

# 基于 CST 的超宽带带阻天线的建模仿真与实现

盛 沙<sup>1</sup>, 范伟龙<sup>2</sup>, 张 克<sup>1</sup>

(1. 北京石油化工学院信息工程学院, 北京 102617; 2. 联想长风科技(北京)有限公司, 北京 102600)

**摘要:**超宽带(Ultra-wide band, UWB)天线作为超宽带通信系统的核心部件, 直接决定整个系统的通信效能。因超宽带天线小巧精简的结构、更低的功耗、多样灵活集成方式使其应用极为普遍。但无线局域网(WLAN)窄带系统的干扰一直没有很好的解决, 针对此问题, 设计了具有带阻功能的超宽带天线, 并进行了仿真和实验测试。测试结果表明, 当天线电压驻波比小于 2 时, 工作频带为 3.1~5.16 GHz 和 5.9~15 GHz; 当电压驻波比大于 2 时, 天线的阻带频段为 5.16~5.9 GHz, 能很好地抑制 WLAN 系统的干扰。

**关键词:**超宽带天线; 带阻天线; 陷波特性; 寄生结构

**中图分类号:** TN822.8

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.19770/j.cnki.issn.1008-2565.2020.02.007

**开放科学(资源服务)标识码:**



## Modeling, Simulation and Implementation of Band-notched Ultra-wide band Antenna Based on CST

SHENG Sha<sup>1</sup>, FAN Weilong<sup>2</sup>, ZHANG Ke<sup>1</sup>

(1. College of Information Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;  
2. Lenovo Chang Feng Technology(Beijing) Ltd. Company, Beijing 102600, China)

**Abstract:** The communication performance of the system is determined by the ultra-wideband (UWB) antenna which is the core component of the UWB communication system. The UWB antennas are widely used in communication systems, as it has the advantages such as low profile, low power consumption and flexible integration. However, the interference of wireless local area network (WLAN) narrowband system has not been solved very well. To solve this problem, an UWB antenna with band-notched function is designed and simulated. The simulation and experiment results show that the operating frequency band is from 3.1 to 5.16 GHz and from 5.9 to 15 GHz, when the antenna voltage standing wave ratio is less than 2. When the voltage standing wave ratio is greater than 2, the band elimination band of the antenna is from 5.16 to 5.9 GHz, which can suppress well the interference of the WLAN system.

**Key words:** UWB antenna; band-notched antenna; band-notched characteristics; parasitic structure

超宽带通信技术广泛应用于军事(如雷达、通信等)领域已达近 60 年, 但是将之用于民用不到 20 年的时间<sup>[1]</sup>。天线是无线超宽带(Ultra-wide band,

UWB)通信系统的核心组成部分; 一方面向外部空间发射电磁波; 另一方面接收空间中的电磁波信号。天线的特性则直接影响 UWB 通信系统的效能。超

宽带通信系统对超宽带天线有着多方面的技术要求,首先,要求天线体积尽可能紧凑、小巧,以便于多应用场景的集成;其次,如何规避设备间的电磁互相干扰。如何实现小巧而具有优异抗干扰特性的天线成为超宽带通信系统设计的关键。

为了防止无线局域网(5.15~5.825 GHz)的频谱干扰,设计出具有带阻特性的天线,许多学者采用各种不同的方法,如变结构设计的方法<sup>[2-3]</sup>、增加寄生单元的方法<sup>[4]</sup>、调谐支线的方法<sup>[5-6]</sup>。笔者提出一种椭圆开孔的结构,设计并优化了 UWB 天线,有效抑制了 WLAN 的无线干扰。

## 1 超宽带(UWB)定义

2002 年 2 月,美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)限定了在民用领域的数字通信、测量 & 成像等场景下,可以采用超宽带技术,但其工作频率  $f$  必须限定在  $\geq 3.1 \text{ GHz}$ 、 $\leq 10.6 \text{ GHz}$  的频谱之内<sup>[7-8]</sup>。

此外,当无线通信的工作频率满足如下 2 项要求之一,便可称之为超宽带通信系统。

(1) 系统带宽  $B_f > 0.2$ 。

系统带宽  $B_f$  的计算式如下:

$$B_f = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (1)$$

式中:  $f_H$  为系统在 -10 dB 带宽下的工作最高频率;  $f_L$  为系统在 -10 dB 带宽下的工作最低频率。

(2) 系统的绝对带宽  $f_H - f_L \geq 500 \text{ MHz}$ 。

## 2 超宽带天线特性参数

### 2.1 天线输入阻抗

天线输入阻抗可反映天线电磁辐射特性。天线输入端的阻抗定义为:

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = 2 \frac{P_{in}}{|I_{in}|^2} = R_{in} + jX_{in} \quad (2)$$

式中:  $Z_{in}$  为天线的输入阻抗;  $V_{in}$  为天线入电压;  $I_{in}$  为天线入电流;  $P_{in}$  为天线入功率;  $R_{in}$  为天线入电阻,包含损耗电阻  $R_i$  和辐射电阻  $R_{rad}$ ;  $X_{in}$  为天线入电抗,入电抗  $X_{in}$  将部分输入能量储存于天线外表而不向外辐射。

### 2.2 阻抗带宽与反射系数

当天线和信号输入线路之间的反射功率小于 10% 时所对应匹配频率的带宽,称之为阻抗带宽。经典信号传输模型如图 1 所示,反射波和入射波电压之间的比值为  $\Gamma$ ,其表达式为:

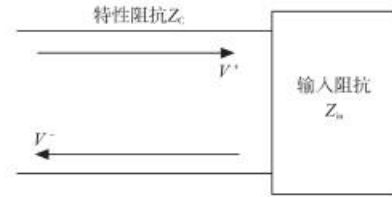


图 1 传输线模型

Fig. 1 The transmission line model

$$\Gamma = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_c - Z_{in}}{Z_c + Z_{in}} \quad (3)$$

入射功率为:

$$P^+ = \frac{|V^+|^2}{2Z_c} \quad (4)$$

反射功率是:

$$P^- = |\Gamma|^2 \frac{|V^+|^2}{2Z_c} \quad (5)$$

天线最终获得的功率是:

$$P_{in} = (1 - |\Gamma|^2) \frac{|V^+|^2}{2Z_c} \quad (6)$$

在工作频带内,天线的反射功率应该小于入射功率的 10%,由式(6)可以解得,反射系数  $\Gamma$  应小于 0.316 2。

### 2.3 电压驻波比与回波损耗

电压驻波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)作为阻抗带宽的一个重要特征参数,与终端电源反射系数  $\Gamma$  有关。电压驻波比(VSWR)计算式如下:

$$\text{VSWR} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (7)$$

基于反射系数,只有当  $\text{VSWR} < 2$  时,可认为天线处于匹配的工作状态。

回波损耗(RL)是阻抗匹配的另一特征参数,定义为:

$$RL = -20 \log(|\Gamma|) \quad (8)$$

在工作带宽内,天线工作在匹配状态时的 RL 应该大于 -10 dB。

### 2.4 辐射方向图

天线的信号发射强弱变化与空间方向的对应关系称之为天线的辐射方向图(简称方向图)。天线方向图是展示说明天线辐射性能的最佳方式,可直观地反映电磁场的空间分布情况。方向图的测定是在远场区完成。通过数学模型得到与空间方向坐标相对应的方向图函数。实际应用中,经常采用天线的 E 面、H 面来代表天线的方向参数。E 面平行于电场矢量, H 面则平行于磁场矢量。2 个面互相垂



直,并且二者都在最大辐射方向上。

### 3 超宽带天线设计

#### 3.1 天线设计要求

- (1) 涵盖 3.1~10.6 GHz;
- (2) 电压驻波比  $VSWR < 2$  (工作频段内);
- (3) 体积务必小,复杂度低,易于制造。

#### 3.2 天线初始模型

单级子天线是结构最为简单、应用最为普及的天线,其结构模型如图2所示。可分为辐射单元、接地板、同轴馈线3部分。其中,同轴馈线的内芯与辐射单元连接,贯穿接地板而不与地连接。馈线屏蔽层则与接地板连接。调整天线尺寸使天线特性阻抗为  $50 \Omega$ ,该辐射单元尺寸不大于  $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  ( $l \times h \times w$ )。

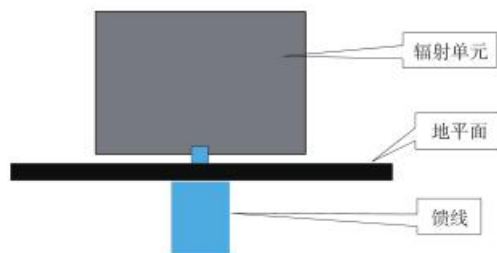


图2 矩形天线示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of rectangular antenna

通过 CST 仿真平台,对单级子天线建模并分析,得到其回波损耗曲线  $S_{11}$ ,如图3所示。由图3可以看出,在 3.1~10.6 GHz 频率区间内,天线的  $RL$  均大于  $-10 \text{ dB}$ ,单级子天线不能满足超宽带通信天线的要求。下面的主要工作是在不增加天线尺寸的前提下,通过对天线结构优化增加天线的阻抗带宽,得到一种可用于超宽带通信的单级子天线设计方法。

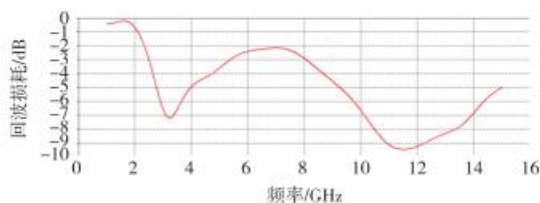


图3 矩形天线回波损耗

Fig. 3 Return loss of rectangular antenna

#### 3.3 辐射体采用椭圆结构

通过天线表面图分析天线的电流分布在 5.3 GHz 的频点的天线外表层的电流图,如图4所示。由图4中可以看出,大量的电流产生于馈电端口附

近。本部分电流所产生的驻波,部分反射回馈电端口,未能辐射到天线外部,大量耗损了天线的发射能量。造成反射损耗增大的最主要原因是由于矩形的辐射平面在边缘突变导致。

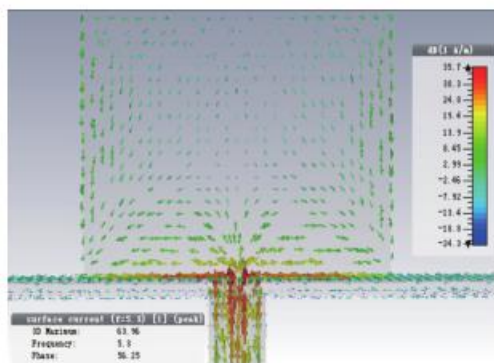


图4 矩形结构天线表面电流图

Fig. 4 Surface current diagram of rectangular structure

在天线尺寸不增加条件下,通过将矩形天线改为椭圆形渐变结构,优化天线与馈电网络的匹配特性,扩展天线的阻抗带宽。保持天线基本尺寸不变,椭圆形的长轴为矩形的宽 30 mm,短轴为矩形高 20 mm,厚度不变为 0.5 mm。改矩形为椭圆形结构后的天线示意图如图5所示。



图5 椭圆形结构天线示意图

Fig. 5 Oval structure diagram

通过 CST 仿真平台建模仿真得到椭圆形天线的  $RL$   $S_{11}$  曲线,如图6所示。由图6可以看出,当  $S_{11}$  小于  $-10 \text{ dB}$  时,天线的工作带宽为 3.1~15 GHz,覆盖了超宽带频率范围,由此可知,将矩形的辐射平面改为边缘渐变的椭圆形,天线阻抗带宽改善明显,符合设计要求。

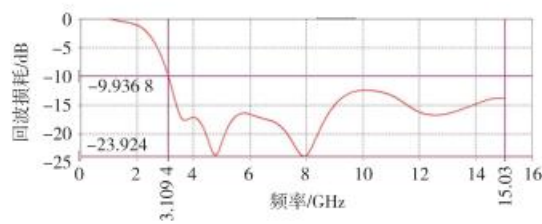


图6 椭圆天线回波损耗

Fig. 6 Return loss of elliptical antenna

椭圆天线的表面电流图(5.3 GHz)及与天线电压驻波比分别如图7、图8所示。

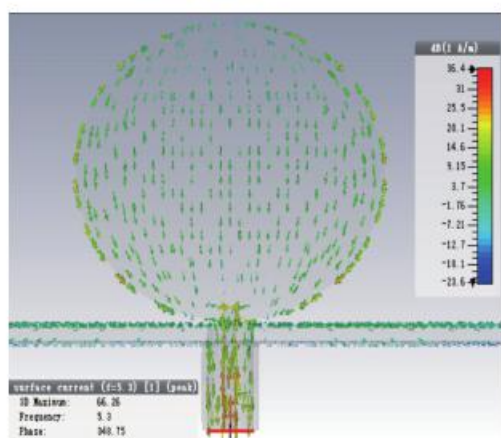


图7 椭圆天线表面电流

Fig. 7 Elliptical antenna surface current

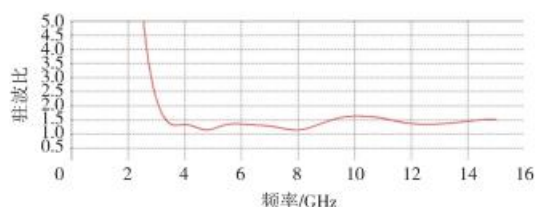


图8 椭圆天线电压驻波比

Fig. 8 VSWR of elliptical antenna

对比图7与图4可以看出,在同一频点,椭圆形天线表面电流密度明显小于矩形天线,说明经馈线馈送的大部分能量都已经辐射到空间,仅有小部分电流形成驻波。由图8可以看出,形成的驻波满足工程上的需求,即在工作频段内VSWR小于2。

### 3.4 天线的优化

经过优化天线外形,使得单级子天线可覆盖超宽带通信的全部频段,满足超宽带通信天线设计要求。但由于超宽带频段内的一些频段已被WLAN、WiMAX和广播系统等无线系统所占用,为了减少系统间的相互干扰,要求实现系统兼容,这就需要对上述椭圆天线进行结构优化,在不增加天线尺寸的基础上,实现对某些频段的陷带功能。

在椭圆形上半短轴上选取一点,以该点为圆心,该点到椭圆上边界为半径,挖一个圆形槽,以便在槽内加载寄生结构而不影响天线尺寸,设计优化后的椭圆形天线示意图如图9所示。改进后天线的圆形槽选用不同的半径对回波反射S11的影响如图10所示。由图10可以看出,在适当的范围内选用不同的圆半径对S11影响不大,且均符合超宽带要求。

天线在4.5 GHz频点优化前和优化后的E面

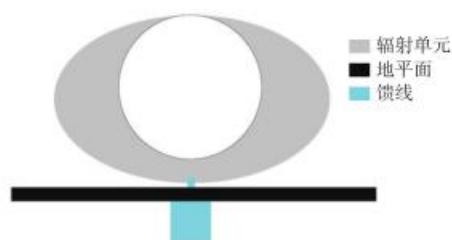


图9 优化后天线示意图

Fig. 9 Schematic diagram of optimized antenna

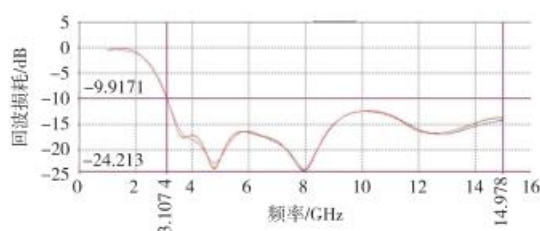


图10 对圆形半径的参数扫描

Fig. 10 Parameter scanning of circular radius

辐射方向图对比如图11所示。由图11可以看出,优化前后天线的辐射方向并没有明显变化。

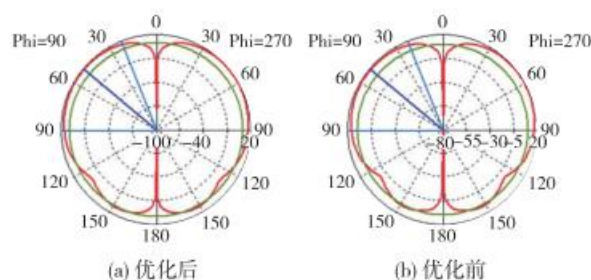


图11 优化前后E面方向图对比

Fig. 11 Direction diagram of plane E of band-notched of UWB

### 3.5 超宽带天线实测

通过软件仿真分析,该UWB天线方案可行。UWB天线实际模型如图12所示,使用矢量网络分析仪对该天线进行测量,结果如图13所示。



图12 超宽带天线实际模型

Fig. 12 Practical model of UWB antenna

对比图13与图10可以看出,仿真结果与实测结果存在一定差异,但二者S11曲线走势基本一致,



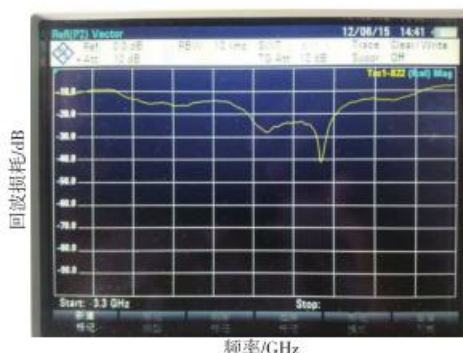


图 13 超宽带天线实测 S11 图

Fig. 13 Measured S11 figure of UWB antenna

并且实测结果也符合超宽带带宽要求。

## 4 具有陷波特性的超宽带天线设计

### 4.1 单阻带超宽带天线设计要求

(1) 涵盖 3.1~10.6 GHz;

(2) 在 5.15~5.825 GHz 之间 (WLAN 频段) 呈阻带特性;

(3) 其他工作频段具有稳定的辐射特性。

### 4.2 陷波特性的实现

单极子 UWB 天线中引入寄生单元,使带阻频带内辐射单元电流流向与寄生单元电流流向相反,达到相互抑制的目的,从而在超宽带频带范围内实现带阻特性。通过对超宽带天线加载开路枝节使天线实现带阻特性,分析开路线长度对阻抗带宽的影响,找到最优的仿真结果,确定最终的开路枝节尺寸<sup>[9]</sup>。

### 4.3 天线结构设计

在天线的陷带性能设计过程中,寄生结构的尺寸、形状对天线的带阻性能影响至关重要。本设计中首先将开路结构定为 T 型,然后为了达到在 WLAN 频段带阻性能要求,又将开路结构改为十字型,最后调整天线参数,改善天线的特性,使其具有设计要求的性能。

具有陷波特性的超宽带天线示意图如图 14 所示。在上述设计的基础上进一步优化、改进。在天线的圆形槽底部加了 1 个 T 型或十字型结构,调整相应结构尺寸,以达到陷波目的<sup>[10-11]</sup>。

### 4.4 阻带天线参数分析

在 UWB 天线的圆形开槽内加入 1 个十字型开路结构形成一个陷波结构单元。用软件对十字型结构不同参数进行扫描,结果如图 15 所示。从图 15 中可以看出,由于十字型结构的加入,会在频带上产

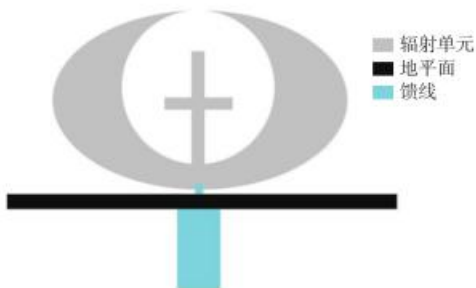


图 14 具有陷波特性的超宽带天线示意图

Fig. 14 Schematic diagram of UWB antenna with notch characteristics

生一个阻带,对于 5 个 *add* 参数的扫描,在 5.16~7.24 GHz 的频带范围内产生了 5 陷波带宽,其中最大带宽为 *add*=1 mm 时,阻带宽度为 1.24 GHz,阻带中心频率为 6.5 GHz,回波反射增益为 -3.22 dB;最小带宽为 *add*=5 mm 时,阻带宽度为 0.74 GHz,阻带中心频率为 5.49 GHz,

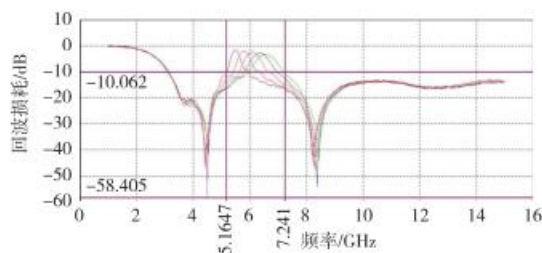


图 15 十字型参数扫描

Fig. 15 Cross parameter scanning

回波反射增益为 -1.74 dB。可见,十字型结构在高频带宽较宽,低频带宽较窄,S11 增益在高频较低,低频较高。说明其在较低频带具有良好的阻带性能,而且频带宽度也能覆盖 WLAN 频段宽度。故选用该十字型结构实现 UWB 天线带阻性能可以完成设计要求<sup>[12-13]</sup>。

经过最终调整,阻带超宽带天线仿真图与参数分别如图 16、表 1 所示。

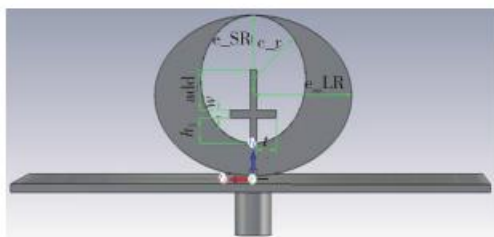


图 16 超宽带带阻天线模型

Fig. 16 Band-notched antenna model of UWB

按照表 1 中设置参数进行软件仿真,得到天线 S11 图与电压驻波比,如图 17 所示。该天线阻带在

5.16~5.9 GHz 基本覆盖了 WLAN 频段,除此频段外,覆盖了 UWB 频段,在高频部分具有平坦反射增益。

表 1 超宽带带阻天线仿真参数

Table 1 Simulation parameters of band-notched antenna of UWB

参数	$\epsilon_{SR}$	$\epsilon_{LR}$	$c_r$	$add/mm$
数值	10	15	8	5
参数	$h_1$	$w$	$t$	
数值	6.5	1	3	

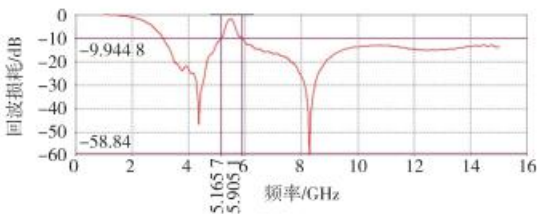


图 17 超宽带带阻天线回波反馈损耗

Fig. 17 Echo feedback loss of band-notched antenna of UWB

为了进一步研究天线的性能,对天线在 4.5、8 GHz 的辐射特性进行研究,得到的辐射方向图,如图 18、图 19 所示。

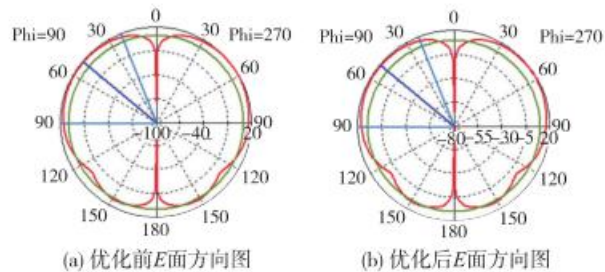


图 18 超宽带带阻天线 E 面方向图

Fig. 18 Direction diagram of plane E of band-notched of UWB

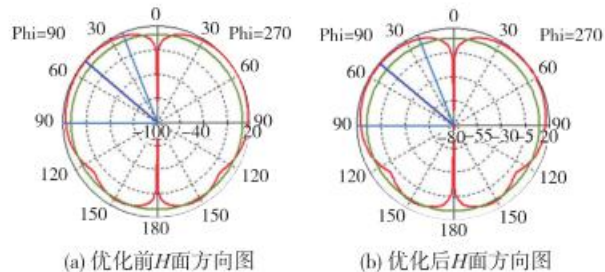


图 19 超宽带带阻天线 H 面方向图

Fig. 19 Direction diagram of plane H of band-notched of UWB

从图 18、图 19 中可以看出,该天线 E 面在低频与高频处有着近似全向辐射的特性;H 面的辐射特

性随着频率的增加,主瓣增益逐渐趋于 90°,旁瓣增益则变小。在高频处,天线具有方向性。但整体而言,H 面仍满足超宽带天线特性的要求。

## 5 结论

提出了 2 种超宽带天线的设计,并通过仿真进行了结构优化。单极子结构的天线,可有效覆盖超宽带通信的带宽;为拥有特定频段阻带特性的陷带天线。第 1 种单极子超宽带天线在  $VSWR < 2$  时,工作频带覆盖了 3.1~15 GHz。第 2 种带阻超宽带天线在  $VSWR < 2$  时,工作频带为 3.1~5.16 GHz 和 5.9~15 GHz;当  $VSWR > 2$  时,天线的阻带频段为 5.16~5.9 GHz,能很好地抑制 WLAN 系统的干扰。

## 参考文献

- [1] FCC. First Report and Order on Ultra-wideband Technology[R]. Technology Report, 2002.
- [2] 胡伟, 张建华, 田健. 一种新型的多边形超宽带印刷天线[J]. 现代雷达, 2011, 33(3): 60-62.
- [3] Marindra Adi Mahmud Jaya, Promwong S, Takada J I. Comprehensive characterization of a novel UWB elliptical planar monopole antenna[C]. TENCON 2012 - 2012 IEEE Region 10 Conference. IEEE, 2012.
- [4] 常雷, 廖成. 具有寄生单元的新型带阻超宽带天线[J]. 微波学报, 2010, 27(1): 17-21.
- [5] 胡少文, 吴毅强, 张云, 等. 具有带阻特性的新型超宽带特性研究[J]. 电子器件, 2014, 37(4): 622-625.
- [6] 何云红. 超宽带天线的研究与设计[D]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
- [7] 蔡凌云. 时域槽天线及几种超宽带带阻天线的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [8] 单坤. 时域小型超宽带天线的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [9] 朱超. 超宽带天线的设计及其陷波特性的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [10] 陈川, 焦永昌, 张立, 等. 一种具有陷波特性的超宽带天线[C]. 2009 年全国天线年会论文集(上), 2009.
- [11] 邓辉. 具有陷波特性的超宽带天线研究与设计[D]. 南昌: 华东交通大学, 2013.
- [12] 焦婧. 具有陷带性能的超宽带天线研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [13] 徐保林. 具有带阻特性的小型化超宽带微带天线设计及应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.