

一种可控三陷波超宽带天线设计与研究

董健* 胡国强 徐曦 施荣华
(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘要: 为了避免如 WiMax, WLAN 和 X 频段卫星系统等窄带通信系统对超宽带通信系统的影响, 该文提出一种具有可控三陷波特性的超宽带天线。该天线通过在辐射贴片和接地板上开槽, 并在基板背面增加环形寄生单元的方法实现三陷波特性的。天线在 3.1~10.6 GHz 的超宽带频段内能够有效地工作并抑制 3 种不同的窄带通信系统的干扰。同时在环形寄生单元处增加开关设置, 使天线能够实现双/三陷波的功能切换, 并增强陷波性能。实测和仿真结果吻合, 该天线实现了良好的陷波功能, 在工作频段内有良好的辐射方向特性。

关键词: 超宽带天线; 三陷波; 可控性; 环形寄生单元

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)09-2277-05

DOI: 10.11999/JEIT141566

Design and Analysis of Controllable Tri-band-notched Ultrawide Band Antenna

Dong Jian Hu Guo-qiang Xu Xi Shi Rong-hua

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A controllable tri-band-notched UltraWide Band (UWB) antenna is presented to avoid the interference of services working in the UWB band such as WiMax, WLAN, and X-band satellite system applications. The tri-band-notched characteristics are achieved by etching slots on the radiating patch and the ground plane, and adding a parasitic ring unit on the back of substrate. The proposed antenna operates on the UWB (3.1~10.6 GHz) efficiently, and it can inhibit interference from three different kinds of narrow band communication systems. A switch is added on the parasitic ring unit in order to realize the conversion between dual band-notched and tri-band-notched functions. Simulated and measured results show that the proposed antenna provides excellent band-notched function on the rejectband and has nearly omnidirectional radiation patterns on the passband.

Key words: UltraWide Band (UWB) antenna; Tri-band-notched; Controllable; Parasitic ring unit

1 引言

超宽带(UltraWide Band, UWB)技术自上世纪的中期出现以来, 从最初的军事用途发展为民用经历了一个漫长但具有突破性的过程。自 2002 年美国联邦通信委员会通过了允许将超宽带技术应用于民用通信的规范, 并划分了 3.1~10.6 GHz 的工作频段, 超宽带技术得以迅速发展^[1]。相较于一般的窄带系统, 超宽带技术具有许多优势, 如超宽的信号传输带宽, 较低的发射功耗以及高数据传输速率等^[2], 因此具有非常广阔的发展前景。由于超宽带系统工作频段极宽, 与其他窄带系统往往存在频谱重叠, 如 3.3~3.6 GHz 的无线城域网(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMax)频

段, 5.1~5.9 GHz 的无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)频段和 7.25~7.75 GHz 的 X 频段卫星下行信号等。为了降低不同通信系统间的相互干扰, 具有频带阻隔特性的陷波超宽带天线^[3,4]设计成为研究热点。

陷波超宽带天线最初由美国 Schantz 等人^[5]于 2003 年提出, 可以通过引入寄生单元^[6,7]、分形结构^[8]、调谐枝节^[9,10]、开槽^[11,12]等方式实现。这些方式中, 开槽结构由于其实现比较简单, 且对工作频段内的阻抗匹配影响较小, 因而获得广泛应用。开槽形状各异, 如直线形槽、V 形槽、U 形槽等, 但它们的共同原理都是改变天线表面电流的分布, 从而达到频率阻隔的效果。例如文献[11]中通过在辐射贴片上开 C 形槽, 同时在接地板上开细长缝隙以形成陷波结构, 这种结构的带宽比较宽, 陷波特性良好。文献[12]提出了一种在矩形天线一侧开一条窄缝, 并在辐射贴片中心引入一倒 U 形槽的微带馈

2014-12-10 收到, 2015-05-11 改回, 2015-06-29 网络优先出版
国家自然科学基金(61201086), 教育部博士学科点专项科研基金
(20110162120044)和湖南省科技计划项目(2014GK3022)资助课题
*通信作者: 董健 dongjian@mail.csu.edu.cn

电超宽带天线, 该天线在 5~5.9 GHz 实现了陷波。文献[13]提出了一种可重构的超宽带天线, 该天线在微带馈电线和辐射贴片开槽, 同时辐射贴片上的回形槽由两个二极管连通并通过控制两个二极管的状态使天线实现单陷波与双陷波的切换。这些设计方案中, 有的不能同时屏蔽多个窄带系统的影响, 有的线性槽可调节参数比较少, 有的结构过于复杂, 这些因素使得陷波中心频率的调整控制方式不够灵活。

鉴于此, 本文设计了一种三陷波超宽带天线, 在辐射贴片和接地板上分别开 H 和 L 形槽, 同时在天线背面添加环形寄生单元实现三陷波特性的。进一步地, 通过在寄生单元处增加开关设置实现双/三陷波的功能切换, 并增强陷波性能。仿真和实验结果均表明该三陷波超宽带天线具有良好的陷波功能和超宽带工作特性。

2 三陷波超宽带天线结构设计

图 1 所示为双陷波超宽带天线^[14]的结构, 通过分别在圆形辐射贴片和接地板上开一个带圆弧边的 H 形槽和两条宽度为 0.2 mm 的 L 形槽实现双陷波特性的, 避免来自 WiMax 及 WLAN 通信系统信号的干扰。 R_H 为圆弧的半径大小, L_{H0} 为内外圆弧的半径之差, L_{H1} 为连接两弧槽口的宽度, α 为弧形与水平线的夹角。仿真优化后确定的双陷波超宽带天线各项参数如表 1 所示。相对于线形槽, 这种开槽结构可以通过槽参数组合的形式更有效地控制陷波中心频率。L 形槽的长度可以通过半波长谐振原理得到, 当槽长度设置为陷波中心频率对应波导波长一半时, 相当于在对应中心频率点引入谐振器, 天线工作于此频率点附近时, 表面电流将会集中在槽口周围, 造成阻抗失配而形成陷波。陷波中心频率与槽长度的关系

$$f_n = \frac{c}{4L\sqrt{\epsilon_c}} \quad (1)$$

式中, c 为光速, f_n 为陷波的中心频率, 在 WLAN 频段中设为 5.6 GHz, L 为两个 L 形槽长度 l 的和。 ϵ_c 为有效介电常数, 设 ϵ_r 为介质的相对介电常数, 两者之间关系为

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (2)$$

代入参数, 计算得到 L 为 12.75 mm。

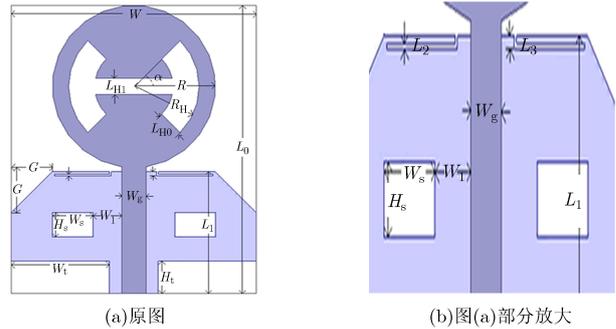


图 1 双陷波超宽带天线结构示意图

该天线实现了 3.3~3.6 GHz 和 5.1~5.9 GHz 两个频带内的陷波特性的, 能够避免来自 WiMax 和 WLAN 窄带系统的信号干扰。为屏蔽来自 X 频段 7.25~7.75 GHz 卫星下行信号的干扰, 在该双陷波超宽带天线的基础上, 在基板背面增加一个环形的寄生单元(如图 2 所示), 从而增加一个阻带使天线实现三陷波功能。将环形单元的宽度 W_2 设定为 1 mm, 陷波的中心频率设定为 7.4 GHz, 根据半波长谐振原理, 环长 R_r 通过式(1)计算得 $R_r=9.65$ mm。在三陷波天线的基础上进行陷波的可控性设计, 目的是将天线高频部分的陷波功能设计为具有开关特性。为此, 采用添加环形寄生单元的开关作为控制部件, 通过改变环形寄生单元长度来控制第 3 个陷波的中心频率。当该陷波中心频率处于原双陷波超宽带天线两个陷波中心频率中的任何一个附近时, 陷波效果因为叠加而得到增加。当该陷波中心频率不在 3.1~10.6 GHz 范围时, 仍然为双陷波超宽带天线。将寄生单元长度设计为开关形式, 能够方便地实现双陷波与三陷波之间的切换, 从而达到可控性设计的目的。

3 陷波特性及可控性分析

图 3 为三陷波超宽带天线的回波损耗曲线与超宽带天线回波损耗曲线的对比图。从图 3 中可以看出三陷波超宽带天线在频率为 3.6 GHz, 5.6 GHz 和 7.4 GHz 附近回波损耗曲线出现峰值且满足 $S_{11} > -10$ dB, 此时三陷波超宽带天线在以上 3 个中心频率点附近形成 3 个阻带, 这 3 个阻带能有效避免来自 WiMax, WLAN 和 X 频段卫星系统的信号干扰。

图 2 中, 在天线背面用于产生高频陷波的寄生单元处, 增加一个开关 1 和开关 2。开关的环长根

表 1 双陷波超宽带天线参数尺寸(mm)

W	L_0	R	W_g	L_1	G	W_s	H_s	W_t	H_t	R_H	L_{H0}	L_{H1}	α	L_2	W_1	L_3
30	35.5	10	3	15	5	5	3	12	4	8	3.2	2	$\pi/3$	0.2	3.5	0.5

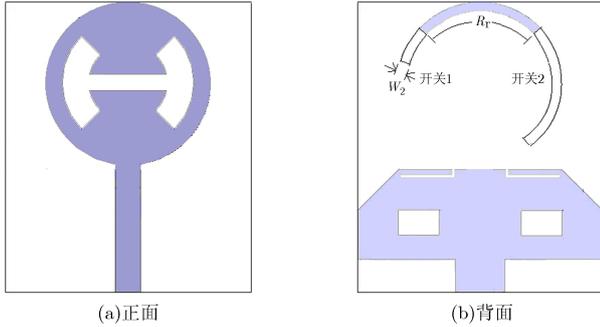


图2 可控三陷波超宽带天线结构示意图

据半波长谐振原理计算，设添加开关后的寄生环总长度为 R ， f_3 为第3个陷波的中心频率，由式(3)：

$$f_3 = \frac{c}{2R\sqrt{\epsilon_e}} \quad (3)$$

计算开关长度 R 。当 R 取值不同时得到不同的 f_3 ，从而实现第3个陷波中心频率的改变。这里设置开关1长度为 3.1 mm，开关2长度为 10.75 mm。

当开关1，开关2均断开时，天线和未改造的三陷波超宽带天线没有区别，实现三陷波的功能。当开关1闭合时，环形寄生单元的长度由原来的 9.65 mm 增加为 12.75 mm，陷波中心频率变为 5.6 GHz，天线在高频处陷波功能消失。同理，当开关2闭合时，环形寄生单元的长度由原来的 9.65 mm 增加为 20.4 mm，陷波中心频率变为 3.5 GHz，天线在高频处陷波功能消失。当开关1，开关2均闭合时，环形的总长度为 23.5 mm，产生的陷波中心频率为 3 GHz，该频率在超宽带工作频段之外。开关状态与天线阻带范围的对应关系见表2。

对三陷波超宽带天线进行开关设计不仅能实现高频段陷波功能的自由控制，而且可增强原来的双陷波功能。图4为三陷波天线加入了开关设置且开关1闭合后的双陷波特性与原双陷波超宽带天线的陷波功能对比。从图中可以看到，加入开关设置后，天线在中频的陷波功能更强，阻带的部分曲线更为

表2 开关状态与天线阻带范围的对应关系

开关状态	阻带范围(GHz)
开关1断开，开关2断开	3.3~3.6, 5.1~5.9, 7.25~7.75
开关1闭合，开关2断开	3.3~3.6, 5.1~5.9
开关1断开，开关2闭合	3.3~3.6, 5.1~5.9
开关1闭合，开关2闭合	3.3~3.6, 5.1~5.9

陡峭，峰值较原双陷波超宽带天线更高，这说明天线的频率阻断效果更为明显。造成该现象的原因是开关1闭合，环形长度改变引起陷波频段的变化，两个同一阻带的陷波结构产生叠加作用，这样天线在中频(5.1~5.9 GHz)的陷波功能加强。同理，开关2通过改变环形寄生单元的长度，使低频(3.3~3.6 GHz)陷波功能得到增强。总之，加入开关设置后，不仅实现了陷波功能的实时控制性，同时在该天线实现双陷波功能时，比原来的陷波性能有所提高。

4 实测结果分析

根据优化后的参数制作天线实物。天线印制在介电常数为 4.4 厚度为 1.6 mm 的 FR-4 板上，这里开关采取等效结构，直接使用不同长度的环形寄生单元实现表2中的不同工作状态。利用矢量网络分析仪对天线实物测试，图5为三陷波超宽带天线回波损耗的仿真与实际测量结果。实测曲线与仿真曲线基本吻合，实测与仿真结果之间的细微差别可能由制造精度或天线转接头的损耗引起。从图5可以看出，在 3.1~10.6 GHz 频带范围内天线分别在 3.6 GHz, 5.6 GHz 和 7.4 GHz 频点附近产生陷波从而形成3个阻带。图6为三陷波超宽带天线的实测增益图，天线在通带内增益保持在 3~5 dBi 上下，而在阻带内增益则下降至 -4 dBi 左右。这说明天线在通带内能够正常工作，而在阻带内由于增益不足无法正常工作。

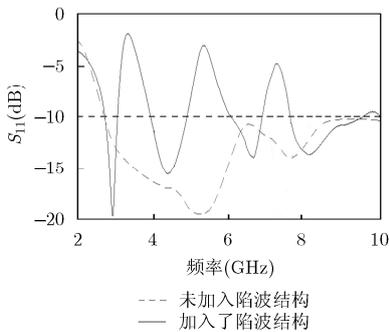


图3 三陷波超宽带天线的回波损耗

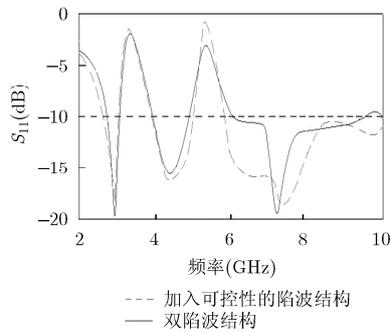


图4 开关1闭合时可控三陷波超宽带天线与原双陷波超宽带天线的陷波功能对比

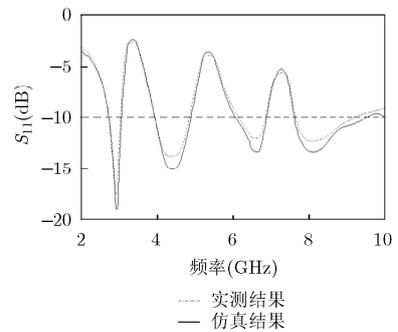


图5 三陷波超宽带天线的实测结果

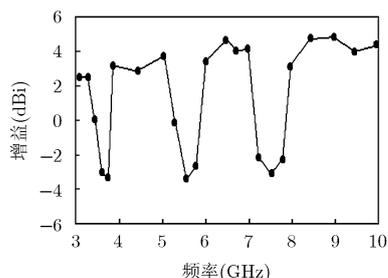


图6 三陷波超宽带天线的增益

图7为该天线分别在3.2 GHz, 5 GHz, 6.8 GHz以及8.5 GHz频率点的远场辐射方向图, 这4个频率点分别处于2.9~3.3 GHz, 3.8~5.1 GHz, 6~7.2 GHz, 7.8~10.6 GHz 4个通带内。从图中可知, 天线H面(xz -平面)辐射方向图都为椭圆形, E面(yz -平面)辐射方向图都呈“8”字形。实测辐射方向图与仿真方向图基本吻合, 这些方向图说明该天线在4个通带内辐射特性良好, 满足超宽带通信的要求。

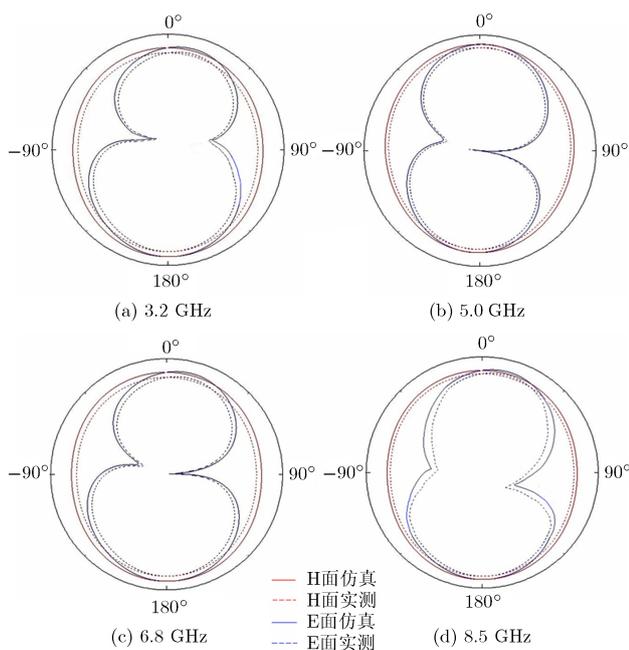


图7 三陷波超宽带天线的辐射方向图

5 结论

本文提出一种具有可控三陷波特性的超宽带天线, 该天线通过分别在圆形辐射贴片和接地板上开圆弧状H形槽及两个L形槽, 同时在基板背面添加环形寄生单元来实现可控三陷波特性的。对天线环形寄生单元进行了开关设计, 通过研究表明, 开关的使用能够将天线进行双/三陷波的切换, 当天线工作在双陷波状态时陷波功能得到了增强。仿真与实测结果表明该天线具备良好的陷波特性和辐射特性。

参考文献

- [1] Federal Communications Commission. First report and order in the matter of revision of part 1-5 of the commission rules regarding ultra-wideband transmission systems[R]. USA: FCC, 2002.
- [2] Chu Qing-xin, Mao Chun-xu, and Zhu He. A compact notched band UWB slot antenna with sharp selectivity and controllable bandwidth[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(8): 3961-3966.
- [3] 曹新宇, 张金玲, 杨虹葵. 新型小尺寸双陷波超宽带天线设计[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(3): 548-551.
- [4] Cao Xin-yu, Zhang Jin-ling, and Yang Hong-zhen. New small size ultra-wideband antenna having two frequency bands notch function[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(3): 548-551.
- [5] Lotfi P, Azarmanesh M, and Soltani S. Rotatable dual band-notched UWB/triple-band WLAN reconfigurable antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12(1): 104-107.
- [6] Schantz H G, Wolence G, and Myska E M. Frequency notched UWB antenna [C]. *IEEE Conference on Ultra-Wideband Systems and Technologies*, Reston, VA, USA, 2003: 214-218.
- [7] Reddy G S, Kamra A, and Mukherjee J. Compact printed monopole UWB antenna loaded with non-Concentric open-Ended rings for triple band-Notch characteristic[C]. *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, Seoul, 2013: 221-223.
- [8] Li Tong, Zhai Hui-qing, Li Gui-hong, et al.. Compact UWB band-notched antenna design using interdigital capacitance loading loop resonator[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11(1): 724-727.
- [9] Su Saou-wen, Wong Kin-lu, and Chang Fa-shian. Compact printed ultra-wideband slot antenna with a band-notched operation[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 45(2): 128-130.
- [10] Li Bing, Hong Jing-song, and Wang Bing-zhong. Switched band-notched UWB/dual-band WLAN slot antenna with inverted S-shaped slots[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11(1): 572-575.
- [11] Emadian S R, Ghobadi C, Nourinia J, et al.. Bandwidth enhancement of CPW-fed circle-like slot antenna with dual band-notched characteristic[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11(1): 543-546.
- [12] 叶亮华, 褚庆昕. 一种小型的具有良好陷波特性的超宽带缝隙天线[J]. *电子学报*, 2010, 38(12): 2862-2867.
- [13] Ye Liang-hua and Chu Qing-xin. Improved notch-band slot UWB antenna with small size[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 2862-2867.

- [12] Chung Kyung-ho, Kim Jae-moung, and Choi Jae-hoon. Wide band microstrip-fed monopole antenna having frequency band-notch funcation[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2005, 15(11): 766-768.
- [13] Badamchi B, Nourinia J, Ghobadi C, *et al.*. Design of compact reconfigurable ultra-wideband slot antenna with switchable single/dual band notch functions[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2014, 8(8): 541-548.
- [14] 施荣华, 徐曦, 董健. 一种双陷波超宽带天线设计与研究[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(2): 482-487.
- Shi Rong-hua, Xu Xi, and Dong Jian. Design and analysis of a novel dual band-notched UWB antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(2): 482-487.
- 董 健: 男, 1980 年生, 副教授, 研究方向为天线理论与设计、微波遥感、阵列信号处理等.
- 胡国强: 男, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为超宽带天线设计与研究.
- 徐 曦: 男, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为超宽带天线设计与研究.
- 施荣华: 男, 1963 年生, 教授, 研究方向为无线通信、智能计算与信息处理等.