

宽带高性能四脊波导圆极化器设计

王进^{*①} 杜彪^① 孙立杰^① 解磊^{①②}

^①(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

^②(西安电子科技大学天线与微波技术重点实验室 西安 710071)

摘要: 在射电望远镜和卫星通信天线中,圆极化器是关键部件之一。传统圆极化器在保证0.75 dB轴比时的相对带宽最多为41%,无法满足日益增长的宽频带应用需求。该文利用四脊波导的宽带特性,通过采用具有不同尺寸的水平脊和垂直脊,使四脊波导两个正交主模的相位常数不同,来实现宽带移相特性,并给出了一种宽带四脊波导圆极化器的设计方法。按照这一方法,设计了一款宽带C波段圆极化器,工作带宽为3.625~7.025 GHz,相对带宽64%。该文还研究了圆极化器主要参数变化对其性能的影响,加工并实测了一个圆极化器样机。实测结果显示,该圆极化器两个正交极化的反射损耗均小于-21 dB,相差 $90^\circ \pm 3.8^\circ$,相应的轴比小于0.6 dB。测试与仿真结果吻合良好,证明了分析与设计方法的正确性。

关键词: 天线;圆极化器;宽频带;四脊波导;敏感性分析

中图分类号: TN821

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)03-0611-08

DOI: 10.11999/JEIT180423

Design of Wideband High Performance Quad-ridge Waveguide Polarizer

WANG Jin^① DU Biao^① SUN Lijie^① XIE Lei^{①②}

^①(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

^②(Science and Technology on Antenna and Microwave Laboratory, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Circular polarizer is a key component in feed systems with circular polarization in radio astronomy telescope and satellite communication antennas. Conventional polarizers are capable of operating over a maximum bandwidth of 40% with an axial ratio value of 0.75 dB, which is unable to meet the growing demand for wide band applications. In this paper, the design of the wide band quad ridges waveguide polarizer is introduced, and the relationship between the phase constants of two orthogonal principal modes is analyzed. The broadband phase shift characteristics are achieved by employing different horizontal and vertical ridges dimensions. Based on this method, a C-Band polarizer is designed, which operates at 3.625~7.025 GHz, 64% bandwidth. The effects of main parameters on the polarizer performances are studied. A prototype of the polarizer is developed. The measurements of the prototype show that return losses are less than -21 dB for two orthogonal polarizations and the phase difference is $90^\circ \pm 3.8^\circ$, the corresponding axial ratio is less than 0.6 dB. Measured and simulated results show good agreements, thus validating the analysis and design methods.

Key words: Antenna; Circular polarizer; Wideband; Quad-ridge waveguide; Sensitivity analysis

1 引言

在卫星通信、射电天文、导航、电子对抗等领域,圆极化天线得到了广泛的应用,因此,圆极化

器技术一直是反射面天线馈源领域的主要研究内容之一。圆极化器用来将线极化信号转化为圆极化信号,是圆极化天线中的重要部件^[1]。随着卫星通信技术和下一代射电天文望远镜技术的发展^[2,3],更宽频带工作的需求越来越迫切,因此,宽频带圆极化器技术是宽带圆极化反射面天线馈源的关键技术之一。

圆极化器是决定天线圆极化性能的主要部件,波导圆极化器在圆极化反射面天线馈源系统中被广泛采用。常用的波导圆极化器型式有螺钉调节型、介质插片型、波纹型、隔板型和双脊波导型等。圆

收稿日期: 2018-05-04; 改回日期: 2018-10-10; 网络出版: 2018-11-01

*通信作者: 王进 15831969575@139.com

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2014AA123601), 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0100100)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (2014AA123601), The Bilateral Inter-Governmental Science and Technology Cooperation Proposal of China (2016YFE0100100)

波导螺钉极化器是在圆波导管壁内对称插入两排螺钉^[4,5], 螺钉长度按一定规律分布, 利用螺钉对平行于螺钉方向的极化波呈容性电纳而产生滞后的相位, 对垂直螺钉方向的极化波呈感性电纳而产生超前的相位, 可使两个正交极化波的相位差为 90° , 从而将线极化转化成圆极化, 螺钉圆极化器的成本低、形式简单、插入损耗小、但调试工作量大, 带宽在15%以内。介质插片型极化器是在圆波导内插入介质片^[6,7], 垂直或平行于介质插片的两正交极化波在传输时, 以不同的传播常数传播, 通过一定的距离后, 产生 90° 的相位差来实现圆极化, 介质插片极化器调试简单, 但介质损耗较大, 带宽在25%以内。波纹型圆极化器是在圆波导或方波导内加载金属膜片作为移相单元^[8-10], 使两个正交极化波的传播常数不同, 当加载的膜片达到一定数量时, 即可产生 90° 的相位差, 把线极化信号转化成圆极化信号。波纹极化器是目前文献中介绍较多的宽带圆极化器, 相对带宽可达到41%, 难点主要是对波纹的加工精度和对称度要求高。隔板型极化器是在圆波导或方波导中插入一个隔片^[11-16], 使圆波导或方波导在物理上由2端口网络变成3端口网络, 从矩形端口输入的信号通过隔片之后, 在公共端口产生两个幅度相等的正交极化波, 当两个正交极化波相位差 90° 时, 就会形成左旋圆极化或右旋圆极化信号, 它的主要特点是不需要外加正交模变换器就能够实现左、右旋双圆极化的同时工作, 具有结构紧凑、重量轻等优点, 隔板圆极化器经过优化设计相对带宽可以做到23%。双脊圆极化器是在波导轴向加载双脊构成^[17,18], 主要用于圆波导中, 脊的形式可设计成阶梯型脊或连续渐变型脊, 双脊圆极化器的带宽比较有限, 至多能做到15%。这些传统的圆极化器虽然各有特点, 在相应的领域有着广泛的应用, 且在各自的设计带宽内具有良好的圆极化特性。但在这些设计中, 保证0.75 dB轴比时的相

对带宽最多为41%, 这使得圆极化天线在要求更宽的带宽时, 传统方案无法满足要求。

本文利用四脊波导的宽带特性, 设计不同高度和宽度的两对正交脊, 以改变两个正交极化波的传播常数, 根据圆极化器的原理, 给出了宽带四脊波导圆极化器的设计方法。设计了一款宽带C波段圆极化器, 工作带宽为3.625~7.025 GHz, 相对带宽64%。为了加工制造的可实现性, 研究了圆极化器主要参数变化及容差与其性能的关系, 给出了圆极化器的加工工艺方法, 并加工和测试了圆极化器样机, 测试结果显示, 该圆极化器两个正交极化的反射损耗均小于-21 dB, 相差 $90^\circ \pm 3.8^\circ$, 相应的轴比小于0.6 dB, 测试与仿真结果吻合良好, 与已知文献中报道的圆极化器相比, 本文设计的圆极化器性能显著提高, 证明了设计方法的正确性。本文设计的圆极化器具有良好的宽带特性和圆极化特性, 可广泛用于卫星通信和射电天文望远镜等领域的宽频带天线, 并且该圆极化器设计方法可用于其他频段圆极化器的设计。

2 四脊波导圆极化器设计原理

本文设计的圆极化器结构示意图如图1所示。该圆极化器为在方波导内壁上加载4个脊片, 相对壁上的脊尺寸相同, 垂直脊与水平脊的尺寸不同, 四脊波导到方波导的变换通过改变脊的高度实现阻抗匹配。

圆极化波是由两个幅度相等, 相位差为 90° 的正交线极化波合成实现的。对四脊波导圆极化器, 当电磁波 E_1 (或 E_2)与脊成 45° 角激励方波导时, 如图1(a)所示, 可分解为两个等幅同相的正交极化分量 E_x 和 E_y , 其中 E_x 平行于垂直脊, E_y 平行于水平脊。 E_x 和 E_y 通过圆极化器的脊波导区域时, 由于垂直脊与水平脊的尺寸不同, 对两个正交极化分量 TE_{10} 和 TE_{01} 模分别产生两个相位常数 β_x 和 β_y , 当通

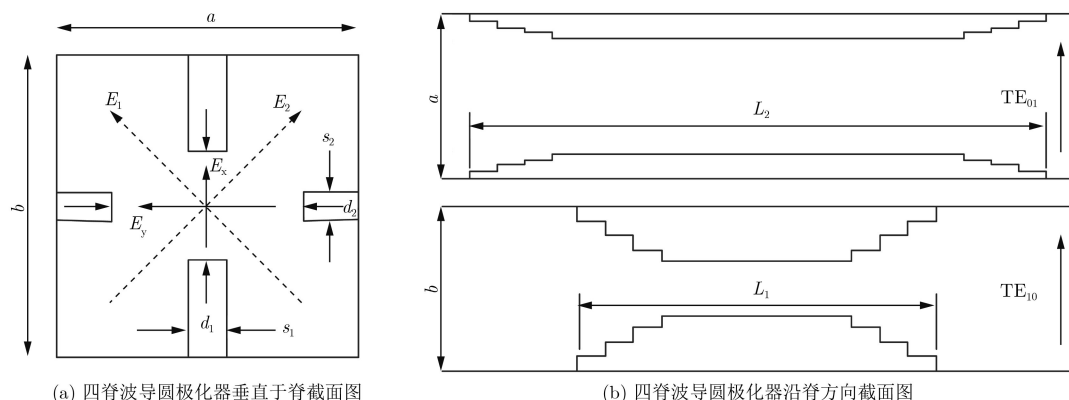


图1 四脊波导圆极化器结构示意图

过一定的长度 L 后, 产生 90° 的相位差, 形成圆极化波, 即

$$\Delta\Phi = (\beta_x - \beta_y) \times L = 90^\circ \quad (1)$$

根据微波理论可知, 在波导系统中, 相位常数满足式(2):

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \left[1 - (\lambda/\lambda_{cr})^2 \right]^{-1/2} \quad (2)$$

其中, λ 是自由空间中的波长, λ_{cr} 是波导的截止波长。

因此, 通过改变波导的截止波长, 即可改变电磁波在波导内的相位常数。对两个正交的模式, TE_{10} 和 TE_{01} 模, 要得到不同的相位常数, 只需改变两个模式在波导内的截止波长。根据式(1)和式(2)可知, 两个模式的截止波长差值越大, 相位常数差值越大, 在相同的长度内可以增大相位差也越大; 在相位差一定的情况下, 可以缩短长度。通过合适地选择波导内两个正交模式的截止波长和圆极化器的长度, 即能满足总的相位差为 90° 。

根据脊波导的性质, 当方波导口径尺寸一定时, 四脊波导 TE_{10} 和 TE_{01} 模的截止波长和相位常数只与脊间距 d 和脊厚度 s 有关, 由此可知, 通过合适地设计四脊波导垂直脊与水平脊的脊厚度 s 、脊间距 d 和脊长度 L , 可使两个正交模式的相位差为 90° 。本文采用电磁仿真软件CST计算四脊波导两个正交主模的截止频率, 进而用式(2)可计算各自相位常数。对于表1所示的四脊波导结构, 由CST计算的 TE_{10} 模和 TE_{01} 模的截止频率分别为2.08 GHz和3.14 GHz, 模式的场分布如图2所示。

表1 四脊波导结构参数值(mm)

参数	a	b	d_1	d_2	s_1	s_2
数值	45	45	13	31	7	4

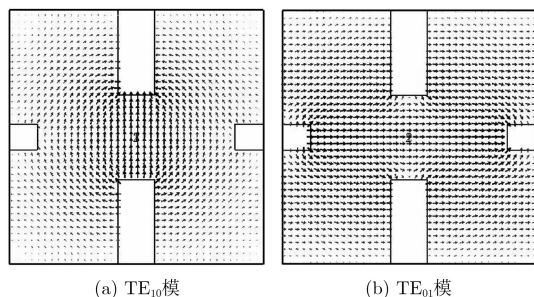


图2 四脊波导 TE_{10} 和 TE_{01} 模场分布图

3 四脊波导圆极化器设计

为了验证上述分析方法的正确性, 结合工程需要, 本文设计了一种C波段圆极化器, 如图3所示, 其工作频率为3.625~7.025 GHz。圆极化器的设计可分为两个步骤: 一是根据工作频率先设计脊

波导圆极化器的结构尺寸参数, 包括方波导口径和脊尺寸的初始参数。二是把圆极化器的初始尺寸值作为优化参数, 以两个模式的反射损耗小于-23 dB (驻波小于1.15), 相差 $90^\circ \pm 3^\circ$ (轴比小于0.5 dB) 为目标优化, 得到圆极化器的最终值。

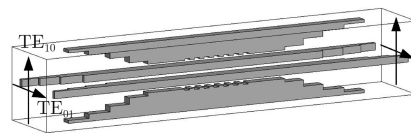


图3 四脊波导圆极化器仿真模型

(1) 四脊波导圆极化器是在方波导的四壁上加载尺寸不同的脊, 因此方波导口径 a 的选取即决定着信号能否正常传输。它的选取原则为既要保证在最低工作频率上主模不能截止, 又要选取尽可能小的口径使传输的高次模数量尽可能少。根据方波导理论, TE_{10} 和 TE_{01} 模为两个正交的主模, 如果自由空间波长 λ_0 满足式(3), 则波导中只能传播主模 TE_{10} 和 TE_{01} 模。

$$\lambda_{c,20} < \lambda_0 < \lambda_{c,10} \quad (3)$$

式中, $\lambda_{c,10}$ 为 TE_{10} 模的截止波长, $\lambda_{c,20}$ 为 TE_{20} 模的截止波长。

此时方波导的主模工作频带约为一个倍频程, 即

$$\frac{c}{2a} < f < \frac{c}{a} \quad (4)$$

其中, c 是自由空间中的光速, f 是工作频率, a 是方波导边长。实际工作中, 当工作波长给定后, 总是选择波导尺寸使之工作在主模工作区, 并且远离截止的区域。因为在临近截止频率时, 由式(2)可知, 相位常数随频率的变化率较快, 不利于移相器的设计。本文以工作频带3.625~7.025 GHz的方波导为例, 图4给出了当最小工作频率 $f_L = 3.625$ GHz分别是方波导截止频率的 $1.01f_{c,10}$, $1.06f_{c,10}$, $1.09f_{c,10}$, $1.12f_{c,10}$ 和 $1.17f_{c,10}$ 时, 相位常数随频率的变化曲线。根据仿真计算, 当工作频率 $f_L > 1.09f_{c,10}$ 时, 相位常数随频率的变化率能较好地实现圆极化器的

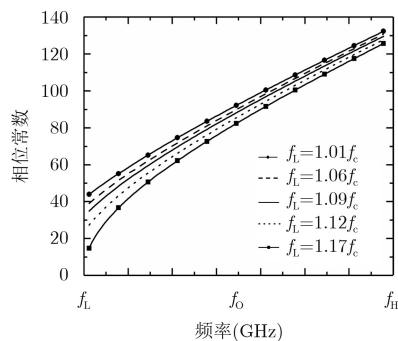


图4 相位常数随频率的变化曲线

设计, 本文选取的方波导口径尺寸值为 $a = 0.55\lambda_L$, λ_L 为最低工作频率在自由空间中的波长。

(2) 脊尺寸 s_1, s_2, d_1, d_2 决定了两个正交模式的截止波长和相位常数。而根据式(2), 只有使两个模式的相位常数有一定的差值, 才能通过一段波导距离后产生 90° 的相位差。脊尺寸 s_1 和 s_2, d_1 和 d_2 的差值不宜过小, 否则两个模式的相位常数差值较小, 会增加圆极化器的长度。本文的设计选取 $s_1 = 0.08\lambda_L, s_2 = 0.05\lambda_L, d_1 = 0.13\lambda_L, d_2 = 0.40\lambda_L$ 为初值, 然后通过优化确定最终值。

(3) 脊波导过渡的设计, 由于圆极化器的移相段为脊波导, 为了便于与圆口径喇叭和正交模耦合器相连, 需要设计脊波导到方波导的过渡波导来改善匹配。该圆极化器的相对工作带宽为64%, $f_H/f_L = 1.94$, 其中 f_H 为工作频带的最高频率, f_L 为工作频带的最低频率。对于方波导, 高次模 TE_{11}, TM_{11} 的截止频率为 $1.414f_{c,10}$, 会落在工作频带内, 不连续性会造成高次模的出现, 因此在确定脊波导到方波导的过渡段时, 其长度决定了出现高次模的幅度, 如果长度过短, 不连续性变化较大, 形成的高次模量较大; 反之, 过渡段长度太长, 则整个圆极化器的长度将过长, 不符合小型化设计理念。本文采用 $1/4$ 波长阻抗变换器的方法得到脊波导到方波导阶梯过渡段的初始参数, 其中垂直脊是4阶过渡, 水平脊是3阶过渡, 通过仿真优化的方法确定过渡段的最终尺寸。

表2列出了优化后四脊波导圆极化器几个主要参数的值。

表2 四脊波导圆极化器主要参数表(mm)

参数	a	b	d_1	d_2	s_1	s_2	L
数值	47.13	47.13	12.93	32.24	6.84	4.67	207

4 参数分析和工艺设计

利用电磁仿真软件CST对圆极化器的主要参数进行仿真分析与研究。首先研究了垂直脊厚度 s_1 、水平脊厚度 s_2 、垂直脊间距 d_1 和水平脊间距 d_2 变化对圆极化器相位特性的影响, 研究了参数变化与极化器性能之间的关系和规律, 在相位差不满足要求时, 如何调整各个参数。在仿真分析过程中, 研究一个参数时, 其他参数保持不变, 并且由于各参数的尺寸取值大小不同, 对各参数变化量的取值也不同, 其中 s_1, s_2, d_1, d_2 为优化后的值。

图5给出了圆极化器相位差随垂直脊厚度 s_1 的变化, 随着 s_1 的增大, 低频点相位差略有增加, 高频点几乎没有影响, 在 s_1 变化0.2 mm的情况下, 整

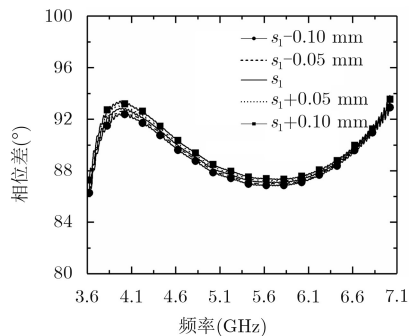


图5 垂直脊厚度 s_1 对圆极化器性能的影响图

个频带内相位差的最大变化幅度小于 1° , 说明该参数变化对极化器相位特性的影响较小。

图6给出了圆极化器相位差随水平脊厚度 s_2 的变化, 随着 s_2 的增大, 相位差变小, 低频点相位差的变化幅度大于高频点的变化幅度, 在 s_2 变化0.2 mm的情况下, 整个频带内相位差的最大变化幅度小于 3° , 说明该参数变化对极化器相位特性的影响大于 s_1 的影响。

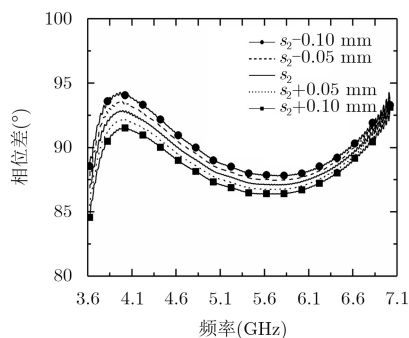


图6 水平脊厚度 s_2 对圆极化器性能的影响

图7给出了圆极化器相位差随垂直脊间距 d_1 的变化, 随着 d_1 的增大, 相位差变小, 低频点相位差的变化幅度与高频点相位差的变化幅度大致相等, 在优化值变化 ± 0.6 mm的范围内, 整个频带内相位差变化基本为一线性变化趋势。

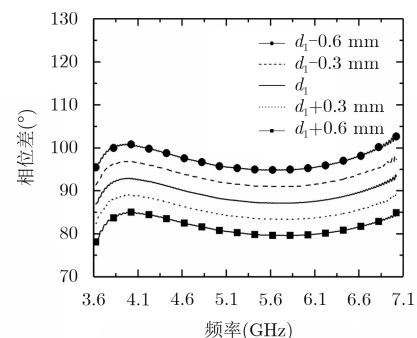


图7 垂直脊间距 d_1 对圆极化器性能的影响

图8给出了圆极化器相位差随水平脊间距 d_2 的变化, 随着 d_2 的增大, 相位差变大, 低频点相位差

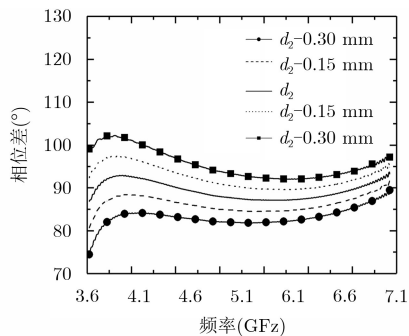


图8 水平脊间距 d_2 对圆极化器性能的影响

的变化幅度大于高频点的变化，在 d_2 变化0.3 mm的情况下，整个频带内相位差的最大变化为 10° ，在变化值相等的情况下， d_2 变化对极化器相位特性的影响大于 d_1 的影响。

由以上分析可得，改变圆极化器的参数，两个正交主模式的相位差变化情况各不相同，因此通过调整圆极化器的主要参数，并利用参数变化引起的相位差变化的互补作用，能够使两个正交主模式在工作频带内实现平坦的相位差，满足 $90^\circ \pm 3^\circ$ 。

其次研究了主要参数的加工误差圆极化器性能的影响，在实际加工过程中，各个尺寸必然会存在加工误差，误差的存在必然会影响到圆极化器的性能。结合圆极化器的加工工艺，分析了实际加工实现过程中出现误差的情况下，圆极化器性能的变化。对于对称结构的波导器件，通常需要采用分块加工的方法，将模型拆分成可以利用精密机加工工艺实现的独立零件，然后通过螺钉连接和焊接将其固定。本文采用了分块加工工艺技术进行设计，基于圆极化器的对称结构，模块数目少、整体性强的原则，模型被分割为4个独立的部分，两种模块，如图9所示，采用定位销和螺钉将4个模块连接固定，最后焊接法兰盘。根据目前精密机械加工误差一般能保证在 ± 0.03 mm时，其对圆极化器匹配性能和相位

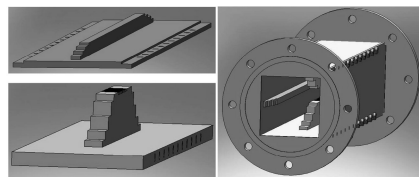


图9 圆极化器结构与加工工艺设计

特性的影响。

分两种情况分析容差的影响，一是加工模型的关键尺寸 s_1, s_2, d_1, d_2 误差均为 $+0.03$ mm或为 -0.03 mm时，圆极化器性能的改变，二是 s_1, d_2 误差为 $+0.03$ mm, s_2, d_1 误差为 -0.03 mm和 s_1, d_2 误差为 -0.03 mm, s_2, d_1 误差为 $+0.03$ mm时，圆极化器性能的改变，根据参数扫描的结果， s_1, d_2 增大，相位差增大，反之相位差减小， s_2, d_1 增大，相位差减小，反之相位差增大，因此这种情况对相位差影响最大。

图10给出了尺寸误差均为 $+0.03$ mm或为 -0.03 mm情况下的圆极化器性能变化。图中实线为在各尺寸为优化值情况下，圆极化器的性能值。在误差全为 $+0.03$ mm的情况下，相位差偏小 0.6° ，在误差全为 -0.03 mm情况下，相位差偏大 0.6° ，而两个正交的 TE_{10} 和 TE_{01} 模式的反射损耗基本不变。仿真结果表明，在该种情况下，圆极化器性能基本保持不变。

图11给出了 s_1, d_2 误差为 $+0.03$ mm, s_2, d_1 误差为 -0.03 mm和 s_1, d_2 误差为 -0.03 mm, s_2, d_1 误差为 $+0.03$ mm情况下的圆极化器性能变化。图中实线为在各尺寸为优化值情况下，圆极化器的性能值。在 s_1, d_2 误差为 $+0.03$ mm, s_2, d_1 误差为 -0.03 mm的情况下，相位差偏大 2.4° ，在 s_1, d_2 误差为 -0.03 mm, s_2, d_1 误差为 $+0.03$ mm情况下，相位差偏小 2.4° ，而两个正交的 TE_{10} 和 TE_{01} 模式的反射损耗基本不变。

以上分析结果可以看出，加工误差的存在对相位差有一定的影响，对反射损耗基本无影响。在加

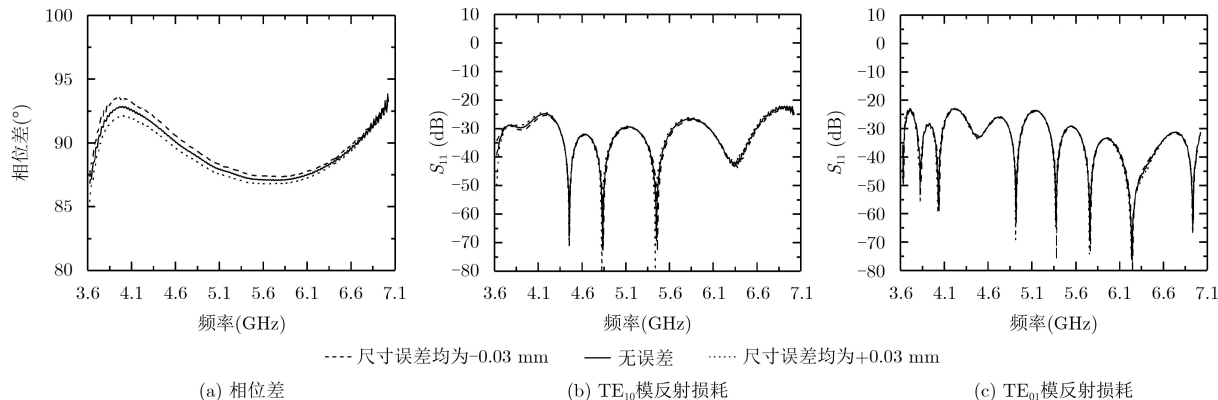


图10 s_1, s_2, d_1, d_2 误差均为 $+0.03$ mm或为 -0.03 mm情况下对圆极化器性能影响

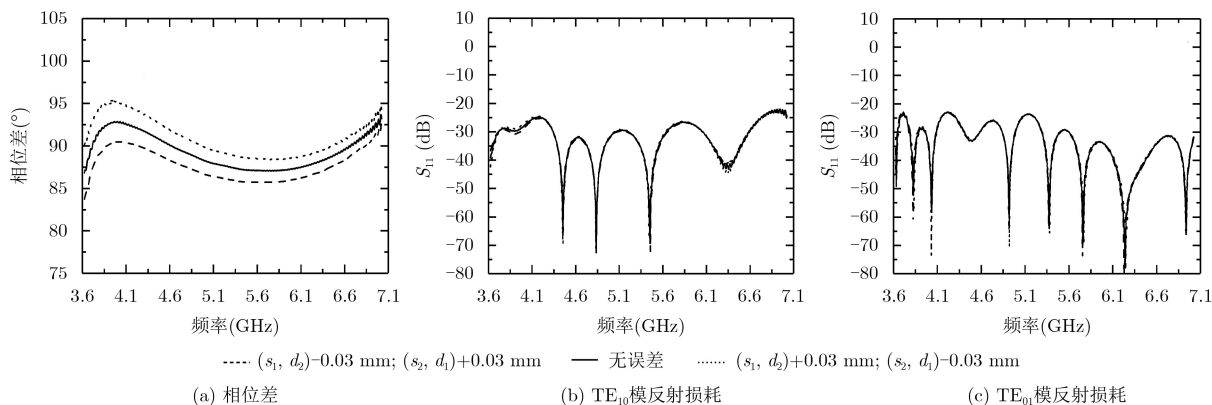


图 11 s_1, d_2 误差为+0.03 mm, s_2, d_1 为-0.03 mm和 s_1, d_2 为-0.03 mm, s_2, d_1 为+0.03 mm情况下对圆极化器性能影响

工时, s_1, d_2 和 s_2, d_1 取相同的正误差或负误差, 对圆极化器的性能影响小, 如果误差值相反则对圆极化器性能影响较大, 这一特性对加工具有重要的指导作用。以上分析说明, 控制好各个关键尺寸的误差取值, 在加工精度 ± 0.03 mm情况下, 该圆极化器具有很高的加工可实现性。

5 测试结果

为了验证分析和设计的正确性, 按上述计算结果和工艺设计方法, 加工了C波段圆极化器样机, 如图12(a)所示。利用中国电科40所AV3629矢量网络分析仪对圆极化器的反射损耗和相位特性进行了测试, 图12(b)–12(d)给出了仿真结果和测量结果对比情况。

图12(b)和图12(c)为圆极化器反射损耗的仿真结果与实测结果。由图可看出, 测试的反射损耗在工作频带内小于-21 dB, 仿真结果小于-22.5 dB, 测试值大于仿真值。由第4节中的分析可知, 加工

误差对反射损耗影响很小, 存在偏差的主要原因, 一是在测试圆极化器的反射损耗时, 需要使用圆矩过渡波导以便与定向耦合器相连, 二是圆极化器的另一个端口要接吸收负载, 三是圆矩过渡波导和吸收负载均不可能做到完全匹配和完全吸收。

图12(d)给出了圆极化器相位差的仿真与实测值。从图中可以明显地看出, 实测结果与仿真结果十分接近, 天线在整个频带内相位差 $90^\circ \pm 3.8^\circ$, 达到了设计的目的。造成实测结果与仿真结果的细小差别的原因, 一是存在着加工和装配误差, 二是在测试时测试件间的连接和电缆的抖动都会引起一定的相位误差。

表3给出了本文设计的四脊波导圆极化器与其他型式圆极化器的实测性能比较结果, 可以看出, 四脊波导圆极化器在满足反射损耗优于-21 dB, 轴比优于0.6 dB的情况下, 相对带宽达到了64%, 而其他型式的圆极化器在同时满足这两个条件的情况

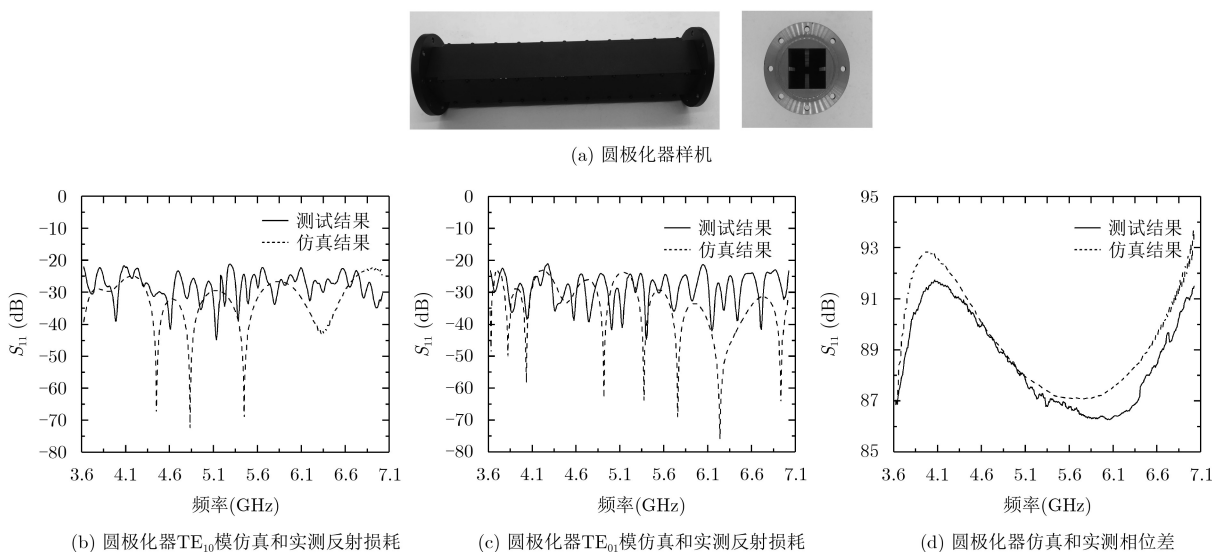


图 12 圆极化器样机照片和性能仿真与测试结果

表3 四脊波导圆极化器与其他型式圆极化器的实测性能比较

圆极化器类型	相对带宽(%)	反射损耗(dB)	相位平坦度	轴比(dB)	来源
螺钉极化器	15	≤ -20	$90^\circ \pm 3^\circ$	≤ 0.50	文献[4,5]
介质极化器	25	≤ -20	$90^\circ \pm 4.5^\circ$	≤ 0.75	文献[6,7]
波纹极化器	41	≤ -24	$90^\circ \pm 4^\circ$	≤ 0.60	文献[8-10]
隔板极化器	23	≤ -25	$90^\circ \pm 5^\circ$	≤ 0.75	文献[11-16]
双脊极化器	15	≤ -25	$90^\circ \pm 3^\circ$	≤ 0.50	文献[17,18]
四脊极化器	64	≤ -21	$90^\circ \pm 3.8^\circ$	≤ 0.60	本文

下, 带宽最宽的为波纹极化器, 相对带宽41%。虽然四脊波导圆极化器的带内反射损耗不是最优的, 但小于-21 dB的实测反射损耗, 已经达到了一个较高的性能。总体而言, 四脊波导圆极化器不仅带宽有了大幅度的提升, 其他指标也具有良好的性能, 能够更加广泛地应用于宽带圆极化馈源系统中。

6 结论

本文利用四脊波导的宽带特性, 给出了宽带四脊波导圆极化器的设计方法, 并按照该方法设计了一款宽带高性能C波段圆极化器, 工作带宽为3.625~7.025 GHz, 相对带宽64%, 实测反射损耗小于-21 dB, 相差 $90^\circ \pm 3.8^\circ$, 与已知文献中报道的圆极化器相比, 设计的圆极化器性能显著提高。对圆极化器的主要参数研究表明, 这种四脊波导结构的圆极化器能够加工实现。通过对圆极化器样机的测试, 测试与仿真结果吻合良好, 证明了设计方法的正确性。本文设计的圆极化器具有良好的宽带特性和低轴比特性, 可广泛用于卫星通信和射电天文望远镜等领域的宽频带工作需求, 并且该圆极化器设计方法可用于其他频段圆极化器的设计。

参考文献

- [1] RAHMAT-SAMII Y and DENSMORE A C. Technology trends and challenges of antennas for satellite communication systems[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(4): 1191-1204. doi: 10.1109/TAP.2014.2366784.
- [2] 王进, 杜彪, 焦永昌, 等. 宽频带四端口馈源网络系统设计[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1313-1318. doi: 10.11999/JEIT160918.
WANG Jin, DU Biao, JIAO Yongchang, et al. Design of broadband 4-port feed network system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1313-1318. doi: 10.11999/JEIT160918.
- [3] 陈卯蒸, 刘奇, 马军, 等. 大口径射电望远镜超宽带接收机发展[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47(5): 1-13. doi: 10.1360/SSPMA2016-00505.
CHEN Maozheng, LIU Qi, MA Jun, et al. Ultra-wideband receiver technology development for radio astronomical large aperture telescope (in Chinese)[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, 47(5): 1-13. doi: 10.1360/SSPMA2016-00505.
- [4] SUBBARAO B and FUSCO V F. Compact coaxial-fed CP polarizer[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2004, 3(1): 145-147. doi: 10.1109/LAWP.2004.831084.
- [5] 施阳, 石志东, 李铭祥, 等. 8 mm 波导螺钉圆极化器的设计与优化[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2007, 13(2): 134-137. doi: 10.3969/j.issn.1007-2861.2007.02.006.
SHI Yang, SHI Zhidong, LI Mingxiang, et al. Design and optimization of waveguide circular polarizer using 8 mm adjustable metal screws[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2007, 13(2): 134-137. doi: 10.3969/j.issn.1007-2861.2007.02.006.
- [6] WANG S W, CHIEN C H, and WANG C L. A circular polarizer designed with a dielectric septum loading[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, 52(7): 1719-1723. doi: 10.1109/TMTT.2004.830487.
- [7] ZHANG T L and YAN Z H. A Ka dual-band circular waveguide polarizer[C]. 7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory, Guilin, China, 2006: 1-4. doi: 10.1109/ISAPE.2006.353406.
- [8] USHIJIMA Y, YUKAWA H, YONEDA N, et al. Dual band rectangular waveguide polarizer using corrugated/elongated conductive plates for Ka-band[C]. 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, Germany, 2017: 520-523. doi: 10.23919/EuMC.2017.8230904.
- [9] 王海伦, 李斌. K波段宽带圆极化器设计[J]. 天文研究与技术, 2015, 12(4): 455-460. doi: 10.3969/j.issn.1672-7673.2015.04.010.
WANG Hailun and LI Bin. A design of a K-band circular polarizer[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2015, 12(4): 455-460. doi: 10.3969/j.issn.1672-7673.2015.04.010.
- [10] 贾茹, 李斌. 天马望远镜Ka波段宽带圆极化器研制[J]. 天文研究与技术, 2017, 14(4): 488-494. doi: 10.14005/j.cnki.issn.1672-7673.20170922.002.
JIA Ru and LI Bin. Development of Ka-band wideband circular polarizer[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2017, 14(4): 488-494. doi: 10.14005/j.cnki.

- issn1672-7673.20170922.002.
- [11] CHAKRABARTI S. Microwave conical horn antenna with dual circular polarization—Close-form design equations[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2018, 28(7): 1–9. doi: [10.1002/mmce.21398](https://doi.org/10.1002/mmce.21398).
- [12] 向小春, 张宇环, 金伟清, 等. 一种Ka频段金属膜片圆极化器设计[J]. *无线电工程*, 2017, 47(11): 59–62. doi: [10.3969/j.issn.003-3106.2017.11.13](https://doi.org/10.3969/j.issn.003-3106.2017.11.13).
XIANG Xiaochun, ZHANG Yuhuan, JIN Weiqing, et al. A design of Ka-band metal waveguide iris circular polarizer[J]. *Radio Engineering*, 2017, 47(11): 59–62. doi: [10.3969/j.issn.003-3106.2017.11.13](https://doi.org/10.3969/j.issn.003-3106.2017.11.13).
- [13] LEAL-SEVILLANO C A, COOPER K B, and RUIZ-CRUZ J A. A 225 GHz circular polarization waveguide duplexer based on a septum orthomode transducer polarizer[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(5): 574–583. doi: [10.1109/TTHZ.2013.2264317](https://doi.org/10.1109/TTHZ.2013.2264317).
- [14] 史俊, 殷晓星, 仲伟业. K波段低轴比的隔板式极化器[J]. *微波学报*, 2017, 33(6): 21–24. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.201706005](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.201706005).
SHI Jun, YIN Xiaoxing, and ZHONG Weiye. Band septum polarizer with low axial ratio[J]. *Journal of Microwaves*, 2017, 33(6): 21–24. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.201706005](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.201706005).
- [15] HASEGAWA Y, HARADA R, TOKUDA K, et al. A new approach to suppress the effect of machining error for waveguide septum circular polarizer at 230 GHz band in radio astronomy[J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2017, 38(5): 638–652. doi: [10.1007/s10762-017-0364-3](https://doi.org/10.1007/s10762-017-0364-3).
- [16] JAZANI G and PIRHADI A. Design of dual-polarised (RHCP/LHCP) quad-ridged horn antenna with wideband septum polariser waveguide feed[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, 12(9): 1541–1545. doi: [10.1049/iet-map.2017.0611](https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0611).
- [17] MANUILOV M B and KOBRIN K V. Dual band compact polarizer based on ridged sections in square waveguide[C]. 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, Saratov, Russia, 2016: 1–5. doi: [10.1109/APEDE.2016.7878900](https://doi.org/10.1109/APEDE.2016.7878900).
- [18] MANUILOV M B and KOBRIN K V. Fast and accurate technique for CAD of ridge waveguide polarizers[C]. Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS), St.Petersburg, Russia, 2017: 1181–1183. doi: [10.1109/PIERS.2017.8261926](https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8261926).
- 王 进: 男, 1983年生, 博士生, 高级工程师, 研究方向为微波无源器件、天线馈电网络与馈源技术.
- 杜 彪: 男, 1962年生, 博士生导师, 研究员, 研究方向为反射面天线和高效率馈源、阵列天线和超材料天线等.
- 孙立杰: 男, 1985年生, 工程师, 研究方向为微波无源器件、天线馈电网络.
- 解 磊: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为卫星通信天线与馈源技术.