

含有左手介质双层基底的亚波长谐振腔微带天线研究*

杨 锐† 谢拥军 王 鹏 杨同敏

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 西安 710071)

(2006 年 11 月 21 日收到, 2007 年 1 月 29 日收到修改稿)

将谐振腔引入微带结构, 分析和设计了含有左手介质双层基底的亚波长谐振腔微带天线. 基于左手介质对右手介质的相位补偿效应, 此新型微带天线的高度并没有因为双层基底而大为增加, 反而有所降低. 计算表明: 在一些情况下, 大幅度提高的带宽特性突破了传统微带天线的窄带局限, 而在另一些情况下, 所得到窄带微带天线能够在单频率点谐振鉴频. 针对这一特性, 将亚波长谐振腔微带天线应用于探测器中, 显示了此新型微带天线在目标探测上的优势.

关键词: 微带天线, 左手介质, 谐振腔

PACC: 4110H

1. 引 言

本世纪以来, 一种被称为左手介质的人工复合材料在许多学科领域内获得了广泛的青睐, 对其研究也呈现迅速发展之势. 而早在 1968 年, Veselago^[1]就从理论上分析了这种具有负介电常数和负磁导率的电介质材料的全新物理特性. 这种介质因其波矢量、电场方向和磁场方向满足左手螺旋关系故而得名. 在被提出后的 30 年里, 左手介质这一具有颠覆性的概念却一直处于无人理睬的尴尬境地, 直到 Smith 等^[2,3]第一次实际合成出这种自然界并不存在的介质, 它的超常规电磁特性^[4-18] (如凋落波汇聚特性^[15,16]、相位补偿效应^[17,18]等), 再次引发了人们的无限遐想.

利用左手介质来提高常规器件电气性能和突破原有限制, 将引起包括固体物理、材料科学、光学和应用电磁学等领域的重大变革. 具体到微带天线的研究方面, 由于左手介质的引入, 其带宽窄、增益较低等缺陷得到了明显的改善^[19-24]. 本课题组也对左手介质基底微带天线做出了系统的分析. 研究表明, 相应地改变左手介质基底的介电常数和磁导率, 可以取得主瓣宽度窄且仰角低的新型辐射特性, 从而有效改变传统微带天线辐射定向性差的不足^[23,24].

但是, 现有文献多局限于在单层基底中部分^[20,21]或完全^[22-24]填充左手介质来提高和改善传统微带天线性能, 对于含有左手介质多层基底微带天线的讨论并不多见.

本文提出了含有左手介质双层基底的亚波长谐振腔微带天线, 将谐振腔引入微带结构. 根据谐振方程, 分析和设计了此新型微带天线. 利用左手介质对右手介质的相位补偿效应有效地降低了天线高度. 计算表明: 在一些情况下, 大幅度提高的带宽特性突破了传统微带天线的窄带局限, 而在另一些情况下, 所得到的窄带微带天线能够在单频率点谐振鉴频. 针对这一特性, 将亚波长谐振腔微带天线应用于探测器中, 显示了此新型微带天线在目标探测上的优势.

2. 理论分析

2.1. 含有左手介质双层基底的亚波长谐振腔微带天线模型

如图 1 所示, a 和 b 表示矩形贴片的尺寸. 图 2 给出了此亚波长谐振腔微带天线的模型. 如图 2 所示, d_1 和 d_2 分别定义了双层基底的高度; 负的 ϵ_{r1} , μ_{r1} 和正的 ϵ_{r2} , μ_{r2} 代表了左手介质和右手介质的介

* 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-04-0950)资助的课题.

† E-mail: mattomato811118@yahoo.com.cn

电常数和磁导率.与传统微带天线不同,此新型微带天线中,矩形贴片、接地板和中间的两层介质构成了 z 方向的一维谐振腔,电磁场相应地分布于上下两理想导体之间.因此,边缘散射场有了更加重要的意义,扮演着此新型微带天线工作中联系谐振腔内、外部电磁场的重要角色.

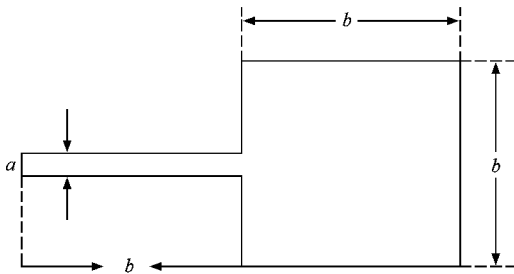


图 1 矩形贴片尺寸

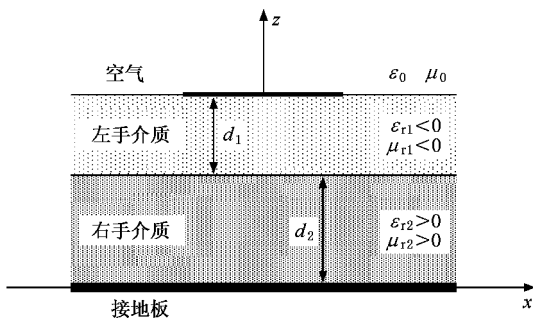


图 2 含有左手介质双层基底的亚波长谐振腔微带天线模型

2.2. 含有左手介质双层基底的亚波长谐振腔微带天线的设计

不同于传统微带天线的设计,对于此新型微带天线的分析,我们重点考虑其内部谐振腔的谐振方程^[17]

$$\frac{n_2}{\mu_2} \tan(n_1 k_0 d_1) + \frac{n_1}{\mu_1} \tan(n_2 k_0 d_2) = 0, \quad (1)$$

式中 k_0 表示空气中的波矢量, n_1 和 n_2 分别代表了左手介质和右手介质的折射率.

$$n_1 = -\sqrt{\epsilon_{r1} \mu_{r1}},$$

$$n_2 = \sqrt{\epsilon_{r2} \mu_{r2}}.$$

电磁波在图 2 所示的相邻连续的左手介质和右手介质基板中传播,由于相位相反,左手介质会对右手介质进行相位补偿.所以,只要在相邻两介质层中相位变化的模值相等,电磁波在通过图 2 所示的双层基板后,相位变化将完全抵消.这使得由矩形贴

片、接地板和左手介质、右手介质双层平板所组成的谐振腔系统其谐振方程(1)不依赖于两介质层的各自厚度,而直接取决于它们的比值^[17].所以,此双层基底谐振腔微带天线仍然可以保持在亚波长高度,甚至还可以大幅度降低.这对于将谐振腔引入传统微带天线是难以达到的,因为当天线基底单纯由右手介质组成时,满足谐振方程的最小高度为半波长.

若满足

$$n_1 k_0 d_1 = -n_2 k_0 d_2, \quad (2)$$

$$\frac{n_2}{\mu_2} = \frac{n_1}{\mu_1}, \quad (3)$$

则谐振方程(1)成立.而且,由于(2)式等号两端的波矢量 k_0 被直接消去,谐振方程(1)将与频率无关.这表明由矩形贴片、接地板和左手介质、右手介质双层平板所组成的谐振腔系统将在任何频率下都谐振,从而使得频率因素对于此新型微带天线性能的影响大为削弱.另一方面,如果所选参数满足谐振方程(1)却不满足(2)式,则天线内部谐振腔只能在固定频率点上谐振.若此频率点与微带天线工作频率重合,则此新型微带天线具有单频率点谐振鉴频特性.

3. 数值结果

3.1. 宽带亚波长谐振腔双层基底微带天线

若选择天线参数为 $a = 0.40 \text{ cm}$, $b = 3.80 \text{ cm}$, $\epsilon_{r1} = \mu_{r1} = -4.00$, $\epsilon_{r2} = \mu_{r2} = 0.80$, $d_1 = 0.25 \text{ mm}$, $d_2 = 1.25 \text{ mm}$, 此时内部谐振腔系统将在任何频率下谐振.图 3 给出了此新型微带天线的回波损耗 S_{11} .从图 3 可以看出,以 3.35 GHz 为中心频率,小于 -10 dB 的相对带宽达到了 21.79% .这大大改善了传统微带天线通常小于 5% 的窄带宽局限.在 3.07 和 3.61 GHz 得到了两个谐振频率点,相应的回波损耗分别为 -29.95 和 -24.62 dB .图 4 给出了此新型微带天线工作在 3.07 GHz 时的 E 面(虚线内)和 H 面(实线内)的方向图.从图 4 可以看出,所得到的方向图与传统微带天线类似.此天线的总高度 $d = 1.50 \text{ mm}$ 与工作在此频率下的传统单层微带天线相当,但这已经突破了传统谐振腔引入微带天线的半波长局限.

实际上,基于左手介质的相位补偿效应,此天线的高度还可以降低.保持其他参数不变,令 $d_1 = 0.10 \text{ mm}$, $d_2 = 0.50 \text{ mm}$, 此时天线总高度 $d =$

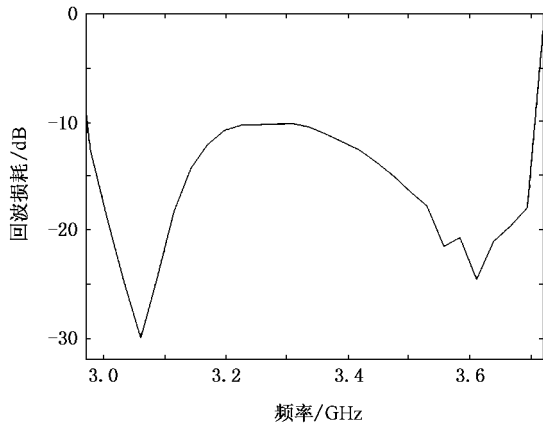


图3 当 $d_1 = 0.25 \text{ mm}$, $d_2 = 1.25 \text{ mm}$ 时,宽带亚波长谐振腔双层基底微带天线的回波损耗 $a = 0.40 \text{ cm}$, $b = 3.80 \text{ cm}$, $\epsilon_{r1} = \mu_{r1} = -4.00$, $\epsilon_{r2} = \mu_{r2} = 0.80$

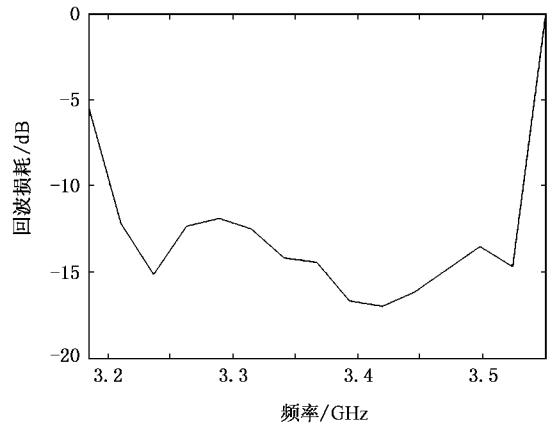


图5 当 $d_1 = 0.10 \text{ mm}$, $d_2 = 0.50 \text{ mm}$ 时,窄带亚波长谐振腔双层基底微带天线的回波损耗 $a = 0.40 \text{ cm}$, $b = 3.80 \text{ cm}$, $\epsilon_{r1} = \mu_{r1} = -4.00$, $\epsilon_{r2} = \mu_{r2} = 0.80$

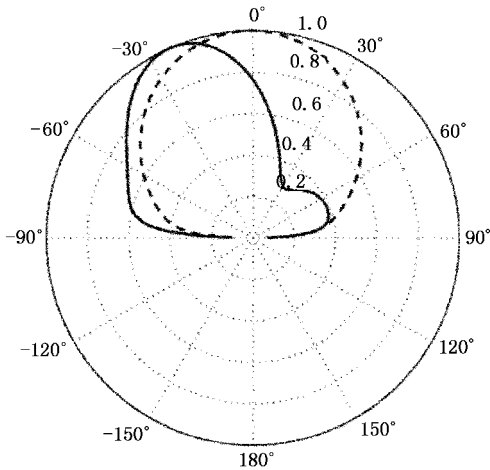


图4 宽带亚波长谐振腔双层基底微带天线的 E 面和 H 面方向图 $a = 0.40 \text{ cm}$, $b = 3.80 \text{ cm}$, $\epsilon_{r1} = \mu_{r1} = -4.00$, $\epsilon_{r2} = \mu_{r2} = 0.80$, $d_1 = 0.25 \text{ mm}$, $d_2 = 1.25 \text{ mm}$, 虚线内为 E 面, 实线内为 H 面

0.60 mm. 图5给出了该天线的回波损耗 S_{11} . 如图5所示, 小于 -10 dB 的带宽仍然很大, 但相比于图3所示的天线已经减小. 保持与图3所示天线基本不变的工作中心频率 3.36 GHz, 该天线的相对带宽为 9.52%. 这一结果再次证明了此亚波长谐振腔微带天线可以比传统微带天线大幅度提高带宽. 但单一的降低基底厚度会缩减微带天线带宽这一规律仍然适用^[25] 并没有因为左手介质的引入而有所改变.

3.2. 窄带亚波长谐振腔双层基底微带天线

若选择天线参数为 $a = 0.40 \text{ cm}$, $b = 3.80 \text{ cm}$, $\epsilon_{r1} = \mu_{r1} = -2.80$, $\epsilon_{r2} = 3.10$, $\mu_{r2} = 1.00$, $d_1 \approx 0.41$

mm, $d_2 \approx 1.09 \text{ mm}$, 此时内部谐振腔将只在 2.40 GHz 频率谐振. 天线的高度 $d = 1.50 \text{ mm}$ 仍与在此工作频率下的传统微带天线相当. 图6给出了该微带天线的回波损耗 S_{11} . 从图6可以看出, 小于 -10 dB 的相对带宽为 6.67%, 中心频率为 2.40 GHz. 值得注意的是, 这一频率恰好与谐振腔的工作频率相等, 也基本与天线的谐振频率 2.39 GHz 一致, 保证了此新型微带天线与其内部谐振腔同时工作, 从而拥有单频率点谐振鉴频特性. 图7给出了该新型微带天线在 2.40 GHz 工作频率下的 E 面(虚线内)和 H 面(实线内)的方向图, 可以看出其辐射特性仍然与传统微带天线类似.

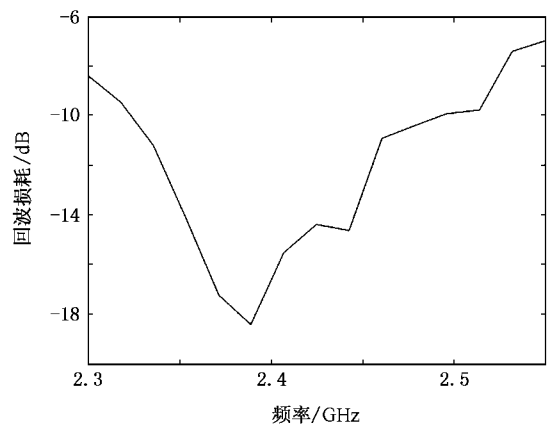


图6 当 $d_1 \approx 0.41 \text{ mm}$, $d_2 \approx 1.09 \text{ mm}$ 时,窄带亚波长谐振腔双层基底微带天线的回波损耗 $a = 0.40 \text{ cm}$, $b = 3.80 \text{ cm}$, $\epsilon_{r1} = \mu_{r1} = -2.80$, $\epsilon_{r2} = 3.10$, $\mu_{r2} = 1.00$

与宽带亚波长谐振腔双层基底微带天线类似, 此窄带亚波长谐振腔双层基底微带天线的高度也可

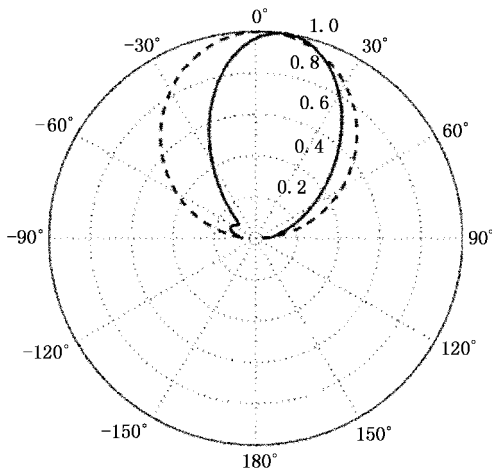


图7 窄带亚波长谐振腔双层基底微带天线的 E 面和 H 面方向图 $a = 0.40$ cm, $b = 3.80$ cm, $\epsilon_{r1} = \mu_{r1} = -2.80$, $\epsilon_{r2} = 3.10$, $\mu_{r2} = 1.00$, $d_1 \approx 0.41$ mm, $d_2 \approx 1.09$ mm, 虚线内为 E 面, 实线内为 H 面

以降低. 保持其他参数不变, 令 $d_1 \approx 0.174$ mm, $d_2 \approx 0.486$ mm, 此时内部谐振腔仍在 2.40 GHz 频率谐振. 天线总高度 $d = 0.66$ mm (约为 $9.30 \times 10^{-3} \lambda$, 其中 $\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{r2} \mu_{r2}}}$) 已大大降低, 而且也小于传统微带

天线通常大于 0.01λ 的天线高度. 图 8 给出了该微带天线的回波损耗 S_{11} . 如图 8 所示, 小于 -10 dB 的相对带宽由于天线高度的降低有所减小, 约为 2.91%. 此天线的中心频率、谐振频率和谐振腔的工作频率也均为 2.40 GHz, 从而保证了此新型微带天线能够在单频率点谐振鉴频.

对于目标探测器, 由于探测目标所依赖的物理环境通常比较复杂, 使得探测器中目标信息传感器 (天线等) 所接收的回波信号难以鉴别. 若将上述能够在单频率点谐振鉴频的新型微带天线应用于探测器中, 则可大大提高探测灵敏度. 首先, 此天线的窄带宽特性, 一方面虽然限制了天线的工作频率, 但另

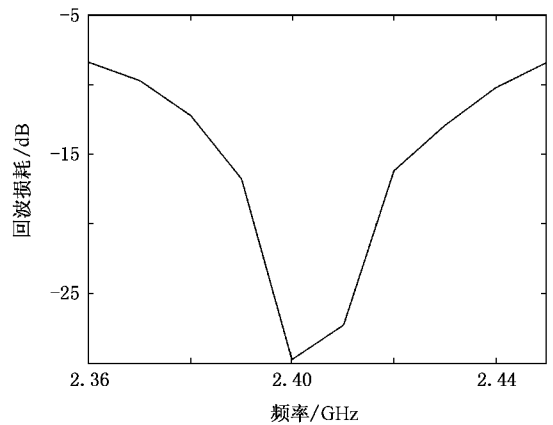


图8 当 $d_1 = 0.174$ mm, $d_2 = 0.486$ mm 时, 窄带亚波长谐振腔双层基底微带天线的回波损耗 $a = 0.40$ cm, $b = 3.80$ cm, $\epsilon_{r1} = \mu_{r1} = -2.80$, $\epsilon_{r2} = 3.10$, $\mu_{r2} = 1.00$

一方面也使得只有少数频率的信号可以耦合进边缘场, 从而初步限定了回波信号的频率范围. 另外, 应用天线内部谐振腔在单频率点的谐振鉴频特性, 进行二次鉴频, 更进一步确定了探测目标的信息, 显示出了此天线在目标探测上的优势.

4. 结 论

本文提出并讨论了含有左手介质双层基底的亚波长谐振腔微带天线. 将谐振腔引入微带结构. 根据谐振方程, 分析和设计了此新型微带天线. 利用左手介质对右手介质的相位补偿效应有效地降低了天线高度. 计算表明: 在一些情况下, 大幅度提高的带宽特性突破了传统微带天线的窄带局限, 而在另一些情况下, 所得到的窄带微带天线能够在单频率点谐振鉴频. 针对这一特性, 本文将亚波长谐振腔微带天线应用于探测器中, 显示了此新型微带天线在目标探测上的优势.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
 [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
 [3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
 [4] Kong J A 2000 *Prog. Electromagn. Res.* **35** 1
 [5] Cui T J, Hao Z C, Yin X X, Hong W, Kong J A 2004 *Phys. Lett. A* **323** 484
 [6] Zhang D K, Zhang Y W, He L, Li H Q, Chen H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 772 (in Chinese) [张东科, 张冶文, 赫丽, 李宏强, 陈鸿 2005 物理学报 **54** 772]

- [7] Zhuang F, Shen J Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 955 (in Chinese) [庄飞, 沈建其 2005 物理学报 **54** 955]
 [8] Zheng Q, Zhao X P, Fu Q H, Zhao Q, Kang L, Li M M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5683 (in Chinese) [郑晴, 赵晓鹏, 付全红, 赵乾, 康雷, 李明明 2005 物理学报 **54** 5683]
 [9] Meng F Y, Wu J, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2194 (in

- Chinese)[孟繁义、吴群、吴健 2006 物理学报 **55** 2194]
- [10] Meng F Y , Wu Q , Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2200 (in Chinese)[孟繁义、吴群、吴健 2006 物理学报 **55** 2200]
- [11] Wu M F , Meng F Y , Wu Q , Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5790 (in Chinese)[武明峰、孟繁义、吴群、吴健 2006 物理学报 **55** 5790]
- [12] Jiang T , Chen Y , Feng Y J 2006 *Chin. Phys.* **15** 1154
- [13] Dong Z G , Zhu S N , Liu H 2006 *Chin. Phys.* **15** 1772
- [14] Hu Y H , Fu X Q , Wen S C , Su W H , Fan D Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2970
- [15] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [16] Alu A , Engheta N 2006 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **54** 268
- [17] Engheta N 2002 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **1** 10
- [18] Li Y , Ran L X , Chen H S , Huangfu J T , Zhang X M , Chen K S , Grzegorzczak T , Kong J A 2005 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **50** 1522
- [19] Burokur S N , Latrach M , Toutain S 2005 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **4** 183
- [20] Mahmoud S F 2004 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **3** 19
- [21] Tretyakov S A , Ermutlu M 2005 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **4** 266
- [22] Wu B I , Wang W , Pacheco J , Chen X , Grzegorzczak T , Kong J A 2005 *Prog. Electromagn. Res.* **51** 295
- [23] Yang R , Xie Y , Wang P , Li L 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 0604108
- [24] Yang R , Xie Y , Wang P , Li L 2006 *J. Electromagn. Waves Appl.* **20** 1221
- [25] Garg R , Bhartia P , Bahl I , Ittipiboon A 2001 *Microstrip Antenna Design Handbook* (Norwood : Artech House)

Subwavelength cavity resonator microstrip antennas based on left- and right-handed metamaterial bilayered substrates^{*}

Yang Rui[†] Xie Yong-Jun Wang Peng Yang Tong-Min

(State Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology , Xidian University , Xi'an 710071 , China)

(Received 21 November 2006 ; revised manuscript received 29 January 2007)

Abstract

By introducing cavity resonators to microstrip structures , subwavelength cavity resonator microstrip antennas with left- and right-handed metamaterial bilayered substrates are proposed and investigated. Due to the phase compensation , the total height of the antennas is reduced rather than increased. With certain sets of parameters , as a breakthrough to the restricted bandwidth of the conventional microstrip antennas , greatly broadened bandwidth can be achieved. Under other conditions , antennas with narrow bandwidth and resonant sensitivity can be realized. Corresponding applications for sensor use are proposed , and distinct advantages over the nonresonant electromagnetic wave sensors are demonstrated.

Keywords : microstrip antenna , left-handed metamaterials , cavity resonator

PACC : 4110H

^{*} Project supported by the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education , China (Grant No. NCET-04-0950).

[†] E-mail : mattomato811118@yahoo.com.cn