

超宽带平板圆片单极天线及其小型化研究

钟玲玲, 李鹏, 章飏

(中国航天科工集团三院八三五七所, 天津 300141)

摘要: 对于一种新型超宽带平板圆片单极天线及其小型化方法进行了研究。平板圆片单极天线将辐射器、反射板和馈电装置放置在一个平面内,减小了空间体积,实现了天线的小型化。对这种天线进行了分析,通过仿真与实验验证了该天线良好的超宽带特性,同时还进一步研究了几种通过减小纵向高度来实现天线小型化的方法,即剪切、折叠和弯角。对于各种新型天线讨论了主要结构参数对于天线特性的影响,分别研究了天线的反射损耗和辐射方向图。仿真和实验结果表明这些新的天线形式能够在很宽的频带上满足性能要求,在卫星通信和移动通信中具有良好的应用前景。

关键词: 超宽带天线; 圆片单极天线; 小型化

中图分类号: TN822⁺.8 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)03-0070-06

Research on Ultrawide-band Planar Circular Disc Monopole Antenna and Its Miniaturization

ZHONG Ling-ling, LI Peng, ZHANG Biao

(8357 Research Institute of the 3rd Institute Academy of CASIC, Tianjin 300141, China)

Abstract: The radiator, reflector plate and the feeder equipment of the planar circular disc monopole were placed on the same plate. The special structure reduced the spatial volume, and was used to realize the miniaturization of the antenna. Detailed exploration was conducted to determine the antenna's properties. Through simulations and experiments, it was demonstrated that the antenna has good ultrawide-band performance. At the meantime, the antenna's height was further reduced by cutting a certain length, puckering a certain length or rotating a certain angle to realize miniaturization. The influence of novel antennas' structure parameters on performance was discussed and the return loss and radiation patterns of the antennas were presented. Simulation and experimental results showed that the novel antenna can performance requirement in ultrawide-band. The novel antennas have good application prospects in satellite and mobile communication systems.

Key words: ultra-wideband antenna; circular disc monopole antenna; miniaturization

超宽带(Ultrawide-band, UWB)技术是伴随着实际应用需求而诞生的。该技术产生于20世纪80年

收稿日期: 2010-11-07

作者简介: 钟玲玲(1980—)女,天津人,博士,工程师,主要研究方向为微波毫米波天线。

代,UWB的特点是极短的脉冲和极宽的带宽,这使得它在电子对抗系统、超宽带雷达等军事方面日益展现出优越性能。在UWB系统中,对天线设计有很高的要求。随着射频电子技术的飞跃和超宽带无线电设备的发展,超宽带天线技术也在不断地发展。近年来,超宽带天线已广泛应用于现代航空、航天以及民用通信等各个方面^[1-2]。因此,设计出结构简单、性能良好并且可以满足各种实际需求的超宽带天线具有重大的现实意义。

按照美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的定义,信号带宽大于1.5 GHz或信号带宽与中心频率之比大于25%为超宽带,2002年2月14日,FCC正式将带宽为7.5 GHz的从3.1 GHz到10.6 GHz之间的频率向民信用途开放^[3-4]。

传统的超宽带天线,如对数周期天线、阿基米德螺旋天线、等角螺旋天线等,馈电网络设计复杂,相位中心不固定。近年来提出的超宽带天线主要以双锥天线的各种演变形式为主,这包括蝶形天线、泪滴天线、渐变槽缝天线等及其变形形式。其中由W.Stohr所提出的圆片单极天线除了具有很宽的阻抗带宽之外,还具有稳定的相位中心^[5]。这种天线能够覆盖无线终端的全部频段,在很宽的阻抗带宽上能提供令人满意的辐射性能。此外,它还具有制作简单、加工方便、成本低廉、体积小、质量轻等诸多优点^[6-8]。

圆片单极天线虽然具有诸多优点,但是由于其地板是垂直于辐射器的,天线的空间尺寸较大,结构稳定性差。尤其是当天线的最低工作频率 f_l 处在短波段时,天线的纵向高度可以达到几米,而地板的尺寸则更为庞大,巨大的体积也会给天线的安装和维护带来不便,这个缺点大大降低了圆片单极天线的实际应用价值,所以需要进一步研究其平面化、小型化技术,因此提出了平板圆片单极天线。文献[7]详细介绍了超宽带平板圆片单极天线的设计方法及其超宽带性能,文中给出了这种天线在民用超宽带范围的仿真和实验结果,并在此基础上,提出了几种减小该天线高度的方法。通过电磁仿真软件以及实验验证,将详细讨论各种改进型天线的性能及主要结构参数对天线性能的影响,并对天线的阻抗及辐射特性进行分析。

1 平板圆片单极天线的特性分析

1.1 天线基本结构

平板圆片单极天线的基本结构如图1a所示:天线上端为圆片单极子的基本结构,圆片半径为 r ,下端反射板由2块边长分别为 m, n 的矩形金属片组成,与圆片共面对称放置;金属圆片与反射板的厚度均为 c ;天线采用同轴馈电的方式,同轴内芯线裸露出来,作为馈电点,同轴外皮与2块地板分别相连。将圆平板垂直地焊接在芯线之上,馈电点为圆片的下端面,焊接时留出馈电间隙 h 。

超宽带平板圆片单极天线的设计方法在文献[9]中已经详细介绍,此处不予赘述。因为要针对民用超宽带范围3.1~10.6 GHz进行设计,选取最低频率为3 GHz,在相关设计公式中,当 $f=3$ GHz时,可以得到 $r \approx 10.7$ mm。经过多组参数调整,综合考虑天线的尺寸参数和性能指标,最后确定能够使平板圆片单极天线获得良好仿真结果的最优参数为:圆片半径 $r=11$ mm,矩形金属反射板边长取值与圆片半径相同,即 $m=n=11$ mm,馈电高度 $h=0.6$ mm,地板和辐射单极子厚度 $c=1$ mm。以此参数模型为基础,实际加工制作了天线实物(如图1b所示)并对其性能进行了测量。

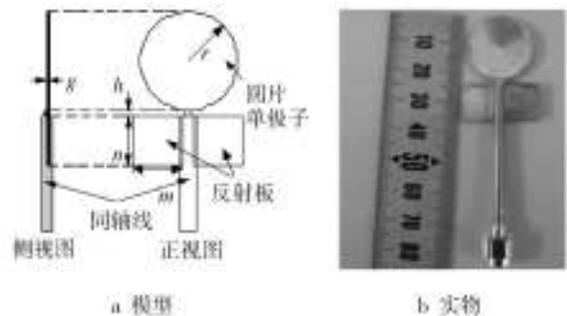


图1 平板圆片单极天线

Fig. 1 Planar circular disc monopole antenna

1.2 天线性能分析

天线的反射损耗 $|S_{11}|$ 是天线的一个重要性能参数,它决定了天线的阻抗特性。图2a给出了超宽带圆片单极天线反射损耗实验与仿真结果的比较。在3.1~55 GHz的超宽频率范围内,天线反射损耗的仿真结果均小于-10 dB;由于实验仪器的限制,只实际

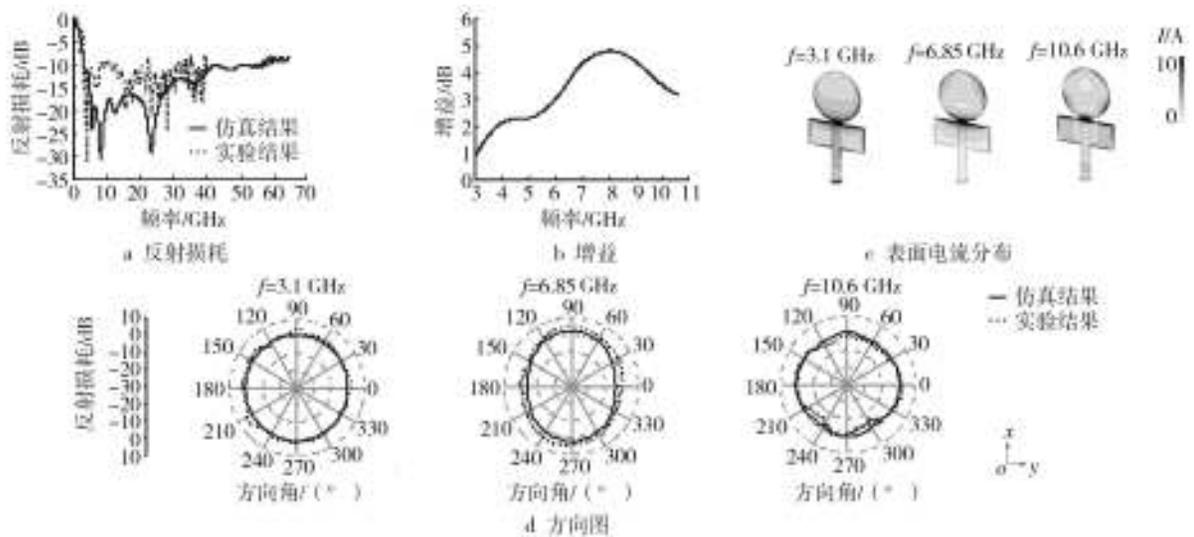


图2 平板圆片单极天线的性能

Fig. 2 Performance of the planar circular disc monopole antenna

测量了0.01~40 GHz的反射损耗,虽然实测的反射损耗比仿真值略高,但是仍然能够基本保证在3.1~40 GHz的频率范围内反射损耗是小于-10 dB的。综上所述,这种平板圆片单极天线阻抗特性良好,它具有近20:1的阻抗带宽。

对于超宽带天线,增益特性是衡量其性能好坏的重要指标。图2b是该天线的增益随频率变化关系的仿真结果(3~11 GHz)。频率在3.1~10.6 GHz范围内,增益变化范围是1~5 dB,变化幅度小于4 dB。总体而言,增益在频带内较为稳定。

天线的方向图是表征天线辐射特性与空间角度关系的图形。图2d表示该天线在频率分别为3.1, 6.85, 10.6 GHz时水平面(xoy面)方向图的仿真和实验结果。在各个频率上,该天线水平面近似全向辐射,仿真与实验测量的方向图吻合度较好,在频率为6.85 GHz时实测值甚至比仿真值略高,该平板圆片单极天线方向图的稳定性较好。

图2c是该天线在频率分别为3.1, 6.85, 10.6 GHz时零相位表面电流分布的仿真结果。在圆片上,电流主要分布在下端点附近。除此之外,电流还集中在地板的上边缘,这表明地板与圆片邻近的部分也成为辐射结构,仿真参数调节过程也表明天线反射损耗性能与地板的横边长度 m 有很大的关系,而纵边长度 n 的变化对反射损耗的影响不大。随着频率的升高天线的电长度增大,所以圆片上的表面电流在高频端会出现几个零点,但就总体而言,电流仍然

主要分布在圆片下端,这一特性较为稳定。

2 减小平板圆片单极天线高度的方法

对于平板圆片单极天线而言,进一步小型化的主要含义是减小天线的纵向高度。前述仿真结果中已经提到过,圆片单极天线的电流主要分布在圆片的下边缘,从理论上说,在不改变圆片直径大小的情况下,从上端采取措施降低天线的高度是值得尝试的方法。为了尽量减小天线尺寸同时保证天线的阻抗特性,采用了剪切、折叠和弯角3种方法来实现平板圆片单极天线在高度上的小型化设计。

2.1 剪切

减小平板圆片单极天线纵向高度的最直接方法是在天线的辐射圆片上直接进行剪切。因为电流主要分布在圆片的下边缘和地板的上边缘,从理论上说适当对圆片在高度上进行剪切能在一定程度上保持平板圆片单极天线的超宽带特性。

经过剪切的平板圆片单极天线结构如图3a所示。保持平板圆片单极天线的基本结构及参数不变(辐射单极子半径 $r=11$ mm,矩形金属反射板边长 $m=n=11$ mm,地板和辐射单极子厚度 $c=1$ mm),微调馈电高度至 $h=1.5$ mm,将圆片单极子在距离其下边缘 w 处剪切掉,则圆片单极子的最终高度为 w 。图3b为 $w=15$ mm时的天线实物。

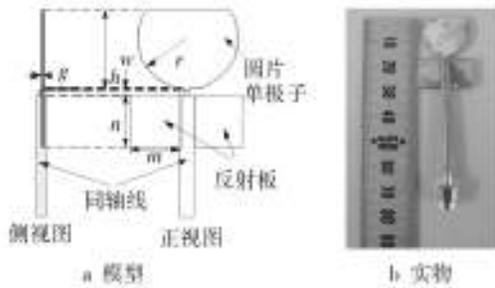


图3 剪切平板圆片单极天线

Fig. 3 Planar circular disc monopole antenna cutting a certain length

图4a给出了剪切平板圆片单极天线在 w 分别为15, 18, 22 mm(不剪切)时反射损耗随频率变化的仿真结果(0~65 GHz)。圆片剪切以后,相比较不剪切的情况其反射损耗总体呈上升趋势,但当 $w \geq 15$ mm时,在3.1~10.6 GHz的频率范围内,反射损耗值仍然能够保持均小于-10 dB,说明这种剪切圆片单极子的圆片高度相比较平板圆片单极子而言可以缩减约

30%。

图4b给出了 $w=15$ mm时剪切后的天线反射损耗曲线,可以看出:在3~18 GHz的频率范围内,反射损耗仿真结果均小于-10 dB;在实际测量的0.01~40 GHz频率范围内,3.1 GHz以上的反射损耗均可保证小于-9 dB;实测反射损耗在高频端比仿真值低,性能良好。

图4c表示 $w=15$ mm时,该天线在3.1, 6.85, 10.6 GHz时 xoy 面的辐射方向图。可以看出,该天线方向图与平板圆片单极天线相比差别不大,仿真与实验结果吻合,总体而言在3.1~10.6 GHz频带内较为稳定。

2.2 折叠

剪切的方法虽然能够减小天线的高度,但是其高度值有一定限制。前文的分析中已经提到,高度只能减小30%左右,因而要考虑通过其它方法继续减小天线的高度,折叠便是方法之一。

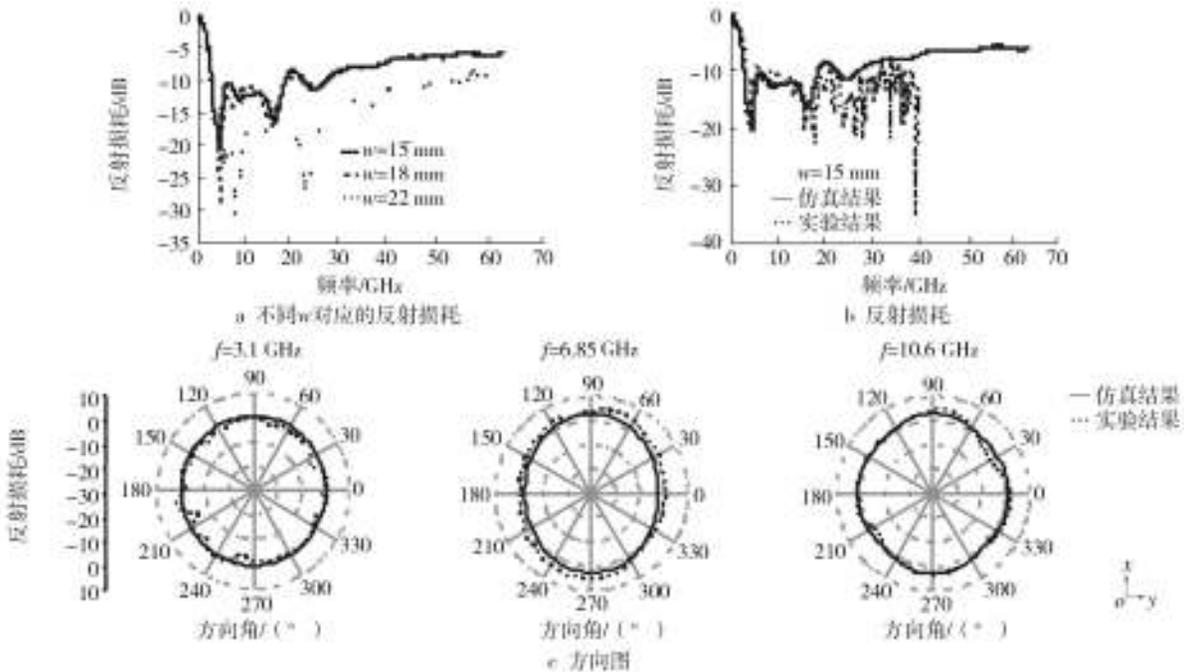


图4 剪切平板圆片单极天线的性能

Fig. 4 Performance of the planer circular disc monopole antenna cutting a certain length

经过折叠的圆片单极天线结构如图5a所示。保持平板圆片单极天线的基本结构及参数不变(辐射单极子半径 $r=11$ mm,矩形金属反射板边长 $m=n=11$ mm,馈电高度 $h=0.6$ mm,地板和辐射单极子厚度 $c=1$ mm),将圆片单极子在距离其下边缘 w 处直角折叠,则圆片单极子的最终高度为 w 。图5b为 $w=5$ mm

时的天线实物。

图6a给出了该超宽带折叠圆片单极天线分别在 w 为0 mm(完全折叠), 5 mm, 11 mm(从中点折叠), 15 mm, 22 mm(不折叠)时反射损耗随频率变化的仿真结果(0~65 GHz)。可以看出,圆片单极子折叠以后,相比较不折叠的情况其反射损耗有上下浮动,但

是浮动范围都不大。无论折叠任何高度,在3.1~10.6 GHz 的频率范围内,反射损耗值均可保证小于-10 dB,说明这种折叠圆片单极子可以在很大程度上减小高度,甚至可以让圆片完全折叠至高度为0。当然,由于纵向尺寸的减小,其横向尺寸必然有所扩展,也就是说它空间体积的减小是有限制的。

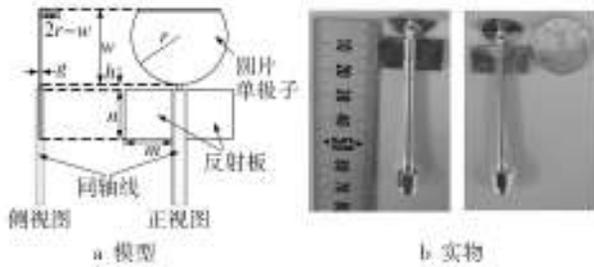


图5 折叠圆片单极天线

Fig. 5 Circular disc monopole antenna puckering a certain length

图6b给出了 $w=5\text{ mm}$ 时折叠后天线的反射损耗。从图6b可以看出在3.1~56 GHz的超宽频率范围内,天线反射损耗的仿真结果均小于-10 dB;在实际测量的0.01~40 GHz频率范围内,天线个别频点反射损耗大于-10 dB,虽然实测的反射损耗与仿真结果相比总体偏高,但总体趋势仍然具有超宽带特性。

图6c表示 $w=5\text{ mm}$ 时天线的辐射方向,可以看出, xoy 面仿真与实验结果基本吻合,仍然呈现良好的全向特性。

2.3 弯角

除了将圆片单极天线的圆片折叠,将其弯折一定的角度是减小天线高度的另一个有效方法。

弯角结构的圆片单极天线如图7a所示。保持平

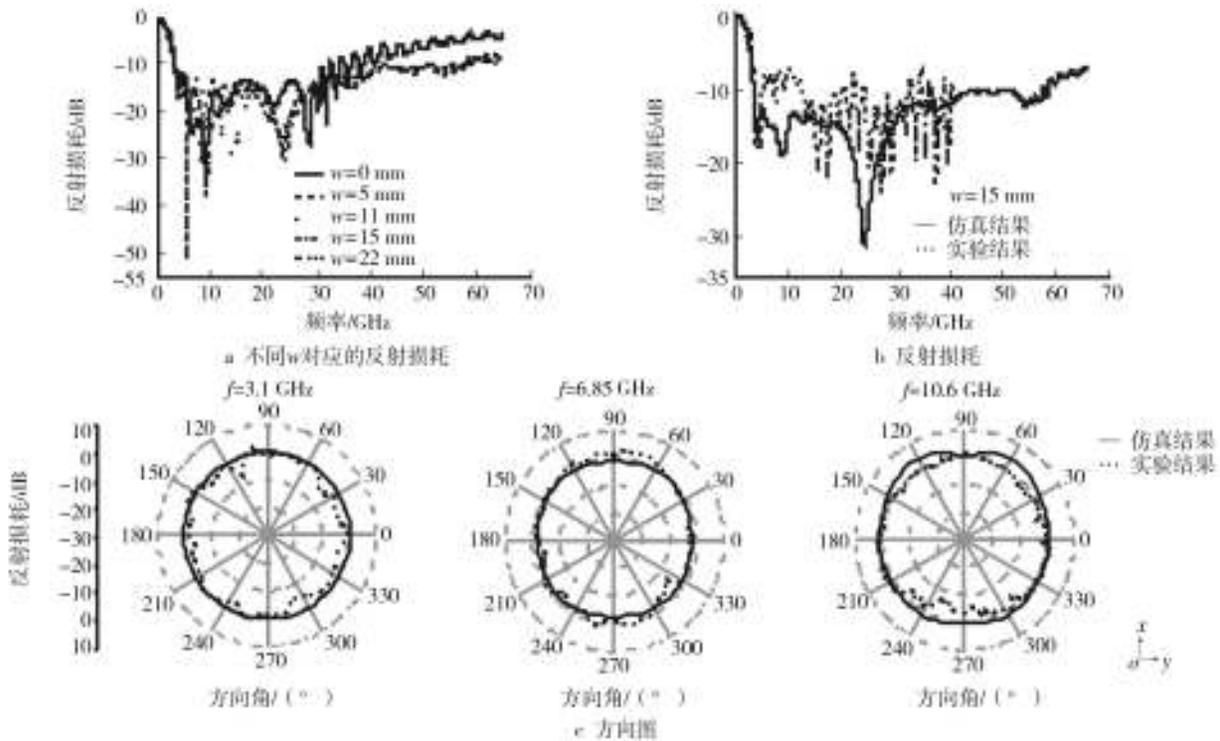


图6 折叠圆片单极天线的性能

Fig. 6 Performance of the circular disc monopole antenna puckering a certain length

板圆片单极天线的基本结构及参数不变(辐射单极子半径 $r=11\text{ mm}$,矩形金属反射板边长 $m=n=11\text{ mm}$,馈电高度 $h=0.6\text{ mm}$,地板和辐射单极子厚度 $c=1\text{ mm}$),将圆片单极子绕反射板的上边缘旋转角度 ϕ ,则圆片单极子的最终高度为 $2r\cos\phi$ 。图7b为 $\phi=50^\circ$ 时的天线实物。

图8a给出了该弯角结构的圆片单极天线在 $\phi=$

0° (不弯角), $\phi=30^\circ$, $\phi=50^\circ$, $\phi=60^\circ$ 时反射损耗随频率变化的仿真结果(0~65 GHz)。从图8a可以看出,虽然随着角度 ϕ 的增大,其反射损耗值也增大,但在3.1~10.6 GHz的频率范围内,角度 ϕ 的值在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 范围内均可保证反射损耗值小于-10 dB。事实上,当 $\phi=50^\circ$ 时,天线的实际高度为 $22 \times \cos 50^\circ \approx 14.14\text{ mm}$,与剪切的平板圆片单极天线相比,

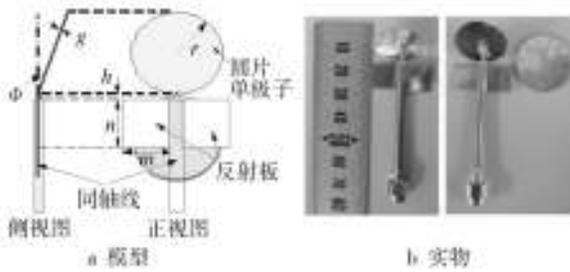


图7 弯角结构的圆片单极天线

Fig. 7 Circular disc monopole antenna with a certain angle

已经进一步达到了在高度上小型化的目的。

图8b给出了 $\phi=50^\circ$ 时弯角后的天线反射损耗仿真和实验结果的对比曲线。从图8b可以看出

在3.1~58 GHz的超宽频率范围内,天线反射损耗的仿真结果均小于-10 dB;在实际测量的0.01~40 GHz频率范围内,反射损耗的总体结果均高于仿真结果。分析其原因,主要是由于加工精度不能保证天线的馈电距离精确到0.1 mm量级,另外还有同轴接头的影响,使得频率越高误差越大。总之,天线在3.1~10.6 GHz频率范围内的反射损耗仍可保证小于-10 dB,从更宽频带上看仍然具有超宽带趋势。

图8c表示 $\phi=50^\circ$ 时弯角结构圆片单极天线的辐射方向。其仿真与测量结果的变化规律均与折叠结构的圆片天线类似,即 xoy 面仿真与实验结果基本吻合,全向性良好。

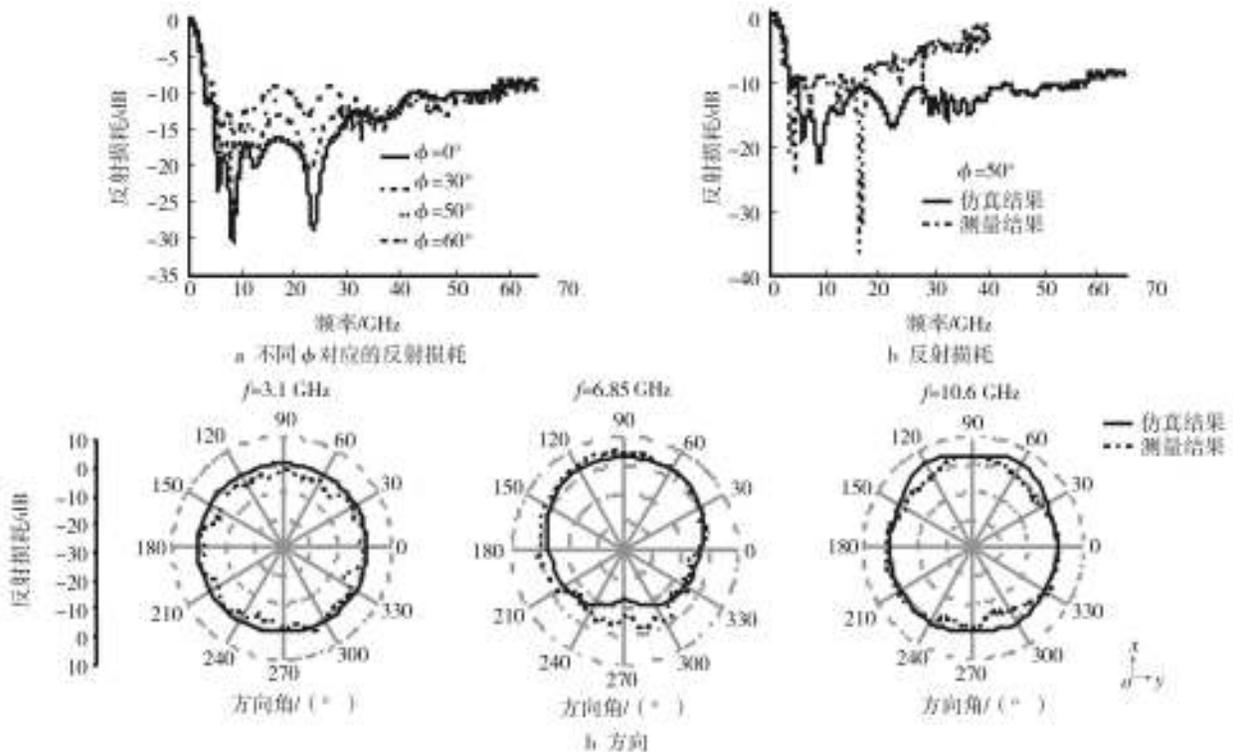


图8 弯角结构圆片单极天线的性能

Fig. 8 Performance of the circular disc monopole antenna with a certain angle

3 结语

介绍了一种平板圆片单极天线,并提出了几种在高度上进一步实现其小型化的方法。平板天线不仅实现了圆片单极天线的平面化,而且大大缩小了天线的空间尺寸,保持了良好的性能,仿真和实验的手段研究证明其具有近20:1的阻抗带宽和全向性的方向图。剪切、折叠和弯角结构的圆片单极

天线有各自的优缺点:剪切的方法能够在不影响平板圆片单极天线平面特性的情况下保持其基本性能仍然满足UWB通信系统的要求,但是其高度的减小有一定限制;折叠和弯角的方法可以继续降低天线的高度,这2种方法虽然破坏了平板圆片单极天线的完全平面特性,但其性能良好,仍不失为有效的小型化方法。笔者提出的各种小型化天线的结构和电特性决定了它们具有广阔的应用前景和 (下转第85页)

3 结果对比与讨论

从车体实测电位随时间的变化曲线可以看出, 新型六元牺牲阳极和五元牺牲阳极给车体提供的阴极保护电位值差别不大, 分布在-750~-780 mV 之间, 电位较为稳定。不过, 车体材料 7A52 铝合金阴极保护电位要求在-860~-1 060 mV 之间^[4], 两者都没有达到最低阴极保护电位-860 mV 的要求。阴极保护方案需要在阳极块数量和位置上进行重新设计。

两栖车辆属于干湿交替作业, 并且浸水时间较短, 要求牺牲阳极极化性能较好, 能使车体电位在最短时间里达到稳定。通过电位随时间变化曲线可以看出, 安装五元牺牲阳极的车辆 A 的车体达到平衡电位需要 10~12 min 时间, 而安装新型六元牺牲阳极的车辆 B 在 5 min 内车体电位就达到平衡。六元牺牲阳极在极化性能上明显优于五元牺牲阳极, 能使车体在较短时间内电位稳定, 六元牺牲阳极更适合应用在两栖车辆上。

4 结语

两栖车辆作业主要面向沿海环境, 属于干湿交替作业, 要求阴极保护用牺牲阳极不仅能够提供车

体足够负的电位, 还要能使车体在较短时间内电位平衡。通过对安装不同材料牺牲阳极车辆车体电位的测试得出:

- 1) 五元和六元牺牲阳极保护电位都不能满足要求, 需要在阳极块数量上进行重新设计;
- 2) 新型六元牺牲阳极极化速度较五元牺牲阳极提高了 2~3 倍, 新型六元牺牲阳极更适合应用于干湿交替作业的两栖车辆。

参考文献:

[1] 赵麦群, 雷阿丽. 金属的腐蚀与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 172.

[2] 黄燕滨, 刘学斌, 丁华东, 等. 海洋环境 Al-Zn-Mg-In-Ti 牺牲阳极腐蚀防护研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 46—48, 72.

[3] GJB 5832—2006, 两栖装备牺牲阳极保护设计与安装[S].

[4] 贝克曼 W V, 施文克 W, 普林兹 W, 等. 阴极保护手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 47.

(上接第 75 页)
实际应用价值。

参考文献:

[1] 穆丹, 姜弢. 一种矩形分形超宽带天线的研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(1): 84—87.

[2] 杨莘元, 殷潜, 毕晓艳, 等. 基于解相关算法的直扩超宽带系统路径间干扰抑制[J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1278—1282.

[3] DEDERER J, CHARTIER Feger S T, et al. Highly Compact 3.1–10.6 GHz UWB LNA in SiGe HBT Technology[C]// The 2nd European Microwave Integrated Circuits Conference. Munich, Germany, 2007.

[4] KUMAR Nishant, BUEHRER R. MICHAEL. The Ultra Wideband Wimedia Standard[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(5): 115—119.

[5] ZHAO Chuan-dong. Analysis on the Properties of a Coupled Planar Dipole UWB Antenna [J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, 2004, 3(1): 317—320.

[6] AGRAWALL N P, KUMAR G, RAY K P. Wide-band Planar Monopole Antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(2): 294—295.

[7] AMMANN M J, CHEN Zhi-ning. Wideband Monopole Antennas for Multi-band Wireless Systems [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 45(2): 146—150.

[8] 李伟, 邱景辉, 林澍, 等. 一种新型三角形组合振子超宽带天线[J]. 装备环境工程, 2008, 5(1): 78—80.

[9] ZHONG Ling-ling, SUN Bo, QIU Jing-hui, et al. Study of a Circular Disc Monopole Ultrawide-band Miniature Antenna [C]//Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS2008. Hangzhou, 2008.