

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108339

Ka 波段低剖面宽频带平板缝隙天线研究

王 前

(成都天奥集团有限公司 成都 610000)

摘要: 针对传统平板缝隙天线带宽窄,以及常用宽带平板缝隙天线腔体分层数多,剖面高的缺点,设计了一种新型低剖面宽带平板缝隙天线。该设计对传统方案的辐射单元与馈电网络均进行了改进,增加了缝隙间距的同时,通过合理增加调配块达到宽带良好匹配的效果。缝隙间距的增大,使馈电网络同层化设计得以实现,从而降减少了天线分层数,降低了天线剖面。对新型平板天线进行了 HFSS 仿真优化,仿真结果表明,该新型平板缝隙天线相对带宽可达到 15%、分层只有 2 层,具有宽频带、分层少、剖面低的优点,该新型平板缝隙天线可以作为未来平板缝隙天线主要方案。

关键词: Ka; 平板缝隙阵; 宽频带; 低剖面

中图分类号: TN823+.24 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Ka-band low-profile broadband waveguide-slot antenna research

Wang Qian

(Chengdu Spaceon Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: In view of the shortcomings of traditional waveguide-slot antennas with narrow bandwidth, many layers of cavities and high profile, a new low-profile and wide-band waveguide-slot antenna is designed. This design improves both the radiating element and the feeding network of the traditional scheme, increases the gap spacing, as well as achieves the effect of good broadband matching by reasonably increasing the allocation block. The increase of the slot spacing enables the same-layer design of the feeding network to be realized, thereby reducing the number of layers of the antenna and reducing the antenna section. The HFSS simulation optimization of the new flat-panel antenna is carried out. The simulation results show that the relative bandwidth of the new flat-panel slot antenna can reach 15%, and there are only 2 layers, with the advantages of wide frequency band, less layers and low profile. The antenna can be used as the main solution for the future flat-panel slot antenna.

Keywords: Ka; waveguide-slot array; broadband; low profile

0 引 言

平板裂缝天线具有辐射效率高、能够实现精确的口径分布控制并获得低副瓣性能、波束指向稳定、功率容量大、有较好的刚度和强度、结构紧凑、厚度薄、重量轻、可靠性高等优异的电气和结构性能,因此成为了一种重要的天线形式,在航天测控、机载预警雷达以及机载气象雷达中得到了广泛的应用^[1-3]。

平板缝隙天线主要是指波导宽边开缝而构成的波导缝隙阵。根据裂缝单元间距和馈电方式的选择,宽边缝隙阵又可分为两种:一种是由行波激励的非谐振缝隙阵,另一种是由驻波激励的谐振缝隙阵^[4]。本文研究的是第 2 种,即驻波缝隙阵。

相邻的缝隙之间的距离等于 $\lambda_g/2$ 的称为谐振缝隙阵。电磁波沿波导传输到短路板处,建立起沿波导轴向的驻波

分布,并产生驻波的正弦电流幅度分布,其相位沿波导轴向线性变化^[5-6]。处于驻波电流零点的缝隙不会切断电流,也就不会被波导激励,因此可以改变缝隙在波导上的位置来改变对缝隙的激励幅度^[7]。

当今对天线阵列的带宽要求越来越高,传统的平板缝隙天线带宽很窄,驻波小于 2 的带宽只有 3% 左右,无法满足总体对于天线带宽的要求^[8-9]。

应运而生的是一种宽频带平板天线,其形式将在下文第 2 部分中介绍。这种宽带平板缝隙天线驻波小于 2 的带宽可达到 20%,解决了传统平板天线带宽窄的问题^[10],但是这种天线形式波导分层多,天线剖面很高,重量大,造成加工难度与加工成本的提高。

本文针对宽频带、低剖面、高效率的平板缝隙天线需求,在以上两种平板缝隙阵的基础上,基于 HFSS 电磁仿真

收稿日期:2021-11-15

软件,对辐射单元进行了改进设计,馈电网络进行了同层化设计,减少了天线分层数,大大的降低了天线剖面的高度,使得天线具有宽带、低剖面的特性,具有很高的应用前景。

1 传统平板缝隙阵天线

平板缝隙天线由多层波导腔体组成,波导腔体通过高速铣床机械加工而成,天线各层之间应用高温铝钎焊的方式焊接,平板缝隙阵加工成本也主要在这两步工艺过程上。因此天线分层越多,加工成本就越高,加工难度也越大,成品率相应也越低^[11-12]。

传统的平板缝隙阵天线的一个子阵如图 1 和 2 所示,天线从上到下分别为辐射层、馈电层、功分层^[13],以及再考虑到后端和差网络所占 1 层,总层数为 4 层。

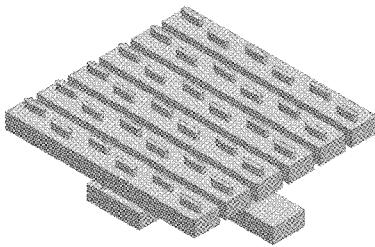


图 1 传统平板缝隙阵示意图

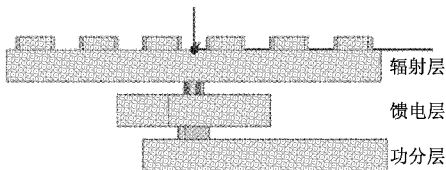


图 2 传统平板缝隙阵分层示意图

辐射缝隙开在最上面的辐射层,每个缝隙的辐射强度和相位通过缝隙的偏移量和缝长调节。单元间距为 $\lambda g/2$,因此每个缝隙都处在波导表面电流的峰值点。由于波导表面电流每隔 $\lambda g/2$ 的距离相位反相,为了实现各个波导缝隙的同相激励,所以相邻纵向偏置缝隙应该位于波导宽边中心线对应的两侧^[14-15]。

单元间距一般对应于中心频率,当偏离中心频率时,波导输入端口的驻波和天线口径场的分布都会因波导内电磁场分布的变化而恶化^[16],这是因为随着频率的偏移,导致波导内电磁场分布的改变使波导缝隙的等效参数发生改变,从而导致缝隙天线口径幅度和相位的误差增大以及输入驻波比的恶化。

传统波导缝隙阵一个馈电缝隙要激励多个辐射缝隙,为串并馈的形式,带宽取决于被激励辐射缝隙的数量,数量越多带宽越窄,因此是窄带结构^[17]。所以为了保证所需天线的带宽,就要限制每根辐射波导上的缝隙数目。这种传统的平板缝隙阵驻波小于 2 的带宽一般约为 3% 左右,可应用于窄带系统。

2 宽带平板缝隙阵

在宽带系统中,传统的平板缝隙阵无法满足带宽的要求,因此一种宽带形式的波导缝隙阵被广泛的应用。

图 3 和 4 为这种平板天线辐射单元模型。天线单元包含 4 个缝隙,其中方位维和俯仰维各 2 个,这 4 个缝隙由同一个馈电缝隙激励,因此具有相同的幅度和相位^[18]。单元的匹配往往通过增加“金属梁”的方式实现,如图 5 所示。

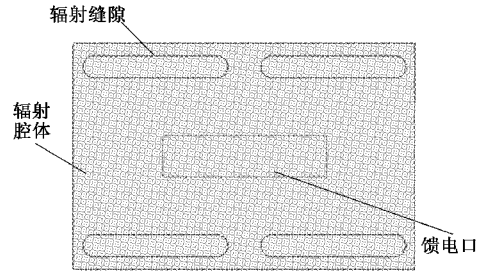


图 3 传统宽带平板缝隙阵辐射单元模型(俯视图)

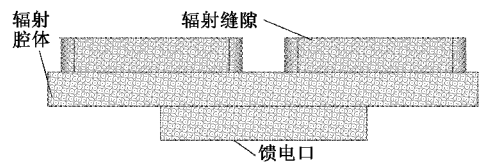


图 4 传统宽带平板缝隙阵辐射单元模型(侧视图)

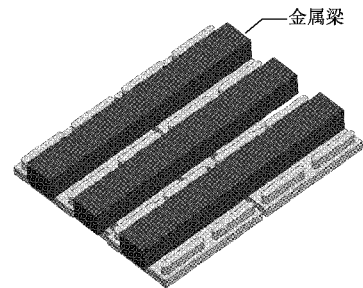


图 5 宽带平板天线阻抗匹配方式

阵面功分网络由一分二波导功分器组成,功分网络将能量分配给天线单元,保证了阵面的同相激励。末级功分器通过一个馈电缝为天线单元馈电,阵面幅度锥削通过配置每个波导功分器功分比实现。

这种形式的宽带平板天线辐射缝隙间距为调节阻抗匹配的参数,一般约为 0.7λ ,这样近距离的缝隙间隔导致带锥削的馈电网络无法同层排布,只能通过 ET 功分器组成多层馈电网络,ET 功分器如图 6 所示^[19],其每一级功分器与下一级功分器均不在同层。图 7 和 8 为阵面模型,可以看出阵面分层较多,从上到下共 5 层腔体,天线剖面相应也很大。

宽带平板缝隙阵馈电网络全部由一分二波导功分器组成,为并馈形式,是宽带馈电形式;图 9 为宽带平板缝隙阵的驻波曲线,可以看到驻波比小于 1.8 的带宽约为 20%。

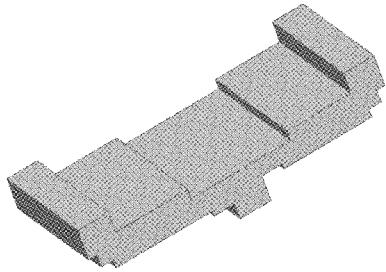


图 6 ET 一分二功分器



图 7 传统宽带平板天线模型(俯视图)



图 8 传统宽带平板天线模型(侧视图)

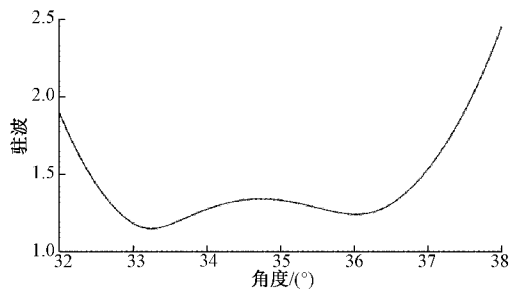


图 9 单元驻波曲线

上述宽带平板天线除驻波带宽满足要求外,天线增益,远场方向图波束宽度、副瓣等指标在频带内均稳定,能够满足宽带系统的要求。

综上所述,该形式平板天线能够满足宽带工作的需求,但是由于馈电网络没有足够空间使用 HT 波导功分器进行同层馈电腔体布局,只能由 ET 波导功分器将馈电网络分层排布,因此天线整体分层较多,从而天线剖面大,重量大,而且机加和焊接成本高,成品率大大降低^[20]。

3 新型低剖面宽带平板缝隙天线

针对第 1 部分介绍的传统平板缝隙阵带宽太窄的限制,以及第 2 部分介绍的宽带平板缝隙阵腔体分层过多,加工难度大成本高,阵面剖面高,重量重的劣势,研制了一种新型的低剖面宽带平板缝隙天线。

该天线沿用第 2 部分宽带平板天线的馈电思路,即完全由一分二功分器组成并馈网络。所不同的是,将天线单元创新设计,增加了缝隙间距的同时,通过合理增加调配块,达到宽带良好匹配的效果。缝隙间距的增大,使馈电网络同层化设计得以实现,从而减少了天线分层数,降低了天线剖面。

单元模型如图 10 所示,可以看到,辐射缝隙排在辐射腔体的四角,为最大的缝隙间距。天线单元由馈电波导开缝(馈电缝隙)进行馈电。

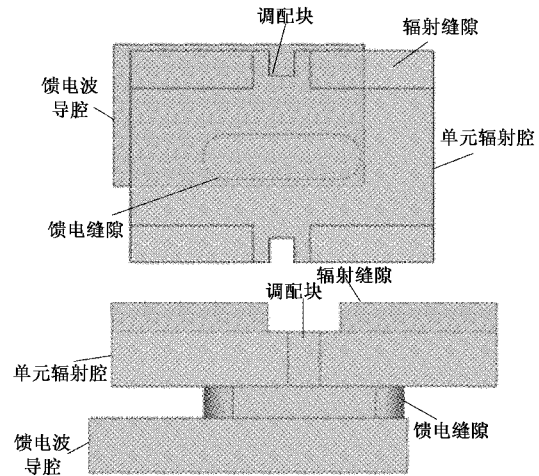


图 10 新型天线单元

图 11 为该低剖面平板天线单元驻波曲线,图 12 和 13 为其带内两维方向图。可以看出单元驻波比小于 1.8 的带宽约为 15%,且单元二维方向图在带内均无畸变。

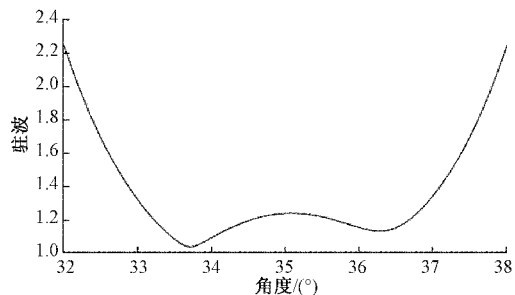


图 11 低剖面平板天线单元驻波

将天线单元组成 16×16 规模面阵,馈电网络由 HT 一分二波导功分器级联组成,最终由和差网络引出一路口和两路差口,共 3 个接口。馈电网络如图 14 所示,可以看出馈电网络由 HT 波导功分器级联而成,只分为 3 层腔体,相比于第 2 部分介绍的宽带平板天线 5 层腔体,极大的降

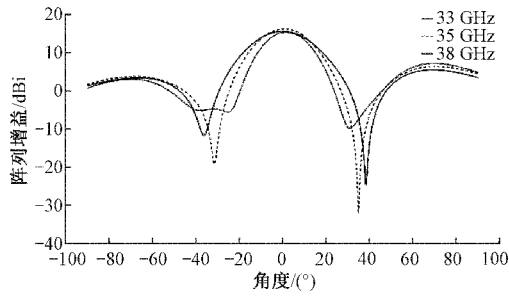


图 12 低剖面平板天线 E 面方向图

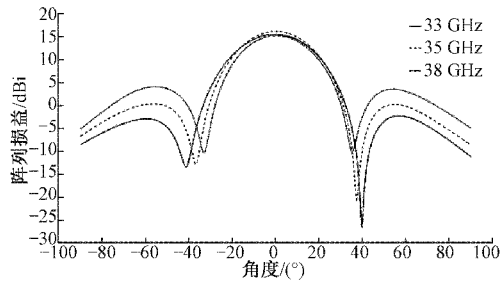


图 13 低剖面平板天线 H 面方向图

低了加工复杂度,同时带来的是低成本、低剖面 and 轻量化的优势。

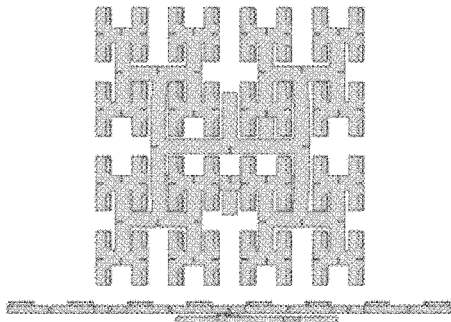


图 14 低剖面平板天线馈电网络

图 15 为最终 16×16 阵面模型三视图,图 16 为面阵端口驻波比曲线(一和两差),图 17~18 为远场两维和波束方向图,图 19 为和方向图增益曲线,图 20~21 则为两维差波束方向图。

通过仿真计算,可以看到最终的面阵能够在 33~38.3 GHz 良好匹配,且带内和波束与差波束方向图一致性均良好,和波束两维副瓣小于 -23 dB。考虑到加工损耗,阵面效率可以达到 55%。

表 1 为第 1 部分、第 2 部分、第 3 部分所述平板(单脉冲)天线在 Ka 波段性能典型值对比,3 种形式代号分别为 I 型、II 型、III 型天线。

通过表 1 的对比可知,3 种平板天线方案各有优缺点,I 型适用于窄带低副瓣需求,II 型带宽最宽,但是分层多,剖面高,加工成本也相应最高,III 型剖面最低,带宽略低于 II 型平板天线,但也具有较宽带宽。综合以上描述,本文介绍的

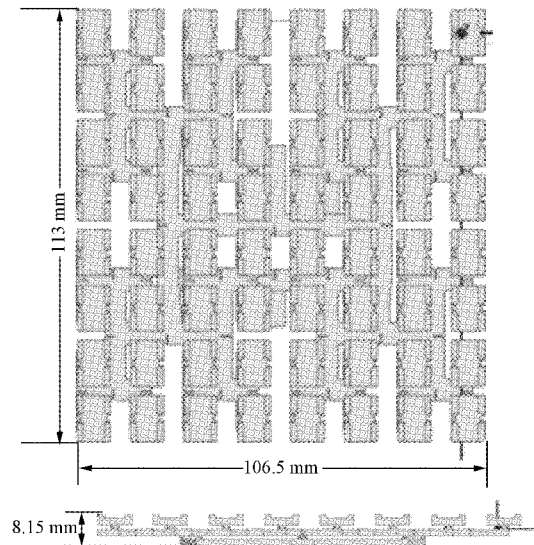


图 15 16×16 阵面模型三视图

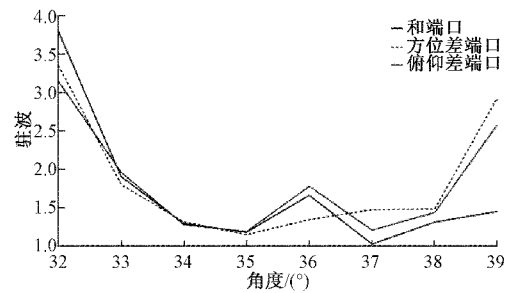


图 16 面阵端口驻波比曲线(一和两差)

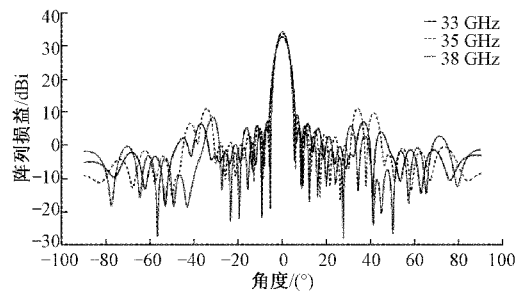


图 17 和波束 E 面方向图

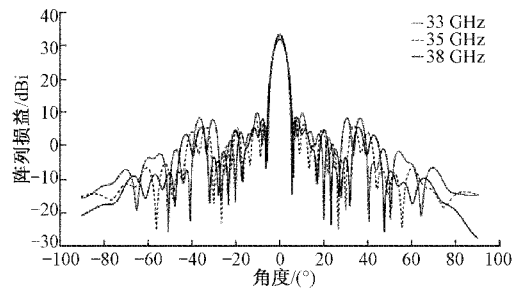


图 18 和波束 H 面方向图

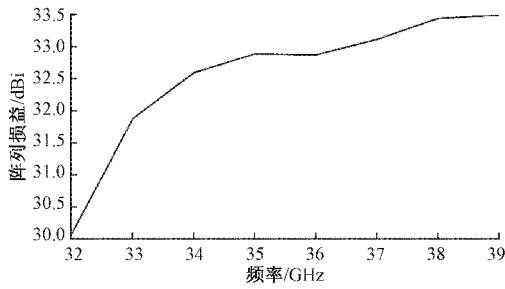


图 19 和方向图增益曲线

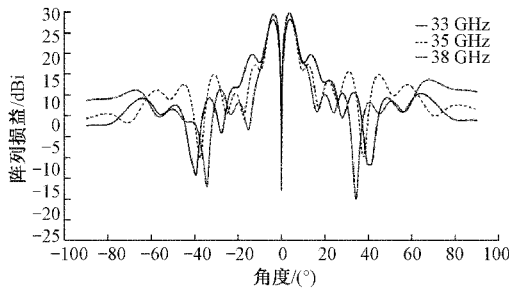


图 20 差波束 E 面方向图

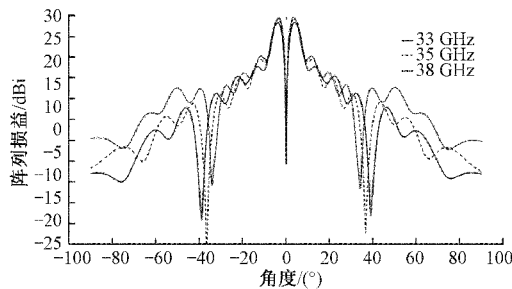


图 21 差波束 H 面方向图

表 1 3 种平板天线性能典型值

性能参数	I 型	II 型	III 型
相对带宽/%	3	20	15
口面效率/%	55	55	55
腔体分层	4	5	3
剖面	中	高	低
最优副瓣/dB	-25	-20	-23

新型宽带平板缝隙阵具有更大的应用前景,可以成为未来平板缝隙天线的主要设计方案。

4 结 论

本文的新型平板缝隙阵方案克服了传统平板缝隙阵天线带宽窄、剖面高的缺点,腔体分层只有 3 层,大大的降低了剖面高度。本文详细介绍了天线单元和馈电网络的设计,组阵采用了单脉冲体制,并用 HFSS 进行了仿真优化,仿真结果表明,驻波比小于 1.8 的带宽约为 15%,带内和

波束与差波束方向图一致性均良好,和波束两维副瓣小于 -23 dB,增益 ≥ 32 dB,考虑到加工损耗,阵面效率可以达到 55%。腔体分层少降低了机加和焊接难度,使得波导缝隙阵天线加工成品率比传统形式的高。宽频带、低剖面的优势,适用于毫米波及以下波段的测控、雷达和对抗等平台。后期将加工试验件对仿真设计进行验证,从而可在未来进行推广。

参 考 文 献

- [1] 张立东. 超薄型平板缝隙阵单脉冲天线设计与仿真[J]. 上海航天, 2006, 1: 61-64.
- [2] 金剑, 万笑梅, 汪伟, 等. 波导平板裂缝天线阵的设计[J]. 雷达科学与技术, 2007, 5(3): 232-235.
- [3] 李续平, 李斌, 张盛华, 等. 3 mm 平板波导缝隙阵天线设计研究[J]. 微波学报, 2014, 30(2): 1-5.
- [4] 胡继志, 张丕状, 杨大鹏. 便携式 FMCW 雷达目标探测设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12): 90-94.
- [5] 王文秀. Ka 波段单脉冲大型波导宽边缝隙阵列的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [6] 史永康, 李连辉, 丁克乾, 等. 一种两维单脉冲波导宽边缝隙阵设计的新方法[J]. 遥测遥控, 2010, 31(6): 56-72.
- [7] 第五健健, 张健穹, 王庆峰, 等. 应用于毫米波车地通信的小型化间隙波导缝隙阵列天线设计[J]. 元件与材料, 2021, 40(8): 826-832.
- [8] 李迎松, 杨晓冬, 刘乘源, 等. 共面波导馈电的超宽带天线研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(9): 819-823.
- [9] 陈鸿海, 孙学良, 赵鹤鸣, 等. 高增益蓝牙天线的设计与应用[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 197-206.
- [10] 张文涛, 杨丽娜, 穆华清, 等. 一种展宽波导缝隙天线带宽方法的研究[J]. 微波学报, 2008, 24: 98-101.
- [11] 陈咏, 何征, 吕弘, 等. 无人机天线在雷电效应中的响应研究及性能检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12): 29-35.
- [12] 秦楚, 殷新社. 分歧波导多工器综合方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(8): 76-81.
- [13] 蒋德富, 刘健. 波导缝隙天线的设计仿真[J]. 现代电子技术, 2013, 36(20): 14-16.
- [14] SEMBIAM R, RENGARAJAN, MARK S, et al. Waveguide-slot array antenna designs for low-average-sidelobe specifications [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2010, 52(6): 89-97.
- [15] TAKEHITO S, JIRO H, MAKOTO A. Iteration-free design of waveguide slot array with cavities[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(12): 3891-3896.
- [16] 徐天琪, 杜磊, 张殿龙. 基于虚拟仪器技术的 77 GHz 毫米波雷达目标运动参数模拟校准装置[J]. 电子测量与

- 仪器学报, 2021, 35(8): 118-125.
- [17] 徐俊峰, 蒯振起, 陈鹏. W 波段多波束基片集成波导缝隙阵列天线[J]. 微波学报, 2009, 25(2): 1-5.
- [18] 丁晓磊, 徐磊. 宽频带高效率平板缝隙天线的研究[J]. 遥测遥控, 2009, 30(5): 43-48.
- [19] 金剑, 王伟, 万笑梅. 宽带单脊波导缝隙天线阵设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007, 2(2): 152-154.
- [20] 邓聪颖, 杨凯, 苗建国, 等. 基于加工位置不确定的多工步数控铣削工艺参数优化研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 111-118.

作者简介

王前, 工学硕士, 主要研究方向为阵列天线与航天测控通信系统总体技术。

E-mail: 1032450933@qq.com