

引用格式:刘昂,李淑华,李宝鹏,等.一种X波段正交极化偶极子天线阵设计[J].电光与控制,2021,28(5):85-88. LIU A, LI S H, LI B P, et al. Design of an X-band orthogonal polarized dipole antenna array[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(5):85-88.

一种 X 波段正交极化偶极子天线阵设计

刘昂, 李淑华, 李宝鹏, 高伟亮, 张凯旋
(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要:为解决 X 波段机载雷达变极化速度较慢的问题,设计了一种可实现脉间变极化的偶极子天线阵。该天线阵采用正交排列薄片电偶极子阵元,并加装垂直贴片和反射板,通过同轴线耦合巴伦进行馈电。利用改造后的阵元组成了一个 4×4 的 16 元矩形栅格、矩形边界均匀平面正交极化天线阵,利用射频开关控制馈电路实现快速变极化,通过高频结构仿真(HFSS)软件对其进行参数优化和建模仿真,结果显示,该天线阵具有较低的驻波比和副瓣电平以及较高的天线增益,可以作为机载正交极化相控阵雷达天线的参考设计,或用作正交极化阵列天线的子阵。

关键词: 机载雷达; 天线阵列; X 波段; 偶极子天线; 正交极化

中图分类号: V243.2 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2021.05.019

Design of an X-band Orthogonal Polarized Dipole Antenna Array

LIU Ang, LI Shuhua, LI Baopeng, GAO Weiliang, ZHANG Kaixuan
(Qingdao Branch of Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, China)

Abstract: In order to solve the problem of slow polarization changing of airborne radar, a dipole antenna array is designed, which can change the polarization between pulses. The antenna array uses orthogonal slice electric dipole array unit, vertical strips and reflection board, for realizing feed through coaxial coupling Balun. Then, a 4×4 rectangular-grid rectangular-boundary uniform plane orthogonal polarized antenna array is formed by using the improved elements, and fast polarization changing is realized by RF-MEMS switch. Then, HFSS software is used for parameter optimization and modeling simulation. The results show that, the antenna array has low standing-wave ratio, low sidelobe level, and high gain, which can be used as a reference design for the antenna of the orthogonal polarization phased array radar or as a subarray of the orthogonal polarization array antenna.

Key words: airborne radar; antenna array; X-band; dipole antenna; orthogonal polarization

0 引言

具有正交极化电磁波辐射和极化信息鉴别能力的相控阵雷达系统逐渐成为先进雷达技术发展的重要方向之一^[1],正交极化天线是其中的重要组成部分。21世纪初,正交极化天线和变极化技术开始受到重视^[2],该技术常见于机载抛物面天线,通过极化电机转动馈源,在 2~5 s 内完成正交线极化转换操作,转换速度慢,且无法实现脉间变极化,变极化时间段内雷达不能工作,难以适应复杂的电磁战场环境。

若雷达系统能够实现脉间快速变极化,对应的信

号处理模块可根据目标的极化散射信息,提高目标的检测鉴别概率和雷达系统的信噪比^[3]。针对快速变极化的需求,以正交电偶极子的结构原理,设计仿真了一种 X 波段正交极化电偶极子天线阵元,使用该阵元组合成一个 4×4 的 16 元矩形均匀平面阵。经高频结构仿真(HFSS)软件对天线阵进行参数优化和建模仿真,结果表明:该天线阵在工作频带内回波损耗小于 -10 dB,中心频率处小于 -20 dB,优于文献[4]的微带天线设计;驻波比小于 1.75,中心频率处最小驻波比为 1.04,优于文献[5]的印刷偶极子设计和文献[6]的 Vivaldi 天线设计;组成阵列后,天线最大增益大于 17 dB,副瓣电平小于 4.3 dB。该天线阵兼具良好的电性能与脉间变极化功能,能够作为相控阵天线的子阵,应用于正交极化相控阵雷达系统中。

收稿日期:2020-04-28

修回日期:2021-01-27

作者简介:刘昂(1992—),男,山东济宁人,硕士生,研究方向为军用天线与电磁兼容技术。

1 阵元设计方案

通用圆柱形电偶极子天线波束均匀、宽带性能较好,但是回波损耗较高、可优化的潜力不足。^[7]薄片形电偶极子在印制偶极子天线的基础上改进而来,优化潜力大,有更低的回波阻抗,可以通过加装反射板或反射腔的方式实现单向辐射。

正交极化电偶极子阵元的结构如图1所示,该阵元由2组偶极子、馈线、垂直贴片和底板组成,馈线、偶极子片和底板厚度为0.1 mm,均采用铜质材料。阵元中2组偶极子由同轴线连接平衡器(巴伦)的形式馈电,能够实现阻抗匹配、保证馈电平衡,同时还能增大功率容量,扩展带宽。偶极子中部间距相同、中心对称,保证天线方向图的对偶性。

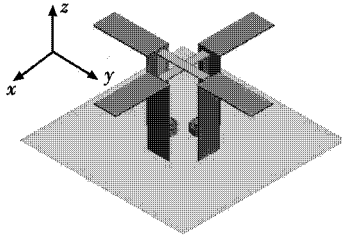


图1 电偶极子结构图

Fig. 1 Electric dipole structure

使用 HFSS 软件对阵元进行建模和参数优化。优化后的结构如图2所示。

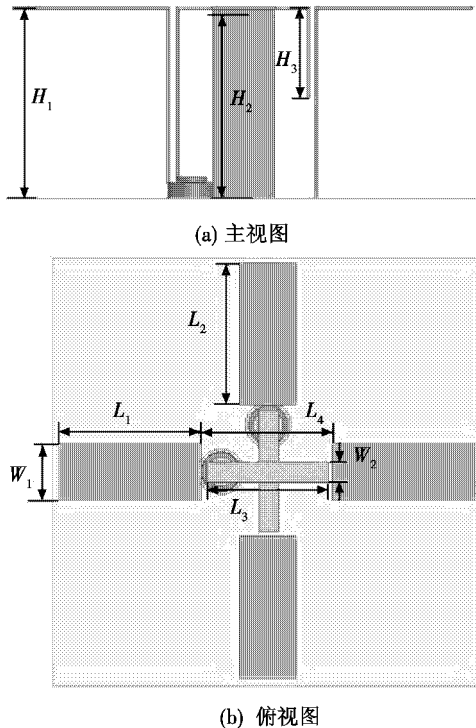


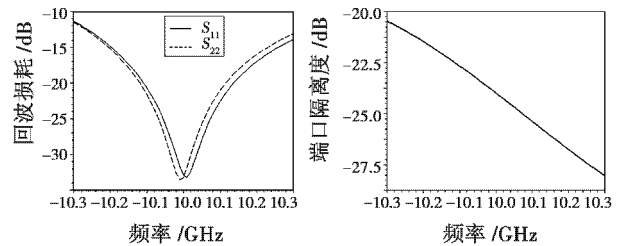
图2 阵元几何结构图

Fig. 2 Geometric structure graph of array element

阵元的尺寸为:偶极子高度和极化一馈线高度 $H_1 =$

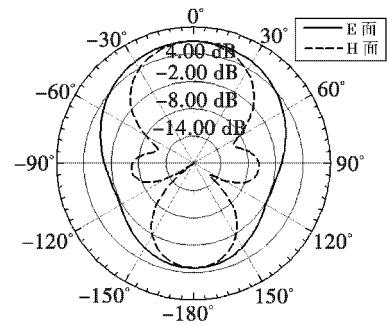
6.3 mm,极化二馈线高度 $H_2 = 6$ mm,馈线弯折部分长度 $H_3 = 2.9$ mm,极化一偶极子长度 $L_1 = 4.58$ mm,极化二偶极子长度 $L_2 = 4.57$ mm,馈线中段长度 $L_3 = 4.15$ mm,偶极子间距 $L_4 = 4.55$ mm,偶极子宽度 $W_1 = 1.9$ mm,馈线宽度 $W_2 = 0.7$ mm。

根据图2可知,为保证足够的馈电空间,偶极子间距较大,单组偶极子总长度为13.71 mm,略低于半波长15 mm,符合工程实际。为降低回波损耗,2组馈线高度差较小,导致端口隔离度有所降低。图3所示为参数优化阵元的回波损耗、端口隔离度及方向。



(a) 回波损耗

(b) 端口隔离度



(c) 平面方向图(极化一)

图3 阵元电性能参数仿真结果

Fig. 3 Simulation results of array electrical performance parameters

图3对阵元性能反映比较直观,天线在中心频率10 GHz上达到谐振,此时两组偶极子的回波损耗 S_{11} , S_{22} 均小于-30 dB,端口隔离度小于-20 dB,驻波比最小为1.04。以平行于 x 轴的偶极子作为研究对象,平行于电场的 xoz 面为天线方向图 E 面,平行于磁场的 yoZ 面为天线方向图 H 面。极坐标图中直径坐标值为增益值,最大增益在直射方向上为6.87 dB。该结构能够有效抑制回波损耗,2组偶极子的对偶性较好。

2 天线阵设计

2.1 阵元耦合分析

在阵列天线中,由于电磁波的干涉和叠加效应,阵元的间距会对波束的扫描和电性能参数产生限制,带来的互耦效应直接影响天线的性能^[3],将会使天线增益下降、方向图畸变、端口隔离度下降^[7]。天线阵在设计时必须将阵元互耦的因素考虑在内,解决互耦不良

影响的方法有很多种,最简单的方法是对阵元间距进行优化,另外还有采用算法进行互耦补偿和改进天线结构等方法。

以二元线阵为例,将两阵元的间距作为变量进行扫描,分析随之变化的回波损耗、端口隔离度和增益,找出最大端口隔离度、最小回波损耗和最大增益所对应的间距大小,应用于天线阵,其变化曲线如图4所示。

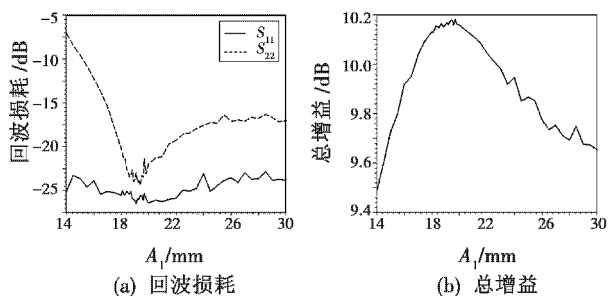


图4 二元阵电性能参数随间距变化曲线

Fig.4 The electric performance parameters of binary antenna array vs the spacing

从图4中看出,电性能参数随阵元间距 A_1 的变化有明显的变化趋势,也呈现一定的不稳定性。当 A_1 的取值在 $18 \sim 20$ mm,即 $0.6\lambda \sim 0.67\lambda$ 之间时,阵元回波损耗受互耦效应的影响最小,增益已达到峰值,选择 $A_1 = 18$ mm,二元阵方向图主瓣宽度和副瓣电平都达到了最小值。

2.2 天线阵结构

常规平面阵的基本类型按照栅格形式和边界形式来划分^[8],矩形栅格矩形边界平面阵是比较基础的一种^[9],在对该型天线阵进行分析时,可以按阵元的激励形式将其拆分为若干组线阵,以便获取阵因子方向图函数进行阵列的分析^[10]。这一阵列形式也常用于机载雷达天线^[11],因此选取该结构作为天线阵的设计方案。

图5所示为阵元组成的阵列在 HFSS 当中整体的仿真结构,阵列为 4×4 矩形栅格矩形边界阵,阵元间距为 18 mm,接地板尺寸为 $69 \text{ mm} \times 69 \text{ mm}$ 。

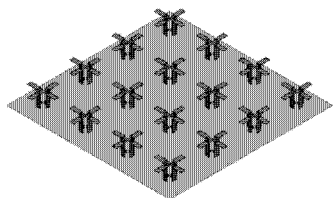


图5 天线阵面结构

Fig.5 Antenna array surface structure

在天线阵中,共存在 2 种极化 32 个端口,相同极化的馈电端口由一个馈电网络连接,对每组 2 个端口采取分时等幅同相的馈电方式。整个天线阵系统的结构如图6所示。

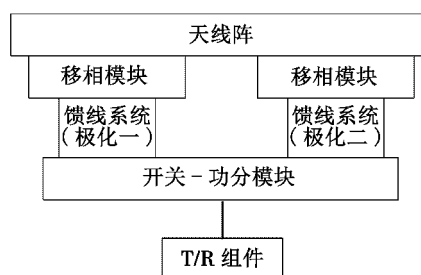


图6 天线阵系统结构

Fig.6 System structure of antenna array

由 T/R 组件发射的高频信号经射频(RF-MEMS)开关^[1]、功分器、馈电网络和移相器,送入天线。发射垂直极化脉冲时,打开对应线路射频开关,关闭水平极化线路射频开关,发射水平极化脉冲则相反,接收时,打开两路射频开关。射频开关的状态转换时间极短 ($< 30 \mu\text{s}$),能够在前一发射波的驻留期间内完成馈电线路的通断,实现脉间快速变极化。整个天线阵系统结构简单,易于加工,损耗较低。

3 仿真结果分析

基于以上设计,对天线阵进行建模分析,得到 2 种天线阵方向图,如图7所示,若以 z 轴为电磁波传播的正方向, x 轴与地面垂直,极化一沿 y 轴方向为水平极化,极化二沿 x 轴方向为垂直极化。直径的坐标为天线阵的增益值。

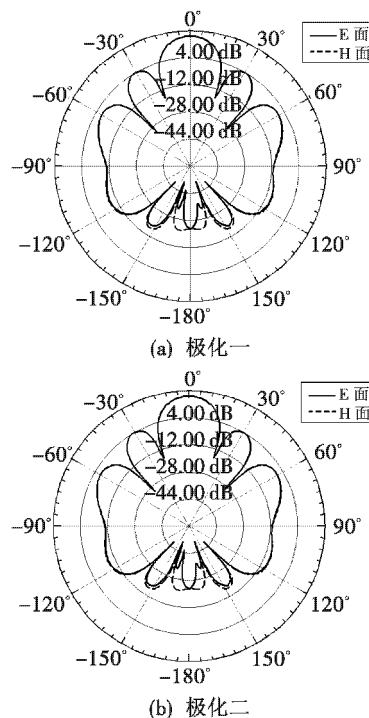


图7 天线阵辐射方向图

Fig.7 Antenna array radiation pattern

由图7可知,天线阵最大增益为 17.1 dB,前后比

为 33 dB,因阵元数量限制,主瓣宽度为 14° ,第一副瓣大小为 4.2 dB。水平极化和垂直极化的方向图相似,可见天线阵具有较好的对偶性。

对天线阵的极化一(水平极化)部分进行分析,使 x 轴方向的馈电点依次产生相移,改变天线阵的射角,使射角沿 z 轴向 x 轴方向分别偏移 15° 和 30° ,观察方向图的变化,方向图如图 8 所示。

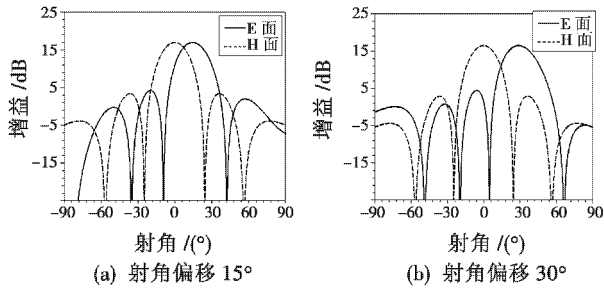


图 8 水平极化天线阵方向图

Fig. 8 Horizontal polarization antenna array radiation pattern

由图 8 可以看出,当射角在 30° 以内时,天线的增益在 16 dB 以上,波束宽度为 14° ;第一副瓣不大于 5 dB,出现在距离射角 30° 的方向处;当射角大于 30° 时,方向图开始产生畸变,天线阵的性能下降,由此可知天线阵的覆盖角度约为 $\pm 30^\circ$ 。

分析图 7、图 8 可知,在天线口径十分有限的情况下,该小型天线阵的增益较高,能够覆盖照射方向 $\pm 30^\circ$ 以上的射角,方向图稳定,前后比较高,具有较大的结构优化潜力。

4 结束语

针对机载雷达 X 波段正交极化阵列天线子阵的设计需求,设计了以正交排列的偶极子为阵元的 4×4 矩形均匀天线阵。经建模分析和参数优化,分析结果可知,阵元驻波比最小为 1.04,端口隔离度达到 -23.8 dB,天线阵最大增益为 17.1 dB,前后比大于 30 dB,2 组极化天线阵的方向图具有较好的一致性,整体尺寸为 $69 \text{ mm} \times 69 \text{ mm} \times 6.3 \text{ mm}$ 。该天线阵适用于工作频段

(10 ± 0.3) GHz、脉冲重复周期不小于 $30 \mu\text{s}$ 、子阵扫描角不大于 60° 、子阵功率不大于 16 W 的雷达阵列天线。相较机械变极化天线而言,天线阵体积小、结构简单、制作方便,能够在 1 个脉冲周期内完成极化的变化,以此为子阵能够制造机载雷达天线阵列,对大规模正交极化天线阵的设计制作具有一定的参考意义及一定的工程实用价值。

参考文献

- [1] 黄成远,张斌珍,段俊萍,等. RFMEMS 开关的研究进展及其应用[J]. 微纳电子技术,2018,55(9):652-659.
- [2] IRIBE K, SATO M. Analysis of polarization orientation angle shifts by artificial structures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11):3417-3425.
- [3] 聂玉明. 正交极化分集天线设计与实现研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [4] 李文晶,梁仙灵,金荣洪,等. Ku 波段双频正交极化微带阵列天线[J]. 中国电子科学研究院学报,2012,7(6):607-610.
- [5] 高兴东. Ku/Ka 共口径阵列天线的双极化高隔离研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.
- [6] 方佳,官伟,张小林. 超宽带宽角扫描双极化阵列天线的研制[J]. 微波学报,2018,34(增刊1):138-140.
- [7] 李棉全,李永祯,董健,等. 正交偶极子的极化特性分析[J]. 电波科学学报,2012,27(2):396-401.
- [8] HE Y J, HE W, WONG H. A wideband circularly polarized cross-dipole antenna[J]. IEEE Antennas Wireless Propag, 2014, 13(1):67-70.
- [9] ZHAO H D, WANG Z X, MENG H F. A design of E/Ka dual-band patch antenna array with shared aperture[C]// Asia-Pacific Microwave Conference, Nanjing, 2015:6-9.
- [10] 过勤超,屈绍波,马华,等. 基于超表面的圆极化印刷偶极子天线研究[J]. 电子元件与材料,2015,34(12):53-56.
- [11] 郑贵,王建,司海峰,等. X 波段宽带宽角扫描相控阵天线的设计[J]. 现代雷达,2015,37(10):46-50.