

文章编号: 2095-4980(2013)02-0245-05

大功率微波下超材料的设计和应用

刘 强, 杨 阳, 黄卡玛

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 为使超材料结构在大功率微波下更稳定地工作, 本文介绍的超材料结构由双层打孔金属板构成, 不同于常见的由介质基板构成的超材料结构。通过采用散射参数反演方法计算发现, 超材料结构具有零折射率系数的特性, 并对电场场强分布产生一定的影响。为了解该超材料对天线性能的影响, 在实验过程中, 采用松下 2M244-M1 型磁控管作为微波源来产生大功率微波, 测试结果显示, 半功率宽度由 28° 减小为 15° , 增益提高了 1.7 dB。

关键词: 超材料; 零折射率; 大功率微波

中图分类号: TN61; TN814

文献标识码: A

Design and applications of metamaterials with high power microwave

LIU Qiang, YANG Yang, HUANG Ka-ma

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: A kind of metamaterial structure is designed. Unlike conventional substrate material, the new structure is composed of a double-layer metallic holes array interacting with high power microwave. According to S -parameter retrieval methods, the metamaterial exhibits the near zero refractive index which has an influence on the E -field distribution. Impacts on the antenna design are discussed and experimentally demonstrated while the Panasonic 2M244-M1 magnetron is employed as microwave source. The half-power width get a drastic reduction from 28° to 15° and the antenna gain is improved by 1.7 dB.

Key words: metamaterials; near zero refractive index; high power microwave

1968 年, 前苏联科学家 Veselago^[1]从理论上对媒质的介电常数和磁导率同时为负值的可能性作了预测, 并对电磁波在这种介质中的传播特性作了研究。这种特殊的电磁材料能够呈现出一些自然界里通常所不具备的电磁现象, 比如负折射率、逆 Doppler 现象、逆 Cerenkov 辐射、理想成像等。1996 年和 1999 年, Pendry^[2]等人先后提出负介电常数和负磁导率可以分别通过细金属线阵列和开口谐振环阵列来实现。2000 年, Smith^[3]等人根据 Pendry 提出的理论模型, 用导线阵列和开口谐振环阵列组成的人工周期结构首次实现了双负电磁材料, 并通过棱镜实验进行了验证。自此, 关于超材料的研究逐渐引起了专家和学者的关注。

除了介电常数和磁导率同时为负值的情况, 零折射率作为超材料的另一个分支同样引起了人们的注意。这种材料在改善天线性能方面有广泛应用。2002 年, Enoch^[4]等人通过研究发现, 在适当的条件下, 将辐射源置于由导线阵列组成的超材料结构中, 辐射出来的电磁能量可以在结构周围较窄的范围内得到集中。Zhou^[5]等人将超材料结构置于贴片天线的上方, 用于提高微带天线的增益。然而, 通常涉及的天线设计或超材料结构大部分是用介质基板实现的^[6], 这些材料在应用于大功率, 尤其是功率值大于 100 MW 的高功率情况下, 它们的介质损耗往往是一个不能避免的问题, 损耗造成的升温会引起介质基板的介电常数发生改变^[7-8], 超材料的性能不能保持稳定, 并且成本也是需要考虑的问题。因此, 本文选用纯金属的双层打孔板来构造超材料, 在这种情况下, 就无需考虑介质损耗和介电常数的改变。

本文对设计的超材料的等效折射系数和其周围的电场场强分布进行了计算和分析, 对超材料结构的结构参数对性能的影响也进行了分析。在此基础上, 以磁控管作为微波源, 并将超材料结构置于喇叭天线前方进行测试, 喇叭天线的性能得到了一定改善。

收稿日期: 2012-10-18; 修回日期: 2012-11-30

基金项目: 四川大学青年教师基金资助项目(No. 2011SCU11069); NSAF 基金资助项目(No. 11176017)

1 超材料结构的设计与分析

1.1 超材料结构与特性

如图 1 所示,设计的超材料结构由常见双层圆孔阵列构成,不同于常见的由介质基板实现的人工周期结构,这里的周期孔阵结构是在金属板上实现的。

根据 Pendry 提出的理论模型^[2],可以通过增加金属的有效电子质量来降低材料的有效等离子频率,使其落入微波频段内。材料的有效介电常数由工作频率和有效等离子频率共同决定,当工作频率趋近于有效等离子频率时,有效介电常数趋近于 0。

根据折射率的定义:

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (1)$$

式中: ϵ 为介电常数; μ 为磁导率。当介电常数趋近于 0 时,折射率也同样趋近于 0。

根据折射定律:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (2)$$

式中: θ_i 和 θ_t 分别为入射角和折射角; n_1 和 n_2 分别为入射区域和折射区域的折射率。如果将辐射源嵌入零折射率材料中($n_1=0$),折射波将垂直于材料与空气的交界面($\theta_t=0$),如图 2 所示。

为获得超材料结构的有效折射率,采用文献[9]中提出的散射参数反构方法。以超材料结构的反射特性和有效折射率为优化目标,通过数值计算,优化得到超材料结构的参数,其中单元周期距离 $W=77 \text{ mm}$,圆孔半径 $R=30.5 \text{ mm}$,采用的铝板厚度 $H=4 \text{ mm}$,双层铝板之间的距离 $S=111 \text{ mm}$ 。采用有限元法对周期单元结构进行计算,得到周期单元的散射特性,即反射参数 S_{11} 和传输系数 S_{21} 的幅度和相位,如图 3 所示。

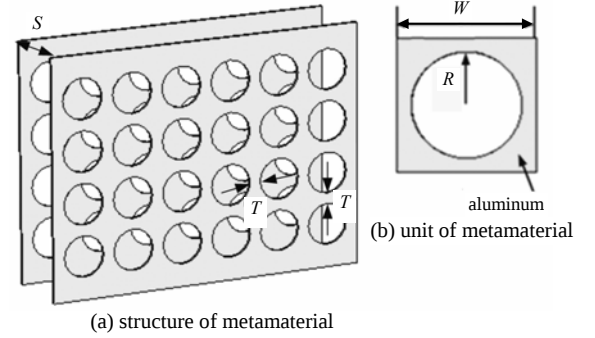


Fig.1 Structure of metamaterial

图 1 超材料结构

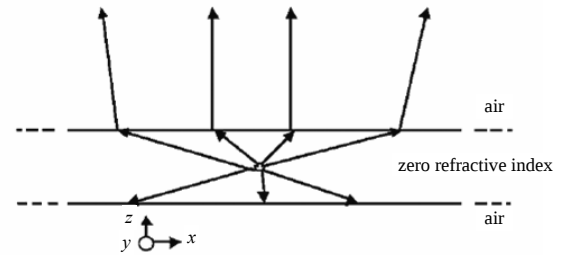


Fig.2 Radiation based on zero refractive index material

图 2 零折射率材料定向辐射示意图

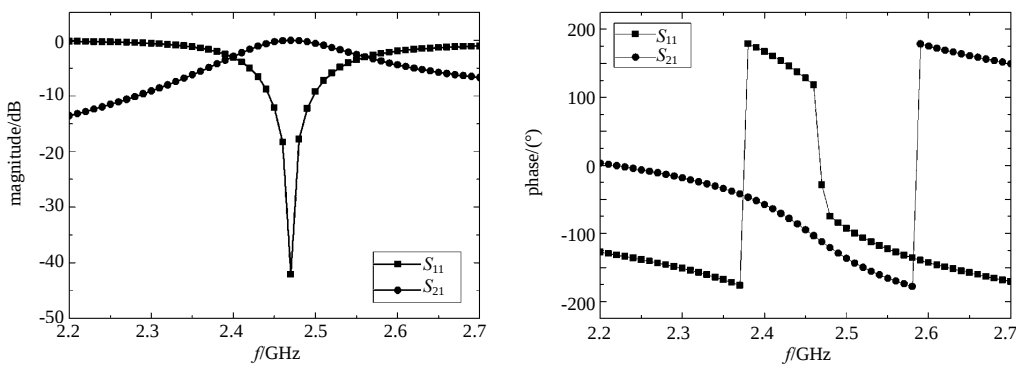


Fig.3 Magnitudes and phases of S_{11} and S_{21}

图 3 反射参数 S_{11} 和传输系数 S_{21} 的幅度和相位

将传输系数和反射参数的值代入反构函数,得到需要的有效折射率。

$$n = \frac{1}{kd} \arccos \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right] \quad (3)$$

式中: k 为传播常数; d 为超材料结构的厚度,在这里即为 S 。计算出的超材料的有效折射率如图 4 所示。图 4 显示:在 $2.2 \text{ GHz} \sim 2.47 \text{ GHz}$ 之间的有效折射率更趋近于 0,但在输出功率达到 1000 W 的情况下,当频率小于 2.47 GHz 时,超材料结构的反射特性会导致反射波对源造成影响。因此,在设计时应当同时保证反射特性和有效折射率。

1.2 加载超材料的喇叭天线特性

基于超材料结构零折射率的特性,将超材料结构置于角锥喇叭天线正前方,测试超材料结构对电场场强分布和增益的影响。在测试过程中,为减小电磁场向除了正前方外的其他方向的辐射,将喇叭天线和超材料置于一个屏蔽腔中。为减小反射回来的电磁波对磁控管造成影响,在屏蔽腔内壁加置了吸波材料,如图5所示。图5显示了在加或不加超材料结构的情况下不同的电场场强分布。

比较图5(a)和图5(b),发现在双层打孔板之间形成了驻波,双层打孔板的结构表现为一个谐振腔。可以发现,超材料结构内的电场强度得到明显增强,并且电场强度沿口径面的分布相当均匀,最终,电磁波以准平面波的形式向外辐射,平面波的实现更有利于增益的提高。从图5(b)中也可以看到,当电磁波在传播过程中遇到超材料结构时,会有一部分能量被反射回来,为减少反射回来的能量对源的影响,在屏蔽腔内壁设置吸波材料用于吸收反射回来的能量。采用时域有限差分法计算出整个装置的反射参数,如图6所示。

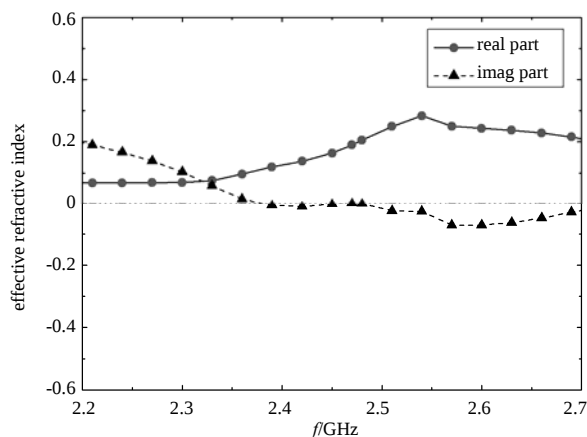


Fig.4 Effective refractive index of metamaterial
图4 超材料的有效折射率

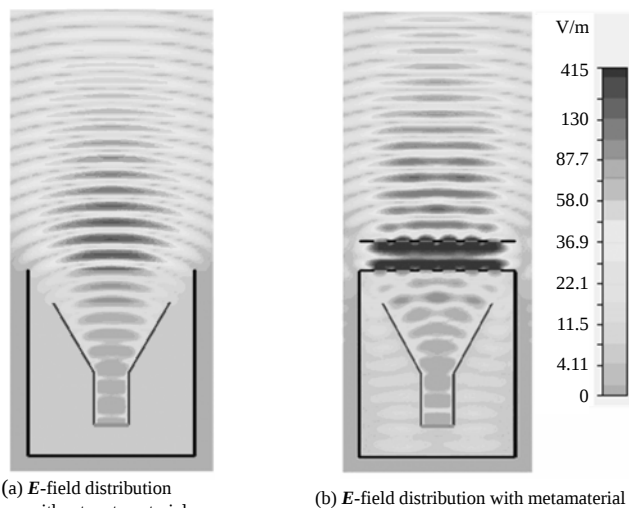


Fig.5 Effects on *E*-field distribution owing to metamaterial
图5 超材料对电场分布的影响

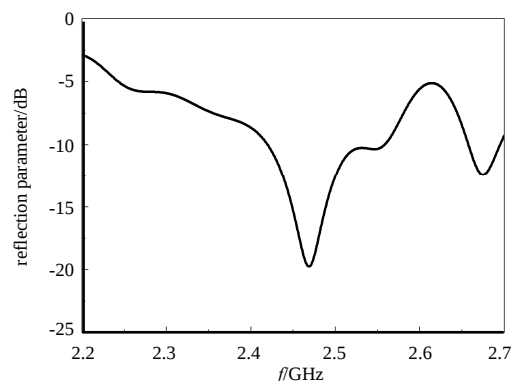


Fig.6 Reflection parameter
图6 反射参数

测试过程中采用磁控管作为微波源,磁控管发射出来的电磁波的振荡频率在 2.47 GHz 处。由图6可以看出,频率为 2.47 GHz 处的反射参数为 -19.7 dB,在这个频点,超材料显示出良好的传输性,再结合吸波材料对反射能量的作用,即使输出功率为 1 000 W,其被反射回来的能量对磁控管的影响也是很微小的,这样可以保证磁控管正常工作。

为保证整个装置工作的稳定性,还需要研究超材料结构尺寸的变化对整个装置性能(如谐振频率和增益)的影响。本文主要关注圆孔半径 R 、打孔板间距 S 和孔间距 D 这 3 个尺寸参数。

图7(a)显示,在 $S=111$ mm 和 $R=30.5$ mm 时,2 个相邻圆孔间的距离 D 的变化对谐振频率和增益没有太大的影响。图7(b)和图7(c)表明,当板间距 S 和圆孔半径 R 发生变化时,谐振频率也会随之变化。图7(b)显示,当 $D=16$ mm 和 $R=30.5$ mm 时,随着 S 以 5 mm 的步长增加时,谐振频率从 2.56 GHz 下降到 2.38 GHz,但频带内增益的最大值基本不变。图7(c)表明,圆孔半径 R 无论是对谐振频率还是增益都有非常明显的影响。在 $D=16$ mm 和 $S=111$ mm 时,当 R 以 5 mm 的步长增加时,谐振频率下降,增益最大值由 20.67 dBi 减至 17.06 dBi。

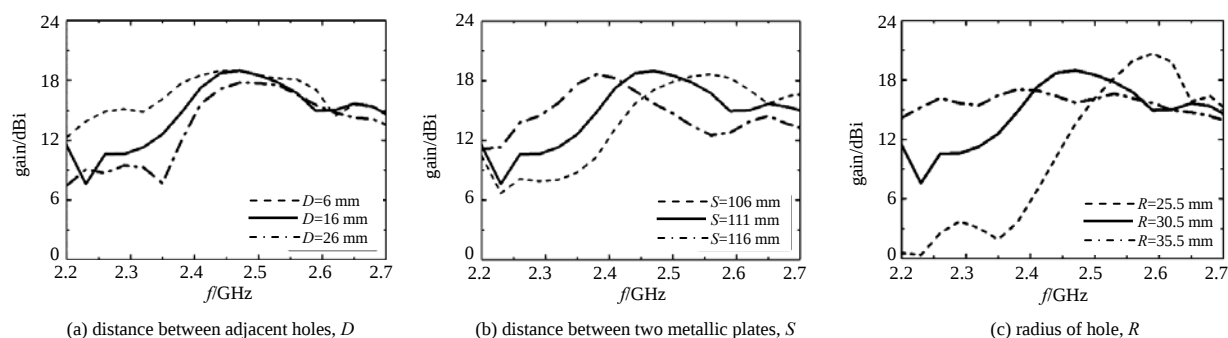


Fig.7 Effects on gain due to different dimensional parameters

图 7 不同尺寸对增益的影响

2 测试和讨论

如图 8(a)所示,由双层打孔金属板构成的超材料结构置于喇叭天线正前方,图 8(b)为馈电波导和作为微波源的松下 2M244-M1 型磁控管。在实验中采用一个脊喇叭作为接收天线,这个接收天线通过 20 dB 衰减器与功率计相连,功率计的最大测量值为 +37 dBm。考虑到磁控管在 2.47 GHz 处的峰值功率为 1 000 W,为保证功率计的安全和接收设备处于天线的远场区域,将接收设备置于距离发射天线 18 m 处。

受实验条件限制,波瓣测试宽度只能从 -40° 到 40° ,将测试天线置于转台上以 2° 为单位进行转动。由于磁控管的振荡频率为 2.47 GHz,因此,主要对 2.47 GHz 处的结果进行分析。在加上超材料和不加超材料 2 种情况下,测得功率计在 2.47 GHz 处的最大测试值为 7.52 dBm 和 5.82 dBm。这说明由于超材料的作用,喇叭天线在 2.47 GHz 处的增益提高了 1.7 dB。测试天线的 H 面辐射方向图如图 8(c)所示,很明显,超材料有减小半功率宽度的作用,与没有加超材料相比,加上超材料后的半功率宽度从 28° 减小为 15° 。

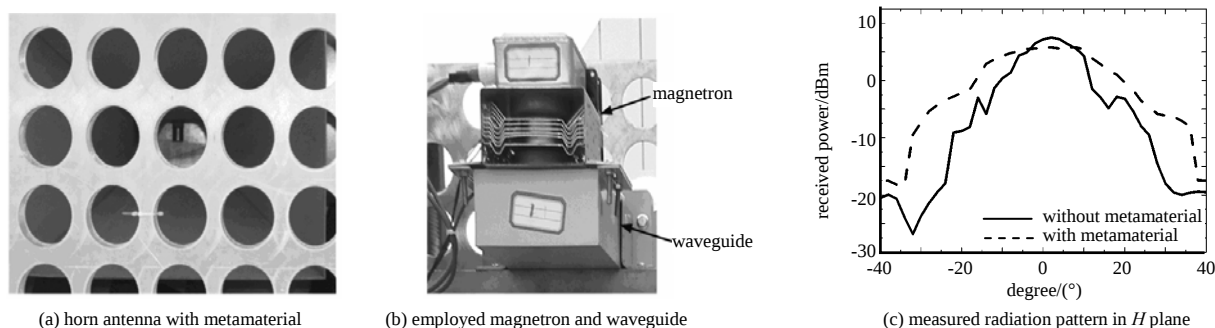


Fig.8 Prototypes and results in the measurement

图 8 测试实物及测试结果

很明显,整个超材料的口径面积比喇叭天线的口径面积略大一些,但即使整个超材料的口径都分布有电场,如图 5(b)所示,从理论上也不可能令这个喇叭天线性能得到很大提高,因此,增益在 2.47 GHz 处提高 1.7 dB 和半功率宽度的剧烈变化已展示了超材料对天线性能的改善。

3 结论

为实现超材料在大功率微波下的稳定性,本文提出的超材料由双层打孔金属板构成。通过数值计算了超材料的零折射率和超材料对电场强度分布的影响。在测试过程中,采用磁控管实现大功率微波输出,并展示了超材料对天线性能的改善作用,由于受辐射口径尺寸的限制,增益提高不多,但半功率波瓣宽度由 28° 减小至 15° 。

参考文献:

- [1] Veselago V G. The Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968,10(4):509-514.

- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Low frequency plasmons in thin wire structures[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1998, 10(22):4785–4809.
- [3] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18):4184–4187.
- [4] Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P, et al. A metamaterial for directive emission[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(21):1–4.
- [5] Zhou H, Pei Z, Qu S, et al. A planar zero-index metamaterial for directive emission[J]. Journal of Electromagnetics Waves and Applications, 2009, 23(7):953–962.
- [6] 余川飞, 李彪. 一种具有宽带宽角特性的改进型准八木天线[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(1):39–43. (SHE Chuanfei, LI Biao. A novel quasi-Yagi antenna with broad-band and broad-angle characteristics[J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(1):39–43.)
- [7] Wu Q, Pan P, Meng F Y, et al. A novel flat lens horn antenna designed based on zero refraction principle of metamaterials[J]. Appl. Phys. A: Materials Science & Processing, 2007, 87(2):151–156.
- [8] Jerzy Krupkay, Krzysztof Derzakowskiz, Bill Riddlex, et al. A dielectric resonator for measurements of complex permittivity of low loss dielectric materials as a function of temperature[J]. Meas. Sci. Technol., 1998, 9(10):1751–1756.
- [9] Smith D R, Vier D C, Koschny T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. Phys. Rev. E, 2005, 71(3):036617(1–11).

作者简介:



刘 强(1987–), 男, 重庆市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波系统与工程.
email:yyang@scu.edu.cn.

杨 阳(1983–), 男, 重庆市人, 讲师, 主要从事微波测量、微波化学等方面的研究工作.

黄卡玛(1964–), 男, 重庆市人, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场理论、微波化学等方面的研究工作.