

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208824

# L/Ku 双频双极化共口径天线设计

汪智 梁志伟

(南京电子技术研究所 南京 210039)

**摘要:** 本文提出了一种新型的用于合成孔径雷达的 L/Ku 共口径天线单元, L 频段单元为双极化的波导背腔十字开槽天线和 Ku 频段天线为单极化波导缝隙阵列天线。L 频段腔体高度通过“倒 T”型馈电减小, 每一个十字开槽天线均通过一对差分探针馈电。Ku 频段缝隙阵列透过同轴探针通过波导功分器馈电。通过 L 频段  $2 \times 2$  阵列和 Ku 频段嵌套设计的实物加工和测试, 实现了阻抗带宽 ( $VSWR < 2$ ) 分别为 22% 的 L 频段双极化天线单元和 8.6% 的 Ku 频段单极化波导缝隙阵列。该设计可以应用于大型共口径阵列。

**关键词:** 共口径; 双频; 差分馈电; 双极化; 合成孔径雷达

**中图分类号:** TN957.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Design of L/Ku dual-band dual-polarized subsystemshared-aperture antenna

Wang Zhi Liang Zhiwei

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** In this paper, new designs of slot elements and a new configuration for array antennas for synthetic aperture radar at L- and Ku-band are proposed. The L-band are cavity-backed crossed slots for dual-polarization, and for Ku-band, waveguide slot arrays for single-polarization are used. The height of the L-band cavity is reduced by adopting an “inverted T” configuration. Each of the crossed slots is fed by a pair of differential probes. The Ku-band slot array is fed by a coax probe although waveguide divider. An initial prototype array comprising  $2 \times 2$  L-band elements interleaved with Ku-band arrays was fabricated and measured. The impedance bandwidth ( $VSWR < 2$ ) of the antenna are dramatically broadened to 22% at L-band and 8.6% at Ku-band. This element design is applicable for larger shared-aperture arrays.

**Keywords:** shared-aperture; dual-band; differential-fed; dual-polarized; synthetic aperture radar

## 0 引言

星载合成孔径雷达 (SAR) 由于不受天气和时间的限制, 在对地探测、防灾减灾领域发挥的作用越来越重要, 针对星载 SAR 探测指标提升、探测要素拓展和抗干扰能力提高的迫切应用需求, 多频、多极化和共口径的轻量化天线提出了更苛刻的要求。

常见的多频多极化共口径天线的主要形式有微带贴片天线, 交错的印刷偶极子和波导缝隙天线等<sup>[1-11]</sup>。共口径天线大致可以分为 3 种类型: 1) 打孔贴片/贴片形式<sup>[1-4]</sup>; 2) 交叉偶极子、开槽天线/贴片、偶极子形式<sup>[5-6]</sup>; 文献[2]中提出了 X/Ku/Ka 共口径微带贴片天线。其中 X/Ku/Ka 多频段共口径天线结合了上述两种形式, X 频段打孔贴片天线, Ku 频段交叉偶极子天线, Ka 为贴片天线, 3 个频段采用微带线贴片形式, 实现低成本共口径设计。文献[5]提出

了 L/S 双频段共口径天线, L 频段和 S 频段均采用偶极子天线。偶极子天线因为其所占物理尺寸小的特点, 容易与其他频段实现共口径。3) 其他形式<sup>[7-11]</sup>。Zhuo 等<sup>[7]</sup>提出了 P/Ku 频段共口径天线, 其中高频段 Ku 阵列天线与 P 频段贴片天线共用辐射口径, 由于两个频段的巨大差距, P 频段贴片可以当做是 Ku 频段天线阵列的金属地板。

上述文献中大部分为微带贴片天线结构, 相比波导结构, 微带贴片介质损耗高, 辐射效率偏低, 不利于星载 SAR 天线设计。同时为了提高阻抗带宽, 贴片天线多采用寄生贴片或者多层结构。本设计提出了一种新型的 L/Ku 双频双极化波导共口径的天线单元, 有效改善天线损耗, 同时馈电采用差分馈电形式, 不但增加天线阻抗带宽, 而且改善了双极化天线的交叉极化电平和隔离度。其中 L 频段为差分馈电波导背腔十字开槽双极化天线单元, Ku 频段为波导缝隙单极化天线阵列。首先介绍双频双极化天线设计原理, 其次

收稿日期: 2022-01-10

对共口径天线的基本结构、参数设计等进行描述,最后通过对仿真和加工实测结果进行对比,验证设计的有效性。

## 1 天线结构及性能分析

### 1.1 天线设计原理

本文采用波导开槽天线单元形式实现共口径。开槽天线的优点是结构简单,表面无突出部分,特别适用于共口径天线设计<sup>[12]</sup>。常用的波导开槽天线是矩形波导,该波导传输主模为TE<sub>10</sub>模,沿着波导壁上切断电流的方向开槽就可以使波导中传输的能量向外辐射。波导开槽天线一般有两种:波导宽壁开槽和波导窄壁开槽。L频段天线采用交叉开槽天线,利用巴俾涅等效原理,开槽天线可以等效为交叉半波长偶极子天线。Ku频段天线阵列采用波导宽壁开槽的缝隙阵列,相邻单元间距为 $\lambda_g/2$ ,纵槽切断波导的横向电流,其等效电路为串联电阻。半波长纵槽的归一化电导公式如下:

$$g = 2.09 \left( \frac{a}{b} \right) \left( \frac{\lambda_g}{\lambda} \right) \sin^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right) \cos^2 \left( \frac{\pi \lambda}{2\lambda_g} \right) \quad (1)$$

式中: $a$ 和 $b$ 为矩形波导宽边和窄边, $\lambda_g$ 为波导波长, $\lambda$ 为自由空间波长。 $x$ 为开槽偏离中心线的距离。

### 1.2 天线结构描述

共口径天线的仿真三维结构如图1所示。实物加工图如图2所示,图2(a)为共口径天线正视图,图2(b)为天线背视图,整个天线包含两个共口径频段天线,频带跨度大(L和Ku频段)。L频段为 $2 \times 2$ 双极化天线阵列,采用差分馈电的波导背腔十字开槽天线,Ku频段为单极化波导缝隙阵列天线,采用波导功分器直接馈电。

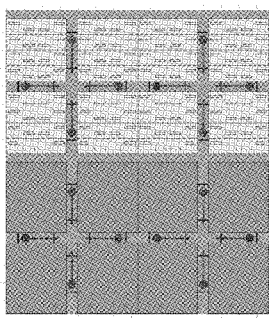
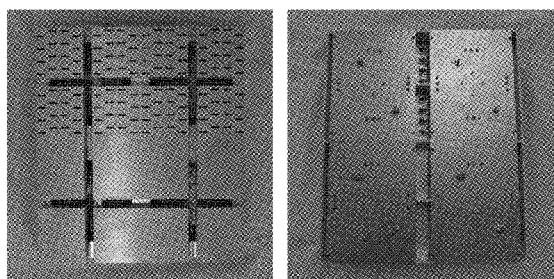


图1 L/Ku双频天线三维模型图



(a) 天线正视图 (b) 天线背视图

图2 L/Ku双频天线实物照片

图3为L频段双极化十字交错天线阵列俯视图和侧视图,由于双极化天线对交叉极化电平要求高,因此选择十字交错开槽天线<sup>[13-15]</sup>。该天线由波导背腔和4个波导金属块构成的共口径Ku天线阵列组成。其中波导腔高度约为 $1/8$ 波导波长,十字交错波导开槽高度约为腔体高度的 $1/2$ 。开槽长度约为 $0.5$ 波长。随着开槽的长度和宽度的增加,天线阻抗带宽变大,但交叉极化电平随之恶化。通过ANSYS HFSS进行性能优化仿真,选择合适的尺寸,既能达到良好的阻抗带宽,又能满足高交叉极化电平要求。

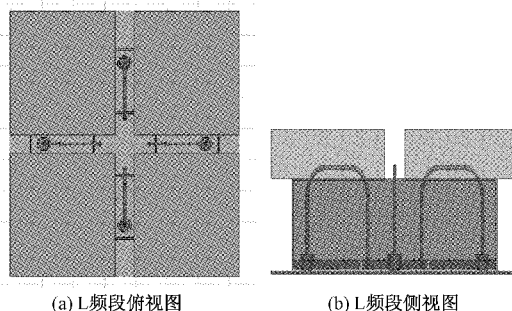


图3 L频段双极化天线俯视图和侧视图

L频段双极化天线单元采用差分馈电如图4所示。馈电采用圆环型探针,终端与金属地相连。通过仿真发现,差分馈电的圆环探针两端距离 $D$ 对阻抗影响不大,而圆环的高度 $h$ 和半径 $r$ 对阻抗匹配有着很大影响。随着圆环高度 $h$ 和圆环半径 $r$ 的增加,阻抗匹配越容易。图5为L频段双极化天线差分馈电的原理图。双极化差分馈电由多层印制板实现 $180^\circ$ 相位差和双端口馈电,即H1和H2相位差 $180^\circ$ ,V1和V2相位差 $180^\circ$ 。差分馈电由于采用双端口馈电,可以有效改善双极化天线交叉极化电平。图6所示给出了L频段 $1.2$ GHz处天线在 $yo$ z面内的电场分布示意图。由图6可以看出,由于两根平行圆环探针的差分馈电,腔体内沿水平方向从中心往两边缘处的电场强度逐渐增大,方向相反,形成了有效的辐射场。

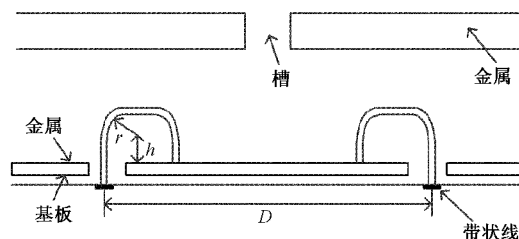


图4 L频段差分馈电示意图

Ku频段单极化波导缝隙阵列由8条缝隙组成,如图7所示。根据天线设计原理,波导缝隙长度约为 $0.5$ 倍中心频率对应的波导波长,缝隙宽度约为 $0.2$ 倍波导波长,波导缝隙间隔约为 $0.7$ 倍波导波长。图8为Ku频段波导缝隙阵列的馈电结构示意图,为了拓宽Ku频段波导天线阻抗带宽,波导缝隙阵列馈电由 $1:2$ 波导功分器组成,其特点

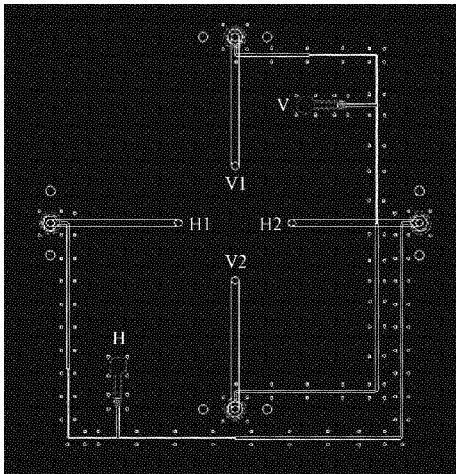


图 5 L 频段差分馈电原理图

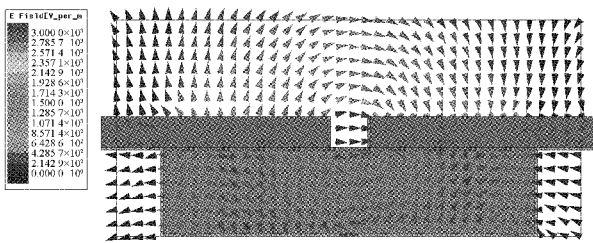


图 6 1.2 GHz 处  $yoz$  面上的电场分布示意图

是馈电链路损耗小,阻抗带宽可以由 4%~5% 提高到 8%~10% 左右。馈电波导功分器采用同轴连接器射频接头,同轴连接器内导体连接波导中的阻抗金属调配块,通过馈电波导腔体两端的开槽缝隙给上层的波导缝隙阵列馈电,从而实现 Ku 频段的宽频带阻抗匹配。

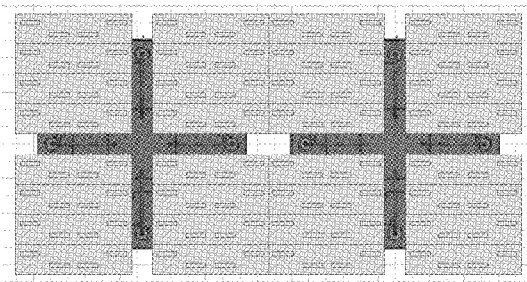


图 7 Ku 频段天线俯视图

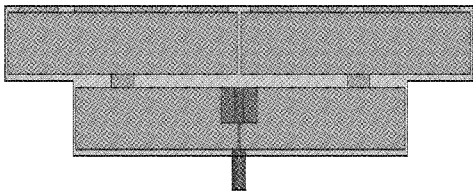


图 8 Ku 频段天线侧视图

### 1.3 天线测试结果

通过双频双极化共口径天线的实物加工和馈电射频连接器装配,分别对双极化 L 频段和单极化 Ku 频段的驻波

和方向图进行测试,得到测试结果如下。

图 9 和 10 分别为双频段天线的仿真和实测驻波曲线,结果显示 L 频段 H 极化阻抗带宽约为 275 MHz(22%),V 极化阻抗带宽约为 275 MHz(22%),Ku 频段阻抗带宽为 1 100 MHz(8.6%)。图 11 为 L 频段双极化馈电端口的隔离度,实测隔离度优于 -28 dB。由于实物加工尺寸的偏差,实测驻波曲线频段略微偏移,仿真和实测结果一致性较好。

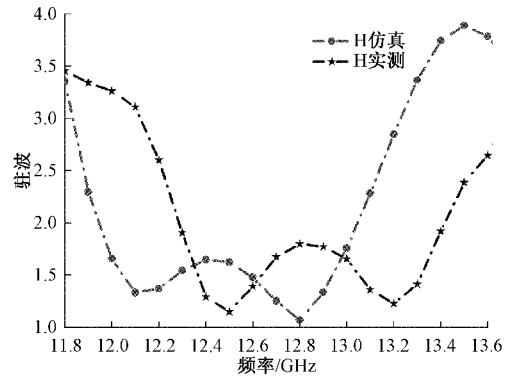
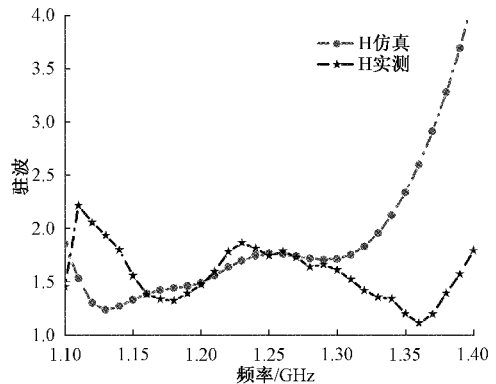
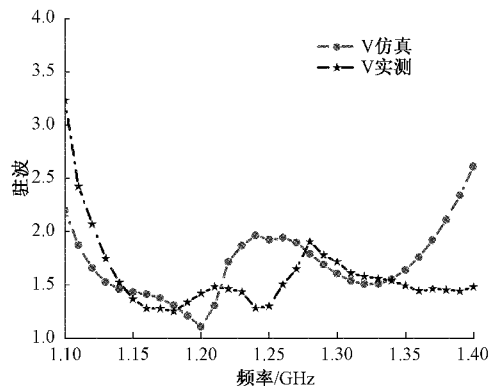


图 9 Ku 频段仿真和实测驻波



(a) H 极化仿真和实测驻波曲线



(b) V 极化仿真和实测驻波曲线

图 10 L 频段仿真和实测驻波

将双频段共口径天线放置在暗室内进行方向图测试,实测归一化方向图曲线如下所示。图 12 和 13 中所示分别为天线在 1.2 GHz(L 频段)和 12.6 GHz(Ku 频段)处的归



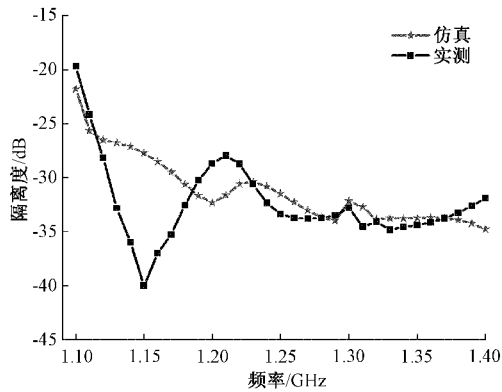
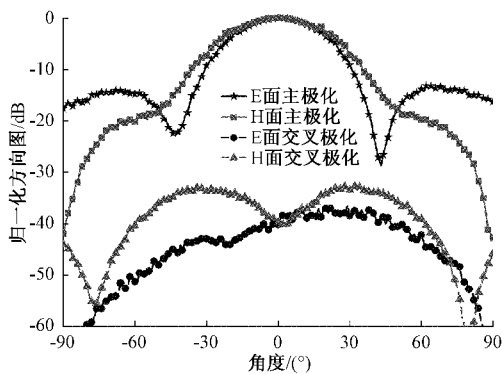
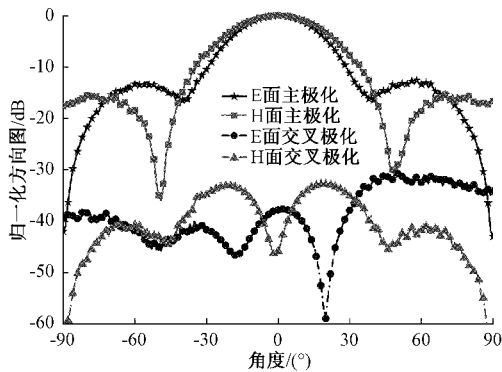


图11 L频段双极化天线端口隔离度



(a) H极化天线仿真和实测方向图



(b) V极化天线仿真和实测方向图

图12 1.2 GHz双频段天线仿真和实测方向图

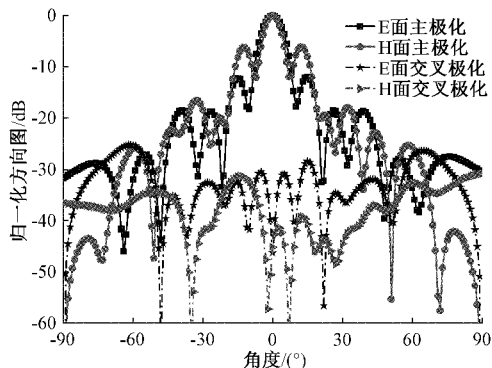


图13 12.6 GHz天线仿真和实测方向图

一化辐射方向图。实测结果显示双频天线在测试频点处的辐射方向图关于 $z$ 轴的对称性较好,L频段1.20 GHz处H极化方向图E面和H面内的3-dB波束宽度分别为 $34.0^\circ$ 和 $39.1^\circ$ ,1.20 GHz处V极化方向图E面和H面内的3-dB波束宽度分别为 $34.1^\circ$ 和 $38.6^\circ$ ,12.60 GHz处方向图E面和H面内的3-dB波束宽度分别为 $9.2^\circ$ 和 $7.4^\circ$ 。L频段双极化天线的交叉极化分别比其主极化低约34 dB和32 dB,Ku频段天线的交叉极化比其主极化低约30 dB,实测和仿真曲线基本吻合。

## 2 结 论

针对星载SAR天线多频多极化和共口径的需求,本文提出了一种新型的共口径L频段双极化差分馈电的波导背腔十字开槽天线阵列和Ku频段单极化波导功分器馈电的缝隙阵列天线。通过仿真和实物加工测试,实现了阻抗带宽( $VSWR < 2$ )分别为22%的L频段双极化天线单元和8.6%的Ku频段单极化波导缝隙阵列。所提出的天线结构紧凑,方便进行阵列扩展,可有效应用于星载共口径相控阵天线阵面。

本文中天线设计实测和仿真曲线存在频段偏移,后续仿真和加工有待进一步优化和改进,同时设计中采用波导结构,在轻量化天线设计方面可以考虑薄壁和一体化加工,更加适用于星载SAR天线辐射单元设计。

## 参考文献

- [1] ISLEIFSON D, SHAFAI L. A study on the design of dual-band perforated microstrip antennas for SAR applications[C]. 2012 15 International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, IEEE, 2012; 1-3.
- [2] MAO C X, GAO S, LUO Q, et al. Low-cost X/Ku/Ka-band dual-polarized array with shared aperture[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(7): 3520-3527.
- [3] HSU S H, REN Y J, CHANG K. A dual-polarized planar-array antenna for S-band and X-band airborne applications [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2009, 51(4): 70-78.
- [4] MAO C X, GAO S, WANG Y, et al. A shared-aperture dual-band dual-polarized filtering-antenna-array with improved frequency response [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 1836-1844.
- [5] NAISHADHAM K, LI R L, YANG L, et al. A shared-aperture dual-band planar array with self-similar printed folded dipoles[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 61(2): 606-613.
- [6] ZHONG S S, SUN Z, KONG L B, et al. Tri-band

- dual-polarization shared-aperture microstrip array for SAR applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(9): 4157-4165.
- [7] ZHOU S G, TAN P K, CHIO T H. Wideband, low profile P-and Ku band shared aperture antenna with high isolation and low cross-polarisation [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2013, 7(4): 223-229.
- [8] ZOU W M, QU S W, YANG S. A low profile dual-band dual-polarized shared-aperture antenna[C]. 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium(ACES), IEEE, 2017: 1-2.
- [9] ZHANG J F, CHENG Y J, DING Y R, et al. A dual-band shared-aperture antenna with large frequency ratio, high aperture reuse efficiency, and high channel isolation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 67(2): 853-860.
- [10] YI L, YAN H, DAI M, et al. Design of a Ka/Ku dual-band dual-polarized array[C]. Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, IEEE, 2014: 369-371.
- [11] BAI C X, CHENG Y J. An S/X dual-band shared-aperture phased array antenna[C]. 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium(IWS), IEEE, 2019: 1-3.
- [12] YUN J X, VAUGHAN R G. Open slot antenna in a small ground plane[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2011, 5(2): 200-213.
- [13] CHEN Y, VAUGHAN R G. Crossed slot antenna with simple feed for high polarization isolation[C]. 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), IEEE, 2013: 650-651.
- [14] PARYANI R C, WAHID P F, BEHDAD N. A wideband, dual-polarized, substrate-integrated cavity-backed slot antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 645-648.
- [15] 李晓今,郭先松,李记任,等.一种超宽带,低交叉极化,低剖面的相控阵天线单元设计[J].电子测量技术, 2019,42(21),41-43.

#### 作者简介

汪智,工程师,主要研究方向电磁场与微波技术。

E-mail:zwang89@163.com

梁志伟,高级工程师,主要研究方向电磁场与微波技术。

E-mail:davidliang2008@126.com