Journal of System Simulation

Volume 27 | Issue 2

Article 9

9-2-2020

Design of Micro-strip Antenna Based on Step-like Electromagnetic Band-gap Structure to Improve Bandwidth and Gain

Zhigang Xiao Physics and Electron Communication Department of Leshan Normal University, Leshan 614004, China;

Jiang Yao Physics and Electron Communication Department of Leshan Normal University, Leshan 614004, China;

Shaoquan Yin Physics and Electron Communication Department of Leshan Normal University, Leshan 614004, China;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design of Micro-strip Antenna Based on Step-like Electromagnetic Band-gap Structure to Improve Bandwidth and Gain

Abstract

Abstract: Design of a micro-strip antenna based on electromagnetic band-gap structure can significantly improve the bandwidth and gain of the antenna. *EBG structure is used to suppress the surface wave propagation and increase the radiation gain of the antenna. At the same time, the antenna substrate thickness increase is beneficial to expand the bandwidth of the antenna.* According to the actual need, the EBG and the antenna can use diffident substrate. The method can replace the traditional choke ring antenna and significantly reduce the antenna size without sacrificing the performance of the antenna.

Keywords

electromagnetic band-gap (EBG), micro-strip antenna, choke ring antenna, metallic grid

Recommended Citation

Xiao Zhigang, Jiang Yao, Yin Shaoquan. Design of Micro-strip Antenna Based on Step-like Electromagnetic Band-gap Structure to Improve Bandwidth and Gain[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 279-285.

第 27 卷第 2 期
2015年2月

改善带宽和增益的阶梯状EBG结构微带天线设计

肖志刚,蒋瑶,尹绍全

(乐山师范学院物理与电子信息工程学院, 乐山 614004)

摘要:设计了一种基于电磁带隙结构(Electromagnetic band-gap, EBG)的微带天线,可显著改善天线 带宽和增益。*EBG 结构用于抑制表面波传播,增加微带天线辐射增益; 天线基板厚度的增加有益 于拓展工作带宽。根据实际需要,EBG 结构和天线可以不共用衬底基板。*该方法可代替传统扼流 环天线,在不牺牲天线性能的前提下,能显著缩减天线体积,在通信领域有潜在的利用价值。 关键词: 电磁带隙结构; 微带天线; 扼流环天线; 金属网格 中图分类号: TN45 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 02-0279-07

Design of Micro-strip Antenna Based on Step-like Electromagnetic Band-gap Structure to Improve Bandwidth and Gain

Xiao Zhigang, Jiang Yao, Yin Shaoquan (Physics and Electron Communication Department of Leshan Normal University, Leshan 614004, China)

Abstract: Design of a micro-strip antenna based on electromagnetic band-gap structure can significantly improve the bandwidth and gain of the antenna. *EBG structure is used to suppress the surface wave propagation and increase the radiation gain of the antenna. At the same time, the antenna substrate thickness increase is beneficial to expand the bandwidth of the antenna. According to the actual need, the EBG and the antenna can use diffident substrate. The method can replace the traditional choke ring antenna and significantly reduce the antenna size without sacrificing the performance of the antenna. Keywords: electromagnetic band-gap (EBG); micro-strip antenna; choke ring antenna; metallic grid*

Keywords: electromagnetic band-gap (EBG); micro-strip antenna; cnoke ring antenna; met

引言

传统扼流环天线的环结构具有抑制表面波传 播的作用^[1-3],以改善天线性能。但扼流环的高度 为λ/4<d<λ/2,这里λ为表面波工作波长。因此, 在需要减小天线高度的场景下,扼流环结构的缺点 是显而易见的。应用 EBG 结构的表面波禁带特性 也可以改善天线性能^[4]。用于普通微带天线的设 计,EBG 结构可以改善天线辐射增益;用于反射 腔式天线设计,如背腔式阿基米德螺旋天线,印刷



作者简介:肖志刚(1974-),男,四川乐山人,博士, 副教授,研究方向为光子晶体方面的研究;蒋瑶 (1976-),女,四川乐山人,研究方向为光电子器件; 尹绍全(1962-),男,四川乐山人,副教授,研究方向 为光电材料加工。 收稿日期:2014-03-12 修回日期:2014-10-24 基金项目:四川省教育厅科研项目(11ZA157) 偶极子阵等,可以显著缩减尺寸等^{[5]-[9]}。EBG 结构的禁带特性源自其谐振机制,拓展工作带宽受限; 但利用传统方法,如增加微带天线基板厚度,是应 用方法之一。

本文提出的 EBG 结构阶梯状微带天线,其实 质是利用较薄基板做 EBG 结构,用来抑制表面波; 较厚基板用做微带天线的衬底,以增加天线带宽。 两者结合,完成改善天线带宽和提高增益的目的。 利用 EBG 结构的目的是产生禁带,对同一频率禁 带,不同基板厚度都可以实现,但从成本和缩减尺 寸的角度考虑,采用越薄的基板达到目的更有竞争 优势。此天线方案可用来代替传统扼流环天线,在 保证天线性能的前提下,显著缩减尺寸。在微波通 信领域具有较大应用潜力。

第 27 卷第 2 期	系统仿真学报	Vol. 27 No. 2
2015年2月	Journal of System Simulation	Feb., 2015

1 EBG 结构参数的变化对带隙的影 响分析

电磁带隙结构最先是由 UCLA 的 D.Sievenpiper博士提出的,也叫高阻抗表面结构, 如图1所示。这是一种金属一介质混合型的二维电磁晶体,其单元尺寸相对于工作波长比较小,它包括四个部分:接地板(Ground plane)、介质基板 (Substrate)、金属贴片(Metallic patch)以及金属过孔 (Vias)。



EBG 结构频率带隙的形成可以认为是一种谐 振或共振机制,通过对单元结构的特殊设计,使得 单元结构的电磁特性可以用集总电路元件—电容 C和电感L来描述,等效为并联的LC谐振电路模 型,电容C和电感L的起源可以用图2来说明。 对图1中的模型来说,当EBG结构与电磁波相互 作用时,在金属贴片上将感应电流,电容主要来自 于毗邻金属贴片两端之间的电荷累积;而电感来自 于电荷在金属过孔和地平面之间来回流动所形成 的电流环路,同这些电流联系在一起的是磁场和电 感。因此,整个EBG结构可被视作一种二维电滤 波器网络(带阻滤波器)以阻止沿表面流动的电流, 如图3所示。





对于一个金属贴片宽度为W,单元间隙为g, 基片厚度为h,介电常数为 ɛ,的 EBG 结构来说, 其电感L,电容C 的值可由下面公式确定:

$$C = \frac{W\varepsilon_0(1+\varepsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1}(\frac{2W+g}{g})$$
(1)
$$L = \mu_0 h$$
(2)

式中: μ_0 是自由空间的磁导率; ε_0 是自由空间的介 电常数。则谐振频率 ω_0 和 LC 电路模型的等效阻 抗 Z 可表示为:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{3}$$

$$Z = \frac{j\omega_0 L}{1 - \omega_0^2 LC} \tag{4}$$

可见,在谐振频率 ω₀ 附近,表面阻抗 Z 非常 大,形成高阻抗表面,表面波抑制带隙产生,在 EBG 结构上没有表面波传播。

此时,表面波的频率带隙宽度可表示为:

$$BW = \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{L}{C}}$$
(5)

式中:η为自由空间阻抗,其值为120π。

EBG 结构表现出来的频率禁带特性,不管是 表面波抑制禁带还是同相位反射禁带,都是由 EBG 结构的参数所决定。如图1所示,决定 EBG 结构带隙的参数主要是金属贴片的尺寸(W)、贴片 之间的间隔(g)、介质基板的介电常数(*ε_r*)以及介质 基板的厚度(h)。另外金属过孔半径对带隙也有影 响但相对与其他参数而言是比较小的,考虑一般实际加工时金属过孔半径的取值是有规定的,因此在研究 EBG 结构参数对带隙的影响时,金属过孔半径都取定值。

对于具有相同参数的 EBG 结构,其表面波带 隙与同相位反射带隙(反射相位的同相区,±90° 之间的频带),并不是必然对应的,略有出入,随 结构参数的变化而改变。

但是结构参数的变化对带隙变化的影响是一 致的,即参数的改变,使得表面波带隙位置的移动 以及带隙宽度的变化都可以从反射相位频率响应 曲线来判断;另一方面,也可以用表面波带隙的变 化来估计反射相位的变化趋势。基于这一点,采取 计算 EBG 结构反射相位的方法来研究 EBG 结构参



数变化对带隙的影响趋势。

计算思路:改变 EBG 结构的某一个参数,其 余参数保持不变,计算垂直入射到 EBG 结构表面 上的反射电磁波的相位,不同的参数对应不同的反 射相位。所有参数基于以下设定的初始值(其中, λ₀=25 mm):

$$W = 0.12\lambda_0$$
, $g = 0.02\lambda_0$, $h = 0.04\lambda_0$, $\varepsilon_r = 2.2$,
 $r_{vias} = 0.3 \,\mathrm{mm}$ (6)

带宽的定义:

B

$$W(\%) = \frac{f_{\phi = -90^{\circ}} - f_{\phi = 90^{\circ}}}{f_{\phi = 0^{\circ}}} \times 100\%$$

其中: $f_{\phi}=90^{\circ}$, $f_{\phi}=-90^{\circ}$ 以及 $f_{\phi}=0^{\circ}$ 分别表示反射 相位为 90° , -90° 以及 0° 时所对应的频率。计算结 果见图 4。



图 4 EBG 结构参数分析:金属贴片单元宽度(W)的影响

1.1 金属贴片宽度 W 的影响

正方形的金属贴片在 EBG 结构的设计中广泛 获得应用。金属贴片宽度在确定表面波带隙和反射 相位带隙上起着重要作用。这里,除了金属贴片宽 度 W 是变量以外,其余 EBG 结构的初始参数在式 (1)中给出。图 4(a)所示的是在不同的金属贴片宽度 下,平面波垂直照射到 EBG 结构表面的反射相位 频带特性。图中每条曲线对应不同的金属贴片宽 度。可见,随着金属贴片宽度的增大,同相谐振点 向低频端移动,反射相位曲线变得越加陡峭。图 4(b)所示的是在不同的金属贴片宽度下, EBG 结构 的反射相位带隙变化情况, 这里, ±90°被用作判 断带隙高端(-90°)和低端(+90°)的标准。

1.2 金属贴片间距g的影响

EBG 结构 LC 模型的电容来自金属贴片之间的 间隔。一旦间距改变,那么等效电容也将改变,并 导致频率带隙的变化。EBG 结构参数的初始参数 仍由式(6)给出,只不过这时贴片间距 g 为变量。 图 5(a)所示的是在不同的贴片间距 g 下,平面波垂 直照射到 EBG 表面的反射相位频带特性,图中每

第 27 卷第 2 期	系统仿真学报	Vol. 27 No. 2
2015年2月	Journal of System Simulation	Feb., 2015

条曲线对应不同的g值。可见,随着g的增大,同 相谐振点向高频端移动,反射相位曲线变得越加平 坦。图 5(b)所示的是在不同的g下,EBG 结构的 反射相位带隙变化情况,这里,±90°被用作判断 带隙高端(-90°)和低端(+90°)的标准。





1.3 介质基板厚度 h 的影响

从式(2)看出, EBG 结构 LC 模型中电感的值 主要由介质基板厚度确定。EBG 结构参数的初始 参数仍由式(6)给出,只是这时基板厚度 h 为变量。 图 6(a)所示的是在不同的基板厚度 h 下,平面波垂 直照射到 EBG 表面的反射相位频带特性, 图中每 条曲线对应不同的 h(mm)。图 6(b)所示的是在不同 的 h 下, EBG 结构的反射相位带隙变化情况。可 见,随着 h 的增大,同相谐振点向低频端移动, 反射相位曲线变得越加陡峭,频率带隙的中心频 率(fo=0°)将减少,这与贴片的宽度 W 的影响一致, 但带宽(BW%)将增加。



图 6 EBG 结构参数分析:介质基板厚度(h)的影响

1.4 介质基板介电常数的影响

基板的相对介电常数 *ε*, 是另一个确定 EBG 结构带隙的有效参数。EBG 结构参数的初始参数仍由式(6)给出,只不过这时相对介电常数 *ε*, 为变量。图 7(a)和(b)分别显示的是在不同的介电常数 *ε*, 下, EBG 结构表面的反射相位特性及带隙特性。可见, 当介电常数增大,带隙位置降低,带隙宽度也减小。 第27卷第2期 2015年2月

如使用 RT/Duriod 6010(*ε*_r=10.2)时,带隙降低到 9.71~10.54 GHz,并且带宽降低到 17.2%,如表 1 所示。比较 LC 等效模型, 当 ε, 增大时, 电容 C 也 增大,则使谐振频率和带宽均减小。



(b) EBG 结构的频带与介质基板介电常数 ε_r 的关系 图 7 EBG 结构参数分析:介质基板介电常数(ɛ_r)的影响

介质基板介电常数对反射相位的影响							
nateria	l ε _r	$f_{\phi}=90^{\circ}$	$f_{\phi}=0^{\circ}$	<i>f</i> _∅ =-90°	Band width	BW	
		/GHz	/GHz	/GHz	/GHz	/%	
Air	1.0	18.71	23.15	28.16	9.45	40.82	
R/D	2 20	15 62	10 27	21.50	5 97	21.05	
5880	2.20	15.05	10.37	21.30	5.87	51.95	

13 48

10.54

12.13

9.71

表1 EBG 结构的参数分析:

总结 EBG 结构的参数变化对表面波带隙和平 面波垂直反射相位频带特性的影响和规律:

(1) EBG 结构金属贴片宽度 W 增加,带隙位 置降低,带隙宽度减小;

(2) 金属贴片间隔 g 的增加,带隙位置升高, 带隙宽度增加:

(3) 介质基板厚度h增加,带隙位置降低,但 带隙宽度增加:

(4) 介质基板介电常数 εr 增加,带隙位置降 低,带隙宽度减小;

(5) 金属过孔的存在与否对 EBG 结构的同相 位反射特性几乎无影响,但对表面波带隙有影响, 无金属过孔时,表面波带隙将不能产生。

由此可见, 各参数对 EBG 结构带隙的影响是 相互制约的。上述结论在实际中设计和应用 EBG 结构提供了重要的理论指导。

Step-like EBG 结构微带天线 2

阶梯状(Step-like)EBG 结构微带天线的设想源 自扼流环天线,如图8所示。扼流环的原理很简单, 就是终端短路的传输线,在经过λ/4距离之后,相 当于完全开路,阻断电磁波的传播。扼流环由几个 同心金属圆环组成,辐射体被包围在中间。辐射体 激发起的表面波向四周传播,如果是光滑的金属平 面,它将不受任何影响,直接到达边界处发生散射: 如果是扼流环结构, 当表面波传播时, 有一部分继 续沿原来的路径传播,但是有一部分将会进入凹 环,到达凹环底部后又被反射回来,传到表面,如 图中8箭头所指示的路径。这两部分波最后都将到 达天线的边界处,它们的相位差取决于在凹环中所 经过的路径, 若刚好是凹环深度的两倍即相位差为 180°,这样它们将会抵消;如果幅度也相等的话, 则表面波在边界处的散射就会被抑制。扼流环的深 度通常取某个工作波长的λ/4,工作带宽较窄。

用 EBG 结构来代替扼流环结构,同样可以达 到抑制表面波的作用,如图 9 所示,称之为 EBG 结构阶梯状天线。与图 8 相比,用三排 EBG 结构

21.52

17.20

2.61

1.67

http://www.china-simulation.com

6.15 10.87

10.2 8.87

ma

R/D

6006 R/D

6010

第 27 卷第 2 期	系统仿真学报	Vol. 27 No. 2
2015年2月	Journal of System Simulation	Feb., 2015

组成的高阻抗表面来代替扼流环,不仅改善天线性能,而且还减小了天线的体积(扼流环的深度为 λ/4,而采用 EBG 结构不受此条件限制,可以做到 约λ/10)。





图 9 阶梯状 EBG 结构微带天线

保证相同的 EBG 结构及天线口径面积的前提 下,对薄基板衬底(Thin Sub.)、厚基板衬底(Thick Sub.),Step-like EBG 结构和 Coplanar EBG 结构 4 种类型的工作在 C 波段(5.8 GHz)的贴片天线作了 分析,如图 10 所示。图 10(a)(b)中的 EBG 结构参 数相同,4种结构中的辐射体尺寸根据谐振频点的 偏移略有调整,各结构参数如下。

Thin Sub.天线, 金属谐振贴片的参数如下: (L_p, W_p, x0)=(15.9mm, 15.9mm, 2.4mm), H=1.575mm, ε_r=2.2。

Thick Sub.天线, 金属谐振贴片的参数如下: (L_p, W_p, x0)=(15.2 mm, 15.2 mm, 3.2 mm), H=3.15 mm, ε_r=2.2。

Step-like EBG 结构, 金属谐振贴片的参数如下: (L_p, W_p, x0)=(16.0 mm, 16.0 mm, 3.6 mm),

H=3.15 mm, ε_r =2.2.

Coplanar EBG 结构, 金属谐振贴片的参数如下: (L_p, W_p, x0)=(16.1 mm, 16.1 mm, 2.4 mm), H=1.575 mm, *c_r*=2.2。

EBG 结构单元的参数为: W=8.72 mm, g= 0.76 mm, H=1.575 mm, ε_r =2.2, rvias=0.6 mm。 金属接地板和介质基板的大小都为(L_sub, W_sub)=(85.32 mm, 85.32 mm)。



3 仿真结果

各天线的 S11 和辐射方向图的结果分别见图 11 和图 12。图 11 结果表明,厚衬底的贴片天线比 薄衬底的贴片天线的阻抗带宽要宽。Co-planar EBG 贴片的衬底与 Thin Sub.结构贴片的衬底相 同,因此其阻抗带宽几乎一致;而同样的情况也出 现在另外两种相同衬底厚度的贴片天线上。值得一 提的是,由于 EBG 结构的作用,Co-planar EBG 结 构天线和 Step-like EBG 结构天线在 5.8GHz 的阻抗 匹配更佳。



http://www.china-simulation.com

第 27 卷第 2 期 2015 年 2 月



图 12 4 种结构天线辐射方向图的对比

图 12 对比了 4 种天线在 5.78 GHz 的辐射方向 图。在该频点, 4 种结构的天线都具有最低的回波 损耗。从 E 面的方向图中可以看出, Co-planar EBG 结构和 Step-like EBG 结构的贴片天线对表面波都 有明显的抑制, 天线的后向辐射减小很大, 前向辐 射增加约 2dB(其中, Step-like EBG 结构要略低些)。 H 面的辐射方向图也表现为前向辐射增加, 后向辐 射减小, 但效果不如 E 面明显, 这与表面波主要 在 E 面传播有关。

综上所述, Co-planar EBG 结构和 Step-like EBG 结构的贴片天线都对表面波的抑制具有明显 效果,都能改善天线的辐射性能。不同的是, Step-like EBG 结构天线的带宽更宽,而 Co-planar EBG 结构比 Step-like EBG 结构天线的增益要高一 些,约 0.5dB。实际中可以根据不同的环境条件或 要求采用更合适的结构来满足需要。

4 结论

扼流环的面积和深度都跟工作波长相关,为保 证扼流环抑制表面波传播的作用,对同心金属环的 数目和间隔也有一定要求,这样其面积需要增加。 在保证天线性能的前提下,扼流环天线和 Step-like EBG 结构天线可以做到辐射面积相同,但后者的厚 度会大大减小。如果进一步优化,如 EBG 结构基板 采用高介电常数,那么 Step-like EBG 天线结构在缩 减尺寸方面更具有优势。本文提出的天线方案完全 可以用来代替传统扼流环天线,天线性能,尺寸缩 减方面优势显著,在微波通信领域具有较大应用潜力。

参考文献:

- J Bluestone. Antenna Choke [P]. EU Patent: 0559980, September, 1993.
- [2] J M Tranquilla, J P Carr, H M Al-Rizzo. Analysis of a choke ring ground plane for multipath control in global positioning system (GPS) applications [J]. IEEE Trans Antennas Propag (S0018-926x), 1994, 42(7): 905-911.
- [3] F Sciré-Scappuzzo, S N Makarov. A low-multipath wideband GPS antenna with cutoff or non-cutoff corrugated ground plane [J]. IEEE Trans Antennas Propag (S0018-926x), 2009, 57(1): 33-46.
- [4] D Sievenpiper, Z Lijun, R F J Broas, N G Alexopolous, E Yablonovitch. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech (S0018-9480), 1999, 47(11): 2059-2074.
- [5] F Yang, Y Rahmat-Samii. Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: A low mutual coupling design for array applications [J]. IEEE Trans Antennas Propag (S0018-926x),2003, 51(10): 2936-2946.
- [6] F Yang, Y Rahmat-Samii. A low profile circularly polarized curl antenna over electromagnetic band-gap (EBG) surface [J]. Microw. Opt. Technol. Lett (S0895-2477), 2001, 31(3): 165-168.
- [7] F Yang, Y Rahmat-Samii. Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications [J]. IEEE Trans. Antennas Propag (S0018-926x), 2003, 51(10): 2691-2703.
- [8] J Bell, M Iskander. A low-profile archimedean spiral antenna using an EBG ground plane [J]. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett (S1045-9243), 2004, 3(1): 223-226.
- [9] Z G Xiao, H L Xu. A double-sided printed dipole array with an electromagnetic band-gap reflector [J]. J Infrared Milli Terahz Waves (S0915-9271), 2009, 30(5): 423-431.