



第十届 全国雷达学术年会 论文集 (下册)

2008年10月31日 - 11月2日 北京

中国电子学会无线电定位技术分会主办
中国航天科工集团二院二十三所承办



国防工业出版社

National Defense Industry Press

第十届全国雷达学术年会论文集

2008年10月31日—11月2日 北京

下 册

主办单位:中国电子学会无线电定位技术分会

承办单位:中国航天科工集团二院二十三所

协办单位:航天长峰朝阳电源有限公司

安捷伦科技有限公司

泰克科技(中国)有限公司

北京镭航世纪科技有限公司

北京凌天科技有限公司

安立有限公司

北京科立信控制技术有限公司

国防工业出版社

· 北京 ·

目 录

雷 达 分 系 统

大型强迫馈电单脉冲相控阵天线	匡勇 申伯勇 于春国 郭林 王小林	(708)
一种新型星载 SAR 宽带双极化微带天线阵的研究	李迎林 李建新	(713)
几种薄膜天线单元形式的研究	于大群 朱瑞平	(717)
复合振子在相控阵天线中的应用研究	王茂彬	(721)
基于模拟退火算法的阵列天线布阵优化	王哲 赵永波 黄敬芳	(725)
液晶相控阵组件扫描精度分析	易伟 孔令讲 杨建宇 张翠玉	(728)
有源可扩充阵列天线可重构方案设计	王周海 王小陆 杨星华 张轶江	(733)
双波段双极化单脉冲馈源	孙文玲 姜新发 聂晓初 张铁柱 闫颂	(738)
改进的交替投影法在相控阵方向图综合中的应用	陈云 何炳发	(741)
有源相控阵天线监测系统的应用	施长海 章传芳 郝志梅 徐志 陈振中	(746)
并行合元极技术在电磁散射问题中的应用	陈明 陈如山 朱剑 樊振宏	(750)
圆极化移相器极化散射参量测量方法的比较分析	杨建新 罗宏	(754)
合成孔径雷达双极化有源相控阵天线研究	李磊 汪伟 张智慧	(759)
一种宽带宽波束双圆极化天线	万笑梅	(762)
有源相控阵天线中场测量方法及其关键技术	施长海 章传芳 陈振中	(765)
基于圆阵的 Watson-Watt 测向算法	黄志忠	(769)
基于数字阵列雷达的两种宽带通道均衡方法研究	唐伟伟 张月 陈曾平	(773)
Anritsu 分布式频率转换天线测量系统	李勇 傅德民 李青凤 柯建武	(777)
一种共形阵列的波束方向图设计迭代方法	唐猛 汤俊 彭应宁 王秀坛	(780)
基于行波耦合馈线的相控阵幅相校正算法比较	彭祥龙 石星 刘苗	(785)
基于 FPGA 的导引头相控阵波束控制器设计	李相平 张刚 赵腊	(789)
新型 S 波段固态发射机设计	周斌 商坚钢	(792)
坐标变换在机载雷达显示系统中的应用	刘扬 孙永良	(796)
3mm 波段雷达高稳定激励器技术	高文英	(800)
毫米波雷达发射机的轻小型化设计	袁同山 束峰涛	(803)
基于某型雷达发射机脉冲调制器的设计	吴光旭	(807)
高功率宽带多波形多注速调管发射机的设计	罗忠省 陈雪宇 郭越红 贺磊	(810)
C 波段高功率超大脉宽固态发射机系统的研制	罗忠省 臧新梅 张丽琴	(814)
DBF 体制雷达中多通道高速数字化接收系统的设计与实现	房爽	(818)
固态雷达发射组件测试方法研究	肖小锋 任敏 李静	(822)
雷达主控双机热备份系统	朱良勇	(826)
基于常规雷达的分布式检测系统设计	刘向阳 许稼 彭应宁	(830)
软件化雷达中的分层通用化	韦文 汤俊 彭应宁 王秀坛	(834)
基于 MCU 和 FPGA 技术的脉冲功率计设计	黄琿	(839)
MIMO 分集检测系统自由度的优化选择	戴喜增 许稼 彭应宁 刘炳齐	(842)
基于数字锁相环的宽带捷变频信号设计	何川 赵军	(846)
相控阵雷达时序控制和数据传输模拟器的设计实现	蒋薇	(850)

一种可扩充有源天线模块的研制和测试
 并行区域分解方法在电磁散射问题中的应用
 6-18GHz 四通道 T/R 组件的设计
 酉矩阵与相控阵天线的监测
 用统计过程控制技术控制铁氧体移相器零场性能一致性研究
 新型发夹带通滤波器设计
 基于带通采样的无需抽取器的数字正交变换方法
 简单多支路功率分配器技术分析
 基于高频方法分析电大尺寸目标的散射
 脊波导本征值的 MOM/BI-RME 分析
 液晶相控阵组件动态测试系统波控数据获取方法研究
 基于局部观测信噪比的分布式 N-P 检测融合规则设计
 利用 ADS 的调谐和优化功能设计四分支耦合器
 MEMS 开关器件在相控阵雷达中的应用
 基于 NiosII 嵌入式系统的高速 CPCI 图形显示板设计与研制
 基于多站定位的机场场面监视系统的分析
 射频半实物 SAR 雷达模拟器的研究
 铁氧体移相单元群的分布式驱动控制技术
 实时操作系统 VxWorks 下 VXI 模块开发
 微波有源组件盒类零件自动检测系统研究
 基于 ADSP-TS201 的自适应滤波器的实现
 基于 MUX 层的雷达分系统同步实现
 惯性技术在雷达系统姿态测量中的应用

王小陆 王周海 曹军 李雁 陈之涛 (855)
 易真 叶建 陈明 陈如山 樊振宏 (859)
 陈兴国 韩军 胡俊 马勇 杨扬 (863)
 李磊 汪伟 (868)
 张立春 匡轮 包淑玲 (872)
 高宁 高勇 邢小明 (875)
 刘高辉 张修社 许世荣 李英军 (879)
 吕植明 侯耀清 (884)
 娄瑜雅 陈如山 丁建军 徐侃 (887)
 徐晓霖 张强 (891)
 陈君 孔令讲 杨建宇 张翠玉 (895)
 杨大志 陈国祥 丁建江 (900)
 孔德武 (904)
 金铃 (910)
 张聚 (914)
 朱子平 潘勇先 赵洪立 (917)
 王强 井应忠 (921)
 谢国杰 李宝柱 匡轮 魏明达 (925)
 龙庆华 (928)
 齐浩军 (932)
 许德刚 (936)
 朱良勇 (940)
 韩延明 凌钢 (943)

SAR/ISAR

一种提高带限 SAR 距离分辨力的方法
 基于粒子群优化算法星载 SAR 波束展宽
 0.1m 高分辨力 SAR 距离带宽合成
 机载全极化 SAR 系统幅相误差补偿方法研究
 基于混合 PCA/ICA 的 SAR 图像特征提取方法
 同时 GMTI/SAR 雷达系统的实现
 多波段多极化机载 SAR 系统研制
 基于变速变重频的 SAR 反对抗技术研究
 基于 PCI 总线的 SAR 运动目标信号模拟源设计和实现
 基于弹射线法的复杂目标 SAR 图像仿真
 一种频域外推 SAR 超分辨算法
 基于余弦调相和相干噪声的 SAR 压制干扰
 旋转目标微多普勒提取方法研究
 Ku 波段 0.1m 分辨力机载 SAR 系统的实现
 噪声连续波干扰信号数字相关检测分析
 雷达扫描模式下海杂波多重分形特性分析
 圆柱内腔合成孔径雷达成像仿真及特征分析
 一种新型双站稀疏线阵三维成像 SAR 系统模型
 一种改进的极化 SAR 地表参数反演方法
 一种机载 SAR 通信控制卡设计
 机载 SAR 运动补偿技术研究

张学磊 肖健华 (947)
 齐美清 汪伟 (951)
 党红杏 邬伯才 辛师勃 (954)
 王志锐 胡庆荣 吴靖巍 (959)
 卢晓光 韩萍 吴仁彪 (964)
 龚晓凌 张卫华 方志红 邓海涛 (968)
 邬伯才 江凯 陈仁元 (972)
 于明成 张中民 许稼 彭应宁 (977)
 夏斌 左渝 许稼 王秀坛 彭应宁 (981)
 张锐 洪峻 明峰 (985)
 张平 胡凤明 杨汝良 (989)
 刘阳 王涛 代大海 张文明 王雪松 (993)
 刘进 李金梁 马梁 丹梅 王国玉 (998)
 邬伯才 党红杏 江凯 辛师勃 (1002)
 黄桂根 傅有光 夏映玲 龚享铱 (1007)
 刘宁波 王捷 关键 李秀友 (1011)
 张月婷 王卫延 丁赤飏 尤红建 (1015)
 王银波 张晓玲 (1020)
 陈炯 杨健 (1025)
 吴创新 李悦丽 黎向阳 (1030)
 赵云仙 刘瑞华 (1034)

一种基于图像对比度的高分辨力 SAR 自聚焦算法研究	夏文文 刘振华	(1038)
一种联合的极化干涉 SAR 植被高度反演方法	韩迪 张晓玲	(1042)
SAR 图像域运动目标参数估计性能	左渝 许稼 彭应宁	(1046)
极化干涉 SAR 系统设计	湛金童 郑陶冶 汪洋	(1050)
弹载大斜视 条带 SAR 成像算法分析	周强 曲长文 王颖	(1055)
SIFT 与 Harris 特征提取算法在 SAR 图像自动配准中的应用及性能分析	孙艳丽 周伟 关键	(1059)
机载下视三维成像合成孔径雷达	王彦平 杜磊 谭维贤 洪文 吴一戎	(1063)
基于多小波变换的 SAR 原始数据压缩算法	李霆 袁礼海	(1067)
基于 UWB SAR 单通道单航过子孔径图像序列的地面运动目标变化检测方法	周红 黄晓涛 常玉林 周智敏	(1070)
一种基于平流层飞艇的低速 SAR 系统设计	胡庆荣 武玉刚 吴靖巍 王志锐	(1074)
C 波段多极化星载 SAR 系统样机及机载校飞	王立刚 张卫华 邓海涛 阮祥伟	(1079)
直升机毫米波阵列天线 SAR 真三维成像系统及其性能分析	洪文 李道京 谭维贤 王彦平 乔明 吴一戎	(1084)
基于多普勒中心估计的星载 SAR 波束指向分析	来驰攀 穆冬 胡学成 林幼权	(1089)
稀疏阵综合脉冲孔径雷达的阵列优化设计分析	陆鹏程 徐晋 付启众	(1093)
结合合成带宽的高分辨力 SAR 成像算法	杨俊刚 黄晓涛	(1097)
SAR/ATR: 基于目标多尺度概率密度特征	张新征 黄培康	(1101)
对 SAR 的分段步进移频干扰研究	吴晓芳 王雪松 丹梅 肖顺平	(1105)
星载 SAR 内定标技术与内定标精度研究	梁淮宁	(1109)
MIMO-SAR 与 MPC-SAR 成像系统性能分析	王力宝 许稼 皇甫堪 彭应宁	(1113)
用分形特征对 SAR 图像目标检测方法的研究	胡风明 杨汝良 商建	(1118)
多通道 SAR-GMTI 系统参数设计	吕孝雷 齐飞林 邢孟道 张守宏	(1122)
三通道聚束式 SAR-GMTI 算法研究	熊涛 高昭昭 邢孟道	(1127)
SAR 辐射定标中角反射器的研究	袁礼海 张长耀 葛家龙 李霆 汪洋	(1131)
极化 SAR 数据的定标精度应用分析	汪洋 鲁加国 袁礼海	(1136)
基于改进 Z-Buffer 算法的 SAR 地面运动目标建模研究	孙祥玺 许稼 左渝 王力宝 叶春茂 彭应宁	(1140)
SAR 自然地面场景原始回波数据仿真	王新民	(1145)
波束同步误差对编队卫星 InSAR 系统性能的影响研究	来驰攀 穆冬 胡学成 林幼权	(1150)
ESPRIT 超分辨方法在大转角目标 ISAR 成像中的应用	詹武平 肖同林 黄顺东 梁建国	(1154)
ISAR 成像中散射点越多普勒单元走动的校正	黄雅静 曹敏 付耀文 姜卫东	(1158)
ISAR 成像中一种改进的距离对准方法	许人灿 高磊 陈曾平	(1162)
高速运动目标的 ISAR 成像方法	张焕颖 张守宏 李强	(1166)
改进的 ISAR 最小熵包络对齐快速算法	唐波 汤俊 彭应宁 王秀坛	(1171)
一种 ISAR 方位向定标的新方法	苏军海 钱江 邢孟道	(1175)
基于双基地 ISAR 配置的目标转速估计	叶春茂 许稼 彭应宁 王秀坛	(1179)
宽带相控阵雷达孔径渡越时间补偿技术	文树梁 鲁耀兵	(1184)
利用超分辨技术实现 ISAR 包络对齐	郭少南 张晓玲 师君	(1188)
一种 ISAR 目标运动补偿的新方法	肖建峰 黄培康 文树梁	(1192)
平稳运动目标的干涉 ISAR 成像	王明明 刘宏伟 李丽亚	(1196)
基于 MSKM 方法的雷达目标一维距离像识别	王贞 冯健 杨万麟	(1200)
粗糙集特征选择在高分辨距离像识别中的应用	胡磊 周剑雄 赵宏钟 付强	(1204)
一种基于神经网络的天线方向图快速生成算法及其在毫米波无源成像技术中的应用	姜正茂 杨建宇 李良超 郑鑫	(1208)
一种新型 0.2THz 成像系统	朱万华 李超 张国庆 方广有	(1212)

单脉冲三维成像系统通道不一致性分析及补偿
 基于三维散射中心模型的雷达目标距离像识别
 基于频分 MIMO 雷达的一维高分辨距离像合成
 弹头微运动实验室模拟测量研究
 基于微多普勒特征的轮式车辆和履带式车辆识别
 宽带高分辨距离像用于高精度测速的方法
 幂变换提高雷达高分辨距离像识别性能的实验研究
 ISAR 成像干扰研究综述
 一种解速度模糊的多通道干涉 SAR/GMTI 实现方法
 应用于 ISAR 干扰效果评估的多级模糊综合评判模型
 方位多相位中心 SAR 解模糊重构
 MRF 和 C 均值法在 SAR 图像分类的性能比较
 基于高分辨 SAR 图像统计特征的抗干扰方法
 分布式 SAR 小卫星阵杂波秩分析
 多舰船目标的 SAR/ISAR 成像方法研究
 静止轨道星载 SAR 参数设计
 合成孔径雷达有源欺骗干扰仿真及效果评估
 调频连续波 SAR 系统设计
 微多普勒分析在弹头微动特征提取中的适用范围
 一种基于航迹的机载 SAR 图像自适应定位算法
 C 波段机载全极化 SAR 系统及实时成像算法设计
 基于三天线 InSAR 的高精度测速测高方法
 一种基于多发多收的虚拟阵列的三维 SAR 成像模型
 机载 SAR 图像量化及去噪声算法的工程应用研究
 车载前视地表穿透合成孔径雷达图像背景均衡技术
 基于精确去除平地相位的 InSAR 高程重建方法
 双基地合成孔径雷达方位多普勒频率特性研究
 无人机载合成孔径雷达的小型化发展
 一种 SAR 图像的变化检测算法
 基于非参数估计方法的水平集 SAR 图像分割

高磊 杜琳琳 黄小红 陈曾平 (1215)
 秦敬喜 周剑雄 赵宏钟 付强 (1220)
 戴喜增 许稼 彭应宁 刘炳齐 (1225)
 宁超 周平 (1230)
 丁苏颖 刘宏伟 (1234)
 刘丹 陆荣 (1238)
 彭聪 刘宏伟 (1240)
 刘红娅 贾鑫 (1244)
 李纯厚 梁波 武昕伟 (1248)
 王振楠 贾鑫 吴彦鸿 李云涛 (1252)
 党红杏 (1255)
 王晓军 宾亚 马宁 孟藏珍 王鹤磊 (1259)
 李江源 王建国 (1263)
 党雅文 张毅 潘洁 (1266)
 马瑜杰 张龙 邢孟道 (1271)
 钱江 苏军海 吕孝雷 邢孟道 (1275)
 孙龙 张宏荣 唐月生 张长耀 靳学明 (1279)
 梁毅 王虹现 邢孟道 保铮 (1284)
 王涛 王雪松 马梁 李盾 冯德军 (1289)
 于俊朋 孙俊 金林 (1294)
 吴靖巍 胡庆荣 王志锐 (1299)
 汪沛 李艳杰 曹哲 (1304)
 李伟华 张晓玲 (1308)
 姜明 (1312)
 王玉明 宋千 张汉华 杨延光 (1315)
 向征 刘兴钊 (1319)
 蔡复青 何友 宋杰 (1323)
 何均 任培宏 (1327)
 王彦光 刘瑞华 (1331)
 冯籍澜 曹宗杰 皮亦鸣 (1335)

结构工艺及其它

X 波段 LTCC 多芯片陶瓷封装
 雷达毁伤分析方法研究
 微波通路的工艺集成设计与制造
 微组装技术及其在固态有源相控阵雷达中的应用
 雷达景象匹配寻的制导目标参考模板制备技术研究
 雷达装备腐蚀与防护对策研究
 模块化多通道旋转关节的设计
 雷达末级组件的先进制造技术
 雷达导引头伺服稳定回路研究
 某机动式雷达 6.2m 抛物面天线结构设计
 雷达海杂波反演大气波导研究
 VXI 机箱的热仿真
 舰载雷达波束指向稳定方法研究
 无线数字式倾角测量系统设计

刘德志 宗敬群 (1340)
 卢彦庭 (1343)
 徐向阳 杜战峰 (1347)
 严伟 (1349)
 董巍 祝明波 张东兴 (1352)
 冉仕勇 任敏 沈震 (1355)
 丁雨亭 (1359)
 林伟成 (1362)
 吴鹏 (1366)
 王新军 智国平 戴非 申伯勇 王春艳 (1370)
 王波 赵振维 吴振森 王红光 (1373)
 吴志辉 (1377)
 李冬伍 李素珍 (1380)
 王志辉 康绍峰 李宁 张兴唐 (1385)

项目管理中资源冲突预警、分析和解决的初步研究	孙建英	于洪霖	(1388)
雷达升降机构力学特性实时仿真分析	李宜筠	刘继鹏	(1392)
相控阵天线关键件研制中的质量控制方法及应用		邢瑾琪	(1396)
碳纤维天线的材料设计及试验研究	薛伟锋	鞠金山	陈该青 (1399)
喷雾冷却现状及影响因素综述		杨静	(1402)
一种新的液晶相控阵组件扫描角度筛选方法	朱颖	孔令讲	杨建宇 张翠玉 (1406)
一种电磁传播中大气衰减的工程计算方法		韩向清	付林 (1411)
浅析敌我识别雷达的电子配件与维修系统		胥科	(1415)
某机动型气象雷达天线车总体结构设计		廖晓容	(1418)
一种新型的交流伺服控制技术		贺银平	(1421)
某型号批产总装及集成工艺优化设计		金锡钢	王健 (1425)
矩形有源相控阵天线的结构与电磁耦合建模与分析	王从思	李昕桢	张福顺 冯昕昱 (1429)

器的转接器、移相器、子阵内功率分配器、子阵外功率分配器、和差器、波控阵面驱动器、波控机及电源、阵面结构件、通风散热设备、天线罩、阵面结构件、通风散热设备等。

对于发射状态,天线的工作原理为:微波信号通过和差器的和路将微波信号分配给子阵外功率分配器后传给子阵内功率分配器,子阵内功率分配器再将能量传给移相器移相后经辐射单元辐射出去,在指定空域形成要求的波束对目标进行照射。接收状态天线的工作过程是发射状态的反过程。即:阵面辐射元收到的微波信号经过移相器移相后各路信号等相,各单元的微波信号再传给子阵内功率分配器,经过了阵内功率分配器后,每个子阵的微波信号合成为一路,再经过子阵外功率分配器后,每个象限合成一路,四个象限共四路。四路微波信号经过和差器后分别形成和波束、方位差波束及俯仰差波束。

2.2 天线设计

由于本天线是一部大型强迫馈电相控阵天线,在天线设计中的关键技术是低损耗的馈电网络、移相器及天线单元设计,为了保证天线的宽频带、高效率,天线的总体设计非常重要,本文设计的天线是一部高增益、宽频带、有限扫描相控阵天线,要求天线增益大于42dBi,两维相控电扫描,扫描范围为方位和俯仰均为 $\pm 10^\circ$,并具有发射通道、接收和通道、方位差通道、俯仰差通道。为了实现高增益和模块化设计,采用子阵式强迫馈电技术,即本天线为一部子阵式强迫馈电单脉冲相控阵天线。为了实现电扫描范围方位 $\pm 10^\circ$ 、俯仰 $\pm 10^\circ$,采用矩形栅格排列。为适于强迫馈电网络的设计和天线的低副瓣要求,天线阵面采用如图1所示的排列方式。

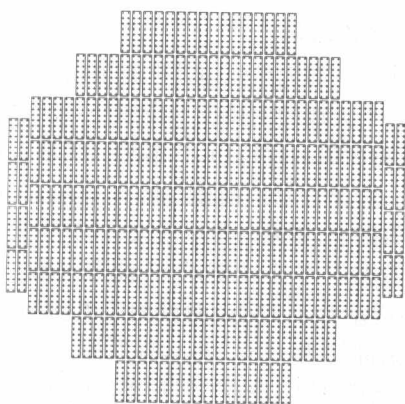


图1 天线阵面单元布置图

如图1所示,天线的移相器和天线单元以16个单元为一个组件,全阵共有256个移相器和辐射单元组件,即有4096辐射单元和移相器,通过强迫馈电网络

将微波功率由一路分为4096路,并给每个移相器和辐射单元馈电。

全阵分为64个子阵,每个象限有16个子阵,每个子阵有64个单元,子阵布置图如图2所示。

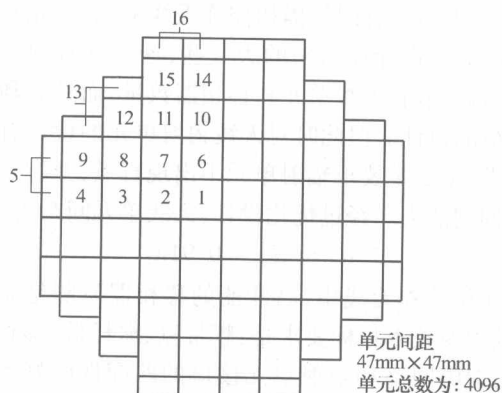


图2 天线子阵布置图

子阵内由魔T和分支波导形成一分64功率分配器,子阵外由魔T和定向耦合器组成馈电网络将微波功率分配到每个子阵上去。子阵个功率分配器采用等长度设计,全部采用波导及波导功率分配器,如图3所示。

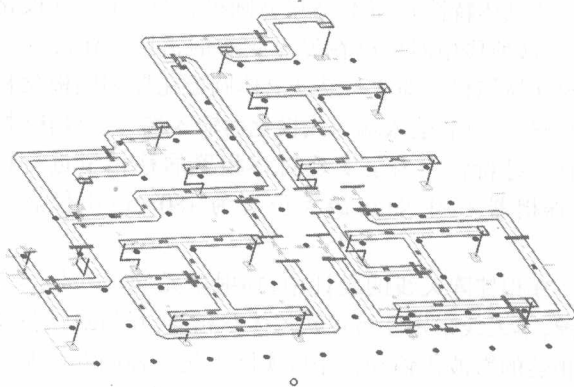


图3 子阵外功率分配器示意图

子阵外功率分配器将每个象限各子阵的功率合成为一路,四个象限共有四路,四路信号经过和差器的魔T相加或相减形成和波束、方位差波束和俯仰差波束。为了保证天线的瞬时宽频带特性,馈电网络采用等长度并馈电方式,从和波束入口到每个单元的馈线均为等长度设计。为了保证天线高效率,馈电网络必须实现低损耗,因此整个馈电网络全部采用波导和波导器件来实现。

本天线采用强迫馈电,扫描范围为方位 $\pm 10^\circ$ 、俯仰 $\pm 10^\circ$ 。为了适于强迫馈电,天线单元排列方式选为正方形栅格,选用正方形栅格馈电网络的设计比较容易实现,也便于馈电网络的安装。

本天线扫描范围为方位 $\pm 10^\circ$ 、俯仰 $\pm 10^\circ$,正方形

栅格排列在扫描范围内不出现栅瓣的单元间距为:

$$d_x = d_y = \frac{\lambda_h}{1 + \sin 10^\circ} = 0.852\lambda_h$$

以上公式是在 $\pm 90^\circ$ 空间内不出现栅瓣计算的单元间距,实际上对于有限扫描相控阵天线来说,单元间距可以比以上公式计算出来的大一些,这不仅有利于提高天线增益,节省天线单元和移相器数量,而且有利于馈电网络的设计。但此时对天线辐射单元的设计有较高的要求,主要是要求辐射单元不出现盲点,并有一定的栅瓣抑制能力。经过优化设计,天线单元间距为

$$d_x = d_y = 0.91\lambda_h$$

在相控阵天线中,高性能的移相器研制是非常关键,其主要技术指标要求是:频带宽、损耗低、移相精度高、与馈电网络和辐射单元接口的匹配性能好等。本天线采用强迫馈电,对于移相器的输入端仅适于线而线,而对空间辐射为可以采用圆极化或线极化,所以移相器需要设计成线极化输入,圆极化输出。在圆极化移相器上装一个圆极化器即可实现该微波网络要求。

根据移相器的性能要求,选择 Faraday 旋转式移相器,磁路形式采用闭锁方式。为了使移相器具有互易特性,圆极化器选用的是非互易圆极化器(四磁极磁化下的铁氧体特性),而不是互易圆极化器(介质圆极化器)。这种移相器可以在发左收右的雷达工作方式下实现互易相移。即非互易铁氧体圆极化器和圆极化移相器配合使用,输入端为线极化而输入端为圆极化时,具有互易特性。为了实现移相器的移相量进行控制,移相器采用四位,最大位态为 180° ,最小位态为 22.5° 。

在相控阵天线的设计中,辐射单元的设计是非常关键,本天线采用互易式铁氧体移相器,互易式铁氧体移相器的微波传输和移相段实际上是一种高介电常数的介质填充圆波导,本设计选用圆波导作为辐射单元,辐射单元与移相器之间的宽频带匹配非常重要,在设计中,除了要考虑天线单元的宽角宽频带匹配外,还要考虑天线单元的加工方便、安装方便,制造公差要求不要太苛刻等因素。本天线采用多级阶梯匹配圆波导辐射单元。辐射单元除了需要保证对空间匹配外,还要保证与移相器匹配,对于铁氧体移相器来说,对于输入端与输出端是高介电常数填充圆波导,移相器与辐射单元的接口匹配、辐射单元与自由空间匹配进行一体化设计,通过优化设计并用有限元分析软件进行分析得到天线辐射单元和接口尺寸。移相器和天线辐射单元在法向匹配在要求的范围内的驻波比如图 4 所示。

实际上,不同的扫描角自由空间的阻抗是不同的,若采用一般的辐射单元,当相控阵天线在出现栅瓣附近的扫描角对应的辐射阻抗变化大,而且容易出现盲

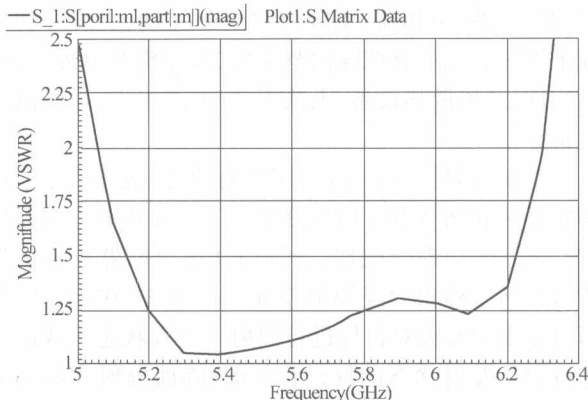


图4 单元与移相器和空间匹配驻波比曲线

点。本天线在辐射单元上采取特殊的措施,抑制了相控阵天线扫描时出现的谐振表面波,使相控阵天线比常规设计的相控阵天线扫描角加大了许多,未出现表面波,天线增益随扫描角下降比较缓慢,未出现盲点。

如上文所述,本天线为了实现低损耗的馈电网络,馈电波导和功率分配器均采用波导器件,由于天线单元间距小,要实现全部采用波导器件馈电,需要进行精心设计。馈电网络的关键是馈电网络与移相器的接口设计和最末级功率分配器的设计,它要求体积小结构紧凑,并且要求匹配性能好、结构简单等。在设计中,采用一种新型的插片式波导功率分配器及相应的与移相器匹配接口,在结构设计中,与阵面体一体化设计,匹配装置在阵面体直接生产。功分器和功分器与移相器的匹配接口一体化设计。这种匹配宽频带匹配器与移相器达到良好的匹配,巧妙地实现了波导型馈电网络与移相器的连接,实现了大型相控阵天线的全波导等长度强迫馈电。

3 理论分析与试验结果

3.1 理论分析结果

本天线为一部大型强迫馈电有限扫描精密跟踪相控阵天线。本天线的主要技术指标是:天线增益、副瓣电平、频带宽度(瞬时带宽)、扫描时天线增益随扫描角的变化等。对于有限扫描相控阵天线来说,在满足扫描要求的前提下,单元间距尽量大,以节省天线单元和移相器的数量。本天线要求:C波段、瞬时频带宽度10%,天线增益大于42dBi,二维相控电扫描,扫描范围为方位和俯仰均为 $\pm 10^\circ$,并具有发射通道、接收和通道、方位差通道、俯仰差通道经过优化设计,天线单元排列如图1所示,天线单元数为4096个,理论分析的和差方向图如图5所示天线典型和差方向图如图6所示。

天线增益是本天线的主要技术指标,按口面效率100%计算,本天线的增益为45.5,按50%的效率计算,天线增益可达到42.5dB。

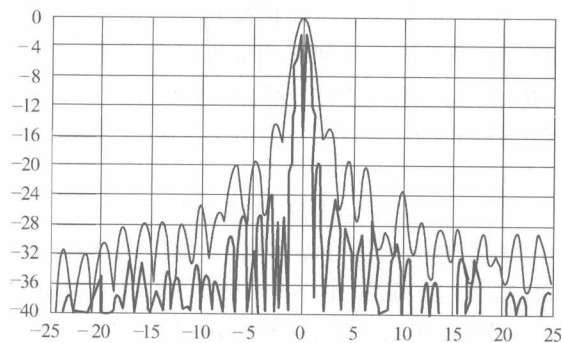


图5 本天线理论分析和差方向图

3.2 试验结果及分析

对于相控阵天线来说,主要的测试项目有:天线不扫描时的方向图测试,天线不同扫描角方向图的测试,天线增益测试,天线指向精度的测试,天线增益随扫描角变化的测试,天线输入电压驻波比测试等。

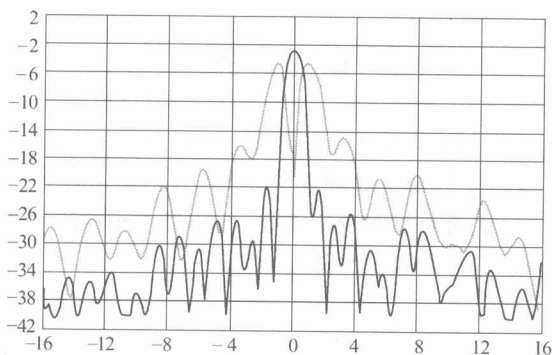


图6 天线典型和差方向图

对于本天线来说,天线增益是一项非常关键的技术指标,天线增益如表1所列。

表1 天线增益

频率	FL	F0	FH
增益(dBi)	42.6	42.4	42.1

其中 $FL = F0 - 250\text{MHz}$, $FH = F0 + 250\text{MHz}$, $F0$ 为中心频率,从测试结果表明,本天线的天线效率约为50%,在天线增益的测试中包括移相器损耗、单元损耗、馈电网络损耗等,不包括密封窗和天线罩损耗。由于本天线采用波导型低损耗强迫馈电,天线效率高,比一般的空馈相控阵天线来说,效率有较大的增加。在C波段,一般的空馈相控阵天线效率只有30%~40%。

对于相控阵天线来说,不同的扫描角,天线增益有一定的变化,随着扫描角的增大,天线增益一般要下降。天线中心频率增益随扫描角变化测试结果如表2所列。

表2 测试结果

扫描角(°)	0	10	12
增益变化(dB)	0	-0.4	-0.9
扫描角(°)	15	20	25
增益变化(dB)	-1.2	-2.3	-3.5

由于本天线是有限扫描相控阵天线,单元间距为 0.91λ 。指标要求最大扫描角为 $\pm 10^\circ$,从表2可知,天线扫描到 15° 时,增益下降仅有1.2B,扫描到 20° 时下降2.3dB,由此可见,本天线可以在 $\pm 20^\circ$ 的扫描空域内工作。如此优良的性能得益于采用了一种具有盲点抑制能力的辐射单元。此辐射单元效率高、匹配性能好、可以抑制盲点,使得天线单元间距约一个波长时,扫描范围可以达到 $\pm 25^\circ$,在扫描范围内不出现盲点。

对于大型强迫馈电相控阵天线来说,馈电网络非常复杂,要保证天线的高效率,天线的匹配性能非常关键,这包括辐射单元的匹配、馈电网络的匹配、移相器的匹配等。图7为天线不扫描时和通道输入电压驻波比,图8为天线扫描 0.5° 时和通道输入电压驻波比。从图中可见,不扫描时在要求的频带范围内输入电压驻波比小于1.8。扫描 0.5° 时在要求的频带范围内输入电压驻波比小于1.32。在大于 0.5° 的其它扫描角输入电压驻波比更小。从结果中可知,本天线的天线效率高的主要原因除了采用了低损耗的波导型馈电网络外,还有一个很重要的原因是天线包括馈线网络、移相器及天线辐射单元的匹配性能好。从结果中还发现扫描后输入电压驻波比的明显减小,这主要对于相控阵天线来说,在不扫描时,天线单元的反射在馈电网络中的叠加的,在也称为法向效应。对于强迫馈电或平面波空馈相控阵天线来说,这种现象是客观存在的,对于球面波空馈相控阵天线来说,阵面移相器和辐射单元的反射在馈源处是不聚焦的,因此球面波空馈相控阵天线不存在法向效应。在本天线增益随扫描角变化的测试中发射,在有些频率点,并不是不扫描时天线增益最高,而是有一定的扫描后天线增益较高,其中原因之一是法向效应的影响。

图7和图8中纵坐标为驻波比,横坐标为 Δf (MHz),即以中心频率为参考。

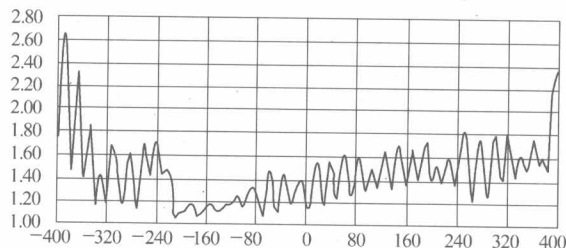


图7 天线不扫描时和通道输入电压驻波比

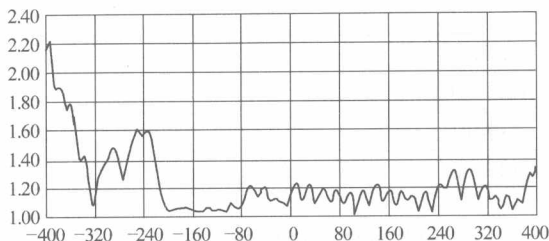


图8 扫描 0.5° 时和通道输入电压驻波比

4 小结

本文介绍了一部大型强迫馈电相控阵天线,其中包括天线的设计方案、设计结果和试验结果,通过本天线的研制发现:大型强迫馈电相控阵天线采用波导型馈电网络和精心匹配可以实现高效率,从天线的驻波比测试发现,天线扫描角为 0° 时驻波比比扫描角不为 0° 时明显大,这就是所谓的法线效应。本天线为有限扫描相控阵天线,在设计时单元间距为0.91个波长,设计时担心单元间距大,扫描性能难于满足要求,因若采用一般的波导单元,不仅会出现大的栅瓣,而且会出现盲点,在设计中采用一种具有盲点抑能力的天线单元,在扫描 $\pm 25^\circ$ 的范围内未出现盲点,而且天线在扫描到 $\pm 15^\circ$ 时增益下降为1.2dB。从试验结果中发现,扫描范围大大超过 $\pm 10^\circ$,而且扫描增益下降比预想的

要小。可见,对于有限扫描相控阵天线可以采用大单元间距,节省天线单元和移相器以降低成本。实际上作者在另一部有限扫描相控阵天线的设计中采用1.4个波长单元间距,实现了 $\pm 10^\circ$ 的扫描,天线增益下降仅有1dB。

天线采用等长度波导型并馈馈电网络,实现了4096个辐射单元全波导型馈电,此馈电网络损耗小于1.0dB,输入电压驻波比小于1.3,并实现了瞬时宽带10%。同时采用功分器、铁氧体移相器及辐射单元的一体化匹配设计技术,达到了馈电网络、移相器和辐射单元的良好匹配,实现了天线的高效率。

相控阵天线的研制是一项复杂的工程,有天线总体、馈电网络、移相器、波束控制系统和复杂的结构设计,还有复杂辛苦的试验,设计人员较多,不能一一列举,在此表示感谢。相控阵天线的研制涉及的设计内容较多,篇幅有限,只能将自己设计的一些经验作一些介绍,供大家参考,请批评指正。

作者简介

匡勇 男,1963年生,硕士,研究员,航天科工集团二院二十三所天馈研究室,研究方向是波导缝隙天线,宽角扫描相控阵天线,有源固态相控阵雷达天线,有限扫描相控阵天线等。

一种新型星载 SAR 宽带双极化微带天线阵的研究

李迎林 李建新

南京电子技术研究所天线与微波技术国家重点实验室, 南京, 210013

【摘要】本文首先提出了一种新型宽带双极化微带天线单元, 然后利用其组成了四元阵列, 计算结果显示由新型结构天线单元组成的阵列在带宽、隔离度和交叉极化电平性能上均具有优良特性, 尤其是交叉极化特性, 优于 -38dB , 具有重要的工程应用前景。

【关键词】微带天线阵; 星载 SAR; 宽带; 隔离度; 交叉极化

Study on a Novel Dual - polarized and Wide - band Microstrip Patch Antenna Array for SAR Applications

Li Ying - lin, Li Jian - xin

National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology

Research Institute of Electronics Technology of Nanjing, Nanjing 210013, China

【Abstract】In this paper, a novel broadband and dual - polarized microstrip antenna is presented firstly. Then a array containing four elements is composied by the novel element. By the results of emulation, we can see: the novel microstrip antenna array is very good in bandwidth, isolation between the two ports and pure polaration. Especially in pure polaration, the novel is better than -38dB , which has much important value in projects.

【Key words】microstrip antenna array; SAR located on satellite; bandwidth; isolation; cross - polaration

1 引言

目前, 随着各国对维护海洋权益、合理开发海洋资源、科学保护海洋环境的重视, 用于海洋目标监视、监测的兼备多极化、高分辨率和宽观测带的星载合成孔径雷达正在被越来越多的关注。

天线作为星载 SAR 的重要子系统, 对 SAR 的功能起着重要作用。因此, 具有大带宽、高隔离度、低交叉极化的微带天线阵列被广泛的研究。Pozar 在 1985 年首先提出口径耦合的馈电方式^[1], 其较同轴馈电和共面微带线馈电等其它馈电形式相比, 不仅能够获得较宽的带宽, 而且使天线单元和馈电网络分置, 从而减少了伪辐射, 这对于大型阵列是十分重要的^[5]。也正是这些优点, 使其在工程中得到了广泛的应用。关于辐射单元, 多采用层叠结构来满足工程中对带宽的需求。

基于上述背景, 本文对宽带双极化微带天线做了相关研究。首先提出了一种新型宽带双极化微带天线单元。其采用口径耦合馈电的形式, 辐射单元采用层叠结构, 主辐射贴片为正方形, 寄生辐射贴片采用圆

形。然后用新型单元组阵, 为了降低隔离度和交叉极化, 采用错位倒相的馈电形式。计算结果显示阵列在带宽、隔离度、交叉极化特性上性能优良, 极化纯度更突出, 优于 -38dB , 能够满足未来工程应用需求。

2 天线单元和阵列的设计

常见的层叠天线结构, 主辐射贴片和寄生辐射贴片形状相同尺寸略微不同^[2-4]。这里选用不同形状的主辐射贴片和寄生贴片。天线单元结构如图 1 所示, 把天线主体剖分为八层, 第一层和第四层分别为圆形寄生贴片和正方形主辐射贴片, 第二层、第三层、第五层、第七层为介质层, 第六层为接地面, 其上面开有两个正交的矩形孔径, 馈线通过孔径耦合能量, 从而激起两种正交模式, 实现垂直和水平极化工作状态。第八层为馈电层, 本文通过在开路线终端加可调枝接的方式, 使馈线、孔径、贴片达到良好的匹配。

考虑到带宽、表面波与介电常数、厚度的关系, 本文设计天线中第二层、第五层介质板选用 Duroid 5880, 第三层介质板选用泡沫, 第七层介质板选用陶瓷板。

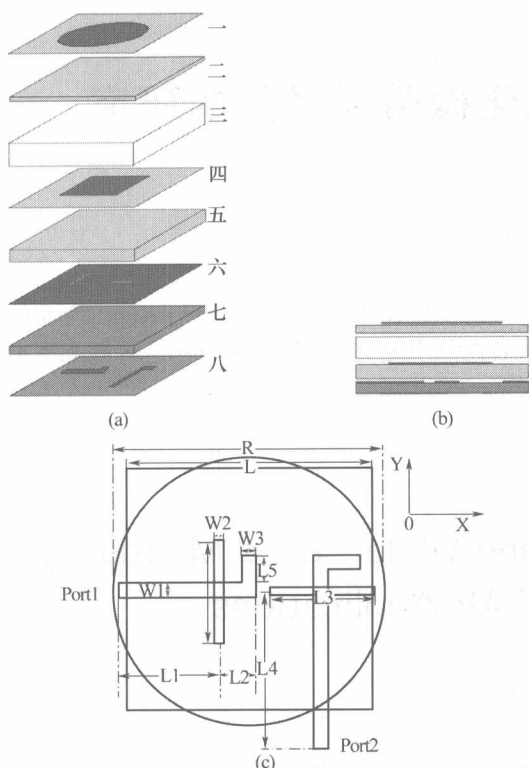


图1 天线单元结构示意图

(a) 天线三维图; (b) 天线侧视图; (c) 天线透视图。

然后,用新型单元组成了四元线阵。结构如图2所示,由于交叉极化和栅瓣抑制程度是单元间距的函数,这里选定单元间距为 0.82λ 。在馈电网络的设计中,水平极化端口采用了错位倒相馈电技术,相位差 0.5λ 不仅是为了抑制交叉极化,也是为了抵消从另一个端口进入并通过贴片的腔体而耦合到传输线的射频能力。这种抵消作用在贴片或者自由空间不会发生,但能在反相连接的微带传输线中发生。

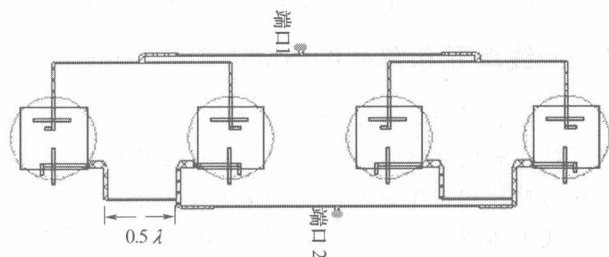


图2 四元阵列示意图

也正是这种相消作用使两端口之间的隔离度得以提高。垂直极化采用等幅同相并馈。端口1和端口2都采用标准 50Ω 馈电。

3 仿真及计算结果分析

本文选用 Designer 软件进行仿真。对于单元,可以理解为天线整体有三个谐振器,即两个贴片和口径

都有自己的阻抗环,窄阻抗环有谐振器间的弱耦合产生,宽环相应的有紧耦合或过耦合谐振产生。在仿真过程中,通过调节谐振器参数使阻抗环彼此接近。在优化设计时,应该特别强调贴片的尺寸,其处在整个耦合网络的中心,对上下两个谐振器都影响。对于两个孔径和馈线,我们先确定馈线和孔径的宽度,根据初始情况调节馈线开路端长度和孔径的位置、长度。软件优化后的天线结构参数为

$$\epsilon_1 = 2.2, \epsilon_2 = 1.08, \epsilon_3 = 2.2, \epsilon_4 = 4.2$$

$$h_1 = 0.254\text{mm}, h_2 = 4.8\text{mm}, h_3 = 1.524\text{mm}$$

$$h_4 = 0.508\text{mm}, w_1 = 1.9\text{mm}, w_2 = 1.1\text{mm}$$

$$L_3 = 10.4\text{mm}, L_4 = 13.5\text{mm}, R = 20.1\text{mm}$$

$$L_4 = 13.5\text{mm}, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, h_1, h_2, h_3, h_4$$

分别为第二层、第三层、第五层、第七层介质板的介电常数和厚度, $w_1, w_2, w_3, L_1, L_2, L_3, L_4$ 分别为馈线宽度、孔径宽度、开路枝节的宽度、孔径中心到端口1的距离、开路线长、孔径长度、孔径中心到端口2的距离, R 为圆形贴片直径。

对于阵列,主要是调节馈线网络,使其达到良好的匹配。在确定了单元间距之后,根据单元端口输入阻抗进行阻抗变换,使阵列两个端口最终都为 50Ω 输出。同时,为了减少馈线网络的损耗,在微带阻抗变换段与段之间的拐角采用了切角处理。

图3为双端口输入阻抗特性,图4为双端口驻波特性。中心频都为 5.45GHz ,相对于 5.4GHz ,有较小偏移。在 $\text{VSWR} < 2$ 时,端口1相对阻抗带宽达到 29.3% ,绝对带宽从 4.6GHz 到 6.18GHz ,端口2相对阻抗带宽达到 20.4% ,绝对带宽从 4.9GHz ~ 6GHz ,阵列实现了宽带特性。

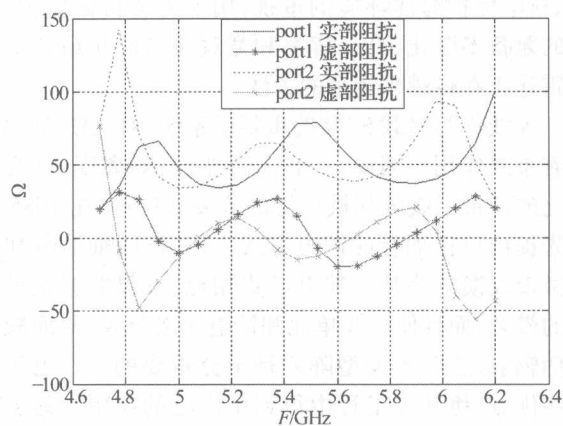


图3 双端口输入阻抗特性

图5为阵列双端口隔离度特性,在整个带内阵列双端口隔离度优于 -49.5dB ,在中心频处达到了 -53dB 。具有较高的隔离度。

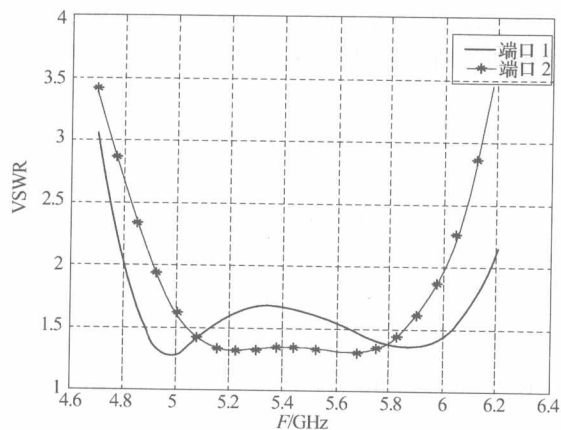


图 4 阵列双端口驻波特性

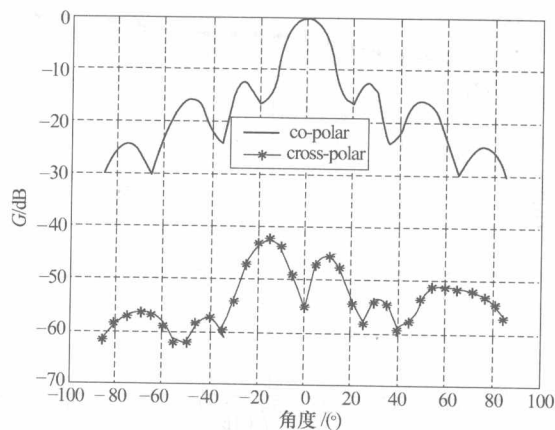


图 7 阵列 1 端口 H 面极化方向图

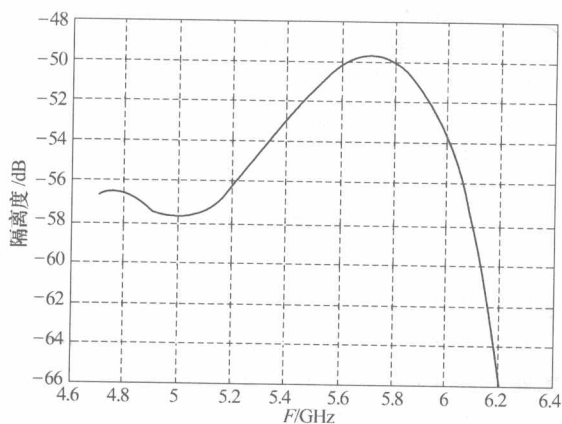


图 5 阵列隔离度特性

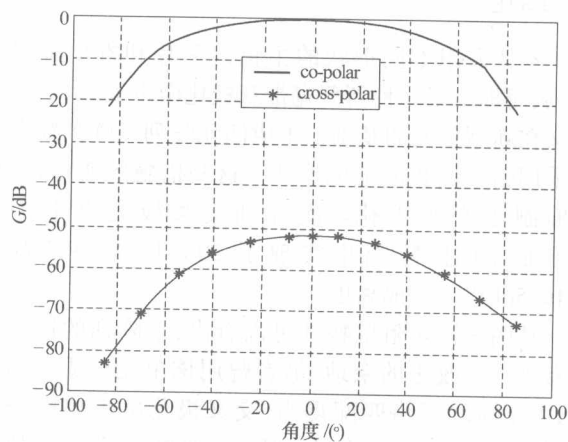


图 8 阵列 2 端口 E 面极化方向图

图 6 为阵列 1 端口 E 面极化方向图,在 $\pm 80^\circ$ 内优于 -38dB ,在最大辐射方向,即 0° 时达到了 -55dB 。

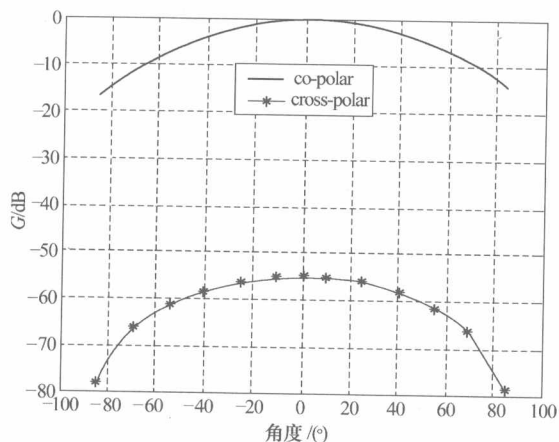


图 6 阵列 1 端口 E 面极化方向图

图 7 为阵列 1 端口 H 面极化方向图,在最大辐射方向达到 -55dB 。

图 8 为阵列 2 端口 E 面极化方向图,在 $\pm 80^\circ$ 内优于 -38dB ,在最大辐射方向达到 -52dB 。

图 9 为阵列 2 端口 H 面极化方向图,在最大辐射方向达到 -50dB 。

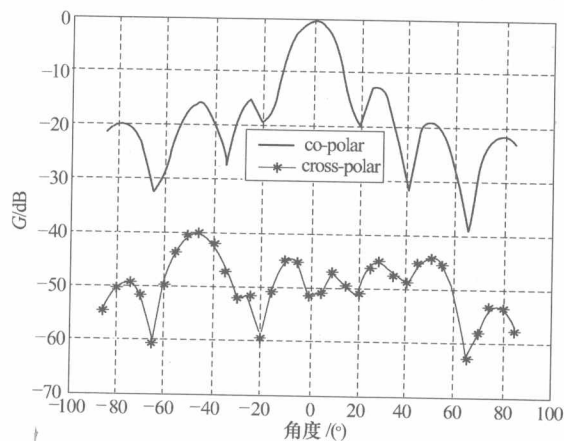


图 9 阵列 2 端口 H 面方向图

图 10 为阵列带内增益特性,阵列带内增益最低达到 12dB ,在中心频处达到 14.5dB ,中心频以上至 6.2GHz 接近 15dB ,可以看出阵列在整个带内增益较高。

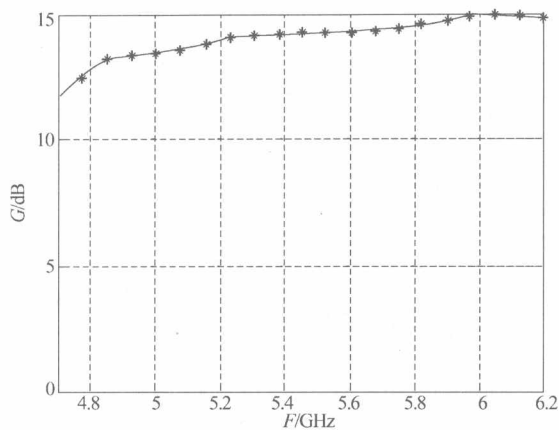


图10 阵列增益特性

4 结论

本文采用不同形状的主辐射贴片和寄生辐射贴片,从而提出了一种新型宽带双极化微带天线单元,然后在新型单元的基础上组成四元阵列。阵列馈电网络采用错位倒相的馈电形式。这些措施的实施,很好的抑制了交叉极化。使阵列交叉极化电平优于 -38dB 。同时,阵列也实现了20%以上的带宽和 -49.5dB 以上的隔离度。

从图3输入阻抗特性可以看出,该阵列的馈线网络有进一步改进的余地,笔者曾用该单元组成二元阵列,由于馈线网络匹配得当,交叉极化电平略次于单元,但明显好于四元阵列。对于天线单元,笔者也研究了正方形辐射贴片加载圆环寄生贴片、圆形辐射贴片加载圆环寄生贴片以及其它几种不同组合的天线单元形式。结果显示这些新型天线单元同样具有很好的辐射特性,具有组阵应用的广阔前景。

总之,该天线阵列整体性能较优,可以考虑组成更大规模的阵列,以满足未来星载SAR的工程需要。

参考文献

- [1] Pozar DM. A microstrip antenna aperture couple to a microstripline. [J]. Electros Letter, 1985, 21(2): 49-50.
- [2] L. Habib, Gkossias and A. Papiernik. Cross - Shaped patch with etched bars for dual polarisation. [J]. Electronics Letters, 1993, 29(10): 916-918.
- [3] K. Ghorbani and R. B. Waterhouse. Dual polarized wide - band aperture stacked patch antennas. [J]. IEEE Trans, 2004, 52(8): 2171-2174.
- [4] Tzung - Wern Chiou, Kin - Lu Wong. Broad - Band Dual - Polarized Single Microstrip Patch Antenna With High Isolation and Low Cross Polarization. [J]. IEEE Trans, 2002, 50(3): 399-401.
- [5] 信息产业部电子第十四研究所翻译. 微带天线设计手册. [M]. 南京:信息产业部电子第十四研究所出版, 2002.

作者简介

李迎林 男, 1984年生, 南京电子技术研究所电磁场与微波技术专业硕士研究生。

李建新 男, 1966年生, 研究员, 1986年厦门大学数学系毕业。现工作于南京电子技术研究所天线与微波技术国防科技重点实验室, 发表论文60余篇。研究方向为相控阵天线、自适应天线、赋形反射面天线等, 近年来主要研究方向为星载SAR天馈线系统。

几种薄膜天线单元形式的研究

于大群¹ 朱瑞平²

1. 南京电子技术研究所, 南京, 210013

2. 天线与微波技术国防科技重点实验室, 南京, 210013

【摘要】轻型可展开天线的研究对降低天线的存储体积、质量和成本有着重要的意义。本文对基于薄膜结构的轻型可展开天线单元形式进行了研究, 详细介绍了几种基本的单元形式, 包括印刷振子、贴片天线和缝隙天线, 并通过电磁仿真软件 HFSS 进行了仿真, 最后对这几种天线单元组阵后性能进行了比较。

【关键词】可展开天线; 薄膜结构; 微带贴片; 微带半波振子; 缝隙天线

Study of Several Elements of Thin - Membrane Antenna

Yu Da - qun¹, Zhu Rui - ping²

1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China

2. National Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Nanjing 210013, China

【Abstract】 The developed of lightweight deployable antenna is significant to reduce the mass, stowage and cost of spacecraft system for future. This paper is concerned with the study of several elements of thin - membrane antenna, including microstrip dipole, patch antenna and slot antenna. The element model of thin - membrane antenna is simulated by using the simulation software Ansoft HFSS. In the end, the performances of array, which are formed by these types of elements, are compared with each other.

【Key words】 deployable antenna; thin - membrane structure; microstrip patch; microstrip half - wave dipole; slot antenna

1 引言

具有高增益的大口径轻型可展开相控阵天线是用于未来天基预警雷达系统、星载 SAR 系统的一种新型相控阵天线, 这种天线的研究对降低天线的存储体积、质量和制造成本有着重要的意义。从 20 世纪 90 年代, 美国的 JPL 实验室就开始对轻型可展开天线进行深入的研究^[1-3]。

轻型可展开天线可以采用薄膜结构, 天线单元加工在柔性的薄膜介质材料上, 薄膜层和接地层之间是空气层, 薄膜层可以通过柔性展开机构将其展平。天线采用这种薄膜结构, 不仅可以大大减轻天线的质量, 而且天线可以实现可折叠, 达到了减小存储体积的目的, 本文所研究的轻型可展开天线单元就是采用薄膜结构。由于微带贴片天线和微带印刷振子具有体积小、质量轻和低剖面等优点, 本文中的轻型可展开天线单元主要采用这两种天线单元形式及微带线馈电的缝隙天线单元形式, 利用电磁仿真软件 HFSS 对各种天线单元及组阵进行仿真, 并对仿真结果进行了比较。

2 薄膜微带印刷振子形式

美国 JPL 实验室研究的可展开天线主要是采用反射面和微带贴片阵列形式, 本文提出了薄膜微带半波振子形式。薄膜微带半波振子是利用薄金属矩形窄条带加工在薄膜材料上实现的, 一般矩形条带的宽度小于 $0.05\lambda_0$ (λ_0 为自由空间的波长), 薄膜材料采用美国杜邦公司生产的 Kapton(聚酰亚胺), 厚度为 0.05mm, 介电常数为 3.4, 微带印刷半波振子采用耦合微带线中心馈电, 如图 1 所示, 薄膜层和接地层之间是空气层, 距离约为 $1/4\lambda_0$, 利用半波振子的长度近似为中心频率对应波长的一半来建立初模型, 通过略微减小半波振子的长度使天线谐振, 在 HFSS 中建立模型进行仿真优化, 仿真结果中的电压驻波比曲线如图 2 所示, 改变振子的宽度对振子的电压驻波比带宽也有影响, 振子愈宽, 带宽愈宽, 且谐振点向低频偏移^[4], 如图 2 所示。除了半波振子的形式外, 还可以采用折合半波振子的形式, 折合振子在阻抗方面是同类普通振子的 4 倍, 谐振时一样只具有实数输入阻抗, 且带宽特性要

好于同类普通半波振子^[4],如图2所示。虽然薄膜微带振子天线单元结构简单,带宽也较宽,但给这种天线单元馈电的耦合微带线网络的设计却比较复杂。

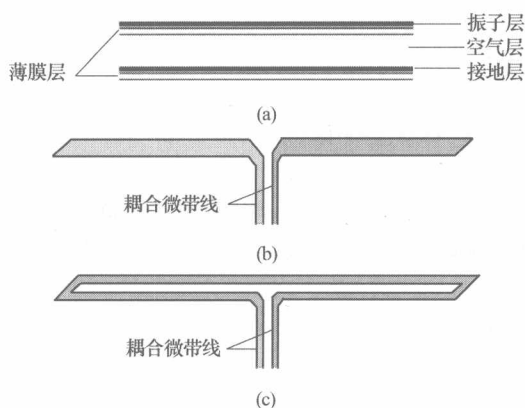


图1
(a) 侧面图; (b) 半波振子; (c) 折合振子。

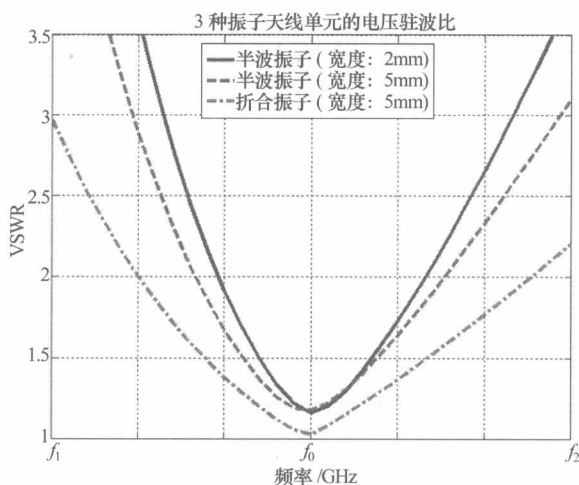


图2 三种振子电压驻波比曲线

3 薄膜微带天线单元形式

3.1 微带线共面馈电形式

微带线共面馈电形式结构简单,类似于第2节中介绍的薄膜半波振子的结构,振子层改为金属贴片和微带线层,且容易加工,模型也容易建立。采用特性阻抗为 100Ω 的微带线进行馈电。为了得到较大的驻波比带宽,将空气层的厚度加大到 1.3cm ,利用参考文献^[5]中矩形微带贴片天线设计公式可以得到贴片的初始边长,然后再用 HFSS 建立模型进行优化仿真,得到最终的模型,电压驻波比曲线如图5所示。从图5中可以看出,微带线共面馈电的薄膜微带贴片天线单元虽然结构简单,但是带宽只有 6.4% 左右,很多情况下并不能满足带宽要求。

3.2 口径耦合馈电形式

微带线口径耦合馈电方式最早由 Pozar 提出^[6],相比微带线共面馈电方式,带宽有了明显的改善,同时接地层屏蔽了馈电网络的寄生辐射,避免了馈电网络的辐射对天线辐射的影响。一般耦合口径都是处于贴片层的正下方,这样可以达到最大的耦合和对称的辐射特性^[5]。本文分别研究了3层薄膜和2层薄膜的口径耦合馈电天线单元,结构如图3(a)和(b)所示。

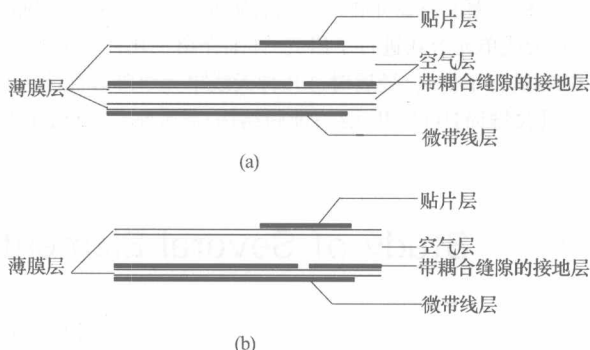


图3 口径耦合馈电天线单元

3层薄膜的口径耦合馈电天线单元的贴片层与接地层距离为 12.7mm ,微带线层与接地层距离为 3mm ,耦合口径采用矩形形状,然后调整贴片尺寸、口径尺寸及开路枝节长度,使输入阻抗实部的2个谐振峰相等,关于中心频率对称,输入阻抗虚部在中心频率经过零点,如图4所示,然后再对端口的输入阻抗进行归一化(端口归一化后的阻抗可经过阻抗变换网络变换到馈电网络上),可得到较大的电压驻波比带宽,如图5所示,带宽达到 12.8% 左右,类似方法可参考文献^[7]。改变耦合口径的形状,如“H”、“狗骨头”形状口径,可以增加耦合的强度,降低背面辐射,但对天线单元的驻波比带宽改善并不明显^[8]。

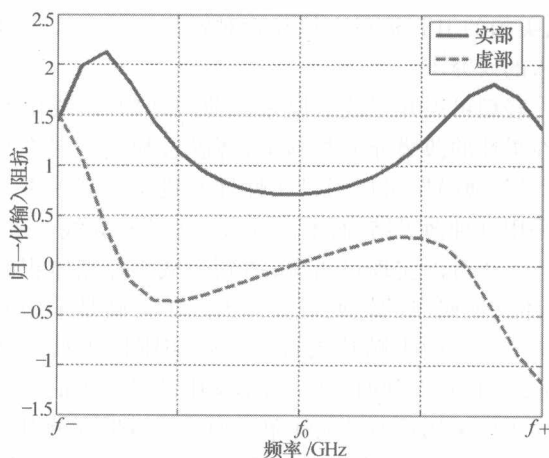


图4 口径耦合馈电单元输入阻抗(3层薄膜)