[文章编号] 1003－4684(2025)01-0037-06

一种对跖形超宽带 Vivaldi 曲面共形天线

丰 励，付梦晗

（湖北工业大学电气与电子工程学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 针对平面 Vivaldi 天线在曲面载体应用中范围受限问题，提出了一种对跖形 Vivaldi 曲面共形天线。相较于平面天线，此天线能够应用于弧形或球形等一些曲面载体。该天线初步设计是对平面天线辐射臂两侧的椭圆形导体底部添加正弦函数形状，以改善阻抗特性，调整天线的阻抗匹配。基于此，在此平面天线的基础上进行曲面共形，将两个辐射单元分别覆于曲面介质基板的上下方，仿真结果表明该天线在共形后，曲面天线的回波损耗相比平面 Vivaldi 天线更小，在增益方面，未共形时的 Vivaldi 天线在工作频段内的峰值增益大于 10 dBi，在 13 GHz 时的最大增益为 13.83 dBi，共形后的 Vivaldi 天线在 7 GHz 时增益能达到 12.88 dBi，可知曲面天线在相同带宽内较平面天线的回波损耗性能更好，且适用于曲面载体的应用。

[关键词] 超宽带；Vivaldi 天线；回波损耗；通信系统

[中图分类号] TN82 [文献标识码] A

在现代无线通信系统中，天线作为一种发射或接收电磁波的单元，能够实现自由空间电磁场和导播系统电磁场之间的转换，因此被广泛应用于卫星导航、雷达系统和医疗设备等领域[1]。传统的平面 Vivaldi 天线虽然能够满足日常应用，但仅适用于平面载体，而应用于曲面载体时，需考虑到天线对载体的贴合，且天线需小型化，防止天线的传输能量发生损耗。目前，随着科学技术的迅速发展，无线电系统的带宽也随之不断扩展[2]，超宽带（ultra wideband，UWB）天线已成为天线领域的研究热点之一。而 Vivaldi 天线普遍用在高速无线通信、高分辨率成像系统和射频干扰等领域，主要因为 Vivaldi 天线不仅适用于超宽带（UWB）信号，生产制造方便，重量轻还易于匹配馈线阻抗[3-5]。目前，Vivaldi 天线的主要研究方向是减小天线尺寸、改善辐射特性和扩大阻抗带宽[6]。为了达到这些目的，已经提出了许多方法。

Vivaldi 天线最早是由 Gibson[7] 在 1979 年提出，即指数型槽线天线，随后 Gazit[8] 在此基础上提出了一种基于低介电常数衬底和对极槽线跃迁的类似天线结构，这种天线结构更加简单，与原始方案相比，提供了更宽的带宽。文献[9-10]中提出了几种对拓的 Vivaldi 天线结构。此类型天线的几何形状设计过于复杂，不仅影响制造成本，还可能由于制造过程中的误差和磨损造成测量结果的不准确性，因为孔径的粗细会对阻震天线的辐射特性产生影响[11]。文献[12-14]中提出了几种不同的椭圆对极 Vivaldi 天线，这些方案能够增强射频特性，但使得天线的几何形状变得复杂，而在决定相关辐射特性方面，天线粗细的轮廓起着关键性作用。

上述文献在一定程度上提到了天线的带宽问题，但随着超宽带技术的发展，要求天线带宽和增益具备更佳的性能，通过以上研究，了解到超宽带天线的应用领域较为广泛，本文提出了一种对跖形超宽带 Vivaldi 曲面共形天线，主要为了提高超宽带天线的低频辐射特性和带宽等其他参数的稳定性，并且能够较好地实现天线小型化，且能够用于曲面载体，即椭圆形辐射贴片底部用正弦形状加载于天线终端来改善天线性能，并对该设计天线进行共形，与传统 Vivaldi 天线相比，天线在共形后能具备良好的带宽性能，且相较于平面 Vivaldi 天线的工作频段内回波损耗更低，表明回波损耗性能更好，改善了平面 Vivaldi 天线局限于对曲面载体的应用，适用于无线通信系统。

1 天线设计

1.1 Vivaidi 天线的基本结构

Vivaldi 天线是一种具有超宽带、定向辐射、低

[收稿日期] 2023－01－06

[基金项目] 国家自然科学基金(41601399)；博士科研启动基金(BSQD2020011)

[第一作者] 丰 励(1982－)，男，湖北武汉人，湖北工业大学副教授，研究方向为微波遥感。

[通信作者] 付梦晗(1996－)，女，河南商丘人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为射频电路。

交叉极化、低副瓣的天线。结构特征表现为具有弧形槽线的缝隙结构天线，它的辐射单元通常具有一个渐变的开口槽，开口大小和开口长度之间呈指数规律分布，因此天线的槽线为指数形式渐变线，这种指数形式槽线使得 Vivaldi 天线有更宽的带宽[15]。传统的天线模型图如图 1 所示，其蓝色部分为介质基板，橙色部分为金属层。该天线将金属层覆盖在介质基板的两面，并在金属层蚀刻出圆形槽线开路腔和渐变指数槽线组成的金属缝隙结构。通常圆形槽线开路腔用于阻抗匹配，而电磁波沿着渐变指数槽线逐渐辐射至自由空间。

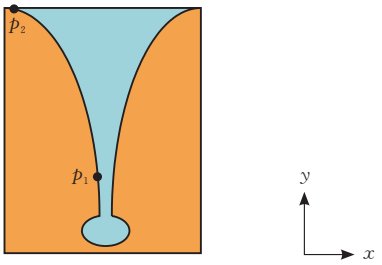

图 1 Vivaldi 天线模型

天线处于工作状态时，电磁波开始进行传输，当渐变指数槽线开口较小时，电磁波的能量就会被天线的金属贴片束缚，且此时天线的辐射较弱，然而当电流沿着指数渐变槽线传输至开口较大位置时，金属贴片就会减弱对电场的束缚，从而使电场信号在开口处可向自由空间辐射。因此，天线的指数渐变槽线的最小距离决定天线的最高工作频率，最大开口距离限制天线的最低工作频率。

1.2 Vivaidi 天线的工作原理

Vivaldi 天线的槽线为指数型渐变槽线，因此要比普通的槽线天线具有更宽的带宽。在图 1 中，天线的指数渐变锥型槽是由 p_1 和 p_2 定义的，$p_1(x_1, y_1)$ 为槽线的起点，$p_2(x_2, y_2)$ 为槽线的终点，渐变指数槽线的设计方程可表示为：

$$y = C_1 e^{Kx} + C_2 \tag{1}$$

式中：K 为指数曲线的增长率，C_1、C_2 表示为常数，即

$$C_1 = \frac{y_1 - y_2}{e^{Kx_2} - e^{Kx_1}} \tag{2}$$

$$C_2 = \frac{y_2 e^{Kx_1} - y_1 e^{Kx_2}}{e^{Kx_2} - e^{Kx_1}} \tag{3}$$

本文在传统 Vivaldi 天线的基础上对金属辐射贴片做了改善，将天线辐射面设计为常用的椭圆形带状分布，通常使两个椭圆形导体分别加载于辐射臂两侧，本文在该设计的基础上又将辐射臂下方用正弦函数形状导体分布加载，主要目的是为了改善天线的阻抗特性，针对正弦形加载的公式如下：

$$y = c\sin(\omega t - q) - d \tag{4}$$

在 Vivaldi 天线设计过程中，馈电方式尤为重要，馈线的匹配直接影响着天线的带宽性能。Vivaldi 天线作为一种行波天线，通常自身的带宽就相对较宽，但阻抗带宽被限制的问题仍旧存在，如在低频处受到横向开口尺寸的影响，高频处则受到指数线起始部分大小的影响。但是在天线设计过程中，指数的起始点是与馈线相连，因而 Vivaldi 天线带宽的高频部分是由馈电点处的设计决定的。本设计中的对跖 Vivaldi 天线采用的是微带－平行双线过渡结构，从天线馈电端到天线末端的电阻以线性或指数关系增大变化，使得流经天线的电流能够从馈电开端处到天线末端逐渐减小至零，便可消除天线末端的电流反射，故将对数方程应用到微带渐变线的曲率设计中，满足以下公式：

$$y = a\ln(bt) - d \tag{5}$$

意在表明通过增加天线辐射部分的有效电长度改善天线性能，且此类型设计在宽带电路中结构较为简单，具有良好的阻抗特性和稳定性。

2 天线设计

2.1 平面 Vivaldi 天线结构

传统的 Vivaldi 天线通常是由渐变锥形缝隙结构组成的金属层覆盖在介质基板上，天线因受到有限尺寸和馈电结构的影响，其带宽性能受到限制。为使 Vivaldi 天线更好地实现带宽匹配，获得较大的传输能量，在传统 Vivaldi 天线的基础上，采用正弦函数和椭圆形状阻抗加载的方法对平面 Vivaldi 天线结构展开设计。如图 2 所示，灰色部分为介质基板，蓝色和橙色部分为金属层，分别分布在介质基板的正反面。

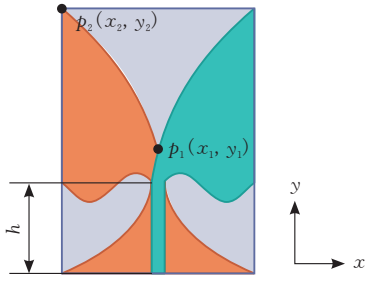

图 2 Vivaldi 天线结构

平面 Vivaldi 天线的介质基板选用介电常数 $\varepsilon = 2.2$，厚度为2 mm的 Rogers5880 材料，介质基板的损耗角正切值为 0.0009，天线的整体尺寸为 180 mm×90 mm，两边的辐射臂分别加载两个类似椭圆形的扇叶，扇叶底部使用正弦函数形状的正弦边界可有效改善天线的阻抗特性，h 为正弦函数的均值距离底部高度，微带线采用从辐射贴片根部到介质基板底端的渐变结构对天线进行馈电，因平行

双线具有对称结构，在宽带电路中结构较为简单，而微带线过渡到平行双线时，能够与金属平板间的电势差保持不变，具有良好的平衡性和稳定的传输特性。

2.2　平面 Vivaldi 天线仿真优化

利用基于有限元法的 ANSYS HFSS 软件对本文所提出的对跖 Vivaldi 超宽带天线进行建模仿真和优化设计。通过对本文 Vivaldi 天线的参数研究，发现以正弦函数为边界的对地高度 h 对天线的性能参数有较大影响，为了评估此参数，在保证天线模型其他参数不变的情况下，对变量 h 进行了参数研究，通过调整图 2 所示的正弦曲线，不同取值的 h 对天线的模拟反射系数 S_{11} 如图 3 所示。

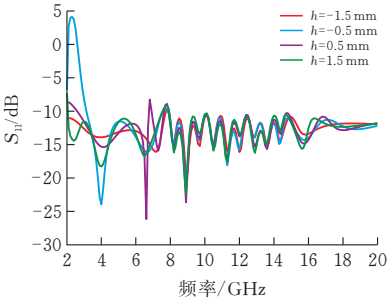

图 3　天线对地高度 h 的优化

图 3 对比了不同参数 h 得出的回波损耗，即 S_{11}。相较于其他 h 参数值优化结果，可以明显看出当参数 h ＝－1.5 mm 时，Vivaldi 天线在低频段实现了更小的回波损耗，尤其是在 2～4 GHz，相比其他参数，此时天线的回波损耗波动较小，且处于－10 dB下方，说明了此时 Vivaldi 天线在低频处的带宽性能满足本文设计天线，阻抗匹配方面较为可观，且当参数 h ＝－1.5 mm 时，在 2～20 GHz 的整个频率范围内，天线的回波损耗（S_{11}）全部在－10 dB以下，达到了天线设计的预期目标，因此本文所提出的对跖 Vivaldi 天线可以在 2～20 GHz 的理想频率范围内工作。

通过对上述结果分析，可以看出金属层底端正弦函数对天线的回波损耗影响颇大，因此对平面 Vivaidi 天线的回波损耗和增益进行仿真分析，当 h ＝－1.5 mm 时，天线的回波损耗如图 4 所示，可以看出天线的回波损耗性能较好，在整个频率范围内的浮动达到了理想状态，实现了超宽带特性。

在保证天线参数不变的情况下，天线的增益效果如图 5 所示。

从以上结果可以看出，当 h ＝－1.5 mm 时，平面 Vivaldi 天线的回波损耗达到了理想范围，且天线增益也处于稳定上升趋于平稳的一个状态，即未共形时的 Vivaldi 天线在工作频段内的峰值增益大

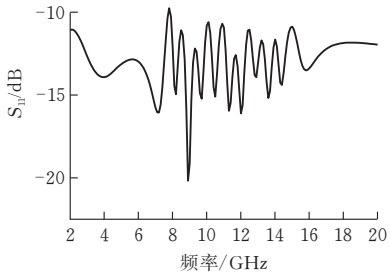

图 4　平面 Vivaldi 天线的回波损耗

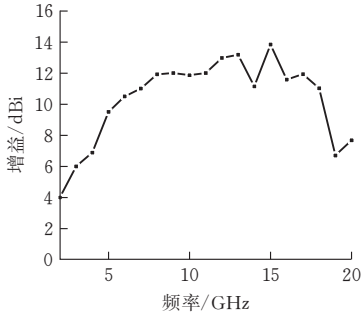

图 5　平面 Vivaldi 天线的增益

于 10 dBi，在 13 GHz 时的最大增益为 13.83 dBi，说明此时天线基本实现了初期设计指标范围。

3　Vivaldi 天线共形与仿真

3.1　曲面共形天线结构

曲面共形天线结构主体是由平面天线和介质基板基体组成，在保证平面 Vivaldi 天线参数不变的情况下，共形天线与载体结构表面外形保持一致，在不搭载对象引入额外负担和影响载体的外形结构等特征下将平面天线共形。结构上表现为将平面 Vivaldi 天线的两个辐射单元与曲面基体紧密贴合，由图 2 共形后的天线可知，其中橙色辐射单元覆于曲面基体的上表面，蓝色辐射单元覆于曲面基体的下表面，馈电采用对称的平行双线结构保证超宽带天线的平衡性能。共形后的曲面基体为导电材料，同平面天线一样采用的厚度为 2 mm 的 Rogers5880 材料，基底呈圆柱曲面形状起到支撑天线的作用，整个基板宽度 w ＝180 mm，弯曲高度为 47.7 mm，曲面天线的整个横跨距离 d ＝260 mm，采用介质基板的介电常数和损耗角正切值与平面 Vivaldi 天线相同，即介电常数 ε ＝2.2，损耗角正切值 $\tan\theta$ ＝0.009。曲面共形后的天线如图 6 所示。蓝色和橙色为金属层分别贴附在曲面介质基板的正反面，同平面 Vivadi 天线一样采用的是微带－平行双线结构对曲面天线馈电，这种曲面结构的方式可以很好地应用于弧形载体。

当平面 Vivaldi 天线与共形基体连接时，因整个共形后的天线基体变形较小，需要考虑天线覆于曲面基体时天线的延展性会对参数性能产生一定的

影响，故对曲面天线的参数指标进行分析。

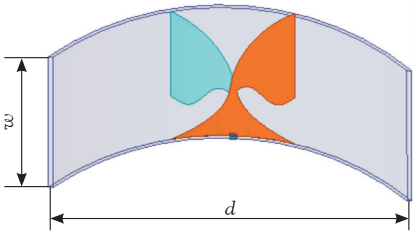

图 6 共形后的曲面天线

3.2 曲面天线仿真

在平面天线所有参数保持不变的情况下，对平面 Vivaldi 天线共形，弧形界面主要目的是为了可供曲面载体应用。为保证此设计的可行性，对共形后的曲面天线模型仿真，回波损耗如图 7 所示。

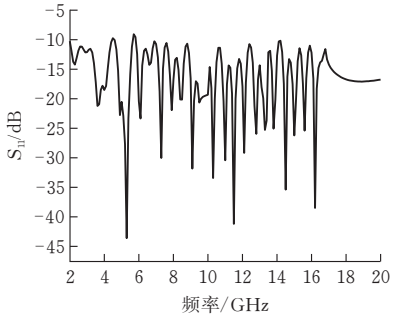

图 7 曲面天线回波损耗

结果显示，曲面天线在全波段 2～20 GHz 内的回波损耗全部低于－10 dB 以下，最低达到－40 dB 左右，相较于平面天线，测得的曲面天线的回波损耗在全频段内效果更好，实现了所设计天线的有效带宽，基本达到天线的预期状态。

同时对曲面天线的增益也做了分析，曲面天线增益如图 8 所示。

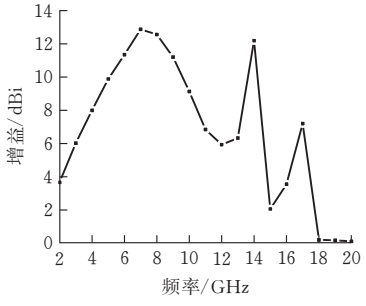

图 8 曲面天线增益

由图 8 可以看出曲面天线的增益在低频 2～7 GHz时处于上升状态，且共形后的 Vivaldi 天线在 7 GHz 时增益能达到 12.88 dBi，在 6～12 GHz 处于下降状态，且在高频 18～20 GHz 时增益趋近于零，因而曲面天线的增益在高频时效果较差，考虑到天线共形时受到弯曲程度和材料延展性的影响，共形后的天线增益会发生衰减，在前半段频率范围内天线增益依旧很高，后半段频率范围内开始发生衰减。

4 仿真结果对比分析

对两款天线的仿真结果做出比较分析，平面天线和曲面天线的回波损耗仿真如图 9 所示。

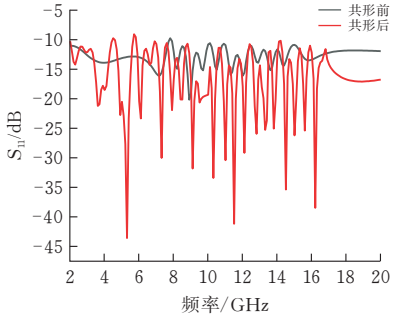

图 9 共形前后天线的回波损耗

黑色曲线为共形前天线的回波损耗，红色线为共形后天线回波损耗。从优化结果可以得出，天线共形前后的回波损耗都达到－10 dB 以下，但相较于平面天线，共形后的曲面天线在 2～20 GHz 全频段内的回波损耗表现出了良好的带宽性能，对天线波形图做估计数值分析，保留了数值小数点后两位，天线共形前后的回波损耗如表 1 所示。

表 1 共形前后天线回波损耗数值估计分析对比

频率/GHz	平面天线/dB	曲面天线/dB
2	－8.75	－10.27
4	－13.70	－18.51
6	－11.44	－20.42
8	－11.77	－16.82
10	－10.63	－19.32
12	－16.59	－17.92
14	－12.79	－12.70
16	－11.97	－16.80
18	－12.14	－16.74
20	－12.02	－16.77

在表 1 所选择的中心频率点，经过对比分析发现，共形后天线的回波损耗性能较平面天线更小，整个频段内曲面天线的回波损耗更低。说明共形后的曲面 Vivaldi 天线匹配性能更好，能够应用于对曲面载体的设计。

在保证参考条件不变的情况下对平面和曲面天线的增益比较分析，黑色为共形前的平面天线增益曲线，红色为共形后的曲面天线增益曲线，即在相同频段内，平面天线和曲面天线的增益性能仿真图如图 10 所示。

从图 10 分析对比可知，未共形时天线在工作频段内的峰值增益大于 10 dBi，在 13 GHz 时的最大增益为 13.83 dBi，共形后的曲面天线在 7 GHz 时增益能达到 12.88 dBi，但在高频时，天线增益有所衰减，这与天线共形的弯曲程度或者天线材料的延展

性有关,使得曲面天线增益有所影响。天线共形前后的增益数值估计分析如表 2 所示,数值保留了小数点后两位。

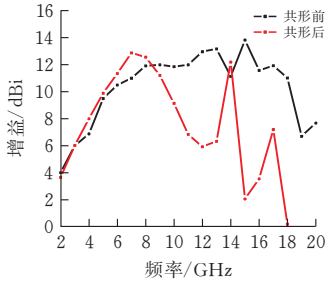

图 10　共形前后天线的增益

表 2　共形前后天线增益数值估计分析对比

频率/GHz	平面天线/dBi	曲面天线/dBi
2	4.00	3.66
4	6.88	8.00
6	10.50	11.35
8	11.92	12.57
10	11.86	9.14
12	12.97	5.93
14	11.14	12.20
16	11.58	3.55
18	11.02	0.19
20	7.68	0.00

5　结束语

本文针对平面 Vivaldi 天线局限于曲面载体中的应用,对平面 Vivaldi 天线进行曲面共形,在传统 Vivaldi 平面天线上提出了一种对跖形 Vivaldi 曲面共形天线。以平面 Vivaldi 天线为基础,将辐射臂两侧的椭圆形辐射单元底部设计成正弦函数形状,以增强阻抗特性,调整天线的阻抗匹配,同时在此天线基础上进行曲面共形。仿真结果表明在设计覆盖频率为 2～20 GHz 范围内,共形后曲面天线的回波损耗相比平面 Vivaldi 天线更小,表现出了工作带宽内良好的辐射特性,阻抗匹配效果更高,在增益方面,未共形时的 Vivaldi 天线在工作频段内的峰值增益处于稳定上升最后趋于平稳的状态;而共形后的 Vivaldi 天线在 8 GHz 时最高增益能达到 12.57 dBi,因受到曲面共形弯曲程度或天线材料延展性的影响,在后段频率范围内天线增益开始出现衰减,但天线整体基本达到设计要求,曲面共形后天线的回波损耗较平面天线更小,说明了它的匹配性能更好,且能够应用于弧形、球形等曲面载体,可用于超宽带无线通信系统。

[参 考 文 献]

[1] 岳新东.一种对踵型 Vivaldi 超宽带天线设计[J].兰州理工大学学报,2019,45(04):110-113.

[2] 于仕辉,娄文涛,董和磊,等.新式凹槽形缝隙超宽带微带天线的设计[J].电子器件,2021,44(03):596-601.

[3] CHEN Z, SU J,LI Z. A modified UWB antipodal vivaldiantenna with elliptical lens[C]. 2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC),2018:1013-1017.

[4] CHEN Y, HE Y, LI W, et al. A 3～9 GHz UWB high-gain conformal end-fire vivaldiantenna array[C]. 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI), 2021:737-738.

[5] AMAR A S I, EID A M,SALAMA A A. High gain low cost vivaldiantenna design using double slits and triangle metallic strip for WiFiapplications[C]. 2019 15th International Computer Engineering Conference (ICENCO), 2019:234-238.

[6] EICHENBERGER J, YETISIR E, GHALI-CHECHIAN N. Antipodal UWB vivaldi antenna with pseudoelement and notched flares for 2.5～57 GHz applications[C]. 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2018:270-1758.

[7] GIBSON P J.Thevivaldiaerial[C]. 1979 9th European Microwave Conference, 1979:101-105.

[8] GAZIT, E. Improved design of the vivaldi antenna[C]. IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation), IET, 1988.

[9] WANG H, HE S, DING Z, et al. A miniaturized vivaldi antenna with high gain for ultra-wideband applications[C]. 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 2017: 1-3.

[10] YANG Y, DU H, QUAN X ,et al. Miniaturized ultra-wideband vivaldi antenna for measurement applications [C].2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2019:1-3.

[11] KAZICI S, LOUTRIDIS A, CARATELLI D. A novel class of super-elliptical vivaldi antennas for UWB applications[C]. 2019 PhotonIcs& Electromagnetics Research Symposium -Spring (PIERS-Spring), 2019: 190-195.

[12] AHADI M, NOURINIA J, GHOBADI C, et al. Compact planar UWB elliptical vivaldi antenna[C].2019 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI), 2019:128-131.

[13] KAZICI S, LOUTRIDIS A,CARATElLLI D.A novel class of super-elliptical vivaldiantennas with enhanced radiation properties[C]. 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2019:259-260.

[14] TANGWACHIRAPAN S, THAIWIROT W, AKKARAEKTHALIN P. Design of Ultra-Wideband antipodal vivaldiantenna with square dielectric lens for mi-

crowave imaging applications[C].2019 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON), 2019:1-4.

[15] 王丽黎,刘庆.一种 3D 拱形高增益超宽带 Vivaldi 天线[J].西安理工大学学报,2022,38(02):171-175.

A Parametatarsal Ultrawideband Vivaldi Surface Conformal Antenna

FENG Li, FU Menghan

(*School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: In view of the limitation of the application range of the planar Vivaldi antenna in curved carriers, this paper proposes a metatarsal Vivaldi conformal antenna, which can be applied to curved carriers such as arcs or spheres, compared with the planar antenna. The preliminary design of the antenna is to add a sine function shape to the bottom of the elliptical conductor on both sides of the radiation arm of the plane antenna to improve the impedance characteristics and adjust the impedance matching of the antenna. Based on this, the surface conformal is carried out on the basis of the plane antenna, and the two radiation elements are respectively covered on the upper and lower parts of the curved dielectric substrate. The simulation results show that the return loss of the curved antenna is smaller than that of the plane Vivaldi antenna after conformal; In terms of gain, the peak gain of Vivaldi antenna without conformal is greater than 10 dBi in the operating frequency band, the maximum gain is 13.83 dBi at 13 GHz, and the gain of the conformal Vivaldi antenna can reach 12.88 dBi at 7 GHz. It can be seen that the return loss performance of curved antenna is better than that of planar antenna in the same bandwidth, and it is suitable for the application of curved carrier.

Keywords: ultra broadband; vivaldi antenna; return loss; communication systems

[责任编校: 闫 品]

(上接第 24 页)

Research on the Type-Ⅱ of Assembly Line Balancing Optimization Based on Hybrid Genetic Simulated Annealing ALGORITHM

WANG Ke, LI Xixing

(*School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: For the Type-Ⅱ of assembly line balancing problem in discrete manufacturing enterprises, a mathematical model with minimum production beat and minimum load standard deviation as the optimization objectives has been established. Based on the classical genetic algorithm, a population separation mechanism based on elite retention strategy has been designed to retain the genetic diversity of the population, and adaptive crossover and adaptive variable probability has been introduced according to the number of iterations of the algorithm; the Metropolis criterion of simulated annealing has been embedded to prevent the algorithm from falling into local optimum, which makes the hybrid genetic simulated annealing algorithm designed in this paper have stronger global search capability. Finally, taking the silage machine assembly line of an enterprise as an example, the hybrid genetic simulated annealing algorithm has been used to solve the problem. Compared with the genetic algorithm, the improved genetic algorithm and the improved particle swarm optimization algorithm. The validity of the model and the superiority of the hybrid genetic simulated annealing algorithm have been verified by the comparison results. The production example shows that the optimized assembly line production beat was 50.4s, and the line balance rate reaches 93.52%, which effectively improves the production efficiency of the assembly line of agricultural machinery enterprises.

Keywords: balancing assembly line; production beat; load standard deviation; local optimum; hybrid genetic simulated annealing algorithm

[责任编校: 张 众]