальное, максимальное и среднее значение КУ в измеряемом диапазоне углов соответственно. Разность средних значений коэффициента усиления модифицированных и эталонной спиральных антенн можно оценить с помощью выражения $A[\text{дБ}] = K^{(j)}[\text{дБ}] - K^{(0)}[\text{дБ}]$, где $j = 1, 2, 3$ – номер образца. Результаты соответствующих расчетов по данным измерений приведены на рис. 8.

По графикам видно, что диаграммы направленности образцов в интервале $x \approx 3..8$ практически идентичны. В интервале до $x \approx 3$ применение замедляющих элементов в виде диэлектрической пластины и металлодиэлектрической пластины с металлизированными отверстиями приводит к выравниванию диаграммы направленности. В интервале $x \approx 8..18$ наблюдается незначительное ухудшение равномерности ДН образцов 1–3. При $x > 18$ наблюдается расщепление диаграммы направленности, вызванное переотражением волн на границах слоев ЗП. На ряде резонансных частот излучение антенны становится узконаправленным, что может найти применение в практических приложениях.

Аналогичная картина наблюдается и при измерении коэффициента усиления антенны. ЗП предложенной конструкции неприменимы в интервале свыше $x > 18$, но повышают мощность излучения в интервале до $x < 3$ (лучший результат

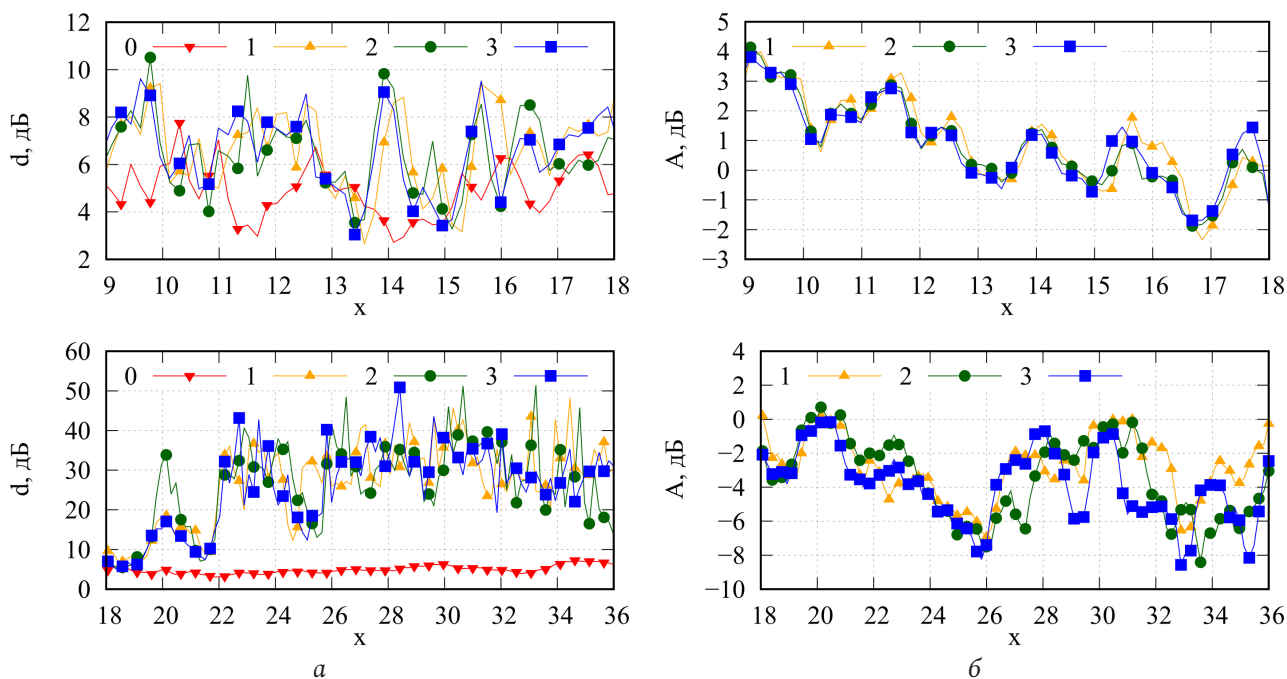


Рис. 8. Зависимость неравномерности КУ от частоты в исследуемом диапазоне углов (а), зависимость разности коэффициентов усиления модифицированных и эталонной спиральной антенны от частоты (б); номер кривой соответствует номеру образца
 Fig. 8. Dependence of the unevenness of the bottom on the frequency in the studied sector of the angles (a), dependence of the difference in the gain coefficients of the modified and reference spiral antennas on the frequency (b); the curve number corresponds to the sample number

принадлежит ЗП с металлическими штырьками – КУ выше на 15 дБ относительно эталонной антенны) и показывают сопоставимые значения усиления в интервале $x \approx 4...18$.

Закключение

Таким образом, предложенный способ замедления ЭМВ в ПСА действительно позволяет снизить нижнюю границу рабочего частотного диапазона антенны. Следует отметить, что предложенные варианты конструкции ЗП ухудшают характеристики антенны при $x > 18$, однако имеют значительные улучшения до $x < 3$.

Наилучшее согласование во всем рабочем диапазоне продемонстрировали образцы 1 и 3, образец 2 обеспечивает равномерную диаграмму направленности в нижней части диапазона. Выбор конкретной реализации ЗП определяется поставленными практическими задачами. Большой ин-

терес представляет возможность нестандартного использования ПСА. Например, в качестве приемопередающей антенны: прием осуществляется в интервале, в котором обеспечивается равномерная ДН, а передача – на более высокой частоте по узкому лучу.

Улучшение параметров излучения в верхней части диапазона либо на конкретных частотах обеспечивается согласованием конструкции слоев ЗП (их формы и толшины, последовательности, градиента изменения диэлектрической проницаемости, размера и расположения металлизированных отверстий и штырьков) и является предметом дальнейших исследований.

Другое направление перспективных исследований – выявление резонансных частот в интервале ниже $x < 1$ для создания малогабаритных узкополосных антенн, функционирующих на ряде частот, определенных конструктивными особенностями прибора.

Список литературы

1. Fang Q., Jin M., Liu W. Single-Arm Archimedean Spiral Antenna with Broadband Circular Polarization // International Journal of Antennas and Propagation. 2021. Vol. 2021, no. 1. P. 6623468. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6623468>
2. Табаков Д.П., Малахов М.А. Исследование характеристик модифицированного плоского спирального излучателя // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 11. С. 54–62. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202211-09>
3. Miniaturization of a spiral antenna using periodic Z-plane meandering / J.M. O'Brien [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63, no. 4. P. 1843–1848. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2394796>

4. Mehboodi E., Movahhedi M., Heidari A. Wideband dual-polarised SAW spiral antenna for monopulse system // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2018. Vol. 12, no. 5. P. 607–611. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0689>
5. Patent US 4243993. Broadband center-fed spiral antenna / B.J. Lamberty, G.S. Andrews; 06.01.1981.
6. Huang H.-F., Lv Z. A new spiral antenna with improved axial ratio and shorted arm length // Progress in Electromagnetics Research C. 2014. Vol. 46. P. 83–89. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIERC13120302>
7. Ramamurthy V., Patel S. Design of planar Archimedean spiral antenna for Wi-Max using different materials // International Journal of Engineering Development and Research. 2014. Vol. 2, no. 2. P. 1947–1951.
8. Семенихина Д.В., Маркина Ю.И. Проектирование спиральной антенны в частотном диапазоне 800 МГц – 25 ГГц // Рассеяние электромагнитных волн: сб. науч. тр. Таганрог, 2010. Вып. 16. С. 44–52.
9. Tanabe M., Nakano H. Low-profile wideband spiral antenna with a circular HIS reflector composed of homogenous fan-shaped patch elements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2020. Vol. 68, no. 8. P. 5801–5810. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2980369>
10. Ivanchenko I., Pishchikov V., Popenko N. Ultra-wideband planar spiral antenna // 2011 Microwaves, radar and remote sensing symposium. 2011. P. 228–229. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRRS.2011.6053613>
11. Wang B., Chen A. Design of an Archimedean spiral antenna // 2008 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. 2008. P. 348–351. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2008.4735217>
12. Kashyap N., Vishwakarma D.K. Cross-dielectric-slab-loaded archimedean spiral antenna // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2016. Vol. 15. P. 589–592. DOI: <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2462085>
13. Плоская линза Люнеберга на основе печатной схемы с проводниками криволинейной формы / К.А. Быков [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 1. С. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.1.48-57>
14. Исследование полусферической метаматериальной линзы из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями / Ю.Г. Пастернак [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 1. С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.1.32-38>

Информация об авторах

Табаков Дмитрий Петрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: электродинамика, устройства СВЧ и антенны, оптика, численные методы математического моделирования.

E-mail: illuminator84@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9173-4936>

SPIN-код (eLibrary): 9666-0814

AuthorID (eLibrary): 664833

ResearcherID (WoS): Q-9888-2017

Малахов Михаил Александрович, главный технолог АО «НИИ “Экран”», г. Самара, Россия; аспирант, доцент кафедры электронных систем и информационной безопасности Самарского государственного технического университета, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: устройства СВЧ и антенны и технология их производства.

E-mail: m.malakhov.2020@bk.ru

SPIN-код (eLibrary): 4942-1762

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2025, vol. 28, no. 3, pp. 71–79

DOI [10.18469/1810-3189.2025.28.3.71-79](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.3.71-79)

UDC 621.396

Original Research

Received 30 June 2025

Accepted 31 July 2025

Published 30 September 2025

Experimental study of spiral antennas with various additional deceleration options

Dmitrij P. Tabakov^{1, 2} , Mikhail A. Malakhov^{2, 3}

¹ Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics

23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

² Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya Street,
Samara, 443100, Russia

³ JSC «Research Institute “Ekran”»

24, Kirov Avenue,
Samara, 443022, Russia

Abstract – Background. The work is aimed at the development and research of flat spiral antennas with additional slowdown. The use of slowdown structures allows to change the operating frequency range of antennas and the electrodynamic characteristics of antennas. Three variants of the retarding structure implementation are considered: a planar dielectric plate, a planar metal-dielectric plate with metallized holes, and a planar metal-dielectric plate with metal pins. The results of measurements of the sample parameters were compared with a reference antenna sample. **Aim.** The work measures the electrical parameters of flat spiral antennas with additional deceleration. The standing wave coefficient, the width of the radiation pattern and the gain are determined for a practical assessment of the degree of influence of design solutions for the construction of decelerating plates on the functioning of the antenna. **Methods.** Planar deceleration plates are installed directly in front of the radiating structure. Plates are implemented as a multilayer structure of dielectric substrates with variable dielectric permittivity. Additional elements are provided in the construction of metal-dielectric plates: metallized holes and metal pins. The experiment is based on rigorous measurement techniques and quantitative methods for evaluating research results. The parameters of the antenna devices were measured under the same conditions at the same workplaces, which ensures the reliability and stability of measurements. **Results.** The proposed design options for the deceleration plates provide better matching and an increase in the gain in the lower part of the operating range, and a decrease in the lower operating frequency of the antenna is observed. At the same time, the best matching is provided by a planar dielectric plate, and a retarding plate with metallized holes has the least effect on the uniformity of the radiation pattern. The use of such structures with a spiral diameter of more than one and a half wavelengths requires careful coordination of the design of the plate layers (their shape and thickness; sequence, gradient of change in dielectric constant; size and location of additional retarding elements). **Conclusion.** From a practical point of view, it has been shown that planar dielectric and metal-dielectric plates slow down electromagnetic waves in flat spiral antennas and allow them to shift the operating range to lower frequencies without increasing overall dimensions.

Keywords – spiral antenna; additional deceleration; planar dielectric plate; antenna measurements; radio engineering measurements.

✉ illuminator84@yandex.ru (Dmitrij P. Tabakov)

 © Dmitrij P. Tabakov, Mikhail A. Malakhov, 2025

References

1. Q. Fang, M. Jin, and W. Liu, "Single-arm Archimedean spiral antenna with broadband circular polarization," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2021, p. 6623468, 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/6623468>.
2. D. P. Tabakov and M. A. Malakhov, "Investigation of the characteristics of a modified flat spiral radiator," *Radio Eng.*, vol. 86, no. 11, pp. 54–62, 2022, doi: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202211-09>.
3. J. M. O'Brien et al., "Miniaturization of a spiral antenna using periodic Z-plane meandering," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 4, pp. 1843–1848, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2394796>.
4. E. Mehboodi, M. Movahhedi, and A. Heidari, "Wideband dual-polarised SAW spiral antenna for monopulse system," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 12, no. 7, pp. 607–611, 2018, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0689>.
5. B. J. Lamberty and G. S. Andrews, "Broadband center-fed spiral antenna," U.S. Patent 4 243 993, Jun. 6, 1981.
6. H.-F. Huang and Z. Lv, "A new spiral antenna with improved axial ratio and shorted arm length," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 46, pp. 83–89, 2014, doi: <https://doi.org/10.2528/PIERC13120302>.
7. V. Ramamurthy and S. Patel, "Design of planar Archimedean spiral antenna for Wi-Max using different materials," *Int. J. Eng. Develop. Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 1947–1951, 2014.
8. D. V. Semenikhina and Y. I. Markina, "Design of a spiral antenna in the frequency range of 800 MHz – 25 GHz," *Scattering Electromagn. Waves*, no. 16, pp. 44–52, 2010. (In Russ.)
9. M. Tanabe and H. Nakano, "Low-profile wideband spiral antenna with a circular HIS reflector composed of homogenous fan-shaped patch elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 7, pp. 5821–5826, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2980365>.
10. I. Ivanchenko, V. Pishchikov, and N. Popenko, "Ultra-wideband planar spiral antenna," in *Proc. 2011 Microwaves, radar and remote sensing symposium*, pp. 108–109, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/MRRS.2011.6053613>.
11. B. Wang and A. Chen, "Design of an Archimedean spiral antenna," in *Proc. 8th Int. Symp. Antennas, Propag. EM Theory (ISAPE)*, pp. 348–351, 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2008.4735217>.
12. N. Kashyap and D. K. Vishwakarma, "Cross-dielectric-slab-loaded Archimedean spiral antenna," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 589–592, 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2462085>.
13. K. A. Bykov et al., "Flat Luneberg lens based on a printed circuit with curved conductors," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 48–57, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.1.48-57>. (In Russ.)
14. Y. G. Pasternak et al., "Study of a hemispherical metamaterial lens made of parallel printed circuit boards with metal diffusers of small electrical dimensions," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 32–38, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.1.32-38>. (In Russ.)

Information about the Authors

Dmitrij P. Tabakov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of the Department of Radioelectronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: electrodynamics, microwave devices and antennas, optics, numerical methods of mathematical modeling.

E-mail: illuminator84@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9173-4936>
SPIN-код (eLibrary): 9666-0814
AuthorID (eLibrary): 664833
ResearcherID (WoS): Q-9888-2017

Mikhail A. Malakhov, chief technologist of JSC «Research Institute “Ekran”», Samara, Russia; postgraduate student, associate professor of the Department of Electronic Systems and Information Security, Samara State Technical University, Samara, Russia.

Research interests: microwave devices and antennas and their production technology.
E-mail: m.malakhov.2020@bk.ru
SPIN-code (eLibrary): 4942-1762