一种基于天线-移相器-天线单元结构的双宽带线圆极化器

陆艺文[1],童宣锋[1],曾维民[1],薛晓马[2],安　睿[2],蒋之浩[1]
(1.东南大学 信息科学与工程学院,江苏 南京 211189;2.太原卫星发射中心,山西 太原 030027)

摘　要: 线圆极化转换器在卫星通信天线系统中可发挥重要作用,针对K/Ka频段卫星通信的需求,采用天线-移相器-天线(AFA)结构,通过独立设计双频带内接收和发射天线,提出了一款双频宽带线圆极化器。通过堆叠贴片的方式引入新的谐振点,从而拓展极化器的工作带宽。所设计的极化器单元尺寸为$0.4\lambda_K\times0.37\lambda_K\times0.27\lambda_K$,可在K波段将入射$x$方向线极化波转换为右旋圆极化波,并在Ka波段将入射y方向线极化波转换为左旋圆极化波。实测结果表明:在保证入射角为0°~25°范围内,该极化器响应稳定,在K和Ka波段的工作带宽分别为9.8%(18.3~20.2 GHz)和7.8%(28.5~30.82 GHz)。

关键词: 卫星通信;极化器;双频;天线-移相器-天线(AFA);宽带
中图分类号: TN 927　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.03.020
引用格式: 陆艺文,童宣锋,曾维民,等.一种基于天线-移相器-天线单元结构的双宽带线圆极化器[J].上海航天(中英文),2024,41(3):187-194.

Dual-broadband Linear-to-circular Polarizer Based on Antenna-filter-Antenna Unit Cell Structure

LU Yiwen[1], TONG Xuanfeng[1], ZENG Weimin[1], XUE Xiaoma[2], AN Rui[2], JIANG Zhihao[1]
(1.School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;
2.Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030027, Shanxi, China)

Abstract: Linear-to-circular polarizers can play an important role in the antenna systems for satellite communications. In view of the requirements of K/Ka-band satellite communications, in this paper, a dual-broadband linear-to-circular polarizer is proposed, in which the antenna-filter-antenna (AFA) structure is adopted and the dual-band receiving and transmitting antennas are independent. In particular, the working bandwidth can be expanded by stacking the patches, resulting in a unit cell size of $0.4\lambda_K\times0.37\lambda_K\times0.27\lambda_K$. With the polarizer, an incident x-polarized wave can be converted into a right-hand circular-polarized (RHCP) wave at the K-band, whereas an incident y-polarized wave can be converted into a left-hand circular-polarized (LHCP) wave at the Ka-band. A polarizer prototype is fabricated and tested. The measured results indicate that the operating bandwidth of the polarizer is 9.8% (18.3~20.2 GHz) and 7.8% (28.5~30.82 GHz) within the incidence angle ranging from 0° to 25°.

Key words: satellite communication; polarizer; dual-band; antenna-filter-antenna (AFA); broadband

0　引言

随着无线通信理论和微波技术的发展,卫星通信已经被广泛应用于电视传播、宽带广播、遥感、移动通信等业务。K/Ka波段卫星通信常使用圆极化波,因为圆极化波的极化特性几乎不受法拉第旋转效应的影响,且在极化失配等方面性能优于线极化

收稿日期:2023-09-25;**修回日期:**2024-03-11
基金项目:国家自然科学基金(62122019)
作者简介:陆艺文(1999—),女,硕士生,主要研究方向为毫米波极化器技术。
通信作者:蒋之浩(1986—),男,教授,博士,主要研究方向为微波毫米波天线、阻抗表面。

波收发系统[1]。K/Ka波段卫星通信终端工作在两个不同波段,其中,下行链路频段为18.7~20.2 GHz,上行链路频段为29.5~30.0 GHz。为了进一步提高收发系统间的隔离度,两个频段采用极化相互正交的圆极化波,即右旋圆极化波与左旋圆极化波[2]。近年来,一些学者设计了双频带共口径圆极化天线[3-9],但其馈电网络通常比较复杂。利用双频线极化天线和双频线圆极化转换器[10-11]产生圆极化波可以有效降低设计复杂度。

最经典的线圆极化转换器结构是弯折线结构。1973年,YOUNG等[12]提出一款基于弯折线结构的极化器,可以实现整个X频段内轴比优于1.5 dB的极化转换效果。JOYAL等[13]借助简单电路模型设计了一款带宽35.9%的单频线圆极化转换器。ZHAO等[14]提出的双频线圆极化转换器可以做到在最大斜入射角为30°的情况下性能保持稳定,但其工作带宽较窄,在高低频段仅分别为2.5%和1.68%。利用频率选择表面结构实现极化转换也被广泛地研究[15-19],其设计思路通常是利用等效电路法设计结构的几何形状和尺寸大小,使得结构透射的两个正交线极化波幅值相等、相位相差±90°,实现线极化波至圆极化波的转换。常见的频率选择表面有交叉偶极子[20]和耶路撒冷十字[21]等结构。WANG等[21]提出了一种双频线圆极化转换器,在K波段,该极化器能在入射角0°~20°范围内稳定响应,工作带宽为29%,但在Ka波段斜入射情况下,极化器透射的圆极化波轴比恶化。2018年,NASERI等[22]提出的双频线圆极化转换器的工作带宽为2.5%和1.68%,但在高频段,极化器只能在斜入射角0°~15°范围内稳定响应。2022年,XIE等[23]提出了一款基于孔径耦合贴片谐振器的双频线圆极化转换器,该极化器在入射角0°~20°范围内稳定响应,在两个频段工作带宽分别为4%和2.35%。与单频线圆极化转换器相比[24-26],双频线圆极化转换器[27-30]由于模式在两个频带之间会有一定程度的相互耦合,通常角度稳定性较低,工作带宽较窄。

本文采用天线-移相器-天线(Antenna-Filter-Antenna,AFA)结构设计了一款双频线圆极化转换器。与多层弯折线和频率选择表面结构相比,该结构可以独立设计两个频段的接收线极化天线单元和发射圆极化天线单元,设计灵活度更大。本文首先介绍了极化器的工作原理和结构,给出了仿真结果,制作了实物进行测试验证,测试结果表明,极化器在所设计的频段保持了稳定的工作性能。

1 极化器设计

所设计的双频圆极化器结构如图1所示,可分别在K和Ka波段实现线极化至右旋圆极化、线极化至左旋圆极化的转换。极化器结构按照功能可分为接收结构和发射结构两个部分,每个部分由两层堆叠贴片构成以实现电磁波的接收或发射。其中各层的贴片皆由低频和高频两种独立的子单元共口径排布而成。在K波段,接收部分的低频线极化贴片接收到x方向的线极化波,经过金属通孔耦合到发射部分低频圆极化贴片,辐射出右旋圆极化波;在Ka波段,接收部分的高频线极化贴片接收y方向的线极化波,经过金属通孔耦合到发射部分高频圆极化贴片,辐射出左旋圆极化波。

接收部分可接收的线极化波方向与频率可以通过调整对应线极化贴片的几何形状和尺寸进行设计。发射部分辐射圆极化波的旋向与频率可以通过调整对应圆极化贴片的几何形状和尺寸进行设计。因此,各频段的接收和发射极化可以独立设计。

由电磁理论可知,入射线极化波$\boldsymbol{E}^{\mathrm{i}}$可以分解为垂直(Transverse Electric, TE)极化波与平行(Transverse Magnetic,TM)极化波,$\boldsymbol{E}^{\mathrm{i}}$可表示为

$$\boldsymbol{E}^{\mathrm{i}}=\cos\varphi|\boldsymbol{E}^{\mathrm{i}}|\boldsymbol{e}^{\mathrm{TM}}+\sin\varphi|\boldsymbol{E}^{\mathrm{i}}|\boldsymbol{e}^{\mathrm{TE}} \tag{1}$$

式中:φ为入射面与x轴的夹角;$\boldsymbol{e}^{\mathrm{TM}}$为TM极化的单位向量;$\boldsymbol{e}^{\mathrm{TE}}$为TE极化的单位向量。

线极化波至左旋和右旋圆极化波的传输系数(t_{R},t_{L})和轴比(AR)可表示为[31]

$$\begin{bmatrix}t_{\mathrm{R}}\\t_{\mathrm{L}}\end{bmatrix}=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1 & j\\1 & -j\end{bmatrix}\begin{bmatrix}s_{21}^{\mathrm{TM,TM}} & s_{21}^{\mathrm{TM,TE}}\\s_{21}^{\mathrm{TE,TM}} & s_{21}^{\mathrm{TE,TE}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\varphi\\\sin\varphi\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中:s_{21}为传输系数。

$$AR=20\lg\left|\frac{|t_{\mathrm{R}}|+|t_{\mathrm{L}}|}{|t_{\mathrm{R}}|-|t_{\mathrm{L}}|}\right| \tag{3}$$

为了在相同的阵列口径下减少阵元总数,提出采用三角形布阵方式设计[32]。在设计过程中,采用商用电磁仿真软件(High Frequency Structural Simulator,HFSS)全波仿真软件对极化器进行仿真和

优化。提出的极化器设计过程可分为3个步骤。

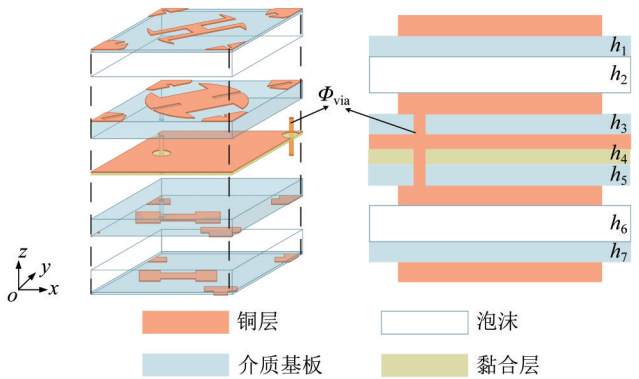
步骤1　优化设计低频线极化贴片阵列与圆极化贴片阵列，实现K波段内线极化波到右旋圆极化波的转换。

步骤2　综合考虑低频贴片阵列与高频贴片阵列之间的相互耦合与阵元排布，优化设计高频线极化阵列与圆极化阵列实现Ka波段内线极化波到左旋圆极化波的转换。

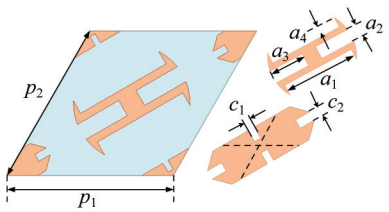
步骤3　为满足实际应用中天线斜入射照射圆极化器的需要，进一步优化极化器整体结构，得到双宽带圆极化器。

1.1　极化器结构

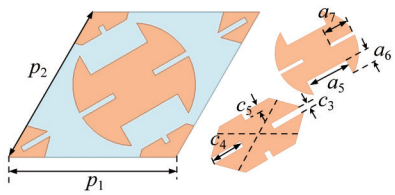
该极化器单元结构如图1所示，以金属地层为分界，下半部分为线极化波接收结构，上半部分为圆极化波辐射结构，上下部分通过金属通孔连接。接收结构与辐射结构均由一个驱动贴片和一个寄生贴片构成。这种堆叠贴片的方式可以引入新的谐振点，通过调节结构尺寸调整谐振频点从而扩展带宽。极化器各层介质基板选择Rogers 4350B（相对介电常数ε_r=3.66，损耗正切角tan δ=0.004），使用Rogers 4450F（相对介电常数ε_r=3.52，损耗正切角tan δ=0.004）压合。引入的寄生贴片部分与驱动贴片之间使用HF31泡沫板支撑。各层贴片的平面图案如图1(b)～图1(e)所示，其具体几何尺寸见表1。极化器的单元尺寸为6 mm×5.2 mm×4.1 mm（$0.4\lambda_K\times0.37\lambda_K\times0.27\lambda_K$，$\lambda_K$为K波段中心频率波长）。



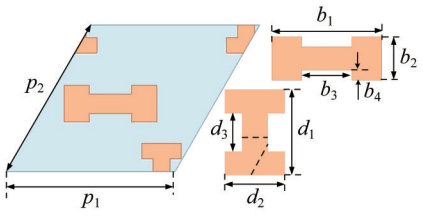
(a) 侧视图



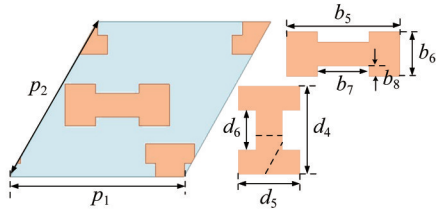
(b) 顶层寄生贴片



(c) 顶层驱动贴片



(d) 底层驱动贴片



(e) 底层寄生贴片

图1　极化器单元结构

Fig.1　Structure of the polarizer unit cell

表 1 极化器单元的具体尺寸

Tab.1 Physical parameters of the polarizer unit cell

参数	数值/mm	参数	数值/mm	参数	数值/mm
p_1	6	a_3	1.72	b_8	0.3
p_2	6	a_4	0.52	c_1	0.37
h_1	0.1	a_5	2.35	c_2	0.28
h_2	1.1	a_6	0.79	c_3	0.2
h_3	0.762	a_7	1.38	c_4	1.1
h_4	0.1	b_1	3.6	c_5	0.25
h_5	0.762	b_2	1.4	d_1	2.2
h_6	1	b_3	1.5	d_2	1.7
h_7	0.1	b_4	0.3	d_3	0.48
Φ_{via}	0.2	b_5	3.3	d_4	2
a_1	3.55	b_6	1.3	d_5	1.4
a_2	0.62	b_7	1.5	d_6	0.9

1.2 泡沫厚度优化

为进一步讨论极化器单元结构几何尺寸对极化器性能的影响，上层泡沫板厚度 h_2 对圆极化透射波轴比和传输系数的影响如图 2 所示。由图 2 可知，泡沫板厚度对轴比的影响较大，而传输系数对厚度参数不敏感。随着 h_2 增大，两个轴比低点相互靠近，这是因为驱动贴片和寄生贴片之间耦合的强弱主要由泡沫板厚度决定，泡沫板厚度增大会导致耦合强度变弱，从而使两个谐振频点之间的距离减小。同时，过大的泡沫板厚度会导致贴片之间的耦合过小。过强或过弱的耦合都会恶化极化器的轴比带宽，综合考虑低频和高频两个频段的结果，选择 1.1 mm 作为上层泡沫板的厚度。

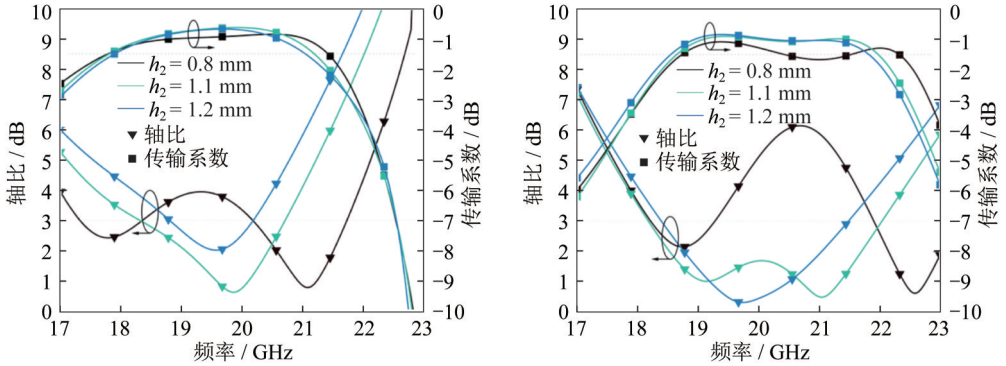
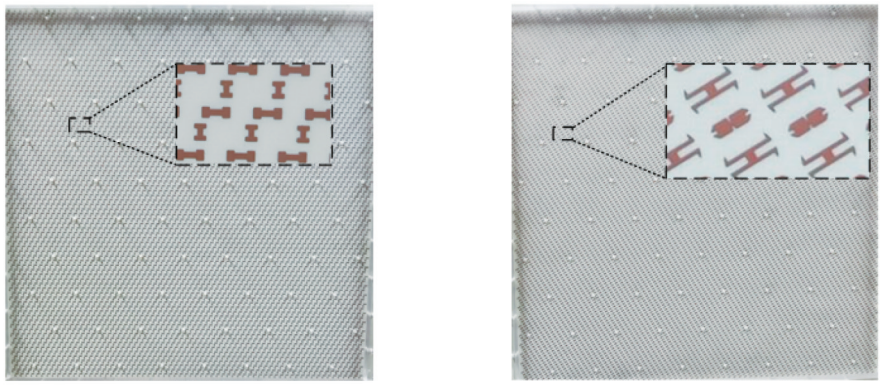


图 2 上层泡沫板厚度 h_2 对轴比和传输系数的影响

Fig.2 Effects of h_2 on the axial ratio and transmission coefficient

2 测试方法

使用标准印刷电路板(Printed Circuit Board，PCB)工艺对所提的极化器进行加工，共加工了 3 块 PCB 板，为了稳定结构，使用尼龙螺丝固定 PCB 板和泡沫板，制作的实物如图 3 所示。结构的整体尺寸为 420 mm×420 mm×4.1 mm。



(a) 下层线极化单元 (b) 上层圆极化单元

图 3 极化器样品实物

Fig.3 Physical image fabricated polarizer sample

测试环境如图 4 所示,两个标准增益喇叭天线被固定在高度为 1.2 m、间距为 1 m 的三脚支架上,通过同轴电缆与思仪 3672E 矢量网络分析仪相连,并放置在极化器的两侧。其充当发射天线与接收天线。极化器被放置在位于两个喇叭中心位置的转台上,且保证极化器与喇叭的几何中心在高度上重合。测试在暗室环境下进行。试验测得的极化器传输系数需利用空载对传时的传输系数进行校准以得到准确的极化器传输系数 s_{21},校准结果可表示为

$$s_{21}=s_{21}^{\text{polarizer}}-s_{21}^{\text{free}} \tag{4}$$

式中:$s_{21}^{\text{polarizer}}$ 为加载极化器时测得的接收天线至发射天线之间的传输系数;s_{21}^{free} 为空载时测得的传输系数。

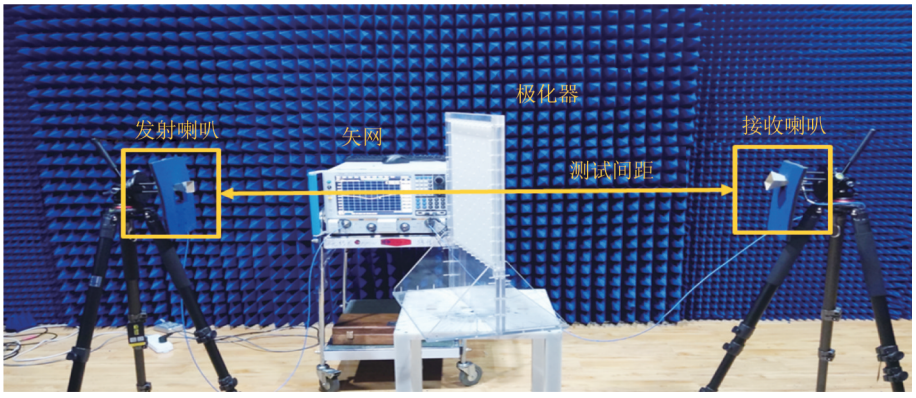


图 4　极化器测试环境

Fig.4　Measurement setup of the polarizer

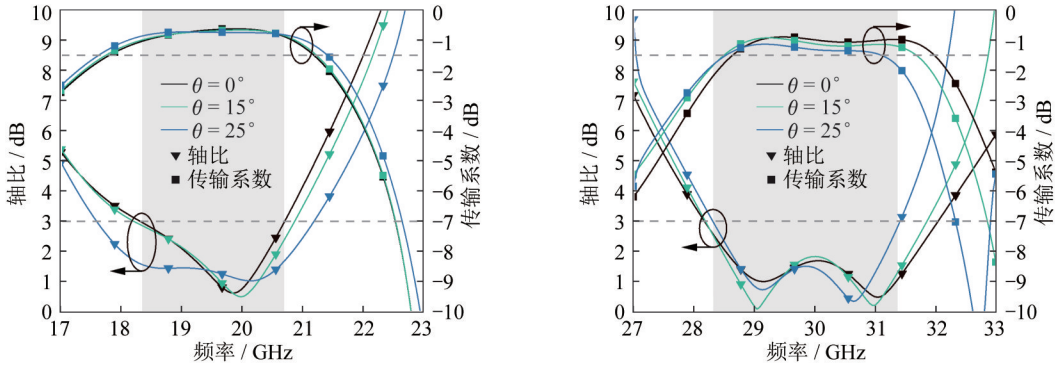
如式(2)所示,极化器的圆极化传输系数可由 4 种线极化传输系数计算合成。测试所用的发射喇叭与接收喇叭均为线极化喇叭。在测量不同极化分量时,信噪比的相对误差会降低测量结果的准确性。在测量过程中接收天线每次都与极化器水平轴相差 45°,利用 45°和－45°方向接收的两个线极化波合成圆极化波,这两个方向接收到的线极化波电平相近,而同一时段的测量过程中,噪声电平往往不会出现大幅波动,所以可以确保两次测量的信噪比相似[30]。经测试对比,这种方法能够得到更准确的传输系数。为了从测量数据中去除多径分量,在时域中添加时域门。

3　结果与分析

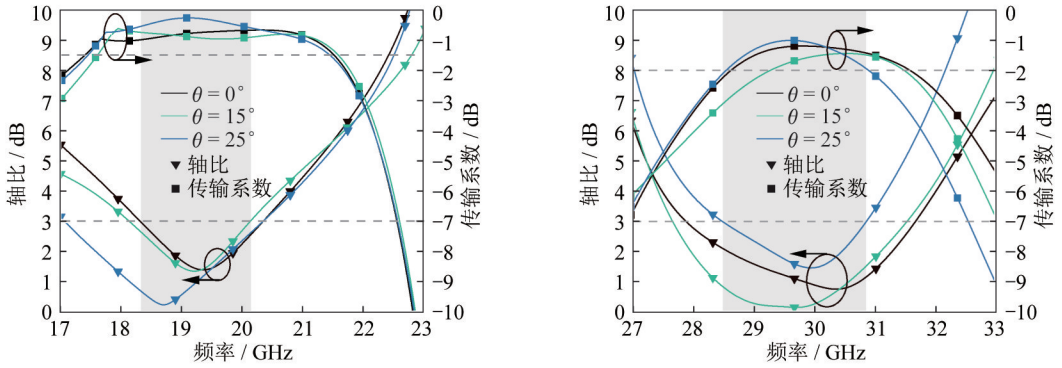
极化器在 $\varphi=0^{\circ}$ 和 $\varphi=90^{\circ}$ 入射面内不同角度极化波入射时,透射的圆极化波轴比和线至圆极化传输系数仿真结果如图 5(a)、图 5(c)所示。在正入射时,在 18.33～20.68 GHz(11.8%)频段内透射波轴比小于 3 dB,极化器插损小于 1 dB;同时,在 28.25～32 GHz(12.4%)频段内透射波轴比小于 3 dB,极化器插损小于 1.5 dB。在斜入射情况下,极化器在 K 波段性能较为稳定,由于高频阵列单元之间的相对间距较大,极化器在 Ka 波段的插损在大角度下变高。

极化器在 $\varphi=0^{\circ}$ 和 $\varphi=90^{\circ}$ 入射面内不同角度极化波入射时,透射的圆极化波轴比和线至圆极化传输系数的测试结果如图 5(b)、图 5(d)所示。可以看出,在保证斜入射角 0°～25°范围内极化器响应稳定的情况下,透射波在 18.3～20.2 GHz(9.8%)频段内轴比小于 3 dB,极化器插损小于 1.5 dB;在 28.5～30.82 GHz(7.8%)频段内透射波轴比小于 3 dB。受限于 PCB 工艺加工精度与组装带来的位置偏差,以及层叠间的空气间隙,实测的极化器在两个频带的工作带宽相较于仿真结果有所恶化。同时由于工作频率较高,介质基板的损耗比厂商给出的在 10 GHz 的标称值高,这是极化器在 Ka 频段实测插损恶化的主要原因。

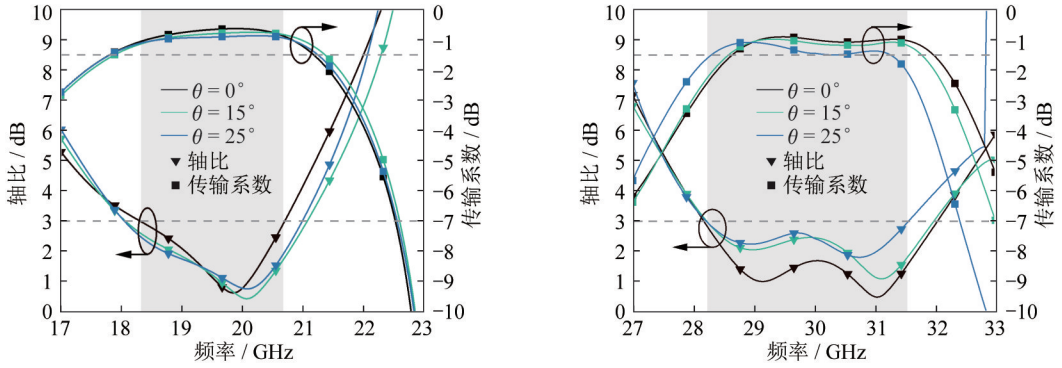
所设计的极化器和已报道的双频圆极化器的性能对比见表 2。相较于多层弯折线和频率选择表面结构,基于天线-移相器-天线结构通过改变接收层和发射层贴片形状,可以灵活地改变接收线极化波方向和发射圆极化波的旋向。与其他设计相比,所提的极化器表现了较宽的工作带宽。但所用层叠结构也会导致其在大角度入射情况下极化器性能恶化,因此后续研究将探索在大角度入射情况下极化器仍能稳定工作的宽带圆极化器设计。



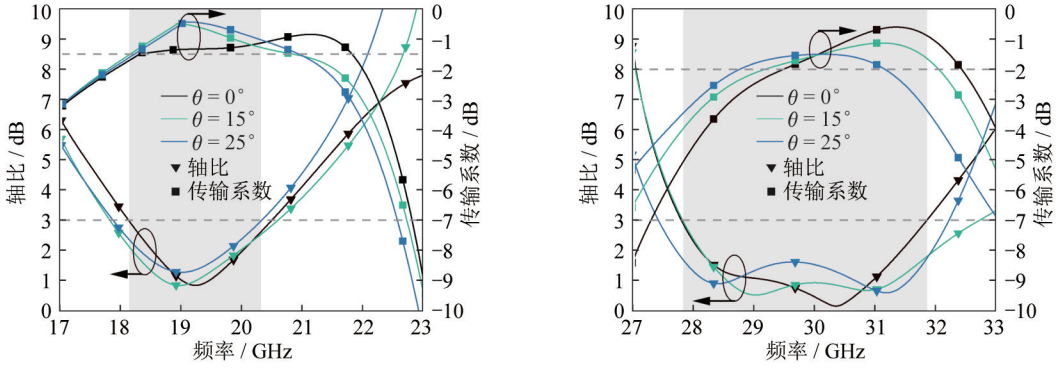
(a) $\varphi = 0°$ 入射面仿真结果



(b) $\varphi = 0°$ 入射面测试结果



(c) $\varphi = 90°$ 入射面仿真结果



(d) $\varphi = 90°$ 入射面测试结果

图 5　极化器在斜入射时仿真和测试结果(左图为 K 波段,右图为 Ka 波段)

Fig.5　Simulated and measured results of the polarizer under oblique incidence (left: K-band; right: Ka-band)

表 2　双频圆极化器性能比较

Tab.2　Performance comparison of the proposed dual-band circular polarizer and other polarizers available in the literature

方法	结构	中心频率/GHz	3 dB轴比带宽*/%	角稳定性/(°)
文献[14]	多层弯折线	19.95 29.75	2.50 1.68	30
文献[22]	频率选择表面	19.95 29.75	2.50 1.68	45 15
文献[23]	天线－移相器－天线	3.54 4.45	4.00 2.35	20
所提方法	天线－移相器－天线	19.25 29.66	9.80 7.80	25

注:*表示实测斜入射情况下的带宽。

4　结束语

采用天线-移相器-天线结构设计了一款工作在K/Ka双频带的线极化至圆极化转换器。实测数据表明,极化器展现了良好的转换性能。K与Ka频段下的工作带宽分别达到了9.8%和7.8%。该研究为K/Ka双频带应用提供了一种有效解决方案。优化的设计结构使得该转换器能够高效地实现线极化至圆极化的转换,并具备较宽的工作带宽,以适应广泛的应用需求。

参考文献

[1] MOMENI H A S M A,BEHDAD N.Wideband linear-to-circular polarization converters based on miniaturized-element frequency selective surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2016,64(2):525-534.

[2] 张路,燕锋,章跃跃,等.基于星间链路状态的低轨卫星网络路由算法[J].上海航天(中英文),2021,38(4):92-100.

[3] 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,2019,67(2):853-860.

[4] CHENG Y J,WANG J,LIU X L.94 GHz substrate integrated waveguide dual-circular-polarization shared-aperture parallel-plate long slot array antenna with low sidelobe level[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2017,65(11):5855-5861.

[5] ZHANG J D,WU W,FANG D G.Dual-band and dual-circularly polarized shared-aperture array antennas with single-layer substrate[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2016,64(1):109-116.

[6] CHEN C. A dual-band circularly polarized shared-aperture antenna for 1U cubesat applications[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022,70(5):3818-3823.

[7] MAO C X, JIANG Z H, WERNER D H, et al. Compact self-diplexing dual-band dual-sense circularly polarized array antenna with closely spaced operating frequencies [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2019,67(7):4617-4625.

[8] WINCZA K, GRUSZCZYNSKI S. Series-fed dual-band dual-polarized antenna lattice fed by slot-coupled power dividers [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2016,15:1065-1068.

[9] 谢辉,俞忠武.八单元圆形顺序旋转阵列的宽带双圆极化馈电网络[J].空间电子技术,2018,15(6):66-69.

[10] 孙慧峰,鄢泽洪,张小苗.双频点圆波导圆极化器优化设计[J].空间电子技术,2003(3):54-58.

[11] 汪洋,张明涛,弓金刚.一种新的双频圆极化器的设计[J].空间电子技术,2014(4):32-34.

[12] YOUNG L,ROBINSON L,HACKING C.Meander-line polarizer [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,1973,21(3):376-378.

[13] JOYAL M A,LAURIN J J.Analysis and design of thin circular polarizers based on meander lines [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2012,60(6):3007-3011.

[14] ZHAO J,CHENG Y J,HUANG T J,et al.A dual-band linear-to-circular polarization converter with robustness under oblique incidences [J]. Microwave and Optical Technology Letters,2020,63:361-366.

[15] EULER M,FUSCO V,CAHILL R,et al.325 GHz single layer sub-millimeter wave FSS based split slot ring linear to circular polarization convertor[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2010,58(7):2457 - 2459.

[16] ZHANG W,LI J Y,XIE J.A broadband circular polarizer based on cross-shaped composite frequency selective surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and

Propagation,2017,65(10):5623 - 5627

[17] MARTINEZ L L, RODRIGUEZ CUEVAS J, MARTINEZ LOPEZAND J I,et al.A multilayer circular polarizer based on bisected split-ring frequency selective surfaces[J].IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2014,13:153 - 156

[18] 郭一凡,姚夏元.基于椭圆孔阵列的频率选择表面研究[J].上海航天,2018,35(2):151-155.

[19] 韦黔,陈迪,刘米丰,等.毫米波段多层介质型频率选择表面设计与仿真[J].上海航天,2017,34(4):164-170.

[20] BOLSTER M F.A new type of circular polarizer using crossed dipoles [J]. IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques,1961,9(5):385-388.

[21] WANG H B, CHENG Y J. Single-layer dual-band linear-to-circular polarization converter with wide axial ratio bandwidth and different polarization modes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019,67(6):4296-4301.

[22] NASERI P, MATOS S A, COSTA J R, et al. Dual-band dual-linear-to-circular polarization converter in transmission mode application to K/Ka -band satellite communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2018,66(12):7128-7137.

[23] XIE J M,LI B,ZHU L.Dual-band circular polarizers with versatile polarization conversions based on aperture-coupled patch resonators [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2022,70(7):5584-5596.

[24] FEI P, SHEN Z, WEN X, NIAN F. A single-layer circular polarizer based on hybrid meander line and loop configuration[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2015,63(10):4609-4614.

[25] BLANCO D,SAULEAU R.Broadband and broad-angle multilayer polarizer based on hybrid optimization algorithm for low-cost Ka-band applications[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2018,66(4):1874-1881.

[26] ARNIERI E,GRECO F,AMENDOLA G.A broadband, wide-angle scanning, linear-to-circular polarization converter based on standard jerusalem cross frequency selective surfaces[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2021,69(1):578-583.

[27] FONSECA N J G,MANGENOT C.High-performance electrically thin dual-band polarizing reflective surface for broadband satellite applications[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2016,64(2):640 - 649.

[28] TANG W, MERCADER-PELLICER S, GOUSSETIS G,et al.Low-profile compact dual-band unit cell for polarizing surfaces operating in orthogonal polarizations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2017,65(3):1472 - 1477.

[29] DEL MASTRO M,ETTORRE M,GRBIC A.Dual-band, orthogonally-polarized LP-to-CP converter for SatCom applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2020,68(9):6764-6776.

[30] SOFI M A,SAURAV K,KOUL S K.Frequency-selective surface-based compact single substrate layer dual-band transmission-type linear-to-circular polarization converter[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2020,68(10):4138-4149.

[31] ERICSSON A,SJÖBERG D.Design and analysis of a multilayer meander line circular polarization selective structure [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2017,65(8):4089-4101.

[32] 王泽琦,汪敏,江扬杰.双极化全金属Vivaldi三角栅格阵列设计[J].微波学报,2023,39(S1):84-87.