

一种新型基于负折射电路的类螺旋天线结构

项 阳^{1,2}, 钱祖平³, 鲍峻松³, 吴保中³

(1. 总参第 63 研究所, 江苏南京 210007; 2. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096;
3. 解放军理工大学通信工程学院, 江苏南京 210007)

摘 要: 文章基于负折射周期电路结构, 设计了一种宽带的类螺旋天线结构. 该天线由两层介质板以及在其上构建的六个形似工字的谐振单元组成, 通过 50 欧姆同轴馈电. 相对螺旋天线, 它构建更加方便. 仿真和测试结果表明这种天线相对带宽高达 30% 以上, 在频带宽度内有类似螺旋天线的三个辐射模式出现, 增益均在 5dB 以上, 其中中间模式具有全向辐射特性.

关键词: 负折射; 类螺旋; 辐射模式

中图分类号: TN81 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2009)12-2766-04

A Novel Analogy-Helix Antenna Structure Based on Negative Refraction Circuit Mode

XIANG Yang^{1,2}, QIAN Zuping³, BAO Junsong³, Wu Baozhong³

(1. The 63rd Research Institute of The General Staff Headquarters, Nanjing, Jiangsu 210007, China;
2. The State Key Laboratory of Millimeter Wave, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;
3. Institute of Communication & Electronics, PLA, University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: Based on negative refraction circuit mode, A novel broadband analogy helix antenna feeding by 50 ohm coaxial line is proposed in this paper, Which is constructed by two layer substrates and six resonance cells being printed on it. Compared to helix antenna, the construction method is more convenience. Measured and simulation results shows that the bandwidth can achieve 30percent, three radiation modes of helix antenna appeared in the bandwidth, and the maximum gain can achieve 5dB.

Key words: negative refraction; analogy-helix; radiation mode

1 引言

1968 年, 前苏联科学家 Veselago 预言: 当介质的介电常数 ϵ 与磁导率 μ 同时为负数时, 物质将表现出如: 逆多普勒效应、逆斯涅尔定律以及逆契仑可夫辐射等^[1] 不寻常特性. 20 世纪 90 年代, 美国科学家 Smith 用细金属导线阵列和开路环谐振器阵列构造出 ϵ 与 μ 同时为负的人工介质, 并其负折射特性进行了实验验证^[2]. 在负折射介质的实际应用方面, Eleftheriades 提出利用在传输线上串电容并电感的方式来实现一维宽带的双负传输线^[3], Caloz 改进了此电路模型, 使用分布元件替代集总元件, 在微带传输线上串入交指电容, 并入短路电感来实现一维的双负传输线^[4], Itoh 教授利用它设计了宽带电桥^[5]. 验证了当传输频率小于中心频率时, 电路的传播常数小于零. 最近, 利用负折射特性小型化微波器件这一领域也引起学者的关注. L. Zhu 利用交指电容和短路电感的不同组合方式, 提高电路的 Q 值, 设计了小

型化的滤波器, 平面尺寸缩减到传统微带滤波器 37%^[6]. 但从实际设计和构造的角度看, 双负结构存在其固有的缺点: 窄频带, 高色散所带来的高损耗. 因此用它来设计具有实际应用价值微波电路难度较大. 但利用负折射周期概念来设计具有辐射特性的结构, 是可行的. 例如用它设计行波结构的漏波天线, 具有可控的方向特性^[7], 用它设计驻波结构的的天线, 具有小型化的优势^[8,9].

文章利用负折射周期结构构造了一种驻波天线, 它具有和螺旋天线类似的模式特性, 但模式随频率的变化规律和螺旋天线刚好相反. 此外, 它拥有螺旋天线不可比拟的带宽特性, 可以在 30% 以上的相对带宽内实现阻抗匹配.

2 工字型天线结构和等效电路

工字型天线结构如图 1 所示, 由两层介质板和空气层组成, 上层介质板的厚度为 h_1 , 空气层厚度为 H , 下

层介质板厚度为 h_2 , 介质板长度为 $subl$, 宽度为 $subw$, 介电常数均为 $\epsilon = 2.2$. 两层介质板的顶面和底面均周期性地覆有贴片, 中间通过探针相连, 探针和贴片组成一个谐振单元. 介质板上的两层贴片在 x 轴方向上的重合面积形成串联电容. 天线采用同轴馈电, 同轴线的特征阻抗为 50Ω . 这种开放式结构有利于电磁能量的辐射. 这样天线结构的等效电路如图 2 所示.

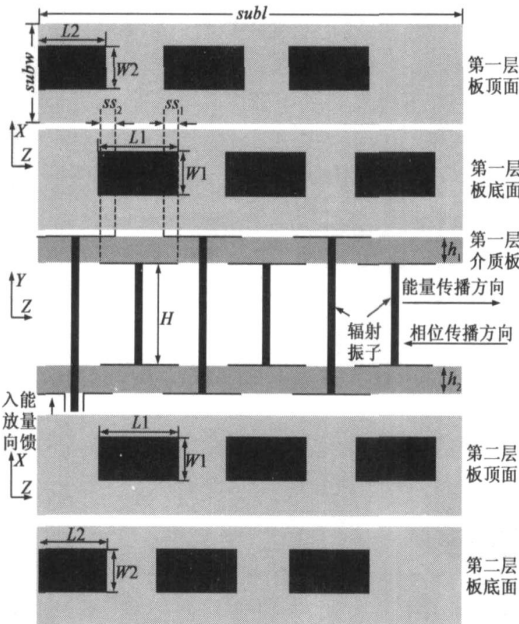


图1 天线模型

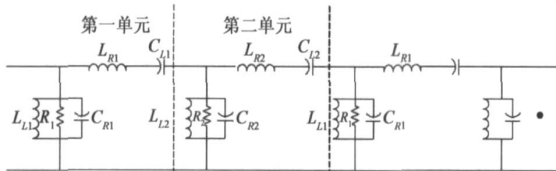


图2 等效电路模型

第一层介质板顶面上的贴片和第二层板底面上的贴片之间的电容等效为 C_{R1} , 探针等效为 L_{L1} , 第一层介质板底面上的贴片和第二层板顶面上的贴片之间的电容等效为 C_{R2} , 探针等效为 L_{L2} . 介质板上顶面和底面贴片沿长边的传输电感等效分别为 L_{R1} 和 L_{R2} , 同层介质板贴片之间的电容分别等效为 C_{L1} 和 C_{L2} . 第一单元的辐射电阻等效为 R_1 , 第二单元的辐射电阻等效为 R_2 . 能量从同轴馈电端口进入周期性振子结构中, 由于贴片和振子的引导作用, 能量沿 z 轴向前传播. 而相位传播方向有可能和能量相同, 也有可能相反.

螺旋天线结构如图 3 所示, 它有轴向和法向两种工作模式, 相位传播方向如图示. 当螺旋半径远小于工作波长时, 天线呈法向工作模式, 此时天线可以等效为一个简单的振子. 当螺旋半径和工作波长可以比拟时, 天

线呈轴向工作模式. 天线的等效电路如图 4 所示.

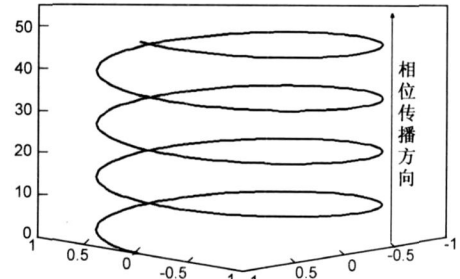


图3 螺旋天线结构

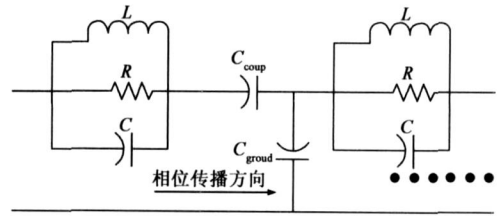


图4 螺旋天线等效电路结构

其中 L 是单圈螺旋线电感, C 是单圈螺旋线的自电容, R 是单圈螺旋的辐射电阻, C_{coup} 是两圈螺旋之间的互电容, 由于互电感相对互电容很小, 因此在等效电路结构上没有体现. 从等效电路的角度, 由于螺旋天线等效电路没有并联的电感, 因此不可能出现负折射的效果. 工字型天线的等效电路决定了其可以工作于负折射区域, 此外, 若等效电路是平衡的, 那么天线的可辐射工作频段(传播常数小于同频率自由空间传播常数, 参见文献[10])就会拓宽.

3 工字型天线设计

为了让工字型天线可以良好的匹配, 就须让其等效电路保持在平衡无阻带状态. 因此必须满足: (1) 单元电路内部满足的特征阻抗匹配条件; (2) 两个单元之间满足的阻抗匹配条件, 否则电路中存在较大的反射^[6]. 单元内部的平衡条件如下:

$$\sqrt{L_{R1}/C_{R1}} = \sqrt{L_{L1}/C_{L1}} = \sqrt{L_{R2}/C_{R2}} = \sqrt{L_{L2}/C_{L2}} = Z_0 \quad (1)$$

单元之间的平衡条件为:

$$\sqrt{L_{R2}/C_{R1}} = \sqrt{L_{L1}/C_{L2}} = \sqrt{L_{R1}/C_{R2}} = \sqrt{L_{L2}/C_{L1}} \quad (2)$$

实际的天线模型中, 相邻探针之间的距离远远小于一个自由空间波长, 调节物理长度 L_1, L_2 可以改变 L_{R1} 和 L_{R2} 的大小, 调节 W_1, W_2 可以改变 C_{R1} 和 C_{R2} 的大小, 调节空气层的高度可以改变并联电感 L_{L1} 和 L_{L2} 的大小, 调节重叠长度 ss_1, ss_2 大小可以调节串联电容 C_{L1}, C_{L2} . 当空气层厚度远远小于波长时 $L_{L1} > L_{L2}$, 因此为了满足阻抗匹配条件, 须有 $C_{L1} > C_{L2}$, 要求 $ss_1 > ss_2$. 物理长度和电容电感数值有严格的理论数值关系, 但

由于根据理论计算得到的模型参数没有考虑到互耦的影响,仿真的结果往往不好.在设计过程中,考虑到实际加工中的问题,一般先固定板材的参数,如板材的介电常数、损耗、高度.再固定空气层的厚度 H ,太小了辐射效率不高,太大了加工稳定度不高.然后让 $L_1 = L_2$ (为使 $L_{R1} = L_{R2}$),保证在 $W_2 > W_1$ (为使 $C_{R1} = C_{R2}$), $ss_1 > ss_2$ 的条件下优化调节电路,使电路的带宽最大.此外为了使天线始终处于辐射状态,就必须使电磁波的相位传播常数小于自由空间的传播常数.这要求探针不能太长,贴片重叠面积也不能太大,另外制作测量的结果表明,如果

表 1 部分结构参数表

L_1	10mm	L_2	10mm
W_1	4.17mm	W_2	4.35mm
ss_1	3.1mm	ss_2	2.9mm
h_1	1.5mm	h_2	1.5mm
$subl$	50mm	$subw$	10mm
H	10mm		

天线的探针没有和贴片完全接触,天线的阻抗特性将更好,最后得到的设计参数如表 1 所示.

在实际制作中,空气层由空气泡沫填充,它和介质板之间通过锡铈合金连接.焊接时,三个短探针不必特意焊接,在插入三个长探针时要保证探针垂直介质板.

4 测量和仿真结果

天线驻波比的测量和仿真结果如图 5 所示,测量结果相对仿真结果稍差,但基本的频带是吻合的.测量结果表明,天线在 4.65GHz 到 6.3GHz 频段内均和 50Ω 阻抗线匹配,相对中心带宽达 30.17%,远高于一般的振子天线和螺旋天线的带宽.且在这一段带宽内,天线辐射特性分别呈现类似螺旋天线的轴向模式,法向模式,以及它们之间的过渡模式,如图 6.

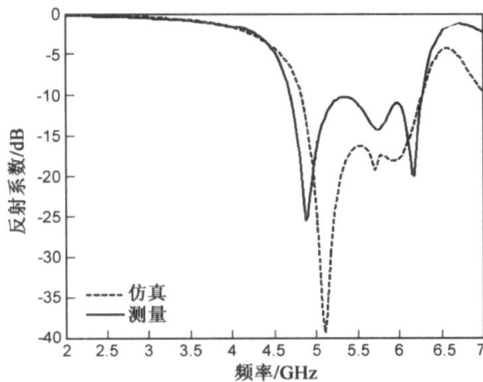


图 5 天线反射参数

天线本质是一个开放式的终端短路的负折射传输线,因此其辐射性能取决于天线上传输电流的分布,负折射电流传输端在天线的低频端,由图 6 可见,当频率为 4.7GHz,天线呈现轴向模式,同时值得注意的是,天线的最大辐射方向在 $-Z$ 轴方向,也即在图 1 的周期结构中,相位的传播方向是往 $-Z$ 方向的,这表明此时天线呈现负折射反向辐射状态.当频率为 5.5GHz 时,天

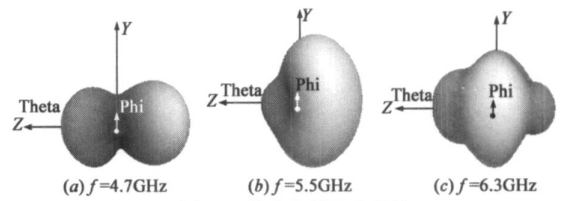


图 6 天线方向图仿真结果

线为轴向模式到法向模式的过渡状态,特点是宽波瓣(见后面讨论),天线仍然处于负折射辐射状态.当频率为 6.3GHz 时,天线为法向模式.值得关注的是,随着频率的变高,天线的辐射模式由轴向模式逐渐过渡到法向模式,这和普通螺旋的变化规律相反.这可能是由于天线的周期探针电感和串联电容值过大造成的.天线在三个频率的两个剖面的测量方向图如图 7、图 8 所示.

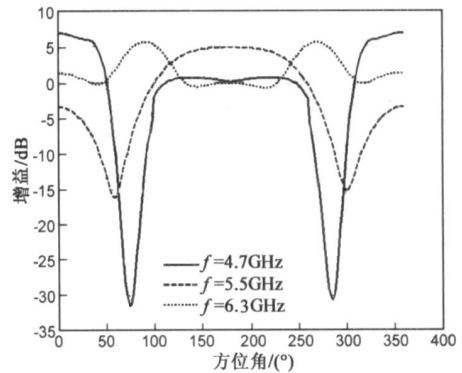


图 7 xoz 剖面方向图

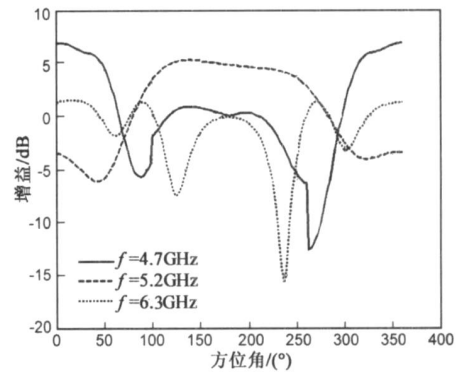


图 8 $yo z$ 剖面方向图

图 7 为 $x\alpha$ 剖面方向图,图 8 为 $yo z$ 剖面方向图.可以看出, $x\alpha z$ 剖面方向图比 $yo z$ 剖面方向图对称性好,当频率为 4.7GHz 时,天线有明显的轴向模式,增益最大值达 6.9dB,天线的后瓣达到 0dB 以上.当频率为 5.5GHz 时,天线的波瓣宽度达到最大,在 $x\alpha z$ 剖面上 0dB 增益以上波瓣宽度为 $\pm 80^\circ$,而在 $yo z$ 剖面上 0dB 增益以上波瓣宽度为 $\pm 100^\circ$,最大增益在 5dB 左右.当频率为 6.3GHz 时,天线呈现明显的法向模式, $x\alpha z$ 剖面的方向增益在 -0.8 dB 到 5.2dB 之间,最大辐射方向沿 x 轴方向.

图 9 到图 11 分别为 4.7GHz, 5.5GHz 和 6.3GHz 时

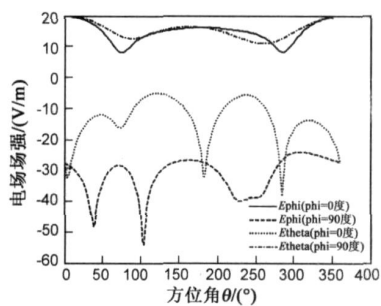


图9 4.7GHz远区电场强度

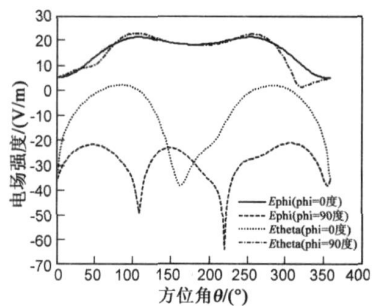


图10 5.5GHz远区电场强度

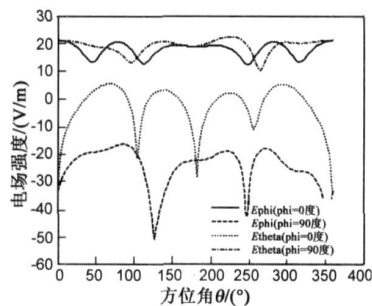


图11 6.3GHz远区电场强度

两个极化方向的场强幅度值。可见不同的方向角, 极化方式不同, 且随频率变化不大。这主要是因为探针和贴片都是辐射体, 但辐射出的电磁场的极化方式不同。

5 结论

负折射电路是目前国际上电磁研究领域最热门的方向之一, 它有着很多不同于常规电路的特性, 利用这些特性可以设计出宽带, 小型化的天线。文章基于这一概念设计了一种类似螺旋天线辐射特性的宽带天线, 得到了轴向, 法向和中间三种辐射模式的方向特性。这种宽带宽波瓣的辐射特性可以很好地应用到无线通信。

参考文献:

- [1] V G Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968 10(4): 509– 514.
- [2] R A Shelby, D R Smith, S Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(6): 77– 79.
- [3] G V Eleftheriades, A K Iyer, P C Kremer. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(12): 2702– 2712.
- [4] C Caloz, T Itoh. Transmission line approach of left handed (LH) materials and microstrip implementation of an artificial LH transmission line [J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2004, 52(5): 1159– 1166.
- [5] Itoh. A compact enhanced bandwidth hybrid ring using an artificial lumped element left handed transmission line section [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(3): 798– 804.
- [6] L Zhu, V K Devabhaktuni, C Wang. CAD of left handed transmission line bandpass filters. Progress in electromagnetics research symposium [C]. Beijing: PIERS Online, 2007. 77– 82.

- [7] Liu L, Caloz C, Itoh. Dominant mode (DM) leaky wave antenna with backfire to endfire scanning capability [J]. Electronics Letters, 2000, 38(23): 1414– 1416.
- [8] Sanada A, Kimura M, Awai I, Kubo H, Caloz C, Itoh. A planar zeroth order resonator antenna using a left handed transmission line [A]. Proceedings of 34th European Microwave Conference Digest [C]. Amsterdam: Horizon House, 2004. 1341– 1344.
- [9] Fahad Qureshi, Marco A Antoniadis, George V Eleftheriades. A compact and low profile meta material ring antenna with vertical polarization [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005, 4(1): 333– 336.
- [10] Marco A Antoniadis, George V Eleftheriades. Compact linear lead/lag metamaterial phase shifters for broadband applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2003, 2(1): 103– 106.

作者简介:



项 阳 男, 1982 年 8 月出生于安徽省合肥市, 2003 年毕业于解放军通信工程学院无线通信系, 获工科学士学位, 2008 年毕业于解放军理工大学通信工程学院卫星通信系, 获工学博士学位。现任职于解放军总参谋部第 63 研究所, 从事天线设计与研究。

E-mail: xiangyang2110@163.com



钱祖平 男, 1961 年出生于江苏省海门市, 博士后, 教授, 博士生导师, 现为解放军理工大学通信工程学院微波教研室主任, 从事微波技术、天线技术、阵列信号处理及电磁兼容与频谱管理研究。