

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.01.016

非均匀覆盖层谐振腔天线设计

冯攀¹, 陈星¹, 周永宏^{1,2}, 徐可¹

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610065; 2. 西华师范大学电子信息学院, 南充 637002)

摘要: 提出了一种非均匀覆盖层谐振腔天线设计方法. 通过构造反射系数幅值随天线口径面位置变化的函数来实现谐振腔天线覆盖层的非均匀化. 使用金属化过孔作为周期结构覆盖层的谐振单元, 分别设计出满足反射系数变化的变谐振单元长度和变过孔直径的两种非均匀覆盖层谐振腔天线. 它们的阻抗特性、方向图和增益, 同具有等反射系数变化规律的非均匀介质覆盖层谐振腔天线一致. 结果表明, 覆盖层的反射系数变化规律是非均匀覆盖层谐振腔天线的决定因素. 设计出的两种非均匀覆盖层谐振腔天线实测 $|S_{11}| < -10$ dB 阻抗带宽均大于 8%, 增益均大于 18 dBi, 同时在阻抗带宽内增益相比峰值增益下降均小于 1.5 dB.

关键词: 谐振腔天线; 非均匀; 覆盖层; 天线设计

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)01-0099-06

Non-uniform superstrate resonant cavity antenna design

FENG Pan¹, CHEN Xing¹, ZHOU Yong-Hong^{1,2}, XU Ke¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Electronic Information Engineering, China West Normal University, Nanchong 637002, China)

Abstract: A novel non-uniform superstrate resonant cavity antenna (RCA) design method was proposed. The non-uniform superstrate was constructed by changing the reflection coefficient at different location of the aperture. The values of the reflection coefficients were determined by a given function. Metallic via was chosen as the unit of superstrate, whose reflection coefficient can be determined by changing via diameters or by changing unit length between vias. According these two ways, two kinds of non-uniform superstrate RCAs were designed, both followed the same reflection coefficient function. The performances of two kinds of antennas were very similar, and both satisfy the results forecasted by the reflection coefficient function. The results indicated that reflection coefficient characteristic was the important impact factor for non-uniform superstrate RCA. Two prototype antennas were fabricated and measured. The measured $|S_{11}| < -10$ dB impedance bandwidth and gain of the two antennas were both greater than 8% and 18 dBi, respectively. The gain only dropped within 1.5 dB from the peak gain in the impedance bandwidth.

Keywords: Resonant cavity antenna; Non-uniform; Superstrate; Antenna design

1 引言

高增益、窄波束天线在雷达, 通讯和微波输能

等领域有着重要的应用需求^[1]. 在馈源天线辐射前端加载一层具有一定反射系数的覆盖层, 使得馈源天线辐射的电磁波在覆盖层和反射地之间来回反

收稿日期: 2017-10-08

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金-NSAF 基金[U1230112]

作者简介: 冯攀(1987-), 男, 四川广元人, 博士生, 研究方向为天线理论与设计.

通讯作者: 陈星. E-mail: xingc@263.net

射,在天线口径面上形成同相面,从而提高天线增益,压窄天线波束.这类天线叫做谐振腔天线(Resonant Cavity Antenna, RCA)^[2],它以其增益高,无功分损耗等优点,得到国内外研究者的广泛研究和应用^[3].

目前,谐振腔天线的覆盖层大多采用均匀的结构.均匀介质板^[4]是最常见的一种类型.另一种常见的均匀结构是周期单元结构,包括频率选择表面^[5](Frequency Selective Surface, FSS)、电磁带隙材料^[6](Electromagnetic Band Gap, EBG)、人工磁导体^[7](Artificial Magnetic Conductor, AMC)、高阻表面^[8](High Impedance Surface, HIS)和零折射率材料^[9](Zero-index Material, ZIM)等.使用这些材料作为覆盖层,要得到较高增益,通常要设计它们的反射系数幅值为较高值,但同时会导致天线的阻抗带宽比较窄,口径效率不高,等不利影响.

非均匀覆盖层设计是解决谐振腔天线高增益与阻抗带宽窄,口径效率不高相矛盾的一种有效技术^[10].按照一定的方式改变覆盖层上的周期单元结构,使得天线谐振的品质因数减小,从而增加阻抗带宽^[11];同时使得天线口径面上口径场的相位和幅度分布更加均匀,从而提高口径效率^[12].结合计算机遗传算法(Genetic Algorithm, GA)进行优化^[13],可设计出性能更佳的谐振腔天线.但是不同的非均匀覆盖层设计,有着不同的指导方法,没有统一的解释;对于非均匀设计中的关键决定性因素没有明确的论证.本文针对此问题,通过实验揭示了反射系数的变化为非均匀覆盖层谐振腔天线的决定性因素.同时本论文据此设计的两种非均匀谐振腔天线达到良好的技术指标,可用于多种应用需求.

2 谐振腔天线工作原理

如图 1 所示,谐振腔天线由馈源天线、反射地和覆盖层三部分构成.由馈源天线 P 发出的电磁波遇到覆盖层后,一部分透射过覆盖层,另一部分则反射回去,经过反射地的再次反射又与覆盖层发生相同的作用.对于边射谐振腔天线,即 $\theta=0$ 时,且覆盖层和反射地之间的距离 H 满足下式^[2].

$$H = \frac{\lambda}{4\pi} (\varphi_R + \varphi_G + 2n\pi) \quad (1)$$

其中, λ 是电磁波在自由空间中的波长; φ_R 是覆盖层反射相位; φ_G 是反射地的反射相位, $n=1, 2, 3,$

… . 电磁波在覆盖层和反射地之间的谐振腔内来回反射振荡后,在天线口径面上形成等相位面,从而提高增益.相比于馈源天线的增益,满足谐振条件的谐振腔天线的增益提高量 ΔD 如下式^[2].

$$\Delta D = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2)$$

其中, $|\Gamma|$ 表示覆盖层的反射系数幅值.

由式(2)可知,要得到较高的增益,则需要覆盖层的反射系数幅值相应的增大.反射系数幅值的增大,意味着覆盖层反射的能量越多,越多的能量在覆盖层和反射地之间震荡,会使得天线的品质因数增大,进而导致天线的阻抗带宽降低.因此单纯地为获得较高的增益而提高覆盖层反射系数幅值,会以牺牲天线带宽为代价.

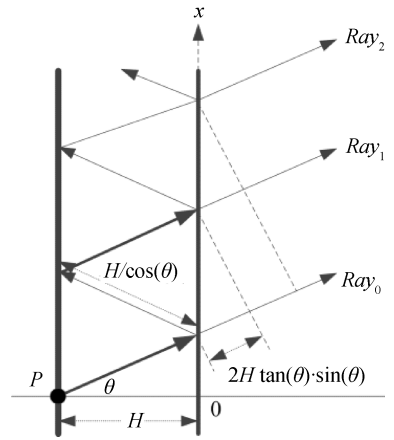


图 1 谐振腔天线工作原理图
Fig. 1 Demonstration of the RCA

3 非均匀覆盖层谐振腔天线设计

3.1 非均匀反射系数

从结构上看,非均匀覆盖层表现为周期性单元结构的变化性.从与电磁波作用方面看,非均匀性则表现为反射系数的大小变化.由于电磁波在覆盖层和反射地之间是边振荡边辐射的,因此在口径面上越远离辐射方向的位置,剩余的能量越少.为了能使口径面上的能量尽量均匀的分布以提高口径面的利用率,应该让覆盖层的反射系数由辐射方向位置向边缘部分逐渐递减.

对于边射谐振腔天线,天线的辐射方向为垂直于口径面方向.定义覆盖层的反射系数幅值在口径面上的位置关系如下式所示.

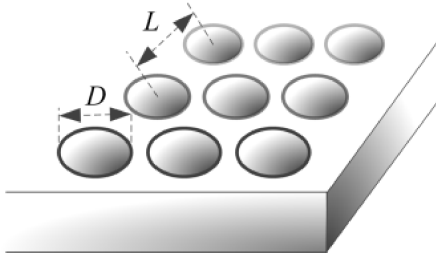
$$|\Gamma| = a - b|x|^c \quad (3)$$

其中, a 表示覆盖层中心位置的反射系数幅值;系数 b 和指数 c 不同的组合时,可以得到不同的反射

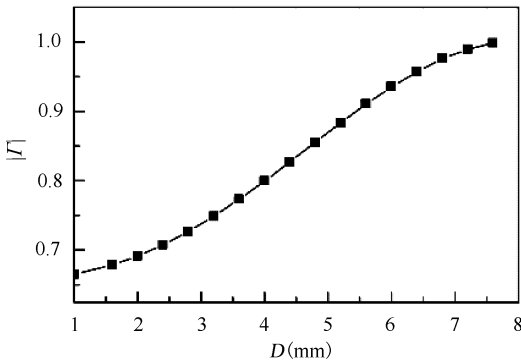
系数变化情况,能代表大部分非均匀变化的设计.

3.2 非均匀覆盖层周期单元

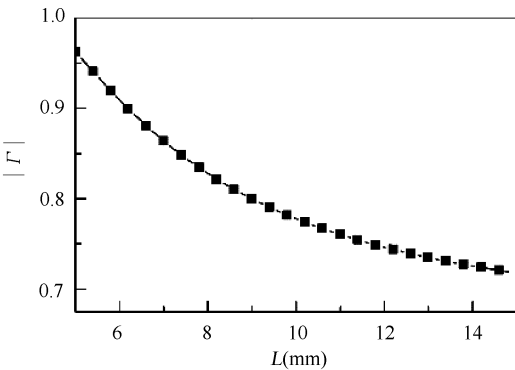
通过改变周期单元的结构尺寸,可以获得不同的反射系数.如图 2(a)所示,本文采用金属化过孔作为覆盖层的周期单元.其具有结构简单易加工,开孔会使得天线质量减小的优点.



(a)



(b)



(c)

图 2 覆盖层周期结构单元

- (a) 金属化过孔; (b) 反射系数幅值随直径的变化;
- (c) 反射系数幅值随单元谐振长度的变化

Fig. 2 Unit cells in the superstrate

- (a) The metallic holes; (b) The magnitude of reflection coefficient varied with diameter ; (c) The magnitude of reflection coefficient varied with the unit cell's length

在开孔加工能力满足的情况下,为获得较高的反射系数幅值,选用厚度为 1 mm,相对介电常数为 15.9 的介质板进行设计.使用 CST MWS 全波仿真软件,通过 Floquet 方法^[14]计算得到周期金属化过孔结构参数与反射系数幅值关系如图 2 (b)

和(c)所示.它们分别表示反射系数幅值与金属化过孔直径和谐振单元长度之间的关系.数据结果表明随着金属化过孔直径和周期单元的谐振长度的分别变化,可以得到的反射系数幅值的动态变化范围从 0.7~1.0,满足较高增益的谐振腔天线设计需求.

3.3 非均匀覆盖层设计

根据式(3),设计覆盖层中心反射系数幅值 a 为 0.9,系数 b 为 0.1,指数 c 为 2 时,天线口径面大小为 3.1λ 时,加载具有该非均匀反射系数特征的覆盖层谐振腔天线,其阻抗带宽、增益和口径效率能够得到很好的综合平衡.从 3.2 小节中的周期单元与反射系数变化的关系中,可以看出,当介质板固定不变后,周期单元的反射系数变化由两个维度决定,即周期单元谐振长度和金属化过孔直径.因此,从这两个维度进行设计,可以得到反射系数变化相同,而结构不同的两种非均匀覆盖层.

3.3.1 金属化过孔直径变化 固定周期单元谐振长度为 9 mm,通过改变金属化过孔直径而改变反射系数幅值大小.根据式(3)及图 2(b)的数据,计算出进行周期组阵时,每个周期单元对应的金属化过孔口径位置、直径大小和反射系数幅值及其等厚介质板的等效相对介电常数,数据结果如表 1 所示.

表 1 金属化过孔直径变化的覆盖层参数

Tab. 1 The parameters of superstrate with varied metallic holes

单元 编号	位置 x (mm)	过孔直径 D (mm)	$ \Gamma $	等效相对介电常数
0	0	5.38	0.9	38.43
1	9	5.34	0.897	37.72
2	18	5.24	0.888	35.75
3	27	4.99	0.873	32.96
4	36	4.71	0.852	29.81
5	45	4.37	0.824	26.61
6	54	3.92	0.791	23.57
7	63	3.29	0.752	20.75
8	72	2.32	0.706	18.18

3.3.2 周期单元谐振长度变化 固定金属化过孔直径为 4 mm,通过改变周期单元谐振长度而改变反射系数幅值大小.同样根据式(3)及图 2(c)的数据,通过数值迭代计算出进行周期组阵时,每个周期单元的口径位置、谐振长度和其对应位置的反射系数幅值及其等厚介质板的等效相对介电常数,数

据结果如表 2 所示.

表 2 周期单元谐振长度变化的覆盖层参数

Tab. 2 The parameters of superstrate with varied length of unit cells

单元编号	位置 x (mm)	谐振长度 L (mm)	$ \Gamma $	等效相对介电常数
0	0	6.18	0.9	38.43
1	6.19	6.21	0.898	38.09
2	12.45	6.3	0.894	37.09
3	18.84	6.47	0.887	35.52
4	25.43	6.72	0.876	33.49
5	32.33	7.08	0.861	31.12
6	39.67	7.61	0.841	28.49
7	47.69	8.43	0.815	25.68
8	56.86	9.9	0.779	22.65
9	69.03	14.43	0.722	19

3.4 非均匀覆盖层谐振腔天线

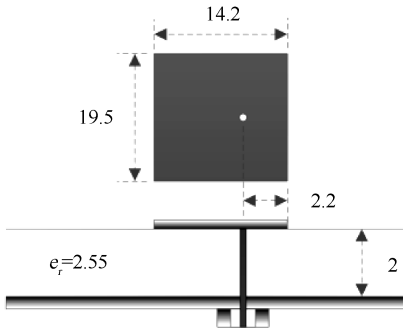


图 3 馈源天线结构图

Fig. 3 Configuration of radiation element antenna

设计矩形微带贴片天线作为馈源天线,使其工作在 5.8 GHz 频点附近,其结构如图 3 所示(单位: mm). 根据表 1 和表 2 中的非均匀覆盖层结构参数,建立天线轮廓为圆形的模型如图 4 所示. 天线 A 和天线 C 的覆盖层,从中心向边缘按照编号依次对应每个周期结构单元. 其覆盖层结构上以中心对称,虚线三角形区域为基本的 1/8 结构,其他部分由此对称得到. 天线 A 使用的是金属化过孔直径变化的覆盖层,其相应位置用具有相同反射系数的等厚介质板替代而成的覆盖层加载于天线 B. 天线 C 使用的是周期单元谐振长度变化的覆盖层,其相应位置用具有相同反射系数的等厚介质板替代而成的覆盖层加载于天线 D. 最后根据式(1)及覆盖层中心位置反射系数的相位计算天线的谐振高度,并适当小幅调整,固定 4 个天线的谐振高度均为 26.8 mm. 此时天线的各项性能指标得到综合平衡.

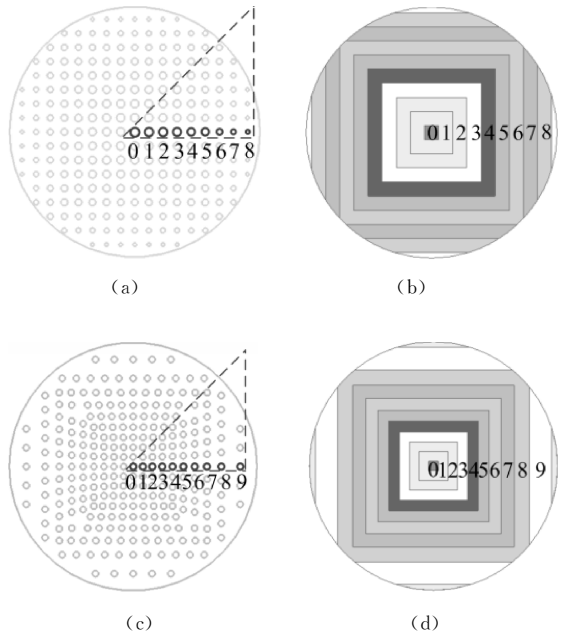


图 4 非均匀覆盖层谐振腔天线结构图

(a) 天线 A; (b) 天线 B; (c) 天线 C; (d) 天线 D

Fig. 4 Configurations of non-uniform superstrate RCAs

(a) the antenna A; (b) the antenna B; (c) the antenna C; (d) the antenna D

4 实验测试

对于以上设计的 4 个非均匀覆盖层谐振腔天线,加工制作天线 A 和天线 C,其实物模型如图 5 所示. 两个实物天线的实测 $|S_{11}|$ 参数与四个天线的仿真结果对比如图 6 所示. 数据对比显示,实测与仿真的 $|S_{11}|$ 参数曲线形态一致,实测频带范围向高频方向有所偏移,但带宽基本相同,这主要是由于材料介电常数偏差、分布不均匀和加工制作的误差造成的. 整体上对比实测与仿真 $|S_{11}|$ 数据结果仍然较吻合.

实测与仿真方向图结果对比如图 7 所示,从图 7 可以看出,其结果数据吻合很好. 仿真的增益曲线对比如图 8 所示,它们的变化趋势和数值基本一致. 统计所有天线仿真和实测数据的主要性能参数列于表 3 中. 实测增益较仿真偏低,这主要是由于覆盖层介电常数很高,其损耗较大造成的. 整体上看天线实测与仿真数据相符合. 两款实物非均匀谐振腔天线实测 $|S_{11}| < -10$ dB 带宽均大于 8%. 实测增益大于 18 dBi,在阻抗带宽内增益相比峰值增益下降均小于 1.5 dB,可满足多种应用需求. 结果表明具有相同反射系数变化的不同结构覆盖层谐振腔天线性能一致,说明在非均匀覆盖层谐振腔天线设计中反射系数变化规律起着决定作用.

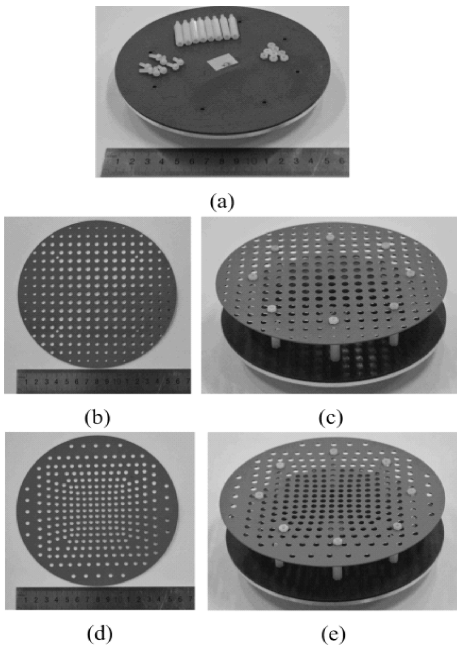


图 5 实物天线

(a) 馈源天线; (b) 天线 A 的覆盖层;
 (c) 天线 A; (d) 天线 C 的覆盖层; (e) 天线 C

Fig. 5 The prototype of RCAs
 (a) The radiation element antenna; (b) The superstrate for RCA A; (c) The RCA A; (d) The superstrate for RCA C; (e) The RCA C

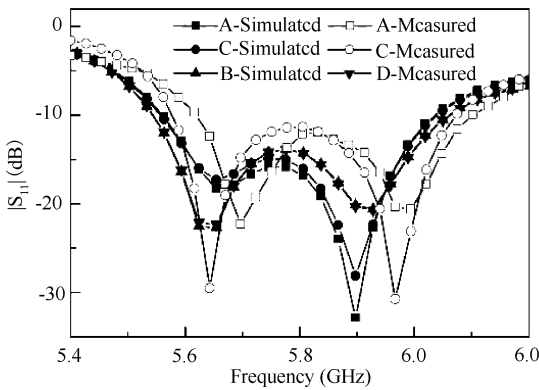
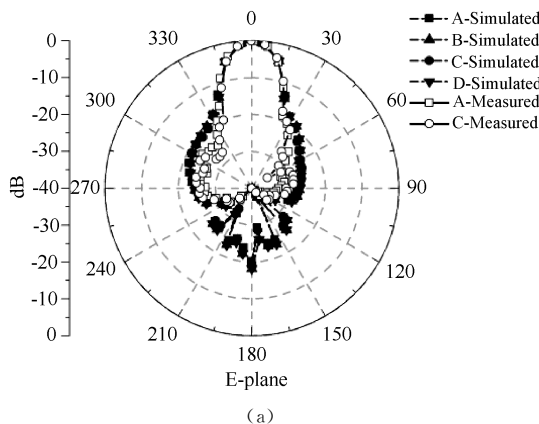
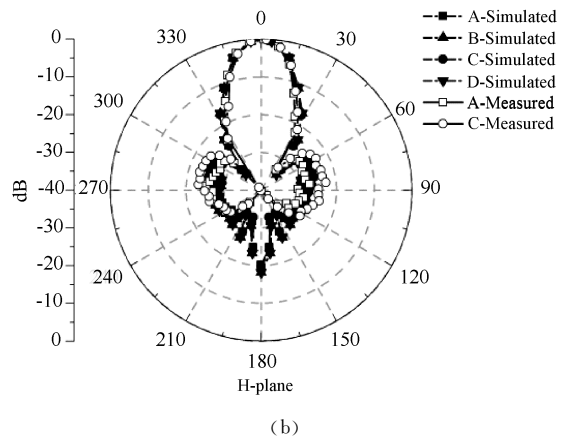


图 6 实测和仿真的 $|S_{11}|$ 参数

Fig. 6 Measured and simulated results of $|S_{11}|$



(a)



(b)

图 7 实测和仿真 5.8 GHz 方向图

(a) E 面; (b) H 面

Fig. 7 Measured and simulated 5.8 GHz pattern
 (a) E plane; (b) H plane

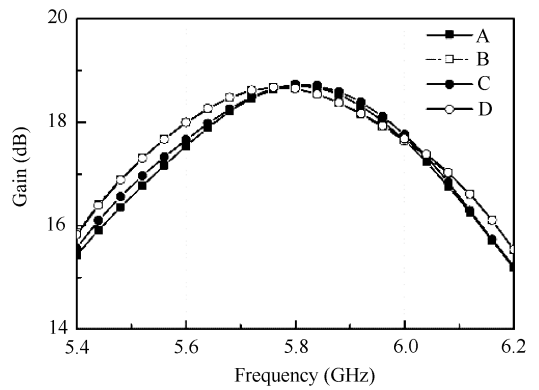


图 8 仿真增益曲线

Fig. 8 Simulated gains vs. frequency

表 3 天线性能参数

Tab. 3 Performances of the antennas

天线	带宽 (%)	增益 (dBi)	旁瓣 (dB)
A	8.28	18.71	-20
B	8.97	18.65	-18.1
C	8.28	18.73	-18.4
D	8.97	18.65	-18.1
实物 A	8.19	18.02	-23.8
实物 C	8.41	18.04	-22.9

5 结论

本文通过构造反射系数随口径变化的函数来设计非均匀覆盖层. 从金属化过孔的直径和谐振长度两个维度上构造不同的非均匀变化结构. 天线实测结果与仿真较吻合, 结果表明具有相同反射系数变化的不同结构覆盖层谐振腔天线的性能一样, 说明在非均匀覆盖层谐振腔天线设计中反射系数变化规律起着决定性作用.

参考文献:

- [1] Abdelghani M, Attia H, Denidni T A. Dual-and wide-band fabry-pérot resonator antenna for WLAN applications [J]. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2016, 16: 473.
- [2] Trentini G V. Partially reflecting sheet arrays [J]. *IRE Trans Antenn Propag*, 1956, 4: 666.
- [3] 刘震国, 葛志晨. Fabry-Perot 谐振天线研究综述 [J]. *现代雷达*, 2009, 31: 70.
- [4] Guha D, Siddiqui J Y. Resonant frequency of circular microstrip antenna covered with dielectric superstrate [J]. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2003, 51: 1649.
- [5] Hosseini A, Capolino F, Flaviis F D. Gain enhancement of a v-band antenna using a fabry-pérot cavity with a self-sustained all-metal cap with FSS [J]. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2015, 63: 909.
- [6] Hashmi R M, Esselle K P. A wideband EBG resonator antenna with an extremely small footprint area [J]. *Microw Opt Techn Let*, 2015, 57: 2228.
- [7] Sun Y, Chen Z N, Zhang Y, *et al*. Subwavelength substrate-integrated fabry-pérot cavity antennas using artificial magnetic conductor [J]. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2012, 60: 30.
- [8] Garcia-Vigueras M, Gomez-Tornero J L, Goussetis G, *et al*. Efficient synthesis of 1-D fabry-perot antennas with low sidelobe levels [J]. *IEEE Antenn Wirel Pr*, 2012, 11: 869.
- [9] Turpin J P, Wu Q, Werner D H, *et al*. Near-Zero-Index metamaterial lens combined with AMC metasurface for high-directivity low-profile antennas [J]. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2014, 62: 1928.
- [10] Li Y, Mittra R, Zeng B, *et al*. Directivity enhancement of fabry-perot antenna by using a stepped-dielectric slab superstrate [J]. *Microw Opt Techn Let* 2012, 54: 711.
- [11] Liu Z G, Zhang W X, Fu D L, *et al*. Broadband fabry-perot resonator printed antennas using FSS superstrate with dissimilar size [J]. *Microw Opt Techn Let*, 2010, 50: 1623.
- [12] Weily A R, Esselle K P, Sers B C, *et al*. High-Gain 1D EBG resonator antenna [J]. *Microw Opt Techn Let*, 2010, 47:107.
- [13] Kim D, Ju J, Choi J. A mobile communication base station antenna using a genetic algorithm based fabry-pérot resonance optimization [J]. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2012, 60: 1053.
- [14] Zhang L, Wan X, Liu S, *et al*. Realization of low scattering for a high-gain fabry-perot antenna using coding metasurface [J]. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2017, 65: 3374.