

低有效介电常数复合材料的聚波特性的研究

刘涛 曹祥玉 马嘉俊 王伟
(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

摘要: 该文通过建立结构模型,分析了辐射源辐射功率密度与有效介电常数和有效磁导率的关系,然后分析了辐射功率密度与此种属性材料介电常数、厚度、辐射源位置及工作频率的关系。结果表明,辐射源辐射功率密度与有效介电常数和有效磁导率的比值成正比关系,相对低的介电常数可以显著改善辐射源前向辐射功率密度,最大辐射功率密度是厚度的周期函数,而与辐射源位置关系不大;获得较大辐射功率密度的工作频带是非常窄的。理论上解释了人工构造的低介电常数材料作为天线覆层提高增益的原因。

关键词: 电磁材料; 复合材料; 聚波特性; 低介电常数; 辐射功率密度

中图分类号: TN804

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0632-04

Study on Characteristics of Converging-Wave Based on Low Effective Permittivity Metamaterials

Liu Tao Cao Xiang-yu Ma Jia-jun Wang Wei

(Institute of Telecommunication Engineering, Engineering University of Air Force, Xi'an 710077, China)

Abstract: Through establishing structure model, the relation is presented among radiation power density of radiation source and effective permittivity and effective permeability. Simultaneously, the relations are numerically analyzed between radiation power density and permittivity, thickness, location of radiation source and operation frequency. The results show that radiation power density is directly proportional to the ratio of effective permittivity and effective permeability; relative low permittivity may remarkably improve radiation power density of radiation source; the maximum of radiation power density is the periodic function of thickness, and is less relation with the location of radiation source; the operation frequency band is very narrow in which the radiation power density can obtain larger values. The results may explain the reason theoretically that low permittivity metamaterials as a cover can enhance the gain of antenna.

Key words: Electromagnetic material; Metamaterials; Characteristics of converging-wave; Low permittivity; Radiation power density

1 引言

Metamaterials 是新发展的一类人工工程材料,包括电磁带隙(Electromagnetic Band-Gap, EBG)结构、负介电常数媒质(Epsilon-Negative material, ENG)、负磁导率媒质(Mu-Negative material, MNG)和双负媒质(Double Negative material, DNG)等,一般通过在一种介质中嵌入周期性金属结构或介质来实现。这些材料都表现出奇异的电磁特性,像 EBG 结构的表面波抑制与同相反射特性,双负媒质的后向波特性。可以说 metamaterials 技术为人类控制和操纵电磁波提供了一种可能的方法,许多基于 metamaterials 奇异电磁特性的新型天线也得到了广泛研究。

实际上,这几类材料还都表现出另一种电磁特性,即对

电磁波的汇聚作用,可以称之为聚波特性。利用这一特性可以非常显著地提高天线的方向性增益^[1-11],改变利用组阵形式提高天线增益的传统方法。总结这些文献研究模型,大致可以归纳为以下 5 类结构:(1)介质孔型 EBG 结构和一维多层介质板结构^[1-3,12];(2)金属细线网格或金属细圆柱构造的周期阵结构^[4-6,12];(3)金属贴片阵结构^[7,8];(4)单纯的 ENG, MNG, DNG 抽象模型^[9-11];(5)具有低有效介电常数值和低有效磁导率值的抽象模型^[13,14]。上述这些结构基本上都是作为天线覆层改善了天线的辐射特性,提高了增益。但对这些结构聚波特性的机理却给出了不同的解释,可以总结为以下 4 种理论:(1)类“孔径天线”。工作时所有覆层孔径单元被激励,以致覆层表面的辐射场分布是非常均匀的,EBG 覆层此时相当于一个“孔径天线”阵,从而提高了天线的增益^[1,6];(2)等效折射率趋近于零^[9-14]。当电磁波频率接近结构的等离子频率(或固有谐振频率)时,结构的有效折射率将趋近于零,从而可以认为电磁波以不同入射角入射到

2007-11-28 收到, 2008-06-04 改回

国家自然科学基金(60671001), 空军工程大学电讯工程学院博士创新基金(200603), 陕西省自然科学基金(2005F21)和西安市工业攻关项目(GG06020)资助课题

metamaterials 上时, 都能以趋近于法线的方向射出, 将原本发散的电磁波整理成趋近于覆层面法线方向的平行波, 起到能量汇聚的功能; (3) “谐振腔”概念。借鉴法布里-泊罗腔的工作原理, 以射线理论解释高方向性输出^[7,8]; (4) 频率禁带内的局域谐振模式。当在 EBG 结构中引入一个缺陷时, 在带隙范围内就会出现一个很窄的传输通带(即谐振峰)。从能量角度来说, 因为 EBG 结构中有缺陷, 这就使得整体性被破坏, 造成电磁能量局限在缺陷附近, 形成一个谐振效应, 改善了天线辐射性能^[2-5]。这些理论解释基本上给的是一个定性的分析, 虽然角度不一样, 但本质上讲有的是可以统一起来的。

本文旨在通过建立低有效介电常数复合材料的结构模型, 从理论上分析辐射源辐射功率密度与模型结构参数的关系, 探求低有效介电常数复合材料在汇聚电磁波方面的作用。

2 结构模型和数学模型

考察一个一维的多层周期结构, 假定这个结构有两种不同的介质组成, 分别是具有厚度 h_1 的介质 1 和厚度 h_2 的介质 2, 如图 1(a), 则在一个周期单元里它具有变化的折射率,

$$n(z) = \begin{cases} n_1 = \sqrt{\varepsilon_{r1}\mu_{r1}}, & 0 < z < h_1 \\ n_2 = \sqrt{\varepsilon_{r2}\mu_{r2}}, & h_1 < z < h_1 + h_2 = h \end{cases} \quad (1)$$

n_1, n_2 分别是两种介质的折射率。根据斯涅尔折射定律, 当整个结构的等效折射率或平均折射率 n_{eff} 趋近于零时, 它将具有汇聚电磁波的能力, 而等效折射率实质上由等效介电常数和等效磁导率来决定。

整个图 1(a) 结构可看作具有等效介电常数 ε_{eff} 和等效磁导率 μ_{eff} 的线性、静态、各向同性均匀无耗媒质材料, 且 ε_{eff} , μ_{eff} 是频率 f_0 的函数。

$$\varepsilon_{\text{eff}}(f_0) = 1 - \frac{f_{\text{ep}}^2}{f_0^2}, \quad \mu_{\text{eff}}(f_0) = 1 - \frac{f_{\text{mp}}^2}{f_0^2} \quad (2)$$

式中 $f_{\text{ep}}, f_{\text{mp}}$ 分别是电、磁等离子频率, f_0 是电磁波频率。由上式可知, 当电磁波的频率接近结构的等离子频率(或固有谐振频率)时, 该结构的有效介电常数 ε_{eff} 和等效磁导率 μ_{eff} 的取值将逐渐小于 1, 并最终可能接近于零。选取图 1(a) 中高为 $h = h_1 + h_2$ 的单元结构放于金属接地板上, 一线电流源嵌入其中, 沿 Y 方向放置, $x=0, z = h_s$, 则场为 TE 极化, 如图 1(b) 所示。

在空气与等效单元结构界面处的谱域电场为^[14,15]

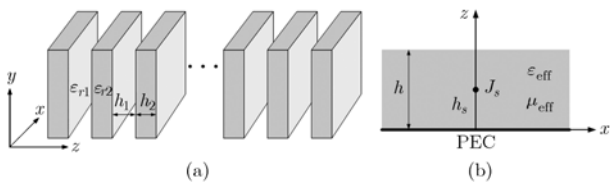


图 1 结构模型

$$\tilde{E}_y(k_x) = -\frac{jZ_0Z_1 \sin(k_{z1}h_s)}{Z_0 \cos(k_{z1}h) + jZ_1 \sin(k_{z1}h)} \quad (3)$$

$Z_0 = \eta_0 k_0 / k_{z0}$, $Z_1 = \eta_0 k_0 \mu_{\text{eff}} / k_{z1}$ 分别是空气与结构内的 TE 模特征阻抗, η_0 是自由空间波阻抗, $k_{z0} = \sqrt{k_0^2 - k_x^2}$ 是在空气中的垂直波数, $k_{z1} = \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}} k_0^2 - k_x^2}$ 是结构内的垂直波数, $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ 是自由空间波数。

单位幅度线电流源在空间激励的电场用逆傅里叶变换表示为

$$E_y(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_y(k_x) e^{-j(k_x x + k_{z0} z)} dk_x \quad (4)$$

通过渐近估计由式(4)可以获得远区电场为^[15]

$$E_y(r, \theta) = \cos\theta \sqrt{\frac{j k_0}{2\pi}} \tilde{E}_y(k_0 \sin\theta) \cdot e^{-jk_0 r} / \sqrt{r} \\ = E_y^{\text{ff}}(\theta) \cdot e^{-jk_0 r} / \sqrt{r} \quad (5)$$

$E_y^{\text{ff}}(\theta)$ 是归一化的远场方向图, θ 是沿法线方向辐射角。

则辐射功率密度为

$$P(\theta) = |E_y^{\text{ff}}(\theta)|^2 / (2\eta_0) \quad (6)$$

因此由式(3)-式(6)得前向 $\theta = 0$ 最大辐射功率密度为

$$P(0) = \frac{k_0 \eta_0}{4\pi} \frac{|\mu_{\text{eff}}| \sin^2(k_0 h_s n_{\text{eff}})}{|\varepsilon_{\text{eff}}| \cos^2(k_0 h n_{\text{eff}}) + |\mu_{\text{eff}}| \sin^2(k_0 h n_{\text{eff}})} \quad (7)$$

式中 $n_{\text{eff}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}}}$ 。

讨论: (1) 当 $|\varepsilon_{\text{eff}}| \ll |\mu_{\text{eff}}|$, 为使 $P(0)$ 值最大, 由极值条件, 式(7)分母中正弦项必须为零, 即

$$k_0 h \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}}} = n\pi, \quad n = 1, 2, \dots \quad (8)$$

等效于厚度 h 是材料内半波长的倍数, 材料内波长 $\lambda_{\varepsilon_{\text{eff}}} = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}}}$ 。同时分子正弦项等于 1, 即要求高度 h_s 是材料内 $\lambda_{\varepsilon_{\text{eff}}} / 4$ 的奇数倍。此时式(7)简化为

$$P(0)_{\text{max}} = \frac{k_0 \eta_0 |\mu_{\text{eff}}|}{4\pi |\varepsilon_{\text{eff}}|} \quad (9)$$

式(9)表明, $P(0)$ 与 $|\mu_{\text{eff}}| / |\varepsilon_{\text{eff}}|$ 成正比关系, 或者说, 一定条件下具有相对低 ε_{eff} 值的材料可以获得较高的前向辐射功率密度。同时从材料内波长 $\lambda_{\varepsilon_{\text{eff}}} = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}}}$ 也可以看到, 低介电常数介质是一种慢波材料, 介质波长远远大于自由空间波长, 这使得波在材料内传播相对长距离情况下相位变化很小, 则在与高介电常数材料交界面处就会有相对均匀的相位分布, 从而提高了辐射的方向性。

(2) 当 $|\mu_{\text{eff}}| \ll |\varepsilon_{\text{eff}}|$, 为使 $P(0)$ 值最大, 由极值条件式(7)分母中余弦项必须为零, 即

$$k_0 h \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}}} = \frac{(2n-1)\pi}{2}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (10)$$

同时分子正弦项等于 1, 即要求高度 h 和 h_s 都是材料内 $\lambda_{\varepsilon_{\text{eff}}} / 4$ 的奇数倍。此时式(7)简化为

$$P(0)_{\text{max}} = \frac{k_0 \eta_0}{4\pi} \quad (11)$$

$P(0)$ 最大值为一个常数。

3 数值分析

本文关注的是相对低 ε_{eff} 值的情况。不失一般性, 取

$|\mu_{\text{eff}}|=1$, $|\epsilon_{\text{eff}}|<1$, 来分析 $P(0)$ 与模型参数 ϵ_{eff} , h , h_s 及工作频率 f_0 的关系。

假设结构模型具有电等离子频率 $f_p=14.5\text{GHz}$, 工作频率选为 $f_0=14.65\text{GHz}$, 则 $\epsilon_{\text{eff}}=0.0204$, $\lambda_0=20.5\text{mm}$, $\lambda_{\text{eff}}=143.5\text{mm}$, $h_s=\lambda_{\text{eff}}/4=35.875\text{mm}$ 。图2给出了频率 f_0 固定, $P(0)$ 与 h 的关系。从图2中可以看到, 当 h 是 $\lambda_{\text{eff}}/2=72.75\text{mm}$ 的整数倍时, $P(0)$ 是厚度 h 的周期函数。当厚度合适时, 材料才具有明显聚波的作用。这可以用来解释文献[3,4,6,7]结构模型中金属网格或金属圆柱要周期放置, 且高度需要优化才能获得较大增益值的原因。当厚度不合适时, 可以看到 $P(0)$ 比较小, 说明此时一部分波被反射回来, 无法穿过材料。

图3给出了不同 h 值, 且 $h_s=h/2$ 时, $P(0)$ 与 f_0 的关系。从图中看到, $P(0)$ 最大值对应的最佳工作频率 f_0 正好是使 h 等于 $\lambda_{\text{eff}}/2$ 的奇数倍时的频率; $P(0)$ 最小值对应的工作频率 f_0 正好是使 h 等于 λ_{eff} 的偶数倍时的频率, 因为此时 h_s 是 $\lambda_{\text{eff}}/4$ 的偶数倍, 式(7)分子项为零。从图中也观察到, $n=1$ 时 $P(0)$ 的最大值要大于 $n>1$ 时的最大值, 这是因为式(8)条件满足时, 最佳工作频率为

$$f_{\text{opt}} = \sqrt{f_p^2 + \frac{n^2 c^2}{4h^2}}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (12)$$

式中 c 是真空中光速。由上式较大的 n 值对应较高的频率, 由式(2)较高的频率又对应较大的 ϵ_{eff} 值, 所以由式(9)知 $P(0)$ 最大值下降。另外从图中也可以看到, 在最大值处曲线是比较陡峭的, 合适工作频率的带宽是比较窄的。

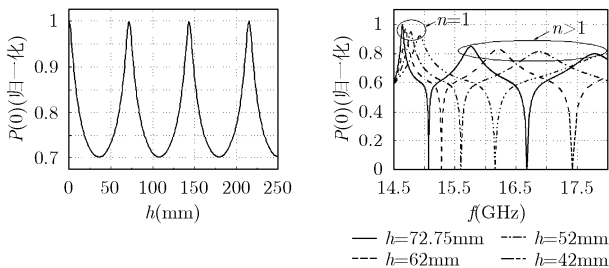


图2 辐射功率密度 $P(0)$ 与厚度 h 关系图

图3 辐射功率密度 $P(0)$ 与频率 f_0 关系

图4给出了 $h=72.75\text{mm}$, 不同 h_s 值时, $P(0)$ 与 f_0 的关系。从图中可以看出, $P(0)$ 最大值与 h_s 的关系并不是太密切, 不同 h_s 值之间 $P(0)$ 最大值差别较小, 最佳工作频率不变。这从式(8)中也可以看到, $P(0)$ 最大值条件与 h_s 并没有直接关系。

图5给出了 $P(0)$ 与 ϵ_{eff} 的近似关系, 因为式(9)系数项是 f_0 的一次函数, 且 f_0 变化范围很小, 而 ϵ_{eff} 是 f_0 的二次函数, 所以系数近似为常值, $P(0)$ 是 ϵ_{eff} 的近似反比函数。数值分析取 $f_0=14.65\text{GHz}$ 。

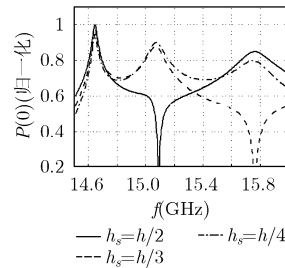


图4 辐射功率密度 $P(0)$ 与源位置 h_s 关系

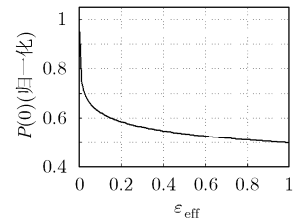


图5 辐射功率密度 $P(0)$ 与 ϵ_{eff} 的关系

4 结论

介质的 ϵ_{eff} 值和 μ_{eff} 值决定着一种材料会怎样和电磁辐射相互作用, ϵ_{eff} 和 μ_{eff} 取值不同, 材料就表现出不同的电磁特性。本文通过研究发现, 具有相对低介电常数值材料可以提高辐射源前向辐射功率密度, 同时给出了材料厚度、辐射源位置及工作频率与前向辐射功率密度的关系。根据斯涅尔定律, 可知较小的有效介电常数值实际上也就对应着较低的等效折射率, 从而使此种属性材料具有汇聚电磁波的能力。当结构模型中 ϵ_{r1} 为空气, ϵ_{r2} 为金属网格、金属细圆柱或周期介质板时, 则构造的结构在适当的频率范围可以等效成具有低介电常数值材料。

参考文献

- [1] Lin Qing-chun, Zhu Fang-ming, and He Sai-ling. A new photonic bandgap cover for a patch antenna with a photonic bandgap substrate [J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2004, 5: 269-273.
- [2] Weily A R, Horvath L, and Esselle K P, et al. A planar resonator antenna based on a woodpile EBG material[J]. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 2005, 53(1): 216-223.
- [3] Th`evenot M, Cheype C, and Reineix A, et al. Directive photonic-bandgap antennas [J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Technology*, 1999, 47(11): 2115-2122.
- [4] Cheype C, Serier C, and Thevenot M, et al. An electromagnetic bandgap resonator antenna[J]. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 2002, 50(9): 1285-1290.
- [5] Boutayeb H, Denidni T A, and Sebak A R, et al. Design of elliptical electromagnetic bandgap structures for directive antennas [J]. *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters*, 2005, 4: 93-96.
- [6] Hu Jun, Yan Chun-sheng, and Lin Qing-chun. A new patch antenna with metamaterial cover [J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2006, 7: 89-94.
- [7] Feresidis A P and Vardaxoglou J C. High gain planar antenna using optimised partially reflective surfaces[J]. *IEE Proc. Microwave. Antenna Propagation*, 2001, 148(6): 345-350.
- [8] Wang S, Feresidis A P, and Goussetis G, et al. High-gain

- subwavelength resonant cavity antennas based on metamaterial ground planes [J]. *IEE Proc. -Microw. Antennas Propag.*, 2006, 153(1): 1-6.
- [9] Alù A, Bilotti F, and Engheta N, *et al.* Metamaterial covers over a small aperture[J]. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 2006, 54(6): 1632-1643.
- [10] Ziolkowski R W and Kipple A D. Application of double negative materials to increase the power radiated by electrically small antennas[J]. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 2003, 51(10): 2626-2640.
- [11] Stuart H R and Pidwerbetsky A. Electrically small antenna elements using negative permittivity resonators[J]. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 2006, 54(6): 1644-1653.
- [12] 李斌. 微波复合介质材料及其应用研究. [博士论文], 西安电子科技大学, 2006.
- Li Bin. Study of application and characteristics of Metamaterials[D], Xi'dian University, 2006.
- [13] Enoch S, Tayeb G, and Sabouroux P, *et al.* A metamaterial for directive emission[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(21): 3901-3904.
- [14] Baccarelli P, Burghignoli P, and Frezza F. Effects of leaky-wave propagation in metamaterial grounded slabs excited by a dipole source[J]. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 2005, 53(3): 32-44.
- [15] Lovat G, Burghignoli P, and Jackson D R. Fundamental properties and optimization of broadside radiation from uniform leaky-wave antennas [J]. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 2006, 54(5): 32-44.
- 刘涛: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为计算电磁学与电磁带隙结构.
- 曹祥玉: 女, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算电磁学、电磁兼容及电磁带隙结构.
- 马嘉俊: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为计算电磁学与电磁带隙结构.