

## 新型六陷波超宽带天线的设计

刘汉<sup>1</sup>, 尹成友<sup>2</sup>, 范启蒙<sup>2</sup>

(1. 西安通信学院信息传输系, 陕西 西安 710106; 2. 电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

**摘 要:** 设计了一种新型的六陷波超宽带天线。通过在辐射贴片上添加一个 T 形谐振枝节、一个弯枝节, 开一个 U 形槽, 馈线附近引入 C 形枝节、反 C 形枝节和在地板上开一对对称的 L 形槽, 实现了六陷波特性和有效地抑制了窄带系统和超宽带系统之间的相互干扰。研究了所加入结构对天线陷波特性的影响, 通过天线表面电流分布和等效电路解释了陷波的原理, 最后将天线加工成实物。实测的驻波比、方向图和增益与仿真结果基本吻合, 证明了设计方法的正确性。所设计的天线性能优良, 六陷波特性和大大提高了天线的应用范围。

**关键词:** 超宽带天线; 陷波特性和; 枝节; 槽

中图分类号: TN823

文献标识码: A

## Design of a novel sextuple band-notched UWB antenna

LIU Han<sup>1</sup>, YIN Cheng-you<sup>2</sup>, FAN Qi-meng<sup>2</sup>

(1. Department of Information Transmission, Xi'an Communications Institute, Xi'an 710106, China;

2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** A novel sextuple band-notched UWB antenna was designed. Sextuple band-notched characteristics could be realized by adding a T-shaped stub, a bent stub, and etching a U-shaped slot on the patch, adding a C-shaped stub, an anti-C shaped stub near microstrip line and etching a pair of L-shaped slots on the ground plane, which effectively suppresses the interference between narrow band systems and UWB systems. The influence of the proposed structures on band-notched characteristics was studied, and band-notched principle was explained by antenna surface current and equivalent circuit. Finally the antenna was fabricated and measured. The measured results of VSWR, radiation patterns and gains agree well with the simulated results, which demonstrates the correctness of the design method. The proposed antenna has good performance and can be widely used due to its sextuple band-notched characteristics.

**Key words:** UWB antenna, band-notched characteristics, stub, slot

### 1 引言

随着 FCC 划定超宽带的民用频段<sup>[1]</sup>, 平面超宽带天线的设计<sup>[2]</sup>成为了一个热门课题。传统的微带天线<sup>[3]</sup>具有剖面低、尺寸小和结构简单等优点, 但是它也有其固有的缺点: 带宽窄, 这极大地限制了微带天线的应用范围, 无法适应于宽带系统。很多学者<sup>[4-6]</sup>对展宽带宽进行了深入的研究, 各种新技术也层出不穷, 目前这一块的研究已经很成熟。考虑到超宽带系统内包含有很多窄带系统, 包括微波互联网 WIMAX(2.3~2.4 GHz、2.5~2.69 GHz、

3.3~3.8 GHz)、无线局域网 WLAN(2.4~2.484 GHz、5.15~5.825 GHz)、国际卫星波段(4.5~4.8 GHz)、卫星 X 波段(7.25~7.75 GHz)和国际电信联盟(ITU)波段(8.01~8.5 GHz)等, 工作带宽重叠的系统必然会互相产生影响。因此, 抑制重叠频段的信号成为了当前的研究重点。实现陷波可以在天线前端加入滤波器, 但这势必会增加结构的复杂度, 不利于其在系统中的应用, 为了解决上述问题, 科研人员设计出了具有陷波特性的超宽带天线。实现天线的陷波特性和, 具有多种手段, 但基本上都是改变贴片和接地板的结构<sup>[7,8]</sup>, 最常见的有添加寄生

收稿日期: 2015-10-30; 修回日期: 2016-10-05

基金项目: 总装备部预研基金资助项目 (No.51333020201)

Foundation Item: The Advanced Research Project (No.51333020201)

单元、开口谐振环、互补开口谐振环和电磁带隙以及开槽等，通过这些结构加入天线的馈线、辐射贴片或地板，使天线在相应频段产生串联或并联谐振，天线不能工作，实现陷波。目前，设计陷波天线的文献也有很多，但是基本上实现的都是双陷波或三陷波<sup>[9,10]</sup>，很少能实现四陷波，目前，仅有一项研究实现了五陷波，很难实现更多的陷波，其原因如下：1) 超宽带天线的基板尺寸有限，陷波结构不能加入过多；2) 不同陷波结构之间具有互耦作用，当距离较大时可以忽略，而随着陷波结构的增多，陷波结构的间距减小，耦合作用明显，这在调整实现所需多个频段的陷波时，难度很大。

本文在一款超宽带天线的基础上，通过在辐射贴片上添加一个 T 形枝节、一个弯枝节、开一个 U 形槽，馈线附近引入 C 形枝节、反 C 形枝节，地板上开一对对称的 L 形槽，实现了六陷波特性和，在此基础上，通过调整各个结构的尺寸，有效地抑制了上文提到的所有窄带信号系统与超宽带系统之间的相互干扰，与前人工作相比<sup>[11, 12]</sup>，该天线尺寸并没有增大，并且大大增加了陷波的个数。对于多窄带信号干扰情况下，该天线具有很高的实用价值。

## 2 六陷波超宽带天线的设计

对于一款已知超宽带天线<sup>[13]</sup>，本文尝试在其基础上实现多陷波特性和。天线的初始结构如图 1 所示。

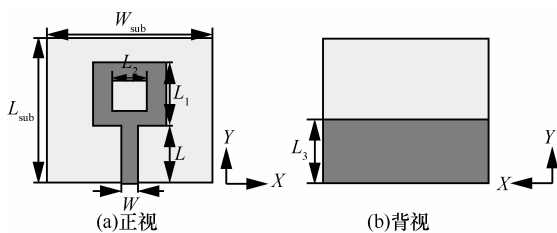


图 1 超宽带天线的结构

制作天线的材料为聚四氟乙烯，介电常数为 3.5，厚度为 1.5 mm。超宽带天线的种类有很多，形式也多样，相较于其他超宽带天线，本文选择的超宽带天线具有如下优势：1) 天线的尺寸适中，整个尺寸为 31 mm×35 mm×1.5 mm，尺寸过大不利于天线的集成化，尺寸太小会限制加入谐振结构的数量，此外，尺寸过小也会导致各个谐振结构的距离靠近，这会产生耦合作用，影响有效陷波的实现；2) 该天线结构适合加入不同形式

的谐振结构。对于贴片，由于是方形环结构，这样既可以在环外加入谐振枝节，也可以在环内加入谐振枝节，并且还可以在贴片上开槽；地板是半平面结构，在地板上既可以开槽，也可以加入寄生条带；馈线的尺寸适中，可以在馈线上开槽实现陷波，也可以在馈线两侧加入谐振枝节；3) 该天线结构简单，仿真和加工易于实现。总体来说，该天线可以充分利用其有效空间和特有的结构，尽可能多地加入谐振结构。

首先观察天线在不同频率下的电流分布，如图 2 所示，在 3.5 GHz、4.6 GHz、6 GHz 和 7.3 GHz 这 4 个频点处，由于电压源是从馈线端加入，故馈线处的电流强度较大，贴片和地板处电流较小，且均匀分布，天线能够正常工作。为了实现天线的陷波特性和，需要设计出相应的结构嵌入到天线中，天线的电流分布将会改变，天线的阻抗特性和辐射特性和也会随之变化，通过调整该结构的位置和尺寸，就可以实现相应频段的陷波特性和。基于以上设计思想，本文将实现多陷波超宽带天线。目前应用最为广泛的是在天线中嵌入谐振结构，当谐振结构的总长度  $L_d$  近似为相应陷波频段中心频率对应波导波长的一半且该结构的宽度  $s$  选择合适时，在该频率点及其附近输入阻抗失配，使天线在该频段内产生较大的反射系数，从而获得陷波特性和，用公式<sup>[14]</sup>表示为

$$L_d \approx \frac{c}{f_{\text{notch}} \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \quad (1)$$

其中， $c$  表示光速， $f_{\text{notch}}$  表示陷波频段对应的中心频率， $\epsilon_r$  表示介质的相对介电常数。根据上述的经验公式，在天线方形环贴片内部加入一个 T 形枝节、环形贴片外加一个弯枝节、贴片上开一个 U 形槽、馈线附近添加 C 形枝节、反 C 形枝节和地板上开一对 L 形槽，实现了六陷波特性和。六陷波天线的结构如图 3 所示，天线的初始尺寸参数如表 1 所示。加入不同结构天线的电压驻波比特性如图 4 所示。从图 4 中可以看出，加入 T 形枝节、弯枝节、U 形槽、反 C 形枝节、C 形枝节和 L 形槽，分别在 5.8 GHz、2.4 GHz、4.5 GHz、8.6 GHz、6.6 GHz 和 3.6 GHz 产生陷波。各个结构的加入对其他频段的陷波影响不大，仅对对应频段陷波起主要作用。

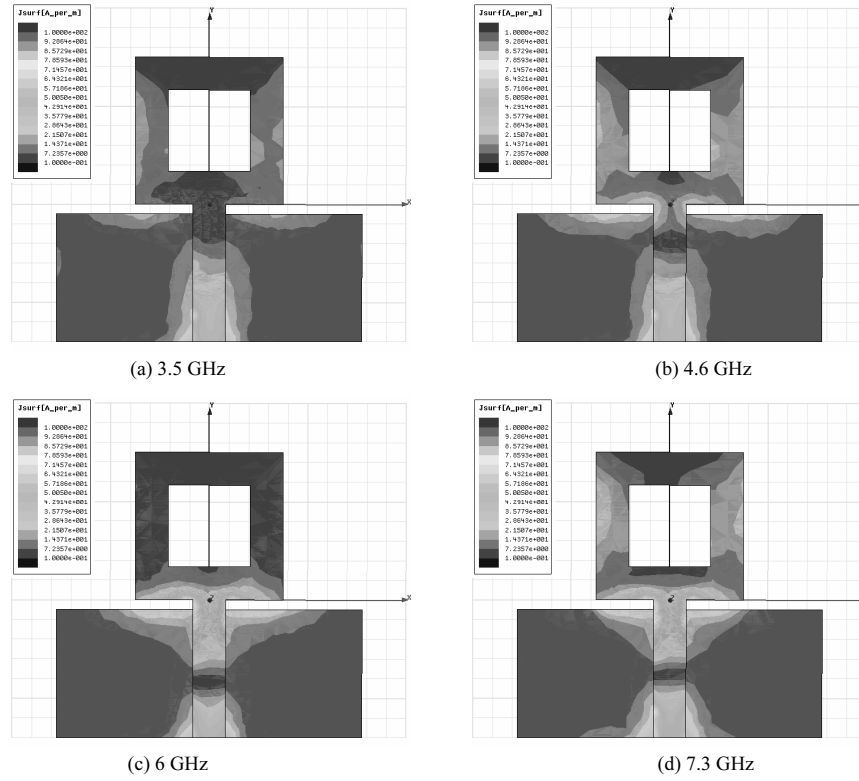


图 2 天线表面的电流分布

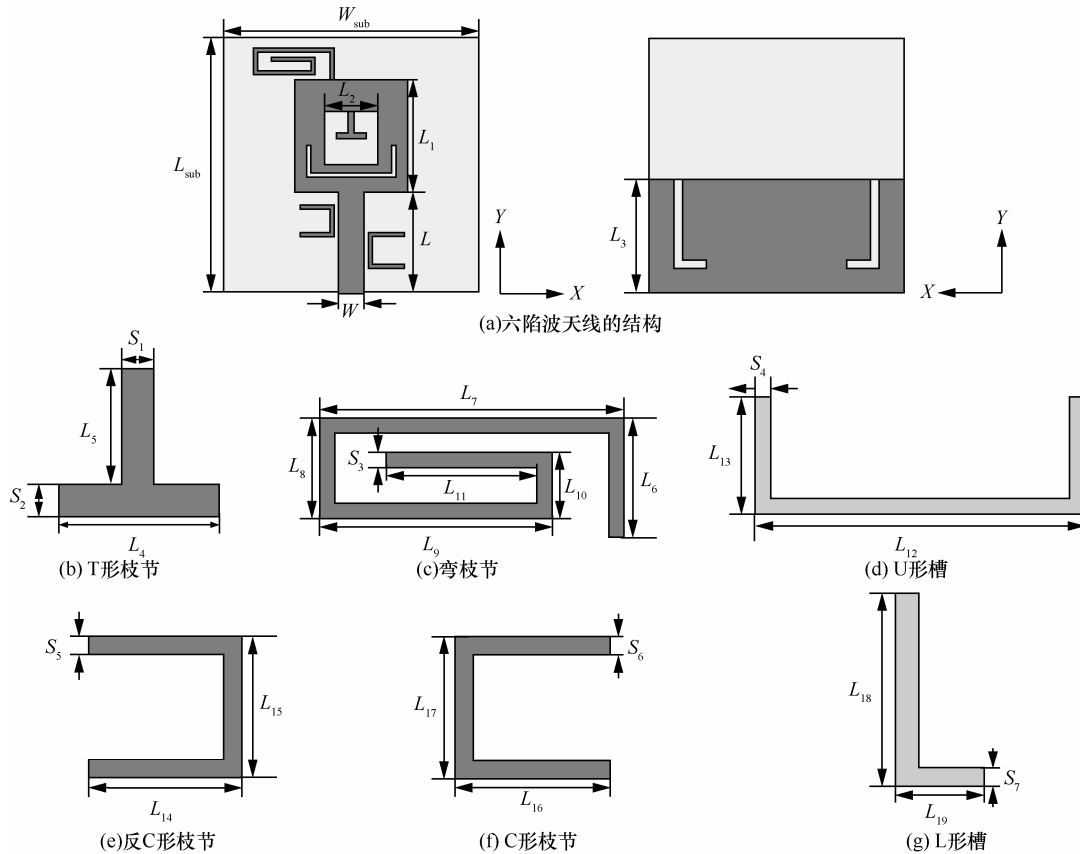


图 3 六陷波天线及谐振结构

表 1 优化前天线结构中的尺寸参数 (单位: mm)

$L_{sub}$	$W_{sub}$	$L$	$W$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$
35	31	14	3.3	15	8.3	13	5	3	4
$L_7$	$L_8$	$L_9$	$L_{10}$	$L_{11}$	$L_{12}$	$L_{13}$	$L_{14}$	$L_{15}$	$L_{16}$
10	3	8	2	5.5	12	6.5	4	4	5
$L_{17}$	$L_{18}$	$L_{19}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$
5.5	11	3	1	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

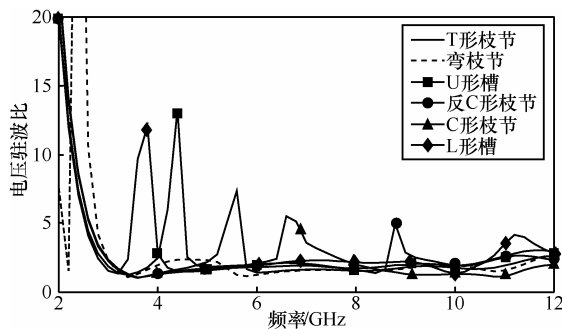


图 4 天线加入不同结构的电压驻波比

为了设计出指定频段陷波的超宽带天线, 下面研究 T 形枝节、贴片上端弯枝节、U 形槽、反 C 形枝节、C 形枝节和 L 形槽的尺寸变化对天线陷波特性的影响, 如图 5 所示。

在图 5(a)中, 可以看到, T 形枝节对天线 3.6 GHz、5.8 GHz 和 6.6 GHz 陷波点有影响, 由于在加入 T 形枝节时仅在 5.8 GHz 附近产生陷波, 对其他 2 个陷波点的影响可以认为 T 形枝节与其他 2 个陷波结构之间存在耦合作用; 同样, 在图 5(b)中, 贴片上弯枝节对 3.6 GHz、4.5 GHz 和 6.6 GHz 处的陷波产生影响。图 5(c)中, U 形槽对 4.5 GHz、5.8 GHz、6.6 GHz 和 8.6 GHz 处的陷波有影响, 其中对 4.5GHz 附近的影响最大, 随着 U 形槽长度的增加, 陷波点向低频段移动。图 5(d)中, 反 C 形枝节对 3.6 GHz、4.5 GHz、5.8 GHz 和 8.6 GHz 附近的陷波有影响, 其中对 8.6 GHz 附近陷波影响最大, 随着枝节长度的增大, 陷波位置逐渐左移。图 5(e)表示的是 C 形枝节对天线陷波特性的影响。C 形枝节对 6.6 GHz 和 8.6 GHz 附近的陷波产生影响, 随着枝节长度的增大, 这两个位置的陷波点均向低频段移动。图 5(f)中, L 形槽主要对 3.6 GHz 附近的陷波点产生影响, 随着 L 形槽长度的增加, 陷波位置逐渐左移。

通过图 5 可以知道, 不同陷波结构之间是有

耦合作用, 为了减小耦合, 需要调整各个结构的尺寸。对于上述加入的 6 个结构, 可以从等效电路元件值的变化来解释, 随着槽或枝节长度的增加或宽度的减小, 都会增大电容或电感值, 这将使陷波频率向低频段移动。例如, 图 5(e)中, C 形枝节的加入在 8.6 GHz 附近产生陷波, 随着枝节长度增大, 枝节等效电路的电感和电容值都会增大, 观察到 8.6 GHz 和 6.6 GHz 的陷波点都左移, 由于反 C 形枝节在 6.6 GHz 处产生陷波, 因此, 这可以看成是 C 形枝节和反 C 形枝节的耦合作用引起的。

通过研究上述 6 个陷波结构的尺寸对天线陷波特性的影响, 可以设计出所需频段陷波的超宽带天线。整个设计过程中陷波结构的调节顺序, 按照先调影响天线陷波的个数多的结构, 再调影响天线陷波个数少的结构的原则, 设计流程比较复杂, 这里不具体展开。根据上述原则综合调整 6 个结构的尺寸, 最终得到了一款能够对 2.3~2.7 GHz、3.3~3.7 GHz、4.5~5 GHz、5.5~5.9 GHz、7.2~7.7 GHz 和 8~8.5 GHz 这 6 个频段陷波的超宽带天线, 有效地抑制了微波互联网 WIMAX (2.3~2.4GHz、2.5~2.69 GHz、3.3~3.8 GHz)、无线局域网 WLAN (2.4~2.484 GHz、5.15~5.825 GHz)、国际卫星波段 (4.5~4.8 GHz)、卫星 X 波段(7.25~7.75 GHz)和国际电信联盟(ITU)波段(8.01~8.5 GHz)与超宽带系统之间的相互干扰, 仿真优化的结果如图 6 所示, 优化后天线的尺寸参数如表 2 所示。

### 3 天线陷波特性的分析

为了直观地了解天线的陷波特性和深入理解天线的陷波原理, 下面观察天线的表面电流分布<sup>[15]</sup>。选取 6 个陷波点及 2 个非陷波点, 6 个陷波点取为 6 个陷波频段的中心频率, 分别

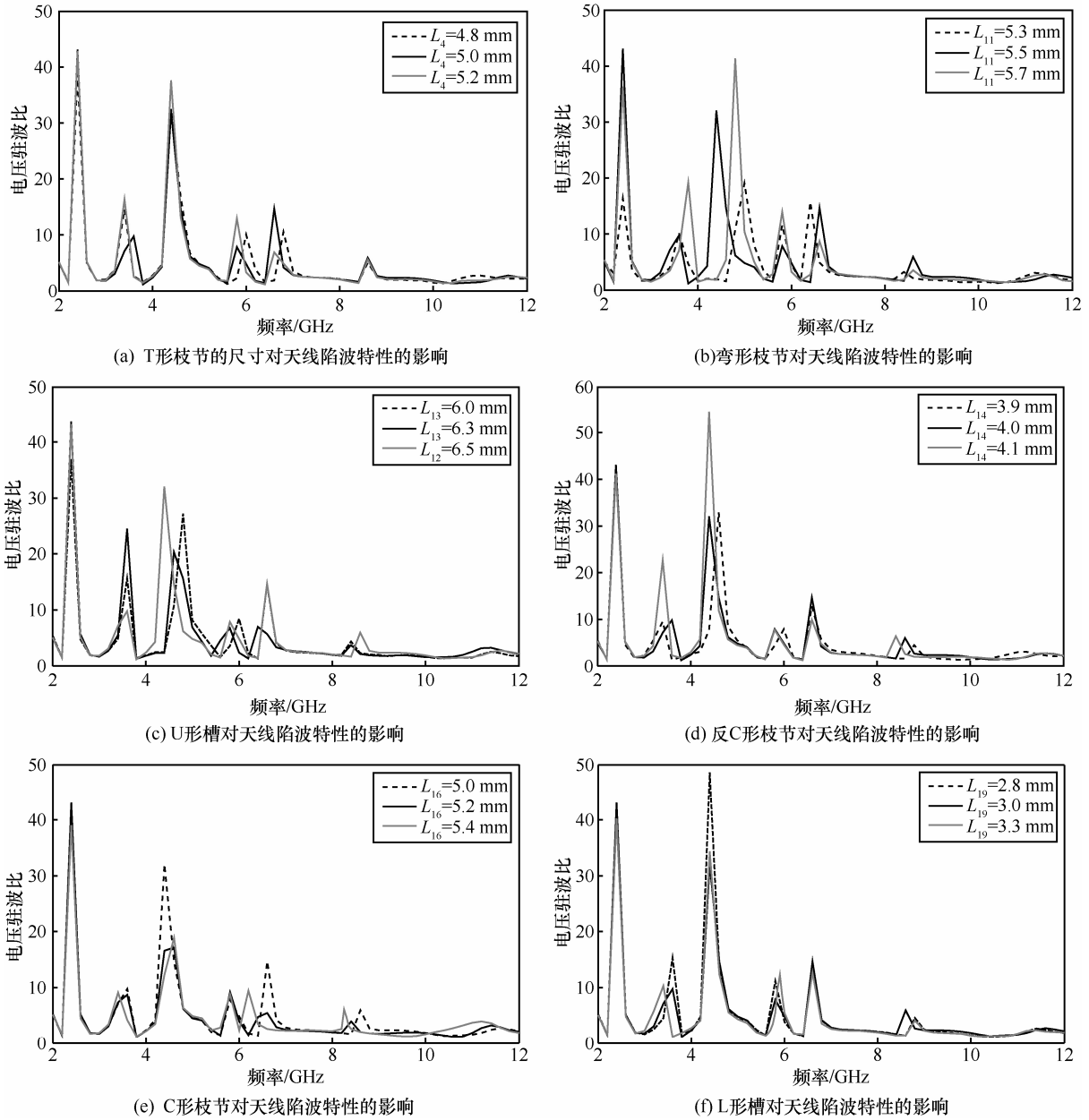


图 5 陷波结构对天线陷波特性的影响

为 2.4 GHz、3.5 GHz、4.6 GHz、5.7 GHz、7.3 GHz 和 8.2 GHz，通频带的 2 个频点取 6.5 GHz 和 10 GHz。8 个频点的天线表面电流分布如图 7 所示。从图 7 中可以看出，弯枝节、L 形槽、U 形槽、T 形枝节、C 形枝节和反 C 形枝节分别产生了 2.4 GHz、3.5 GHz、4.6 GHz、5.7 GHz、7.3 GHz 和 8.2 GHz 处的陷波，在相应的频点，电流分别聚集在这些结构附近，阻抗失配，天线不能工作；而在 6.5 GHz 和 10 GHz 时，天线电流均匀分布，天线正常工作。

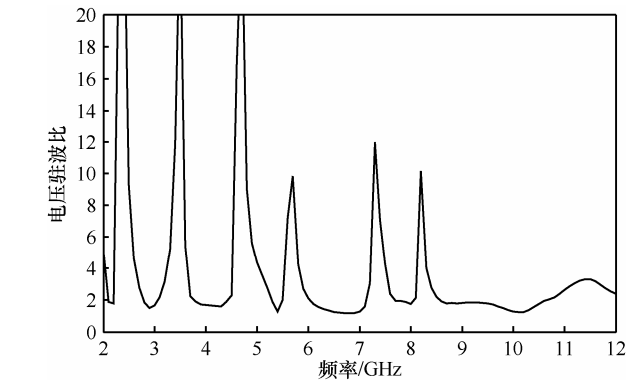


图 6 仿真优化后天线的电压驻波比

表 2 优化后天线结构中的尺寸参数 (单位: mm)

$L_{sub}$	$W_{sub}$	$L$	$W$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$
35	31	14	3.3	15	8.3	13	5.2	3.2	4
$L_7$	$L_8$	$L_9$	$L_{10}$	$L_{11}$	$L_{12}$	$L_{13}$	$L_{14}$	$L_{15}$	$L_{16}$
10	3	8	2	5.5	12	5.6	4.1	4.5	4.8
$L_{17}$	$L_{18}$	$L_{19}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$
5	11	3	1	0.8	0.5	0.2	0.5	0.5	0.5

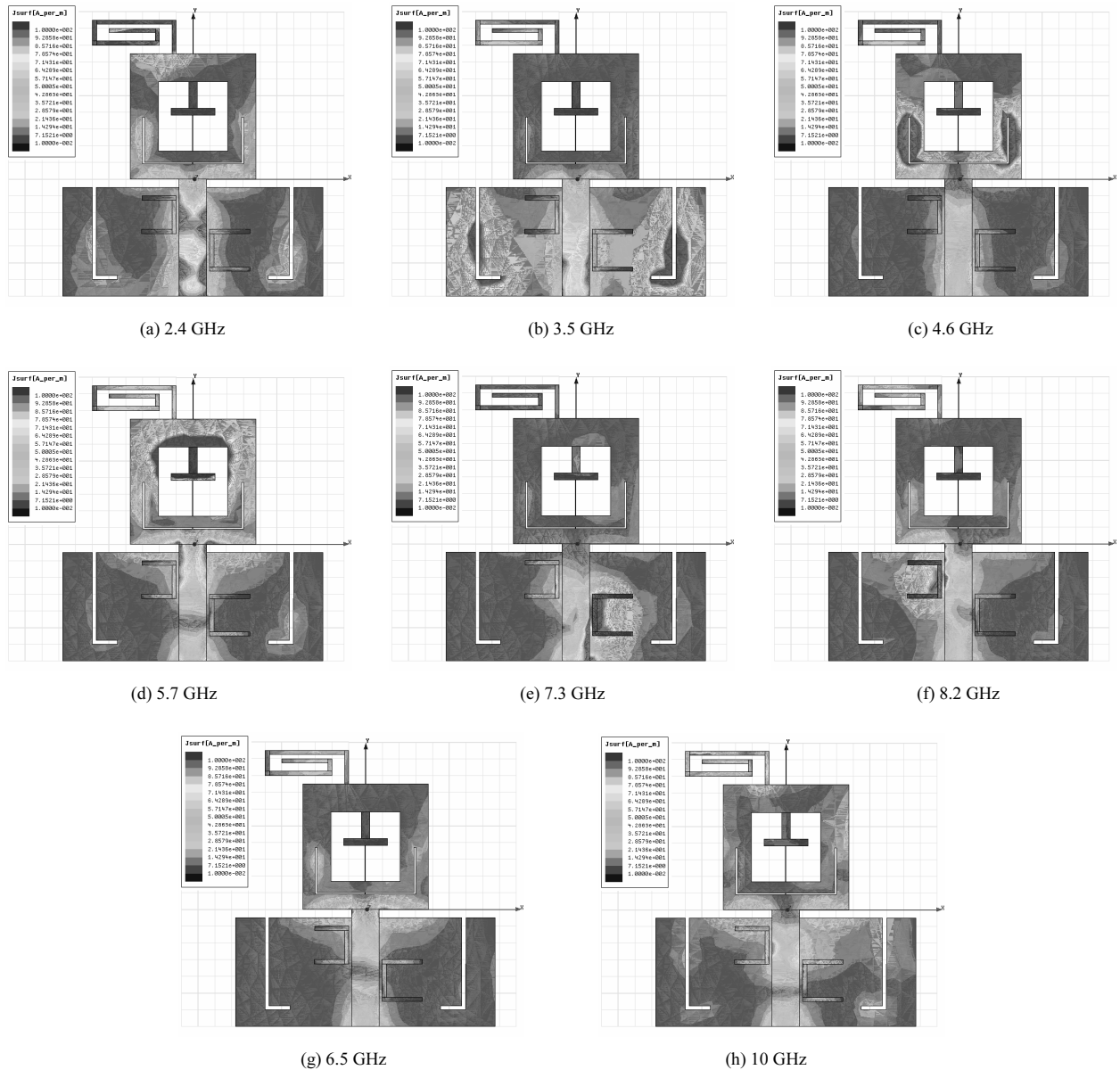


图 7 六陷波超宽带天线表面的电流分布

为了能够更深入地理解天线的陷波结构在天线陷波中起到的作用,下面从等效电路<sup>[14]</sup>对天线的陷波特性和特性进行解释。天线的陷波特性和特性实现可以认为是引入了谐振结构,观察一下天线的阻抗特性,如

图 8 所示。从图 8 中可以得到,天线在 2.4 GHz、3.4 GHz 和 7.4 GHz 附近阻抗与串联谐振电路的阻抗很相似,电抗趋于 0 并且对频率的导数为正,电阻趋于局部最小值,阻抗在馈线端口处趋于 0 将会

导致所需频段的陷波，此时可以认为天线发生串联谐振；天线在 4.7 GHz、5.5 GHz 和 8.3 GHz 时，天线的阻抗和并联谐振电路的阻抗很相似，电阻很大，电抗趋于 0 并且对频率的导数为负，此时可以认为天线发生并联谐振。当天线在某个频点发生串联或并联谐振时，将会导致阻抗失配，天线能量不能正常发射或接收，这就实现了所谓的陷波。可以按照馈电顺序并考虑相邻陷波结构之间的耦合作用，作出天线的等效电路，如图 9 所示。 $C_0$  和  $L_0$  表示天线工作在低频段时的电容和电感，并联的  $R_s$ 、 $L_s$ 、 $C_s$  表示二阶或高阶谐振通带内的输入阻抗<sup>[11]</sup>，3 个串联谐振电路分别代表反 C 形枝节、L 形槽和弯枝节，3 个并联谐振电路代表 C 形枝节、U 形槽和 T 形枝节。

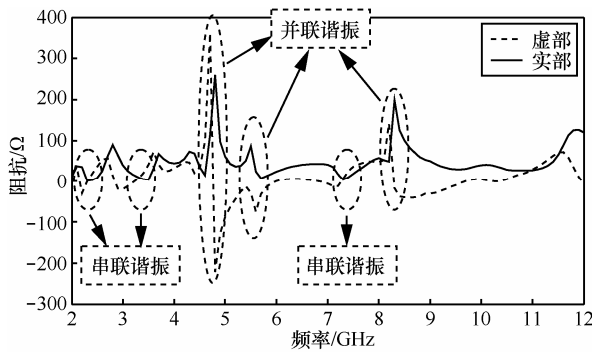


图 8 天线的阻抗曲线

### 4 天线的加工与实测

为了进一步验证本文设计天线的实用价值，需要对天线进行加工实测。利用 Agilent N5230A 矢量网络分析仪对天线的电压驻波比进行测试，仿真结果与实测结果对比如图 10 所示。从图 10 中可以看

出，天线的仿真结果和实测结果基本吻合，偏差是源于加工误差和同轴接头的焊接误差。

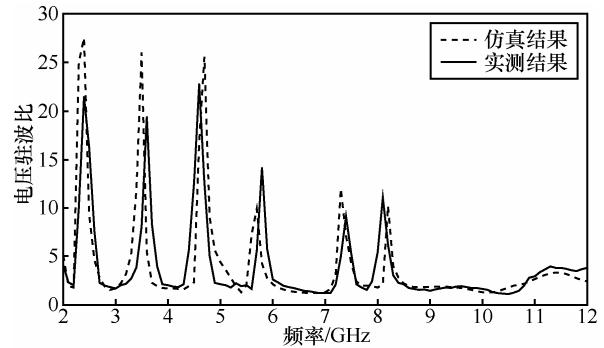


图 10 六陷波超宽带天线的实测与仿真电压驻波比

对于本文所设计的天线，还需要观察其方向图特性<sup>[16]</sup>，以确定在陷波频段处不收发信号，在非陷波频段能够收发各个方向的信号。天线的放置如图 11 所示。本文选取陷波频点 4.6 GHz 和非陷波频点 3 GHz、4 GHz、5.3 GHz、6.4 GHz、8.8 GHz 这 6 个代表性的频点观察天线 E 面(YOZ 面)和 H 面(XOZ 面)仿真和实测的归一化方向图，如图 12 所示。从图 12 中可以看出，天线的实测结果与仿真结果吻合较好。在 4.6 GHz，方向图呈不规则状，天线不能全向收发信号，并且天线的辐射能力很弱；在 3 GHz、4 GHz、5.3 GHz、6.4 GHz 和 8.8 GHz，天线的方向图在 E 面呈现“8”字形，H 面基本呈现全向性，能够较好地收发各个方向的信号。需要说明的是，在 8.8 GHz 时，H 面方向图在 90° 出现凹陷，原因是天线在高频段出现反相电流，导致天线方向图发生畸变。

天线的增益能够反映天线的辐射能力，对于超宽带天线，需要研究其在整个频段上的增益特性，确定天线性能的优劣。天线的仿真与实测增

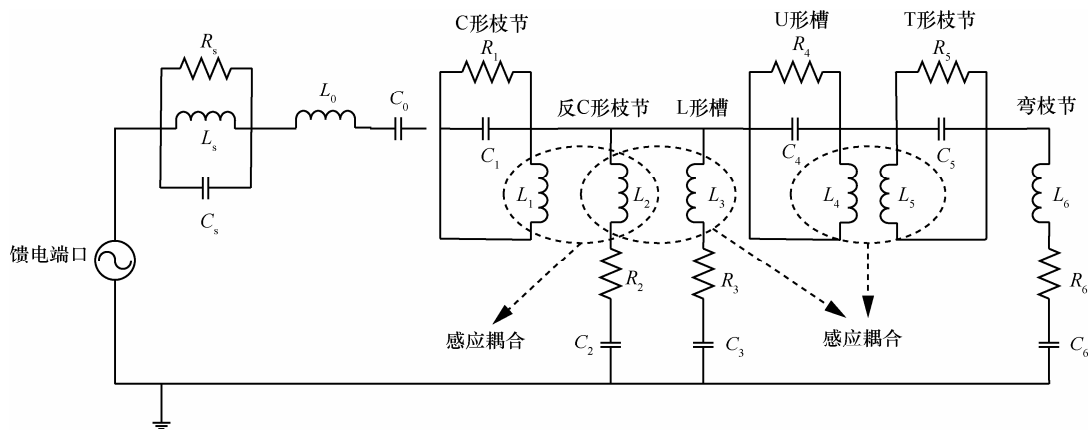


图 9 天线的等效电路

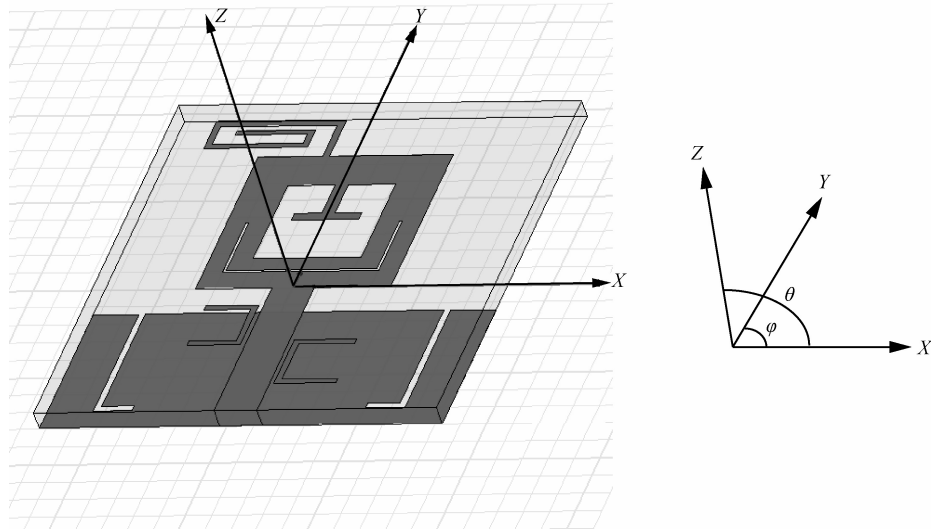


图 11 天线的坐标转换示意

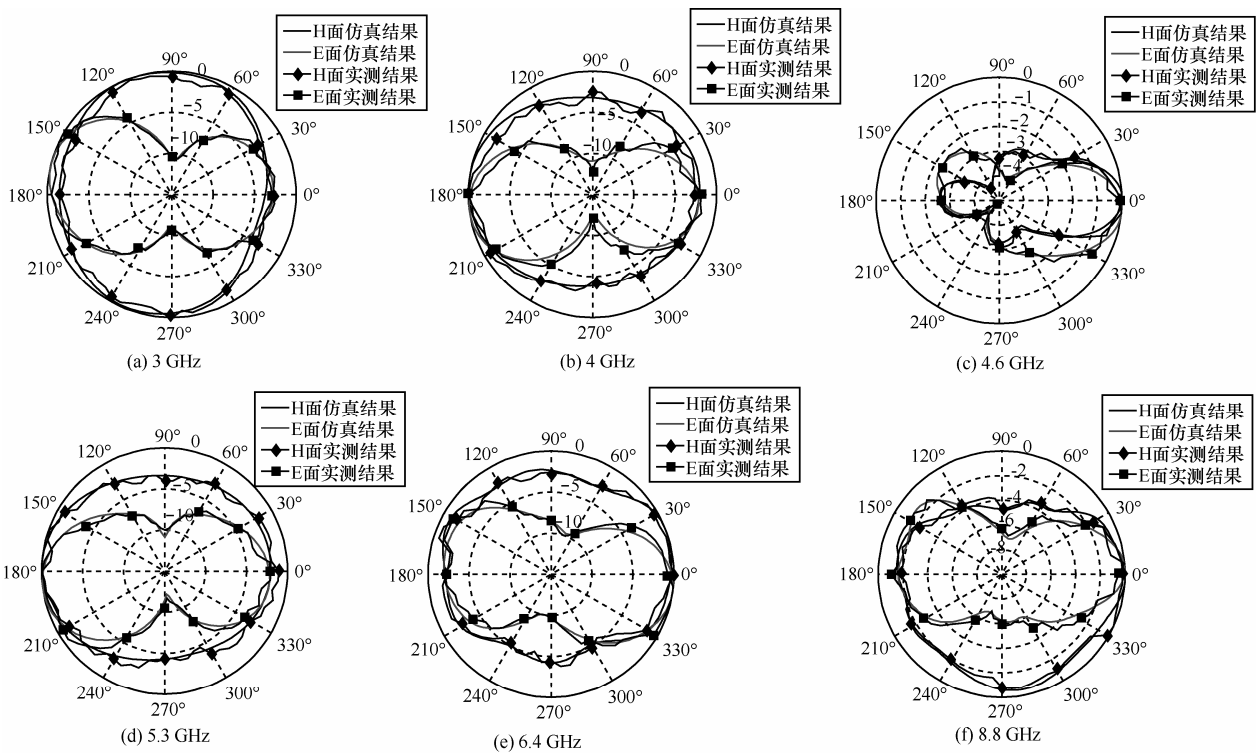


图 12 天线 E 面和 H 面归一化方向

益如图 13 所示。从图 13 中可以看出，实测结果与仿真结果吻合较好，它们之间的偏差同样是加工误差和同轴接头的焊接误差导致的，并且测试环境也会对结果产生影响。在非陷波频段，增益都在 1 dB 以上，辐射能力较强，在 6 个陷波频段，增益显著下降，天线收发呈现钝态，辐射能力大大减弱。

### 5 结束语

本文在一款超宽带天线基础上，通过在辐射贴

片上添加一个 T 形谐振枝节、一个环形谐振枝节，开一个 U 形槽，馈线附近引入 C 形枝节、反 C 形枝节和在地板上开一对对称的 L 形槽，实现了六陷波特性和有效地抑制了窄带系统和超宽带系统之间的相互干扰。研究了天线的陷波特性和原理进行了解释，最后将天线加工成实物，对天线进行了实测，实测结果和仿真结果基本吻合，证明了本文设计方法的正确性。所设计的天线性能优良，能够广泛地应用于超宽带系统中。

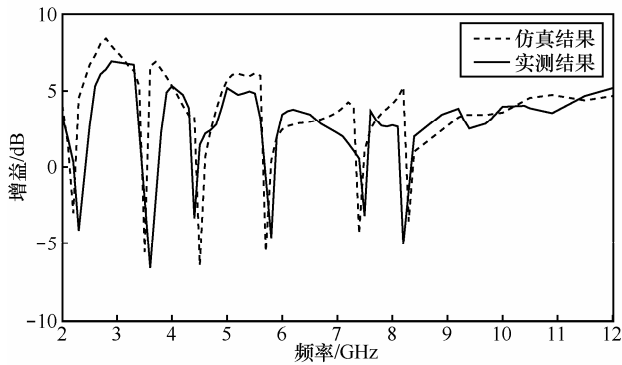
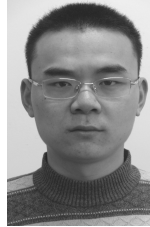


图 13 天线仿真和实测的增益曲线

## 参考文献:

- [1] Federal Communications Commission. First report and order in the matter of revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems[R]. Technical Report ET-Docket 98-153. USA, Washington: FCC, 2002.
- [2] WU J, ZHAO Z, Z NIE, et al. A printed UWB vivaldi antenna using stepped connection structure between slotline and tapered patches[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 698-701.
- [3] NASIMUDDIN, CHEN Z N, QING X M. Slotted microstrip antennas for circular polarization with compact size[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2013, 55(2): 124-137.
- [4] SUDHANSHU V, PREETAM K. Printed Newton's egg curved monopole antenna for ultrawideband applications[J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2014, 8(4): 278-286.
- [5] ISLAM M M, ISLAM M T, SAMSUZZAMAN M, et al. Compact metamaterial antenna for UWB applications[J]. Electronics Letters, 2015, 51(16): 1222-1224.
- [6] SHRIKANTH G Y, ANIL K, SHILPA K, et al. Cross-configured directional UWB antennas for multidirectional pattern diversity characteristics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(2): 853-858.
- [7] SHRIVISHAL T, AKHILESH M, SANDEEP Y. A compact koch fractal UWB MIMO antenna with WLAN band-rejection[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1565-1568.
- [8] REZAUL A, MOHAMMAD T I, AHMED T M. Dual band-notch UWB antenna with single tri-arm resonator[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 670-673.
- [9] LI J F, CHU Q X, LI Z H, et al. Compact dual band-notched UWB MIMO antenna with high isolation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(9): 4759-4766.
- [10] ZHANG C Z, ZHANG J, LI L. Triple band-notched UWB antenna based on SIR-DGS and fork-shaped stubs[J]. Electronics Letters, 2014, 50(2): 67-69.
- [11] ZHANG J W, CAO P, HUANG Y, et al. Compact planar ultra-wideband antenna with quintuple band-notched characteristics[J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2015, 9(3): 206-216.
- [12] WANG J H, YIN Y Z, LIU X L. Triple band-notched ultra-wideband antenna using a pair of novel symmetrical resonators[J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2014, 8(14): 1154-1160.
- [13] DENG H W, HE X X, YAO B Y, et al. A compact square-ring printed monopole ultra wideband antenna[C]//2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings. 2008: 1644-1646.
- [14] KARIMIAN R, ORAIZI H, FAKHTE S. Design of a compact ultra-wide-band monopole antenna with band rejection characteristics[J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2014, 8(8): 604-610.
- [15] JAWAD Y S, CHINMOY S, YAHIA M M A. Compact SRR loaded UWB circular monopole antenna with frequency notch characteristics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(8): 4015-4020.
- [16] 吕文俊, 朱洪波. 超宽带折合环天线的设计与研究[J]. 通信学报, 2010, 31(2): 76-80.  
LYU W J, ZHU H B. Design and study of ultra-wideband folded loop antennas[J]. Journal on Communications, 2010, 31(2): 76-80.

## 作者简介:



刘汉(1988-), 男, 安徽庐江人, 博士, 西安通信学院讲师, 主要研究方向为超宽带微带天线的理论分析与仿真计算。



尹成友(1964-), 男, 安徽巢湖人, 电子工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为天线与电波传播、近地复杂线天线分析、微带天线理论及数值分析、数据融合及阵列信号处理等。

范启蒙(1993-), 男, 河南濮阳人, 电子工程学院博士生, 主要研究方向为天线与电波传播。