

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.06.014

基于回折线极化器技术的 VICTS 天线全极化可调实现

文忠¹, 袁龙¹, 郭庆功²

(1. 成都国恒空间技术工程有限公司, 成都 610041; 2. 四川大学电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 提出了一种新的基于多层回折线结构的 VICTS 天线极化实现方式, 首次采用两个回折线极化器级联的方式, 以一个统一的极化器结构, 在一副 VICTS 天线上实现线极化补偿和线/圆极化转化功能. 天线无需更换极化器, 即可实现线极化和圆极化的自由切换. 设计了一个直径 $D=100$ mm 的模型, 验证了这种全极化可调方案的正确性.

关键词: 回折线极化器; VICTS 天线; 全极化可调

中图分类号: TN **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2020)06-1110-06

A meanderline-based polarizer technique for the implementation of a full-polarization tunable of VICTS antennas

WEN Zhong¹, YUAN Long¹, GUO Qing-Gong²

(1. Chengdu Guoheng Space Technology and Engineering Company LTD, Chengdu 610041, China;
2. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A new method based on multi-layer meander-line structures to implement the expected polarization of VICTS antennas was introduced. A cascade of two meander-line polarizers with a unified structure was employed for the first time, which could achieve the functionality of linear polarization compensation and linear to circular polarization conversion on the same VICTS antenna. Without the need of polarizer replacement, free switch between linear polarization and circular polarization was achievable. A model with the diameter of 100 mm was designed, and the correctness of the full-polarization tunable scheme was verified.

Keywords: Meander-line polarizers; VICTS antennas; Full-polarization tunable

1 引言

VICTS 天线是一种基于连续横向枝节(CTS)概念衍生出来的可用于“动中通”通信的新型无源平板相控阵天线, 具有低剖面、高增益、扫描范围大、机械稳定性高、成本低和易于批量制造等优点, 特别适合微波和毫米波频段的应用. 相对于其他种

类的“动中通”通信天线, 可适应各种机动平台、跟踪速度快以及扫描范围大的 VICTS 天线具有先天性的优势.

近年来, 学术界对 VICTS 天线的工作原理和应用方式开展了广泛的研究. 文献[1, 2]从阵列天线原理出发, 建立了 VICTS 辐射方向图的数学模型, 对 VICTS 天线的工作原理开展了深入的研究.

收稿日期: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(61877041)

作者简介: 文忠(1976-), 男, 四川泸州人, 博士, 高级工程师, 研究方向为雷达信号处理、阵列天线信号处理、电磁场与微波技术、卫星通信、卫星导航、信息安全等. E-mail: 67030173@qq.com

通讯作者: 郭庆功. E-mail: guoqingong@scu.edu.cn

文献[3]提出了一种利用可旋转脊波导缝隙阵列馈电实现波束扫描的 VICTS 天线方案, 可实现 $\pm 30^\circ$ 的俯仰面波束扫描. 文献[4]设计了一个基于馈电层和 CTS 辐射层相对旋转实现天线辐射的工作于 60 GHz 的 VICTS 天线, 口径效率可达 62%, 可实现 $\pm 60^\circ$ 俯仰面扫描. 近年来面向工程应用有学者就 VICTS 天线的实现方式进行了广泛的探索, 设计了多种不同形式的 VICTS 天线^[5-7]. 但上述研究均未涉及到 VICTS 天线的极化匹配问题. 由于 VICTS 天线是一种线极化天线, 且其极化方向随着波束扫描而改变, 在“动中通”应用中, 必须设计一个极化层进行 VICTS 天线的极化补偿或转换.

文献[8]特别设计了一个针对 CTS 天线的空间极化匹配装置. 文献[9,10]基于模式匹配技术和递归 T 矩阵的线极化旋转器分析方法, 采用一种周期金属线形式的极化装置, 在各自工作频段实现了超宽频带内的 45° 极化旋转. 文献[11,12]分别基于金属回折线极化器, 实现了宽频带的线/圆极化转换. 文献[13]提出了一种采用方形环阵列实现线/圆极化转换的可行方案. 不过, 这些方案均只能实现一种极化方式, 而在某些卫星通信频段, 需要终端天线在不更换馈源的前提下, 能在线极化和圆极化两种模式中自由切换. 因此, 要求终端天线既能在线极化模式下工作, 又具备圆极化功能, 迫切需要一种能够实现线极化和圆极化的自由切换的极化器.

本文提出了一种基于回折线极化器技术的 VICTS 天线全极化可调的实现方案, 采用两个回折线极化器, 可在不同工作模式下分别实现线极化和圆极化. 为了验证这种方法的正确性, 设计了一个工作在 Ka 频段的全极化可调 VICTS 天线, Ansoft HFSS 的仿真结果达到了设计指标的要求.

2 天线描述

全极化可调 VICTS 天线的结构如图 1, 它由 4 个部分组成: 一个 VICTS 天线、一个极化滤波器和两个回折线极化器.

VICTS 天线由下层的准 TEM 波馈电层和上层的辐射单元阵列组成, 两个部分通过矩形过渡结构实现耦合. VICTS 天线上下两层采用平行波导技术, 并不直接接触, 通过电机控制, 可以很轻易实现一个角度 φ 的相对旋转, 在辐射单元产生相位梯度, 从而获得波束扫描能力.

极化滤波器是一种由周期性金属平行线构成

的极化选择表面, 该结构在 Rogers RT5880 基板上实现, 采用泡沫/蜂窝进行支撑, 能够抑制由于 VICTS 天线旋转而产生的交叉极化分量, 提高天线的极化隔离度.

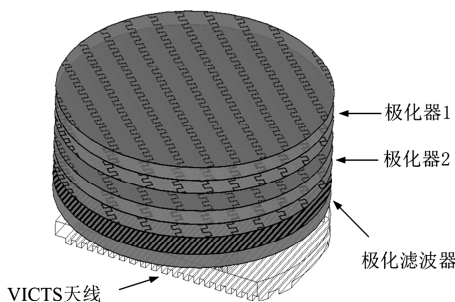


图 1 全极化可调 VICTS 天线结构图

Fig. 1 The diagram of a full-polarization tunable VICTS antenna

在本天线系统中, 采用了两个相同的回折线极化器单元, 每一个极化器单元都具备将设计频率的入射线极化波转换为圆极化波的功能. 本文所提到的全极化可调正是通过这两个相同回折线极化器单元实现的.

全极化可调 VICTS 天线是模块化的, 各个部分可以分开设计和优化. 本文不会对 VICTS 天线的设计进行详细描述, 下面就回折线极化器电路分析与设计、圆极化工作模式和线极化工作模式等几个部分展开研究.

3 回折线极化器电路模型

回折线极化器是一种由金属回折线格栅构成的周期性结构, 通常由 3 到 4 层级联构成, 层间距一般为四分之一波长, 以获得最大的带宽. 回折线极化器的主要几何参数包括: 层间距 d , 基板厚度 h , 金属线宽度 t , 回折结构宽度 w , 螺距 p 以及周期 s , 如图 2 所示.

在实际应用中, 通常与线极化天线配合使用, 能够在宽频带获得优异的轴比性能和驻波性能. 此外, 可利用标准印制板 (Printed Circuit Board, PCB) 工艺实现低成本制造. 层与层之间一般采用低损耗泡沫、聚氨酯蜂窝或塑料环支撑. 回折线极化器是一个各向异性结构, 当入射平面波照射到该极化器上时, 平行于金属回折线轴线的电场表现为感性, 垂直于金属回折线轴线的电场表现为容性. 为了实现线极化到圆极化的转化, 入射电场必须与回折线轴线呈 45° (图 3(a) 中的 x 轴), 这样, 入射平面波的电场被分解为两个正交的等幅同相分量:

E_{\perp} 和 E_{\parallel} , 其中, \perp 和 \parallel 分别指垂直和平行于回折线轴线的方向. 从成本、插入损耗和带宽综合考虑, 回折线极化器一般为三层, 等效电路模型如图 3(b) 所示. 在这个电路模型中, 没有考虑两个正交极化之间的耦合, 这个假设是合理的, 因为回折线表面产生的交叉极化很小. 图 3(b) 中的等效电路被设计为传输系数为 $|\tau|=1$, 传输相位差为 90° , 这样就能够确保入射线极化波能够无损耗地转换为回折线极化器输出端口处的圆极化波.

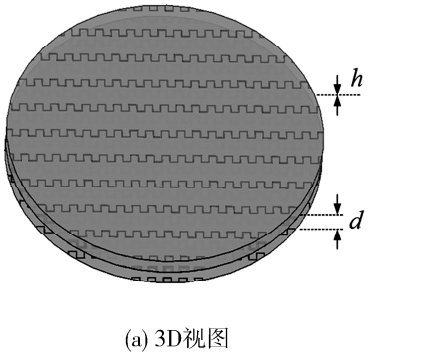


图 2 回折线极化器几何参数

Fig. 2 The geometric parameters of meander-line polarizers

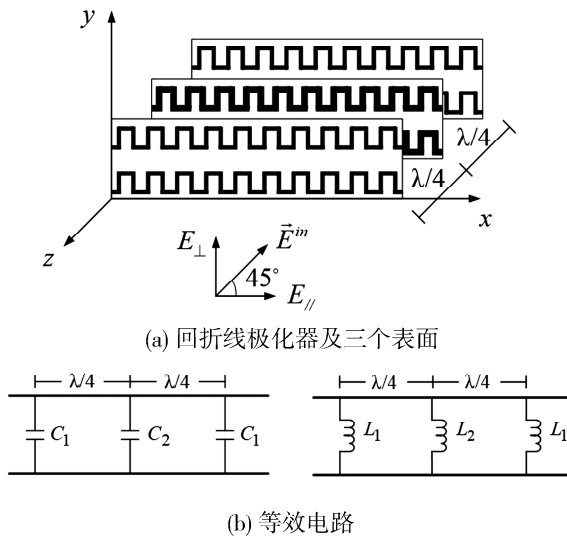


图 3 回折线极化器及其等效电路模型基

Fig. 3 The meander-line polarizers and its equivalent circuit models

为利用图 3(b) 中的等效电路设计圆极化器, 考虑图 4 描述的通用等效电路模型. 其中, b_1, b_2 为

归一化导纳, 对于电容, 归一化电纳为 $b_C = \omega C Z_0$; 对于电感, 归一化电纳为 $b_L = -Z_0 / \omega L$. 其中, $Z_0 = 377 \Omega$, 为自由空间波阻抗.

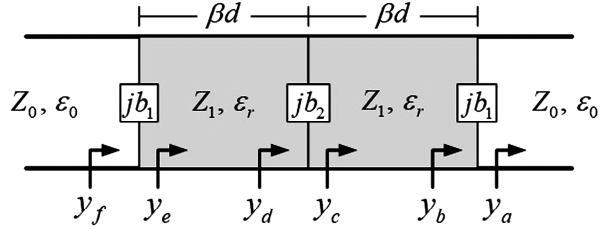


图 4 单个极化(⊥或//)电路模型
Fig. 4 Circuit model of the single(⊥or//)polarization

为了满足传输系数 $|\tau|=1$ (或 $|\Gamma|=0$), 对于一个给定层间距为 $\theta = \lambda/4$ 的回折线极化器, 根据传输线理论并结合回折线极化器的对称性, 其等效电路各参数之间的关系可表示为

$$y_a = \frac{Z_1}{Z_0} \tag{1}$$

$$y_b = y_a + j b_1 \tag{2}$$

$$y_c = \frac{y_b + j \tan \theta}{1 + j y_b \tan \theta} \tag{3}$$

$$b_2 = -2 \text{Im}(y_c) \tag{4}$$

这样, b_1 和 b_2 的关系可以表示为

$$b_2 = \frac{2 b_1}{y_a^2 + b_1^2} \tag{5}$$

此外, 电磁波在通过回折线极化器产生的传输相位差可以表示为

$$\theta_I = 2 \arctan(b_1/2) + \arctan(b_2/2) \tag{6}$$

由圆极化形成条件 $\Delta\varphi = |\varphi_{\perp} - \varphi_{\parallel}| = 90^\circ$ 并假设回折线极化器之间的支撑材料的特性阻抗 $Z_1 = Z_0$, 就可以求得 b_1 和 b_2 的关系.

一般, 为了使回折线的带宽最宽, 要求如下.

$$\varphi_{\perp} = -45^\circ, \varphi_{\parallel} = +45^\circ \tag{7}$$

这样, 则可得到层间距为 $\lambda/4$, 支撑材料特性阻抗近似等于空气的三层回折线极化器的等效电路参数如下式.

$$b_{1\perp, \parallel} = \pm 0.439, b_{2\perp, \parallel} = \pm 0.736 \tag{8}$$

4 圆极化器设计和圆极化模式

为了验证这种电路模型的正确性, 设计了一个工作在 19.45 GHz 的三层回折线极化器. 每一层金属回折线图案均被蚀刻在 5 mil 厚的 Rogers RT5880 ($\epsilon_r = 2.2, \tan \delta = 0.0009$) 介质基板上以减小损耗, 铜厚为 $t_{Cu} = 0.035 \text{ mm}$, 相邻层之间采用厚度为 3.8 mm 的 Rohacell 71HF 泡沫 ($\epsilon_r = 1.093$,

$\tan \delta \approx 0.01$) 支撑.

采用无限周期阵列理论和 Floquet 模式展开方法, 将圆极化器当作是一个无限周期阵列, 运用 Ansoft HFSS 对该圆极化器进行设计和优化. 对每一层金属回折线的尺寸和图案进行单独调整, 以从它们的反射系数 $\Gamma(\perp, \parallel)$ 得到它们的归一化导纳 $b(\perp, \parallel)$. 不过, 在对回折线极化器进行设计时, 需要有以下考虑: 首先, 为了避免栅瓣的产生和更高的 Floquet 模式的传输, 每一个金属回折线表面的晶格单元必须选择足够小; 其次, 在极化器设计过程中没有考虑层与层之间的耦合, 即使只有 TE_{00} 和 TM_{00} 两个模式传播, 当更高阶消逝模在相邻层的位置电平足够高的情况下, 也会对极化器的响应产生影响. 这样, 通过减小晶格单元尺寸来增加高阶模式的衰减显得尤其重要; 最后, 相邻表面越近, 高阶模式对于极化器的响应影响越大. 因此, 在对回折线极化器的每一层进行单独设计后, 需要对完整的极化器进行数值仿真和优化, 以获得预期的响应. 完整的三层回折线极化器晶格单元如图 5 所示.

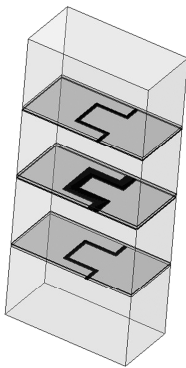


图 5 三层回折线极化器晶格单元模型
Fig. 5 Model of the three layers meander-line polarizer unit cell

图 6 为入射电磁波斜入射时, 回折线极化器的轴比性能, 从图 6 可以看出, 当斜射角在 $T=0 \sim 70^\circ$ 变化时, 轴比可在 17.7~21.2 GHz 的范围内保持在 3 dB 以下, 可确保在 VICTS 进行波束扫描时的极化匹配.

当需要 VICTS 天线工作在圆极化时, 将两个回折线极化器切到圆极化模式, 它们与极化滤波器的相对旋转坐标关系如图 7 所示.

在圆极化模式下, 入射电场 \vec{E}_{inc} 分别与极化滤波器、回折线极化器 1 和回折线极化器 2 呈 90° (垂直), 90° (垂直), 45° 夹角, 仅回折线极化器 2 起到

移相作用, 回折线极化器 1 的作用与极化滤波器一致. 与仅采用一个回折线极化器的 VICTS 天线相比, 轴比性能和回波损耗几乎一致, 仅增加了回折线极化器 1 的插入损耗.

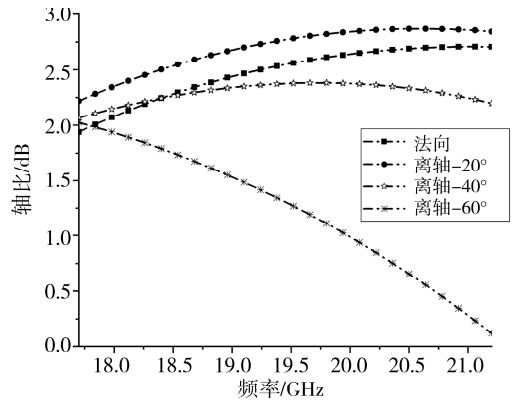


图 6 回折线极化器轴比性能(17.7~21.2 GHz)
Fig. 6 The axial ratio performance of the meander-line polarizer(17.7~21.2 GHz)

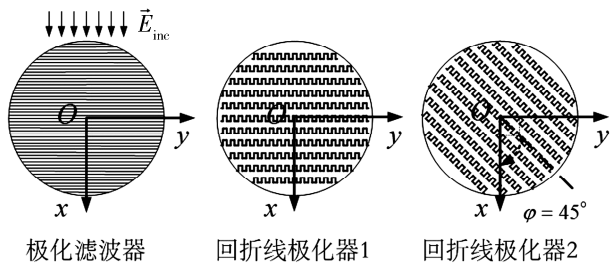


图 7 VICTS 天线各层相对旋转坐标关系(圆极化模式)
Fig. 7 The relative rotation coordinates of each layer of the VICTS antenna(circular polarization mode)

5 线极化模式

当 VICTS 天线与线极化卫星进行通信时, 需要对 VICTS 天线进行极化补偿. 这样, 就要求 VICTS 天线具有线极化可调的能力. 在线极化模式, 两个回折线极化器与极化滤波器的相对旋转坐标关系如图 8 所示.

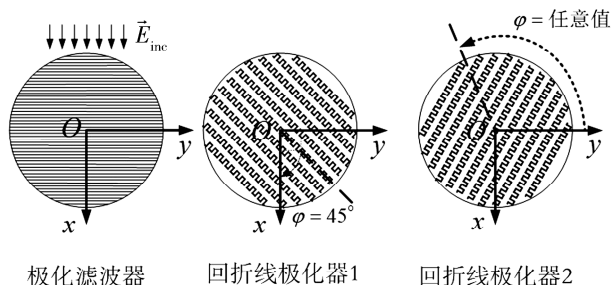


图 8 VICTS 天线各层相对旋转坐标关系(线极化模式)
Fig. 8 The relative rotation coordinates of each layer of the VICTS antenna(linear polarization mode)

在线极化模式下,入射电场 \vec{E}_{inc} 分别与极化滤波器、回折线极化器 1 和回折线极化器 2 呈 90° (垂直), 45° 夹角以及任意夹角值,回折线极化器 1 起到将线极化入射波转换为圆极化波的作用,而回折线极化器 2 的作用是将回折线极化器 1 输出的圆极化波再次转化为线极化波.线极化波的极化角可以通过旋转回折线极化器 2,改变回折线极化器 1 和回折线极化器 2 之间的相对夹角实现.

为了验证这种方案的正确性,对一个直径 $D=100$ mm 的 VICTS 天线进行了仿真,具体仿真结果见表 1.其中, T_1 为回折线极化器 1 与入射电场的相对夹角, T_2 为回折线极化器 1 与回折线极化器 2 的相对夹角, T_{AP} 为极化角.

表 1 线极化模式下,极化角与回折线极化器之间的关系

Tab.1 In linear polarization mode, the relation between polarization angle and meander-line polarizer

T_1	T_2	theta	phi	T_{AP}
45°	90°	3°	180°	5.29°
45°	70°	3°	180°	21.29°
45°	50°	3°	180°	38.32°
45°	30°	3°	180°	58.37°
45°	10°	3°	180°	79.22°
45°	0°	3°	180°	89.66°

从表 1 可以看出,当在 VICTS 天线上集成回折线极化器 1 和回折线极化器 2,线极化工作模式下,可以实现任意极化角的调整,极化角与 T_2 的关系近似满足 $T_1 + T_{AP} = 90^\circ$,这与预期吻合.

6 结 论

本文提出了一种新的基于多层回折线结构的 VICTS 天线极化实现方式.与传统极化器不同,该方案首次采用两个回折线极化器级联的方式,在一个 VICTS 天线上实现线极化补偿功能和线/圆极化转化功能的自由切换.这种设计可在宽频带内实现大俯仰扫描范围的极化自适应匹配,根据卫星信号的不同极化方式,自动进行匹配/切换,且加工简单,易于批量化生产.基于本文提出的方案,对采用两个回折线极化器,直径 $D=100$ mm 的 VICTS 天线进行了仿真,分别给出了圆极化模式和线极化模式的仿真结果,仿真结果与预期非常吻合,证明了这种设计的正确性.此外,该方案是首次在 VICTS 天线中实现,在其他文献报道中未见相关研究,对

于 VICTS 天线全极化可调具有一定的指导意义.

参考文献:

- [1] Porter B G. Closed form expression for antenna patterns of the variable inclination continuous transverse stub [C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston: IEEE, 2010.
- [2] Jun G, Xue L. Theoretical model for patterns of VICTS antenna [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT). Chengdu: IEEE, 2017.
- [3] Lu X L, Gu S M, Wang X C, *et al.* Beam-scanning continuous transverse stub antenna fed by a ridged waveguide slot array [J]. IEEE Antenn Wireless Propag, 2017, 16:1675.
- [4] Karim T, Jiro H, Ronan S, *et al.* Wide-band and large coverage continuous beam steering antenna in the 60-GHz band [J]. IEEE T Antenn Propag, 2017, 65: 4418.
- [5] Rui S H, Yu J C, Ya F W. Shared-aperture variable inclination continuous transverse stub antenna working at K-and Ka-Band for mobile satellite communication [J]. IEEE T Antenn Propag, 2020, 68: 1.
- [6] Zheng L, Xue L. On polarization matching algorithm of VICTS antenna [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT). Chengdu: IEEE, 2017.
- [7] Wei M, Liu J, Li H, *et al.* Design of a variable inclination continuous transverse stub array [C]//Proceedings of the International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Hangzhou: IEEE, 2018.
- [8] Stankovsky A V, Litinskaya Y, Alexandrin A M, *et al.* Spatial polarizers for CTS structure-based antenna arrays [C]//Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. Moscow: IEEE, 2019.
- [9] Rafal L, Mateusz M, Jerzy M. Analysis and design of a polarizer rotator system [J]. IEEE T Antenn Propag, 2008, 56: 844.
- [10] Wafa A A, Msaeed K. Design of a multilayer 45-degree wideband polarizer (6-18 GHz) [C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Atlanta: IEEE, 2019.
- [11] Joyal M A, Laurin J J. Analysis and design of thin

- circular polarizers based on meanderlines [J]. IEEE T Antennas Propag, 2012, 60:3007.
- [12] Fran G, Emilio A, Gia A, *et al.* Dual band dual circularly polarized antenna with a meanderline polarizer [C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Boston: IEEE, 2018.
- [13] Toufid M H, Hidayath M. Broadband single-layered, single-sided flexible linear-to-circular polarizer using square loop array for s-band pico-satellites [J]. IEEE T Antenn Propag, 2019, 67: 149262.

引用本文格式:

中文: 文忠, 袁龙, 郭庆功. 基于回折线极化器技术的 VICTS 天线全极化可调实现 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 1110.

英文: Wen Z, Yuan L, Guo Q G. A meanderline-based polarizer technique for the implementation of a full-polarization tunable of VICTS antennas [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2020, 57: 1110.