

基于 Minkowski 分形 CRLH 结构的微带漏波天线

吴国成¹, 王光明¹, 周超¹, 吉成召²

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军地空导弹装备检验所, 陕西 三原 713800)

摘要:将 Minkowski 分形理论应用于文献中提出的复合左右手传输线结构,使其带宽从 2.78~3.30 GHz 展宽到 2.02~4.53 GHz。对新结构色散特性进行分析,给出色散曲线,确认其为平衡结构,并在此基础上设计了一款微带漏波天线。由于复合左右手单元结构具有左手和右手特性,漏波天线可以分别实现后向辐射和前向辐射,在平衡状态下,消除了平衡点附近的阻带效应,平衡点处的群速不为 0,有行波传播,天线可产生横向辐射。仿真和测试结果表明,该文所设计的漏波天线工作频段为 2.35~3.20 GHz,相对带宽为 30.6%,且能实现从后向到前向连续辐射,克服了传统漏波天线后向辐射角和前向辐射角不连续的缺点。

关键词:复合左右手传输线;微带漏波天线;Minkowski 分形;连续辐射

中图分类号: TN823 **文献标识码:** A

A Leaky-Wave Antenna Based on the Minkowski Fractal Composite Right/Left-Handed Structure

WU Guocheng¹, WANG Guangming¹, ZHOU Chao¹, JI Chengzhao²

(1. School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. The Equipment Verifying Institute for Ground-to-Air Missile, Sanyuan 713800, China)

Abstract: The Minkowski fractal theory was applied to the unit cell of composite right/left-handed transmission line, and the bandwidth of the designed unit cell is broadened from 2.78-3.30 GHz to 2.02-4.53 GHz. By analyzing the dispersive characteristic of the unit cell, a balanced property is confirmed, and the dispersion diagram is given at the same time, and a leaky-wave antenna was designed based on the proposed unit cell. The leaky-wave antenna can implement backward radiation and forward radiation respectively due to the left-handed and right-handed of the CRLH unit structure, and in balanced cases, the gap between left-handed and right-handed regions can be suppressed, so the traveling wave along the structure occurs and the antenna implements transverse radiation at the balanced point with the group velocity is not zero. Both the simulation and measured results show that the designed leak-wave antenna can operate at 2.35-3.20 GHz, the bandwidth is 30.6%, and the antenna can offer continuous radiation from the backward direction to the forward direction, overcoming the shortage of the discontinuity of the traditional leaky-wave antenna.

Key words: composite right/left-handed transmission lines (CRLH-TL); microstrip leaky-wave antenna; minkowski fractal; continuous radiation

0 引言

漏波天线是行波天线的一种,当电磁波沿导波结构传播时,会不断向外辐射能量。由于漏波天线具有较宽的带宽和频扫特性等优点,因而受到了人们的高度关注,被应用于汽车防撞雷达和高分辨率雷达的设计等领域^[1]。漏波结构可分为均匀漏波结构和周期性漏波结构两种。传统均匀漏波结构只能

产生前向辐射,而周期性结构尽管可产生后向辐射,但不能产生横向辐射,导致前、后向辐射角不连续^[2-3]。将复合左右手传输线结构应用于漏波天线的设计可有效解决该问题。当复合左右手传输线单元结构处于平衡状态,消除了平衡点附近的阻带效应,使平衡点的群速不为 0,有行波传输,可产生横向辐射。处于左手频段时可产生后向辐射,处于右

收稿日期:2012-11-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60971118)

作者简介:吴国成(1988-),男,河南信阳人,硕士生,主要从事复合左右手传输线的应用的研究。E-mail:wgc805735557@163.com

手频段时可产生前向辐射^[2]。

采用复合左右手传输线单元结构设计的微带漏波天线能产生从后向到前向的连续辐射。

常见的构造复合左右手单元结构方法主要有：

- 1) 利用集总参数元件来实现(如 SMT 元件)。
- 2) 利用分布参数元件来实现(如交指电容、短路枝节电感等)。
- 3) 利用基于等效方式结构来实现(如互补金属开口谐振环(CSRR)等^[4,5-9])。

自 1975 年法国数学家 B. B. Mandelbrot 提出“分形”这一概念以来,分形理论受各个学科高度关注。在微波工程应用中,国内外各研究小组都取得了多项成果,其中空军工程大学的王光明教授和陈文灵博士所领导的研究小组将分形理论应用到微波无源器件和微带天线的小型化设计和带宽拓展中,取得了丰硕的成果^[3];该学校的许河秀博士进一步将分形理论应用于复合左右手传输线单元结构的设计中,取得的成果已在多种高影响因子的国内外 SCI 期刊上发表^[10]。此外,分形理论还被应用到频率选择表面的设计和天线雷达散射截面(RCS)缩减等微波研究领域,成果显著。

本文在前人研究的基础上,将 Minkowski 分形理论应用于文献[8]中复合左右手传输线单元结构,使其带宽从 2.78~3.30 GHz 展宽到 2.02~4.53 GHz。分析计算给出了该单元结构的色散曲线,并确认其为平衡结构。在此基础上构造了一款基于该单元结构的微带漏波天线。使用 HFSS 进行仿真并加工了实物,测试结果表明所设计的漏波天线工作带宽为 2.35~3.20 GHz,相对带宽为 30.6%,且天线在 2.44 GHz、2.66 GHz 和 3.00 GHz 分别实现了后向、端向和前向辐射,克服了传统漏波天线辐射角不连续的缺点。

1 Minkowski 分形曲线

Minkowski 分形曲线的构造过程如下：

取一段长度为单位 1 的直线(Minkowski 分形曲线的初始元(见图 1(a)), (图中 $n=0$, 其中 n 为阶数), 将其 3 等分, 保留两端线段, 将中间的一段改成高为 $a/3$, 底为 $1/3$ 的 U 型折线($a/3$ 为凹入高度, 其中 a 小于单位 1, 即 $0 < a < 1$), 如图 1(b)所示; 再将 5 条线段进行同样的操作, 如图 1(c)所示。重复上述操作直到无穷, 即可得到理想的 Minkowski 分形曲线^[7]。

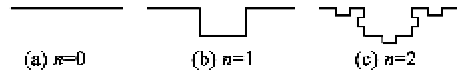


图 1 Minkowski 分形曲线

2 复合左右手单元结构分析

图 2 为本文中复合左右手单元结构图。其中 l 为矩形贴片的长度, w 为微带线宽度, d 为整个单元结构的长度, s 为矩形贴片的宽度, w_1 为矩形贴片上缝隙的宽度, w_2 为 1 阶 Minkowski 分形凹入高度, d_1 为地面开环矩形缝隙的宽度, d_2 为地面开环矩形缝隙开口的距离, d_3 为地面开环矩形的边长。其介质板厚 0.65 mm, 相对介电常数为 9.6。

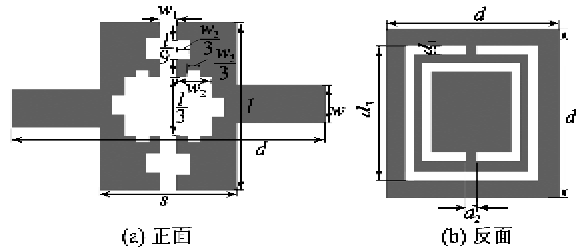
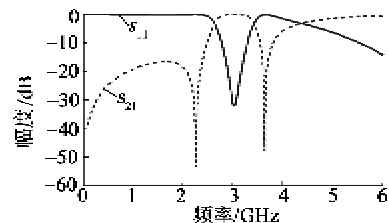


图 2 单元结构图

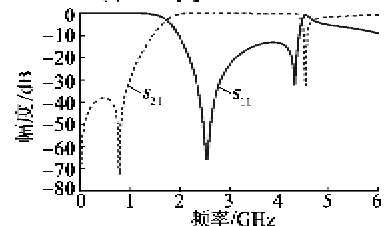
表 1 为该单元结构的相关参数。使用 HFSS 软件进行仿真, 图 3 为文献[8]中结构和本文中结构的 S 参数仿真结果。由图及表 1 可看出, 文献[8]中结构有一个从 2.78~3.30 GHz 的通带, 相对带宽仅为 17.1%; 而本文中单元结构有一个从 2.02~4.53 GHz 的通带, 相对带宽达到 76.5%, 相比于原始结构, 有效地展宽了带宽。

表 1 单元结构的参数

d/mm	d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	
9.6	0.6	0.5	6	
l/mm	s/mm	w/mm	w_1/mm	w_2/mm
2.7	2.8	0.64	0.5	0.6



(a) 文献[8]中单元结构 S 参数



(b) 新单元结构 S 参数

图 3 单元结构的仿真结果

色散关系公式:

$$|\beta(\omega)d| = \left| \operatorname{Re} \left[\arccos \left(\frac{1 - S_{11}S_{22} + S_{21}S_{12}}{2S_{21}} \right) \right] \right| \quad (1)$$

式中 d 为单元结构的长度。

根据 S 参数,利用式(1)来计算该单元结构色散曲线^[9],结果如图 4 所示。由图可看出,该结构为平衡结构,平衡点的频率为 2.66 GHz,漏波频段为 2.35~3.20 GHz,相对带宽为 30.6%。

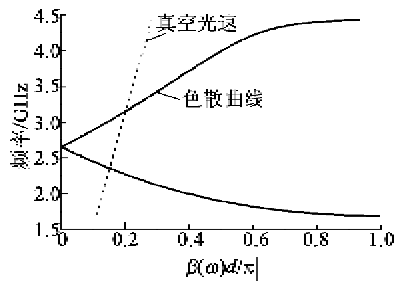
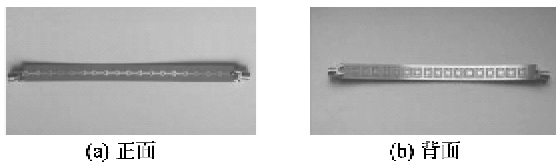


图 4 单元结构色散曲线

3 微带漏波天线设计分析

图 5 为本文所设计的漏波天线实物图,是由 19 个复合左右手传输线单元级联而成。使用 HFSS 仿真软件和矢量网络分析仪对天线进行仿真测试。图 6 为天线仿真和测试的 S 参数。由图可看出测试结果与仿真结果吻合较好。在漏波频段,回波损耗都大于 10 dB,相对带宽为 30.6%。



(a) 正面 (b) 背面
图 5 漏波天线实物图

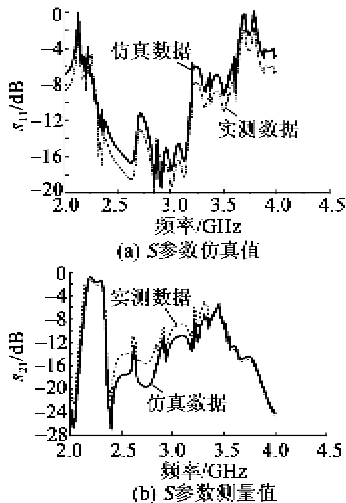


图 6 S 参数仿真值和测量值

图 7 为漏波天线不同频点的方向图。由图可以看出,在 2.40 GHz 时,由于处于左手频段,漏波天线的辐射角约为 320° ,为后向辐射;在平衡点 2.66 GHz 时,天线辐射角约为 0° ,为横向辐射;在 3.20 GHz 时,由于处于右手频段,天线辐射角约为 30° ,为前向辐射。通过上述分析可知,本文所设计的漏波天线较好的实现了从后向到前向连续辐射,克服了传统漏波天线辐射角不连续的缺点。

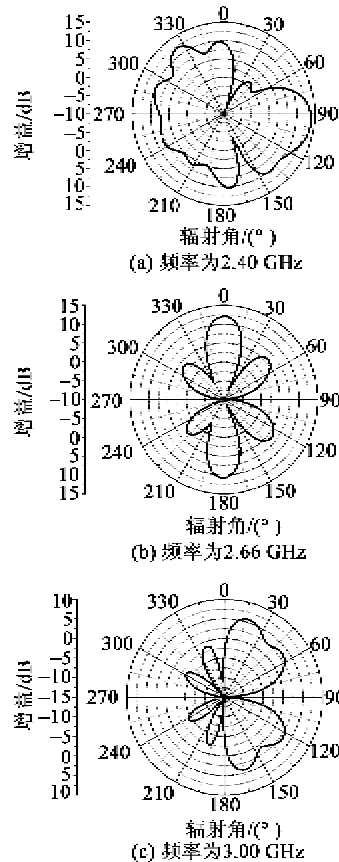


图 7 3 个频点的辐射方向图

4 结束语

本文通过将 Minkowski 分形曲线应用于文献 [8] 中的复合左右手传输线单元结构,使其带宽从 2.78~3.30 GHz 展宽到 2.02~4.53 GHz。计算并给出新结构的色散曲线,证明该结构为平衡结构,在此基础上,设计了一款微带漏波天线,加工了实物并进行测试。测试结果表明,此漏波天线工作带宽为 2.35~3.20 GHz,相对带宽为 30.6%,且天线在 2.44 GHz、2.55 GHz 和 3.00 GHz 分别为后向、端向和前向辐射,实现了从后向到前向的连续辐射,克服了传统漏波天线辐射角不连续的缺点。

(下转第 770 页)