

一种宽频带复合天线设计

王亮¹, 赵东贺², 韩国栋²

- 中华通信系统有限责任公司 河北分公司, 石家庄 050081;
- 中国电子科技集团公司 第54研究所, 石家庄 050081)

摘要: 针对多系统载体天线数量多的问题, 提出了一种基于印刷偶极子结构的宽频带共口径复合天线设计方法; 通过两种不同形式的印刷偶极子进行共口径设计: 采用平面印刷偶极子结构完成宽带高增益线极化天线, 通过宽带定向耦合器实现了天线和差方向图辐射; 采用十字印刷偶极子实现低增益天线的圆极化辐射; 两种天线单元印刷在同一微波介质上, 通过优化天线单元布局, 相对位置关系和增加金属隔离环等措施, 降低天线之间的相互影响, 实现共口径复合天线性能满足工程应用要求; 加工了天线样机, 测试结果表明线极化天线在工作频带 1.2~1.8 GHz 范围内和差通道电压驻波比小于 1.8, 和通道增益大于 13.5 dBi, 方位差波束零值深度小于 -25 dB, 圆极化天线在工作频带 1.2~1.8 GHz 范围内电压驻波比小于 1.6, 增益大于 6.5 dBi, 轴比小于 2.5 dB, 与计算结果基本一致; 复合天线可以满足多种无线通信系统的需求, 减少了天线数量, 有效节省载体平台空间, 同时具有结构简单紧凑、剖面低、易于工程实现等特点, 具有广阔的应用前景。

关键词: 复合天线; 共口径; 印刷偶极子; 定向耦合器

Design of A Wideband Compound Antenna

WANG Liang¹, ZHAO Donghe², HAN Guodong²

- Hebei Branch, China Communications System Co., Ltd., Shijiazhuang 050081, China;
- The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: To address the challenge of accommodating a large number of multi-system carrier antennas, a wideband shared aperture compound antenna based on printed dipole structure is proposed. The shared aperture design incorporates two distinct forms of printed dipoles. A planar printed dipole structure is used to achieve for the wideband high-gain linear polarization antenna, a wideband directional coupler for the sum-difference pattern radiation, and a cross dipole low-gain antenna for the circular polarization radiation. These antenna elements are printed on the same microwave dielectric substrate, and the mutual interference between them is mitigated through the techniques including the antenna unit layout optimization, relative positioning, and isolation rings. The performance of common aperture composite antennas is achieved to meet the needs of engineering application, and process an antenna prototype. The test results show that the VSWR is less than 1.8, the gain is greater than 13.5 dBi, the azimuth difference beam zero depth is less than -25 dB of the linear polarized antenna in the range of 1.2~1.8 GHz; and the VSWR is less than 1.6, the gain is more than 6.5 dBi, the axial ratio is less than 2.5 dB of the circularly polarized antenna in the range of 1.2~1.8 GHz, the test results are basically consistent with the calculation results. The proposed design can meet the requirements of various wireless communication systems by reducing the number of antennas, thereby effectively saving space on the carrier platform. The compound antenna has broad application prospects, thanks to its simple and compact structure, low profile, and ease of engineering implementation.

Keywords: compound antenna; common aperture; printed dipole; directional coupler

0 引言

从赫兹实验室内建立第一个天线系统开始, 人类进入了无线通信时代。经过一百多年的发展, 无线通信在社会生活中的作用越来越大, 已成为当今社会不可或缺的组成部分。天线作为无线通信系统中唯一具备与空间进行能量交互的装置, 实现射频导波信号和空间电磁波信号的相互转换, 是无线通信系统的重要组成部分^[1]。天线同时具备对能量进行空间配给的作用, 通过天线的辐射方向图特点, 实现对特定区域进行无线传输。随着移动通信、广播电视、卫星通信、导航、微波遥感以及射电天文等民用、军用领

域的无线通信系统应用越来越广泛, 无线通信技术得到了快速发展^[2]。现代无线通信系统多为基于载体平台的多种无线系统共存的综合系统, 以实现复杂的功能性能。当多个体制的无线系统共存时, 不同的系统使用不同的工作频段, 所以需要在载体上配置大量覆盖不同频段和不同辐射特性的天线。通常载体上可用于天线配置的空间非常有限, 只有少数特定的区域用于布置天线, 这样会造成天线间相互耦合、遮挡、干扰严重, 限制了系统性能的提升^[3]。为解决这一问题, 技术人员在超宽带天线、多频带天线以及复合天线等进行了大量的研究。共口径天线^[4-6]因其可以在固

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-09-13。

基金项目: 河北省高层次人才资助项目(A202101005)。

作者简介: 王亮(1982-), 男, 高级工程师。

引用格式: 王亮, 赵东贺, 韩国栋. 一种宽频带复合天线设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 273-279.

定孔径内复合多个天线,满足多个系统使用,极大地提高了天线辐射口面的利用率,同时可以有效减小天线体积,逐渐成为了研究热点。

复合天线是指在固定空间内将多种不同频段,极化、增益的天线形式集成组合的一种天线。共口径天线是一类特殊的复合天线。共口径天线是指将多种天线设计在同一口径上的复合天线。通过优化多种天线形式、结构、相互关系以及结构复用,实现在同一辐射孔径内满足多个系统天线的使用需求。共口径天线的组成包括微带天线、振子天线、缝隙天线、螺旋天线、喇叭天线等全向、定向天线单元。在设计时需注意降低各天线之间的耦合、遮挡等相互影响,在性能上满足系统要求。常见的共口径天线主要包括 3 种形式。第一种是在大尺寸天线单元或者阵列的局部空间配置另外的不同类型的小尺寸天线^[7]。这种设计中,不同频段天线的频率比通常较大,天线单元物理尺寸相差很大。由于尺寸的悬殊,空间布局合理,不同天线之间的影响几乎可以忽略不计,易于实现共口径的目的。第二种选择合适的低频天线单元和高频天线单元进行组合,采用分散放置^[8]、层叠放置以及结构复用^[9-10]等组合方式,可以消除不同频段天线单元之间的遮挡影响。这种形式的共口径天线结构比较紧凑,利于低剖面设计,大大提高了天线的空间利用率。第三类共口径天线是通过引入具有带通或带阻特性电磁超材料来降低不同频段天线之间的相互遮挡,实现天线的共口径设计^[11-12]。电磁超材料技术的发展给天线设计提供了新的方向。利用电磁超材料的带通或带阻特性实现天线的频率选择和相位调整,使得高频电磁波能够穿过上层的低频天线能够正常辐射,降低天线之间的相互遮挡,实现了天线的共口径设计。共口径天线结构紧凑,符合天线小型化的发展趋势,而巧妙地设计甚至可以提高电性能。

为解决复杂无线通信系统的天线数量多的问题,本文提出了一种低剖面宽频带共口径复合天线的设计方式。天线主体为高增益线极化单脉冲天线,天线单元采用宽带异面印刷振子形式。阵列分为左右两部分,通过定向耦合器实现天线的和、差方向图辐射。在单高增益线天线中间设置有印刷振子结构的低增益圆极化天线,频率覆盖 GPS、北斗、海事卫星等卫星通信频段。两种振子印刷在同一微波介质板上。为了验证天线设计的正确性,加工了天线样机。测试结果表明线极化天线在工作频带 1.2~1.8 GHz 范围内和差通道电压驻波比小于 1.8,和通道增益大于 13.5 dBi,方位差波束零值深度小于 -25 dB,圆极化天线在工作频带 1.2~1.8 GHz 范围内电压驻波比小于 1.6,增益大于 6.5 dBi,轴比小于 2.5 dB,与设计结果基本吻合,满足工程应用要求。该共口径天线具有结构紧凑、体积小、剖面低的特点;同时有效减少了系统天线数量,降低了系统设备复杂度。

1 复合天线设计与分析

1.1 复合天线结构

复合天线结构如图 1 所示,天线由天线罩、辐射层和

金属反射地板组成,天线罩选用介质天线罩,材料为玻璃钢,厚度为 1 mm。天线辐射层为 1 mm 厚度的双面微波介质板,介质材料为聚四氟乙烯,介电常数为 2.55。高增益线极化天线的辐射单元和馈电网络刻蚀辐射层上下表面上,辐射单元采用单侧切角的矩形异面印刷偶极子,上下表面辐射单元为互补结构。馈电网络为 T 型宽带渐变线结构匹配合成网络,网络的合成端为平行双线转微带线的转换结构。辐射层中心位置刻蚀有十字交叉振子结构的宽带圆极化天线。复合天线最下层为金属反射地板,地板下表面装有宽带和差网络和宽带 90°电桥,通过射频电缆与辐射层连接。宽带和差网络采用带反相器结构的环装电桥,这种形式具有带宽宽、相位稳定的优点,满足高增益线极化天线实现和差方向图的幅度相位要求。宽带 90°电桥采用 0.25 波长带状线定向耦合器结构形式,为十字交叉振子提供幅度相等、相位差为 90°馈电信号,实现天线的圆极化辐射。

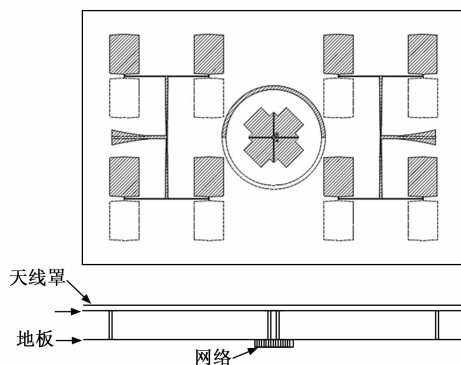


图 1 天线结构示意图

1.2 线极化天线设计

线极化天线为单脉冲跟踪系统天线。单脉冲跟踪是跟踪移动目标常用的跟踪体制,通过单脉冲天线同时产生和差波束,用独立的接收支路同时接收回波信号,通过比较回波信号幅相特征,实现目标跟踪^[13]。单脉冲天线通常由天线和和差网络组成。根据天线低剖面、共口径的使用需求,线极化天线采用平面印刷振子作为天线阵列单元,通过宽带 180°定向耦合器实现天线和差波束输出。

平面印刷振子是一种印刷在微波介质板上的偶极子天线,天线单元的辐射结构是一对具有一定宽度的偶极子,分别印刷在介质基板表面^[14],可以为共面结构,也可以为异面结构。图 2 为线极化天线示意图,天线的印刷振子单元为异面互补结构,两个振子分别印刷在介质板上下表面,印刷振子为矩形结构,通过异面平行双线实现振子的平衡馈电,采用异面平行双线结构也有利于天线单元与合成网络的集成设计。介质基板材料选择为聚四氟乙烯,介电常数为 2.55,基板厚度为 1 mm。天线尺寸如图 2 所示,振子长度为 l ,振子宽度为 w ,振子间距为 d_1 ,在振子的馈电一侧引入宽度为 cw_1 切角,改变振子与馈线之间的缝隙,实现容性加载,改善天线的阻抗特性。天线阵列规模为 2×4 ,单元方位、俯仰间距分别为 d_x 和 d_y 。设计了宽带 T 型渐

变线等分合成网络适应天线的带宽特性, 与多级四分之一波长 T 型公分网络相比, 渐变线阻抗变换结构具有更平坦的频率响应和更小的尺寸。

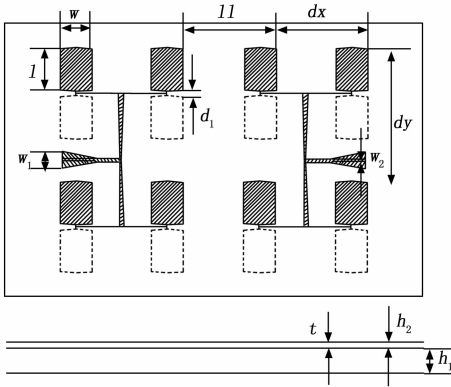


图2 线天线示意图

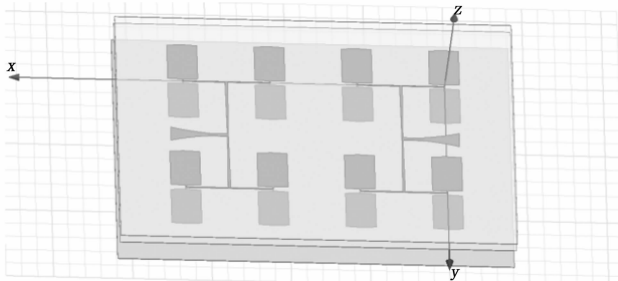


图3 线天线模型示意图

由于平行双线的结构无法与同轴结构直接匹配连接, 设计了平衡-不平衡转换器, 实现天线由平行双线馈电结构转换成微带线馈电结构。平衡-不平衡转换器的线宽分别为 w_1 和 w_2 。印刷振子层与下方金属反射板距离为 h_1 , 与上方天线罩距离为 h_2 , 天线模型示意图如图 3 所示。对线极化天线进行了仿真分析, 获得较佳电特性的单元天线参数, 尺寸如下: $l = 50 \text{ mm}$, $w = 38 \text{ mm}$, $d_1 = 4 \text{ mm}$, $cw_1 = 1.1 \text{ mm}$, $dx = 130 \text{ mm}$, $dy = 160 \text{ mm}$, $w_1 = 20 \text{ mm}$, $w_2 = 2.7 \text{ mm}$, $h_1 = 38 \text{ mm}$, $h_2 = 5 \text{ mm}$, 天线具有良好的宽带阻抗特性。

和差网络是单脉冲阵列天线关键组成部分。和差网络能够同时将分路信号进行相加和相减, 形成和差信号, 其阻抗带宽和幅相一致性会直接影响单脉冲天线的跟踪性能。环形电桥是一种 180° 混合环, 是最典型的和差网络, 通常由 1.5λ TEM 传输线 (微带线、带状线) 并联连接的环状混合网络^[15], 具体由一段 $3 \lambda/4$ 和三段 $1 \lambda/4$ 的传输线组成。当信号从和端口输入时, 差端口无信号输出, 是隔离端口, 在 1 分路端口和 2 分路端口输出的信号幅度相等, 相位相等, 同理可得到当信号从差端口输入时, 和端口无信号输出, 是隔离端口, 在 1 分路端口和 2 分路端口输出的信号幅度相等, 相位相差 180° 。由于经典环形电桥带宽较窄, 无法满足宽带天线使用要求。为解决这一问题, 使用反相

器结构代替环形电桥的 $3 \lambda/4$ 传输线, 可以有效展宽电桥的带宽。根据这一理论, 设计了基于平行双线结构的反相器^[16-17], 利用平面双线结构易于极性互换的特点, 通过平行双线基板上传输线通过金属孔化与基板背面输出端的平行带状线连接, 平行双线的下面传输线通过过孔与输入端的地相连接, 从而完成极性转换, 产生 180° 相位。宽带和差网络结构如图 4 所示。介质基板材料选择为聚四氟乙烯, 介电常数为 2.2, 基板厚度为 1 mm。通过计算和优化设计, 各结构尺寸参数为 $L_1 = 31.5 \text{ mm}$, $L_2 = 7.5 \text{ mm}$, $L_3 = 2.5 \text{ mm}$, $L_4 = 7.5 \text{ mm}$, $L_5 = 2 \text{ mm}$, $L_6 = 4 \text{ mm}$, $L_7 = 4 \text{ mm}$, $W_1 = 1.4 \text{ mm}$, $W_2 = 0.7 \text{ mm}$, $W_3 = 0.9 \text{ mm}$, $W_4 = 0.25 \text{ mm}$, $W_5 = 2.5 \text{ mm}$, $W_6 = 7.2 \text{ mm}$, $jw_1 = 1.2 \text{ mm}$, $jw_2 = 0.75 \text{ mm}$, 和差器在工作频段范围内实现良好的传输特性。

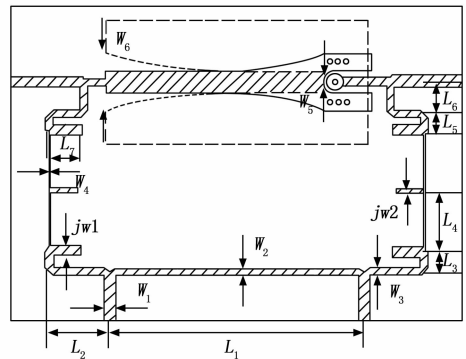


图4 和差网络结构示意图

和差器设计完成后, 与印刷振子阵列天线进行整体优化设计, 仿真结果如图 5~6 所示, 由仿真结果可知, 由于和差网络的影响, 线极化天线的电压驻波比略有变化。由天线方向图仿真结果可知, 天线和差方向图满足单脉冲跟踪要求。

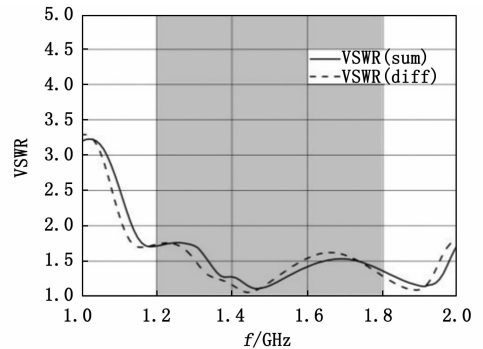


图5 天线电压驻波比驻波比仿真结果

1.3 圆极化天线设计

目前的卫星导航系统主要包括美国全球定位系统 GPS、俄罗斯全球卫星导航系统 GLONASS、欧洲伽利略 GALILEO 卫星导航系统和中国北斗卫星导航系统 BDS^[18], 各个系统各有优势。随着导航技术的发展, 同时具备多个导航系统数据接收能力的导航终端在应用中的优势愈加明显。

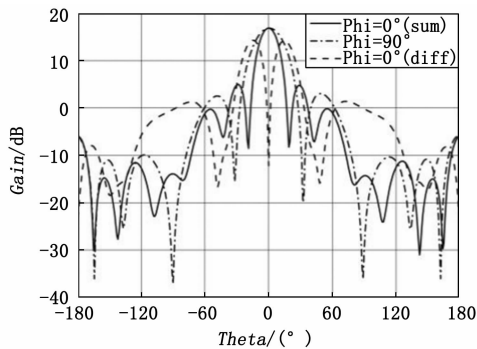


图 6 线天线和差方向图仿真结果

这就对导航天线的宽频带的特性提出了更高的要求。而据资料显示,卫星导航系统的工作频率集中在 1.2~1.8 GHz 频段范围内,因此研究宽频带圆极化天线的对导航系统具有重要意义。常规的圆极化天线形式包括微带天线、螺旋天线和十字振子天线等形式,微带天线剖面低,但带宽较窄,无法满足宽带使用要求;螺旋天线包括轴向螺旋和多臂螺旋,具有良好的圆极化辐射特性和较宽的带宽特性,但天线多为立体结构,剖面高度高;十字交叉振子天线结构简单,剖面中等,能形成优良的圆极化辐射。由于复合天线需要共口径设计,考虑线极化天线的结构特点,选用平面印刷十字交叉振子作为圆极化天线的实现方式。圆极化天线的辐射单元采用两对异形正交平面印刷振子,使用一对同轴线对印刷振子进行馈电,同轴线的内、外导体分别于相对的辐射单元连接,通过宽带圆极化电桥对两组正交振子馈电,实现天线的圆极化辐射。辐射单元利用金属反射地板,实现天线的定向辐射。天线的结构和模型示意图如图 7 所示,辐射单元的尺寸为偶极振子总长度 $YL_1=86$ mm,振子长度尺寸 $YL_2=19.8$ mm, $YL_3=40.8$ mm,振子宽度 $Yw_1=32$ mm, $Yw_2=45$ mm,相邻振子间隙 $dd=1.5$ mm,振子距离金属反射板的高度 $h_1=38.5$ mm,天线罩子与辐射层之间距离 $h_2=5$ mm,印制板厚度为 1 mm 聚四氟乙烯板材,介电常数为 2.55。

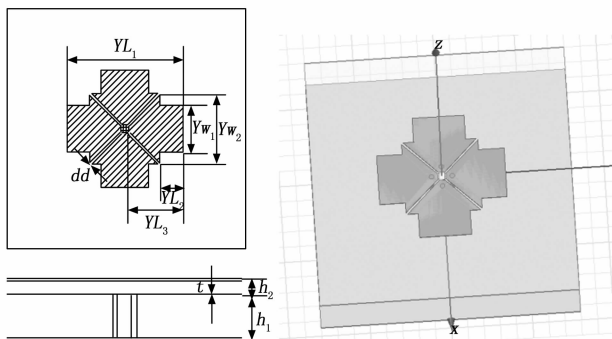


图 7 圆极化天线示意图

圆极化天线通过 90° 圆极化电桥为正交的振子辐射单元馈电,实现天线形成左、右旋圆极化辐射。 90° 电桥^[19-20]是一种四端口网络,在射频电路中起着功率分配和产生 90° 相

位差的作用。根据天线的工作带宽,采用长度为 $1\lambda/4$ 的带状线耦合器结构实现所需 90° 电桥的设计。电桥结构示意图如图 8 所示,信号由端口 1 输入时,端口 2 为隔离端口,端口 3 为耦合端口,端口 4 为直通端口,端口 3 与端口 4 之间相位差为 90° 。与其他电桥相比,带状线耦合器直通端和耦合端在同一侧,方便外部连接。带状线耦合器由四层金属涂层组成,从下往上依次是:下接地板、下金属带线层、上金属带线层和上接地板,接地板与金属带线层距离为 2 mm,金属带线层间距离为 0.381 mm,金属带线层重和部分宽度为 $Yw_3=1.4$ mm,长度为 $YL_3=32$ mm,4 个输出端宽为 $W_2=3.3$ mm。金属涂层之间填充有介质,所有填充介质材料相同。

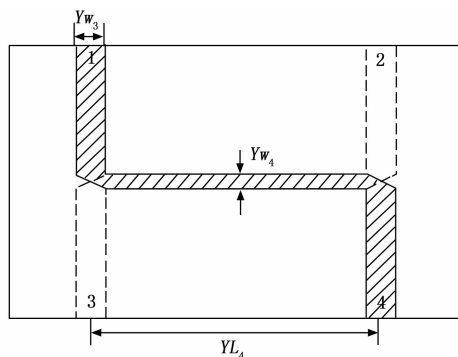


图 8 圆极化电桥结构图

在实际设计中可以通过调节上下金属带线的重叠部分的尺寸来调节耦合度和相位。耦合器外侧为密闭金属腔体,防止耦合器信号泄露并增加耦合器的结构强度。如图 8 所示为 90° 电桥结构示意图,带状线耦合器介质材料为聚四氟乙烯,介电常数为 2.55。对圆极化电桥进行优化设计,电桥在工作带宽内的幅度相位传输特性满足使用要求。完成十字印刷振子天线和圆极化电桥的初步设计后,对圆极化天线的整体性能进行了仿真设计,图 9 给出圆极化天线在 1.2~1.8 GHz 的工作频率范围内天线 VSWR 仿真结果,从仿真结果可知,天线宽带阻抗特性良好。

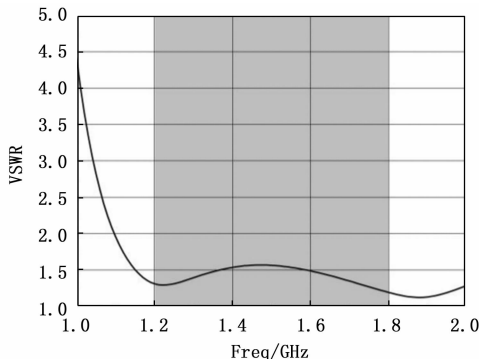


图 9 圆极化天线电压驻波比仿真结果

1.4 共口径天线设计与分析

基于以上两种天线设计结果,设计一种结构紧凑共口径复合天线,天线整体包括三层板状结构,上层为 1 mm 厚

玻璃钢天线罩, 圆极化天线的平面印刷十字交叉振子与线极化天线辐射贴片刻蚀在中间层微波介质板上, 十字正交振子设置在线极化天线中间。最下层为金属反射板。对共口径天线进行整体仿真计算, 复合天线模型示意图如图 10 所示, 仿真结果如图 11~12 所示。由图 11 可知, 单脉冲天线和圆极化天线共口径设计后, 由于两个天线之间相互耦合作用, 对圆极化天线的轴比特性影响较大, 恶化严重。通过分析, 影响天线轴比的因素主要为两个天线之间的距离和圆极化天线与单脉冲天线之间的相对位置关系。根据这两个主要因素对共口径天线进行了优化设计, 改进措施主要包括增加天线距离、改变天线的相对位置关系和在两天线之间增加隔离措施。受天线物理尺寸和阵列间距的限制, 单脉冲天线和圆极化天线之间距离只能有限增加, 无法满足距离要求, 在此基础上, 对单脉冲天线阵列采用 Y 轴方向非均匀布阵方式, 进一步增大两个天线之间的距离; 同时通过旋转圆极化天线结构, 使圆极化天线的振子方向成 45° 夹角放置; 并在圆极化天线与测控天线之间增加圆环状金属隔离结构, 改善圆极化天线的电流分布。通过以上措施, 优化复合天线的相关参数, 最终在在参数 $dx = 110 \text{ mm}$, $dy = 160 \text{ mm}$, $l = 160 \text{ mm}$, $gr = 130 \text{ mm}$ 时, 圆极化天线轴比在工作带宽内小于 2.5 dB , 满足工程使用要求。圆极化天线方向图如图 12 所示, 由于天线之间的耦合作用, 圆极化天线方向图产生一定变形, 方向图变成平顶形状, 天线最大增益略有降低, 3 dB 波束宽度变宽, 同时由于地板的反射作用, 天线的前后比得到改善。

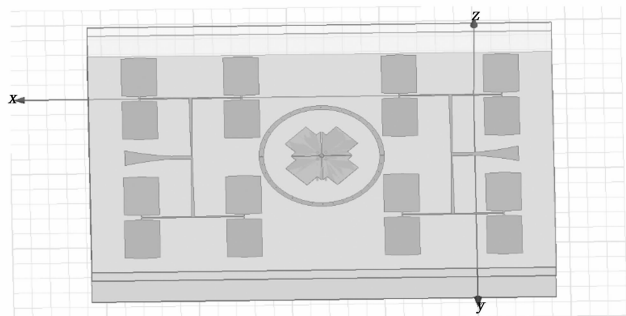


图 10 天线模型示意图

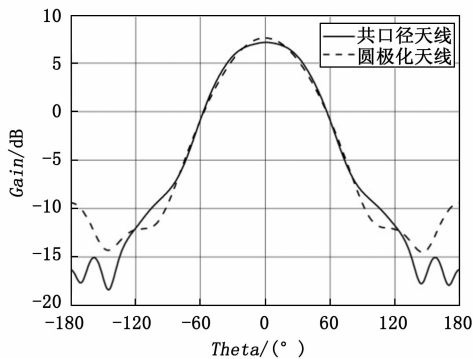


图 11 圆极化天线方向图仿真结果

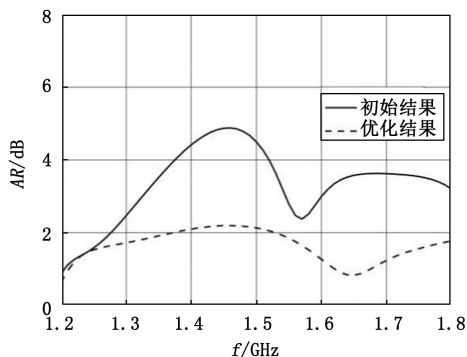


图 12 圆极化天线轴比设计结果

2 测试结果与分析

根据计算设计结果, 加工制作了共口径复合天线样机, 天线罩采 1 mm 厚玻璃钢材质; 采用微波介质板加工制作了辐射层, 圆极化天线振子内侧有金属过孔。为增加共口径天线的环境耐受性, 对介质层的金属涂层进行了表面沉锡工艺处理, 该工艺既可以提高印刷电路的可焊性, 同时又能对金属层起到防氧化、腐蚀的作用。结构件加工完成后, 对共口径天线进行了装配, 和差器和圆极化器通过射频电缆与共口径天线连载在一起。天线样机照片如图 13 所示。采用 Agilent E5071C 矢量网络分析仪和天线自动测试系统在微波暗室中对天线样机的电性能进行了测试, 分别测试电压驻波比、增益方向图和轴比等特性。

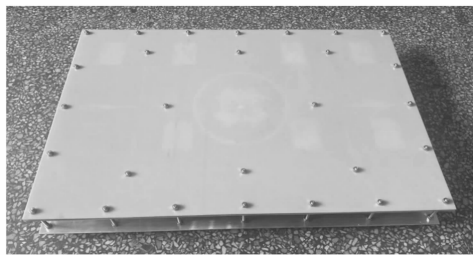


图 13 天线样机照片

高增益线极化天线测试结果如图 16~17 所示。图 14 给出高增益线极化天线的合口和差口电压驻波比计算与测试结果, 其中实线为计算结果, 虚线为测试结果。由仿真结果可知, 计算结果和实测结果两条曲线的趋势基本相似, 天线在 $1.2 \sim 1.8 \text{ GHz}$ 频带范围内电压驻波比均小于 1.8 , 在工作带宽内阻抗特性良好。图 15 给出了天线在中心频率的何口和差口测试方向图。由测试结果可知, 天线的和方向图副瓣由于共口径适应设计略有变差, 天线差方向图方面差波束零值深度小于 -27 dB , 满足单脉冲天线方向图要求。圆极化天线测试结果如图 16~20 所示。图 16 给出圆极化天线的电压驻波比计算与测试结果。由图可知, 计算结果和实测结果两条曲线的趋势基本相似, 天线在 $1.2 \sim 1.8 \text{ GHz}$ 频带范围内电压驻波比均小于 1.6 , 在工作带宽内具有良好阻抗特性。图 17 和图 28 给出了天线在中心频率的方向图和轴比测试结果。由测试结果可知, 天线的仿真和

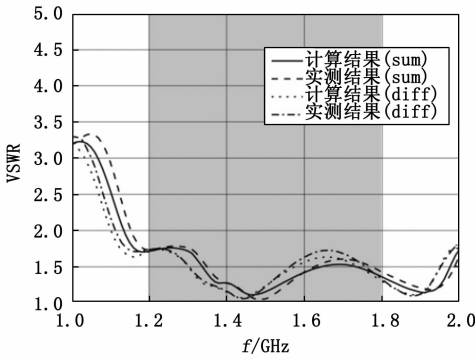


图 14 线极化天线电压驻波比实测与仿真结果

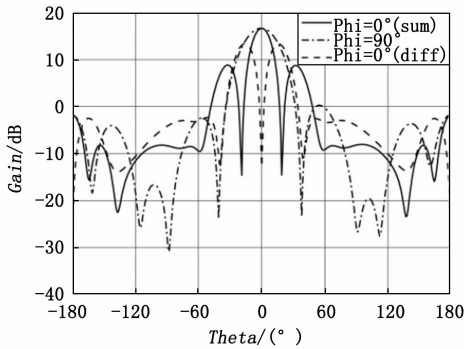


图 15 线极化天线测试方向图

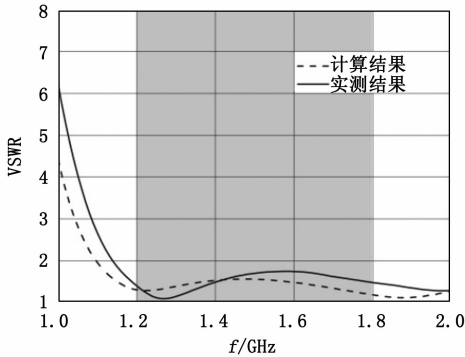


图 16 圆极化天线电压驻波比实测与仿真

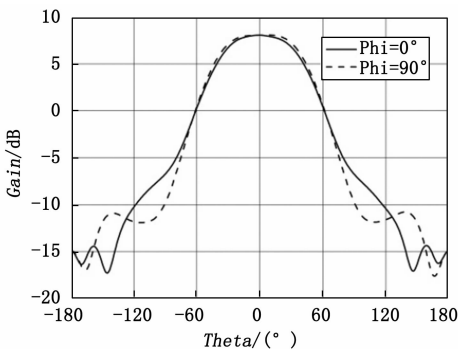


图 17 圆极化天线增益测试方向图

实测结果基本一致。图 19 给出了复合天线的两种天线的增益的测试结果。由测试结果可知，高增益线极化天线在工作带宽内增益 > 13.5 dB，宽带圆极化天线在工作带宽内增

益 > 6.5 dB，两种天线具有良好的宽带辐射特性。图 20 给出了宽带圆极化天线的轴比的测试结果，由测试结果可知，在工作带宽内天线轴比小于 2.5 dB，具有良好的圆极化辐射特性。

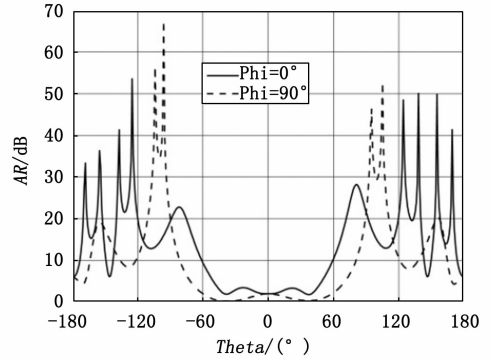


图 18 圆极化天线轴比测试结果

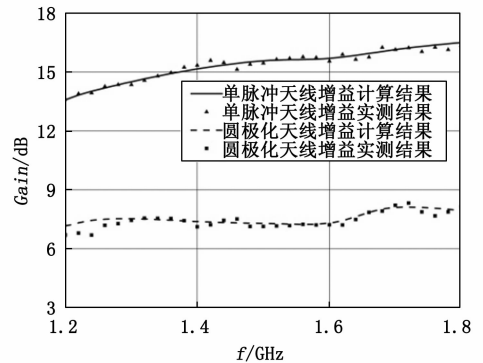


图 19 复合天线增益实测与计算结果

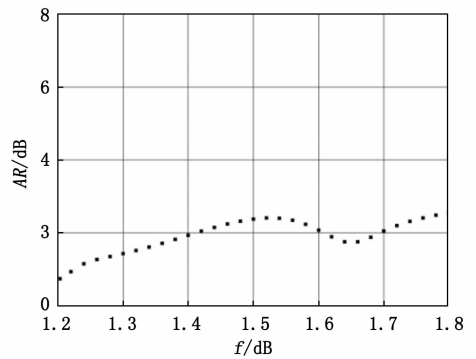


图 20 圆极化天线轴比测试结果

3 结束语

本文设计了一种基于印刷振子结构的宽频带共口径复合天线。通过两种不同形式的印刷偶极子进行共口径设计，包含宽带高增益线极化天线和宽带圆极化天线两种天线。高增益线极化天线采用平面印刷偶极子结构，设计了宽带定向耦合器实现了天线和差方向图辐射，满足宽带单脉冲天线的工作要求。宽带圆极化天线采用十字印刷偶极子实现圆极化辐射。两种天线单元印刷在同一层微波介质板上，采取优化天线单元布局，调整相对位置关系和增加金属隔

