

УДК 621.372.413

А.А. Волошин, Н.А. Руда, Ю.В. Прокопенко, канд. техн. наук, **Ю.М. Поплавко**, д-р. физ.-мат. наук
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Исследование частотных характеристик перестраиваемой микрополосковой антенной структуры

В работе исследован микромеханический метод перестройки частотных параметров микрополосковой антенны с круглым излучателем. Показано, что изменение размера воздушного зазора между диэлектрической подложкой и металлическим излучателем изменяет эффективную диэлектрическую проницаемость линии под антенной, что влияет на изменение рабочей частоты устройства, величины обратных потерь и ширины полосы пропускания. Проанализировано влияние физических и геометрических параметров антенной структуры на ее излучательные характеристики. Предложенный метод позволяет осуществлять перестройку микрополосковых антенн в частотной области, повышая эффективность их излучения и расширяя полосу их рабочих частот. Библ. 14, рис. 10.

Ключевые слова: микрополосковая антенна, частотная перестройка, микромеханический метод управления, эффективная диэлектрическая проницаемость, воздушный зазор, коэффициент отражения, ширина полосы пропускания.

Введение

Одной из основных тенденций развития современной радиоэлектроники СВЧ является микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Поэтому требования, предъявляемые к электродинамическим характеристикам антенных устройств, являются достаточно жесткими и часто противоречивыми. Большое значение имеют габариты, вес, стоимость и конструктивные параметры антенных структур.

Необходимость резкого уменьшения габаритов и веса антенн, совмещения функций приема и излучения с одновременной обработкой радиосигнала в пространстве и времени привела к требованию обеспечения минимальных размеров как элементарных излучателей, так и их функциональных объединений – фазированных антенных решеток. Таким образом, требуется органическое сочетание излучающей системы с СВЧ-схемами обработки сигнала.

Микрополосковые антенны (МПА), изготов-

ляемые по технологии интегральных схем, обеспечивают высокую повторяемость размеров, низкую стоимость, малые металлоемкость, габаритные размеры, массу [2]. МПА способны излучать электромагнитные волны с линейной и вращающейся поляризацией, допускают удобные конструктивные решения для объединения отдельных излучательных элементов в антенные решетки и размещения их на поверхностях сложной формы.

Характерной особенностью большинства микрополосковых антенных устройств является небольшая ширина полосы частот, не превышающая 2,5 %, и только у некоторых образцов достигает 5 – 7 % [3]. Это обстоятельство в значительной степени ограничивает их применение. Для МПА, используемых в мобильных устройствах и для передачи данных в беспроводных локальных сетях, требования к рабочей полосе частот весьма жесткие. Различные функциональные характеристики, в числе которых эффективность излучения, широкополосность, диапазонность и оптимальная для специфики условий эксплуатации форма диаграммы направленности – являются взаимосвязанными параметрами. Только для передачи данных по технологии 3G в нашей стране используются три частотных диапазона (CDMA EVDO 450 МГц, CDMA EVDO 800 МГц и HSDPA 2100 МГц). Это приводит к необходимости использовать одновременно несколько излучательных элементов для различных частотных диапазонов. Поэтому для большинства телекоммуникационных применений желательной есть возможность изменения частотных характеристик МПА.

Естественным путем расширения полосы частот МПА является использование более толстых подложек. Однако этот способ имеет ограниченные возможности, поскольку при этом создаются условия для возникновения в подложке поверхностных волн, резко снижающих эффективность излучения антенны [8]. В настоящее время основными методами увеличения широкополосности МПА являются добавление в конструкцию антенны связанных с основной пластиной активных и пассивных излучающих элементов, использование логоперио-

дических структур, применение согласующих цепей или пластин сложной формы [14].

В данной статье рассматривается метод частотной перестройки параметров микрополосковой антенны, осуществляемой микромеханическим способом. Основываясь на опыте изучения микромеханической перестройки параметров волноводного фазовращателя [10], было отмечено изменение измеренных параметров антенны в зависимости от размера воздушного зазора между металлическим излучателем и диэлектрической подложкой. Используя этот метод, появляется возможность изменять частотные характеристики микрополосковой антенны во время функционирования прибора.

Конструкция и моделирование прибора

Конструкция микрополосковой антенны представляет собой металлический излучатель, размещенный на диэлектрической подложке, с обратной стороны которой находится земляная пластина. Для МПА предпочтительной является толщина диэлектрика от $\lambda_0/20\sqrt{\epsilon_S}$ до $\lambda_0/50\sqrt{\epsilon_S}$, где λ_0 - длина волны, ϵ_S - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика [6]. В качестве диэлектрика применяются диэлектрические материалы с низкими потерями (тефлон, полиэтилен) и $\epsilon_S = 2 - 2,6$, но, в зависимости от применения, возможен и более широкий спектр значений ϵ_S [7]. При этом толщина антенного устройства может колебаться от десятых долей до единиц миллиметра.

Основное требование к материалу подложки – малые потери, характеризующиеся тангенсом угла диэлектрических потерь $\tan\delta$. Подложки из ячеистого материала с низким значением ϵ_S [13] или МПА с воздушным заполнением [1] имеют наименьшие потери и обеспечивают наибольшую эффективность излучения антенны.

Излучатели МПА чаще всего имеют прямоугольную или круглую форму, однако принципиально возможна произвольная форма с известной резонансной частотой. Существуют примеры использования фрактальных структур в качестве антенн или их отдельных элементов, что

делает их более широкополосными и многочастотными за счет большого количества резонансных частот, соответствующих каждому характерному масштабу структуры [12]. Выбором формы пластины можно как существенно улучшить согласование МПА с фидерной линией, так и реализовать круговую поляризацию излучения антенны [5].

Возбуждение МПА осуществляется как прямым гальваническим контактом с микрополосковой линией или коаксиальным зондом, так и неконтактным методом – электромагнитной связью через отверстие в экранной плоскости или взаимодействием за счет близости с несущими СВЧ-энергию цепями [9].

В данной статье рассматривается конструкция микрополосковой антенны с металлическим излучателем круглой формы с радиусом R (рис. 1). Питание антенны осуществляется с помощью микрополосковой линии с шириной w , подводимой к излучателю. Воздушный зазор между излучателем и диэлектрической подложкой создается путем его отрыва микромеханическим способом [4].

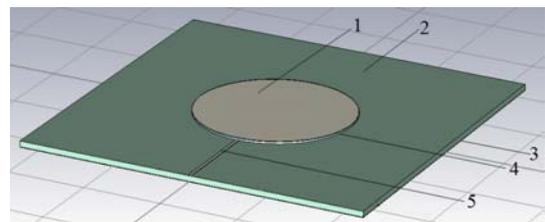


Рис. 1. Конструкция микрополосковой антенны с круглым излучательным элементом: 1 – круглый металлический излучатель; 2 – диэлектрическая подложка; 3 – земляная пластина; 4 – воздушный зазор; 5 – микрополосковая линия

Частотная зависимость коэффициента отражения антенны без воздушного зазора (рис.2) между излучателем и подложкой для круглой и прямоугольной конструкций была получена с помощью метода конечных разностей во временной области. Антенна с круглым излучателем показывает большую эффективность излучения, чем антенная конструкция с прямоугольным излучателем, и имеет более широкий полосу пропускания.

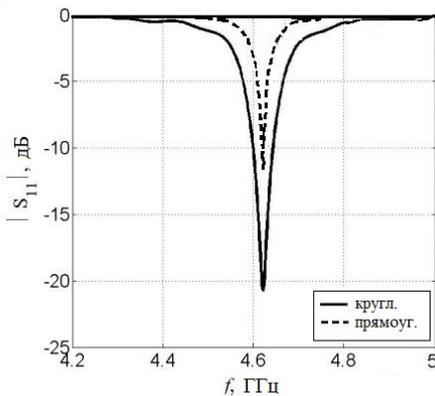


Рис. 2. Результаты FDTD моделирования коэффициента отражения МПА с круглым и прямоугольным излучательными элементами без воздушного зазора (величина воздушного зазора $d=0$ мкм)

Конструктивные и физические параметры МПА оказывают влияние на характеристики ее излучения. Резонансная частота круглой микрополосковой антенны обратно пропорционально зависит от радиуса R металлического излучателя. В то же время она уменьшается при увеличении относительной диэлектрической проницаемости подложки (рис.3). Для дальнейшего рассмотрения характеристик МПА удобно использовать величину $\sqrt{\varepsilon_s}kR$, где $k = \frac{2\pi f_r}{c}$ –

резонансное волновое число, поскольку она не зависит от абсолютных размеров антенной конструкции.

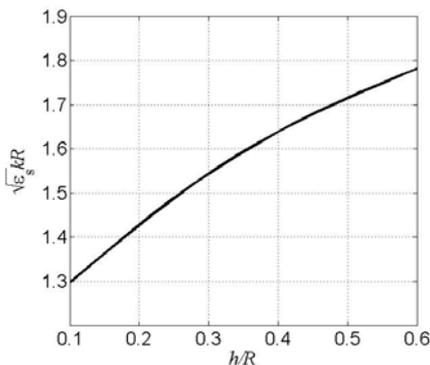


Рис. 3. Графики зависимости изменения резонансного волнового числа микрополосковой антенны с круглым излучателем от относительной толщины подложки для различных значений (относительной) ширины микрополосковой линии

Толщина диэлектрической подложки h , используемой для изготовления микрополосковых антенн, обычно намного меньше длины волны. Поэтому только небольшая часть волн, возбуж-

даемых излучателем внутри структуры, достигает ее границ, где должно возникать излучение. В связи с этим микрополосковые антенные конструкции имеют низкую эффективность.

С увеличением толщины подложки увеличиваются краевые поля на краях излучателя, отношение толщины подложки к радиусу излучателя (h/R) увеличивается, что уменьшает эффективную диэлектрическую проницаемость и увеличивает резонансную частоту антенны и ширину ее полосы пропускания (рис. 4).

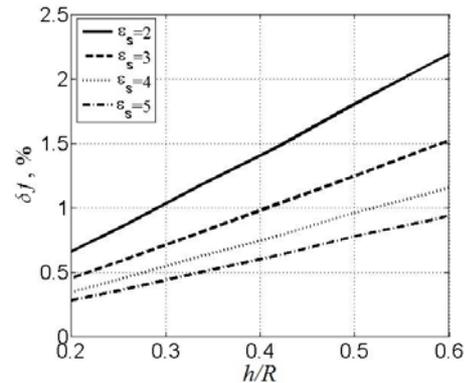


Рис. 4. Графики зависимости ширины полосы пропускания круглой микрополосковой антенны от относительной толщины диэлектрической подложки для разных значений относительной диэлектрической проницаемости подложки

Приведенные зависимости показывают, что ширина полосы пропускания круглой МПА возрастает с уменьшением относительной диэлектрической проницаемости подложки.

Изменение характеристик МПА с воздушным зазором

Возможность перестройки характеристик микрополосковой антенной конструкции расширяет перспективы использования таких приборов в современной СВЧ технике. В представленной МПА структуре управление резонансной частотой антенны осуществляется путем изменения расстояния между металлическим излучательным элементом и диэлектрической подложкой.

Конструкция микрополосковой антенны с воздушным зазором характеризуется изменением амплитуды коэффициента отражения S_{11} . Увеличение расстояния между подложкой и металлическим излучателем уменьшает эффективную диэлектрическую проницаемость конструкции, что позволяет увеличить рабочую частоту антенны и уменьшить обратные потери (рис. 5).

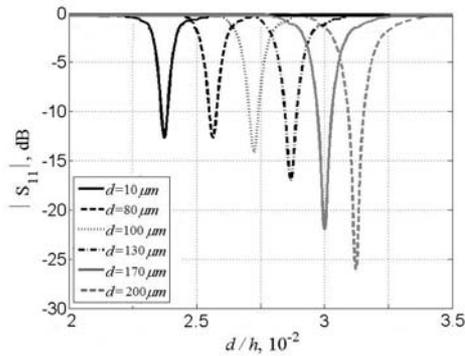


Рис. 5. Результаты FDTD моделирования амплитуды коэффициента отражения микрополосковой антенны с круглым излучателем для разных значений толщины воздушного зазора ($\epsilon_S = 6$)

С изменением относительной толщины воздушного зазора d/h происходит изменение резонансного волнового числа $k = 2\pi f_r / c$ микрополосковой антенны, которое увеличивается при уменьшении значения эффективной диэлектрической проницаемости антенной структуры (рис. 6). Эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ_{eff} для различных значений d была получена методом конечных элементов. Полученные зависимости показывают значительную перестройку параметров МПА с изменением расстояния между металлическим излучателем и диэлектрической подложкой. Изменение толщины воздушного зазора на единицы процентов от толщины диэлектрика ведет к увеличению значения резонансного волнового числа до 45%.

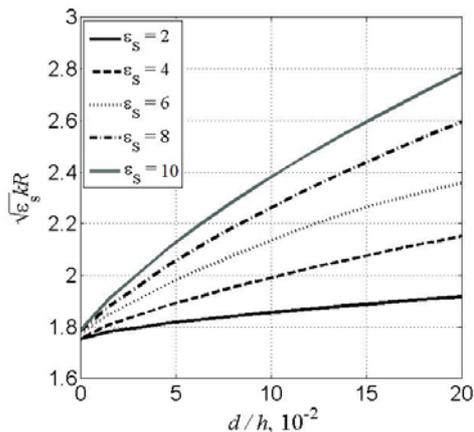


Рис. 6. Графики зависимости величины резонансного волнового числа микрополосковой антенны с круглым излучателем от толщины воздушного зазора между подложкой и излучателем для различных значений относительной диэлектрической проницаемости подложки ($h/R = 0,6$)

Величина перестройки характеристик микрополосковой антенны зависит не только от значения относительной диэлектрической проницаемости подложки, но и от ее толщины. Уменьшая толщину подложки можно получить ту же перестройку резонансного волнового числа антенной структуры при меньших изменениях величины воздушного зазора между подложкой и излучателем (рис. 7).

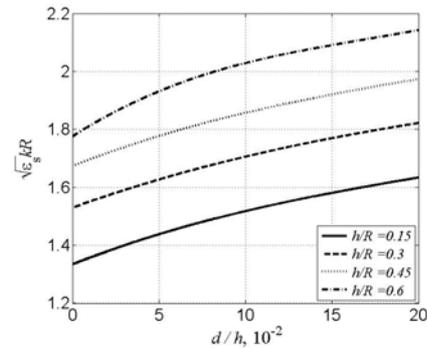


Рис. 7. Графики зависимости величины резонансного волнового числа микрополосковой антенны с круглым излучательным элементом от толщины воздушного зазора между подложкой и излучателем для различных значений относительной толщины подложки ($\epsilon_S = 4$)

Увеличение эффективности перестройки характеристик МПА путем изменения величины воздушного зазора не должно снижать эффективность излучения структуры. Согласование входного сопротивления микрополосковой антенны с волновым сопротивлением питающей микрополосковой линии имеет большое влияние на эффективность излучения антенной конструкции. При максимальном согласовании антенного излучателя с микрополосковой линией достигаются минимальные обратные потери, что отражается в близком к единице коэффициенте стоячей волны по напряжению (КСВН) (рис. 8).

При увеличении зазора между антенной и подложкой уменьшается эффективная диэлектрическая проницаемость конструкции, что увеличивает входное сопротивление антенны. Волновое сопротивление микрополосковой линии возрастает при уменьшении ширины полоски. Таким образом, можно подобрать ширину питающей микрополоски для достижения той же эффективности излучения МПА в заданном диапазоне частот при меньших расстояниях между подложкой и металлическим излучателем.

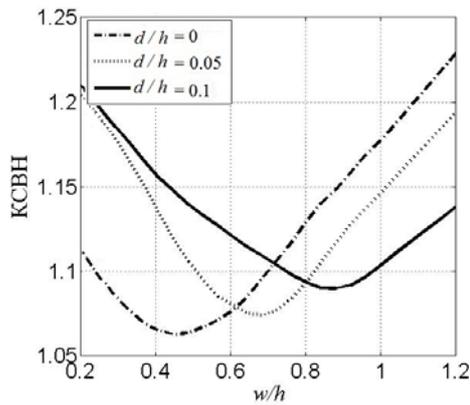


Рис. 8. Графики зависимости КСВН круглой МПА от ширины питающей микрополосковой линии для разных значений толщины воздушного зазора между диэлектрической подложкой и металлическим излучателем ($h/R = 0,6$)

Как было показано выше, полоса рабочих частот микрополосковых антенн может быть расширена за счет использования толстых диэлектрических подложек [13]. Недостатком таких подложек есть возникновение в их объеме дополнительных колебаний, которые снижают эффективность излучения (рис. 9). Уменьшение толщины подложки создает проблемы в процессе изготовления подложек больших площадей для устройств, работающих в миллиметровом диапазоне [11].

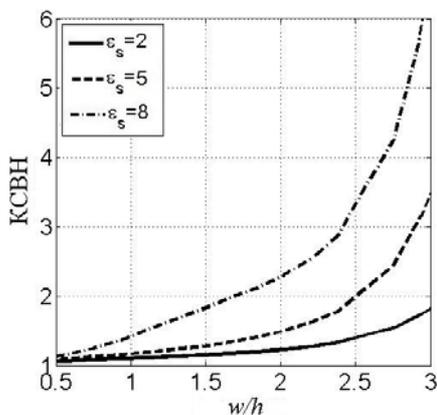


Рис. 9. Графики зависимости КСВН круглой микрополосковой антенны от относительной толщины диэлектрической подложки для разных значений относительной диэлектрической проницаемости материала подложки ($h/R = 0,6$)

Расширить полосу частот можно также используя в качестве подложки материал с низкой диэлектрической проницаемостью, однако это приведет к необходимости увеличивать габариты конструкции, поскольку требуется увеличение ширины питающей микрополосковой линии, как это показано на рис. 8.

В связи с этим метод уменьшения диэлектрической проницаемости подложки непосредственно под антенной путем создания воздушного зазора между подложкой и излучателем является наиболее перспективным вариантом решения данной проблемы (рис. 10). Это позволяет не только уменьшить габариты антенной конструкции, но и избавиться от возникновения колебаний внутри подложки, которые ухудшают эффективность излучателя и его полосу частот, поскольку не увеличивается количество диэлектрического материала под антенной, в котором могут распространяться поверхностные волны.

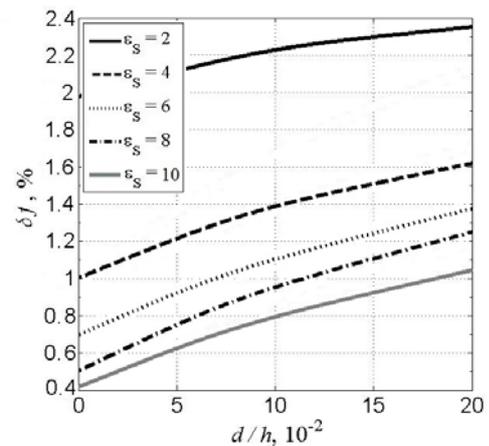


Рис. 10. Изменение ширины полосы пропускания микрополосковой антенны с круглым излучателем в зависимости от относительной толщины воздушного зазора d/h для различных значений относительной диэлектрической проницаемости подложки ($h/R = 0,6$)

При увеличении толщины воздушного зазора полоса рабочих частот антенного устройства расширяется. В связи с этим, такие микрополосковые антенные структуры можно использовать не только для перестройки их характеристик, но и для расширения полосы на одной рабочей частоте.

Выводы

Наличие небольшого воздушного зазора между диэлектрической подложкой и металлическим излучателем в микрополосковой антенной конструкции приводит к значительным изменениям измеряемых параметров антенны. Изменение толщины воздушного зазора позволяет перестраивать рабочую частоту антенны и уменьшает обратные потери.

Величина перестройки зависит также и от параметров используемой диэлектрической подложки: диэлектрической проницаемости и толщины. Уменьшая толщину и увеличивая ди-

электрическую проницаемость подложки можно достичь той же величины перестройки при меньших расстояниях между подложкой и излучателем. Однако использование подложек с высокой диэлектрической проницаемостью уменьшает ширину полосы рабочих частот.

Полоса пропускания антенны может быть расширена путем увеличения толщины подложки МПА, поскольку это уменьшает эффективную диэлектрическую проницаемость структуры. Но при этом снижается эффективность излучения из-за возникновения дополнительных колебаний в объеме подложки. Использование в качестве подложки диэлектрического материала с низким значением диэлектрической проницаемости приводит к увеличению габаритов устройства, поскольку в этом случае необходимо увеличивать ширину микрополосковой линии для достижения нужного согласования излучателя и питающей микрополоски.

Решением этой проблемы является создание воздушного зазора между подложкой и излучателем, поскольку в этом случае рабочая полоса частот может быть расширена без увеличения габаритов устройства и утолщения диэлектрической подложки.

Важно найти компромисс между толщиной и диэлектрической проницаемостью, выбирая материал подложки для микрополосковых антенн, для поддержания баланса между эффективностью перестройки характеристик МПА и эффективностью ее излучения.

Поскольку требуемые перемещения очень малы (единицы процента от толщины диэлектрической подложки), отрыв излучателя может быть реализован с помощью пьезоэлектрических, электрострикционных движителей или микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Список использованных источников

1. *Dubrovka F.F., Martynyuk S.E.* Stripline Antenna Array for Local Information-Telecommunication Radio Networks.// *Radioelectronics and Communication Systems*. – 2009. - Vol. 52. - № 8. - Pp. 445 – 448.
2. *Fang D.G.* Antenna Theory and Microstrip Antennas. - CRC Press: Taylor & Francis Group, 2010. - 635 p.
3. *Garg R., Bhartia P., Bahl I., Ittipiboon A.* Microstrip Antenna Design Handbook. - Artech House antennas and propagation library, 2001. – 817p.
4. *Golubeva I., Kazmirenko V., Sergiyenko P. and Prokopenko Y.* Effective permittivity in tunable microstrip and coplanar lines.// *Proceedings of the XXXII International Scientific Conference ELNANO-2012*. – 2012. - Pp. 69-70.
5. *Guney K., Sarikaya N.* A comparative study of models of adaptive systems with fuzzy logic, designed to calculate the resonant frequency of round microstrip antennas.// *Radiotechnics and Electronics*. – 2009. - Vol. 54. - № 4. - Pp. 389 – 400.
6. *Johnson R.C.* Antenna engineering handbook. Third edition. - McGraw-Hill, 1993. - 1511p.
7. *Kumar G., Ray K.P.* Broadband microstrip antennas. - Artech House antennas and propagation library, 2003. - 325 p.
8. *Lee K.-F.* Microstrip patch antennas – basic properties and some recent advances.// *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1989. - Vol. 51. - № 9/10. - Pp. 811 – 818.
9. *Pozar D.M.* Microstrip Antennas.// *Proceedings of IEEE*. – 1992. - Vol. 80. - № 1. - Pp. 79 – 92.
10. *Ruda N., Prokopenko Y., Poplavko Y.* Electromagnetic analysis of waveguide-dielectric phase shifter.// *Electronics and Communications*. – 2011. - № 2(61). - Pp. 46 – 51.
11. *Targonsky S.D., Waterhouse R.B., Pozar D.M.* Design of Wide-Band Aperture-Stacked Patch Microstrip Antennas.// *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1998. - Vol. 46. - № 9. – Pp. 1245 – 1251.
12. *Болотов В.Н., Киричок А.В., Ткач Ю.В.* Экспериментальное исследование фрактальных антенн.// *Электромагнитные явления*. – 1998. - Т. 1. - №4. – С. 483 – 497.
13. *Лобкова Л.М., Щебетовский В.Г., Шестаков А.Г.* Характеристики излучения микрополосковых антенн.// *Вестник СевГТУ*. - 2003. - Вып. 47. - С. 102-111.
14. *Лось В.Ф.* Микрополосковые и диэлектрические резонаторные антенны. САПР - модели: методы математического моделирования – М.: ИПРЖР, 2002. – 96 с.

Поступила в редакцию 01 апреля 2014 г.

УДК 621.372.413

А.О. Волошин, Н.О. Руда, Ю.М. Поплавко, д-р. фіз.-мат. наук, **Ю.В. Прокопенко**, канд. техн. наук
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

Дослідження частотних характеристик мікросмушкової антенної структури з перелаштуванням

В роботі досліджений мікромеханічний метод перелаштування частотних параметрів мікросмушкової антени з круглим випромінювачем. Показано, що зміна розмірів повітряного зазору між діелектричною підкладкою та металічним випромінювачем змінює ефективну діелектричну проникність лінії під антеною, що впливає на зміну робочої частоти пристрою, величини зворотних втрат та ширини смуги пропускання. Проаналізовано вплив фізичних та геометричних параметрів антенної структури на її випромінювальні характеристики. Запропонований метод дозволяє здійснювати перелаштування мікросмушкових антен в частотній області, підвищуючи ефективність їх випромінювання та розширюючи смугу їх робочих частот. Бібл. 14, рис. 10.

Ключові слова: мікросмушкова антена, частотне перелаштування, мікромеханічний метод керування, ефективна діелектрична проникність, повітряний зазор, коефіцієнт відбивання, ширина смуги пропускання.

UDC 621.372.413

A.A. Voloshyn, N.A. Ruda, Yu.M. Poplavko, Dr.Sc., **Yu.V. Prokopenko**, Ph.D.
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

Frequency characteristics investigation of tunable microstrip antenna structure

The micromechanical method of frequency parameters tuning of microstrip antenna with a circular radiator is investigated in paper. It is shown that the change in the size of the air gap between the dielectric substrate and the metal patch changes the effective dielectric constant of line under the antenna which affects the operating frequency of the device, the return loss value and bandwidth. The effect of physical and geometrical parameters of the antenna structure on its radiative characteristics is analyzed. The proposed method enables tuning of antenna parameters in frequency domain increasing the radiation efficiency and extending its operating frequency range. Reference 14, figures 10.

Keywords: microstrip antenna, frequency tuning, micromechanical control, effective dielectric permittivity, air gap, reflection coefficient, bandwidth.

References

1. Dubrovka F.F., Martynyuk S.E. (2009), "Stripline Antenna Array for Local Information-Telecommunication Radio Networks". Radioelectronics and Communication Systems. Vol. 52, no. 8, pp. 445 – 448.
2. Fang D.G. (2010), "Antenna Theory and Microstrip Antennas". CRC Press: Taylor & Francis Group. P. 635.
3. Garg R., Bhartia P., Bahl I., Ittipiboon A. (2001), "Microstrip Antenna Design Handbook". Artech House antennas and propagation library. P. 817.
4. Golubeva I., Kazmirenko V., Sergiyenko P. and Prokopenko Y. (2012), "Effective permittivity in tunable microstrip and coplanar lines". Proceedings of the XXXII International Scientific Conference ELNANO-2012, pp. 69-70.
5. Guney K., Sarikaya N. (2009), "A comparative study of models of adaptive systems with fuzzy logic, designed to calculate the resonant frequency of round microstrip antennas". Radiotechnics and Electronics. Vol. 54, no. 4, pp. 389 – 400.

-
6. *Johnson R.C.* (1993), "Antenna engineering handbook. Third edition". McGraw-Hill. P. 511.
 7. *Kumar G., Ray K.P.* (2003), "Broadband microstrip antennas". Artech House antennas and propagation library. P. 325.
 8. *Lee K.-F.* (1989), "Microstrip patch antennas – basic properties and some recent advances". Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. Vol. 51, no. 9/10, pp. 811 – 818.
 9. *Pozar D.M.* (1992), "Microstrip Antennas". Proceedings of IEEE. Vol. 80, no. 1, pp. 79 – 92.
 10. *Ruda N., Prokopenko Y., Poplavko Y.* (2011), "Electromagnetic analysis of waveguide-dielectric phase shifter". Electronics and Communications. No. 2(61), pp. 46 – 51.
 11. *Targonsky S.D., Waterhouse R.B., Pozar D.M.* (1998), "Design of Wide-Band Aperture-Stacked Patch Microstrip Antennas". IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 46, no. 9, pp. 1245 – 1251.
 12. *Bolotov V.N., Kirichok A.V., Tkach Yu.V.* (1998), "Experimental research of fractal antennas". Elektromagnitnyie yavleniia. V. 1, no. 4, pp. 483 – 497. (Rus.)
 13. *Lobkova L.M., Shchebetovskii V.G., Shestakov A.G.* (2003) "Radiating characteristics of microstrip antennas". Vestnik SevGTU. V. 47, pp. 102-111. (Rus.)
 14. *Los V.F.* (2002), "Microstrip and dielectric resonator antennas". SAPR-modeli: metody matematicheskogo modelirovaniia. Moskva, IPRZhR. P. 96. (Rus.)