

其 他



目 录

序号	姓 名	职 称	单 位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类 别
1	万顺生 张钟勤	副高 中级	无人 机	机载雷达天线罩的电性能研究	无线电工程	2001 增刊	
2	万顺生 张钟勤	副高 中级		基于 SBR 法研究发动机进气道的 RCS	微波学报	011701	J
3	万顺生 卫 民	副高 中级		毫米波/红外频率选择表面的双工性研究	激光与红外	013006	
4	许丽玉	中级	高 教 所	大学生学习评价及其对教师的素质要求	南京航空航天大学学报(社 科版)	010301	
5	许丽玉	中级		试论科学教育的本质与大学教学改革	南京化工大学学报(哲社 版)	010004	
6	樊泽恒	副高		校园网功能的理性思考及开发应用的对策	南京航空航天大学学报(社 科版)	010004	
7	吴万敏 张 辉	副高 副高		产学合作: 发展高职教育的战略选择	江苏高教	010005	H*
8	张 辉 郭桂英	副高		战略型应成为新世纪教育规划的重要特征	高教探索	010002	H
9	杨雪花 孙晓武 何家声	初级 副高 正高	教 务 处	多指标情况下医学正常值范围的确定	中国卫生统计	011805	J
10	杨雪花 何家声 戴梅竞	初级 正高 正高		大学生心理卫生问题的影响因素分析	中国心理卫生杂志	011503	J
11	杨雪花 戴梅竞	初级 正高		大学生个性特征及其与心理健康状况关系的研究	中国校医	011501	
12	傅桂龙	中级	物 质 处	投影机亮度刍议	中国电化教育	0100170	H
13	耿 琨	副高	科 技 部	在“科教兴国”战略中航空科普教育是培养航空科技人才的重要因素	第三届全国科普教育继续教育理论研讨会	2001	
14	许 琴	中级	校 办	知识经济对传统图书情报工作的影响	情报杂志	012003	H
15	许 琴	中级		提高缩微胶片利用率论谈	图书馆建设	0112303	H
16	王鲁娜	副高	医 院	胰激肽释放酶治疗糖尿病周围神经炎疗效观察	中华医学理论与实践杂志	010103	
17	程永波	中级	研 究 生 院	关于高校应用学科建设的思考	第七届工科研究生院研究生教育研讨会	2001	
18	程永波	中级		论高等教育的可持续发展	黑龙江高教研究	010003	H
19	杨名大	副高	机 械 厂	印制板数控钻床的研究与开发	机械设计与制造工程	002903	J
20	杨名大 苏小光	副高 副高		煤气表密封性能检测新方法	数据采集与处理	011601	H
21	王吉团	中级	实 设 处	保证安全, 保护环境, 促进特种加工技术的持续发展	中国机械工程	011207	H

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
22	夏道家	中级	科技 技 部	函数图中 $t \times 10^4/s$ 或 $t/10^4S$ 形式的标目标注问题	科技与出版	010004	H
23	朱德培	副高		努力提高论文质量, 迎接 21 世纪挑战——庆祝《数据与采集与处理》创刊 15 周年	数据采集与处理	011601	
24	朱德培	副高		高校学报改革的一些思考	编辑学报	011302	H
25	朱德培	副高		努力提高我国科技论文的国际地位	科技与出版	010005	H
26	朱德培	副高		高校学报迎接知识经济挑战的策略研究	南京航空航天大学学报(社科版)	010301	
27	朱德培	副高		谈科技期刊的社会效益与经济效益	中国科技期刊研究	011205	
28	朱德培	副高		扩大学术期刊社会效益的有效途径	合肥工业大学学报(社会科学版)	011502	
29	朱德培	副高		科技期刊终校工作之我见	编辑学刊	010001	H
30	朱德培	副高		创新是科技期刊的生命	编辑学刊	010004	H
31	熊春茹	副高		高校英文学报国际化办刊改革实践谈	编辑学报	011305	H
32	熊春茹	副高		科技期刊英文标题的规范化问题	编辑学刊	010006	H
33	熊春茹	副高		科技论文英文摘要撰写规范化问题	数据采集与处理	011604	H
34	王霞	中级	学生 处	论代位执行	兰州学刊	010006	
35	王霞	中级		论债权人代位诉讼的具体程序	中州学刊	010004	
36	王霞	中级		论行政诉讼检察监督之完善	江西社会科学	010001	
37	李明成 丁秀东	硕士 副高		大学生素质综合测评的探索与实践	南京航空航天大学学报(社科版)	010301	
38	王贵农 宁键	副高	校办	构建大学生素质综合测评体系的动因、原因及处理好的几个关系	南京航空航天大学学报(社科版)	010301	
39	刘伟清	中级	学生 处	试论大学生自助精神的培养	德育天地	000004	
40	刘伟清	中级		纪实性评价: 大学生评价的主导方针	南京航空航天大学学报(社科版)	010301	
41	刘伟清	中级		大学生素质教育的基础——适应性教育	江苏高教	010002	H
42	褚峰	中级		完善高校助学体系的理性思考	南京航空航天大学学报(社科版)	010301	
43	谭白磊	中级	校房 改办	Windows 中 Msinfo32 命令的有效使用	计算机应用研究	011808	J
44	徐福民	中级		正确认识住房分配货币化努力解决青年教职工住房问题	中国高校后勤研究	010006	
45	苏娟	副高	体 育 部	普通高校“个别化”体育教学方法探索	南京体育学院学报	011501	
46	苏娟	副高		大学生健康身体素质教育探析	山东体育科技	012302	
47	苏娟	副高		2400 米跑对学生健康更有利	中国学校体育	0111802	H
48	郁建华	初级		体育院校运动系人才培养的现状与改革对策	南京体育学院学报	011502	
49	蒋诗泉	中级		“电视闭音”教学手段与学生足球战术意识的培养	体育与科学	012204	H
50	杨峰	中级		关于“洗血”与有氧运动对降低人体血脂的效果比较分析	南京体育学院学报	011505	
51	孙雷	中级		高校课外体育活动俱乐部制在健康教育中的效应分析	南京体育学院学报	011503	
52	孙雷	中级	体 部 部	“快乐体育”在普通高校体育实践课中的试行	南京体育学院学报	010002	
53	孙雷	中级		高校课外体育活动俱乐部制在健康教育中对大学生体育锻炼价值取向及争取大东实效的相关分析	南京体育学院学报	010004	

序号	姓 名	职 称	单 位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
54	吕玉军	中级	体 育 部	民国时期的中华全国体育协进会	历史档案	010004	H
55	宋卫东	中级		静式气功在体育课整理活动中的应用和研究	第十八届江苏省高等学校体育科学论文	2001	
56	贡建伟	中级		以“健康第一”的战略思想引导学校体育改革	南京体育学院学报	011504	
57	贡建伟	中级		不同体育教学形式对大学生的社会支持的影响	成都体育学院学报	012706	H
58	贡建伟	中级		高校体育课程教学“学力化”探 析	体育与科学	012206	H
59	贡建伟	中级		大学生体育兴趣和锻炼动机的调查研究	体育科研	012203	
60	贡建伟	中级		我国高校办高水平运动队存在的问题及对策	北京体育大学学报	012404	H
61	贺军萍 郝 玉	初级 中级		高校体育资源开发之我见	第十八届江苏省高等学校体育科学论文报告会	2001	
62	陆森召	初级 中级		抓好体育信息化,推动体育教育事业发展	江苏省高校第十八届体育科学论文报告会	2001	
63	苏 娟	副高		体育基础理论多媒体教学的内容设计与教法研究——科学的身体锻炼篇	江苏省高校第十八届体育科学报告会	2001	
64	梁 芳	中级	图 书 馆	数字化时代高校图书馆的发展前景	东北师大学报(哲社版)	010004	H
65	陆小南	副高		关于图书馆视听室发展趋势的探讨	江苏省高等学校图书馆学报	010002	
66	陆小南	副高		高校图书馆视听室发展趋的探讨	情报杂志	01200	H
67	徐惠珍	副高		1993~2000 年 EI 收录南航大科技论文的情况统计分析	情报杂志	012000	H
68	姚 翔	中级		图书馆作为二次媒介进行阅读辅导	情报杂志	012000	H
69	姚 翔	中级		浅谈知识管理	情报杂志	012006	H
70	张 清	初级		论知识经济时代图书馆如何加强自身建设	情报杂志	012000	H
71	张 清	初级		试论信息时代的高校图书馆资源共享	情报杂志	012004	H
72	张 清	初级		试论网络时代图书馆的价值取向	情报杂志	012000	H
73	邹小筑	中级		文献检索课教学改革的实践与思考	情报理论与实践	012400	H
74	陈万寅	副高		关于高校图书馆工作的几点思考	图书馆	010005	H
75	陈万寅	副高		区域性文献采编中心的实践与发展	图书情报知识	010004	H
76	陈万寅	副高		新时期大学图书馆副馆长的角色定位	大学图书馆学报	011905	H
77	金明华	中级		高校图书馆特色数据库建设的现状与思考	情报杂志	010011	H
78	金明华	中级		论图书馆网上咨询服务中的 FAQ	图书馆	010006	H
79	许凤芝	中级		高校图书馆人力资源开发战略研究	沪苏两地中青年图书馆工作者论坛	2001	
80	许凤芝 缪红梅	中级 中级		论读者工作中的新书短期借阅服务模式	情报杂志	2001	H
81	袁红卫	中级		谈高校图书馆计算机联机检索服务	图书情报工作	2001 增刊	H
82	袁红卫 陈仁文	中级 副高		Dialog 联机检索指令运用技巧	现代图书情报技术	010001	H
83	马 静	副高	图 书 馆	搜索引擎机理剖析	中国信息导报	010006	H
84	马 静	副高		Google 的搜索机理和搜索技巧	图书情报工作	010009	H
85	马 静	副高		网上信息资源及其检索技术智能化研究	图书情报工作	010001	H

序号	姓 名	职 称	单 位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
86	吴 菁		图书馆	基于通风流量的图书馆网络浏览收费管理	现代图书情报技术	010001	H
87	秦 萍	中级		高校图书馆电子资源的分析利用	图书馆建设	2001 增刊	H
88	秦 萍	中级		论网络环境下图书馆的发展趋势	情报杂志	012000	H
89	秦 萍	中级		图书馆计算机及光盘资料管理的探讨	情报杂志	012000	H
90	秦 萍	中级		电子期刊在高校图书馆中的应用	情报杂志	012000	H
91	李玉梅	中级		论新世纪高校图书馆员的素质	情报杂志	012000	H
92	蒋仁营	副高		高校图书馆要关注校园网络文化建设	情报杂志	012000	H
93	蒋仁营	副高		试论大学图书馆的分馆建设	图书情报工作动态	010006	
94	陈宇红	中级		网络信息数字化技术是未来图书馆的发展方向	情报杂志	010001	H
95	陈宇红	中级		网络环境下电子期刊的发展优势与合理配置	情报杂志	010001	H
96	梁 明			浅议大学生读者读书心态	情报杂志	2001	H
97	梁 明			图书书名与读者心理	情报杂志	2001	H
98	梁 明			图书馆人的形象	情报杂志	2001	H
99	贾玉兰			重视新生读者 做好有效服务	情报杂志	2001	H
100	贾玉兰			浅谈期刊读者服务工作	情报杂志	2001	H
101	张瑞芳	助工		Internet 上的航空信息资源	江苏航空	010001	
102	张瑞芳	助工		传统期刊与电子期刊的比较研究	情报杂志	2001	H
103	张瑞芳 徐惠珍	助工 副高		DIALOG 数据库分类及常用功能	情报杂志	010005	H
104	张瑞芳	助工		21 世纪图书馆服务新观念	情报杂志	2001	H
105	尚加宁	中级		图书分类法与因特网分类方法的可比性研究	情报理论与实践	012401	H
106	尚加宁	中级		环境决定论在发展中图书馆的应用	情报杂志	010011	H
107	符文康			高等学校体育教师素质要求探析	南京航空航天大学学报(社科版)	2001 教学专辑	
108	符文康			论高校散打教学中的武德教育	中国学校教育研究	2001	
109	张 珂	初级		论大学体育舞蹈教学中的审美教育	中国学校教育研究	2001	
110	张 珂	初级		女大学新生课余体育锻炼状况及其影响因素的分析研究	江苏省高校第十八届体育科学论文报告会	2001	

机载雷达天线罩的电性能研究

万顺生 张钟勤

(南京航空航天大学无人机研究院)

摘 要 介绍了天线罩对飞机的双重作用,分析了影响其电/结构性能下降的诱因。本文对气象雷达天线罩电性能检测系统和测试要点作了详述,其测量精度达到了美国 RTCA - MOPS 标准要求。为民机气象雷达天线罩的维修与检测在国内开辟了一条捷径。

关键词 雷达天线罩 防雷击条 传输率 测量

1 引言

气象雷达天线罩的性能取决于它为天线提供直接保护的能力以及它为雷达信号提供的双向传输能力,这一传输要求具有最小的波瓣畸变与功率吸收。雷达效率、分辨率及显示的准确度依赖于穿过天线罩后有一个清晰的、不失真的、反射自由的天线视图。经验证明,好雷达罩可以有效地提高气象雷达探测距离。随着前向风切变/回避雷达系统的诞生,现在天线罩的性能要求变得更为严格。任何检修和维护过程的目的都是为了保持原天线罩的性能。

检修一台损坏的天线罩时,特别要注意保持雷达天线罩的电学厚度。这个重要参数与天线罩的物理厚度、工作频率和材料类型(介电常数和损耗角正切)及使用的结构型式有关。物理厚度很小的变化可能导致很大的电学厚度的变化,这将影响天线罩的性能。

民航使用的天线罩有两大类:薄壁式和夹层式。薄壁式天线罩的薄壁是相对雷达信号的波长大小而言的。夹层或天线罩由两种或多种复合材料(比如环氧纤维玻璃)组合的表面组成,由介电的芯层将其分开,芯层可以是非金属的蜂窝、空心的瓦楞式夹层或泡沫塑料。表面和芯层的厚度取决于雷达的工作频率和表面、芯层、喷漆系统和抗静电漆涂层的介电常数和损耗角正切^[1]。

2 雷达天线罩电/结构性能下降的诱因

(1) 雨蚀—雨滴的高速冲刷将侵蚀喷漆系统,接着是侵蚀罩体头部外表面的结构、防护雨蚀的一般结构措施是在头部保持一层合适的防雨蚀涂层系统或用一层薄的聚氨基甲酸酯薄膜或橡胶套保护。

(2) 冲击损伤—遭遇大的冰雹、大鸟(如野鸭)撞击和地面车辆等碰撞时容易被飞行和地勤人员发现,而小的冰雹和小鸟撞击可能不十分明显。如果这类损伤未被及时发现,使雷达天线罩外壳面有穿透之处,湿气将进入芯层区而降低这部分的电性能。随着时间的推移和在冰点附近继续飞行,不断结冰和融化,将使结构发生小的裂纹,使湿气传播,导致雷达天线罩的穿透区扩大。

(3) 雷击损伤—多数雷达天线罩装有防雷击分流条,当雷击天线和罩内金属结构时会途经头部的罩体,损伤依雷击电流强度的不同可能在罩上形成裂孔。同样,芯层散发的热量可能使内表面脱层(脱胶),面积可达足球大小或更大。雷电也会从芯层和内层传到雷达天线罩后部的机体结构,严重影响冲击区的结构完整性。

即使雷达天线罩装了雷击分流条也会偶然遭到雷击,击中罩上没有分流条的部位。分流条的位置应考虑对电性能影响最小(传输效率,反射波瓣等等)。故必须放在防止雷击罩体内部导体的有效部位。装好防雷击条的雷达罩应经受雷中试验以确保该系统是令人满意的。

(4) 静电烧蚀:静电烧蚀是由雷达罩外表面上静电荷引起的雷达罩的微小穿透。它积累到一定程度就会穿透雷达罩。某些静电烧蚀将使周围的内外雷

达罩表面由于暴露而变黑。

这种穿透将使湿气进入雷达罩，随着时间推移和以后的飞行，对雷达罩电性能的损失和影响将日趋严重。如果湿气存在于雷达罩中，并影响了雷达罩的电性能，它应当在指定的雷达罩修理站被除去。防止静电烧蚀的一个方法是使用一个导电的底漆和涂漆体系（适用于雷达罩的），使得积累的静电荷在尾部被引导到飞机框架。

(5)湿气：雷达罩结构内部湿气的存在可由雷达罩湿气仪检测，制定一个湿气水平标准是非常必要的。

(6)漆厚度：过厚的漆层会对雷达系统性能造成不利影响。

(7)修理不当：FAA 咨询通告 43 - 14 介绍了气象雷达罩的维护，不正确的修理方法会导致其性能下降。

3 雷达天线罩电性能标准

美国航空无线电技术委员会（RTCA Radio Technical Commission for Aeronautics Aviation）已制定了一个包括具有前视风切变探测能力的机载气象雷达最低工作性能标准(MOPS Minimum Operational Performance Standards for Nose Mounted Radomes)。93年以后出厂的波音和空中客车等大型飞机的雷达罩电性能要求均引用了 RTCA-MOPS 的规定。

标准将雷达罩分为五级。表 1 列出了不同级别的雷达天线罩在窗口区的传输效率平均值与最小值。A 级是较高性能雷达所要求，例如前视风切变探测/回避；B 级到 E 级渐次：例如只作气象探测。对 A 级雷达罩的旁瓣电平也做了规定（旁瓣是指雷达能量没有直穿雷达罩的部分）

第二大类是从 B 级到 E 级，主要重复过去对气象雷达的要求，而第一

大类，A 级对旁瓣要求控制较严，对于预测风切变的雷达对旁瓣电平要求较严。对通用航空一般不作风切变探测的飞机的旁瓣电平也有相应要求。

依目前 RTCA 的 DO - 213 标准，A 类雷达天线罩任何一点的最小传输效率为 85%，在整个范围内平均 90%，如果考虑到闪电分流器和现有的表面涂层，那么可能降到 82% - 87%。在新的 RTCA DO - 213 中，带有无闪电分流器和喷漆的 A 类罩，雷达天线

级别	平均	最小 (%)
A	90	85
B	87	82
C	84	78
D	80	75
E	70	55

表 1 雷达罩传输效率划分

罩平均传输效率推荐为 90%，任何一点的最小传输效率为 85%，旁瓣电平也有要求。雷达天线罩性能的提高无异于提高了雷达的探测距离。由于雷达天线罩的维修会导致其性能下降，RTCA DO - 213 对那些修理和重新涂漆之后，需要进行传输效率测试的雷达罩也有明确规定。

图 1 是一幅主瓣与旁瓣均合格的罩体电性能测试图，图 2 是同一罩体因局部碰撞被不适当地以腻子填平以后的测量结果。因其旁瓣电平较高而不再合格，在去除该处过厚的腻子以后又恢复到上图的合格测量结果，可见不适当的维修对电性能带来不良后果的严重程度。

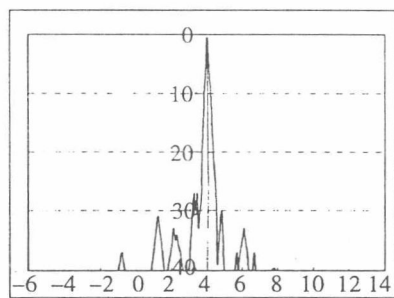


图 1 合格罩体的原始分瓣电平

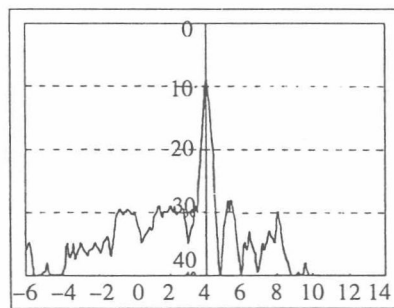


图 2 不正确的修理引起旁瓣电平的提高

4 雷达天线罩电性能测试要点

由于机载雷达天线罩与天线位置的关系极为复杂，天线在罩内转动时，罩子结构和电气性能方面的幅度和相位分布很不对称，天线在罩内不同方位和不同俯仰扫描角状态下，电气性能差别很大，因而这是一项十分复杂而仔细的工作，对测试人员的水平和测试设备的精度要求很高。

4.1 测试设备

对转台功能的要求有：

(1) 当雷达罩不动、天线在罩内时，方位应能作

360° 度旋转, 俯仰能作正负 60° 运动;

(2) 当天线不动 (停在空间任意位置) 时, 雷达罩应以天线的转动轴为圆心对天线作方位和俯仰转动, 方位可 360° 旋转, 俯仰可正负 60° 运动;

(3) 雷达罩可以以罩轴为轴, 作自由旋转运动;

(4) 定位精度较高, 如小于 0.05 至 0.01 毫弧度。

如此复杂的测试转台, 实际上是一个高精度的多维转台。对等高架设测量是五维转台, 对倾斜架设测量是六维转台。因为在天线转台下面还有一个俯仰转动机构, 它可以调整天线转台的方位转动平面与收发天线的连线平行。

CK-2000 型三自由度雷达罩测试转台是一种较好的转台自动控制系统, 它包括发射系统、接收系统、伺服随动系统、计算机实时采集和处理系统等。可以在微波暗室中测量天线直径 300-1200mm 的雷达罩。

为了获得精确可靠的结果, 应尽量缩短测试时间, 保持背景电平 and 系统误差的一致性。

4.2 注意事项

雷达罩的电性能测量就是在有罩和无罩的情况下, 对天线性能的测量比较。这种测量不是在一种状态 (固定的方位和俯仰扫描角), 而是不同状态 (理论上无穷多个组合, 典型的也有数十个或数百个组合) 下进行, 所以测量工作量大。为了提高工作效率, 须注意以下事项:

4.2.1 制定合理的测试程序

雷达罩的测量工作量虽然很大, 但重复性 (不同状态下的重复) 操作较多, 进行反复的无罩和有罩测量数据比较, 所以要在不影响测量精度的情况下, 尽量减少工作量, 提高测量速度, 找到合理的测量程序。

要尽量减少罩移去和再罩上的次数。为此, 在开始测量每一个指标时要先在天线和雷达罩相对不变的情况下反复测准无罩和有罩的数值, 并把有罩测量结果作为标准。此外, 不要将其它不同状态下的测量与无罩相比, 而应与首次测量的有罩结果相比, 写成公式:

$$P = \frac{P_1}{P_{10}} \cdot \frac{P_X}{P_{X0}} \quad (1)$$

式中, P 表示任意状态下的测量结果; P_{10} 表示无罩测量记录; P_1 表示标准状态下首次测量记录, 所谓标准就是用来作比较的准绳, 一般选在天线的方位、俯仰转动角均为零的状态; P_{X0} 表示在任何时间有罩的标准状态下的测量记录; P_X 是在 P_{X0} 测量后任意

状态下的测量记录。如果信号稳定, 可以连续在不同状态下测量 P_X 值。若信号不稳定或是为消除信号不稳定所造成的误差, 可以每测一次 P_X 都要再测一次 P_{X0} 。显然, 由式(1)可以明显地看出, 如果测量仪表信号稳定, 复位准确, 那么 $P_1 = P_{X0}$, 于是有:

$$P = \frac{P_X}{P_{X0}} \quad (2)$$

按这样的程序测量, 只要复位精度高和测试仪表稳定, 是能够测量出满意结果来的。设备复位的速度要比移去罩子快得多, 省时又省力。

4.2.2 对测量系统的要求

(1) 仪表的稳定性要好。测量仪表要能长期 (两小时以上) 稳定、可靠地工作。稳定度应优于 10^{-6} 。

(2) 仪表的精度要高, 即定标标准要准确, 比如测量频率误差不要小于 1MHz, 接收信号误差要小于或等于 0.1dB。

(3) 测量的动态范围要大。在保证信号稳定的情况下, 尽量加大发射功率, 提高接收机的灵敏度, 保证接收信号的电平比噪声电平, 至少大 5-10 倍。

(4) 无论测量什么参数, 都要用调配器使收发天线匹配, 驻波 S 小于 1.05-1.10 为宜。

4.2.3 对被测雷达罩的要求

雷达天线罩是飞机的一个重要组成部分, 要确保测量数据的可靠性, 除了对测试设备有高精度、高稳定度要求外, 还要求被测量的对象应是实际产品, 而且安装状态和有关尺寸应和飞机的原状态一致。

5 电性能检测实例

南京航空航天大学“天线与电磁散射实验研究室”是国内率先对雷达天线罩进行电性能检测的指定单位之一, 迄今为止, 已为多家航空公司送检的雷达天线罩进行过电性能检测, 该室严格按照“美国航空航天研究与试验委员会”颁布的 ARTC - 4 及 RTCA - MOPS 标准进行测试, 其结果与美国 NORTON 公司的检测结果相一致。很显然, 在国内检测的方便、快捷与价廉等优势是国外检测机构难以匹敌的。雷达天线罩电性能测量对场地、设备和操作人员的要求非常严格。该研究室拥有一个大型微波暗室 (24X10X10m³), 设备配置及测量系统框见图 3。

以 BOEING757, 件号为 284N1418 - 7 的雷达天线罩为例, 见图 4。

显而易见, 该罩的损伤面积较大, GAMECO 公司按照严格的工艺流程进行了修复。因机型不同,

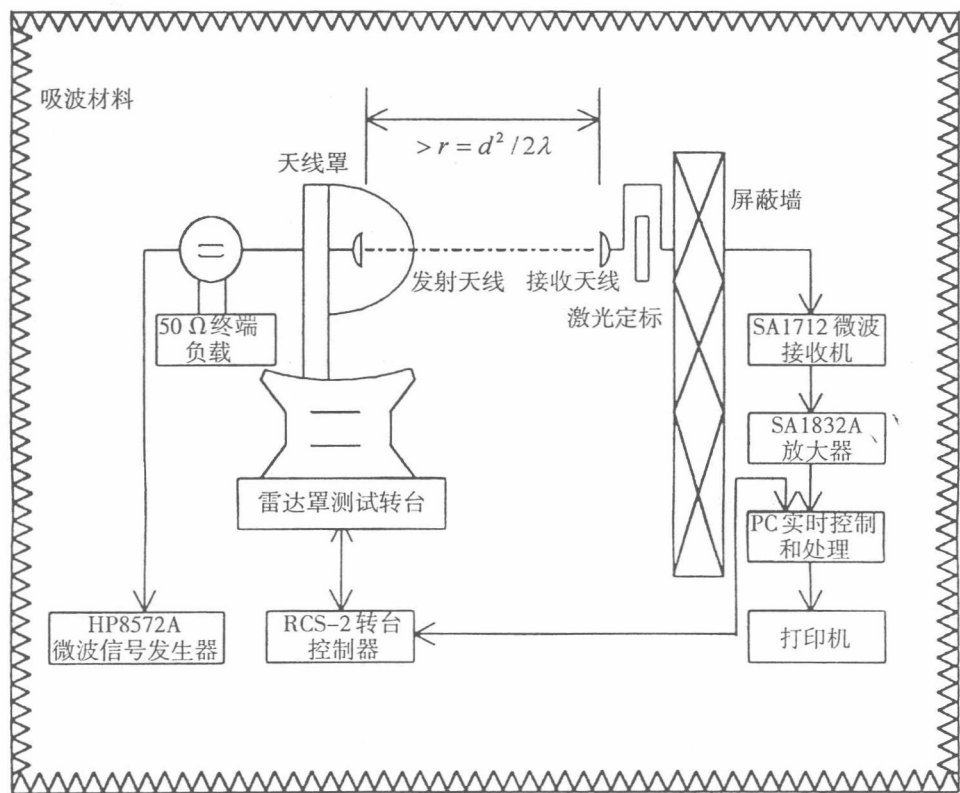
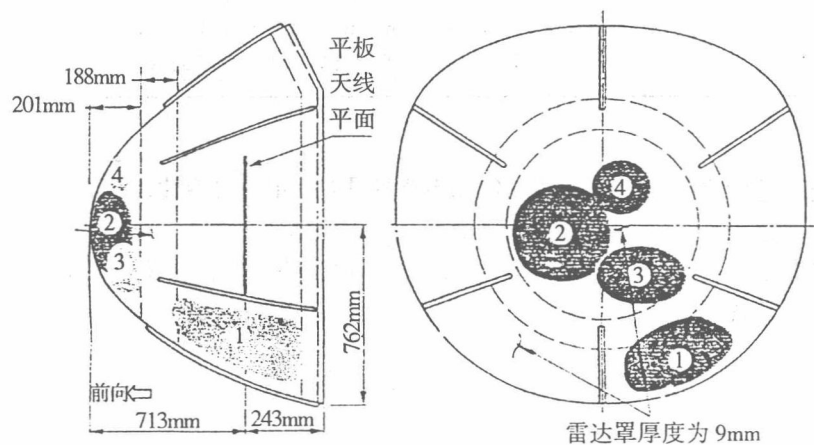


图3 微波暗室内设备配置及测量系统框图



损伤区域	损伤面积(cm ²)
1	3462.00
2	2461.76
3	2712.96
4	415.27

图4 雷达天线罩损伤区域

雷达天线罩也各异，其天线位置不尽相同，因而在测量时，一定要严格设定天线位置，否则会引起波瓣畸变，导致精度下降。表2给出以机头轴线为中心的±30°方位角、±20°俯仰角的实际测量数据。

经数据处理后得，单向电磁波传输率平均值为90.69%，单向电磁波传输率最小值为88.08%，符合RTCA - MOPS所规定的A级标准，结论为合格。

图5是水平0°时实测的一条典型曲线。可见，该罩通过正确方法修复后，在±80°方位角内，传输率曲线基本平坦，其它各组曲线均类似，证明修复是成功的。

6 结束语

雷达天线罩电性能检测结果如实反映了维修者的修复水平，其实维修过程是一门工艺要求很高的专项技术，各航空公司每年都有一些因不同情况受损的天线罩亟待修复检测。由于种种原因，这些罩子通常是送到国外返修检测。FAA咨询通报AC43-14“气象雷达天线罩的维修”和南航乔新教授主编的“气象雷达天线罩维修教程”对此作了深入浅出的专门介绍，是专业维修人员的必修课程。近年来，南航已为各航空公司培训了一批自己的专业维修人员，使得雷

透波率		方位角												
俯仰角	(%)	-30°	-25°	-20°	-15°	-10°	-5°	0°	+5°	+10°	+15°	+20°	+25°	+30°
	+20°	91.9	90.2	91.5	90.3	90.0	90.4	90.1	91.0	90.0	91.0	91.8	90.3	90.1
	-10°	91.9	90.9	89.8	90.8	91.5	92.1	92.5	91.2	90.6	90.8	90.5	90.2	89.9
	0°	88.5	89.2	89.4	88.7	89.1	89.4	89.2	88.9	89.2	88.3	88.1	88.6	88.3
	-10°	90.2	89.9	91.7	92.0	89.9	89.8	89.3	89.2	89.8	89.3	89.6	88.5	89.4
	-20°	91.3	92.6	93.2	92.4	92.6	92.1	91.1	91.4	92.2	91.5	92.2	91.7	92.9

表2 实际测量数据

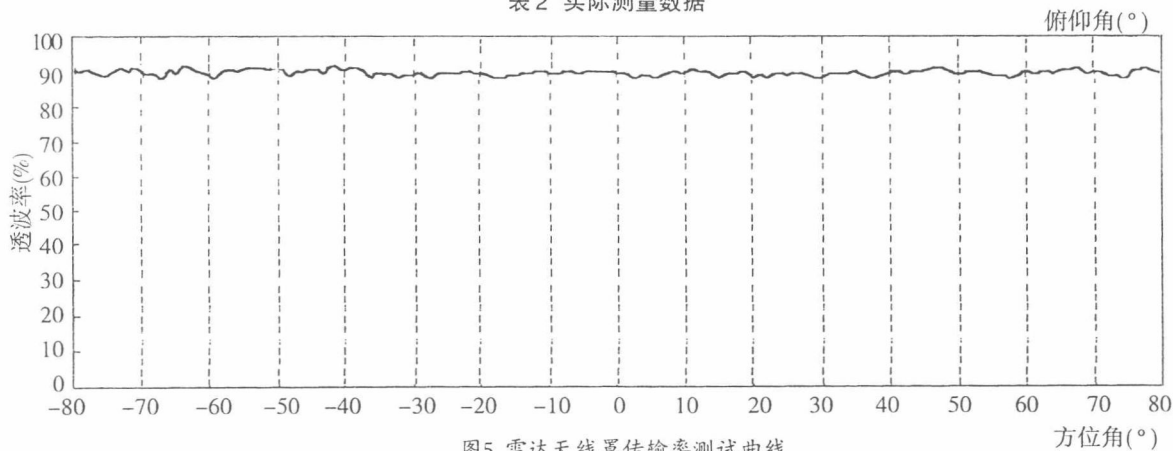


图5 雷达天线罩传输率测试曲线

达天线罩的修复水平得到了很大的提高，有效地恢复了原雷达罩的电性能指标，使得受损的罩子修复合格后重新投入使用，其意义十分显然。

参考文献

- [1] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法. 国防工业出版社, 1994
- [2] Lightning Test Waveforms and Techniques for Aerospace vehicles and Hardware. by ASE Committee AE-4 Special Task F.5 1976
- [3] 乔新. 气象雷达天线罩维修教程. 航空工业出版社, 1998

上接第92页

因为它们在不同的优化准则下得出的结论。总的来讲，对噪声功率估计的方差越小，检测概率也就越大。文献[3]中极大检测概率MPL-CFAR的性能与基于最小方差估计BLU-CFAR的性能接近，但优于BLU-CFAR的情况，也正是这种机理。

3 结论

本文给出了来自负指数分布的有序统计量的概率密度函数和概率分布函数，推导了各有序统计量的均值及方差的数学表达式，并给出了用有序统计量对指数分布的参数进行估计的方法，分析了其方差的大小，结合恒虚警技术的应用，可以看到对噪声功率水平估计的方差越小，检测概率也越大，恒虚警损失也就越小。从这里也可以看出，对某一需要最优的准则，在另外一种场合不见得最优。在这里可以提到，由于利用有序统计量对噪声分布参数的估计，

对假定的均匀噪声背景具有一定的鲁棒性，因而继续研究利用有序统计量对韦布尔分布、 K —分布、对数正态分布等参数进行估计，是一项有意义的工作。

参考文献

- [1] Hrohling. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple-target situations. IEEE Trans. AES, 1983; 19(4): 608 ~ 621
- [2] PPGandhi, SAKassam. Analysis of CFAR Processors in Nonhomogeneous Background. IEEE Trans. AES, 1988; 24(4): 427 ~ 445
- [3] DTNagile, JSaniie. Performance Analysis of Linearly Combined Order Statistic CFAR detectors. IEEE Trans. AES, 1995; 31(2): 522 ~ 533
- [4] Meng Xiangwei, He you. A unified model of greatest of selection logic CFAR algorithm-TMGO. Proc. of 1998 International Radar Symposium (IRS' 98), German: 1998: 613 ~ 620
- [5] 孟祥伟, 何友. 基于准最佳加权有序统计的最大选择CFAR检测算法. 电子学报, 1997; 25(12): 74 ~ 78
- [6] 孟祥伟, 何友. 最小选择恒虚警检测器的统一模型—TMSO. 仪器仪表学报, 1997; 18(5): 481 ~ 485
- [7] HDavid. Order Statistics. New York: Wiley, 1981

基于 SBR 法研究发动机进气道的 RCS*

Research on RCS of Engine Duct Based on SBR Method

万顺生 张钟勤

(南京航空航天大学无人机研究所, 南京 210016)

WAN Shunsheng ZHANG Zhongqin

(Research Institute of Pilotless Aircraft, NUAA, Nanjing 210016)

【摘要】 采用弹跳射线法(SBR)对发动机进气道的雷达散射截面(RCS)进行了分析计算。通过光学射线跟踪、场强跟踪及口径积分方法,研究了任意截面和形状的管道电磁散射特性,比较了一实际进气道的计算与实验结果,验证了此方法的有效性,从而解决了工程急需。

关键词: 射线,进气道,雷达散射截面

Abstract: RCS of engine duct is calculated and analyzed using SBR method. EM scattering characteristics of the pipe with arbitrary section and shape are studied by the methods of shooting and bouncing rays, field intensity track and aperture integral. The calculation is compared with the experimental result for a real engine duct. It proves that this method is very effective and meets practical needs in engineering.

Key terms: Ray, Duct, Radar cross-section

一、引 言

理论分析和实验结果都已证明,发动机进气道是飞机及导弹的一个强电磁散射源。因此,在计算现代飞行器的 RCS 值以进行隐身外形设计时,应充分考虑进气道结构的电磁散射特性。由于进气道的几何形状和结构复杂,通常将进气道简化为如图 1 所示的模型。进气道由一管状腔体和一距离在 L 处的涡扇或第一压缩器的叶片(非涡扇发动机)组成,叶片轴和进气道管轴相重合。进气道通过平面电磁波照射,周围介质为空气。分析计算此类腔体的 RCS,常用方法有导波模式法^[1,2]、高斯波束法^[3]、复射线法^[4,5]和弹跳射线法(SBR)^[6]等。其主要区别在于计算腔体内多次反射时采用了不同的高频近似处理,而对于边缘绕射的分析则大多采用几何绕射理论(GTD)、一致性绕射理论(UTD)或等效电磁流法(ECM)进行计算。本文结合我校研制的 CK1 型无人机进气道的特点,采用 SBR 法成功地分析计算了大尺寸口径进气道的电磁散射特性。

* 收稿日期:2000-03-20;定稿日期:2000-06-07。航空科学基金资助项目。

二、SBR 法

对于非均匀渐变截面的管状腔体,当截面渐变而产生的内壁散射影响小到可忽略不计时,其电磁散射分析可通过几何光学(GO)射线法结合口径积分(AI)法来完成。这种方法首先将入射的均匀平面波展开为一组密集的平行射线管,与开口面相交的一部分 GO 射线则可以进入腔体,如图 1 所示。场射线按照几何光学原理进行跟踪,直至每根射线都经过腔壁和终端多次反射重新回到入射口面上。在入射和反射跟踪过程中,必须考虑极化、腔壁损耗、发散因子等因素,对每根射线进行场强跟踪,最后将反弹至口面上的场进行积分而求解出进气道的电磁散射特性值。因此 SBR 法包含了对电磁波射线的跟踪、电磁场强跟踪和口径积分三部分。

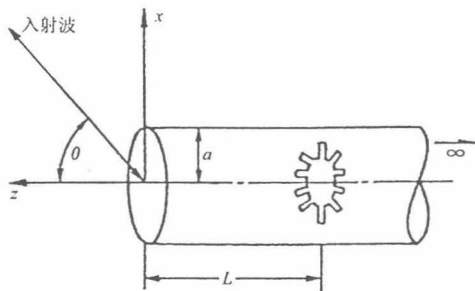


图1 简化进气道模型

2.1 射线跟踪

当入射射线照射到进气道腔壁 P_1 处时,其反射点和反射方向矢量如图 2 所示。射线跟踪要求解反射点坐标 (X_1, Y_1, Z_1) 以及反射射线的方向矢量 $\hat{S}_r$ 。

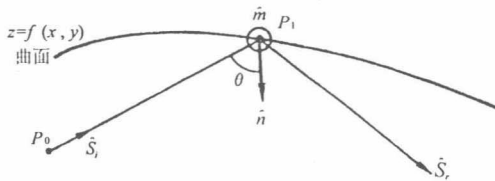


图2 反射点和反射方向矢量

如果空间曲面的反射方程为 $Z=f(x, y)$, 则射线方程为

$$(X_1, Y_1, Z_1) = (X_0, Y_0, Z_0) + (S_{ix}, S_{iy}, S_{iz})t \quad (1)$$

式中 t 为入射点 $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 到反射点 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 间的距离。当反射射线与入射射线位于同一平面内,且反射角等于入射角时,反射点 P_1 处曲面的反射方向矢量 $\hat{S}_r$ 有如下关系:

$$\hat{m} \cdot \hat{S}_r = 0 \quad (2)$$

$$-\hat{S}_i \cdot \hat{n} = \hat{n} \cdot \hat{S}_r \quad (3)$$

其中 $\hat{m}$ 为单位方向矢量, $\hat{n}$ 为反射点 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 处曲面的单位法向矢量,经推导得:

$$(n_z - n_y)S_{rx} + (n_x - n_z)S_{ry} + (n_y - n_x)S_{rz} = (n_z - n_y)S_{ix} + (n_x - n_z)S_{iy} + (n_y - n_x)S_{iz} \quad (4)$$

$$(S_{iy}n_z - S_{iz}n_y)S_{rx} + (S_{iz}n_x - S_{ix}n_z)S_{ry} + (S_{ix}n_y - S_{iy}n_x)S_{rz} = 0 \quad (5)$$

$$n_x S_{rx} + n_y S_{ry} + n_z S_{rz} = -n_x S_{ix} - n_y S_{iy} - n_z S_{iz} \quad (6)$$

联立求解(4)~(6)式可求得反射方向矢量 $\hat{S}_r$ 。因此,当射线以不同入射角入射到一空性等截面圆柱腔体时,可根据入射点 P_0 的坐标和入射线单位方向矢量 $\hat{S}_i$,求出经腔体多重反射最终回到口面上的场分布。

2.2 场强跟踪

射线在腔体内壁多次反射,设第 n 个反射点 $P_n(X_n, Y_n, Z_n)$ 的入射电场为 $\vec{E}^i(X_n, Y_n, Z_n)$, 则第 $n+1$ 个反射点 $P_{n+1}(X_{n+1}, Y_{n+1}, Z_{n+1})$ 的入射电场为:

$$\vec{E}_{n+1}^i(X_{n+1}, Y_{n+1}, Z_{n+1}) = (DF)_n(\Gamma)_n \cdot \vec{E}_n^i(X_n, Y_n, Z_n) \cdot e^{-jK_0 r_n} \quad (7)$$

式中 $(DF)_n$ 为第 n 点到 $n+1$ 点之间的发散因子, $(\Gamma)_n$ 为第 n 点场反射系数矩阵, r_n 表示第 n 点到第 $n+1$ 点之间的距离

$$r_n = [(X_{n+1} - X_n)^2 + (Y_{n+1} - Y_n)^2 + (Z_{n+1} - Z_n)^2]^{1/2} \quad (8)$$

(7) 式是场幅度跟踪方程, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$. $n=0$ 即 $\vec{E}_0^i(X_0, Y_0, Z_0)$ 是口面上入射电场, 这时 $(DF)_0=1$, $(\Gamma)_0=1$; 当 $n=N-1$ 时, $\vec{E}_N^i(X_N, Y_N, Z_N)$ 是经腔壁多次反射回到入射口面上的电场。因此, 确立进气道腔体的散射特性, 关键是解 (7) 式的反射系数矩阵 Γ 和发射因子 DF 。

场发散因子 $(DF)_n$ 是由电磁波波前曲率矩阵决定的。对平面波来说, 波前曲率为零, $(DF)_0=1$ 。当电磁波经曲面反射时, 反射波前曲率只与入射波前曲率矩阵以及曲面的曲率矩阵有关。经分析和推导后发现, 若反射波前的两个主曲率半径为 R_1, R_2 , 则

$$(DF)_n = \frac{1}{\sqrt{1 + r_n/R_1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + r_n/R_2}} \quad (9)$$

若进气道腔体为纯导体, $\Gamma=1$, 则第 $n+1$ 点入射场为:

$$\vec{E}_{n+1}^i = (DF)_n \cdot e^{-jK_0 r_n} \vec{E}_n^i \quad (10)$$

根据前面射线跟踪和场幅度跟踪, 已经求出经进气道腔壁多次反射而回到入射口面上的电场分布, 将口面上的电场等效成磁流源, 进行口径积分, 可求出进气道的散射场。

2.3 口径积分

由于均匀入射到腔体的电磁波经多次反射后回到口面的场已不是均匀分布的, 为了积分, 我们引入了射线管概念, 即入射不单是一根根射线, 而是一截面积为 $\Delta X \Delta Y$ 的 r 射线管, 这样: (1) 在每个 r 射线管与口面相交的截面内场幅度是均匀的; (2) 在口截面内相位为线性分布, 如图 3 所示。这样射线跟踪就成为对 4 根射线组成的四边形截面射线管进行跟踪, 口径积分实际上就是对每一射线管截面的积分。

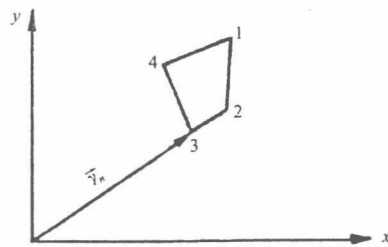


图 3 射线截面积分

若最终口面 Σ_A 上的电场为:

$$\vec{E}(x_i, y_i, 0) = \hat{x}E_x + \hat{y}E_y + \hat{z}E_z$$

则等效磁流源产生的远区辐射场 E^{bs} 为:

$$\vec{E}^{bs} = \frac{e^{-jK_0 r}}{r} [\hat{\theta}A_\theta + \hat{\phi}A_\phi] \quad (11)$$

而

$$\begin{pmatrix} A_\theta \\ A_\phi \end{pmatrix} = \frac{jk}{2\pi} \iint_{\Sigma_A} dx dy e^{jK_0(ux+vy)} \begin{pmatrix} -E_x \cos\varphi - E_y \sin\varphi \\ (-E_x \sin\varphi + E_y \cos\varphi) \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$u = \sin\theta \cos\varphi$$

$$v = \sin\theta \sin\varphi$$

这里 θ, φ 是入射电磁波的角度, 所以进气道的后向电磁散射特性, 即雷达散射截面为:

$$\begin{aligned} \text{RCS}_{\varphi\varphi} &= 4\pi |A_{\varphi}|^2 \\ \text{RCS}_{\theta\theta} &= 4\pi |A_{\theta}|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

三、理论与实测结果比较

根据以上分析结果,利用(11)式并考虑(7)~(10)等式,我们编制了SBR法发动机进气道电磁散射特性的计算程序,最后以(12)式形式给出雷达散射截面随角度变化的曲线。为了验证理论分析和程序的正确性,计算了一个口径半径 R 为 10λ ,深度 D 为 40λ 的进气道模型。图4是SBR法与模式法计算结果的比较。从图中可看出,无论是水平极化还是垂直极化,两者能基本吻合。

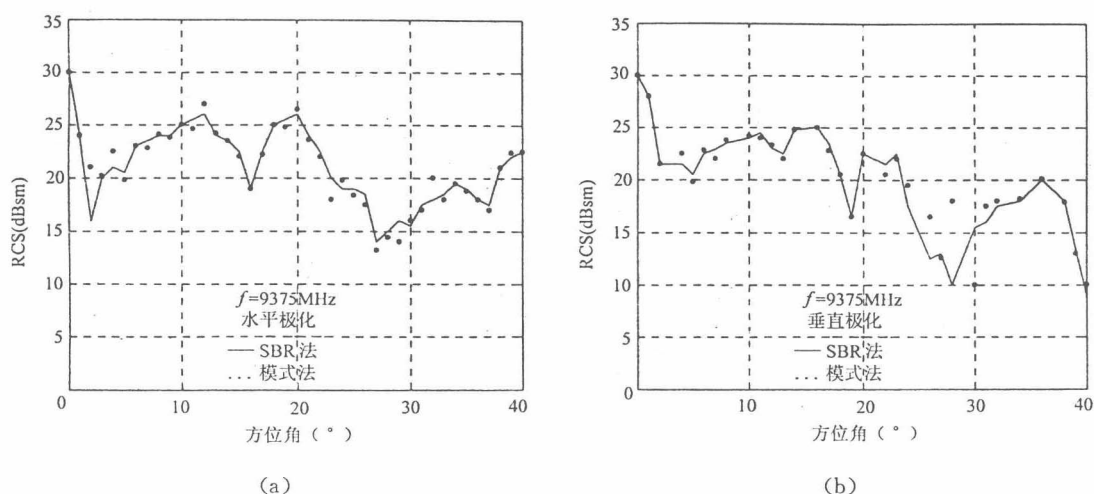


图4 SBR法与模式法比较

图5是CK1型无人发动机进气道的外形。图6是采用SBR法计算得到的该进气道的电磁散射特性曲线,从中可看出正负20°范围内吻合较好。

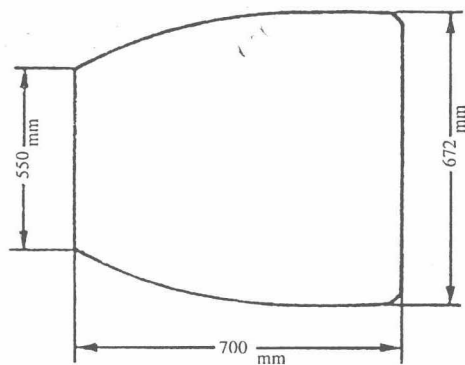


图5 CK1型无人机的进气道尺寸

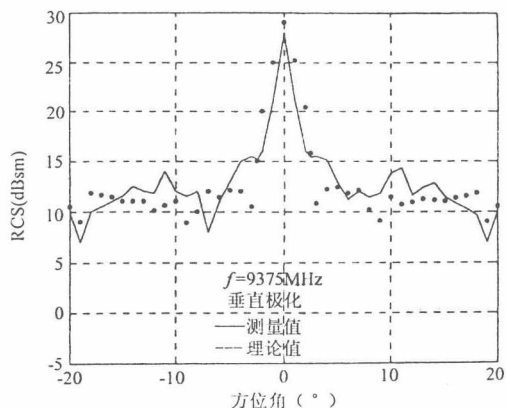


图6 CK1型无人机进气道电磁散射特性

四、结束语

理论分析与实测结果表明,利用 SBR 法计算大尺寸口径、任意截面和形状的进气道雷达散射截面积,与其它几种方法相比,其物理概念清晰,数学模型也容易建立。考虑到发动机进气道唇口受到边缘效应的影响,因此采用 SBR 法进行分析计算时,若结合边缘绕射理论,则可进一步提高精度。

参 考 文 献

- [1] P. H. Pathak, R. J. Burkholder. Mode, ray, and beam techniques for analyzing the EM scattering by open-ended waveguide cavities, IEEE Trans. AP, 1989, 37: 635~647.
 - [2] P. H. Pathak, R. J. Burkholder. High-frequency electromagnetic scattering by open-ended waveguide cavities, Radio Sci., 1991, 26: 211~218.
 - [3] H. Ling. RCS of waveguide cavities; a hybrid boundary-integral/modal approach, IEEE Trans. AP, 1990, 38: 1413~1420.
 - [4] 尧德中. 平面波的复射线束展开. 电子科学学刊, 1994, 16(1): 72~75.
 - [5] 阮颖铮. 复射线理论及其应用. 北京: 电子工业出版社, 1991.
 - [6] H. Ling, R. C. Zhou, S. W. Lee. Shooting and bouncing rays; calculating the RCS of an arbitrary shaped cavity, IEEE Trans. AP, 1989, 37: 194~205.
- 万顺生 1950 年生, 副教授, 天线与电磁散射特性研究室主任。
张钟勤 1972 年生, 硕士, 从事天线与电磁散射特性研究。

新颖的结构设计 · 优越的工艺技术

电子机械工程

《电子机械工程》系中国电子学会电子机械工程分会会刊,它是全国唯一的一本电子机械结构杂志,在全国电子机械领域内享有相当高的声誉。国内统一刊号为 CN32-1539/TN,国际标准刊号为 ISSN1008-5300,广告经营许可证号:3201004001343。

《电子机械工程》以刊登工程、科研和教学实践经验总结为主,兼报导国内外电子机械工程领域内的先进技术。主要刊载内容:电子设备系统;整机结构设计;机电一体化技术和新品;计算机辅助设计、制造和试验;分机设计(包括箱柜及附件设计);电子组装(包括微组装);布线与连接(包括印制板、连接器等);热设计;振动与冲击隔离;电磁兼容性;人机工程;可靠性与试验技术;天馈与传动;工艺技术等。

《电子机械工程》为大 16 开本双月刊杂志,每期 64 页,每本定价 7 元,全年共收费 42 元。

通信地址:南京 1313 信箱 110 分箱(210013)

电 话:(025)3344000-2656

文章编号:1001-5078(2000)05-0293-03

毫米波/红外频率选择表面的双工性研究

万顺生, 卫 民

(南京航空航天大学无人驾驶飞机研究所, 南京 210016)

摘 要:采用 FSS 来设计天线复用副面, 实现透过毫米波而反射红外的双工性能。理论分析和实验结果都证明了该方案的有效性, 样件对毫米波的透射率和对红外的反射率均可大于90%。该复用面还具有适用于双色红外系统的优点, 克服了光学结构仅可用于单色红外的不足。

关键词:毫米波; 红外; 频率选择表面; 天线

中图分类号: TN820.1⁺⁶; TN805

文献标识码: A

Duality Research on MM-Wave/Infrared FSS

WAN Shun-sheng, WEI Min

(Research Institute of Pilotless Aircraft, NUAA, Nanjing 210016)

Abstract: A new kind of antenna multiplexer designed by FSS is presented. The FSS pass through millimeter wave and reflected infrared waves. Vectorial Floquet's mode analysis and experimental results of the fabricated sample verify the validity of the multiplexing technique. The mm-wave in-band transmissivity and the infrared wave reflection efficiencies are greater than 90%, which meet the demand of the systems. The FSS multiplexer can also be used in the system operating with multi-frequency infrared.

Key words: millimeter wave; infrared; FSS; antenna.

1 引言

研究和开发毫米波和红外相结合的复合系统已成为当今复合遥感技术发展的新课题。在该项研究中, 毫米波与红外的天线复用技术占有重要位置。有专家曾提出并开展了介质板镀膜复用面的研究, 通过在一定厚度的介质板表面镀光学膜来达到透红外而反射毫米波的效果, 其系统简单构成见图1(a)。本文在理论分析的基础上, 提出利用频率选择表面(简称 FSS)来制造复用副面, 该副面透过毫米波而反射红外光, 见图1(b)。研究结果表明与前一种方案相对而言, 频率选择表面的传输效率(毫米波)和反射率(红外)都较高, 且具有适用双色和多色红外复合系统的独特优点。

FSS 是由大量无源单元按某种特定分布方式周期排列而成的分层准平面结构。FSS 对电磁波的透射和反射具有良好的选择性, 对于其通带内的电磁波呈现全通特性, 而对其阻带内的电磁波则呈全反射特性, 即具有空间滤波器功能。FSS 在微波、毫米波、红外直至光波的各个频段得到了广泛的应

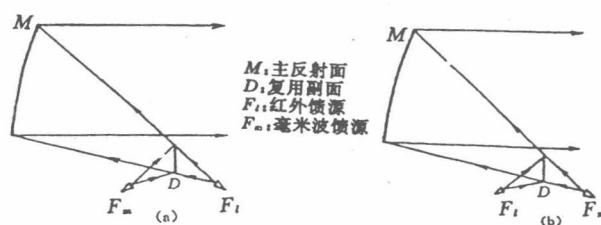


图1 毫米波/红外复合天线系统

用^[1]: 在微波领域中, FSS 除用做人工介质外, 还用于通讯卫星系统的频段多工器, 利用多馈源配置来扩大通讯容量, 后又用于天线罩研制。在红外和可见光谱段, FSS 成功地应用于太阳能装置而大大提高了效率; 在远红外分子激光器中人们使用 FSS 反射镜提高泵源的效率; 此外 FSS 还可用来制作偏振器和波束分离装置。目前 FSS 的研究正向有源和可控方向发展^[2,3]。

FSS 的分析方法主要有早期的变分法、等效电

作者简介: 万顺生(1950-), 男, 南航无人机研究所高级工程师
收稿日期: 2000-03-20