

Системы телекоммуникации, связи и защиты информации

УДК 621.396.677.75

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»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

Частотно-перестраиваемая цилиндрическая диэлектрическая резонансная антенна, возбуждаемая волноводом

В работе предложен метод перестройки полосы рабочих частот цилиндрической диэлектрической резонансной антенны. В основе метода лежит микромеханическая перестройка составного цилиндрического диэлектрического резонатора (СЦДР). Преимуществами предложенного метода являются широкий диапазон перестройки и увеличение коэффициента полезного действия антенны. Исследованы два типа конструкций антенн, возбуждаемых волноводом в режиме стоячей и бегущей волны. Представлены основные характеристики антенн. Проведен анализ зависимости коэффициента отражения S_{11} , центральной рабочей частоты и формы диаграммы направленности от взаимного расположения составных частей цилиндрического диэлектрического резонатора. Исследовано влияние геометрических размеров и электрофизических параметров резонатора на эффективность перестройки частоты, эффективность излучения и коэффициент усиления антенны. Библиограф. 11, рис. 7.

Ключевые слова: диэлектрическая резонансная антенна, цилиндрический диэлектрический резонатор, перестройка частоты.

Введение

Развитие и миниатюризация средств мобильной связи, усилило интерес к антенным системам, способным легко размещаться в корпусе любой формы и размера. В то же время использование нескольких стандартов беспроводной связи в одном устройстве, приводит к увеличению числа поддерживаемых частотных диапазонов, например, в телефонах стандарта GSM могут быть использованы диапазоны: 900, 1800, 1900 МГц. А в современных смартфонах и мобильных станциях является актуальной поддержка частотных диапазонов, отведенных для беспроводных сетей и технологий передачи данных: WLAN, Wi-Fi, Bluetooth, LTE. Исходя из

этих требований, появляется необходимость в исследовании и проектировании многодиапазонных или перестраиваемых антенн. Такие антенны наряду с формированием диаграмм направленности одновременно совмещают в себе функции входных фильтров.

Одним из перспективных кандидатов на роль такого типа антенн являются диэлектрические резонансные антенны (ДРА) [1]. В силу того, что длина волны в диэлектрике уменьшается до $\lambda_0/\sqrt{\varepsilon}$, где λ_0 - длина волны в свободном пространстве, ε - диэлектрическая проницаемость диэлектрика, ДРА могут быть в $\sqrt{\varepsilon}$ раз меньше проводных антенн, расположенных в свободном пространстве. Поэтому при использовании диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon=30-100$), ДРА для высоких и сверхвысоких частот компактны. В сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн диэлектрические потери ДРА намного меньше, чем у металлических проводников. В результате КПД ДРА обычно высок и слабо зависит от влияния близлежащих предметов, а эффективность излучения обычно более 95% [1].

Фактором, замедляющим применение ДРА, является: сравнительно узкие полосы рабочих частот. Однако, этот недостаток становится несущественным при смещении рабочих частот систем связи в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн.

Известны несколько способов перестройки ДРА [2-6]. В работе [2] для подстройки рабочей частоты, возбуждаемой коаксиальным кабелем, применяется паразитный слот (щель в форме кольца, заполненная воздухом), изменение диаметра которого приводит к смещению частоты. В работах [3-5] с этой же целью используется проводящий диск вместо паразитного слота. Однако, эти методы перестройки применимы для подстройки антенны на этапе проектирова-

ния. Практический же интерес представляет перестройка антенны в процессе работы. В работе [6] сдвиг частоты производится путем изменения емкости, для чего используют варикапы или варакторы. Этот метод обеспечивает возможность непрерывной перестройки частоты, а также он прост в реализации. Однако, включение варактора или варикапа в диэлектрический резонатор (ДР) приводит к уменьшению коэффициента полезного действия (КПД) за счет снижения добротности резонансных элементов, а диапазон перестройки имеет существенные ограничения.

В данной статье предложен микромеханический метод частотной перестройки диэлектрической резонансной антенны, который имеет широкий диапазон перестройки - до 30% и увеличивает КПД антенны.

Принцип частотной перестройки ДРА и их конструкции

Микромеханическая частотная перестройка ДРА может достигаться за счет возмущения в распределении электромагнитного поля диэлектрического резонатора (ДР) и управляться путем механического воздействия. Внесение диэлектрической неоднородности в виде воздушного зазора параллельно линиям электрического поля составного диэлектрического резонатора (СДР) вызывает достаточное возмущение для перестройки ДРА с TM_{01} -типом колебаний [7, 8]. Но, диапазон перестройки не превышает 10%, а конструкции имеют недостаток – необходимость использования дополнительных элементов возбуждения.

Предлагаемый метод перестройки основан на использовании составного цилиндрического диэлектрического резонатора (СЦДР), однако, воздушный зазор вносится поперечно линиям электрического поля, что приводит к существенному изменению распределения электромагнитного поля и расширению диапазона перестройки. Используемый СЦДР, представленный на рис. 1, состоит из двух полуцилиндров радиусом R и высотой h , разделяемых воздушным зазором d . В таком СЦДР при возбуждении на низшем типе колебаний $TE_{01\delta}$, воздушный зазор будет перпендикулярно пересекать силовые линии электрического поля резонатора.

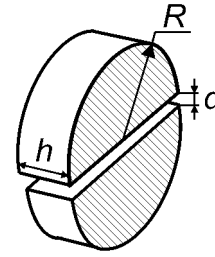


Рис. 1. Составной цилиндрический ДР

Основной принцип предложенного метода заключается в изменении так называемой эффективной диэлектрической проницаемости СЦДР. В работе [9] для анализа $TE_{01\delta}$ -типов колебаний СДР вводится понятие эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{эфф}$ неоднородной среды, которая определяется как проницаемость однородной среды с численно такими же макроскопическими характеристиками как и у неоднородной. Изменение величины воздушного зазора d на несколько процентов от радиуса резонатора, что составляет десятки микрон в сантиметровом диапазоне длин волн, приводит к существенному изменению распределения электромагнитного поля, изменяя при этом $\epsilon_{эфф}$ ДР.

Для количественной оценки влияния величины воздушного зазора (d) на изменение $\epsilon_{эфф}$ СЦДР представлена зависимость на рис.2, учитывающая влияние геометрических размеров резонатора h/R .

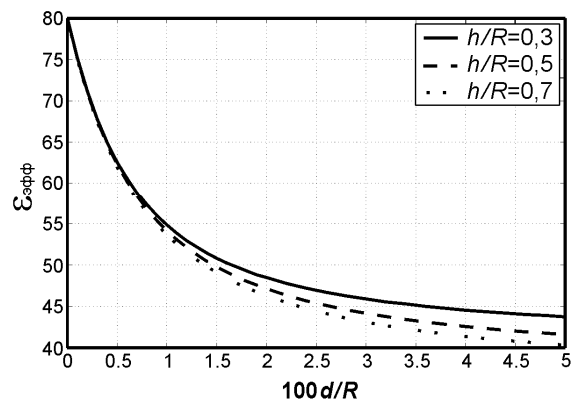


Рис. 2. Графики зависимости эффективной диэлектрической проницаемости СЦДР с диэлектрической проницаемостью материала $\epsilon = 80$ от нормированной величины воздушного зазора

Из зависимости видно, что $\varepsilon_{\text{эфф}}$ значительно уменьшается даже при малом увеличении зазора, а наибольшее изменение достигается с ростом соотношения геометрических размеров h/R , что позволяет увеличить эффективность перестройки.

Поскольку центральной рабочей частотой ДРА является резонансная частота диэлектрического резонатора, далее будет рассматриваться влияние величины воздушного зазора на резонансные частоты ДР. Резонансная частота цилиндрического ДР обратно пропорциональна корню квадратному из диэлектрической проницаемости материала ДР [1]. Следовательно, уменьшение величины эффективной диэлектрической проницаемости приводит к смещению резонансной частоты в более высокочастотную область.

Благодаря тому, что ДР легко возбуждаются во многих линиях связи, для их возбуждения на низшем типе колебаний $TE_{01\delta}$ можно использовать микрополосковую, микрощелевую, волноводную или коаксиальную линии. Волноводный метод возбуждения является наиболее простым

и привлекательным за счет того, что резонатор легко размещается в передающем тракте без дополнительных элементов связи и легко согласуется с ним.

Два наиболее распространенных способа возбуждения ДРА волноводом: в режиме бегущей волны и в режиме стоячей волны [10]. В данной статье рассмотрены оба типа ДРА, конструкции которых представлены на рис. 3 в двух проекциях: вид спереди и вид сбоку. Конструкция ДРА, возбуждаемая волноводом в режиме стоячей волны представлена на рис. 3.а. СЦДР устанавливается в центре неизлучающей апертуры в торце прямоугольного металлического волновода. Вторая конструкция ДРА, возбуждаемая волноводом в режиме бегущей волны, представлена на рис. 3.б. СЦДР устанавливается в центре неизлучающей апертуры, расположенной в широкой стенке волновода. Размеры прямоугольного отверстия апертуры b_x , b_y несколько превышают размеры СЦДР, однако, выбраны значительно меньшими по сравнению с размерами стенки волновода a , b .

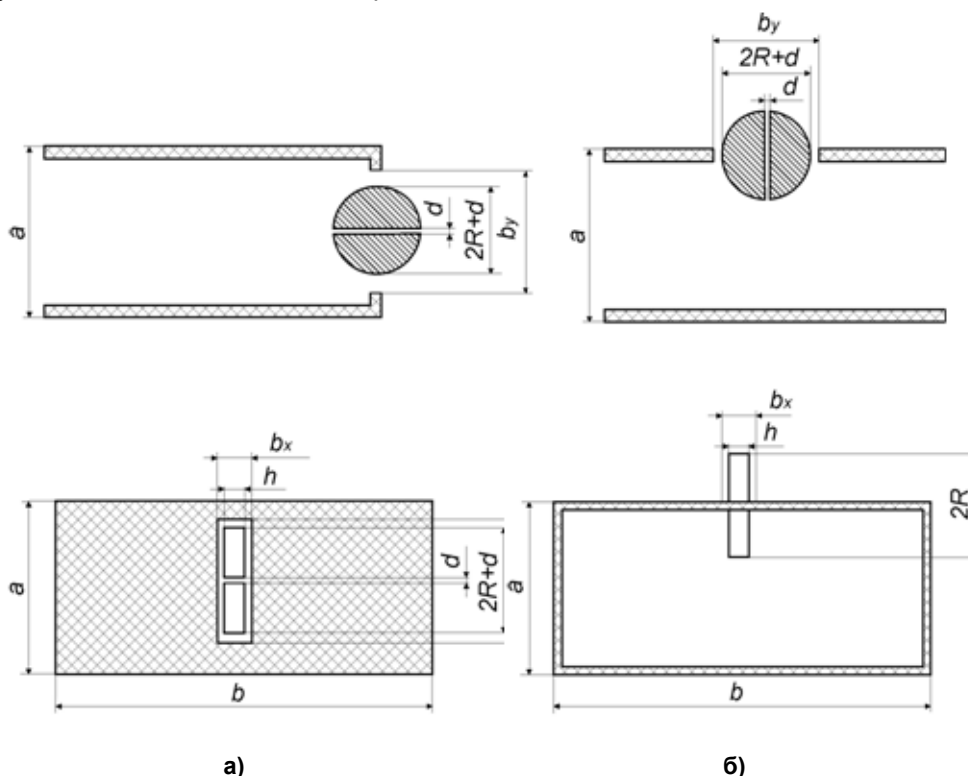


Рис. 3. Конструкции ДРА, возбужденные волноводом в режиме а) стоячей б) бегущей волны

Конструкция, представленная на рис. 3.б, имеет преимущество в том, что появляется возможность расширения полосы рабочих частот за счет использования систем связанных

диэлектрических резонаторов, расположенных в широкой стенке волновода [10], где количество используемых резонаторов ограничивается длиной волновода.

Характеристики частотно перестраиваемых ДРА

Для количественной оценки свойств перестраиваемых ДРА были рассчитаны зависимости влияния величины воздушного зазора на характеристики антенны: центральную рабочую частоту, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), эффективность излучения, коэффициент усиления (КУ) и диаграмму направленности (ДН). Расчет характеристик исследуемых антенн был проведен с помощью метода конечных разностей во временной области.

На рис. 4 приведены частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} конструкции ДРА, приведенной на рис. 3.а, для разных значений величины воздушного зазора d при $h/R = 0,3$ и $\varepsilon = 80$. Из зависимости видно, что уровень обратных потерь практически не изменяется или даже уменьшается при перестройке, что говорит о низком КСВН и высокой степени согласованности антенны и фидера.

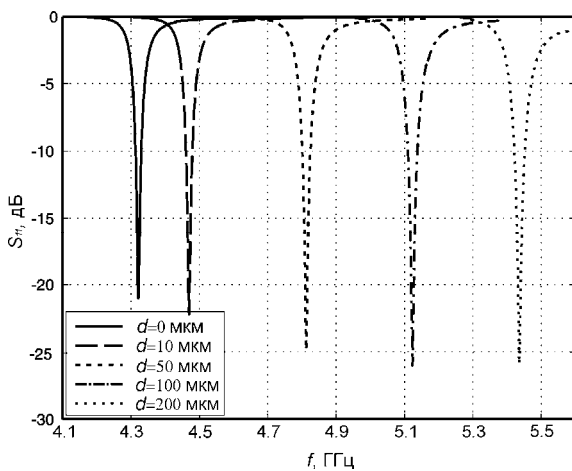


Рис. 4. Зависимость S_{11} от частоты при $h/R = 0,3$, $\varepsilon = 80$ для конструкции ДРА

Наряду с зависимостями влияния геометрических размеров резонатора, представленными на рис. 2, было исследовано влияние электрофизических параметров резонатора - диэлектрической проницаемости материала ДР, на эффективность перестройки частоты.

Резонансные частоты ДР удобно представлять в виде нормированного резонансного волнового числа $\sqrt{\varepsilon}kR$, где ε - диэлектрическая проницаемость материала ДР, $k = \frac{2\pi f_0}{c}$, f_0 - резонансная частота, c - скорость света в вакууме, R - радиус СЦДР. Значение нормиро-

ванного резонансного волнового числа не зависит от абсолютных значений геометрических размеров ДР и частотного диапазона.

Из зависимости, представленной на рис. 5, видно, что наибольшее изменение нормированного волнового числа достигается с ростом диэлектрической проницаемости ДР, из чего следует, что для повышения эффективности перестройки следует выбирать материал ДР с большей диэлектрической проницаемостью.

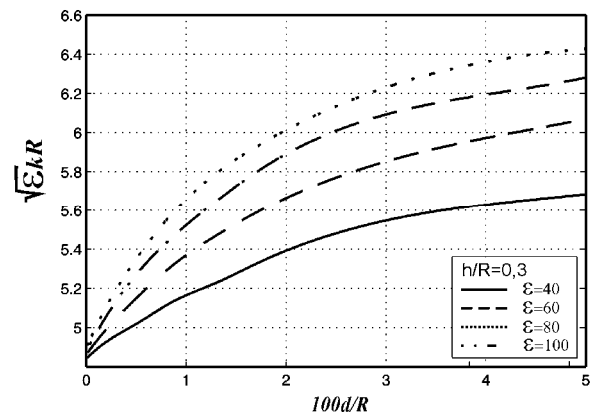


Рис. 5. Зависимость нормированного волнового числа от нормированного расстояния между полуцилиндрами для разных диэлектрических проницаемостей материала ДР при $h/R = 0,3$

Эффективность излучения является одной из основных излучающих характеристик антенн, вместе с диаграммой направленности (ДН), показывающая количество излучаемой энергии к общим потерям энергии. В общем случае, эффективность излучения определяется через подводимую и излучаемую мощности [1]. Однако, выражая диссипативные и излучающие потери через добротности, можно получить формулу для расчета эффективности излучения:

$$\eta = 1 - \frac{Q_H}{Q_0}; \quad (1)$$

где Q_H - нагруженная добротность, Q_0 - собственная добротность, учитывающая диссипативные потери СДР.

При внесении воздушного зазора в СЦДР, собственная добротность резонатора Q_0 растет из-за перераспределения энергии электромагнитного поля, а именно за счет увеличения энергии, запасаемой в воздушном зазоре, где практически нет потерь, что приводит к повышению эффективности излучения. Зависимости, представленные на рис. 6, подтверждают факт повышения эффективности излучения. Уменьшение диэлектрической проницаемости

материала ε и соотношения геометрических размеров h/R резонатора приводит к росту собственной добротности и, соответственно, к улучшению эффективности излучения.

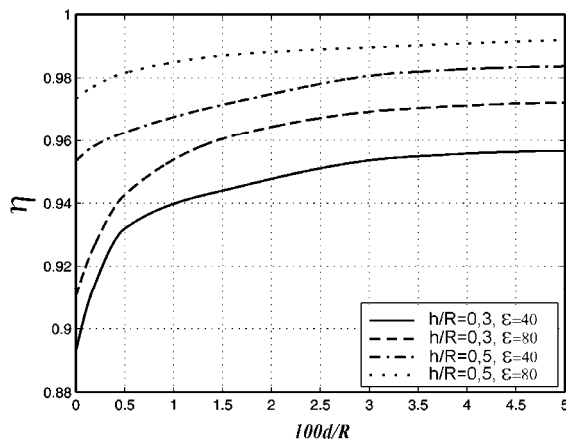
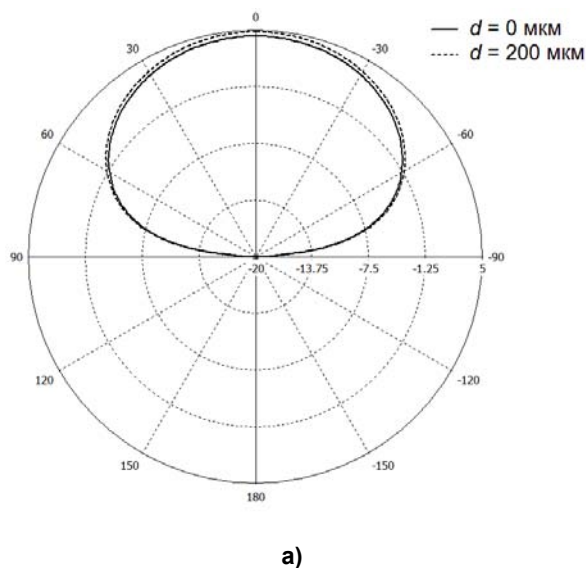
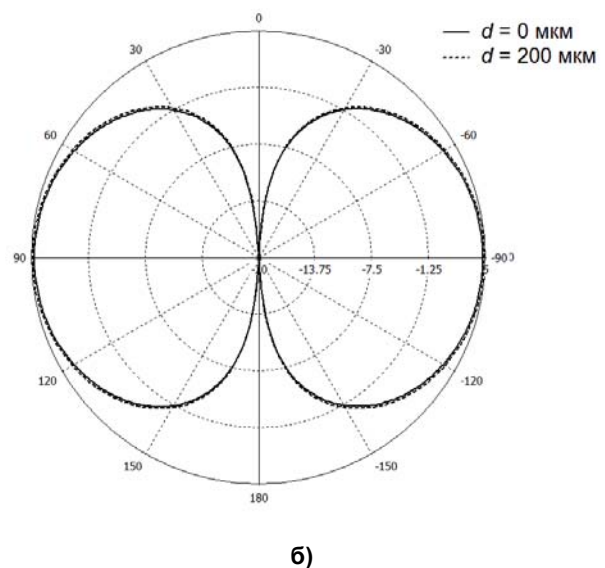


Рис. 6. Зависимость эффективности излучения антенны от нормированного расстояния между полуцилиндрами для диэлектрических проницаемостей материала ДР $\varepsilon = 40$, $\varepsilon = 80$ при $h/R = 0,3$ и $h/R = 0,5$



а)



б)

Рис. 7. Диаграммы направленности ДРА, возбужденной волноводом в а) E_θ при $\varphi = 0$ б) E_φ при $\theta = \pi/2$

Следует отметить, что характеристики, приведенные на рис. 5., рис. 6. и рис. 7, практически одинаково для обеих конструкций.

Выводы

Предложен метод микромеханической перестройки полосы рабочих частот диэлектрической резонансной антенны, преимуществом которого является широкий диапазон перестройки полосы - до 30% и увеличение КПД антенны за счет роста эффективности излучения до 6%.

Изменение эффективности излучения влечет за собой изменение коэффициента усиления и КПД антенны, т.к. они связаны прямо пропорциональной зависимостью.

По определению ДРА относятся к классу широконаправленных антенн. Предложенные в данной статье конструкции ДРА не являются исключением. Нормированные диаграммы направленности обеих конструкций антенн имеют одинаковую широконаправленную форму, с углом раскрытия главного лепестка близким к 90° на уровне 0,707. Сужение диаграммы направленности в направлении главного лепестка возможно за счет использования систем связанных ДР.

На рис. 7 приведены диаграммы направленности ДРА без внесения и с внесением воздушной неоднородности. Внесение воздушного зазора увеличивает коэффициент усиления антенны не изменяя форму ДН, из чего можно сделать вывод, что предложенный метод перестройки не влияет на форму поля в дальней зоне антенны.

С целью получения характеристик, необходимых при проектировании антенн, были исследованы две конструкции ДРА, возбуждаемые волноводом в режиме стоячей и бегущей волны. Характеристики антенн практически одинаковы для обеих конструкций. Коэффициент усиления антенн изменяется прямо пропорционально росту эффективности излучения. Диаграммы направленности являются широконаправленными, а внесение воздушного зазора не приводит к изменению их формы. Однако,

ДРА, запитываемая волноводом в режиме бегущей волны, имеет преимущество в том, что в конструкции может быть размещена система связанных ДР, которая позволит расширить полосу рабочих частот и получить более узкую ДН.

Проведены исследования влияния геометрических размеров и электрофизических параметров резонатора на эффективность перестройки рабочей полосы частот. Из зависимостей можно сделать вывод, что эффективность перестройки частот растет с увеличением соотношения геометрических размеров h/R и диэлектрической проницаемости материала ДР. Однако, выбирая материал ДР, нужно найти компромисс между его размерами и диэлектрической проницаемостью, для поддержания баланса между эффективностью перестройки и эффективностью излучения ДРА.

Благодаря высокой эффективности перестройки предложенного метода, малые изменения величины воздушного зазора (десятки, сотни микрометров) могут достигаться за счет электромеханической перестройки при помощи пьезоэлектрических актюаторов или микроэлектромеханических систем (МЭМС), что позволит непрерывно перестраивать полосу рабочих частот антенны в процессе работы.

Список использованных источников

1. *Kwai-Man Luk, Kwok-Wa Leung* Dielectric Resonator Antenna. - England, Baldock, Research Studies Press Ltd., 2003. 388 p.
2. *K. W. Leung and K. K. So* Frequency-tunable designs of the linearly and circularly polarized dielectric resonator antennas using a parasitic slot.// IEEE Transactions Antennas and Propagation Society, 2005, vol. 53, pp. 572–576.
3. *Z. Li, C. Wu and J. Litva*, Adjustable frequency dielectric resonator antenna. // Electronics Letters. Mar. 1996. Vol. 32. PP. 606–607.
4. *Z. N. Chen, K.W. Leung, K. M. Luk, and E. K. N. Yung* Effect of parasitic disk on a coaxial probe-fed dielectric resonator antenna.// Microwave. Opt. Technol. Lett. Jun. 1997. Vol. 15. PP. 166–168.
5. *H.K. Ng and K.W. Leung* Frequency Tuning of the Dielectric Resonator Antenna Using a Loading Cap.// IEEE Transactions Antennas and Propagation Society, 2005, vol. 53, No. 3, pp. 1229–1232.
6. *C. X. Hao, K.W. Leung and X. Q. Sheng* Frequency-Tunable Differentially Fed Rectangular Dielectric Resonator Antennas.// IEEE Transactions Antennas and Propagation Society, 2011, vol. 10. pp. 884–887.
7. *George Drossos, Zhipeng Wu and Lionel E. Davis*. The air gap effect on a microstrip-coupled cylindrical dielectric resonator antenna.// Microwave and optical technology letters. Jan.1999. Vol 20. No 1, pp. 36 – 40.
8. *G.P. Junker, A.A. Kishk, A.W. Glisson and D.Kajfe*. Effect of air gap on optical dielectric resonator antenna operating in TM_{01} mode.// Electronics letters, Jan. 1994, Vol. 30, No. 2, pp. 97 – 98.
9. *Ю.М.Поплавко, В.И. Молчанов, В.М. Пашков, Ю. В. Прокопенко и др.* Перестраиваемые СВЧ-устройства с электромеханическим управлением.// Техника и приборы СВЧ. — 2009. — Вып.1. — С. 49 — 59.
10. *Трубин А.А.* Микроволновая антенна на основе линейной решетки связанных диэлектрических резонаторов в волноводе.// Вісник Національного технічного університету України «КПІ» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратуобудування. – 2009. - № 38, ст. 78 – 83.
11. *Poplavko Yu. M., Prokopenko Yu. V., Molchanov V. I., Dogan A.* Frequency-tunable microwave dielectric resonator.// IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, vol. 48, pp. 1020–1027.

Поступила в редакцию 26 декабря 2014 г.

УДК 621.396.677.75

А.О. Волошин, Н.О.Руда, Ю.В. Прокопенко, канд.техн.наук, **Ю.М. Поплавко**, д.-р.фіз.-мат.наук
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

Частотно-перестроювана циліндрична діелектрична резонансна антена, збуджена хвилеводом

В роботі запропоновано метод перебудови смуги робочих частот циліндричної діелектричної резонансної антени. В основі методу лежить мікромеханічна перебудова циліндричного

діелектричного резонатора, що складається з двох полуциліндрів, розділених повітряним зазором. Перевагами запропонованого методу є широкий діапазон перебудови і збільшення коефіцієнта корисної дії антени. Досліджено два типи конструкцій антен, збуджених хвилеводом в режимі стоячої і біжучої хвилі. Представлені основні характеристики антен. Проведено аналіз залежностей коефіцієнта відбиття, центральної робочої частоти і форми діаграми спрямованості від взаємного розташування частин циліндричного діелектричного резонатора. Досліджено вплив геометричних розмірів та електрофізичних параметрів резонатора на ефективність перебудови частоти, ефективність випромінювання і коефіцієнт посилення антени. Бібл. 11, рис. 7.

Ключові слова: діелектрична резонансна антена, циліндричний діелектричний резонатор, перестроювання частоти.

UDC 621.396.677.75

A. Voloshyn, N. Ruda, Yu. Prokopenko, Ph.D., Yu. Poplavko, Dr.Sc.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",

Peremogy, ave. 37, Kiev, 03056, Ukraine.

Frequency-tunable dielectric resonator antenna excited by waveguide

This paper presents a method of frequency-tuning a cylindrical dielectric resonant antenna. The basic of proposed method is micro electro-mechanical alteration of the composite cylindrical dielectric resonator. Advantages of the proposed method are the wide range of adjustments and increasing of the total efficiency of the antenna. Two types of antenna were investigated, the excited by waveguide in the standing and running wave mode. The basic antenna characteristics, and also analysis of dependencies of the reflection coefficient, central operating frequency and radiation pattern versus the relative position of components of the cylindrical dielectric resonator are presented. The influence of the geometric dimensions and electrical parameters of the resonator on the efficiency of frequency tuning, radiation efficiency and antenna gain are investigated. References 11, figures 7.

Keywords: dielectric resonator antenna, cylindrical dielectric resonator, frequency tuning.

References

1. Kwai-Man Luk, Kwok-Wa Leung (2003), "Dielectric Resonator Antenna". England, Baldock, Research Studies Press Ltd. P. 388.
2. K. W. Leung and K. K. So (2005), "Frequency-tunable designs of the linearly and circularly polarized dielectric resonator antennas using a parasitic slot". IEEE Transactions Antennas and Propagation Society. Vol. 53, pp. 572–576.
3. Z. Li, C. Wu and J. Litva (1996), "Adjustable frequency dielectric resonator antenna". Electronics Letters. Vol. 32, pp. 606–607.
4. Z. N. Chen, K.W. Leung, K. M. Luk, and E. K. N. Yung (1997), "Effect of parasitic disk on a coaxial probe-fed dielectric resonator antenna". Microwave Opt. Technol. Letters. Vol. 15, pp. 166–168.
5. H.K. Ng and K.W. Leung (2005), "Frequency Tuning of the Dielectric Resonator Antenna Using a Loading Cap". IEEE Transactions Antennas and Propagation Society. Vol. 53, no. 3, pp. 1229–1232.
6. C. X. Hao, K.W. Leung and X. Q. Sheng (2011), "Frequency-Tunable Differentially Fed Rectangular Dielectric Resonator Antennas". IEEE Transactions Antennas and Propagation Society. Vol. 10. pp. 884–887.
7. George Drossos, Zhipeng Wu and Lionel E. Davis (1999), "The air gap effect on a microstrip- coupled cylindrical dielectric resonator antenna". Microwave and optical technology letters. Vol 20, no 1, pp. 36 – 40.
8. G.P. Junker, A.A. Kishk, A.W. Glisson and D.Kajfe (1994), "Effect of air gap on optical dielectric resonator antenna operating in TM_{01} mode". Electronics letters. Vol. 30, no. 2, pp. 97 – 98.
9. Y. Poplavko, Y. Prokopenko, V. Molchanov, Y. Pashkov, oth. (2009), "Tunable microwave devices with electromechanical control". Microwave devices and engineering. Vol.1, pp. 49 — 59. (Rus.)
10. A. Trubin (2009), "Microwave antennas, based on dielectric resonators circular arrays". National Technical University of Ukraine "KPI" Journal – Radio Engineering. No 38, pp. 78 – 83. (Rus.)
11. Poplavko Yu. M., Prokopenko Yu. V., Molchanov V. I., Dogan A. (2001), "Frequency-tunable microwave dielectric resonator". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 48, pp. 1020-1027.