

УДК 621.396.677

Сверхширокополосные печатные щелевые излучатели с управляемыми частотными характеристиками

Чернышев С. Л.^{1,*}, Виленский А. Р.¹

* chemshv@bmstu.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе исследована возможность создания сверхширокополосных (СШП) антенн с управляемыми частотными характеристиками согласования на основе печатной щелевой антенны Вивальди. В области нерегулярной щелевой линии введены печатные коммутируемые резонаторы с регулируемым емкостным сопротивлением (модель варактора), которые позволяют производить подстройку частотных характеристик для каждого состояния коммутации резонаторов, обеспечивая полосно-пропускающие и полосно-заградительные свойства антенны.

Ключевые слова: режекция, СШП антенна, реконфигурируемая антенна Вивальди

Введение

СШП диапазон частот (3,1 - 10,6) ГГц активно осваивается во всём мире для разнообразных информационных радиосистем. Ограничения на эквивалентно изотропно излучаемую мощность (ЭИИМ) в полосе частот приводит к необходимости понижения мощности передатчиков СШП радиосистем и использования чувствительных приёмников. Тем не менее, качественные приём и обработка СШП радиоимпульса зачастую осложняются воздействием на приёмную сторону узкополосных относительно мощных радиопомех от существующих бытовых терминалов мобильной связи и обмена информацией. Примером может служить "паразитное" излучение WLAN систем в диапазоне (5,1 - 5,8) ГГц. Энергетический потенциал таких систем может оказаться значительно выше потенциала СШП системы, поэтому, несмотря на существенное различие в ширине рабочих полос, узкополосный сигнал может представлять заметную помеху при обработке СШП сигнала. Помимо вышесказанного мощная узкополосная помеха может перегрузить входной чувствительный каскад СШП приёмника. Следует также отметить, что общепринятые методы цифровой режекции помехи в случае импульсных СШП радиосистемы практически не применимы в связи с практической

трудностью оцифровки СШП сигнала. Данные соображения приводят к необходимости организации раннего подавления паразитных каналов приёма в СВЧ тракте СШП устройства путём его адаптивной настройки.

Другим примером систем, где может потребоваться адаптивное управление частотными характеристиками излучения, является когнитивное радио [1]. Здесь в общем случае должна быть предусмотрена возможность сканирования эфира в сверхширокой полосе частот с настройкой канала обмена информацией на оптимальную полосу частот. Для решения данной задачи удобно использовать комбинации СШП и узкополосных режимов функционирования системы, которые также можно обеспечить за счёт управления частотными характеристиками непосредственно приёмо-передающей антенны.

В работе исследована возможность обеспечения полосно-пропускающих и полосно-заградительных частотных характеристик СШП печатной щелевой антенны путём введения управляемых резонаторов непосредственно в структуру излучателя. В качестве базового излучателя выбрана подробно описанная СШП антенна Вивальди [2], [3]. Совмещение фильтровых и излучающих элементов позволяет эффективно использовать объём устройства.

Реконфигурируемые антенны Вивальди ранее исследовались в работах [4], [5]. В работе [4] на основе набора коммутируемых при помощи PIN-диодов резонаторов обеспечивается СШП управление полосой пропускания антенны. Публикация [5] посвящена разработке антенны Вивальди с управляемой полосой режекции на основе L-резонатора, подстраиваемого при помощи набора варакторов. Отметим, что антенны с электрически управляемыми параметрами и специальными устройствами, корректирующими диаграмму направленности, рассматриваются и другими авторами, например [6-8]. В представленной работе мы предлагаем новую конфигурацию реконфигурируемой антенны Вивальди, сочетающей в себе возможность работы в СШП, полосно-пропускающем, полосно-заградительном режимах и их комбинациях. Подключение резонаторов и их грубая перестройка производится при помощи СВЧ ключей (PIN-диоды, MEMS-коммутаторы), а плавная подстройка частотных характеристик осуществляется включением в состав резонаторов элементов с управляемым ёмкостным сопротивлением (модель СВЧ-варактора).

В первой части работы представлены результаты исследования резонансных реконфигурируемых элементов при возбуждении от двухпортовой щелевой линии. Вторая часть работы посвящена исследованию реконфигурируемой антенны Вивальди.

1 Исследование реконфигурируемых печатных резонаторов

Система реконфигурируемых резонаторов полосно-пропускающего фильтра

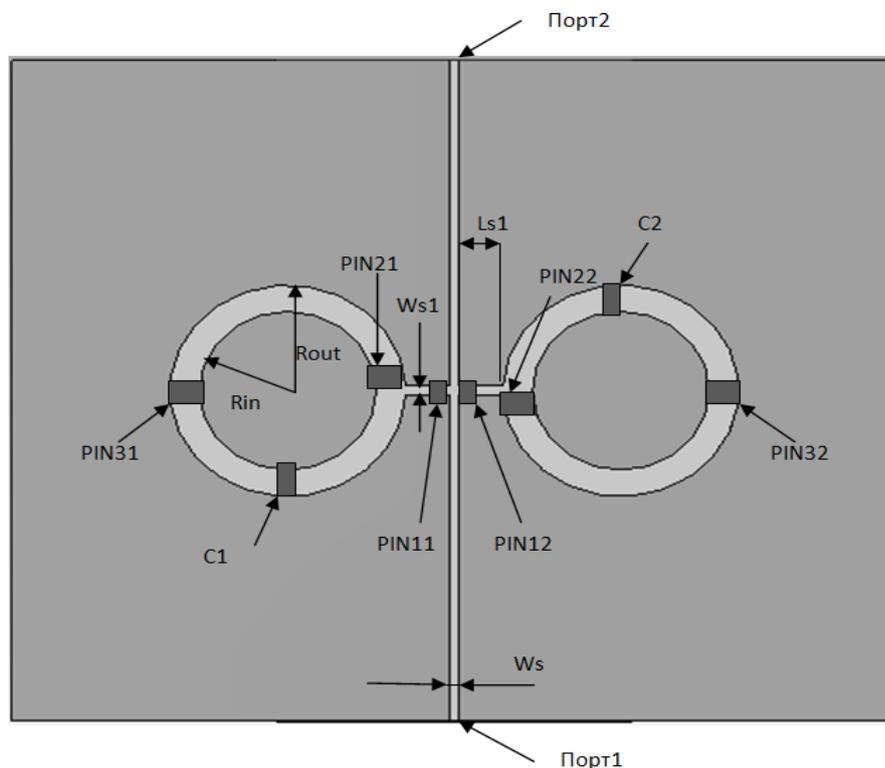


Рисунок 1 - СВЧ модель реконфигурируемого щелевого фильтра

На рисунке 1 представлена СВЧ модель реконфигурируемого щелевого фильтра, подключаемого к двухпортовой щелевой линии шириной W_s при помощи коммутаторов $PIN11$ и $PIN12$ через поперечную щелевую линию длиной L_{s1} и шириной W_{s1} . При замкнутых $PIN11$, $PIN12$ коммутаторы $PIN21$, $PIN22$, $PIN31$, $PIN32$ разомкнуты, таким образом, в щелевую линию не вносится неоднородность, и поддерживается режим бегущей волны. В таком состоянии резонатор отключён, реализуется СШП режим. При замыкании $PIN11$, $PIN12$ коммутаторы $PIN21$, $PIN22$ автоматически замыкаются, резонаторы подключаются к линии. При этом коммутаторы $PIN31$, $PIN32$ могут быть разомкнуты - низкочастотный режим, либо замкнуты - высокочастотный. С помощью управляемых ёмкостей $C1$, $C2$ производится плавная подстройка резонаторов в обоих режимах. Полосно-пропускающие свойства модели проявляются в поддержании режима бегущей волны в щелевой линии в том случае, если реактивное сопротивление со стороны резонаторов равно нулю, что имеет место при полных длинах подключаемых отрезков, близких к целому числу половолн с учётом ёмкостных нагрузок. Круговой профиль резонаторов и их встречное включение в линию позволяют уменьшить уровень паразитного излучения.

Фильтр проектируется для обеспечения перестройки в полосе (3-9) ГГц. Для этого вся полоса разбивается на два поддиапазона (3-5) ГГц - низкочастотный режим, (5-9) ГГц -

высокочастотный режим. Управляемые ёмкости располагаются примерно в области пучности напряжения стоячей волны в высокочастотном режиме, обеспечивая тем самым эффективную широкодиапазонную перестройку.

Электродинамическое моделирование устройства проводилось во временной области в использовании метода конечного интегрирования. Для этого коммутаторы моделировались в состоянии включения идеально проводящими отрезками шириной 0,5мм. В выключенном состоянии элемент игнорируется моделью. Варактор моделировался сосредоточенной ёмкостью, подключённой к двум узлам вычислительной сетки. Материал подложки RO 4003 ($\epsilon_r = 3,38$), толщина 0,508 мм. Частотные характеристики коэффициента отражения синтезированного фильтра приведены на рисунках 2,а и 2,б для низкочастотного и высокочастотного режимов соответственно ($C_a=C1=C2$).

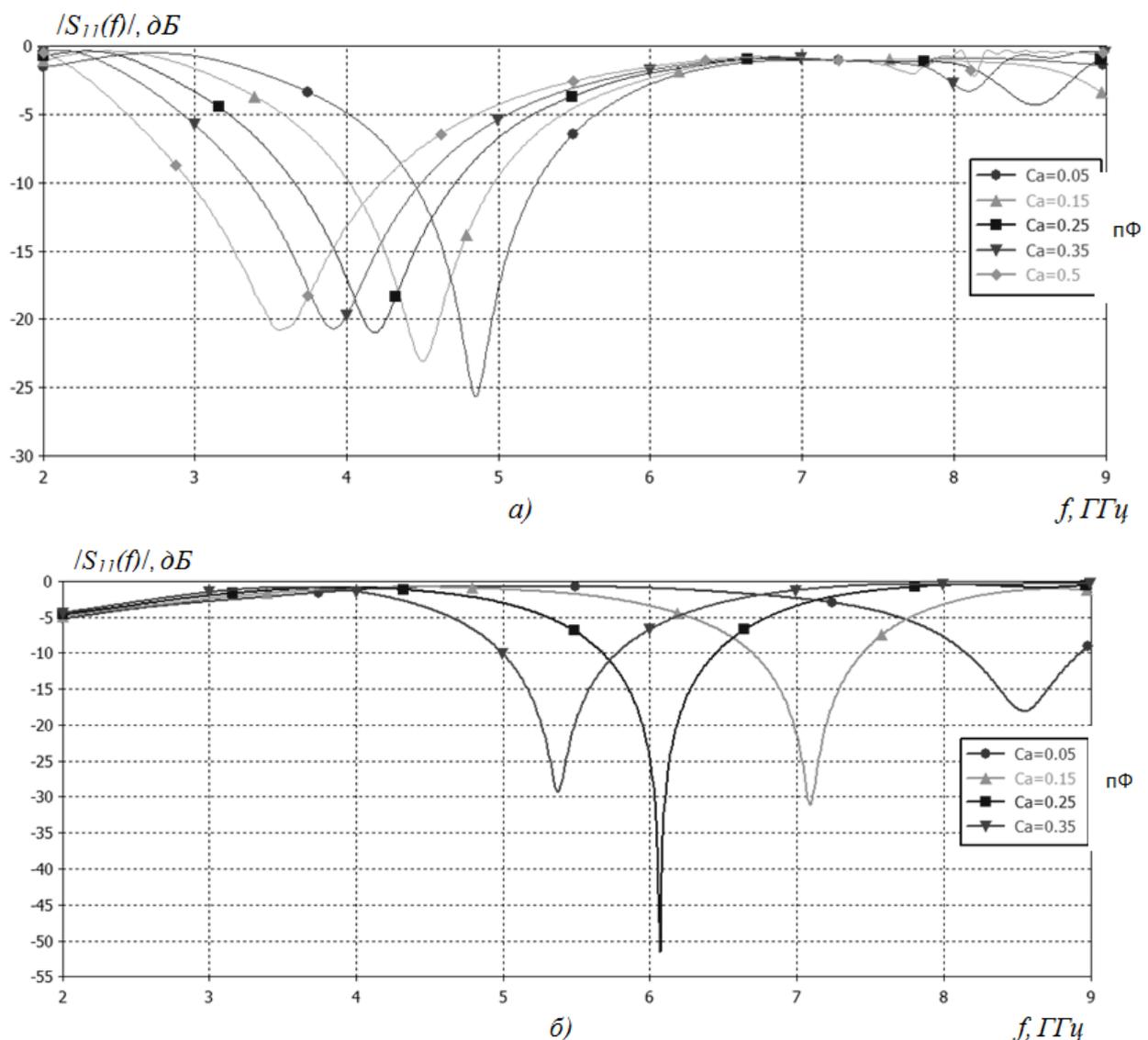


Рисунок 2 - Частотные зависимости модуля коэффициента отражения синтезированного полосно-пропускающего фильтра: а - низкочастотный режим, б – высокочастотный

Таблица 1 - Размеры реконфигурируемого щелевого резонатора

Размеры в миллиметрах

Параметр	W_s	W_{s1}	L_{s1}	R_{in}	R_{out}
Значение	0,35	0,35	2	4	0,35

Режекторный реконфигурируемый фильтр

На рисунке 3 изображена конструкция режекторного реконфигурируемого фильтра. Фильтр расположен на подложке на противоположной стороне от щели и основан на перестраиваемом L-образном резонаторе, один конец которого соединён короткозамыкателем с металлизацией сквозь плату, другой конец остаётся открытым и выведен в область взаимодействия с щелевой линией. При отключении коммутатора $PINn$ резонансная частота фильтра выходит за верхнюю границу рабочего диапазона и резонатор слабо взаимодействует с щелевой линией. При подключении коммутатора в системе наблюдается четвертьволновый узкополосный резонанс, положением которого можно управлять с помощью ёмкости C_n .

В связи с тем, что резонатор будет устанавливаться в область нерегулярной щелевой линии антенны Вивальди в модель было введено линейное расширение щели от $W_{s_{in}}$ до $W_{s_{out}}$, которое хорошо аппроксимирует начальный участок экспоненциального профиля.

В таблице 2 приведены геометрические размеры синтезированного фильтра. На рисунке 4 представлены частотные зависимости модуля коэффициента отражения модели для случая СШП режима ($PINn$ отключён) и для режекторных режимов.

Таблица 2 - Размеры реконфигурируемого режекторного фильтра

Размеры в миллиметрах

Параметр	W_m	$W_{s_{in}}$	$W_{s_{out}}$	L_{v1}	L_{v2}	s
Значение	0,55	0,35	0,8	3	6	1

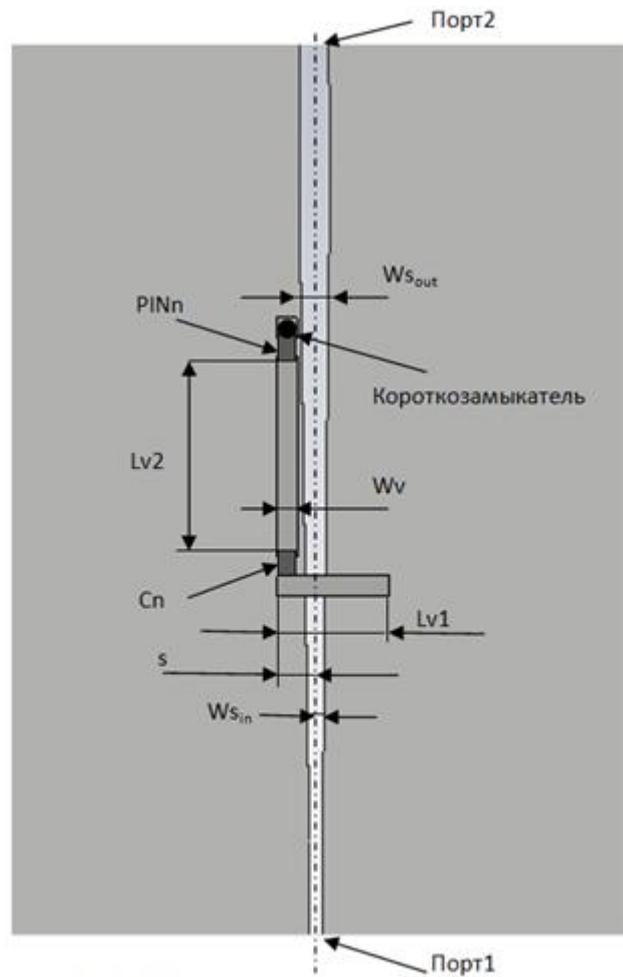


Рисунок 3 - СВЧ модель реконфигурируемого режекторного резонатора

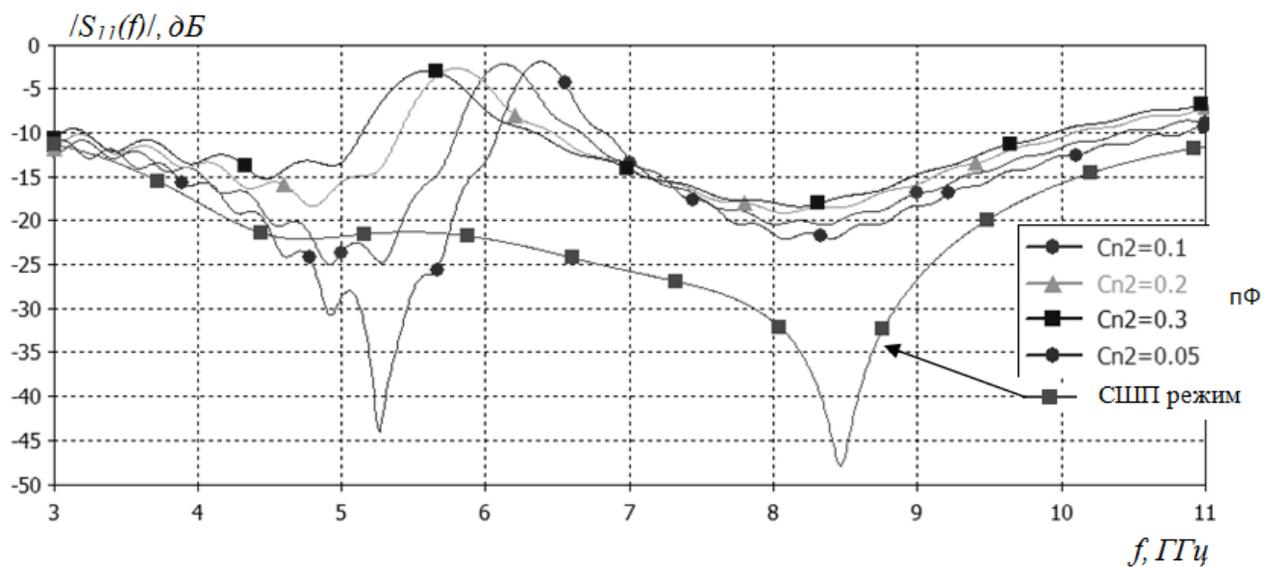
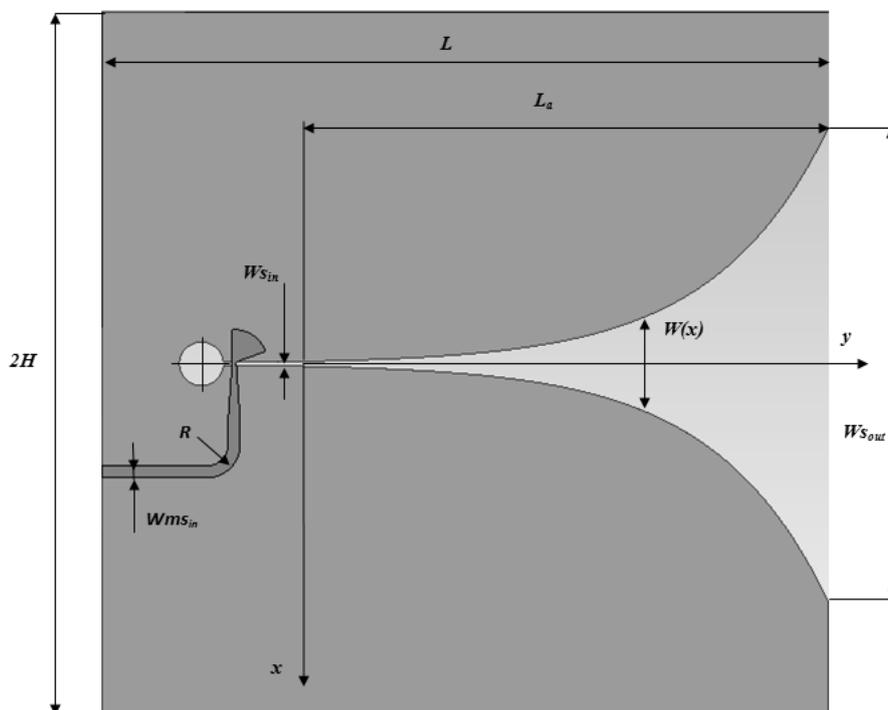
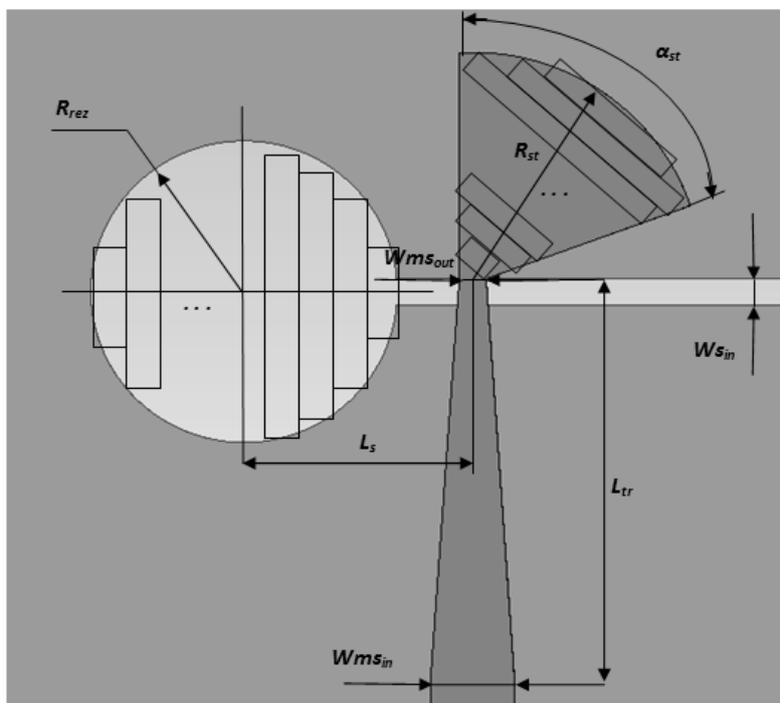


Рисунок 4 - Частотные зависимости модуля коэффициента отражения синтезированного режекторного фильтра

Как видно из полученных результатов, режекторный фильтр обеспечивает эффективное узкополосное подавление и может быть легко настроен на требуемый частотный канал. Отрицательным эффектом является возрастание общего уровня коэффициента отражения модели.



а)



б)

Рисунок 5 - Конструкция базовой антенны Вивальди

2 Исследование реконфигурируемой антенны Вивальди

Полученные в разделе I реконфигурируемые элементы были включены в состав СШП антенны Вивальди. Общий вид начальной конфигурации антенны показан на рисунках 5а,б, модификация антенны приведена на рисунке 6 укрупнённо для области введения элементов. Рисунок 5б содержит ступенчатое представление СШП элементов согласования перехода от микрополосковой к щелевой линии. Описание данной конструкции и алгоритм синтеза могут быть найдены в [9,10].

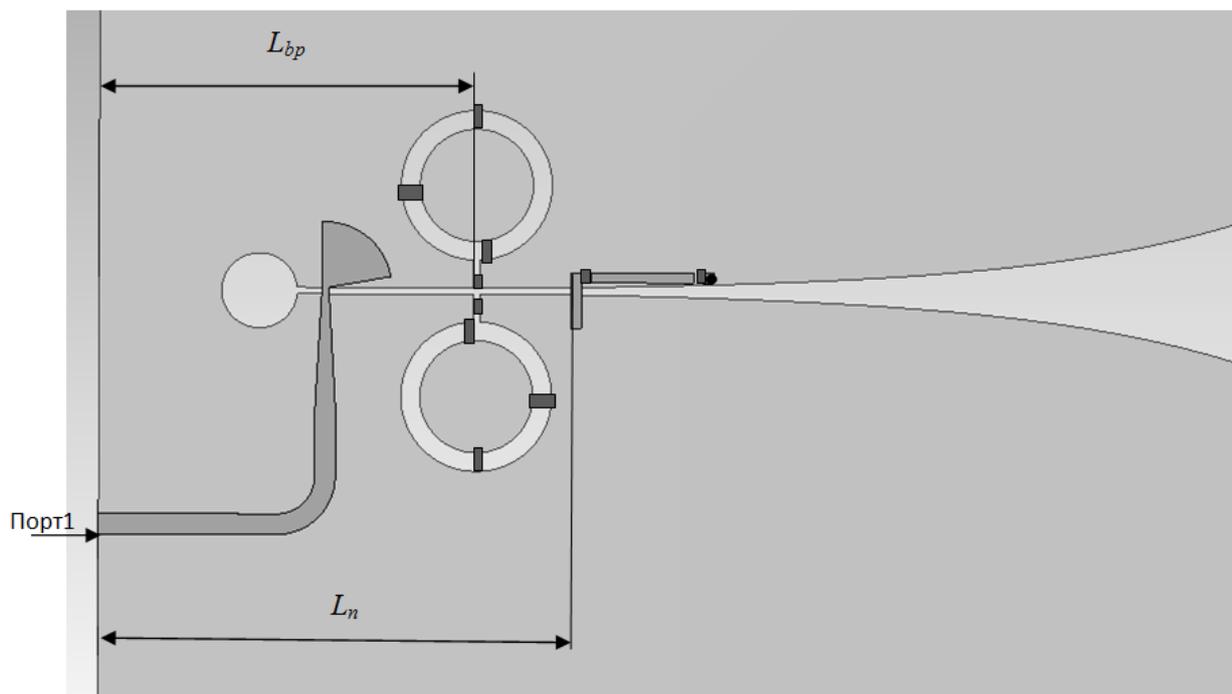


Рисунок 6 - Конструкция реконфигурируемой антенны Вивальди (укрупнённый вид области введения реконфигурируемых элементов)

Профиль щелевой линии описывается выражениями:

$$W(y) = W_{sin} \cdot e^{\alpha \cdot y},$$
$$\alpha = \frac{1}{L_a} \cdot \ln\left(\frac{W_{sout}}{W_{sin}}\right),$$

где W_{sin} - ширина щелевой линии в области возбуждения, W_{sout} - ширина щелевой линии на выходе антенны, L_a - длина нерегулярной щелевой линии.

Совокупность параметров разработанной реконфигурируемой антенны Вивальди сведена в таблицу 3.

Таблица 3 - Основные параметры реконфигурируемой антенны Вивальди

Размеры в миллиметрах

Параметр	$W_{S_{out}}$	$W_{S_{in}}$	L_a	$W_{ms_{in}}$	$W_{ms_{out}}$	L_{tr}	L_s	R_{rez}	R_{st}	$\alpha_{sp, \text{град}}$	$2H$	L	L_{bp}	$W_{S_{in}}$
Значение	55	0,35	60	1,1	0,35	6,2	3,5	2	3,5	70	75	84	20	25

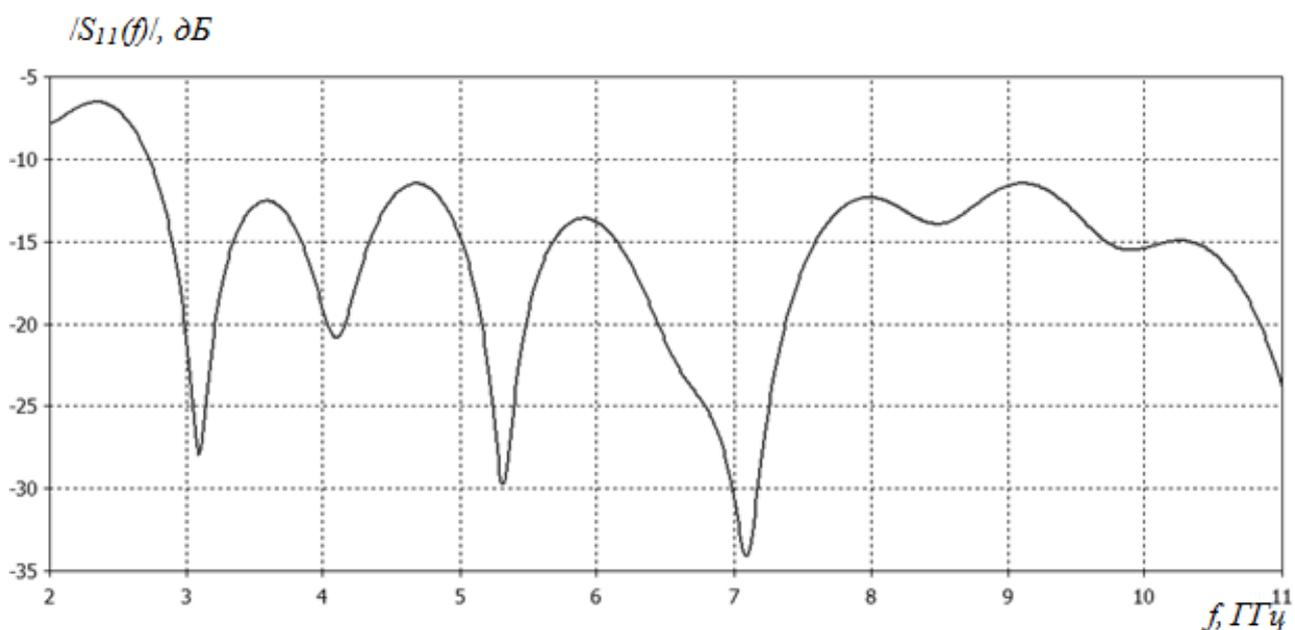
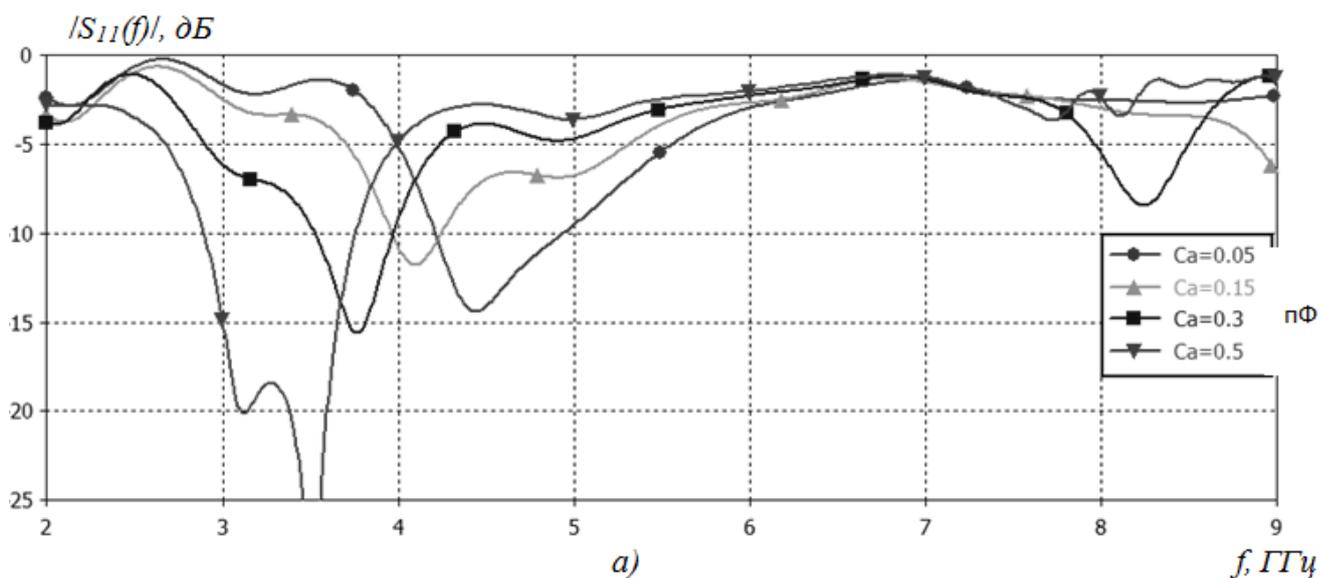


Рисунок 7 - Частотная зависимость модуля коэффициента отражения базовой антенны



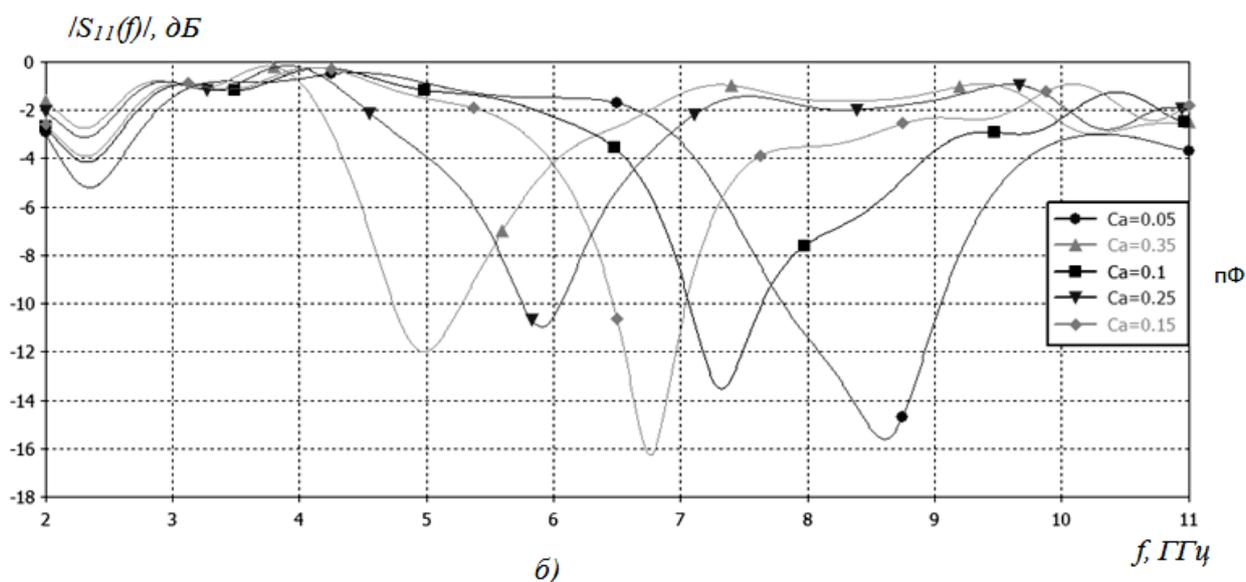


Рисунок 8 - Частотные зависимости модуля коэффициента отражения реконфигурируемой антенны Вивальди в полосно-пропускающих режимах: а - низкочастотный режим, б – высокочастотный

Частотная зависимость коэффициента отражения базовой антенны представлена на рисунке 7. Результаты моделирования полосно-пропускающего режима работы реконфигурируемой антенны продемонстрированы на рисунках 8а,б для низкочастотного и высокочастотного режимов работы соответственно.

Для оценки влияния фильтра на характеристики направленности антенны была рассчитана диаграмма направленности (ДН) для высокочастотного полосно-пропускающего режима при $Ca = C1 = C2 = 0,15$ пФ (рисунок 9а), а также частотная зависимость КУ (рисунок 9б).

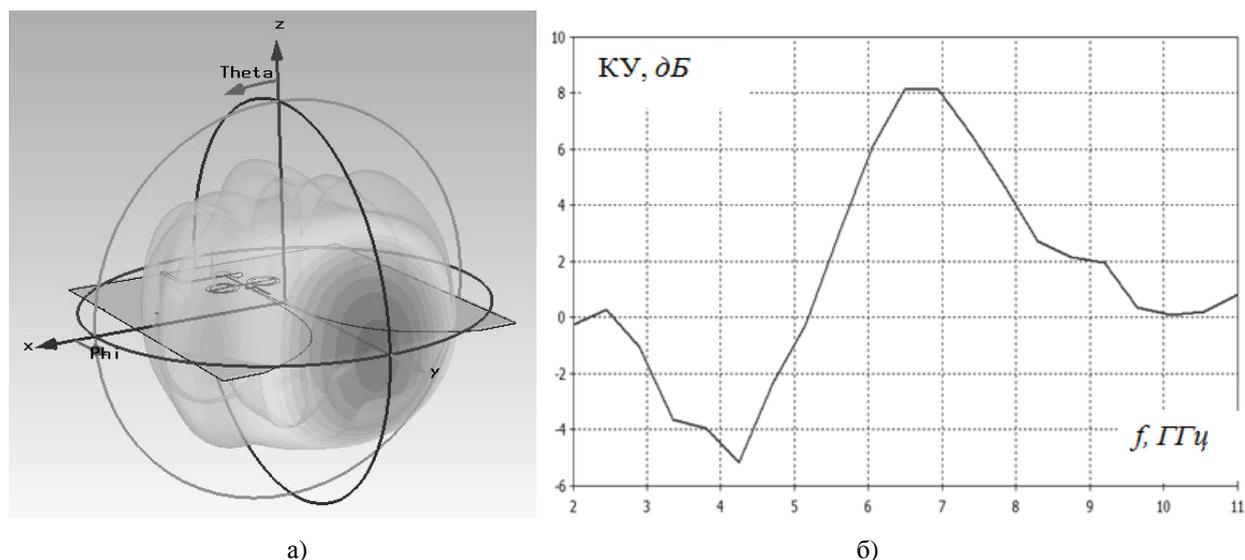


Рисунок 9 - Характеристики направленности реконфигурируемой антенны в полосно-пропускающем высокочастотном режиме: а - трёхмерная ДН антенны, $f = 6,5$ ГГц, $Ca = 0,15$ пФ; б - частотная зависимость КУ

Для исследования работы антенны в режиме узкополосной режекции замыкался коммутатор $PINn$, а кольцевые резонаторы отключались от щелевой линии. На рисунке 10 изображены частотные зависимости характеристик согласования в режимах режекции и СШП режиме (все фильтры отключены). В режиме режекции модель демонстрирует существенный рост рассогласования в диапазоне (4 - 5) ГГц, что,

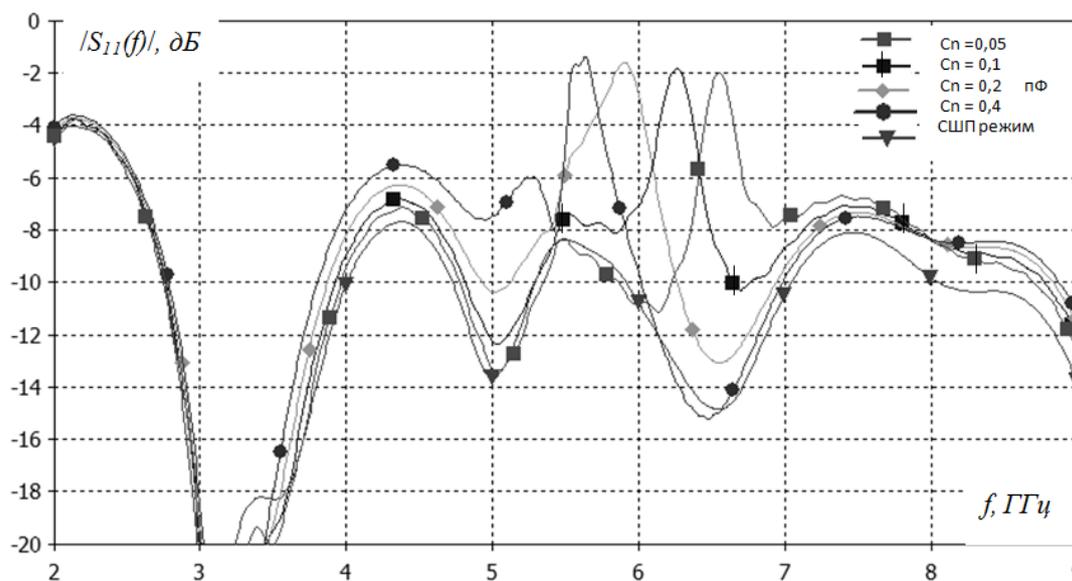


Рисунок 10 - Частотные зависимости модуля коэффициента отражения реконфигурируемой антенны Вивальди в режиме режекции и СШП режиме

очевидно, является следствием синфазной суперпозиции локальных отражений на совокупности неоднородностей системы. Тем не менее, удаётся эффективно подавить требуемую узкую полосу частот. Частотная характеристика КУ антенны в режиме режекции при $Cn = 0,1$ пФ, продемонстрирована на рисунке 11.

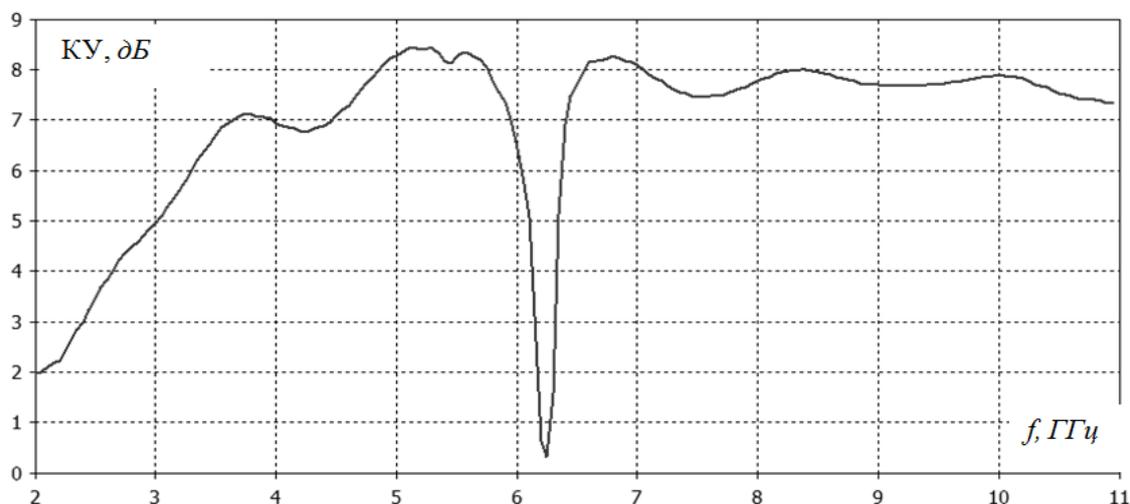


Рисунок 11 - Частотная характеристика КУ антенны в режиме режекции, $Cn = 0.1$ пФ

Заключение

В работе продемонстрирована возможность построения антенны Вивальди с управляемыми частотными характеристиками путём введения в структуру классической антенны реконфигурируемых резонаторов. При этом обеспечена возможность функционирования излучателя в СШП, полосно-пропускающем режимах, в режиме режекции и их комбинациях.

Отметим, что элементы перестройки резонаторов были промоделированы идеализированно: не учтены характеристики реальных коммутаторов и варакторов в сверхширокой полосе частот, также в модели не были введены низкочастотные цепи управления элементами. Соответствующие усложнения должны быть привязаны непосредственно к конкретной топологии разработанной СВЧ платы. Как показано в работах [4], [5], учёт характеристик реальных элементов и цепей управления может приводить к заплыванию уровней согласования в полосно-пропускающем режиме и ослаблению режекции. Тем не менее, полученные для упрощённых моделей результаты в целом остаются справедливыми.

Список литературы

1. Hall P.S., Gardner P., Kelly J., Ebrahimi E., Hamid M.R., Ghanem F., Herraiz-Martinez F.J., Segovia-Vargas D. Reconfigurable Antennas Challenges for Future Radio Systems // 3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. Berlin, Germany, March 2009. IEEE Publ., 2009. P. 949-955.
2. Gibson P.J. The Vivaldi Aerial // 9th European Microwave Conference, 1979. P. 101-105. DOI: [10.1109/EUMA.1979.332681](https://doi.org/10.1109/EUMA.1979.332681)
3. Janaswamy R., Schaubert D.H. Analysis of tapered slot antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1987. Vol. 33, iss. 9. P. 1058-1065. DOI: [10.1109/TAP.1987.1144218](https://doi.org/10.1109/TAP.1987.1144218)
4. Hamid M.R., Hall P.S., Gardner P., Ghanem F. Frequency Reconfigurable Vivaldi Antenna // 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Barcelona, Spain, April 2010. IEEE Publ., 2010. P. 1-4.
5. Hamid M.R., Hall P.S., Gardner P., Ghanem F. Switched WLAN-Wideband Tapered Slot Antenna // Electronics Letters. 2010. Vol. 46, iss. 1. P. 23-24. DOI: [10.1049/el.2010.2268](https://doi.org/10.1049/el.2010.2268)
6. Климов А.И., Меркулов К.Б., Останков А.В., Пастернак Ю.Г., Юдин В.И. Плоская дифракционная СВЧ антенна с электронно управляемой поляризационной чувствительностью // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 6. С. 137.
7. Авдюшин А.С., Ашихмин А.В., Зеленин И.А., Пастернак Ю.Г., Федоров С.М. Искусственный диэлектрик с синтезируемой поверхностью отражения электромагнитных волн СВЧ диапазона // Радиотехника. 2014. № 6. С. 4-7.

8. Кабанов И.Н., Комаров В.В., Мещанов В.П. Частотноселективные структуры микроволнового и терагерцового диапазона частот // Антенны. 2014. № 7. С. 62-67.
9. Чернышев С.Л., Виленский А.Р. Разработка излучателей для сверхкороткоимпульсных антенных решёток // Доклады XVII МНТК «Радиолокация. Навигация. Связь». Воронеж, 2011. С. 2159-2170.
10. Чернышев С.Л., Виленский А.Р. Исследование балансных печатных щелевых антенн бегущей волны в составе антенных решеток X-диапазона // Радиотехника. 2013. № 11. С. 118-122.

Ultra-Wideband Printed Slot Radiators with Controllable Frequency Characteristics

S.L. Chernyshev^{1,*}, A.R. Vilensky¹

*chemshv@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: режекция band rejection, UWB antenna, reconfigurable Vivaldi antenna

We have studied the possibility of creating ultra-wideband (UWB) antennas with controlled frequency response of matching based on the printed slot antenna Vivaldi by introducing controlled resonators directly into the structure of the radiator. In the area of irregular slotline there are printed switched resonators with variable capacitance (varactor model), which allow tuning the frequency characteristics for each state of switching cavities, providing bandpass and band-barrage properties of the antenna. The investigation of reconfigurable printed resonators in the system of reconfigurable resonators of a bandpass filter is conducted. The paper considers filter to provide restructuring in the band (3-9) GHz. Electrodynamic simulation of the device was carried out in the time domain using a finite integration method. A bandstop reconfigurable filter is also investigated. The filter located on the substrate opposite the slit is based on tunable L-shaped resonator that has one end connected to the short-circuit through the board metallization; the other end remains open and is brought into the region of interaction with the slotline. Such filter provides an effective narrow-band suppression and can be easily tuned to the desired frequency channel. The combination of these two types of filters allows you to create a controlled print Vivaldi slot antenna with combined properties. The paper investigates parameters of the scattering and radiation pattern of the antenna in different modes.

References

1. Hall P.S., Gardner P., Kelly J., Ebrahimi E., Hamid M.R., Ghanem F., Herraiz-Martinez F.J., Segovia-Vargas D. Reconfigurable Antennas Challenges for Future Radio Systems. *3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009*, Berlin, Germany, March 2009. IEEE Publ., 2009, pp. 949-955.
2. Gibson P.J. The Vivaldi Aerial. *9th European Microwave Conference*, 1979, pp. 101-105. DOI: [10.1109/EUMA.1979.332681](https://doi.org/10.1109/EUMA.1979.332681)
3. Janaswamy R., Schaubert D.H. Analysis of tapered slot antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, vol. 33, iss. 9, pp. 1058-1065. DOI: [10.1109/TAP.1987.1144218](https://doi.org/10.1109/TAP.1987.1144218)

4. Hamid M.R., Hall P.S., Gardner P., Ghanem F. Frequency Reconfigurable Vivaldi Antenna. *2010 Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Barcelona, Spain, April 2010. IEEE Publ., 2010, pp. 1-4.
5. Hamid M.R., Hall P.S., Gardner P., Ghanem F. Switched WLAN-Wideband Tapered Slot Antenna. *Electronics Letters*, 2010, vol. 46, iss. 1, pp. 23-24. DOI: [10.1049/el.2010.2268](https://doi.org/10.1049/el.2010.2268)
6. Klimov A.I., Merkulov K.B., Ostankov A.V., Pasternak Yu.G., Youdin V.I. Planar diffraction microwave antenna with electronically controlled polarizing sensitivity. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1999, no. 6, p. 137. (in Russian).
7. Avdyushin A.S., Ashikhmin A.V., Zelenin I.A., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M. Artificial dielectric with surface synthesized for reflection of electromagnetic waves of microwave range. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2014, no. 6, pp. 4-7. (in Russian).
8. Kabanov I.N., Komarov V.V., Meshchanov V.P. Frequency selective structures of microwave and terahertz ranges. *Antenny = Antennas*, 2014, no. 7, pp. 62-67. (in Russian).
9. Chernyshev S.L., Vilenskii A.R. Development of emitters for super short pulse antenna arrays. *Doklady 17 MNTK "Radiolokatsiya. Navigatsiya. Svyaz"* [Proc. of the 17 IRTC "Radiolocation. Navigation. Communication"]. Voronezh, 2011, pp. 2159-2170. (in Russian).
10. Chernyshev S.L., Vilenskii A.R. The investigation of X-band wideband antenna arrays composed of balanced travelling wave slot antennas. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2013, no. 11, pp. 118-122. (in Russian).