

文章编号: 1671-0576(2023)01-0012-05

# 宽带高增益全并馈双极化波导缝隙滤波天线阵

张 涛, 李迎欣, 朱丽丽, 纪 松, 鲁洵洵

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

**摘 要:** 设计了一款高增益、低副瓣、高效率宽带双极化波导缝隙滤波天线阵。采用四脊波导实现天线宽带性能,采用十字缝结构实现天线辐射单元双极化性能,采用全并馈电形式减小了天线阵馈电网络复杂度。通过在天线阵中集成设计直线型频变耦合滤波器,提高了滤波天线的带外抑制性能。实物测试结果与仿真结果吻合良好,验证了设计方法的正确性。

**关键词:** 全并馈; 双极化; 阵列天线; 频变耦合滤波器

**中图分类号:** TN82

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2023.01.003

## Broadband High-gain Full-corporate Feed Dual-polarization Slot Waveguide Filter Antenna Array

ZHANG Tao, LI Yingxin, ZHU Lili, JI Song, LU Xunxun

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** A broadband dual-polarization slot waveguide filter antenna array with high gain, low sidelobe and high efficiency was designed. The broadband performance of the antenna was realized by four-ridge waveguide. The dual-polarization radiation performance was realized by the cross-shaped aperture. The full-corporate feed design was contributed to decrease the complexity of the feed network. Furthermore, an in-line frequency-dependent coupling (FDC) filter which can be integrated into the antenna array was synthesized and designed to improve out-of-band suppression. The measured results agree well with the simulated results, which confirms the validity of the proposed approach.

**Key words:** full-corporate feed; dual-polarization; array antenna; FDC filter

### 0 引言

在现代雷达系统中,高性能天线是必不可少的一环。为了实现更大的工作带宽,降低同频干扰,宽带双极化天线<sup>[1]</sup>被广泛研究。

收稿日期: 2022-10-20

基金项目: 八院青年科研基金(KJW-KT-QNKYJJ-2022-16)

作者简介: 张 涛(1993—),男,硕士,工程师,主要从事天线技术研究。

近些年来,微带双极化天线由于具有结构紧凑、质量轻、易加工等优点而得到应用。但由于介质损耗大、寄生效应强以及表面波泄漏等原因,微带双极化天线的高频段性能不稳定<sup>[2]</sup>。相比于微带天线,波导缝隙天线由于具有低损耗、高增益以及高结构强度等优点,而得到了更加广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。文献[3]采用两种不同的天线单元形式实现了双极化辐射功能,但两种天线单元形式并存不仅降低了天线辐射效率,还增加了馈电网络的复杂度。另一方面,当多款天线安装在同一工作平台,特别是当各天线工作频率相近时,天线之间因互耦产生的干扰会造成天线性能恶化。采用抑制天线工作频段以外信号能量的方法可以显著降低天线间的互耦,进而改善天线性能。

本文提出一种“十字缝”形式的双极化波导缝隙天线阵列形式,并设计一款直线型频变耦合滤波器,通过引入频变耦合在通带上阻带实现一个传输零点。通过联合设计天线和滤波器,在不改变天线阵列性能的前提下提高带外抑制性能,并进行仿真验证。

## 1 天线子阵结构布局

双极化天线单元结构共分为 6 层,分别为辐射缝、四脊波导、耦合波导、垂直极化(VV)馈电端口、耦合缝和水平极化(HH)馈电端口,如图 1 所示。

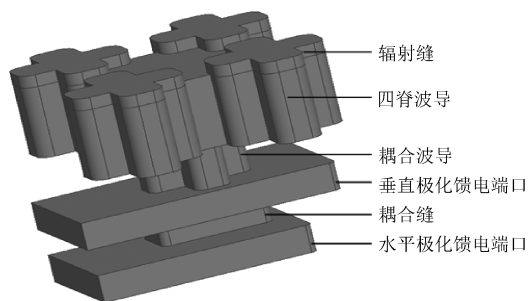


图 1 双极化天线单元结构

第一层 4 个“十字形”辐射缝对称分布,位于第二层的四脊波导边缘,共同形成双极化辐射单元。第三层的耦合波导用于耦合双极化电磁波,通过适当调整耦合缝和辐射缝的尺寸,使得第一层的 4 个辐射缝能够辐射等幅同相的信号。

采用全并馈形式对双极化天线单元进行馈电,有助于降低阵列天线功分网络的复杂度。通

过第四层波导馈电实现垂直极化信号传输。通过对第六层波导馈电,经第五层耦合波导实现水平极化信号传输。

由于图 1 所示天线单元水平极化馈电端口同相,垂直极化馈电端口反相,双极化天线采用两种不同的一分二功分器,如图 2 所示。采用图 2(a)所示的一分二功分器结构设计水平极化馈电网络,直接对同相的水平极化子阵进行馈电。采用图 2(b)所示的一分二功分器结构设计垂直极化馈电网络。根据波导功分器中波导磁场的对称性,在馈电网络中增加一层功分波导层,垂直极化波经耦合缝隙馈入功分波导,经功分波导功分,使得馈电方向上的相邻子阵垂直极化波变为同相。

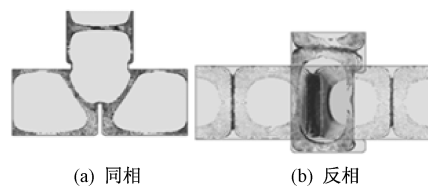


图 2 双极化天线一分二功分器

图 2 所示的功分器将两种极化合并为一个单元,实现  $2 \times 2$  双极化天线子阵。该子阵单元之间采用并联馈电,避免了串联馈电带来的长线效应影响,有效扩展了缝隙天线的工作带宽。天线工作在 K 波段,采用 HFSS 15.0 软件进行天线电性能仿真,其反射系数和隔离度仿真结果如图 3 所示。图中  $f_L, f_H, f_0$  分别为天线工作的低频频点、高频频点和中心频点。可知,  $2 \times 2$  双极化天线子阵实现了 10% 工作带宽 ( $0.95f_0 \sim 1.05f_0$ ), 反射系数  $|S_{11}| < -10$  dB, 隔离度  $|S_{12}| < -40$  dB 等指标。

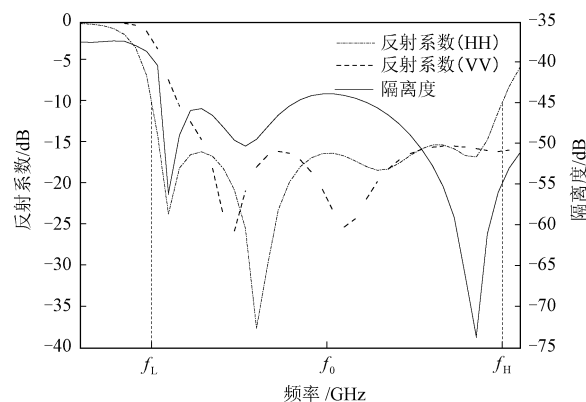


图 3  $2 \times 2$  双极化天线子阵反射系数和隔离度

## 2 1/4 分区全并馈双极化波导缝隙阵列天线

基于图 1 所示的双极化天线单元和图 2 所示的一分二功分器,采用全并馈波导缝隙天线将辐射缝隙由串联馈电改为并联馈电,将两种极化单元合并为一个单元,避免了传统波导缝隙线阵中长线效应的影响。通过调节功分器中阻抗变换段的长度和匹配台阶的尺寸,在输入端口幅度满足要求的前提下,使输入端口驻波最优,且带宽尽量宽。

基于优化后的  $1 \times 2$  天线子阵,将除馈电网络以外的天线单元部分整体平移,构成  $2 \times 2$  天线子阵。将优化后的一分二功分器代入  $2 \times 4$  天线子阵进行仿真。微调两层馈电网络参数,得到优化后的  $4 \times 4$  子阵仿真结果。基于设计的全并馈双极化天线子阵,通过不等功分器实现综合的泰勒(Taylor)加权分布。通常单脉冲天线由 4 个相同的分区组成,且 4 个分区是轴对称的,只需要完成 1/4 分区天线子阵列设计即可。1/4 分区双极化波导缝隙天线子阵如图 4 所示。

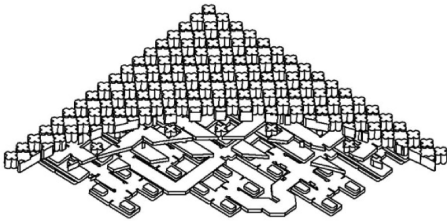


图 4 1/4 分区双极化波导缝隙天线子阵

$$\begin{bmatrix} 0 & 1.0439 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.0439 & 0.0774 & 0.6614 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6614 & -0.7814 & 0.6967(\omega - 2.56) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6967(\omega - 2.56) & -0.7814 & -0.6614 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.6614 & 0.0774 & 1.0439 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0439 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $\omega$  为归一化角频率。

图 6 给出了直线型频变耦合滤波器的 S 参数仿真结果。相比传统直线型滤波器,直线型频变耦合滤波器实现了 10% 带宽 ( $0.95f_0 \sim 1.05f_0$ ) 性能,滤波器工作带宽与天线工作带宽一致,并且实现了高性能带外抑制。

## 3 频变耦合滤波器综合

为了提高雷达系统的抗干扰性能,在天线中集成滤波器来抑制带外干扰信号的方法得到了越来越多的应用。

由于阵列天线结构复杂且可用空间有限,因此采用一种简单直线型频变耦合滤波器。通过引入频变耦合结构在上阻带实现了一个传输零点,以提高滤波器带外抑制性能。直线型频变耦合滤波器拓扑图及结构<sup>[5]</sup>如图 5 所示。

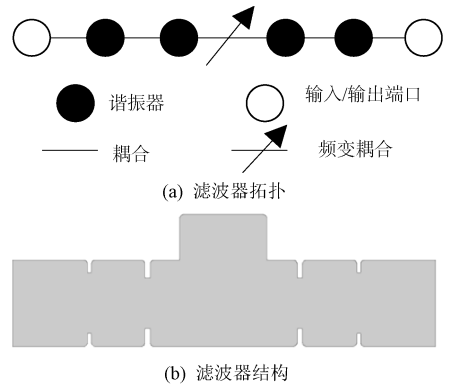


图 5 直线型频变耦合滤波器拓扑及结构示意图

根据  $Q$  值设计滤波器输入/输出端口尺寸,并根据频变耦合矩阵的耦合系数设计谐振单元间距,进而得到完整的频变耦合滤波器尺寸。其中零极点优化法综合频变耦合矩阵为

## 4 双极化波导缝隙滤波天线

基于设计的 1/4 分区阵列天线和频变耦合滤波器,联合设计了一款双极化波导缝隙滤波天线。对于单脉冲天线,通过设计和差网络,将 4 个图 4 所示 1/4 分区阵面组阵,产生和差信号。双极化波导缝隙滤波天线阵如图 7 所示。

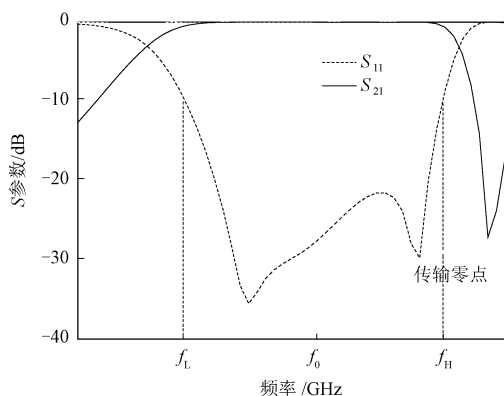


图 6 直线型频变耦合滤波器的反射系数

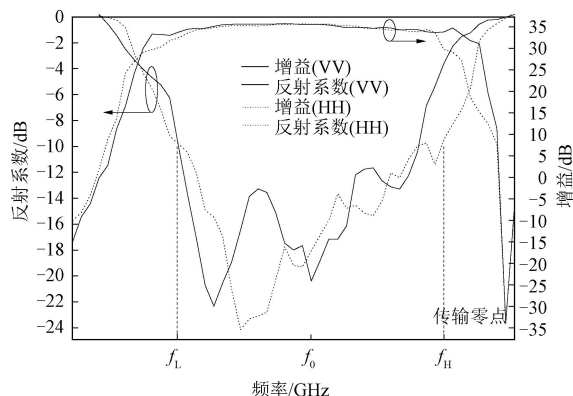


图 8 双极化波导缝隙滤波天线阵反射系数及增益

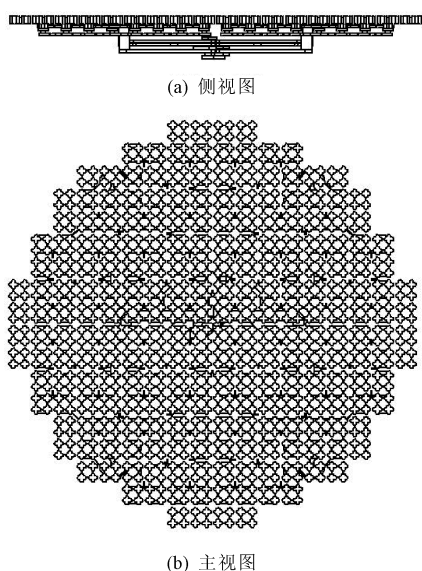
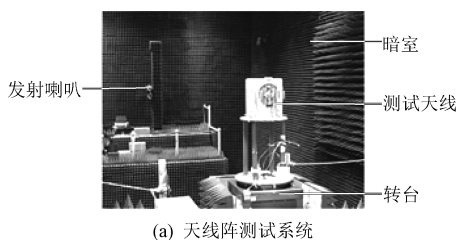
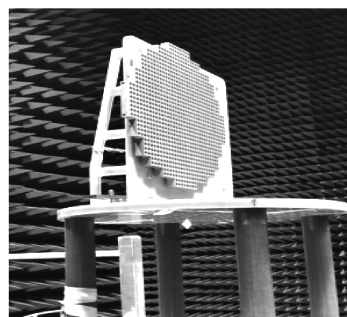


图 7 双极化波导缝隙滤波天线阵



(a) 天线阵测试系统



(b) 被测天线阵

图 9 双极化波导缝隙滤波天线阵及测试系统

对双极化波导缝隙滤波天线阵的反射系数及增益进行仿真,结果如图 8 所示。可以看出,双极化波导缝隙滤波天线阵实现了约 10% 的阻抗带宽 ( $0.950f_0 \sim 1.066f_0$ ), 反射系数  $|S_{11}| < -10$  dB, 带内增益波动稳定在 1 dB 左右。由于在阵列天线系统中集成设计滤波器引入了传输零点,提高了天线系统的带外抑制性能。

## 5 测试结果分析

宽带双极化波导缝隙滤波天线阵测试系统及实物如图 9 所示。为验证该天线阵的设计指标及性能,对其进行性能测试,并与仿真结果对比。

在中心频点  $f_0$  处,天线阵垂直极化仿真及测试的和差方向图如图 10 所示。可以明显看出,

波导缝隙滤波天线阵仿真及测试的和差方向图吻合良好,副瓣低于  $-25$  dB,零深低于  $-33$  dB。

在中心频点  $f_0$  处,天线阵水平极化的仿真及测试和差方向图如图 11 所示。可以明显看出,波导缝隙滤波天线阵仿真及测试的和差方向图吻合良好,副瓣低于  $-24$  dB,零深低于  $-33$  dB,在中心频点处效率约为 45%。

图 12 给出了该滤波天线阵在微波暗室中测试得到的增益随频率变化的响应曲线。由于波导自身固有的高通特性,因此,只测试了滤波天线阵的通带及高通性能。从图中可以看出,该天线阵具有平稳的带内增益和陡峭的群边带特性,实现了良好的带外抑制效果。

通过上述分析可知,天线阵的测试结果满足设计指标要求,且与仿真结果吻合良好。仿真及

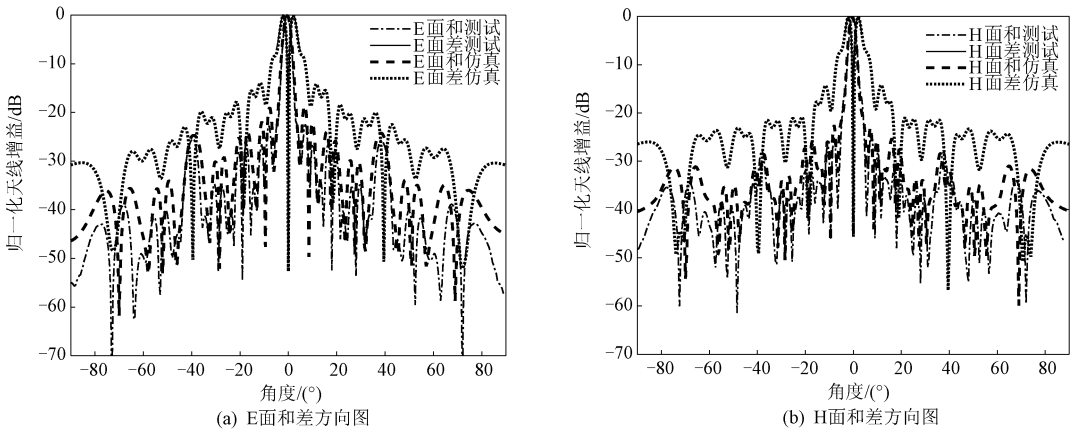


图 10 天线阵垂直极化和差方向图仿真与测试结果对比

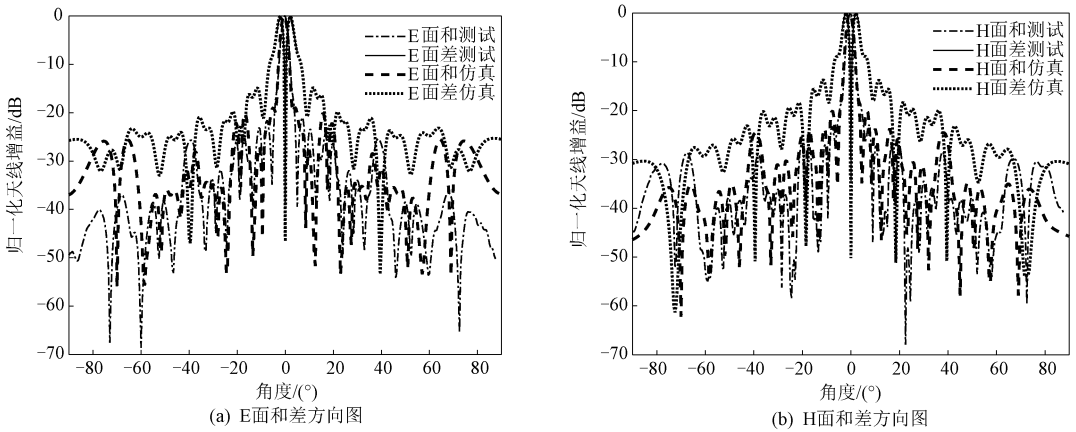


图 11 天线阵水平极化和差方向图仿真与测试结果对比

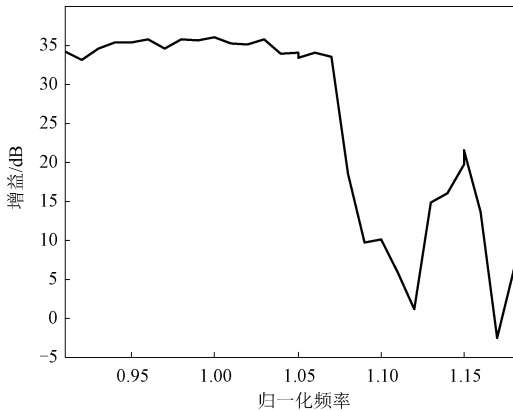


图 12 频率增益曲线

测试验证了天线阵结构的可靠性。与其他双极化天线阵结构相比,这种天线阵结构充分利用了天线空间,简化了功分网络设计。

### 6 结论

本文设计了一种全并馈双极化波导缝隙滤波

天线阵,该天线阵具有宽带、低副瓣、高增益等特性,通过在馈电网络集成设计频变耦合滤波器,在天线工作带宽上阻带引入了一个传输零点,实现了较高的带外抑制。测试结果满足设计指标要求,且与仿真结果吻合良好,证实了设计方法的有效性。本文的研究为后续宽带双极化波导缝隙滤波天线阵设计提供了有效的技术支持。

### 参考文献

[ 1 ] 李腾. 毫米波波导缝隙阵列单脉冲天线研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.

[ 2 ] CAO B L, WANG H, HUANG Y, et al. High-gain L-probe excited substrate integrated cavity antenna array with LTCC-based gap waveguide feeding network for W-band application[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2015, 63(12): 5465-5474.