

基于左手介质后向波特性的微带天线小型化研究^{*}

武明峰^{1)†} 孟繁义¹⁾ 吴群¹⁾ 吴健^{1)‡}

1) 哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院, 哈尔滨 150001)

2) 电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室, 北京 102206)

(2006 年 4 月 5 日收到, 2006 年 8 月 17 日收到修改稿)

基于色散性稳定、频带宽、电尺寸小的左手介质结构单元, 设计了一种左手介质和传统介质相结合的微带天线基板结构, 利用左手介质的后向波效应对传统介质中传播后的电磁波进行相位补偿, 从而实现微带天线小型化设计. 理论计算和数值仿真结果表明, 工作于 4.7 GHz 的微带天线的物理尺寸被减小了 37.92%, 突破了传统微带天线的半波长要求的限制, 而小型化的微带天线的增益、带宽等性能方面与传统天线相当, 证明了用左手介质小型化微带天线的可行性和实用性.

关键词: 左手介质, 后向波特性, 微带天线, 小型化

PACC: 4110H

1. 引 言

左手介质(left-handed medium)是 20 世纪 90 年代末期出现的一种新型周期结构的人工电磁媒质, 它同时具有负值的介电常数和负值的磁导率, 导致在该媒质中传播的电磁波的电场 E 、磁场 H 以及波矢量 k 三者构成左手系, 而不遵循常规媒质的右手法则, 故而得名. 自美国加州大学圣迭戈分校的 Smith^[1]于 2000 年首次人工构造出这种自然界中并不存在的媒质以来, 由于它所具有的一系列超常规的电磁特性(包括左手特性、负折射特性、后向波特性等^[2])而备受关注. 国内外的研究成果表明, 上述电磁特性具有较广泛的应用前景^[3-5], 本文将着重探讨后向波特性及其在微带天线小型化设计中的应用.

Engheeta^[6]的理论研究结果表明, 将左手介质的后向波效应和传统介质的前向波效应相结合可以设计出小于半波长的谐振腔, 且谐振腔的物理尺寸不再受制于谐振频率, 而是取决于左手介质与传统介质的本构关系参数的比值, 近期的实验结果证明了该理论的正确性和可行性^[7]. 在这个应用实例中, 左手介质相当于一个相位补偿器, 电磁波在传统介质中传播时产生的相位差可以通过左手介质的后向波

效应加以补偿. 左手介质作为相位补偿器在微带天线小型化方面也具有巨大的应用潜力, 因为根据罗远祉等^[8]提出的微带天线空腔模型理论, 微带贴片与接地板之间可以看成是四周为磁壁, 上下为电壁的谐振腔. 因此微带天线也可以利用左手介质的相位补偿效应突破传统微带天线的半波长电尺寸的束缚, 使得小型化设计成为可能. 文献[9—11]的理论研究结果表明, 这种思路是正确的. Tretyakov 等^[12]利用传输线模型开展了进一步的理论探讨, 结果表明虽然左手介质的色散特性将影响微带天线的工作带宽, 但是利用左手介质的后向波效应小型化微带天线是切实可行的.

上述理论结果还面临三个方面的考验. 首先, 该结果是基于假想的左手介质推导得出的结论. 在推导过程中, 左手介质的介电常数和磁导率被设定为非色散的负值常数或者洛伦茨模型等数学模型, 然而现实中能够实现的左手介质的有效介电常数和磁导率的色散性非常强. 其次, 对于诸如微带天线等腔体结构的应用场合, 开口谐振环(split-ring resonator 简记为 SRR)结构或其衍生结构的左手介质比左手传输线更便于加载. 然而目前 SRR 结构或其衍生结构的左手介质带宽较窄、电尺寸较大. 最后, 即使利用左手介质突破了半波长的限制, 减小了微带天线的物理尺寸, 但是是否会损失天线其他方面的性能指标(如

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60571026)和电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室(批准号: 514860303)资助的课题.

[†] E-mail: wumingfeng2005@yahoo.com.cn

增益、带宽和效率等),有待进一步的研究和证实。

为了验证利用左手介质后向波效应小型化微带天线的正确性、可行性和实用性,首先需要获得一种色散性比较平稳、带宽较宽且电尺寸较小的左手介质单元。基于该单元设计合适的微带天线基板,进而使传统微带天线小型化,以验证利用左手介质小型化微带天线理论的正确性和可行性。最后将小型化后的微带天线与传统的微带天线相比较,探讨该技术的优劣。

本文针对上述问题展开研究,利用本课题组设计的一种相对带宽达到 56.4%、在中心频率上单元电尺寸仅为 0.067 波长的宽频带小单元左手介质单元^[13,14],构造出一种加载左手介质的微带天线基板,并构建出一种小型化微带天线。通过建立上述天线的传输线分析模型,直观地刻画了后向波效应在小型化微带天线中的作用。仿真实验结果表明,微带天线的物理尺寸减小了 37.92%,从而突破了传统微带天线设计中的半波长物理尺寸的限制,而增益、带宽等性能指标并未降低。

2. 宽频带、电小尺寸左手介质

左手介质基板研究之根本在于获得色散平稳、宽频带、电尺寸小的左手介质单元。本研究拟采用的方形环左手介质单元结构如图 1(a)所示,将 5 个这样的方形环单元并列组合放置在波导中间,如图 1(b)所示。波导中填充相对介电常数为 2.2 的介质材料,且入射波由端口 1 向端口 2 传播,入射波的磁场垂直穿过方形环单元。该仿真模型能够对均匀平面波照射激励下的 5 个单元厚度的半无限大左手介质平板的电磁波反射和透射特性进行有效模拟。设方形环平行 z 轴的两条边宽为 0.13 mm,长为 2.03 mm;平行 y 轴的两条边宽为 0.26 mm,长为 2.03 mm;方形环开口宽度均为 0.13 mm。另外,两个理想磁接触器(perfect magnetic conductor,简记为 PMC)的边界间距离为 0.254 mm,这个参数实际上代表的是阵元的横向间距,且每个方形单元中心之间的纵向距离为 2.29 mm。在这样的结构参数下,通过计算机仿真得到的上述 5 元阵列的 S 参数幅度和相位随频率的变化曲线,然后利用 Nicolson-Ross-Wei(NRW)方法^[15]从 S 参数中提取得到 5 单元阵列对应的有效介电常数和有效磁导率。上述思路在文献 13,14 中已经阐明,故不赘述。图 2 和图 3 分

别给出了有效介电常数和有效磁导率的频率变化曲线,可以看到在 4.2—7.5 GHz 频带上有效介电常数和有效磁导率的实部同时为负值,虚部近似为零,表明方形环阵列在此频段上显露左手介质特性,具有后向波效应。该左手介质的相对带宽达到 56.4%、中心频率上结构单元三方向最大电尺寸仅为 0.067,并且有效介电常数和有效磁导率随频率变化较缓、色散性稳定,达到了设计要求,可以用于设计微带天线的基板。

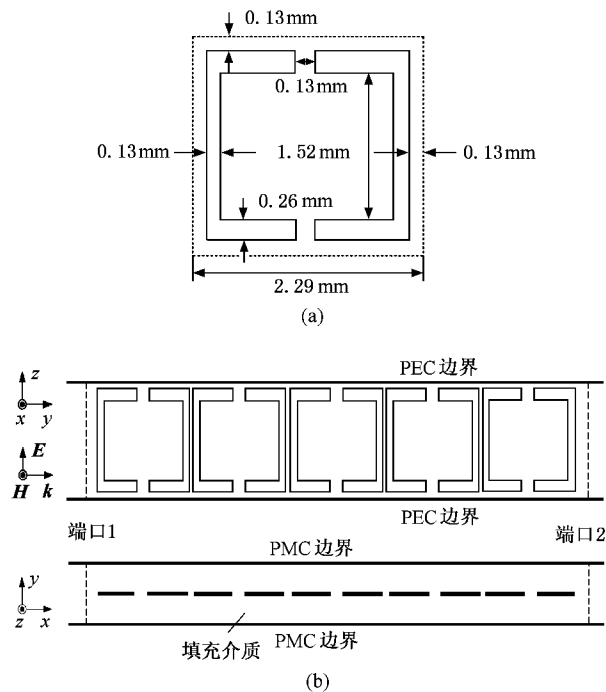


图 1 方形环左手介质结构示意图 (a)方形环单元结构尺寸标注 (b)方形环左手介质数值仿真结构模型

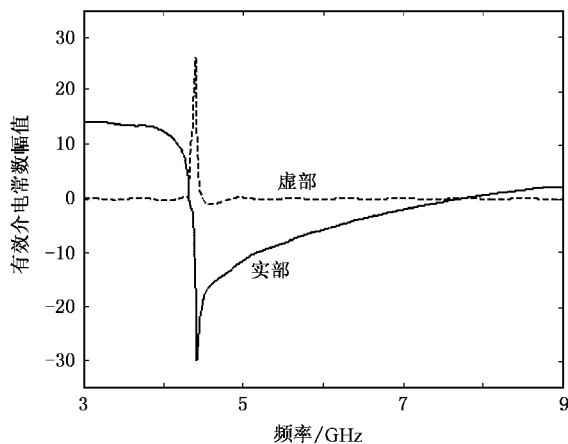


图 2 有效介电常数随频率的变化曲线

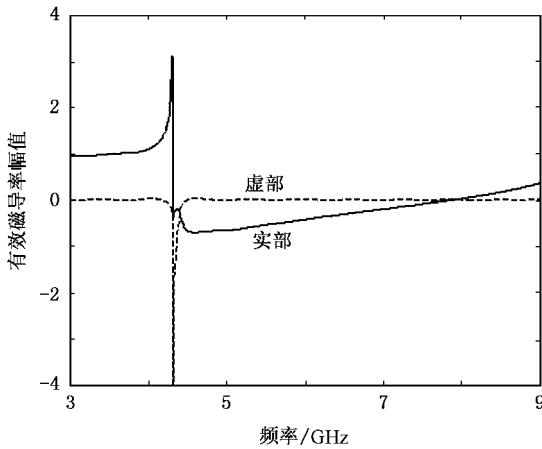


图3 有效磁导率随频率的变化曲线

3. 加载左手介质的微带天线及其传输线分析模型

为了直观而清晰地刻画左手介质后向波效应对微带天线的影 响,本文建立起左手介质基板上微带天线的传输线分析模型.微带天线的结构如图4所示.基板长为 D_1 、宽为 D_2 、高为 h ,填充材料的相对介电常数为 2.2,内部加载着 21 个 5 单元方形环阵列(共 105 个方形环单元),阵列上方放置长为 W_1 、宽为 W_2 的矩形贴片天线,贴片在传统介质上方的长度为 L_R ,在左手介质上方的长度为 L_L .馈电采用边馈方式,馈线长为 L_f 、宽为 W_f .为了使方形环单元能够产生左手介质特性,需要满足磁场垂直穿过方形环的激发条件,因此微带天线应该工作于 TM_{01} 模.传统的矩形微带天线可以看成场沿横向没有变化的传输线谐振器,纵向场呈驻波变化,辐射主要由纵向两端开路的边缘场产生.当微带贴片下方加载左手介质之后,纵向场(图4中沿 y 轴方向)向前传播到达左手介质便受其后向波特性的影响.

微带天线的传输线模型的等效电路如图5所示, Y_r 表示微带天线两个开路端的等效辐射阻抗, G 表示微带两端开路产生的辐射电导, C 表示两端开路的边缘效应导致的电容效应.设

$$Y_r = G + j\omega C, \quad (1)$$

式中 G 和 C 分别为^[16]

$$G = \frac{1}{90} \left(\frac{W}{\lambda} \right) \quad (W < 0.35\lambda), \quad (2a)$$

$$G = \frac{1}{120} \left(\frac{W}{\lambda} \right) - \frac{1}{60\pi^2} \quad (0.35\lambda \leq W \leq 2\lambda) \quad (2b)$$

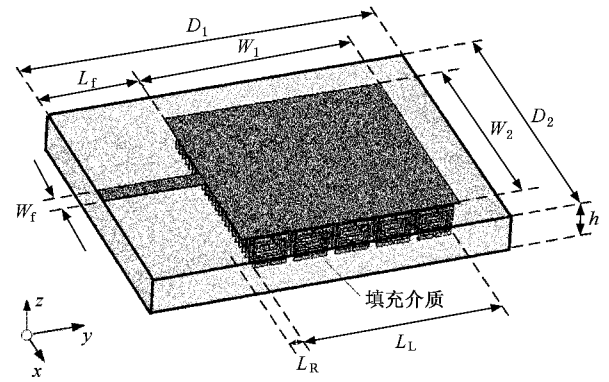


图4 基板中加载左手介质的微带天线结构图

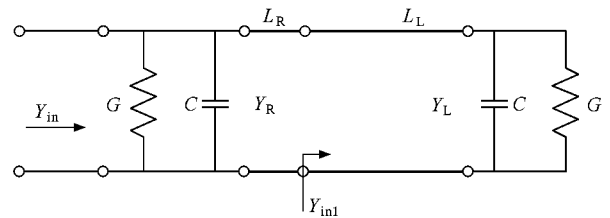


图5 微带天线的传输线分析模型等效电路图

$$G = \frac{1}{120} \left(\frac{W}{\lambda} \right) \quad (W > 2\lambda), \quad (2c)$$

$$C = \frac{2\pi\Delta l Y_r}{\lambda\omega}. \quad (3)$$

这里 Δl 代表开路端电容效应引起的延长长度,由于该微带贴片的边长 W 比高度 h 大得多,因此可以取 $\Delta l = 0.5h$.

Y_R 和 Y_L 分别表示右手介质和左手介质上微带线的特征导纳,可分别由以下公式求得:

$$Y_R = \frac{W}{h} \sqrt{\frac{\epsilon_{RHM}}{\mu_{RHM}}}, \quad (4a)$$

$$Y_L = \frac{W}{h} \sqrt{\frac{\epsilon_{LHM}}{\mu_{LHM}}}. \quad (4b)$$

这里, W 表示微带天线的宽度, h 表示基板的高度, ϵ_{RHM} 和 μ_{RHM} 分别表示传统媒质的介电常数和磁导率, ϵ_{LHM} 和 μ_{LHM} 分别表示左手介质的有效介电常数和有效磁导率.

β_R 和 β_L 分别表示微带贴片上的纵向场在右手介质和左手介质上方微带线中传播时的相位常数,可分别由以下公式求得:

$$\beta_R = \omega \sqrt{\epsilon_{RHM}} \sqrt{\mu_{RHM}}, \quad (5a)$$

$$\beta_L = \omega \sqrt{\epsilon_{LHM}} \sqrt{\mu_{LHM}}. \quad (5b)$$

值得注意的是,根据左手介质理论^[2],在左手介质有效介电常数和有效磁导率同时为负值的频段, β_L 的值也为负值,这正是左手后向波效应的表现。

L_R 和 L_L 分别表示微带贴片上的纵向场在右手介质和左手介质上方微带线中传播的长度,它们之和等于微带贴片的边长 W_1 。因此微带天线的输入电导可以表示为^[12,16]:

$$Y_{in} = Y_r + Y_L \frac{Y_{inl} + jY_R \tan(\beta_R L_R)}{Y_R + jY_{inl} \tan(\beta_R L_R)}, \quad (6)$$

$$Y_{inl} = Y_L \frac{Y_r + jY_L \tan(\beta_L L_L)}{Y_L + jY_r \tan(\beta_L L_L)}. \quad (7)$$

4. 电磁仿真验证及讨论

对图 4 所示的微带天线,给定各项尺寸为 $D_1 = 22 \text{ mm}$, $D_2 = 16.26 \text{ mm}$, $W_1 = 13.36 \text{ mm}$, $W_2 = 11.84 \text{ mm}$, $h = 2.29 \text{ mm}$, $L_f = 6.21 \text{ mm}$, $W_f = 3.05 \text{ mm}$, $L_R = 1.91 \text{ mm}$, $L_L = 11.45 \text{ mm}$ 。将上述参数及左手介质的有效介电常数和有效磁导率代入传输线分析模型,计算得到该微带天线的辐射电阻如图 6 所示,可见该天线能够工作于 5.01 GHz。在匹配的条件下,天线的反射系数如图 7 中虚线所示,反射系数 -10 dB 的带宽为 4.97—5.11 GHz,相对带宽为 2.78%。

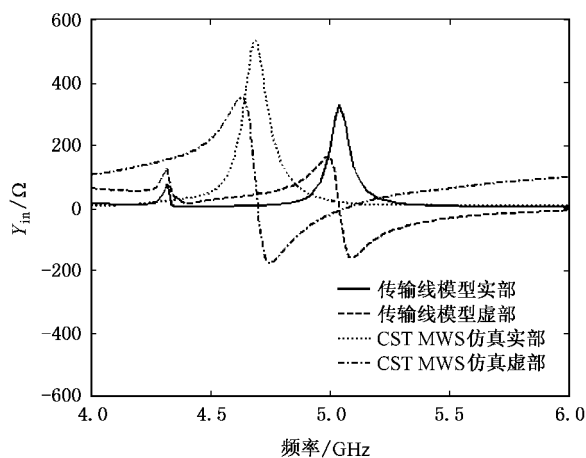


图 6 加载左手介质的微带天线的输入阻抗 Y_{in} 随频率变化曲线

利用 CST Microwave Studio(CST MWS)三维电磁仿真软件对上述结构参数的微带天线进行数值仿真,仿真得到该微带天线的辐射电阻如图 6 所示,可见该天线能够工作于 4.70 GHz。天线的反射系数如图 7 实线所示,反射系数 -10 dB 的带宽为 4.60—4.78 GHz,相对带宽为 3.84%。仿真还得到该天线的

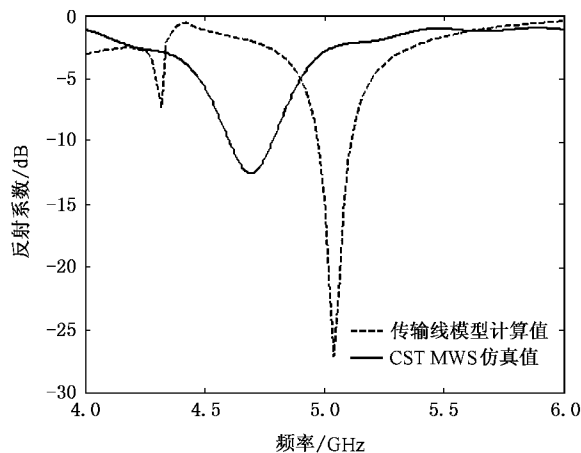


图 7 加载左手介质的微带天线的反射系数随频率变化曲线

远场增益为 7.11 dB(图 8)。

对比传输线模型的解析结果和 CST MWS 的数值仿真结果,可见二者符合较好,说明传输线模型较准确地刻画了左手介质基板上微带天线的工作机理。从传输线模型(6)(7)式中,我们可以直观地发现左手介质后向波效应对微带天线纵向波的相位补偿作用:右手介质中波的相位常数为正值的 β_R ,而左手介质中波的相位常数为负值的 β_L ,当纵向波通过长为 L_R 的右手介质到达左手介质时,左手介质将通过负值的 β_L 对纵向波进行相位补偿。传统微带天线可以将纵向场方向上的两个开路端(即辐射端)等效为两个缝隙天线,为了满足两端的相位要求,微带天线的纵向场长度需要达到半个波长。基板中加载左手介质之后,虽然纵向尺寸没有达到半个波长,但是借助左手介质的后向波效应对纵向波进行相位补偿,依然可以达到两端辐射的要求。这表明了利用左手介质后向波效应进行微带天线小型化设计的正确性。

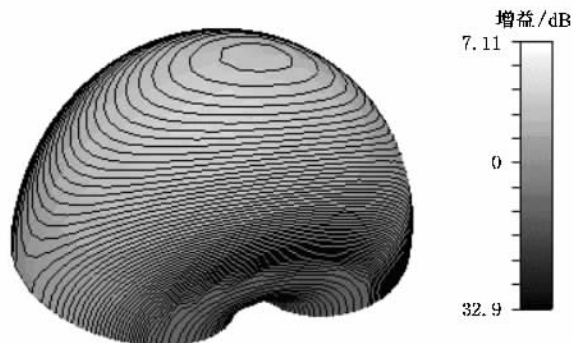


图 8 加载左手介质的微带天线的远场辐射分布图

此外,为了验证基板加载左手介质的微带天线的各项性能,下面将其与传统微带天线作对比.一般情况下,当基板介电常数为 2.2 时,工作于 4.70 GHz 的微带天线的纵向尺寸约为半个波长,也就是 21.52 mm,带宽约 2.5%,增益 7 dB 左右^[16].仿真实验表明,基板中加载左手介质后,微带天线纵向尺寸仅为 13.36 mm,带宽为 3.84%,增益为 7.11 dB.可见,左手介质的后向波效应将微带天线纵向尺寸减小了 37.92%,且没有损失带宽、增益等性能指标.

5. 结 论

本文基于宽频带、电小尺寸、色散稳定的方形环

左手介质,设计了具有后向波效应的微带天线基板,对微带天线的纵向波进行相位补偿,探讨利用后向波效应减小微带天线纵向尺寸的可行性和实用性.传输线分析模型和数值仿真实验都表明,利用后向波效应能够使得微带天线小型化,且将其纵向尺寸减小了 37.92%,突破了传统微带天线的半波长尺寸设计要求的限制,而且小型化后的天线在带宽、增益等性能方面并未降低.研究结果表明,微带天线的这项小型化技术具有较高的应用前景和推广价值.

感谢 CST 公司为本课题研究提供 CST Microwave Studio 三维仿真软件包及大量的技术支持.

-
- [1] Smith D R, Kroll N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2933
- [2] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [3] Zhuang F L, Zhao Q, Liu Y H *et al* 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330
- [4] Zhao Q, Zhao X P, Kang L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese) [赵 乾、赵晓鹏、康 雷 2004 物理学报 **53** 2206]
- [5] Kang L, Zhao Q, Zhao X P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3379 (in Chinese) [康 雷、赵 乾、赵晓鹏 2004 物理学报 **53** 3379]
- [6] Engheta N 2002 *IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.* **1** 10
- [7] Li Y, Ran L, Chen H *et al* 2005 *IEEE Trans. Microw. Theor. Techniq.* **53** 1522
- [8] Lo Y T, Solomon D, Richards W F 1979 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **27** 137
- [9] Xu W, Li L W, Yao H Y *et al* 2005 *J. Electromag. Wave Appl.* **19** 2033
- [10] Mahmoud S F 2004 *IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.* **3** 19
- [11] Wu M F, Wu Q, Meng F Y *et al* 2005 *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf.* **1** 23
- [12] Tretyakov S A, Ermutlu M 2005 *IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.* **4** 266
- [13] Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2194 (in Chinese) [孟繁义、吴 群、吴 健 2006 物理学报 **55** 2194]
- [14] 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]
- [15] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **51** 1516
- [16] Garg R, Bhartia P, Bahl I *et al* 2001 *Microstrip Antenna Design Handbook* (Norwood : Artech House) Chap 5

Investigation on the miniaturization of the microstrip antenna based on the backward wave property of left-handed medium^{*}

Wu Ming-Feng^{1)†} Meng Fan-Yi¹⁾ Wu Qun¹⁾ Wu Jian¹⁾²⁾

¹⁾ School of Electronics and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

²⁾ Key Laboratory of National Defense Science and Technology of Electromagnetic Environment and Modeling Techniques, Beijing 102206, China)

(Received 5 April 2006 ; revised manuscript received 17 August 2006)

Abstract

Based on a left-handed medium (LHM) structure unit with smooth dispersion, broadband property and of electrical small dimensions, a microstrip antenna (MSA) substrate is designed partially loaded by both the LHM and the conventional dielectric medium for the miniaturization of MSAs, in which the backward wave property of LHM is employed to compensate for the phase shift resulting from waves propagating in the conventional dielectric medium. Both the analytical and numerical results demonstrate that the physical dimensions of a 4.70 GHz MSA have been significantly reduced by 37.92%, and can be no longer proportional to the working wavelength, while its bandwidth and gain can be equivalent to that of a conventional MSA. All above results indicate the practical capability of LHM in the miniaturization of MSAs.

Keywords : left-handed medium, backward wave property, microstrip antenna, miniaturization

PACC : 4110H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60571026) and the Key Laboratory of National Defense Science and Technology of Electromagnetic Environment and Modeling Techniques, China (Grant No. 514860303).

[†] E-mail : wumingfeng2005@yahoo.com.cn