

基于超材料的椭圆波束馈源技术研究

刘磊, 何应然, 张文静

(中国电子科技集团 第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 针对传统工程用椭圆波束馈源带宽窄、加工难度大等问题, 设计了一种新型的椭圆波束馈源, 即在角锥喇叭内壁加载超材料层, 使得馈源在水平极化和垂直极化两个极化辐射相同椭圆外形的波束; 根据阻抗匹配原理, 当电磁波水平极化和垂直极化入射时波阻抗的乘积与真空中波阻抗乘积相等时, 超材料单元的性能达到最优, 将优化后的超材料单元周期排布为超材料层加载到喇叭内壁, 即可形成椭圆波束馈源; 在 Grasp 软件中仿真计算了该馈源作为前馈馈源和后馈馈源使用时, 反射面天线的电气性能; 仿真结果表明: 在工作频段 10.95~14.5 GHz 内, 基于超材料的椭圆波束馈源实现了良好的极化波束等化, 波束宽度比在 0.9~1.14 之间, 驻波小于 1.55; 前馈照射反射面时, 天线效率在 65%~75% 之间, 交叉极化电平低于 -30 dB; 后馈照射反射面时, 天线效率在 61%~72% 之间, 交叉极化电平低于 -30 dB, 验证了馈源设计的可行性。

关键词: 椭圆波束; 馈源; 超材料; 波束等化

Metamaterial-based Feed Antenna with Elliptical Radiation Beam

Liu Lei, Zhang Wenjing, He Yingran

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Considering that the traditional elliptical beam feed is narrow bandwidth and is difficult to fabricate, a new type of elliptical beam feed is designed in this paper. The novel feed is obtained by loading metamaterial layers on the inner wall of a pyramid horn. This method makes the beams radiated by the feed show similar elliptical shape for both the horizontal and the vertical polarization. According to the impedance matching principle, when the product of the wave impedance in horizontal and vertical polarization is equal to the product of wave impedance in vacuum, the performance of the metamaterial unit cell is optimized. By periodically loading the inner wall of the horn with the optimized unit cells, the metamaterial layer is formed and the elliptical feed horn is achieved. The elliptical feed can be used as either prime focus feed or second focus feed. For both cases, the radiation performances are verified using GRASP software. The simulation results show that in the operating frequency band of 10.95~14.5 GHz, the elliptical radiations of the feed are achieved. The beamwidth ratio is between 0.9 and 1.14, and the standing wave ratio is less than 1.55. When the feed is used for a prime focus reflector, the antenna efficiency is between 65% and 75%, and the cross-polarization level is lower than -30 dB. When the feed is used for a second focus reflector, the antenna efficiency is between 61% and 72%, and the cross-polarization level is lower than -30 dB. These results verify the feasibility of the feed design.

Keywords: elliptical beam; feed; metamaterial; beam equating

0 引言

近年来, 世界卫星技术飞速发展, 每当出现紧急情况, 如自然灾害等使地面通讯中断, 卫星移动通信^[1]总会第一时间到达现场, 保障通信通道的畅通。而天线技术作为卫星移动通信技术发展的重中之重, 更是受到极大的重视, 椭圆波束天线^[2-4]由于其天线效率较高、副瓣较低且天线剖面较低, 便于携带和移动, 受到研究人员的广泛关注。目前椭圆波束天线多以赋形双反射面天线为主, 而椭圆波束馈源直接照射反射面的天线由于馈源性能的制约应用较少。

设计椭圆波束馈源的技术方案主要有以下 3 种: 1) 椭圆波纹喇叭技术, 这种喇叭加工难度大; 2) 椭圆形或矩形波导

内介质锥加载技术^[5], 这种馈源的介质锥不容易安装固定; 3) 矩形喇叭内壁开槽技术^[6-7], 这种喇叭带宽窄, 开槽尺寸无规律, 研究设计较为复杂且用途单一。

普通角锥喇叭的波束不等化, 而采用超材料技术^[8-10]设计超材料片层, 将片层贴装于角锥喇叭内壁, 可以调节边界的阻抗特性, 从而获得混合平衡^[11-14]模式。

故设计一种基于超材料的椭圆波束馈源, 工作频率为 10.95~14.5 GHz。通过在角锥喇叭内壁加载超材料层, 产生极化波束等化较好的椭圆波束, 即水平极化和垂直极化的波束接近一致。结果表明, 与传统的馈源相比, 本文基于超材料的椭圆波束馈源, 极化波束等化好, 且依照此方法设计椭圆波束馈源具有椭圆比可调的优点, 具有广阔的应用前景, 我们以椭圆比为 2:1 馈源研究作为设计实例进行说明。

基于这种新型馈源的反射面天线系统具有结构紧凑的特点, 可以应用于移动载体卫星通信中, 显著降低天线系统的高度。

1 椭圆波束馈源设计原理

一般角锥喇叭的辐射波束为椭圆波束, 但是其两种极化的

收稿日期: 2018-01-05; 修回日期: 2018-02-05。

基金项目: 河北省重点研究项目(16960404D)。

作者简介: 刘磊(1993-), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事电磁超材料方向的研究。

张文静(1962-), 男, 山东莱西人, 研究员, 硕士研究生导师, 主要从事电磁场与微波方向的研究。

波束等化特性较差,交叉极化电平高,不能用作馈源照射反射面天线辐射椭圆波束。文章所研究的基于超材料的椭圆波束馈源是在角锥喇叭内壁加载一层超材料层,超材料层的原理是通过优化设计超材料单元,使满足阻抗匹配条件,周期排列构建电磁平衡表面,加载到角锥喇叭内壁。使得加载超材料层后的角锥喇叭具有类似波纹喇叭的特性,传输类平衡混合模式,此时X极化和Y极化的辐射波束近似一致,且交叉极化电平也会降低。

同时,其椭圆比调节是通过控制喇叭口面长宽比。在大量研究设计经验表明,小张角喇叭更易利用超材料层实现极化波束等化,故设计喇叭过程中需根据喇叭口面尺寸调节喇叭长度,使得喇叭张角尽量小。然后根据不同口面尺寸对超材料层的贴片尺寸,排列间距、介质厚度等参数进行优化,对椭圆比为2:1的超材料角锥喇叭馈源进行研究,并将其分别作为前馈源和后馈源照射反射面天线进行电性能验证。

2 馈源设计

2.1 超材料单元设计优化

本文设计的超材料单元采用类蘑菇型的超材料结构,采用上层周期排布金属贴片,中层介质层加导电通孔,和底层接地的结构。为了构造电磁平衡表面,对贴片尺寸进行优化。首先初步设计一个梯形贴片形状,贴片单元分为两个矩形贴片拼接在一起,矩形贴片的尺寸参数和中间导电过孔的位置和内径可调,如图1显示了超材料的结构图和贴片单元的平面图。

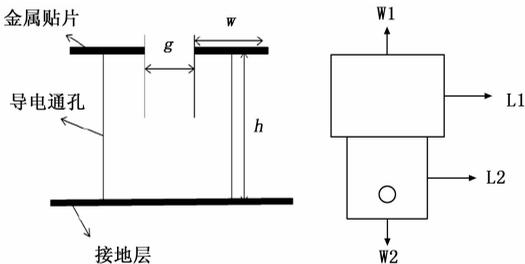


图1 超材料单元结构图

超材料单元设计需满足阻抗条件,下式则为阻抗条件:

$$Z^{TE} \times Z^{TM} = \eta_0^2 \quad (1)$$

$$Z^{TE} = R^{TE} + jX^{TE} = \frac{\eta_0}{\cos\alpha_i} \left(\frac{1 + \Gamma^{TE}}{1 - \Gamma^{TE}} \right) \quad (2)$$

$$Z^{TM} = R^{TM} + jX^{TM} = \eta_0 \cos\alpha_i \left(\frac{1 + \Gamma^{TM}}{1 - \Gamma^{TM}} \right) \quad (3)$$

Z^{TE} 和 Z^{TM} 分别为喇叭内壁TE模式和TM模式的表面波阻抗,为真空中波阻抗, α 为照射角, Γ^{TE} 和 Γ^{TM} 分别为TE模式和TM模式传输的反射系数。此设计需要对超材料单元的所有尺寸参数进行优化调整,计算出两种模式的波阻抗使其满足式(1)。

根据本文工作频率的要求,初步确定超材料单元的尺寸(十分之一工作波长左右),对贴片单元的初步模型进行优化仿真,贴片材质为铜,介质层材料为Rogers RT5870,介电常数为2.33,初始尺寸定为 $W1=1.8$ mm, $W2=1.1$ mm, $L1=L2=1.5$ mm,介质层厚度 $h=2.54$ mm,介质顶层尺寸为 3.1 mm \times 3.1 mm。在此基础上对参数进行优化。

文章采用软件仿真的办法得到超材料单元的阻抗特性。使用全波电磁仿真软件,可以得到单元模型对TE和TM极化波

的反射系数。根据公式(2)和公式(3),可以计算出波阻抗和,进而求出波阻抗乘积 K ,并相对真空波阻抗进行归一化,若 K 值为1则说明实现阻抗条件,允许 K 值有一定的偏移,下图为优化贴片尺寸后的阻抗匹配曲线。

在优化过程中发现贴片尺寸变化时有如下规律:初始尺寸的 $W1$ 和 $W2$ 不变,变化 $L1$ 和 $L2$,发现 $L1$ 单独增大时,阻抗匹配曲线低频处向左平移,谷值下降,高频处基本不变(低频和高频分别指曲线与阻抗乘积为1直线相交处的低频端和高频端,谷值指曲线中段频率处坡度较缓部分的数值大小); $L2$ 单独增大时,阻抗匹配曲线向左平移,谷值下降,高频处基本不变。 $L1, L2$ 保持不变,将 $W1$ 和 $W2$ 分别变化时,发现 $W1$ 增加时,曲线高频处向左平移,低频处基本不变,且曲线谷值下降; $W2$ 增加时,曲线整体向左平移,幅度较小,且对谷值影响很小。

综合以上4个尺寸对阻抗匹配影响的研究规律,进行针对性的尺寸调节,找到一组在工作频带内阻抗匹配较好的贴片尺寸,此时超材料金属贴片的各个边的尺寸分别为 $W1=1.2$ mm, $W2=1.6$ mm, $L1=L2=1.45$ mm。

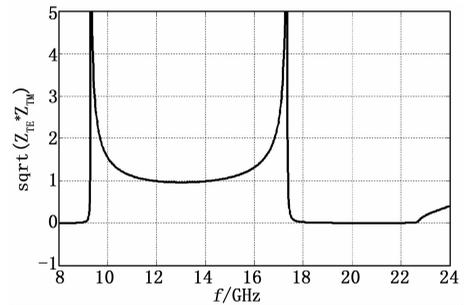


图2 阻抗匹配曲线

由图2可以看出,在10~16 GHz频率之间包含工作带宽,优化后波阻抗乘积 K 的值在1附近,满足阻抗匹配条件,可以周期排列成超材料层加载到喇叭内壁。

2.2 馈源辐射特性研究

利用在角锥喇叭内壁加载超材料层的方法设计椭圆波束馈源具有椭圆比可调的特点。设计原则:椭圆比与喇叭长宽比相对应,首先根据照射角要求确定喇叭口面大致尺寸,根据椭圆比确定长宽比,然后根据口面大小,调节喇叭长度,在小张角情况下较易实现波束等化,根据经验表明角锥喇叭内壁贴加超材料层后, $\varphi=90^\circ$ 面比 $\varphi=0^\circ$ 面更易实现波束等化,故主要针对 $\varphi=0^\circ$ 面波束特性进行改善。

设计喇叭尺寸为辐射口面 30 mm \times 60 mm,长度为 53 mm,馈电口为方波导(用来产生双极化),尺寸为 19.05 mm \times 19.05 mm,将优化后的超材料贴片单元周期排列,加载到喇叭内壁,在超材料层的边缘部分,保留贴片单元的完整性,避免金属贴片与喇叭内壁重合。

设定波束等化特性判定标准:首先电场分量沿 X 方向为 X 极化,电场分量沿 Y 方向为 Y 极化。超材料喇叭在其特征频点处-10 dB波束宽度特性:分别记录了各个特征频点处,两种极化(X 极化和 Y 极化)的两个平面($\varphi=0^\circ$ 面和 $\varphi=90^\circ$ 面)的波束宽度,并将同一平面的 Y 极化的波束宽度与 X 极化的波束宽度的比值作为波束等化的判断依据进行画图,这一比值越接近于1说明波束等化的特性越好。将同一极化的 90° 面波束

宽度与 0° 面波束宽度的比值定为椭圆比，椭圆比在 2:1 附近即达到设计目标。图 3 至图 5 为截取的 3 个特征频点的不同极化不同平面的方向图综合。3 个频点分别为频带内的低频、中频和高端，并依据设定的波束等化特性判定标准，计算了频带内极化波束等化曲线，分别用不同种类的线条进行画图。

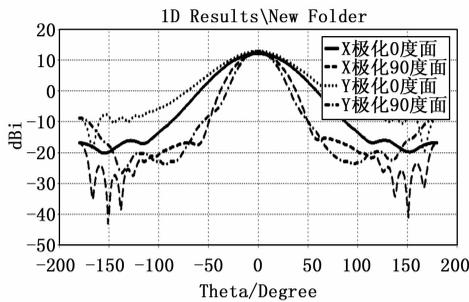


图 3 10.95 GHz 方向图

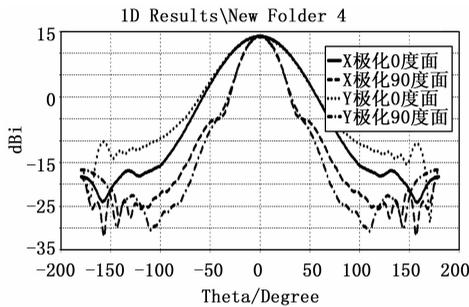


图 4 12.5 GHz 方向图

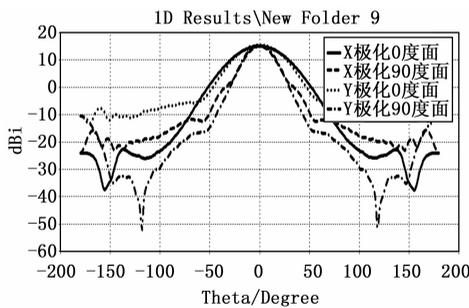


图 5 14.5 GHz 方向图

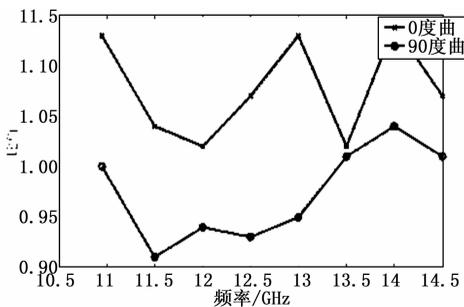


图 6 波束等化曲线

由图 3、图 4 和图 5 中可以看出馈源在工作频带内低端频率、中心频率、高端频率的波束等化较好，并且椭圆比在 2:1 左右，达到本文设计要求，图 6 中两条曲线分别为 $\varphi = 0^\circ$ 面和 $\varphi = 90^\circ$ 面中两个极化的 -10 dB 波束宽度的比值，通过图 6

可以直观看出，在全频带内，几个特征频点处波束宽度比值均在 1 附近，上下浮动在正负 0.14 范围以内，说明超材料角锥喇叭馈源极化波束等化较好，达到预期目标。并且从图中也可以看出 $\varphi = 90^\circ$ 面比 $\varphi = 0^\circ$ 面波束等化要好，后期深入研究时可以针对性的改善 $\varphi = 0^\circ$ 面的波束特性。

观察图 7，馈源在频带内的驻波小于 1.55，其中 Y 极化驻波低于 X 极化，且两种极化驻波均随着频率的增加逐渐减小，频率在 12.25 GHz 以后驻波逐渐降低到 1.2 以下。并且经过计算统计，在频带内馈源的交叉极化电平小于 -21 dB。

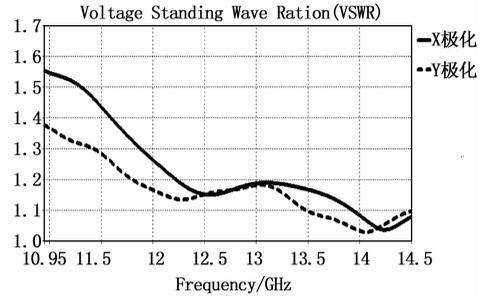


图 7 驻波曲线

综上所述，利用超材料层加载到角锥喇叭内壁的思路是可行的。这种方法设计的椭圆波束馈源在工作频带 10.95 GHz~14.5 GHz 内可以产生极化等化较好的椭圆波束，并且驻波较低，基本达到预期的椭圆比，实现了设计要求。

3 馈源照射反射面电能应用验证

(1) 将设计的椭圆比为 2:1 的椭圆波束馈源作为前馈馈源照射反射面。设计椭圆形主面的尺寸，综合馈源各特征频点的 $\varphi = 0^\circ$ 面和 $\varphi = 90^\circ$ 面的 -10 dB 波束宽度，取其中间值定为馈源的照射角。取馈源的 -10 dB 照射角为 $23^\circ \times 45^\circ$ ，利用反射面参数的几何关系，设计前馈反射面尺寸为长轴 1 m，焦距比为 0.6，短轴为 0.5 m。将喇叭的方向图从 CST 软件中导入 Grasp 软件中进行计算天线的辐射方向图，并将方向图中的增益、副瓣、交叉极化等参数提取出来，计算天线的效率、副瓣电平、交叉极化电平等电参数，与现有的椭圆波束天线的性能进行对比，验证馈源设计的性能和应用前景。

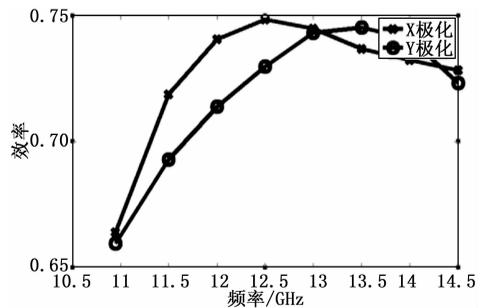


图 8 前馈天线效率

可以看出天线效率在 65% 到 75% 之间，在频带内，天线效率在低频处相对较低，随着频率升高逐渐增大，且 X 极化天线效率稍高于 Y 极化。交叉极化电平低于 -30 dB，在整个频带内交叉极化电平先下降后升高。在低频处 Y 极化交叉极化电平相对较低，在高频处相对较高，天线的第一副瓣电平低于 -18 dB。

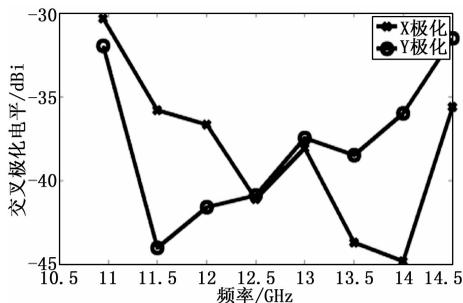


图9 前馈天线交叉极化电平

2) 将椭圆波束馈源作为后馈馈源照射反射面。设计一种标准卡塞格伦天线,照射角保持不变为23度×45度,根据卡塞格伦天线的几何参数的关系,计算得天线主面尺寸为10 m×5 m,副面尺寸1 m×0.5 m,长轴焦距比为0.33,离心率3.4,图10和图11为仿真去除副面遮挡后的天线的效率和交叉极化电平曲线。

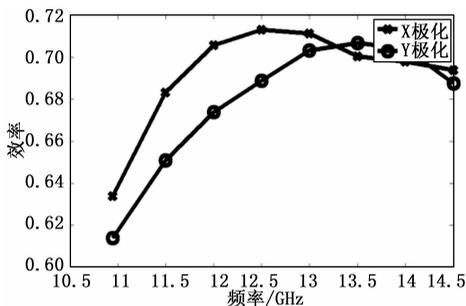


图10 后馈天线效率

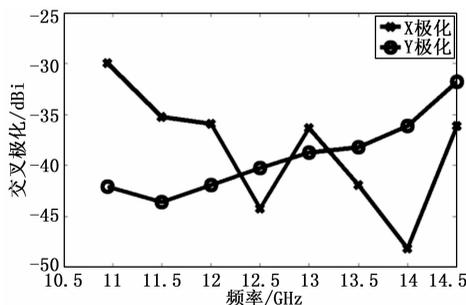


图11 后馈天线交叉极化电平

由图10和图11可以看出,后馈标准卡塞格伦天线的天线效率在61%到72%之间,在极化方面看,X极化时效率比Y极化时效率要高,表明极化波束不是完全等化,存在微小误差,与馈源仿真结果可以对应。在整个频带看,在低频处稍差,在频率11.5 GHz以上天线效率均超过65%。在频带内交叉极化电平低于-30 dB,在低频处,Y极化交叉极化电平相对要低,高频处相对较高,第一副瓣电平低于-17 dB。后馈标准卡塞格伦天线的电性能指标由于副面遮挡和副面漏失等原因相对于前馈反射面天线有些许降低。

以2011年中国电子科技集团第五十四研究所刘兴隆等人设计的赋形双偏置椭圆波束天线为例,轴比为2:1,天线主反射面尺为550 mm×1 100 mm,在天线发射和接收的中心频率天线效率分别达到63%和66.29%。将本文设计的椭圆比2:1的前馈天线与之相比,效率要优,后馈天线效率与之相

比,在低频处稍低,在高频处要高。但利用基于超材料的椭圆波束馈源照射反射面天线,结构简单,同时副瓣电平和交叉极化电平也相对较低,具有一定的技术优势。

4 结束语

设计了一种基于超材料的椭圆波束馈源,利用满足阻抗匹配条件的超材料层,加载到喇叭内壁调节电磁波的辐射特性,相对于传统椭圆波束馈源设计方法,具有带宽大、加工简单的优点。对馈源电性能进行仿真验证:馈源在工作频带内,极化波束等化良好,同平面两种极化的波束宽度比在0.9~1.14之间,驻波在1.55以下。照射反射面,前馈时天线效率在65%~75%之间,交叉极化电平低于-30 dB;后馈照射反射面时,天线效率在61%~72%之间,交叉极化电平低于-30 dB。馈源性能和天线性能较好,验证了设计的正确性,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] Zhou H, Jong M G, Lo. Evolution of Satellite Communication Antennas on Mobile Ground Terminals [J]. International Journal of Antennas and Propag. 2015, 1-14.
- [2] 朱翠肖, 椭圆波束天线设计 [J]. 无线电通信技术, 2003, 29 (2): 45-46.
- [3] 刘兴隆, 杜彪, 秦顺友, 等. 大轴比椭圆波束天线过度函数的研究 [J]. 中国电子科学院学报, 2012 (1).
- [4] 张魏, 邢锋, 雷雪, 等. 基于NURBS建模的椭圆波束赋形天线设计 [J]. 现代雷达, 2016 (4): 64-67.
- [5] ERIK Lier, YAHYA Rahmat-Samii, SEMBIAM R. Reng-arajan Application of Rectangular and Elliptical Die-core Feed Horns to Elliptical Reflector Antennas [J]. Transactions On Antennas And Propagation. IEEE 1991, 39 (11).
- [6] Syota Yamamoto, Hiroyuki Deguchi, Mikio Tsuji Compact groove-loaded rectangular horn with elliptical beam for orthogonal polarization use [J]. IEEE, 2011, 78-1-4244-9566-5/10.
- [7] Hiroyuki Deguchi, Hirotsugu Urata, Mikio Tsuji et al. Multiple-Step Rectangular Horn with Two Orthogonal Sectoral Tapers for Elliptical Beam [Z].
- [8] 张庆乐, 新型电磁超材料在天线中的应用 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [9] 陈呈, 人工电磁材料近零折射率特性的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [10] 郭智, 基于电磁超材料的微波天线的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014, 32-38.
- [11] PER-Simon Kildal. Metasurfing Since 1987-A Personal Story Involving, Soft and Hard Surfaces, EBG Surface cloaking, Gap Waveguides and Mass Production [J]. IEEE, 2014, 978-1-4799-3540-6/14.
- [12] Qi Wu, Clinton P. et al. Shaw Inhomogeneous Metasurfaces With Engineered Dispersion for Broad-Band Hybrid-Mode Horn Antennas [J]. IEEE Transactions On Antennas And Propagations, 2013, 61 (10).
- [13] AlùA. First-principles homogenization theory for periodic metamaterials [J]. 2011, 84.
- [14] Smith D. R, Pendry J. B, Wiltshire M. C. Metamaterials and negative refractive index Science, 2004, 305, 788-792.