

УДК 621.37

ОГРАНИЧЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ПОЛОСЫ АНТЕНН НА РЕЗОНАТОРАХ ФАБРИ–ПЕРО

А.А. АХУМЯН, А.А. ГАСПАРЯН

Институт радиофизики и электроники НАН Армении, Аштарак

(Поступила в редакцию 22 марта 2011 г.)

На основе теории цепей рассмотрены частотно-амплитудные характеристики антенн на резонаторах Фабри-Перо. Показано, что к резонаторным антеннам применимы подходы, свойственные регенеративным усилителям. Получены выражения для предельно достижимой частотной полосы резонаторной антенны с согласующими цепями. Экспериментально подтверждено, что соответствующим выбором корректирующих, частично отражающих покрытий можно значительно расширить частотную полосу резонаторных антенн.

1. Введение

Востребованность малых, тонкопрофильных микроволновых антенн с высоким усилением в телекоммуникационных, радарных и сенсорных системах инициировала исследования в нетрадиционных для этой области направлениях. Наиболее перспективными оказались направленные излучатели на основе резонаторов Фабри–Перо (ФПР), образованных, как правило, металлическим отражателем и расположенной над ним на определенном расстоянии частично отражающей поверхности (ЧОП) [1,2]. Облучающая антенна может быть расположена как внутри резонансной полости, так и вне ее. Так как электродинамические характеристики ФПР антенн в основном зависят от свойств ЧОП, то были исследованы различные отражатели – фотонные кристаллы с запрещенной зоной [3,4], металлические сетки [5], метаматериалы [6,7] и частотно-селективные поверхности [8,9]. Основным недостатком этих антенн является узкополосность как следствие резонансного характера усиления. Основным путем преодоления этого недостатка является применение дополнительных ЧОП [10], корректирующих фазово-частотную характеристику отражателей. Однако в настоящее время нет единого подхода к синтезу полосно-расширяющих структур. В данной работе анализируются частотные характеристики ФПР антенн с точки зрения теории цепей.

2. Предельная полоса пропускания резонансной антенны ФПР

Усиление антенны на основе ФПР, схематически представленной на рис.1, определяется известным выражением [11]:

$$G = G_I G_e = G_I \frac{1 - R^2}{1 + R^2 - \cos\left(\Psi_R - \frac{4\pi}{c} f d \cos\theta\right)}, \quad (1)$$

где G_I – коэффициент усиления облучающей антенны, G_e – дополнительное усиление, обусловленное ФПР, R – модуль коэффициента отражения ЧОП, Ψ_R – фаза отражения, c – скорость света, f – частота, d – расстояние между металлическим отражателем и частично отражающим покрытием, θ – угол между направлением распространения и нормалью к поверхности антенны.

На резонансной частоте, определяемой из условия

$$\Psi_R - \frac{4\pi}{c} f_0 d \cos\theta = 2n\pi, \quad (2)$$

дополнительный коэффициент усиления по мощности составляет

$$G_e = \frac{1 + R}{1 - R}. \quad (3)$$

Для определения полосы пропускания резонаторной антенны воспользуемся известным из теории цепей [12] выражением для коэффициента усиления по напряжению $g(\omega)$ регенеративного усилителя:

$$g(\omega) = \frac{1}{|\rho(\omega)|}, \quad (4)$$

где $\rho(\omega)$ – коэффициент отражения резонансного контура антенны со стороны питающего волновода. Полоса пропускания однорезонаторной антенны имеет вид

$$\Delta f = \frac{2}{g_0 - 1} \frac{f_0}{Q}, \quad (5)$$

где g_0 – коэффициент усиления по напряжению на центральной частоте, Q – добротность резонансного контура антенны.

Используя выражение Эйри для добротности ФПР

$$Q = n\pi \frac{\sqrt{R}}{1 - R}, \quad (6)$$

из (3) и (5) получим выражение для полосы пропускания однорезонаторной ФПР антенны:

$$\Delta f_1 = \frac{2f_0}{n\pi} \frac{(1 - R)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{R}(\sqrt{1 + R} - \sqrt{1 - R})}. \quad (7)$$

Для основной моды $n = 1$ и достаточно большом усилении $R \approx 1$ получаем

$$\Delta f_1 \approx \frac{\sqrt{2}}{\pi} (1-R)^{\frac{3}{2}} f_0. \quad (8)$$

Из полученного выражения следует, что полоса пропускания однорезонаторной ФПР антенны составляет несколько процентов от центральной частоты, что неприемлемо для многих применений. Расширения полосы пропускания можно добиться, используя согласующие цепи в виде дополнительных частично отражающих поверхностей с соответствующими коэффициентами отражения и фазовыми расстояниями (рис.1). Для определения предельно достижимой полосы пропускания воспользуемся теоремой Боден-Фано [12,13], согласно которой для любой физически реализуемой согласующей цепи должно выполняться условие

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \ln \left| \frac{1}{\rho(\omega)} \right| d\omega \leq \frac{\omega_0}{Q}, \quad (9)$$

или из (4)

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \ln g(\omega) d\omega \leq \frac{\omega_0}{Q}. \quad (10)$$

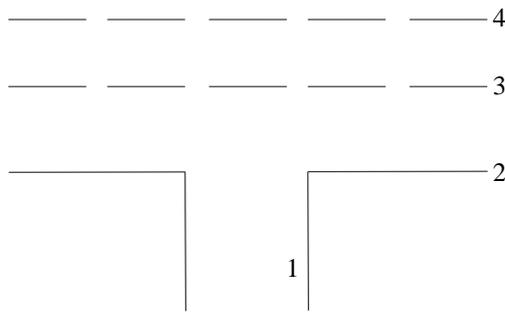


Рис.1. ФПР антенна. 1 – питающий волновод, 2 – металлический отражатель, 3 – ЧОП, 4 – корректирующий отражатель.

Идеальная прямоугольная частотная характеристика $g(\omega)$, удовлетворяющая условию (10), имеет вид $g(\omega) = g_0$ в пределах максимальной возможной полосы и $g=1$ вне ее. В этом случае, исходя из (3), (6) и (10), максимальная ширина полосы резонаторной антенны ФПР определяется выражением

$$\Delta f_{\infty} = 2 \frac{(1-R)}{\sqrt{R} \ln \left(\frac{1+R}{1-R} \right)} f_0. \quad (11)$$

Сравнивая показанные на рис.2 кривые, соответствующие (7) и (11), можно убедиться, что согласующая цепь позволяет существенно увеличить ширину частотной полосы ФПР антенны.

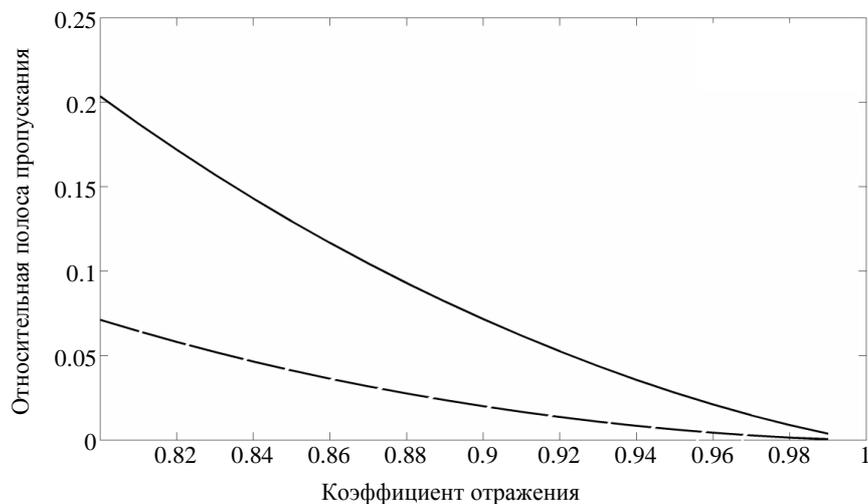


Рис.2. Зависимость частотной полосы ФПР антенны от коэффициента отражения ЧОП; штриховая кривая – полоса однорезонаторной антенны, сплошная кривая – полоса согласованной антенны.

3. Эксперимент

Структура экспериментальной ФПР антенны схематически представлена на рис.1. Источником облучения антенны является стандартный прямоугольный волновод K_u диапазона, с алюминиевым фланцем с размерами 100(60 мм, являющимся металлическим зеркалом резонатора. В качестве ЧОП выбрана трехслойная диэлектрическая фотонная структура с запрещенной зоной в полосе пропускания антенны. Эта структура, состоящая из двух четвертьволновых слоев из поликорунда с размерами 60x40x1 мм, диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10$ и одного промежуточного четвертьволнового тефлонового слоя с $\epsilon = 2.2$, обеспечивает коэффициент отражения $R = 0.92$ в частотном интервале 18–26 ГГц, что, согласно (3), соответствует $G_e = 25$. ЧОП расположена на расстоянии $d = 7.4$ мм от поверхности металлического зеркала, соответствующего, согласно (2), резонансной частоте $f = 20.3$ ГГц. На рис.3 приведена частотная зависимость нормированного коэффициента усиления в направлении нормали к поверхности антенны. Полоса пропускания антенны на уровне -3 дБ составляет 250 МГц и находится в хорошем согласии с (7). В качестве полосорасширяющей согласующей цепи использовалась полуволновая пластина из поликорунда толщиной 1.75 мм, соответствующей резонансной частоте 27.1 ГГц и расположенной на расстоянии 7.6 мм от ЧОП. Как видно из рис.3, применение согласующего дополнительного покрытия приводит к расширению полосы

пропускания более чем в 4 раза, в полном соответствии с (11). Полосу пропускания можно несколько увеличить, применяя несколько согласующих секций, однако при этом возрастут потери, что приведет к нежелательному падению коэффициента усиления.

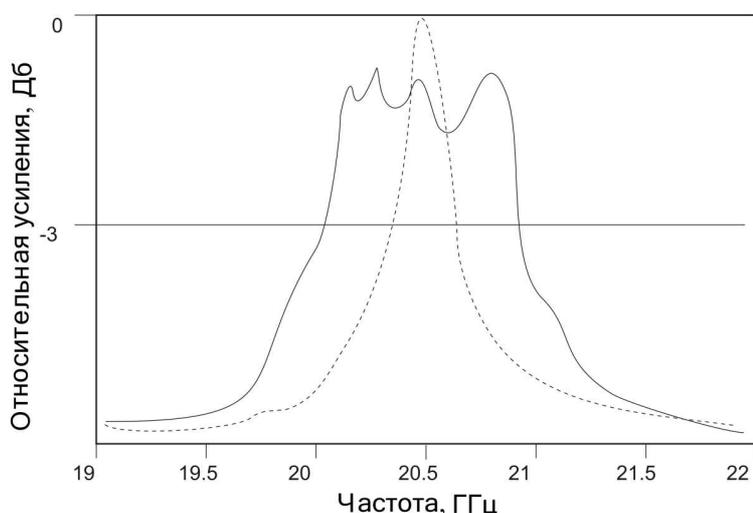


Рис.3. Амплитудно-частотная характеристика разработанной ФПР антенны; штриховая кривая – без согласующего отражателя, сплошная кривая – с согласующим отражателем.

Таким образом, экспериментальные результаты полностью согласуются с полученными из теории цепей соотношениями, что позволяет применить хорошо разработанные методы синтеза согласующих цепей к задачам расширения частотной полосы резонаторных антенн.

Авторы благодарны Н.Г. Погосяну и В.Р. Тадевосяну за помощь при моделировании и измерении параметров антенн. Работа выполнена в рамках программы базового финансирования Комитета по науке Министерства образования и науки РА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A.Feresidis, J.Vardaxoglou.** Proc. IEEE Microwaves, Antennas and Propagation, **148**, 345 (2001).
2. **M.Thevenot, C.Cheype, A.Reinex, B.Jecko.** IEEE Trans. Microw. Theory Tech., **47**, 2115 (1999).
3. **B.Temelkuran, M.Bayindir, E.Ozbay, R.Biswas, M.Sigalas, G.Tuttle, K.Ho.** J. Appl. Phys., **87**, 603 (2000).
4. **A.R.Weily, L.Horvath, K.P.Esselle, B.C.Sanders, T.S.Bird.** IEEE Trans. Antennas Propag., **53**, 216 (2005).
5. **N.Guerin, S.Enoch, G.Tayeb, P.Sabaouroux, P.Vincent, H.Legay.** IEEE Trans. Antennas Propag., **54**, 220 (2006).
6. **S.Enoch, G.Tayeb, P.Sabaouroux, N.Guerin, P.Vincent.** Phys. Rev. Lett., **89**, 213902-1 (2002).

7. **A.Ouir, A. de Lustrac, J-M.Lourtioz.** Appl. Phys. Lett., **88**, 084103 (2006).
8. **F.Costa, S.Genovesi, A.Monorchio.** IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., **8**, 1341 (2009).
9. **D.Kim, J.I.Choi.** PIER Lett., **7**, 59 (2009).
10. **Zhen-guo Liu.** J. Infrared Mili. Terahz Waves, **31**, 391 (2010).
11. **G.V.Trentini.** IRE Trans. Antennas Propag., **AP-4**, 666 (1956).
12. **H.W.Bode.** Network Analysis and Feedback Amplifier Design, Van Nostrand, New York, 1945.
13. **R.M.Fano.** J. Franklin Institute, 249, 57 (1950); 139 (1950).

ՖԱԲՐԻ-ՊԵՐՈՒ ՌԵԶՈՆԱՏՈՐԱՅԻՆ ԱԼԵԶԱՎԱՔՆԵՐԻ
ՀԱՃԱԽԱԿԱՆ ՇԵՐՏԻ ՍԱՀԱՄԱՆԱՓԱԿՈՒՄԸ

Ա.Ա. ՀԱԽՈՒՄՅԱՆ, Ա.Ա.ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ

Շղթաների տեսության տեսակետից քննարկված են Ֆաբրի-Պերո ռեզոնատորային ալեհավաքների հաճախական-լայնության հատկությունները: Ցույց է տրված, որ ռեզոնատորային ալեհավաքներում կիրառելի են ռեզոնատորային ուժեղարարներին բնորոշ մոտեցումները: Համաձայնեցնող շղթաներով ալեհավաքների համար ստացված են առավել հասանելի հաճախական շերտի արտահայտություններ: Փորձնականորեն հաստատված է, որ հաճախական շերտը կարելի է զգալի լայնացնել՝ օգտագործելով ճիշտ ընտրված լրացուցիչ մասնակի անդրադարձնող ծածկույթներ:

BANDWIDTH LIMITATION OF THE FABRY-PEROT CAVITY ANTENNAS

A.A. HAKHOUMIAN, A.A. GASPARYAN

The bandwidth behavior of the Fabry-Perot cavity antennas are considered on the basis of circuit theory. It is shown that the approaches of regenerative amplifier are applicable to resonator antenna. The equations for bandwidth limitation of the matched resonator antennas are obtained. It is experimentally confirmed that bandwidth of the Fabry-Perot cavity antennas can be significantly enlarged by using properly selected partially reflective additional superstrates.