

机载垂尾超短波一体化天线的设计

钟志浩¹, 芮 锡¹, 李从周¹, 袁 斌²

(1. 中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036; 2. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 设计了一种适用于机载垂尾顶部安装的超短波一体化天线, 实现了天线与天线罩结构和性能上一体化。对一体化和分离式两种形式的超短波天线进行了研究, 采用曲流和匹配加载技术实现了天线的宽频带工作特性, 在工作频带内实测驻波比 ≤ 2.5 , 相较于分离式天线, 一体化天线解决了天线与天线罩之间的加载耦合效应而导致天线增益下降的问题, 在全频带增益提高了约 2 dB, 重量降低了 1.9 kg, 天线性能得到全面提升。

关键词: 宽带化; 超短波; 一体化; 机载天线; 天线罩

中图分类号: TN82

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222533

中文引用格式: 钟志浩, 芮锡, 李从周, 等. 机载垂尾超短波一体化天线的设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(10): 103-107.

英文引用格式: Zhong Zhihao, Rui Xi, Li Congzhou, et al. Design of aircraft vertical tail V/UHF integrated antenna[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10): 103-107.

Design of aircraft vertical tail V/UHF integrated antenna

Zhong Zhihao¹, Rui Xi¹, Li Congzhou¹, Yuan Bin²

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In this paper, a V/UHF integrated antenna suitable for installation on the top of aircraft vertical tail is designed, which realizes the integration of antenna and radome in structure and performance. The integrated and separated V/UHF antennas are studied. The wide-band operating characteristics of the antenna are realized by using the meandering and matching technology. The measured standing wave ratio in the operating frequency band is less than or equal to 2.5. Compared with the separated antenna, the integrated antenna solves the problem of antenna gain reduction caused by the coupling effect between the antenna and the radome. By using the integrated antenna, the gain is increased by about 2 dB in the full band, the weight is reduced by 1.9 kg, and the antenna performance is comprehensively improved.

Key words: wide-band; V/UHF; integrated; airborne antenna; radome

0 引言

随着现代信息化作战体系的逐步建立, 对机载电子设备的要求也逐步提高, 超短波电台是航空电子通信系统中的重要设备之一, 主要用于飞机与控制塔台的空地通信以及飞机与飞机空中编队间的飞行联络^[1]。在教练机或战斗机等机载平台, 超短波天线通常安装于垂尾顶端, 天线辐射特性的好坏将直接影响到整个机载通信系统的工作性能, 设计出能够满足要求的天线是目前工程研究中的重要方向^[2]。

目前国内外设计的超短波天线主要采用马刀天线, 内埋于垂尾顶罩内, 天线与天线罩分离设计并分离测试验证, 天线的设计阶段就未考虑垂尾顶部天线罩的复杂结构对天线辐射性能的影响, 往往单独天线在暗室内测试性能可以满足要求, 但装机后, 由于天线罩的传输损耗和罩体与天线之间的耦合造成天线装机后的增益下降^[3], 外场使用过程中经常出现通信距离不够、通信中

断的现象。因此, 对天线与天线罩一体化的研究具有重要意义。

1 天线设计

1.1 天线设计难点

超短波天线能够接收和发射 V/UHF 频段的电磁信号, 主要工作频段为 100~400 MHz^[4], 具有以下设计难点:

(1) 超短波天线采用单极子天线形式, 天线理论高度应为 $4/\lambda_{\max}$ ^[5], 约为 694 mm, 而实际装机环境高度不超过 400 mm, 天线需要采用小型化设计;

(2) 机载超短波天线要求四倍频工作带宽, 属于超宽带天线^[6], 需要采用宽频化设计;

(3) 天线安装于垂尾顶端, 实际接地面尺寸过小^[7], 并且由于飞机机体是一个复杂的电磁散射体, 机载天线激励的机体表面电流与天线耦合, 改变了天线原有的电磁参数, 导致天线在装机后方向图发生变化, 不圆度变差^[8]。

为了准确评估超短波天线装机后真实性能,本文分别对超短波分离式天线和一体化天线进行了仿真设计。

1.2 分离式天线

1.2.1 结构组成

作为传统天线设计方案,如图1所示,分离式天线由分离式天线罩和内部辐射体组成,再整体内埋于飞机垂尾天线罩内,具有两层天线罩。

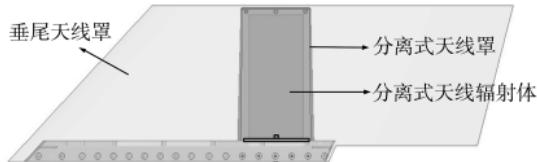


图1 分离式天线结构示意图

由于垂尾天线罩安装于飞机垂尾顶端,对气动和静强度要求高,内部开“腔体”不宜过大,因此也就限制了分离式天线的尺寸,要求宽度不超过220 mm。

1.2.2 辐射体设计

如图2所示,分离式天线辐射体采用刀型单极子天线形式,印刷在宽度为210 mm、高度为360 mm、厚度为1.6 mm的Rogers5880介质基板上。辐射体顶部进行开缝处理,缝隙宽度为7.5 mm,开缝后贴片上的电流路径加长,从而等效延长了辐射体长度,降低辐射体的谐振频率^[9]。同时,在辐射体顶部进行集总元件250 nH电感与220 Ω电阻并联电路设计,以及在辐射体馈电点右侧并联150 Ω的调谐枝节,调节馈电端口的输入阻抗,能够使天线输入阻抗在低频段变化平坦,进一步实现小型化与宽频带设计^[10]。

1.3 一体化天线

1.3.1 结构组成

如图3所示,一体化天线采用翼尖罩、天线辐射体及金属底座背板采用共固化一体成型,相较于分离式天线减少了一层天线罩,且内部辐射体可利用空间增大。

一体化天线是天线与天线罩一体化设计的技术方

案,在设计之初就将天线的电性能设计与天线罩的透波、耦合、结构、强度等要求统筹考虑,全面提升整个系统的电气、重量等性能^[11]。

1.3.2 辐射体设计

采用天线罩与辐射体一体化设计,可充分利用垂尾罩空间,增加天线辐射体设计的自由度,详细设计如图4所示,天线辐射体印刷在宽度为800 mm、高度为360 mm、厚度为1.6 mm的Rogers5880介质基板上,在普通平面单极子的基础上,增加了天线辐射体使用面积,提高天线的整体辐射效率。同时在辐射体左右两侧增加两处接地套筒,用紧靠在梯形单极子两侧对称的两根寄生元来代替套筒就构成了套筒天线^[12],正是由于两根寄生振子的存在,起到了等效加粗原有单极子天线半径的作用,使得开式套筒单极子天线的工作频带比普通的单极子天线宽得多^[13]。最后在顶部采用阻抗匹配技术,加载100 nH的电感,实现宽带谐振。

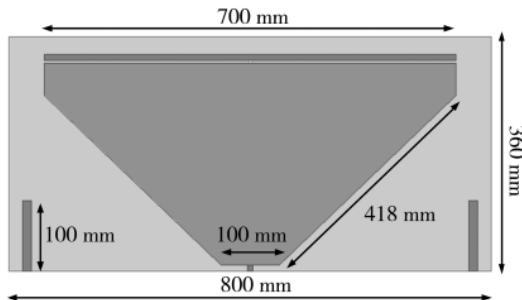


图4 一体化天线辐射体示意图

1.4 小结

分离式天线的方案中,垂尾罩和分离式天线通常由不同厂家设计和生产,并且仅以各自单独的性能作为设计目标,垂尾罩和天线之间相互耦合、影响以及垂尾罩对天线的损耗无法在设计中考核。且由于罩体强度影响,分离式天线尺寸受限,辐射体尺寸仅为210 mm×360 mm。

一体化天线方案在设计阶段就考虑天线罩对天线辐射体的影响,以一体化天线的指标作为最后考核指标。将垂尾天线罩与超短波天线一体化设计,增加了天线的设计自由度,充分考虑了天线罩和天线辐射体之间的相互影响,并且内部辐射体尺寸扩大到800 mm×360 mm,提高了天线的辐射效率。

2 天线仿真

2.1 仿真模型

根据单极子天线理论,天线需要安装在无限大的地上,和其镜像电流组成偶极子天线,才能在水平面辐射全向的垂直极化电磁波。单极子天线的“地”理论直径应大于3倍波长,当天线的接地面较小时,如图5所示,电流会绕过边缘向下传输,向下传输的电流也会参与电磁辐射,导致天线的辐射方向图发生畸变,同时还会使天

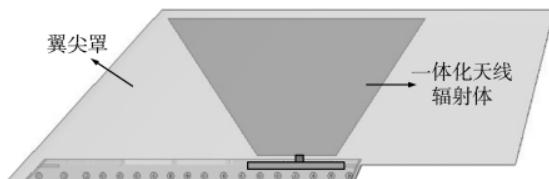


图3 一体化天线结构示意图

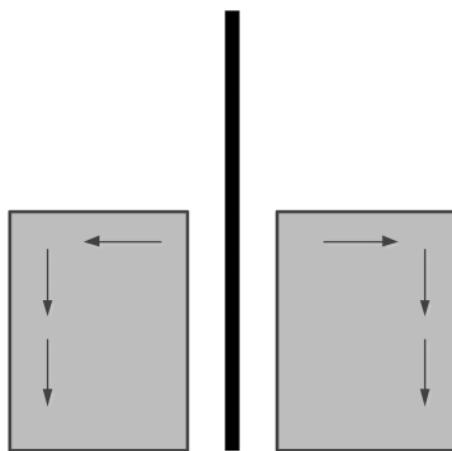


图 5 有限大地面电流分布

线的端口阻抗失配,导致天线效率降低^[14]。

机载超短波天线的安装位置通常在垂尾顶端,垂尾顶端视野良好且四周无遮挡,但是只有一块 800 mm×50 mm 的金属安装槽作为天线的“地”。如图 6 所示,为了尽可能还原真实装机环境,建立局部飞机垂尾模型,在垂尾上分别对分离式天线和一体化天线进行仿真研究。

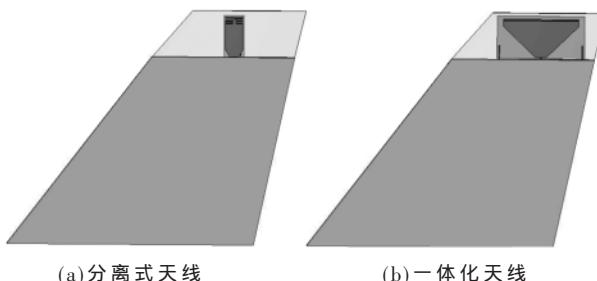


图 6 超短波天线布局仿真模型

图 7 为分离式天线和一体化天线在垂尾上的仿真电压驻波比,从图中可知,一体化天线和分离式天线在 100~400 MHz 频段内均满足电压驻波比 VSWR ≤ 2.7。

图 8 和图 9 为两种天线分别在 V 段(130 MHz)和 U 段(300 MHz)方位面增益对比图,由于天线接地面过小,

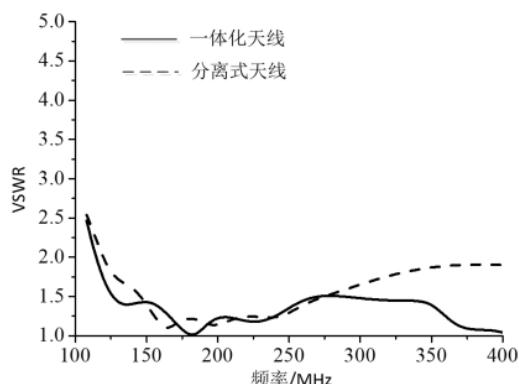
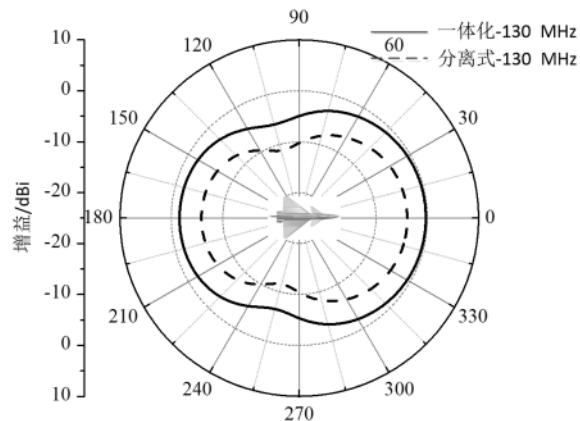
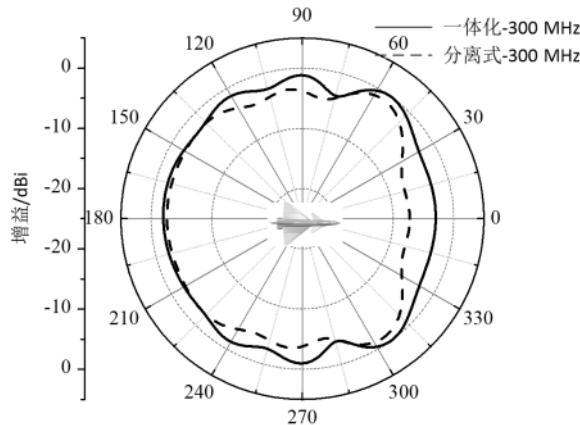


图 7 天线仿真电压驻波比曲线

图 8 仿真对比方向图($\theta=90^\circ$, 130 MHz)图 9 仿真对比方向图($\theta=90^\circ$, 300 MHz)

导致天线方向图不是规则的圆形,天线在低频段的航向方向增益值较高,背向和侧向无明显凹陷;在高频段机体的侧向 $\pm 45^\circ$ 附近存在凹陷现象。

表 1 为分离式天线和一体化天线在 100~400 MHz 内 3 个水平面内($\theta=60^\circ$ 、 90° 、 120°)的平均值增益统计表,相较于分离式天线,一体化天线在 V 段(100~200 MHz)增益提高约 3 dB,在 U 段(200~400 MHz)增益提高约 2.1 dB,并且在全频段能够满足方位面增益 ≥ -6 dBi。

表 1 天线平均仿真增益值统计表

频率/MHz	一体化天线/dBi			分离式天线/dBi		
	$\theta=60^\circ$	$\theta=90^\circ$	$\theta=120^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=90^\circ$	$\theta=120^\circ$
100	-4.9	-1.7	-1.4	-10.7	-7.2	-6.9
130	-7.5	-3.2	-0.5	-10.1	-6.9	-8.6
174	-5.3	-5.9	-2.3	-6.2	-5.5	-6.2
225	-3.1	-2.5	-4.1	-4.7	-6.2	-7.1
300	-1.9	-1.2	-2.1	-4.3	-3.3	-5.3
400	-2.1	-1.9	-2.7	-1.6	-2.2	-6.5

2.2 实物对比测试

为进一步验证一体化天线方案,对天线进行实物加工,并在暗室进行对比测试,对比测试如图 10 所示。

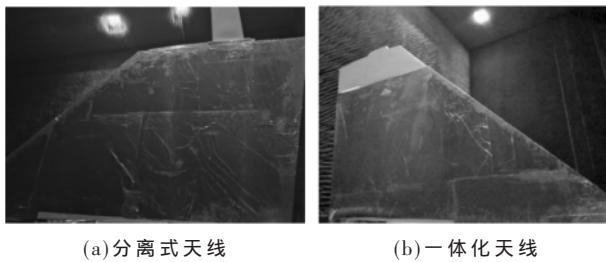


图 10 天线增益测试图

如图 11 所示,通过矢量网络分析仪对一体化天线和分离式天线进行电压驻波比测试,在 100~400 MHz 频带内,一体化天线电压驻波比 ≤ 2.3 ,分离式天线电压驻波比 ≤ 2.44 。超短波天线属于宽带天线,主要设计难点是超宽带的匹配,一体化天线辐射体尺寸更大,更利于宽带匹配,所以电压驻波比优于分离式天线。

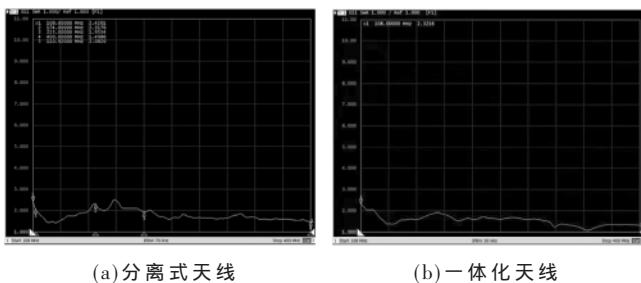
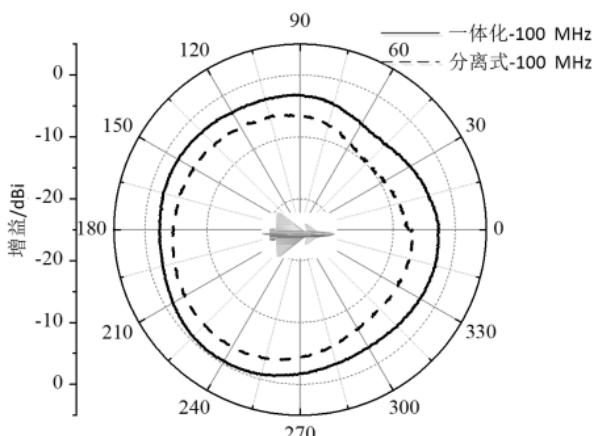
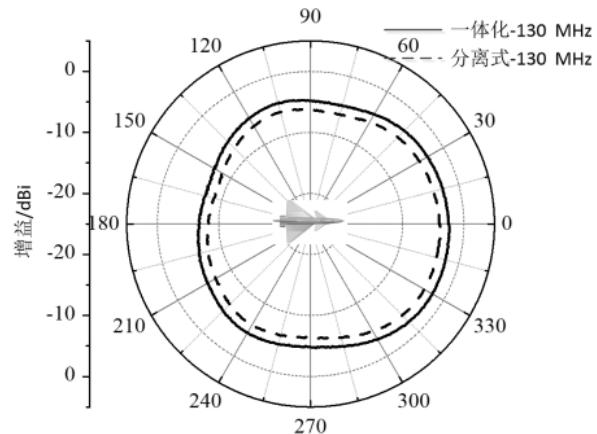
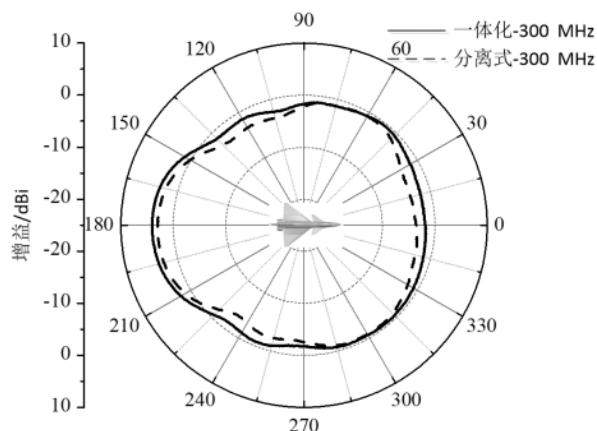
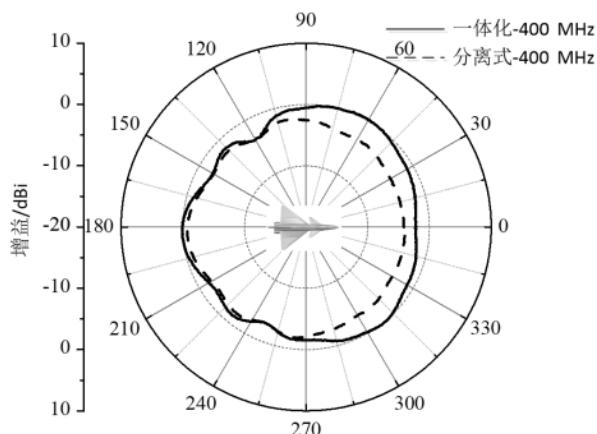


图 11 天线电压驻波比实测图

超短波一体化天线和分离式天线在 100~400 MHz 的实测方向图如图 12~图 15 所示,与仿真结果的趋势基本一致,根据测试结果,采用一体化天线增益比分离式天线增益提高 1~3 dB。若考虑实际垂尾天线罩对分离式天线的损耗和耦合影响^[15],一体化天线相较于分离式天线,整体增益可提高 2 dB 以上,在 V 段平均增益 ≥ -7 dBi,U 段平均增益 ≥ -4 dBi,具有较好的全向性。天线实测平均增益值统计表如表 2 所示。

图 12 实测对比方向图($\theta=90^\circ$, 100 MHz)图 13 实测对比方向图($\theta=90^\circ$, 130 MHz)图 14 实测对比方向图($\theta=90^\circ$, 300 MHz)图 15 实测对比方向图($\theta=90^\circ$, 400 MHz)

超短波一体化天线的罩体采用高强度、高透波的复合材料作为蒙皮,选用纸蜂窝作为轻质芯层,表 3 为两种天线实测重量对比,在满足静强度前提下,一体化天线的重量相比于分离式天线减轻了 1.9 kg。同时,超短波一体化天线通过一排螺钉与飞机垂尾上金属底座相连,也便于后期维护,所以一体化天线在重量后期装机维护性都具有明显的优势。

表 2 天线实测平均增益值统计表

频率/MHz	一体化天线/dBi			分离式天线/dBi		
	$\theta=60^\circ$	$\theta=90^\circ$	$\theta=120^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=90^\circ$	$\theta=120^\circ$
100	-4.9	-2.6	-2.5	-8.6	-6.1	-6.1
130	-6.9	-4.3	-2.9	-8.1	-7.1	-6.9
174	-5.9	-6.5	-5.7	-6.1	-6.5	-7.4
225	-3.1	-3.01	-3.9	-5.1	-5.2	-6.3
300	-2.1	-1.4	-1.7	-2.8	-2.4	-3.2
400	-1.1	-1.1	-2.2	-2.1	-2.5	-4.8

表 3 两种方案天线重量实测对比

方案	分离式天线重量		一体化天线	(kg)
	垂尾天线罩	分离式天线		
重量	5	1.4	4.5	
合计		6.4	4.5	

3 结论

本文设计了一款用于飞机垂尾的超短波一体化天线,并通过理论分析、仿真对比和实物测试对比了一体化天线与传统分离式天线的性能区别,结果显示一体化天线和分离式天线采用曲流和加载技术均能实现良好的宽带匹配,工作频段内实测驻波 ≤ 2.5 ,相较于分离式天线,一体化天线在100~400 MHz频段内增益提高了约2 dB,重量降低了1.9 kg,天线性能得到了显著的提高。

通过采用天线和天线罩一体化设计的技术方案,将天线的电性能设计与天线罩的透波、耦合、结构、强度等要求统筹考虑,全面提升整个系统的电气、重量等性能,解决了天线与天线罩之间的加载耦合效应而导致天线增益下降的问题,有效地提高超短波通信性能。

参考文献

- [1] 张伟.直升机机载 V/UHF 宽带共形天线研究[J].直升机技术,2019,17(2):53-57.
- [2] 冉涛.机载刀型天线的设计与研究[D].西安:西安电子科技大学,2011.
- [3] 张翼周.对天线罩影响天线辐射性能的分析[D].成都:电子科技大学,2004.

- [4] 李晓林,李韩,熊烨,等.新型舰载超短波宽带平面天线[J].电波科学学报,2011,26(3):539-543.
- [5] 钟顺时.天线理论与技术[M].北京:电子工业出版社,2015.
- [6] Federal Communications Commission. FCC first report and order in the matter of revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra wideband transmission systems[Z].ET-Docket, 2002: 98-153.
- [7] 邹庆,谭洪开.高教机天线布局影响通讯距离研究与改进[J].教练机,2015,14(2):62-65.
- [8] 方金鹏.某机载 VHF 天线布局优化仿真分析[J].制导与引信,2013,34(1):36-39.
- [9] 张强.基于曲流技术的小型化宽带贴片天线的研究[D].天津:天津大学,2016.
- [10] PUES H F, VAN DE CAELLE A R. An impedance-matching technique for increasing the bandwidth of micro-strip antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(11): 1345-1349.
- [11] 府大兴.星载 SAR 结构功能一体化天线制造关键技术[J].中国电子科学研究院学报,2020,15(11):1070-1074.
- [12] 唐世荣,乔玮,高喜,等.开放式套筒简单极子手持天线的设计与验证[J].电波科学学报,2017,32(1):79-83.
- [13] GUNAVATHI N, SRIRAMKUMAR D, SHRESTHA U. Sleeve monopole antenna for WiMAX applications[C]//India Conference(INDI-CON), 2012 Annual IEEE, 2012: 588-591.
- [14] 刘芸,孙红兵.垂尾隐蔽式超短波全向天线的一体化设计[J].电子测量技术,2017,40(7):59-63.
- [15] 李进杰,顾小豪.电磁波入射角对小型机载天线罩透波率的影响测试[J].计算机测量与控制,2020,28(3):5-8.

(收稿日期:2022-01-06)

作者简介:

钟志浩(1993-),男,硕士,工程师,主要研究方向:天线综合设计、机载天线布局。

芮锡(1983-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:航空电子、辐射与散射、射频综合系统。

李从周(1994-),男,硕士,工程师,主要研究方向:天线隐身、天线整机布局测试。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所