2017年10月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

## 文章编号: 2095-4980(2017)05-0803-04

# 基于超材料结构的定频波束可调天线设计

李晓林, 王志强, 吴景峰

(中国电子科技集团公司 第13研究所,河北 石家庄 050051)

摘 要:提出了一种新颖的波束可调天线。该天线辐射单元采用加载电容的超材料结构,相较于传统波导裂缝阵列天线的辐射缝隙,超材料辐射单元的尺寸缩小了76%;天线采用蚀刻有超材料结构的Rogers RT5880印刷电路板(PCB)作为天线辐射面,通过调整加载在超材料单元上的电容来调整波束指向。天线的测试结果与电磁仿真软件仿真结果接近。测试和仿真结果表明,天线工作在频率15 GHz,最大增益为11 dBi,辐射效率为80.8%,波束可调天线实现了-28°,-20°,-12°,-6°,6°,13°和24°七种不同波束指向。

**关键词:**超材料;电容加载;可重构天线;波导缝隙阵列天线 中图分类号:TN820.1<sup>+</sup>2 **文献标志码:**A **doi:**10.11805/TKYDA201705.0803

# Design of frequency-fixed beam-steering antenna based on metamaterial

LI Xiaolin, WANG Zhiqiang, WU Jingfeng

(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

**Abstract:** A novel beam-steering antenna is proposed. The radiation element of the antenna is implemented by the metamaterial structure loaded with capacitor, which can reduce the length by 76% compared with the conventional radiation element of the waveguide slot antenna. The antenna is fabricated by Printed Circuit Board(PCB) of Rogers RT5880 and waveguide. The PCB with etched metamaterial elements is used as the antenna radiation surface. The beam direction can be controlled by changing loaded capacitor. Measured antenna patterns show a good agreement with theoretical predictions. This prototype demonstrates the antenna operates at 15 GHz. The peak gain is 11 dBi. The radiation efficiency is 80.8%. The beam-steering antenna achieves seven beam angles, including  $-28^{\circ}$ ,  $-20^{\circ}$ ,  $-12^{\circ}$ ,  $-6^{\circ}$ ,  $6^{\circ}$ ,  $13^{\circ}$  and  $24^{\circ}$ .

Keywords: metamaterial; capacitor-loaded; reconfigurable antenna; waveguide slot array antenna

天线作为无线通信系统的关键单元,在无线通信系统中的地位举足轻重。在无线通信系统的设计中,传统天 线的性能和结构固定不变,使整个通信系统在应用中缺乏对复杂多变环境的适应能力。如果将大量天线安装在一 起,虽然可以在一定程度上解决这些问题,但会增加系统成本和质量,且不利于实现良好的电磁兼容特性,可重 构天线技术就是针对上述难题提出的<sup>[1]</sup>。可重构天线可以应系统需求,在一个通用天线口径通过非机械结构变化, 实时地改变口径的某些特性,来获得所需要的天线性能,使整个系统具有更加丰富和灵活的功能。从具体实现方 法上来讲,可重构天线利用光、电或者其他方式改变辐射体上的电流分布,从而改变天线的辐射特性。

可重构天线包括频率可重构天线、方向图可重构天线、频率和方向图同时可重构天线以及极化可重构天线。 目前国内外的学者在可重构天线领域取得了一些成果<sup>[2-6]</sup>。由于波导缝隙阵列天线具有低剖面、体积小、质量轻、 辐射效率高、易于实现低副瓣、结构简单紧凑等特点,所以国内外的学者对于波导缝隙可重构天线进行了一些研 究<sup>[7-8]</sup>。但是大部分基于波导结构的方向图可重构天线是通过改变工作频率来实现波束调整<sup>[9-10]</sup>,本文提出的波 束可调天线用超材料结构代替了传统的波导谐振辐射缝隙,可以使辐射单元的尺寸由 0.5λ<sub>0</sub>降低到 0.12λ<sub>0</sub>(λ<sub>0</sub>为自 由空间中工作波长),并且通过控制超材料结构是否向外辐射能量来调节电磁波的空间合成,实现了在固定工作 频率下波束可调的功能。

## 1 波束可调天线原理及设计

#### 1.1 设计原理

波导内部的电磁波一边向前传输,一边向外辐射, 在波的传输方向上存在线性相位差,可以使用众所周知 的公式来计算波束指向的角度。波束指向公式:

$$\sin\theta = \frac{\lambda_0}{\lambda_o} - m\frac{\lambda_0}{d} \tag{1}$$

式中: $\theta$ 表示主波束偏移天线法线的角度;d表示 2 个相 邻辐射单元的间距; $\lambda_0$ 表示自由空间波长; $\lambda_g$ 表示波导波 长;m表示整数。



Fig.1 Principle diagram of antenna radiation 图 1 天线辐射原理图

从式(1)中可以得到调整波束指向角度的2种方法: a) 调整天线的工作波长; b) 调节辐射阵元的间距。第1 种方法就是改变工作频率来实现波束调整。本文所设计的天线属于定频波束可重构天线,通过调整相邻辐射单元 间距 *d* 的方法实现方向图可重构。

天线的辐射面由一系列超材料单元排列构成,每个超材料单元的谐振频率由加载电容调控,可以通过改变电容值使超材料单元的谐振频率接近或者远离天线的工作频率。当超材料单元的谐振频率远离天线的工作频率时,超材料单元基本不会向外辐射能量。当超材料单元的谐振频率接近或者等于天线的工作频率时,超材料单元会向外辐射最大的能量。如图1所示,通过改变电容值可以调整向外辐射能量的阵元之间的间距,从而改变天线的阵因子,达到改变波束指向的目的。

## 1.2 超材料单元的设计

本文采用文献[11]中的超材料结构,如图2所示。超材料结构加载于天线表面,超材料结构单元为闭合环与 孤岛的组合形式。孤岛上添加的"T"形开槽可以改变内外环间的互感和电容,增加了设计的自由度,可以通过 调整加载在超材料结构上的电容值,控制超材料单元在天线的工作频率下是否向外辐射能量。

超材料结构蚀刻在 PCB 板上, PCB 介质基片为 Rogers RT5880, 厚度为 0.254 mm, 相对介电常数为 2.2。超 材料单元的结构参数如下:超材料单元边长  $W_1$ =2.4 mm, 单元之间间距  $D_1$ =0.83 mm, 2个"T"形开槽之间间距  $S_1$ =0.28 mm, "T"形开槽上边长  $S_2$ =0.71 mm, 缝隙间距  $S_3$ =0.28 mm。



超材料单元的辐射特性如图 3 所示,当超材料单元加载 0.6 pF 电容时,15.05 GHz 频点附近的 S<sub>11</sub>小于等于 -10 dB,意味着大部分能量透过超材料结构辐射到了空间中。当超材料单元加载 0.1 pF 电容时,15.05 GHz 频点 附近的 S<sub>11</sub>接近于 0 dB,意味着能量全反射,基本没有辐射出去。定义加载 0.6 pF 电容的状态为 "1",加载 0.1 pF 电容的状态为 "0"。

## 1.3 波束可调天线

本论文将辐射单元的尺寸由 0.5<sub>0</sub>降低到 0.12<sub>0</sub>,使得辐射单元的间距降为 0.125<sub>0</sub>,即相邻辐射阵元间距的 变化梯度为 0.125<sub>0</sub>。这样可以根据需要的波束指向调整状态为"1"的相邻辐射单元的间距。

使用 Rogers RT5880 加工的天线辐射表面如图 4 所示。天线阵列采用 2 行 33 列结构,天线的辐射单元如图

804

仿真与测试结果

的加工误差及介电常数误差所致。

明了天线结构具有较好的可实现性。

2

2 所示,天线阵列的行间距为 10 mm。由于设计的天线工作在 Ku 波段,选用标准波导 WR62 对天线馈电,如图 5 所示。将传统波导宽边缝隙阵列天线的辐射面替换成图 4 中的天线辐射面<sup>[12-13]</sup>,可以通过电容值来控制辐射面 上每个超材料单元所处的状态,调整天线的波束指向。整个天线阵列的尺寸为 127 mm × 30 mm × 15 mm。



图 4 天线辐射面的结构

天线阵列的仿真和测试的S参数如图6所示,测试结果

挑选了 4 种波束指向进行理论工作的验证。在天线的

与仿真结果一致,测试指标良好。在14.4~15.4 GHz的频带

内, S<sub>11</sub>均小于-10 dB。在 15.2 GHz, S<sub>11</sub>最小为-32 dB。测

试结果与仿真结果有一定的频率偏移,这是由于天线结构

实测过程中,验证了-6°,-12°,13°和 24°4 个波束指向,如

图7所示,测试结果与仿真结果在4个波束方向上吻合,证



Fig.5 Picture of the real antenna 图 5 天线实物图



Fig.6 Simulated and measured return loss of the antenna 图 6 仿真和测试的回波损耗



Fig.7 Simulated and measured patterns of the center frequency 图 7 中心频率仿真和测试方向图

测试和仿真结果表明,超材料天线在 15 GHz 频点的最大增益为 11 dBi,并且在不改变测试天线结构的前提下,可以实现 7 种波束指向,分别为 24°,13°,6°,-6°,-12°,-28°。每种波束指向与所对应的天线状态见表 1。

## 3 结论

本文设计的超材料定频波束可调天线,将传统的 矩形谐振缝隙用超材料单元代替,通过调整加载在超 材料单元上电容值大小,可以灵活地调整天线的波束 指向。超材料结构与 PCB 板的结合,可以使天线成本 得到极大程度的降低,而且非常适合批量生产。本文 中的波束可调天线没有使用移相器,使得天线成本得 以降低。由于本次设计只是为了验证设计思路,所以 并没有对天线进行幅度加权,导致副瓣较高,后期工 作中会对天线阵列进行幅度加权处理来降低副瓣。实

表 1	波束指向对应的天线状态	
1C I		

Table1 Beam direction corresponding to state of the antenna		
beam direction	state	
24°	$\frac{110001100011000110001100011000110}{00000000$	
13°	$\frac{110000110000110000110000110000110}{00000000$	
6°	$100000010000001000000100000010000\\000000$	
-6°	$1111000001111000001111000001111000\\000000$	
-12°	$\frac{1111000000001111000000001111000000}{000000111100000000$	
-20°	$\begin{array}{c} 1010100000000001010100000000000\\ 00000000$	
-28°	$\begin{array}{c} 101010000000000000000000101010000\\ 00000000$	

测结果表明:本文所设计的天线在 14.4~15.4 GHz 的频带内,可以实现 7 个不同的波束指向,整体性能良好。对于波束可重构天线的研究具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] VOLAKIS J L. Antenna Engineering Handbook[M]. 4th ed. New York:McGraw Hill Professional, 2007.
- [2] KHIDRE A, YANG F, ELSHERBENI Z. A patch antenna with a varactor-loaded slot for reconfigurable dual-band operation[J]. IEEE Transations on Antennas and Propagation, 2015, 63(2):755-760.
- [3] TARIQ A,GHAFOURI-SHIRAZ H. Frequency-reconfigurable monopole antennas[J]. IEEE Transations on Antennas and Propagation, 2012,60(1):44-50.
- [4] HUNG C,CHIU T. Dual-band reconfigurable antenna design using slot-line with branch edge[J]. IEEE Transations on Antennas and Propagation, 2015,63(2):508-516.
- [5] 曹卫平,蔡彬. 频率与方向图可重构锯齿偶极子微带天线的设计[J]. 桂林电子科技大学学报, 2014,34(4):264-267.
  (CAO Weiping,CAI Bin. Design of reconfigurable frequency and radiation pattern saw-tooth-dipole micro-strip antenna[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2014,34(4):264-267.)
- [6] 崔奉云,李林翠,张黎,等. 基于 MEMS 开关的方向图可重构天线的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(4): 444-448. (CUI Fengyun,LI Lincui,ZHANG Li,et al. Design of pattern reconfigurable antenna based on MEMS switch[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(4):444-448.)
- [7] TAN Lirong, WU Ruixin, POO Yin. Magnetically reconfigurable SIW antenna with tunable frequencies and polarizations[J]. IEEE Transations on Antennas and Propagation, 2015,63(6):2772-2776.
- [8] BABA A A,HASHMI R M,ESSELLE K P. Wideband gain enhancement of slot antenna using superstructure with optimised axial permittivity variation[J]. Elecronics Letters, 2016,52(4):266-268.
- [9] KIM D J,LEE J H. Beam scanning leaky-wave slot antenna using balanced CRLH waveguide operating above the cutoff frequency[J]. IEEE Transations on Antennas and Propagation, 2013,61(5):2432-2440.
- [10] HAGHIGHI S S,HEIDARI A A,MOVAHHEDI M. A three-band substrate integrated waveguide leaky-wave antenna based on composite right/left-hand structure[J]. IEEE Transations on Antennas and Propagation, 2015,63(10):4578-4582.
- [11] LIPWORTH G, HUNT J, MROZACK A, et al. Simulations of 2D metamaterial apertures for coherent computational imaging[C]// 2013 IEEE International Conference on Microwaves. Tel, Aviv, Israel: IEEE, 2013:21-23.
- [12] KANG H,LIM S. Electrically small dual-band reconfigurable Complementary Split-Ring Resonator(CSRR)-loaded Eighth-Mode Substrate Integrated Waveguide(EMSIW) antenna[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2014,62(5):2368-2373.
- [13] GHALIBAFAN J,KOMJANI N,REJAEI B. Tunable left-handed characteristics of ferrite rectangular waveguide periodically loaded with complementary split-ring resonators[J]. IEEE Transations on Magnetics, 2013,49(8):4780-4784.

## 作者简介:



**李晓林**(1989-),男,石家庄市人,在读硕士 研究生,主要研究方向为超材料可重构天线设 计.email:cetclxl@163.com. **王志强**(1971-),男,河北省沧州市人,高级 工程师,研究方向为微波系统设计.

吴景峰(1966-),男,河北省衡水市人,研究员级高工,研究方向为微波电路设计.