

面向飞行器测控通信的天线孔径综合技术

吴 琦, 王梓潼, 张栋梁, 夏思雨, 范文琪, 陈逸隆

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 先进飞行器测控通信需要实现遥测、遥控、通信、跟踪等多种功能, 传统上一般由多个无线收发系统及分立天线单元构成, 其体积、重量、成本和安装等方面与飞行器有限资源的矛盾日益突出. 天线孔径综合使用单个多功能天线孔径实现多个专用天线孔径的功能, 大幅减少了天线孔径数量, 显著缓解了飞行器平台上天线孔径布局压力, 为提升系统级电磁兼容性提供了全新手段. 本文系统阐述了面向飞行器测控通信的天线孔径综合技术路线, 着重介绍了面向多个分立天线单元进行综合的多频多极化天线技术、面向发射/接收天线综合的双工天线技术、面向多个天线综合于同一孔径的共孔径天线技术及面向同频天线阵列集成的耦合抑制技术. 结合软件无线电系统工作特点, 分析了软件无线电系统应用于飞行器测控通信系统的优势与可行性. 最后, 本文对飞行器测控通信的天线孔径综合技术发展进行了展望, 提出天线孔径综合技术在飞行器测控通信系统发展中可能的发展方向.

关键词: 测控通信; 天线孔径综合; 软件无线电

基金项目: 国家自然科学基金(No.U2141230)

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)03-1014-26

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240933

Antenna Aperture Synthesis Technology for Air Vehicle Measurement, Control and Communication Applications

WU Qi, WANG Zi-tong, ZHANG Dong-liang, XIA Si-yu, FAN Wen-qi, CHEN Yi-long

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The measurement and control of advanced air vehicle requires the realization of multiple functions such as telemetry, remote control, communication, and tracking. Traditionally, it is generally composed of multiple wireless transceiver systems and discrete antennas. The contradiction between its volume, weight, cost, installation, etc. and the limited resources of the air vehicle is becoming increasingly prominent. The antenna aperture synthesis enables a single multi-functional antenna aperture to perform the functions of multiple dedicated antenna apertures. This greatly reduces the number of antenna apertures. It also significantly eases the pressure on the antenna aperture layout on the air vehicle platform, offering a new way to enhance the system-level electromagnetic compatibility. This paper systematically elaborates on the technical route of antenna aperture synthesis for air vehicle measurement and control communication. It focuses on introducing the multi-band and multi-polarization antenna technology for the synthesis of multiple discrete antennas, the diplexer antenna technology for the synthesis of transmitted and received antennas, the shared-aperture antenna technology for the synthesis of multiple antennas in the same aperture, and the coupling suppression technology for the integration of the same-frequency antenna array. At the same time, combined with the working characteristics of the software-defined radio system, it analyzes the advantages and feasibility of the application of the software-defined radio system in the air vehicle measurement and control communication system. Finally, this paper looks forward to the development of the antenna aperture synthesis technology for air vehicle measurement and control communication and puts forward the possible development directions of the antenna aperture synthesis technology in the development of the air vehicle measurement and control communication system.

Key words: telemetry, tracing and control; antenna aperture synthesis; software defined radio

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.U2141230)

1 引言

测控通信系统(也称测控与通信系统,TT & C)负责对飞行器的飞行轨道、工作状态进行实时监测与调整,同时接收飞行器回传的数据、图像及视频信息,是保障各类飞行器运行安全和性能发挥的重要组成部分^[1-3]. 飞行器测控通信系统包含遥测、遥控、卫星通信、卫星导航、集群协同通信多个子系统,典型组成如图 1 所示. 各子系统的工作频段覆盖 UHF、L、S、Ku、Ka 等,天线极化类型包含线极化及左、右旋圆极化,各系统典型参数如表 1 所示^[1,4,5]. 飞行器飞行首区及航区部

分阶段,飞行器位于地面测控站的视距范围内,飞行器上安装相应不同频段的线极化定向/全向收发天线,可以与地面测控站直接通信. 在飞行器航区的大部分区域及末区,在地面测控站的非视距范围内,飞行器可能需要通过卫星作为中转与地面测控站通信(一般称为超视距通信). 随着航空航天技术的不断进步,单一飞行器在执行任务时往往面临诸多限制,而协同组网则为飞行器的性能提升和任务拓展带来了全新的可能性. 在这种背景下,飞行器上需安装有用于飞行器间通信的线极化天线或阵列,以确保高效、稳定的通信连接.

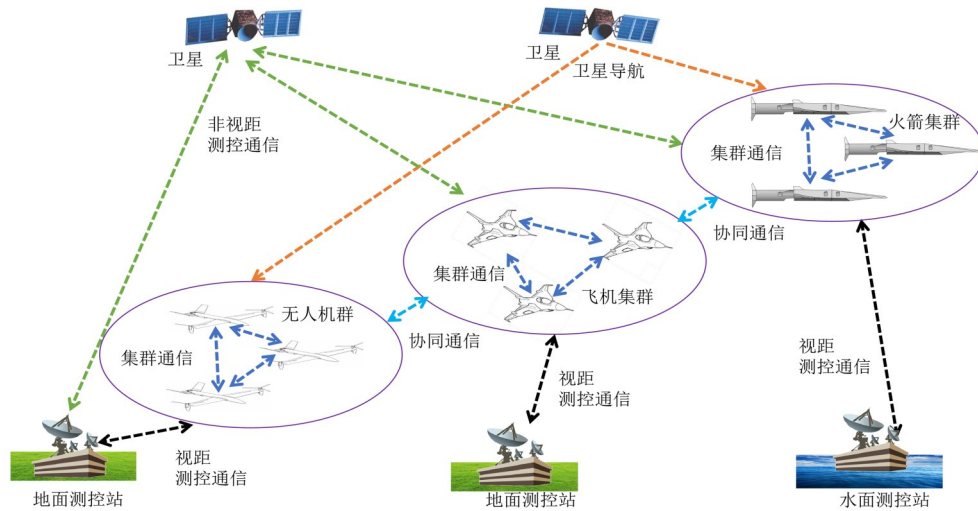


图 1 飞行器测控通信示意图

表 1 飞行器上测控通信系统典型参数

系统	具体功能	工作频率/GHz	典型发射机功率/dBm	典型接收机灵敏度/dBm	天线极化
遥测	飞行数据传输	L/S	40~43	—	线极化
遥控	远程控制	L/S	—	-90~-87	线极化
数据链	集群协同通信	L/S	44~47	—	线极化
		L/S	—	-120~-100	线极化
	图像传输	C	—	—	线极化
北斗导航	定位导航	B1:1.575	—	约-130	右旋圆极化
		B3:1.268	—	约-130	右旋圆极化
北斗通信	短报文通信	1.615	33~43	—	左旋圆极化
		2.491	—	约-124	右旋圆极化
卫星通信	数据传输	UHF	40~43	-120~-100	圆极化
		Ku	47	-105~-100	圆极化/线极化天线阵列
		Ka	50	-105~-100	圆极化天线阵列

北斗是我国自主研发的全球卫星导航系统,具备短报文通信、卫星导航等多种功能,是各类飞行器必备的关键系统. 北斗系统以其高精度的定位、导航和授时服务,为飞行器的安全飞行提供了坚实的保障^[4]. 以北斗通信与导航系统为例,飞行器通常需安装北斗短报文发射的左旋圆极化天线及北斗短报文接收的右旋圆

极化天线;同时,飞行器需安装工作于B1、B3等频段的右旋圆极化卫星导航天线. 对于工作于复杂电磁环境的飞行器,其B3频段导航天线可以组成天线阵列,通过自适应波束赋形的方法形成抗外部电磁干扰的能力.

由于飞行器平台上空间有限,在其金属框架上开多个天线孔径会对平台的综合应力产生极大影响^[6],且

有限空间上多天线孔径布局也极为困难. 通过天线孔径综合技术, 使用单个多功能天线实现原先多个天线承担的功能, 从而缩减平台上天线孔径数目, 能够在达到综合应力与电磁兼容性要求的基础上, 缓解平台空间资源有限情况下天线孔径布局压力^[7-10]. 例如, 可使用多频天线技术将北斗导航 B1 与 B3 频段接收天线综合为单个天线; 以及使用双工技术将视距通信的遥测与安控收发天线综合为单个天线. 也可以将耦合抑制后的多个不同功能的天线放置于同一天线孔径内, 实现飞行器平台上天线孔径数量的缩减.

然而, 先进飞行器平台对于带宽、极化、增益、尺寸等关键指标的严苛要求使得共孔径天线设计的难度显著增大^[10]. 为了满足飞行器天线孔径小尺寸的要求, 多馈电端口结构的综合孔径内部天线单元间距更近, 造成天线单元间耦合更严重, 导致天线的辐射性能恶化. 因此, 天线孔径综合技术的应用面临着如何在极小的空间包络甚至是任意间距下实现天线间的同频、邻频、异频耦合高效抑制的难题. 解决此问题的关键在于如何直观地揭示天线间的耦合机理, 并定位造成耦合产生的主要因素. 对此, 特征模理论凭借其明确的物理意义能够对天线间的耦合机理给出明确的指导^[11].

本文结合腔模理论、特征模理论等分析方法, 对多功能天线、天线孔径综合以及天线解耦 3 个技术的新进展进行了介绍, 特别针对飞行器测控通信的天线孔径综合进行了详细讨论. 对于多功能天线技术, 其核心在于使用单天线实现多个天线功能. 对此, 本文介绍了多频多极化天线技术, 阐述了基于腔模理论和特征模理论的多模谐振设计方法, 并介绍了通过多个结构组合的多频天线设计方法. 进一步介绍了将天线与双工器设计为单个器件的双工天线设计技术及优势. 针对使用单孔径实现多孔径功能的孔径综合技术, 梳理了共孔径天线的布局形式与关键技术, 重点介绍了基于模式耦合理论和模式调控的耦合抑制技术. 对于孔径复用率最高的叠层式布局, 阐

述了遮挡效应的理论分析方法、提高孔径复用率的低频单元小型化设计方法及集成滤波响应的天线间耦合抑制方法. 使用多频多极化天线与共孔径天线设计, 理论上有望将飞行器平台上测控通信相关孔径数量缩减至原本数量的 1/3. 针对去耦合技术, 面向部分测控通信系统对天线阵列的需求, 本文分别对模式理论分析、去耦合寄生结构以及去耦合网络的同频天线阵列耦合抑制方法进行了介绍. 其中, 基于特征模理论的耦合模式分析方法能够为受限空间条件下的天线单元去耦合提供新的思路. 利用上述方法可改善天线方向图、增益、扫描角、抗干扰等关键性能. 此外, 本文分析了软件无线电系统功能特点, 分析了使用软件无线电平台作为飞行器测控通信系统的可行性与优势. 最后, 对飞行器测控通信应用的天线孔径综合技术进行了总结和展望.

2 多频多极化天线技术

使用单个多功能天线实现原先多个天线的功能, 可以大幅减少飞行器平台安装天线的数量, 缓解平台上有限空间内的天线布局压力. 例如, 在飞行器上可以将遥测发射天线与其他发射天线综合为单个多频发射天线, 从而实现天线数量的缩减. 进一步地, 利用先进的双工天线技术, 可将遥测发射天线与遥控接收天线综合为单个双频或三频天线.

2.1 多频天线

多频天线的基本设计思路是使用一个天线产生多个谐振, 同时满足多个测控通信系统对于天线工作频段、天线极化、发射方向图的要求, 从而达到缩减天线数量的目的. 其实现方法包括激励单一结构的多个模式^[12-18]和使用不同结构的组合^[19-24], 如图 2 所示. 多频天线的设计难点在于如何自由调控天线的多个不同工作频率, 实现所需的天线极化, 并保持辐射方向图的稳定性. 因此, 需要在天线分析和综合的理论方法上进行创新和突破. 多频天线设计方法特点总结见表 2.

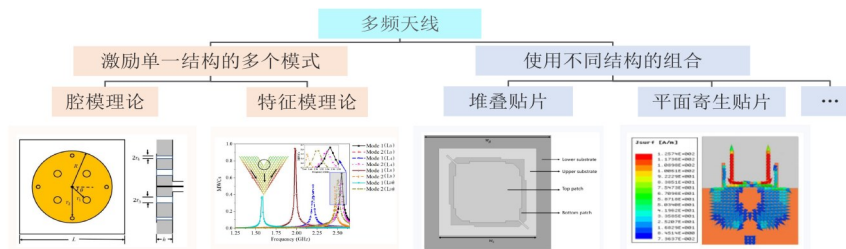


图2 多频天线设计方法

天线理论当中的腔模理论与特征模理论凭借明确的物理含义, 能够对如何激励单一结构的多个模式从而实现多功能设计给出明确的理论指导. 腔模理

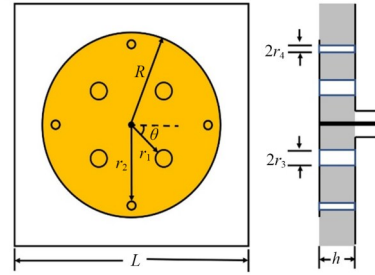
论^[25,26]是分析、设计各类宽带天线的基础. 利用腔模理论对天线的工作模式进行分析, 进而通过在贴片上开槽、增加枝节、加载短路探针等方法可以对模式的谐振

表 2 多频天线设计方法特点总结

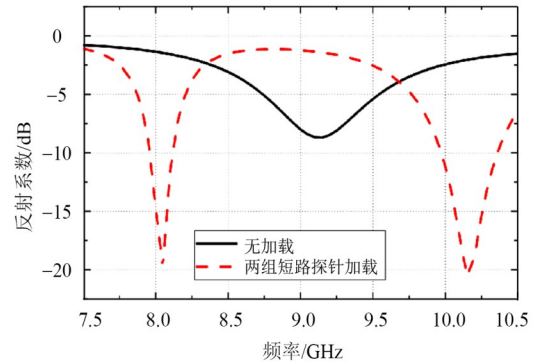
设计思路	理论基础	求解形式	适用范围	谐振频率调整范围	设计自由度
激励单一结构的多个模式	腔模理论	解析解	规则形状微带贴片结构	较小	较低
	特征模理论	数值解	任意形状微带贴片结构	适中	适中
使用不同结构的组合	特征模理论	数值解	任意形状多层微带贴片结构	较大	较高

频率及辐射方向图进行调控,实现多频工作.例如,文献[13]中采用TM₁₀、TM₁₂和TM₃₀模,设计了一种三频段的低剖面微带贴片天线.首先,通过选择合适的尺寸,在5.8 GHz左右激励微带贴片天线的TM₁₂模;同时,在辐射贴片的中心刻蚀线性缝隙,将TM₁₂和TM₃₀模式的辐射场转换为低旁瓣电平的定向辐射;其次,在贴片下方对称加载短路探针,改善TM₁₀模式的阻抗匹配,将其谐振频率移动至2.4 GHz左右;最后,在贴片的辐射边缘增加一对平行槽,从而扩展TM₃₀模式的表面电流分布,将其谐振频率重新分配到5.2 GHz左右.文献[17]中基于短路探针加载提出了一款双频微带贴片天线,天线结构如图3(a)所示.设计流程从传统圆形微带贴片天线出发,在使用腔模理论进行分析的基础上,使用两组短路探针激励TM₂₂和TM₃₂模.加载短路探针前后天线的反射系数如图3(b)所示,无短路探针加载时,天线在对应频段内仅有一个谐振频点,且谐振深度较浅.加载短路探针后,在对应频段内产生了两个较深的谐振.两个谐振频点均可通过短路探针加载的位置及短路探针的尺寸独立调节,所激励的两种模式均具有类似单极子的全向辐射方向图,可以很好地适用于飞行器上数据链通信系统.

特征模理论提供了一种理解天线辐射机制和优化天线设计方案的全新思路^[27-29],其优势在于特征模式作为辐射体的固有模式,能够独立于馈电结构分析天线特性,从而能够对天线的辐射机理开展更为深入的研究.基于特征模理论,通过对辐射结构进行分析,可以有选择性地激励多个模式实现多频工作.需要特别指出的是,即便某一个特征模式可以被有效激励,也并不意味着天线可以工作在该模式的谐振点附近,还需要确保馈源与模式之间阻抗匹配^[30].文献[18]中提出了一种利用特征模理论指导设计的双频三角形贴片天线,在该设计中基于对模式显著性的分析确定了一对需要被激励的简并模式,并通过在贴片中插入等边三角形槽,来对这一对简并模的特征值进行调控,最后选择合适的位置布置馈电点,从而实现了天线的双频工作.除了通过激励单一结构的多个模式实现天线的多频工作外,使用多个不同结构的组合来实现多频工作也是一种直接的设计方式.根据结构的放置形式,可以分为堆叠贴片^[19-21]和平面寄生贴片两类.在堆叠贴片的情况下,通常其中一层贴片通过同轴线连接馈电,其他贴片通过该激励贴片的电磁耦合馈电.文献[19]中基于堆叠贴片的形



(a) 天线结构



(b) 加载短路探针前后的反射系数

图 3 基于短路探针加载的双频双极化天线^[17]

式提出了一款三频天线,包含一个全向线极化工作频段和两个定向圆极化工作频段,天线结构及性能如图4所示.天线由两层贴片组成,上层贴片通过同轴探针馈电,下层贴片通过电磁耦合激励.通过在贴片进行切角实现圆极化,使用短路探针加载改善线极化频段的辐射方向图.该天线可同时用于L波段的双频导航系统及S波段的全向数据链通信系统.文献[22]中提出了一款基于平面寄生贴片的三频天线,原始天线由半模基片集成波导构成,通过在波导的辐射口面上加载两组寄生贴片,实现两个额外的谐振频点,寄生贴片由通过波导辐射产生的电磁耦合激励.由于天线整体具备准八木结构,三个频段均具备良好的定向辐射方向图.

多频天线的设计方法可分为两类,分别为单一结构的多模式激励方法以及不同结构的组合方法,两类方法的技术特点如表2所示.通过单一结构的多模式激励进行多频天线设计时,无论是腔模理论还是特征模理论都具备明确的物理含义,理论指导充分.其中,腔模理论适用于形状规则的微带贴片天线分析,而特

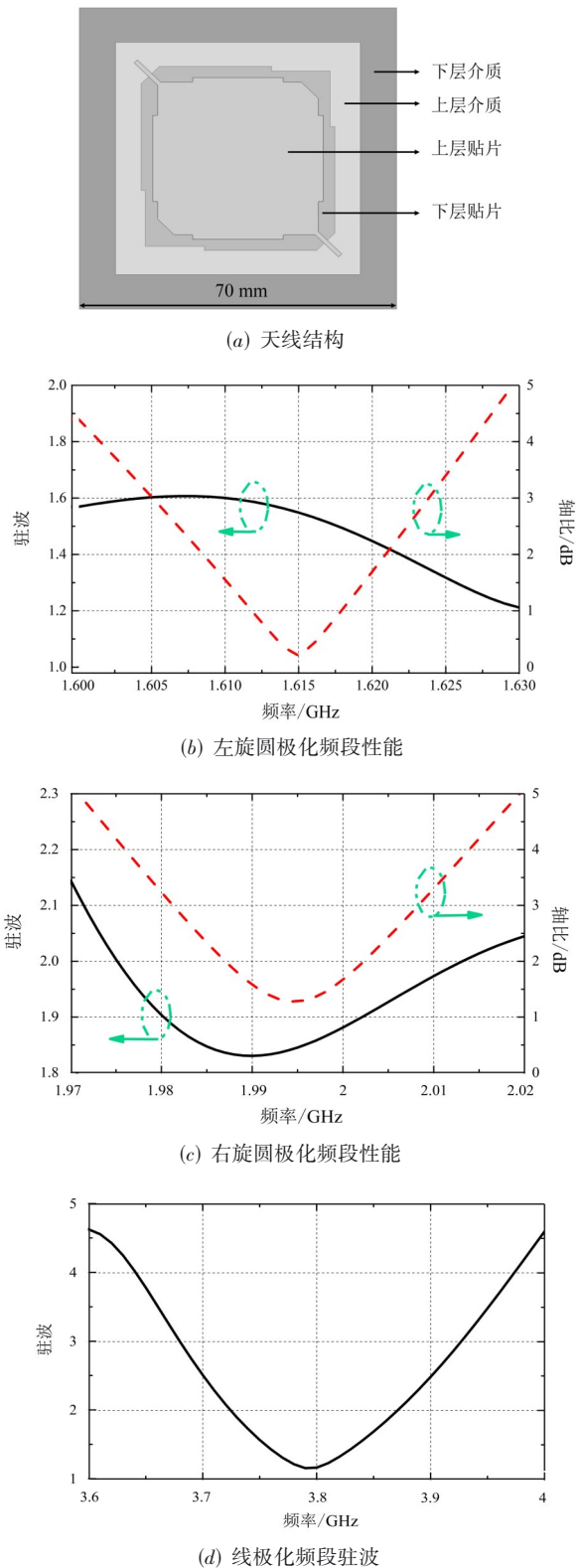


图4 一种基于堆叠贴片的三频三极化天线^[19]

征模理论适用于任意形状的微带贴片天线分析。然而，对于一个特定的结构，其谐振频率受到固有模式的限制，因此该方法的设计自由度相对较低，且谐振频率的

调整范围较小。不同结构的组合方法可以根据需要的频段或极化使用多个辐射结构，设计的自由度相对较高。但不同结构之间的电磁耦合影响较大，可能导致辐射性能的下降，设计难度更大，特征模理论可用于该类天线的设计。上述两种方法均可有效实现天线的多频多极化工作，针对不同场景使用合适的方法能够进一步提升多频天线设计的效率。

2.2 双工天线

早期飞行器平台上天线数目较少，分立的天线分别连接各自的发射机或接收机进行工作。随着天线技术的发展，学者们提出了一系列先进的双频天线及其设计方法，传统的双频天线在单频天线的基础上通过结构优化、模式分析等方式改进设计而成，仍然沿用单频天线仅有单端口的特点，此类双频天线可通过合路器/功分器直接与两个发射机/接收机连接。当双频天线的两个工作频段分别对应两个不同工作频段的发射机与接收机时，天线需要通过双工器与发射机/接收机连接^[31-33]，如图5所示。双工器通过滤波实现对不同频段信号的分离，保证发射端信号只能通过发射机端口输出，而接收端信号只能通过接收机端口输入。同时，双工器可以提供高隔离度，避免强发射信号进入接收通道产生干扰或饱和效应，高质量的双工器会大幅提升双频天线在收发共用场景下的性能。然而，传统双工器尺寸较大，且能提供的隔离度较为有限，通常小于40 dB^[34-36]。同时，将单独设计好的双频天线与双工器级联需要额外的空间、线缆，还可能面临天线与双工器间的阻抗不匹配等挑战。为了更高的集成度，学者们渐渐将天线与双工器融合设计为单个微波器件，即双工天线。双工天线的发展趋势如图5所示，与传统双频天线对比，双工天线具有两个端口，且端口间具有较好的隔离。以表1中的遥测和遥控系统为例，考虑遥测发射满足GJB151B规定的带外抑制要求(80 dBc)，使用单个双工天线，要保证电磁兼容性，天线两个端口的端口隔离度需大于50 dB。然而，满足该指标的难度极大，常规的双工天线设计方法一般难以实现。但随着双工天线技术的发展，目前已有少数先进的双工天线的设计方法能够满足指标要求。

双工天线主要有两种设计方法，如图6所示。第一种设计方法基于谐振槽/腔的固有模式^[37-45]。设计流程首先需要从固有模式中选择本身就具备高隔离度的模式进行激励，并将这些模式调整到所需要的频段，从而实现天线的双工工作^[37-45]。文献[37]中提出了一种激励T形槽的双工天线，使用U形和T形激励结构分别激励不同的模式，被激励的两个模式天然具备高隔离，且具有相似的极化、方向图等辐射特性，该天线工作于不同频段的端口之间的隔离度大于26 dB。

文献[40]中提出了一种激励谐振腔固有模式的双工天线,为了减小天线尺寸,使用四分之一模的基片集成波导作为谐振腔,在谐振腔上刻蚀圆形的开口环谐振器来对模式进

行调控,进一步激励双模式实现双工,天线的两个工作频率为 2.45 GHz 和 3.5 GHz,两个频段之间的端口隔离度大于 33 dB.

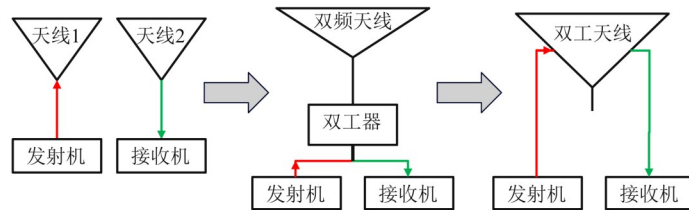


图5 双工天线发展趋势

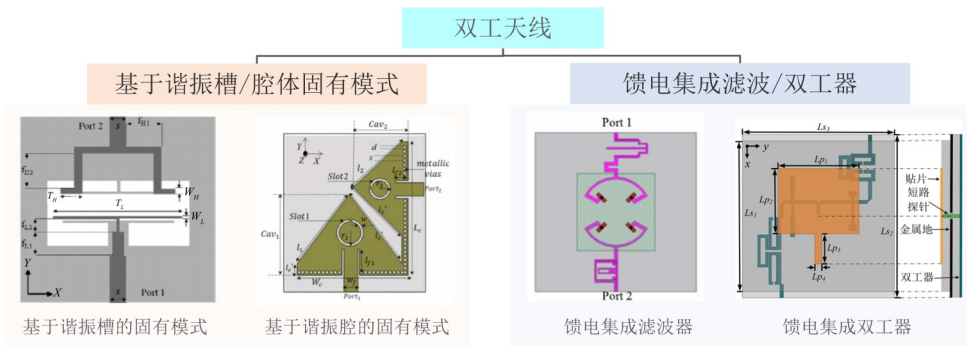
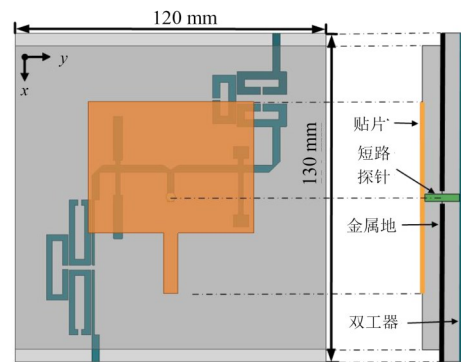


图6 双工天线设计方法

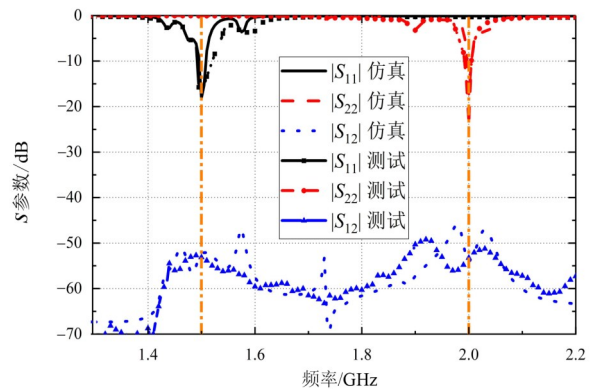
双工天线的第二种设计方法从双频天线的馈电结构出发,将滤波器或双工器集成到馈线中,从而实现双频天线两个不同频段的高端口隔离度^[46-52]。文献[48]中提出了一种馈电集成滤波器的双工天线,使用多模谐振器激励贴片天线实现双频。为了提高两个端口间的隔离度,在高频和低频馈电上均集成了滤波器。高频通道的滤波器在低频通道产生传输零点,低频通道的滤波器在高频通道产生传输零点,在两个通道间实现了大于 45 dB 的高端口隔离度。

文献[52]中提出了一种适用于遥测与遥控系统的共极化双工天线,天线结构及性能如图7所示。该天线实现了 53 dB 的高端口隔离,同时保持了紧凑的尺寸。通过对阶梯阻抗谐振器的理论分析,将阶梯阻抗谐振器与 T 形公共接头集成,满足双工器对公共接头的阻抗匹配要求,并给出了一般设计准则,具有结构简单、设计方法可解析、布局灵活性高的优点;进一步加载微带开口环谐振器,增强阻带抑制能力。采用短路探针直接连接双频天线和双工器,实现紧凑集成。双工器的低频和低频两个通道的带宽分别为 4% 和 3%,双工天线低频和高频的工作带宽分别为 1.5% 和 1%,两个通道间的端口隔离度均大于 53 dB。利用该双工天线,可将飞行器当中的遥测发射天线与遥控接收天线综合为单个天线。

综合上述介绍,本节系统介绍了激励单一结构的



(a) 天线结构



(b) 天线 S 参数

图7 用于遥测与遥控的双工天线^[52]

多个模式和使用不同结构的组合这两种设计多频天线的基本思想,阐述了通过腔模理论和特征模理论指导多频天线设计的方法.使用多频天线技术,多个发射机/接收机可通过多工器共用一个天线,从而减少平台上天线数目,减小平台天线布局压力.进一步,本节介绍了将双频天线和双工器设计为单个双工天线的设计方法,梳理了双工天线的发展过程.利用多频多极化天线技术可将飞行器平台上多个窄带测控通信天线进行综合,从而将飞行器平台上窄带测控通信天线数目大幅缩减.

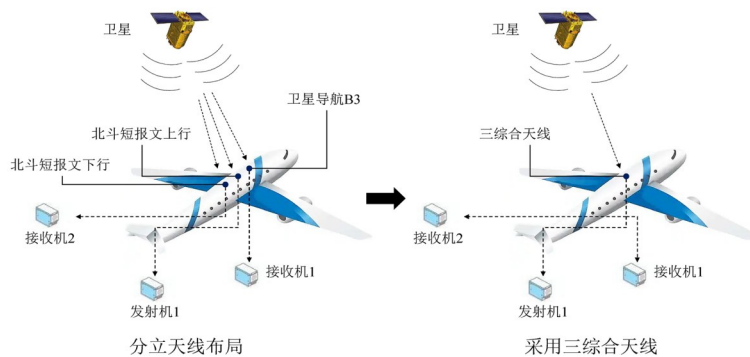


图8 采用三综合天线后的孔径缩减情况

然而,多频多极化天线技术不能彻底解决飞行器当中用于测控通信的天线布局压力大的问题.首先,多频多极化天线技术的应用对象为飞行器平台当中用于测控通信的不同频段的窄带天线单元,如遥测发射天线与遥控接收天线等.但对于如北斗导航B1频段以及北斗短报文通信的上行频段的的天线,由于工作频率过于接近,因此在单天线综合时难以保证对应两个工作频率的端口之间具有足够高的隔离度.此外,在飞行器平台当中多个测控通信系统,如用于数据传输的卫星通信系统等对发射功率以及接收机的灵敏度有着较高的要求,此时用于发射或接收电磁波的天线往往采用阵列的形式,此时为了进一步提升天线的集成度并降低天线孔径的数量,需要采用共孔径天线技术进行设计.

3 共孔径天线发展趋势与设计方法

共孔径天线通过将多个工作于不同频段或极化的天线集成于同一个物理孔径内,可以有效地减少飞行器平台上天线孔径数量,从而提高平台的综合应力性能与气动性能.然而,为了满足天线孔径的小尺寸需求,将多个天线近距离放置在孔径内会产生严重的近场耦合,导致天线性能严重恶化,包括增益的下降、辐射方向图的畸变、谐振频率的偏移等^[53].

共孔径天线的布局主要有四种方式,如图9所示,第一种为平铺式,将不同频段的天线单元在孔径空白

2.3 多频多极化天线技术应用前景

通过多频多极化天线技术将多个用于测控通信的独立的天线综合为一个多功能天线,对于提升系统集成度并缓解因平台空间狭小带来的天线布局压力具有重要意义.特别是对用于测控通信的多个分立的窄带天线单元,如表1中用于北斗导航以及短报文通信的天线,可结合多频天线技术与多工天线技术将北斗导航B3频段以及北斗短报文通信上下行频段的圆极化天线综合为一个三频双圆极化天线,并保证三个频段对应的端口具有较高的隔离度,从而将原本所需要的三个天线缩减为一个,如图8所示.

处平铺排布;第二种为嵌套式,高频单元在低频单元的空白处放置;第三种为交错式,低频单元放置于高频单元上方;第四种为叠层式,高频单元放置于低频单元上方.

3.1 平铺式共孔径天线

平铺式共孔径天线,将不同频段的天线单元在孔径空白处平铺排布,可在同一个物理孔径内放置多个天线,且不改变连接各天线的射频电路,是一种常用的共孔径天线设计方案.通常为了减小孔径的几何尺寸,需要将天线紧密布局,这使得天线单元间存在强烈的电磁耦合现象,导致天线阻抗匹配恶化、辐射效率下降、辐射方向图畸变等问题.因此,有必要从理论层面与方法层面开展研究工作,实现对近距离放置天线间强电磁耦合的有效抑制.其中,模式分析理论以及集成滤波响应是抑制天线间电磁耦合的有效方法.

文献[53]创新性地多个天线视为一个整体,采用特征模理论对整体进行广义本征值分解,创建了天线耦合模式理论.采用三角形网格对任意金属结构天线进行建模,基于电磁理论中的表面电流模式和虚拟电压馈电严格推导出天线耦合模式系数表达式.模式耦合系数为导纳量纲,数学上完备正交,可定量描述每个模式对天线耦合的贡献量,是孔径综合天线耦合分析的全新视角.此外,在该文献中提出了振子型天线的

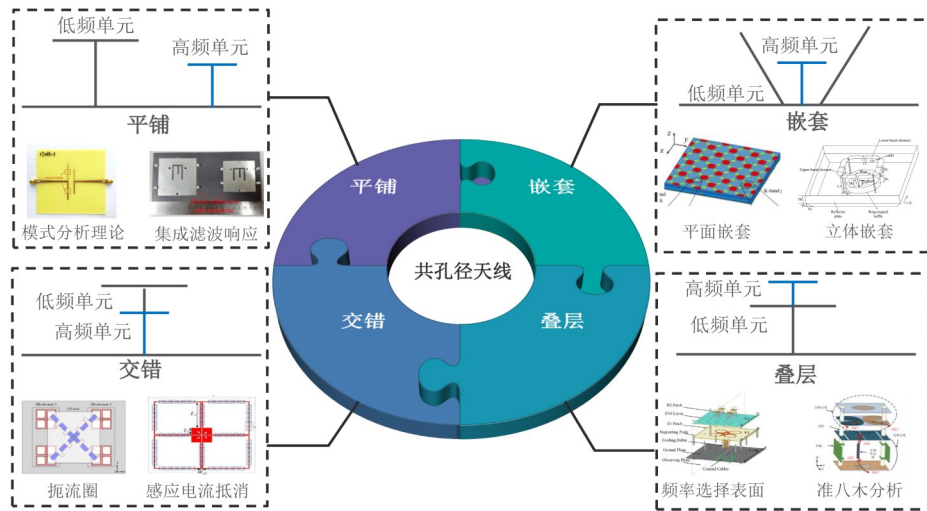


图9 共孔径天线布局方式及设计方法

集总电感加载的模式调控方法,揭示了近场/远场条件下高阶耦合模式的贡献,并基于特征电流分布给出最佳加载位置^[53];提出刻槽与集总加载混合结构,解决了宽带辐射单元表面集总加载无效的难题^[53]。文献[54]指出长期以来国际上采用金属剖分和表面电流描述缝隙天线特征模不正确的问题,并基于广义等效原理,给出了缝隙结构与对应金属结构特征值和特征向量的定量对偶关系。在此基础上,构建了缝隙天线的耦合模式理论,发展了集成交趾电容型缝隙天线的模式调控方法,降低了集总加载的寄生参数效应。微带天线辐射原理与细线振子天线不同,文献[55]将电磁辐射体耦合模式理论推广到微带天线形式,推导出以阻抗为基本量纲的天线耦合模式系数,并提出了短路探针型微带天线的模式调控方法,基于特征电场分布确定短路探针加载位置。针对共孔径天线单元耦合产生的电磁干扰问题,利用短路探针表面的PEC边界条件,在电场较强的位置加载短路探针,达到电场抑制的效果,可以降低天线的带外发射,实现天线的邻频耦合抑制。至此,三类基本电磁辐射体的耦合模式理论被构建完成,基本覆盖飞行器测控通信天线常用的单元类型。

使用模式耦合理论分析振子天线得到特征电流及特征方向图如图10(a)所示,图中五个模式均为模式耦合系数较大的模式。从图10(a)可以看出,模式1和模式3为功能模式,对天线的辐射起主要贡献,其判断准则为模式电流分布与振子天线正常工作时的电流分布相同。模式4、模式10和模式11均为高阶非功能模式,其中,模式4的电流分布仅在左侧振子上较大,在右侧振子上较小,即模式4虽然为非功能模式,但是其对天线间的耦合贡献较小,主要贡献天线的高阶辐射。模式10和模式11的两个振子上电流分布均较大,对天线间的耦合起主要贡献,可以使用模式调控方法来抑制

模式10和模式11,从而降低天线间的耦合。采用阻抗加载是对天线特征模式进行调控的有效方法^[56-59],在本例中,可以在模式10和模式11电流分布较大的地方加载集总电感,从而抑制耦合模式,降低天线间的耦合。加载集总参数电感的去耦合效果如图10(b)所示,在160~320 MHz的带宽内,天线间的耦合平均降低约10 dB,代价为天线阻抗匹配带宽略减小。

模式耦合理论具有如下特点:(1)通过对模式互导纳的分析,可以精准量化每个模式对耦合的贡献;(2)通过对模式电流的分析,可以准确定位功能模式与非功能模式,所谓功能模式就是对天线辐射起主要作用的模式,非功能模式就是对天线辐射贡献较小,主要对天线耦合产生贡献的模式;(3)通过模式调控,在不影响功能模式的前提下,抑制非功能模式,可以在不改变或较小改变天线本身工作特性与两天线间距的前提下实现带外耦合抑制。除了上述的耦合模式抑制技术外,滤波天线技术也是对平铺式共孔径天线进行耦合抑制的有效方法^[60-63]。所谓滤波天线是指天线本身具备带外滤波的能力,通常采用两种设计方法。第一种方法为从滤波器的角度出发^[64-66],对滤波器的最后一级进行设计,使得滤波器具有辐射能力。第二种方法从天线的角度出发^[67-69],在天线馈电上集成滤波结构或对天线本身辐射结构进行优化,使天线增益产生类似滤波器的响应。文献[64]中提出了一种使用滤波天线的平铺式共孔径天线,在天线上加载了三个短路探针从而实现带外辐射零点,天线的增益具有带通响应,实现了大于30 dB的端口隔离度。

3.2 嵌套式共孔径天线

嵌套式共孔径天线,在低频单元所占口径内空白部分,放置不影响其辐射性能的高频单元。根据天线单元形式可分为平面嵌套与立体嵌套两种,平面嵌套为

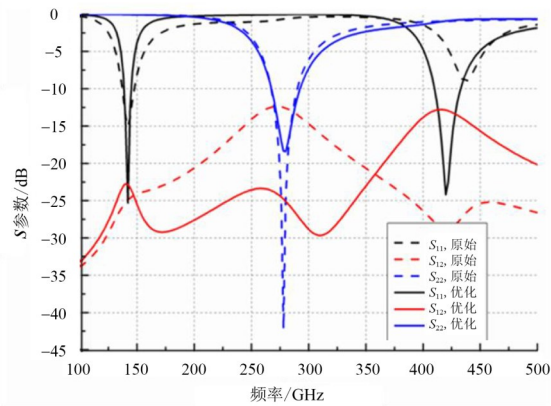
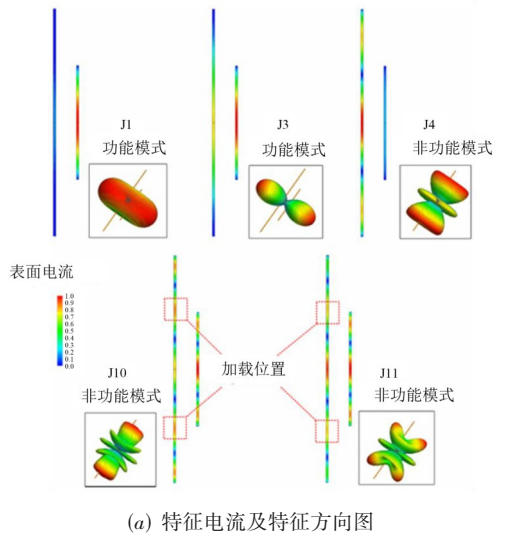


图10 振子天线模式调控去耦合^[53]

将高频单元在低频单元间空白处放置^[70-72], 立体嵌套为将高频单元嵌套放置于低频单元内部^[73, 74].

为了防止高频单元与低频单元之间出现严重的邻频干扰, 平面嵌套共孔径形式通常用于测控通信系统中频率相差较大的天线, 例如用于卫星通信的Ku/Ka波

段天线阵列. 文献[70]中提出了一种用于Ku/Ka波段的卫星通信的平面共孔径波束扫描阵列天线, 该天线工作于17.7~21.2 GHz的右旋圆极化和27.5~31.0 GHz的左旋圆极化双频段, 两个频段的中心频率比为1.5:1. 在该天线结构中使用了可集成至馈线的二阶滤波器来提高不同频段天线单元间的隔离度.

立体嵌套式共孔径天线通常用于基站天线及阵列的设计中, 结构示意图如图11所示. 文献[74]中提出了一种基于嵌套式布局的双频段共孔径基站天线阵列. 在该天线结构中, 高频单元放置于低频单元的中心, 为了组成阵列, 在相邻低频单元之间也放置了高频单元. 为了减小对高频单元性能的影响, 低频单元采用类似碗状的设计, 同时在布置于两个相邻的低频单元之间的高频单元四周加装用于改善高频单元性能的金属挡板, 实现了0.82~0.96 GHz和1.71~2.17 GHz的双频共孔径.

3.3 交错式共孔径天线

交错式共孔径天线, 低频单元放置于高频单元上方, 结构示意图如图12所示. 所面临的问题除了天线间的强电磁耦合外, 还有低频单元对高频单元的遮挡效应, 即减小高频单元的辐射在低频单元上产生的感应电流, 主要方法有抑制感应电流的产生和感应电流的抵消技术^[62, 75-77].

文献[75]中提出了一款基于抑制感应电流产生的交错式共孔径天线, 在一个低频单元下方对称放置了四个高频单元. 在该设计中, 在低频单元的辐射贴片上加载了扼流圈结构, 如图13(a)所示. 该结构的等效电路为并联LC谐振电路, 在高频表现为开路. 通过扼流圈结构的加载抑制了高频单元的辐射在低频单元上产生的感应电流, 从而减小上方低频单元对下方高频单元的遮挡效应. 由图13(b)可以看出, 加载扼流圈后, 低频单元对高频单元子阵辐射的影响明显减小, 从而实现了0.88~1 GHz和1.71~2.28 GHz的双频共孔径.

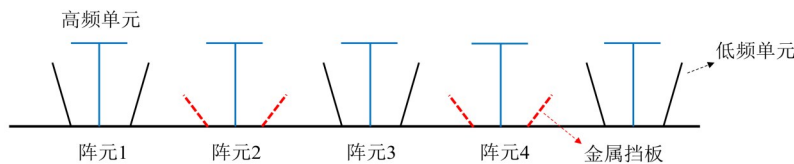


图11 立体嵌套式共孔径天线结构示意图

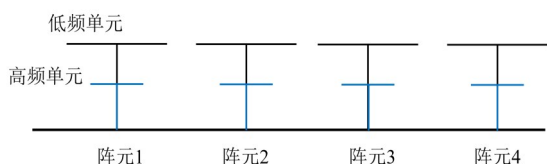
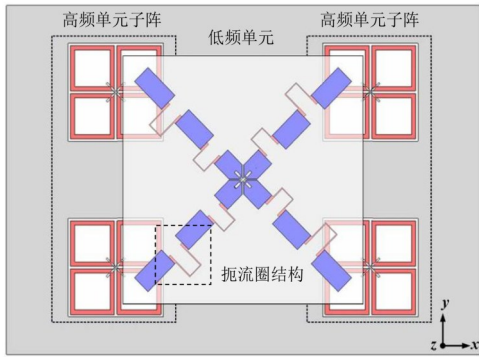
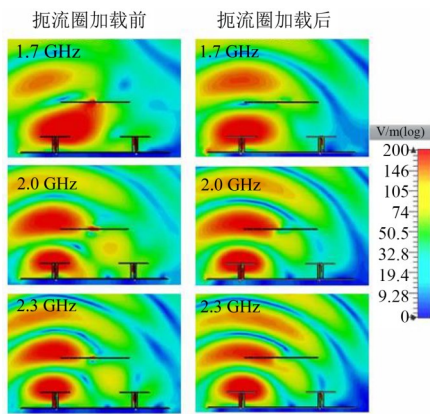


图12 交错式共孔径天线结构示意图

文献[77]中提出了一种基于感应电流抵消的交错式共孔径天线, 同样在一个低频单元下方对称放置了四个高频单元. 由于低频单元对高频单元的遮挡效应, 高频单元在低频单元上会产生感应电流. 通过在低频单元的辐射贴片上开了U形槽, 感应电流在U形缝隙的



(a) 天线结构



(b) 加载扼流圈前后高频单元子阵激励时的 xoz 平面电场分布

图 13 加载扼流圈的交错式共孔径天线^[75]

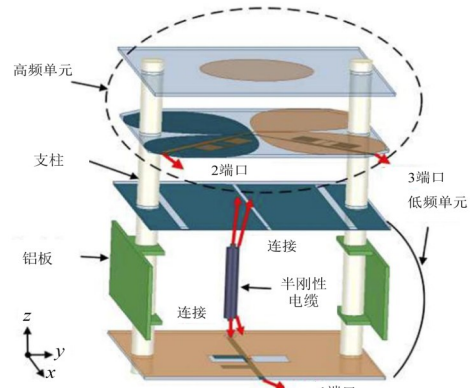
两侧方向相反,产生的散射电场相互抵消,从而减小了对高频单元辐射方向图的影响. 最终,该设计方法实现了 1.7~2.2 GHz 和 3.3~3.6 GHz 的双频共孔径.

3.4 叠层式共孔径天线

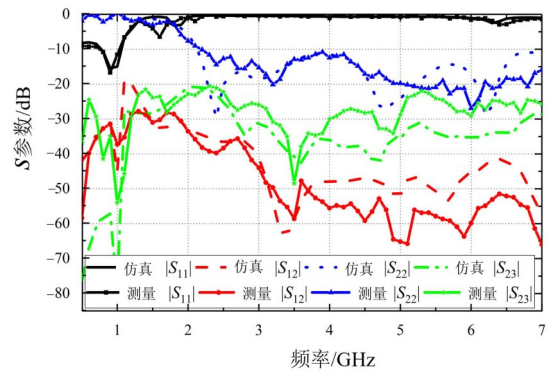
叠层式共孔径天线,高频单元放置于低频单元上方. 相较于平铺式及平面嵌套式布局,具有更高的孔径复用率,同时可以避免立体嵌套式布局要求低频单元与高频单元频率比较大、交错式布局低频单元带宽极为受限的问题. 但是其设计所面临的问题最为复杂,需同时考虑天线间的强电磁耦合、高频单元所需的反射器以及高频单元对低频单元的遮挡效应^[61,78-81].

文献[78]提出了一种用于第五代移动通信的叠层式共孔径天线阵列,将四个高频的贴片天线叠层放置于低频缝隙天线上,通过耦合微带线和馈电结构上加载开路枝节给缝隙天线集成滤波响应,利用缝隙天线本身的滤波性能和双功能超表面实现了对带外耦合的抑制. 双功能超表面在低频单元的工作频段作为人工磁导体反射器,在高频单元的工作频段内作为带通频率选择表面. 仿真和测试结果表明,该阵列在 0.69~0.96 GHz 和 3.4~3.7 GHz 频段具有稳定的辐射方向图和 27 dB 以上的隔离度.

针对飞行器测控通信与对抗应用,文献[81]中提出了一种覆盖 UHF、S 和 C 波段的共孔径天线,它包括一个在 UHF 频段工作的折叠振子天线和一个覆盖 S、C 频段的双极化平面领结天线,如图 14 所示. 在文献[81]中通过准八木原理严格分析了高频单元对低频单元的遮挡效应,并严格推导并验证了减少遮挡效果的一般设计准则. 低频和高频单元互为反射器和引向器,实现了 100% 的孔径复用效率. 为了提高低频和高频单元间的隔离度,低频和高频单元分别集成了低通和带阻滤波响应. 共孔径天线的阻抗匹配带宽分别为 0.77~1.06 GHz 和 2.2~6.6 GHz,隔离度大于 30 dB.



(a) 天线结构



(b) 隔离度

图 14 基于准八木原理的叠层共孔径天线^[81]

3.5 共孔径天线技术特点总结

综合上述内容,本节介绍了将多天线放置于同一孔径的平铺、嵌套、交错与叠层四种布局方式,阐述了每一种布局的优势、所需解决的关键问题及设计方法. 当前低耦合多极化天线孔径布局方式多为交错式及嵌套式,正向 3D 的叠层式发展,叠层式布局由于其极高的空间利用率而成为了飞行器综合天线孔径设计的极佳选择,该种布局方式既可以实现辐射孔径的复用,也可以实现天线结构的复用. 对采用上述四种布局方式对应的共孔径天线的实际效果进行对比,如表 3 所示. 可以看

到如文献[81]所示的采用叠层式布局的共孔径天线在实现孔径复用率为100%的同时具备较小的尺寸。

表3 4种共孔径天线布局方法的效果对比

文献	共孔径形式	尺寸/ λ_c^3	隔离度/dB	孔径复用率
文献[60]	平铺	$1.14 \times 0.40 \times 0.09$	>30 >30	0
文献[73]	嵌套	$2.83 \times 2.83 \times 0.57$	>30 >15	80%
文献[62]	交错	$0.79 \times 0.79 \times 0.22$	>27 >24	24%
文献[81]	叠层	$0.15 \times 0.15 \times 0.14$	>30 >30	100%

对于飞行器当中不同功能的测控通信系统,可以将多频多极化天线技术以及共孔径天线技术结合使用,从而实现飞行器平台当中天线口径数量的大幅缩

减。对于如表1中所示的使用单个天线单元的测控通信系统,如短报文通信以及视距通信的数据链系统等,更加适合采用多频多级化天线技术进行综合,从而减少所需天线的数量。在此基础上,对于部分难以实现综合的分立天线单元,以及飞行器当中的一些超视距通信系统所采用的阵列天线,以及如北斗导航B1、B3阵列天线、卫星通信天线阵列,共孔径天线技术能够进一步减少飞行器的天线孔径。对飞行器测控通信系统的天线进行孔径综合设计,如图15所示,结合多频多极化天线技术以及共孔径天线技术,理论上有望将原本所需要的十二个天线孔径缩减为四个,孔径数量缩减到原本数量的1/3。此外,使用共孔径天线设计方法,也可将测控通信天线与其他宽带系统(例如电子战)天线放置于同一孔径,实现孔径综合,例如将Ku波段的电子战干扰对抗天线与频率相差较大的UHF卫星通信天线进行叠层共孔径设计。

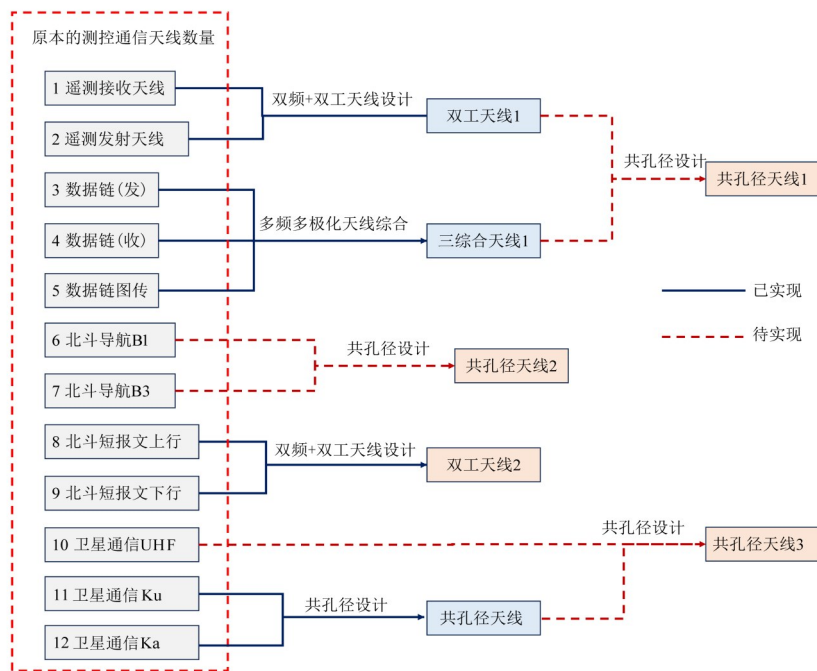


图15 测控通信系统天线孔径综合示意图

4 天线阵列耦合抑制方法

飞行器上部分测控通信系统天线需要组成阵列的形式来提高天线性能,例如卫星导航天线阵列可以通过自适应波束形成技术来实现抗外部电磁干扰的目的。然而,为了减小对飞行器气动性能以及隐身性能的影响,用于放置天线阵列的空间受到了极大的限制,阵列当中的阵元间距将被严重的压缩,导致阵元之间存在着强烈的相互耦合,可能导致阵元的阻抗匹配恶化、增益下降、嵌入方向图畸变等问题。因此,如何实现天线

阵列的耦合抑制是提升天线阵列性能的重要因素。本节将从模式理论分析及模式调控解耦、寄生元件加载解耦以及去耦合网络三个方面对天线阵列的耦合抑制方法展开介绍,见图16。

4.1 模式理论分析

如第3节所述,为了满足测控通信系统的多频段通信的需要,在同一天线孔径中会集成多个天线。过小的天线间距可能导致天线间产生严重的耦合。通过模式理论分析的方法,能够定位对同频或异频天线之间的

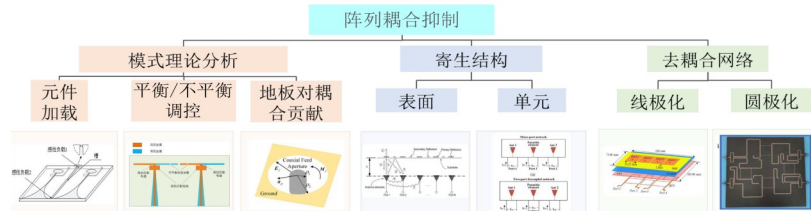


图 16 天线阵列耦合抑制方法

耦合起主要贡献的耦合模式,并通过模式调控的手段加以抑制,从而能够实现天线之间的耦合抑制。

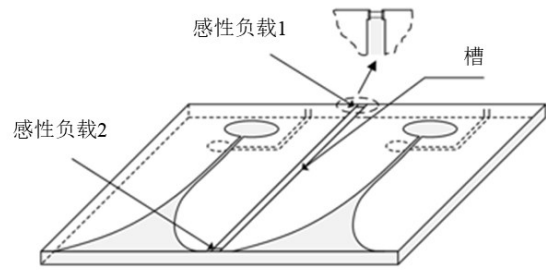
4.1.1 集总元件加载

在天线结构当中进行集总元件的加载是重要的模式调控手段之一^[82]。对于天线的特征模式,集总元件的加载对不同模式的具体影响并不相同,主要体现在集总元件加载后,各模式导纳的变化不同。为了研究集总元件加载对不同模式的模式导纳的影响,文献[82]构建了包含集总元件加载效果的模式导纳等效电路,并指出对于低阶或高阶模式可分别采用二阶或四阶高通电路对模式导纳进行拟合。当天线结构中进行集总元件(电容C、电感L、电阻R)加载时,可在模式导纳等效电路当中进行集总元件串联实现模式导纳的拟合。等效电路当中串联元件的值与天线结构当中的元件值以及加载位置的模式电流强度相关。通过对模式导纳进行分析可知,当在高阶模式的电流峰值位置处进行集总元件加载时,高阶模式的模式导纳变化明显,而低阶模式的模式导纳几乎不变,因此通过在特定位置进行集总元件加载,可以实现对某个模式的精确调控而不影响其他模式的性能。基于此特点,可以针对耦合模式进行抑制而不影响主要的功能模式,从而实现天线间的去耦合。

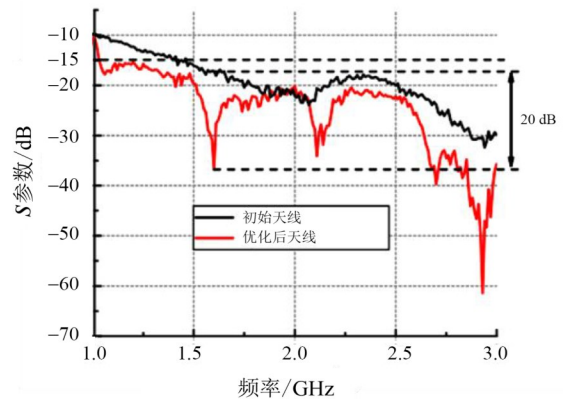
文献[83]提出了一种基于模式调控的 Vivaldi 天线阵列耦合抑制方法,在其方法中对两个 Vivaldi 天线的耦合模式进行分析,得到模式互导纳值。从而定位了模式互导纳最大的6个模式。并通过观察模式电流分布,将上述6个模式确定为非功能模式。为了实现模式抑制,同样采用在电流分布较大的地方加载集总电感的方法,此外,为避免电感被短路,在 Vivaldi 天线间开了一条缝隙,优化后的天线结构如图 17(a)所示。天线隔离度的测试结果如图 17(b)所示,可以看到,在不增加天线距离条件下,单元隔离度最高可提升 20 dB,在几乎整个工作频带内,隔离度都优于 15 dB。

4.1.2 平衡/不平衡调控

通过对天线表面的电流分布进行分解并分析得到耦合模式是一种有效的耦合分析方法。特别是针对天线的近场耦合,采用电流模式分解能够更加直观地揭示天线的耦合机理,并对去耦合方法提供理论指导。下面以近距离放置的偶极子天线为例进行说明。通常共



(a) 优化设计天线示意图



(b) 原天线和优化后天线的实测 S21 比较

图 17 Vivaldi 天线模式调控方法^[83]

线偶极子天线之间的耦合被认为较弱,这是由于偶极子天线的辐射强度在共线方向为极小值。然而,这个结论对于近场耦合并不成立,即当共线阵子被近距离放置时,同样会出现强烈的近场耦合。通过电流模式分解的方法能够对其近场耦合机理进行解释。

在传统的耦合分析方法当中,可以对天线之间的互阻抗进行计算,从而评估耦合的强弱。对于共线偶极子的互阻抗计算,通常假设偶极子馈电点两侧的电流依然是平衡电流,即电流幅度相等,且电流在天线上不同位置的幅度分布服从余弦分布^[84]。然而,文献[85]指出,当两个共线阵子被近距离放置,特别是天线的中心间距小于半波长时,在偶极子的馈电点两侧会产生不平衡的电流分布,这与传统分析方法中的假设相违背。因此,当天线间距很小时,对于共线排布的偶极子天线耦合很低这一传统认知不再成立。为了分析不平衡电流对共线偶极子天线耦合的影响,可以对不平衡电流

进行模式分解,从而分析不同模式对耦合的影响.文献[85]中提出了共模/差模电流分解法,其核心思想是将不平衡的电流分布分解为共模电流与差模电流的叠加,并分别对这两种模式进行分析.其中,差模电流分布与偶极子天线独立存在时的电流分布类似,是理想的平衡电流分布.而共模电流分布,馈电点两侧的电流流向相反,这是造成总电流分布不平衡的主要原因.需要注意的是,当偶极子天线独立存在时,由于无法形成回路,共模电流是无法产生的.但是对于共线偶极子天线,天线间的耦合为共模电流的存在提供了电流回路,如图18所示,使得共模电流的产生成为可能.由于共模电流在馈电点处的电流很小,导致共模电流的模式互阻抗远大于差模电流的模式互阻抗,说明了共模电流对耦合起主要贡献,需要对共模电流进行抑制从而实现去耦合.在文献[85]中,通过不平衡的电容加载,实现了耦合模式抑制,从而提升了共线偶极子天线之间隔离度的提升,如图19所示.不平衡电容加载的位置选择在共模电流的峰值处.通过不平衡电容的加载,共线偶极子天线间的隔离度在工作频点可提升至15 dB以上.

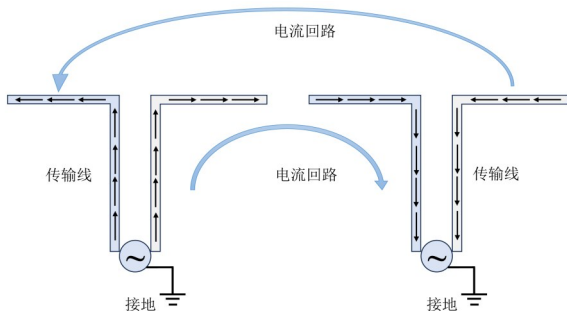
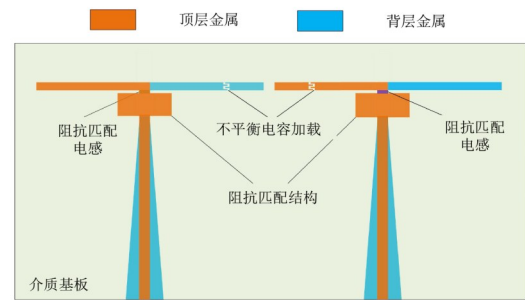


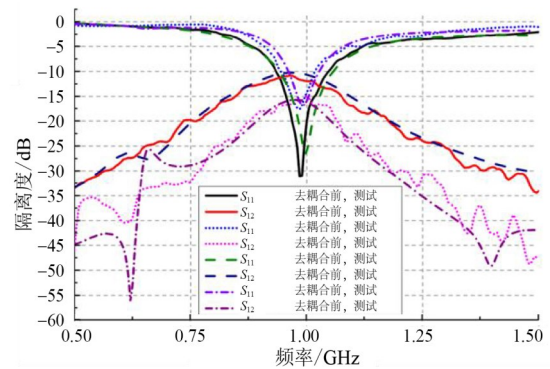
图18 耦合为共模电流提供的电流回路

需要注意的是,共模/差模电流的概念与奇偶模的概念容易被混淆,两种模式的概念在微波领域,特别是传输线的分析中被广泛地应用.理论上,天线表面的电流分布均可被分解为上述两种模式的叠加^[86,87].奇偶模的概念往往无法脱离微波网络模型,对于一个具有对称性的微波网络模型,可在对称轴位置假设存在理想电壁(奇模)或理想磁壁(偶模),从而实现奇模与偶模的分解并对奇偶模分别进行分析^[88,89].

而对于差共模式,则由传输线上的电流方向决定,电流方向相同为共模,相反为差模.差共模式与奇偶模式的一个关键差别在于,差共模式不需要理想电壁与理想磁壁的辅助便可进行分析.在本文所涉及的偶极子的案例当中,天线的馈电结构可天然地作为两根传输线进行差共模分解,两种模式的电流幅度可由天线表面的总电流分布直接获取,相比奇偶模分解的方法更加高效.



(a) 不平衡电容加载



(b) 隔离度

图19 采用不平衡电容加载的共线偶极子去耦合方法^[85]

4.1.3 平台贡献

用于天线布局的金属平台对于天线间的隔离度有重要影响.通过在平台上对天线进行合理的布局能够显著提升天线间的隔离度.文献[90]提出了一种多输入多输出(MIMO)天线阵列的自解耦方法.该文献首先研究了在无激励情况下的金属地平面所固有的特征模式,结果表明,在金属地平面的某些特定模式下,存在两个或多个平行的弱电场区域.进一步利用贴片天线激发上述特定的模式,便可调控金属地平面的电场分布.此时,将另一个天线单元布置于上述金属地平面的弱电场区域可以大幅提升天线间的隔离度.为了验证该解耦方法的可行性,对 1×2 微带贴片天线阵列进行了仿真与测量,测试结果表明,在3.88~4.17 GHz范围内,天线间的平均隔离度高于28 dB,最高隔离度可达57 dB.该自解耦方法具有较强的通用性和可扩展性,适用于不同类型的天线阵列和多单元阵列.

文献[91]建立了包含了飞行器整机结构、材料与天线一体化的电磁耦合分布模型,提出了天线总体布局的迭代优化设计方法.此方法基于模式激励系数对天线端口和载体平台的相互耦合进行量化,通过模式线性叠加的方式表征天线间的耦合,并根据模式激励系数的分布确定了天线耦合最小的安装位置.针对激励系数计算中多重积分的处理会严重影响计算精度的

问题,文献[91]证明了模式激励系数和模式电荷的正比线性关系,用模式电荷代替所有的激励系数,大大提高了该方法的普适性和易用性.如图20所示,通过实测验证表明,利用该方法指导无人机的天线布局,天线间的隔离度整体提升了20~40 dB.

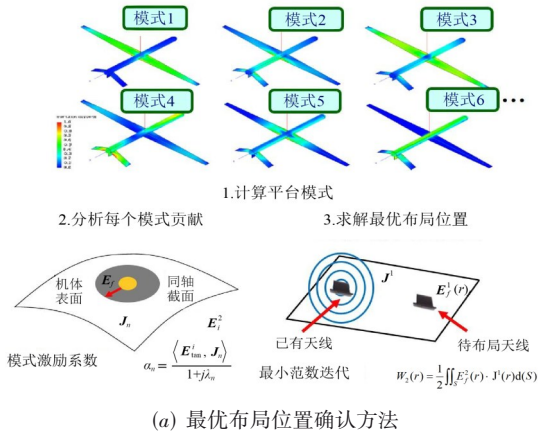


图20 基于特征模理论的飞行器平台天线布局方法^[91]

4.2 寄生结构

对于多个天线单元之间的互耦,引入寄生结构是实现耦合抑制的重要方法之一.在设计过程中,通过巧

妙地设计寄生结构的尺寸参数和放置位置,能够有效地实现耦合场的抵消,从而抑制天线间的耦合.典型的寄生结构包括用于天线阵列上方的去耦合表面以及用于天线阵元之间的寄生单元,如图21所示.

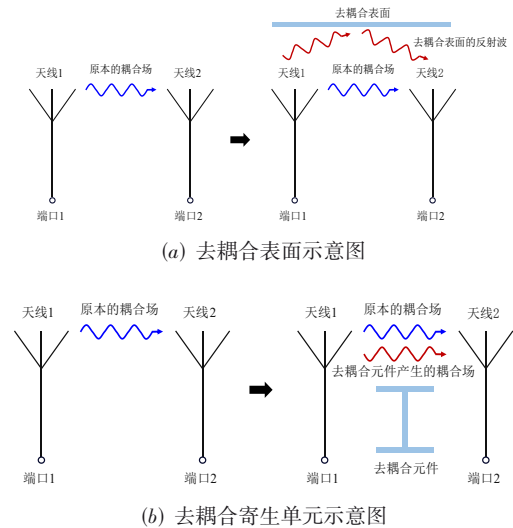


图21 寄生结构去耦合原理示意图

4.2.1 去耦合表面

去耦合表面由多个电小金属贴片组成的薄膜表面构成.其去耦合原理为利用去耦合表面产生的反射电磁波与原本天线阵元间的空间耦合幅度相等,相位相差180°,从而实现天线阵元的耦合抵消,如图21(a)所示.

在文献[92]中首次提出了去耦合表面的概念,并分别针对八元线极化贴片阵列天线和工作于5G频段的2×2双极化阵列天线进行去耦合表面设计.测试结果表明,对于八元线极化贴片阵列,使用去耦合表面后任意两个相邻阵元之间的隔离度能够从15 dB提升至30 dB以上,与此同时,去耦合表面不会对天线阵元的阻抗匹配产生消极影响.对于2×2双极化阵列天线,利用去耦合表面,两个相邻阵元之间的水平极化与垂直极化方向的耦合、同一阵元两个正交极化之间的耦合系数均被有效抑制至-25 dB以下.在文献[93]中提出了具有极化旋转特性的去耦合表面结构,使用该去耦合表面能够产生两个正交极化分量的反射波,通过调整去耦合表面的结构参数和高度能够控制反射波的幅度与相位,实现同时抵消天线单元间的共极化和交叉极化耦合的效果,从而提升天线单元之间的隔离度.作为验证,将上述具有极化旋转特性的去耦合表面应用于1×4的圆极化天线阵列中,仿真和测试结果表明该结构可使隔离度提高至25 dB以上,在3.3~3.8 GHz的频段范围内圆极化阵列的轴比低于3 dB.

对于飞行器的测控通信系统,去耦合表面的优势在于,其应用不会受到天线阵元间距的限制,因此可以用于紧凑排布的天线阵列当中.然而,去耦合表面的使用将不可避免地增加阵列的剖面高度,因此在天线孔径高度受限的情况下,去耦合表面的使用将会受到限制.

4.2.2 寄生单元

使用寄生单元去耦合的作用机理可以解释为在天线单元之间创建额外的耦合路径,从而与原本的耦合相抵消,从而提升天线间的隔离度,如图21(b)所示.

针对线极化天线,文献[94]提出了一种二元天线阵列寄生去耦技术,该技术通过在两个辐射天线单元之间插入一个无源寄生单元以抵消原有耦合.对于由两个单极子天线组成的天线阵列,寄生单元可以是一个与单极子天线结构相同的无源结构,结果表明,在2.4 GHz处,两个单极子天线之间的隔离度从5 dB增加到27 dB.类似地,对于由两个贴片天线组成的天线阵列,在天线之间可以插入与贴片大小相同的寄生单元实现去耦.结果表明,2.4 GHz处,使用此方法后,两个贴片天线之间的隔离度从18 dB增加到29 dB.对于由两个倒F天线组成的对称阵列,可以在天线之间插入一个T形单极子实现去耦合,仿真结果表明,在2.4 GHz处,两个倒F天线之间的隔离度从13 dB增加到28 dB.针对用于飞行器的北斗导航或卫星通信的圆极化天线之间,寄生单元需要保证实现耦合抑制的同时维持天线阵列出色的圆极化性能,这使得寄生元件的结构设计变得更加困难^[95].针对此问题,通常将用于去耦合的寄生单元同样视作辐射器,其产生的场与天线产生的场相叠加并满足圆极化辐射的条件,从而实现天线阵元圆极化性能的提升.例如文献[96]设计了一种新型结构的去耦合寄生单元,为了保持出色的圆极化特性,用于圆极化阵列的去耦合元件本身同样需要具备圆极化的特点.基于此思路设计的寄生单元能够将二元圆极化天线间的隔离度提升至30 dB以上.此外,在1.7~2.7 GHz的频带范围内,圆极化天线阵元的轴比均小于3 dB.

对于用于测控通信的天线阵列,寄生单元的优势在于其使用不会带来额外的插入损耗,因此不会对发射功率以及接收机的灵敏度产生影响.然而,寄生单元的布局需要一定空间,而在飞行器平台当中,阵列布局的空间相对较小,因此寄生单元的使用会受到天线阵元间距的限制.

4.3 去耦合网络

使用去耦合网络是实现阵元间去耦合的重要方式之一.去耦合网络可以由集总参数元件构成,如使用贴片电感和电容.此外,去耦合网络也可以使用分布参数

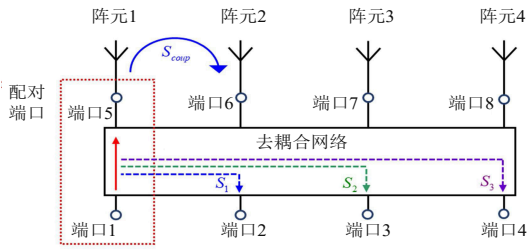
元件进行构建,如利用微带线、交指电容等.不同结构的去耦合网络可以广泛应用于不同类型的天线阵列,包括线极化和圆极化天线^[97-101],以满足各种测控通信任务的需求.理想情况下,多端口去耦合网络通常是互易、无耗的,其输入端口连接到源,输出端口连接到天线阵元,使所有输入到端口的功率都被无反射地馈送至天线端口.文献[97]提出了一种大规模多端口去耦合网络的系统设计方法,可用于线极化和圆极化天线阵列,根据工作频率的不同,去耦合网络可以通过集总阻抗和分布阻抗的广义 Π 网络来实现,该文献中提出对于 N 元天线阵列的去耦合网络,至少需要 N^2+N 个阻抗元件组成,为去耦合网络的设计提供了基本的理论指导.

4.3.1 线极化天线阵列

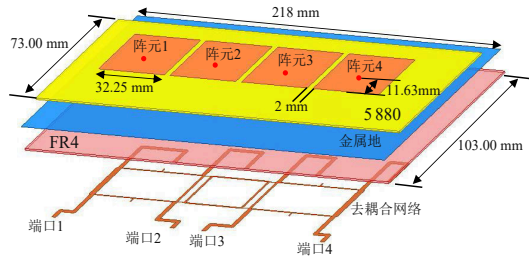
对于飞行器当中用于测控通信的紧凑排布的相控阵天线,文献[98]提出了一种具有端口配对特性的去耦合网络.该去耦合网络能够提供额外的六条额外的耦合路径,从而实现了四元天线阵列中相邻阵元与非相邻阵元间的耦合抑制.此外,为了保证飞行器测控通信相控阵天线的波束扫描性能不会受到去耦合网络的影响,在文献[98]中首次提出了去耦合网络输入端口与输出端口间的端口配对特性的概念.如图22(a)所示,去耦合网络的输入端口1与输出端口5具有配对特性,而端口1应与端口5~端口7保持较高的隔离度,从而保证由端口1馈入的能量主要被天线1所辐射.通过分析阵因子分析了端口配对能力对波束扫描性能的影响.研究表明,当输入端口与非配对端口之间的隔离度小于15 dB时,阵列的主波束增益可能发生恶化,同时阵列的副瓣、栅瓣幅度可能出现抬升.文献[98]中提出的去耦合网络通过环形结构设计,保证了输入端口与非配对端口之间的隔离度大于15 dB,如图22(b)所示.仿真和测试结果表明,阵列各单元间的隔离度提高了7.0~23.8 dB,阵列在所有扫描角度的实现增益可提高0.6 dB,如图22(c)所示.

4.3.2 圆极化天线阵列

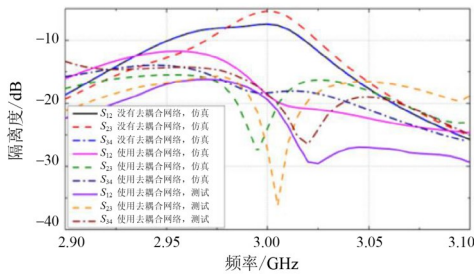
对于飞行器测控通信系统当中的卫星导航圆极化天线阵列,阵元之间的耦合情况更加复杂.与线极化阵元相比,圆极化阵元需要考虑两组正交极化模式之间的耦合,复杂程度大大增加.此外,圆极化天线间的解耦不仅需要提升阵元之间的隔离度,同时还需要维持阵元的圆极化特性,这对去耦合网络的设计提出了更为苛刻的要求.为了实现去耦合的同时维持天线的圆极化特性,文献[100]提出了基于正交模分解的圆极化贴片阵列去耦馈电网络设计方法.文中将圆极化电流分解为两个幅度相等,相位相差 90° 的正交线极化模式,即将复杂的圆极化转变为更加直观的线极化进行



(a) 端口配对特性示意图



(b) 天线及去耦合网络结构



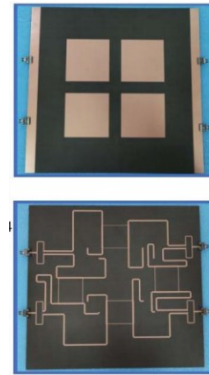
(c) 去耦性能

图 22 去耦合网络天线耦合抑制^[98]

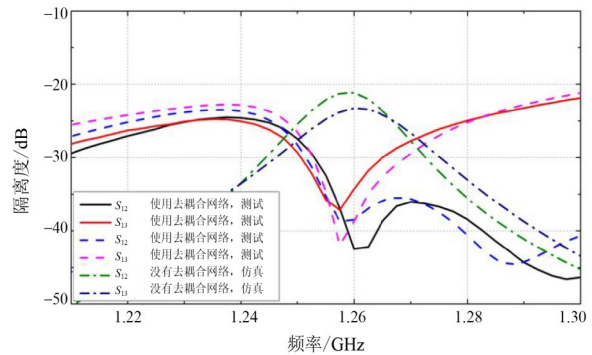
分析. 在此基础上,文中指出对应于两个平行线极化电流的模式耦合最强,为对耦合起主要贡献的耦合模式. 因此可以抓主要矛盾,对该耦合模式进行针对性处理.

在文献[100]中,针对北斗导航 B3 频段圆极化阵列,设计了一种新型的去耦合网络,通过在馈电网络之间引入了一个定向耦合器,实现了耦合模式的对消. 与此同时,为了维持天线阵列的圆极化特性,在定向耦合器的前端集成了一分二的不等分威尔金森功分器,从而使圆极化阵元的两个正交模式幅度相等,利用此方法设计的去耦合网络能够在去耦合的同时保证天线的圆极化特性. 进一步地,对于用于卫星导航 B3 频段的 2×2 圆极化贴片阵列,文献[100]中首先确定了相邻阵元之间的耦合模式,进而设计了一种环形去耦合网络,能够实现相邻圆极化阵元之间的顺时针解耦. 如图 23 所示,仿真和测试结果显示,在中心频率 1.265 GHz 处,四个阵元之间的隔离度可提高 15~23 dB,相应的 3 dB 波束宽度覆盖 $-28^\circ \sim -27^\circ$ 的范围.

去耦合网络的优势在于其使用一般不会受到天线阵元间距的限制,且不会增加阵列的剖面. 但去耦合网



(a) 天线及去耦合网络结构



(b) 去耦性能

图 23 去耦合网络天线耦合抑制^[100]

络会带来额外的插入损耗,可能影响对测控通信系统的发射功率以及接收机灵敏度.

4.4 天线阵列耦合抑制方法总结

本节针对几类典型的去耦合技术进行了介绍,针对不同的场景,上述各种方法具有不同的优势,各类去耦合技术的特点被整理如表 4 所示. 对于飞行器当中用于测控通信的天线阵列,由于孔径空间有限,阵列的尺寸受到限制,天线阵元的间距往往很小,因此常规尺寸的去耦合寄生元件难以布置于天线阵元之间. 此外,为了保证飞行器的气动性能不受到影响,天线阵列需要有足够低的剖面. 而使用去耦合表面将不可避免地增加阵列的高度,因此与飞行器表面物理孔径的尺寸设计形成了矛盾. 去耦合网络的使用不会明显增加阵列的剖面,但会在测控通信系统的天线与发射机或接收机之间引入额外的插入损耗,因此可能对发射功率以及接收灵敏度产生消极影响. 相比较之下,基于耦合模式分析的去耦合方法为空间受限条件下用于测控通信的天线阵列的去耦合提供了新的思路与理论指导,能够在不受空间限制的情况下实现较好的耦合抑制效果,并不会带来阵列剖面增加以及插入损耗等问题,因此更加适用于飞行器当中的天线阵列.

表4 典型去耦合技术特点总结

去耦合方法	是否受空间大小限制	阵列剖面	插入损耗
耦合模式抑制	否	无影响	较小
寄生单元	是	无影响	较小
去耦合表面	否	明显增加	较小
去耦合网络	否	略微增加	较大

5 结合软件无线电系统应用

随着智能无线通信和互联网技术的不断进步,高速、可靠、远距离的无线应用需求越来越多,可重构技术展现出广阔的应用前景^[102-104]。在海量化的通信终端以及多元化的通信技术的背景下,软件无线电应运而生。软件无线电(Software Defined Radio, SDR)是以通用处理器和可编程收发器为基础,通过软件定义和实

现各类无线通信功能。近些年由于微电子技术和片上系统器件的快速发展,软件无线电技术取得迅猛发展。在射频前端方面,收发器带宽不断增长,已有设备可达到百兆以上的工作带宽^[105,106]。另一方面SDR通道数量增加,单个软件无线电平台已经可达到8收8发通道^[107]。此外,多台软件无线电设备之间支持借助时钟源对基带信号同步,组建的软件无线电协同网络有助于构建大规模收发系统。这些发展支持软件无线电设备在更多的频段内进行天线抗干扰调零^[108-113]、无线通信^[114,115]、卫星导航^[116,117]、全双工收发^[118,119]等应用,为实现更高容量、灵活通用的无线通信系统奠定了重要基础。

如图24所示,凭借软件定义信号处理、软件定义协议、软件定义收发模式的特点,软件无线电已经被广泛应用于测控通信系统中。

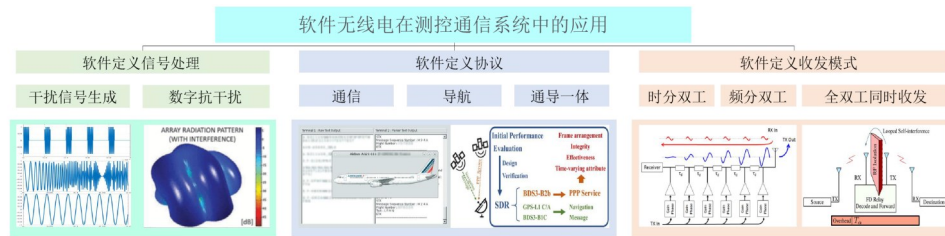


图24 软件无线电在测控通信系统中的应用

5.1 软件定义信号处理

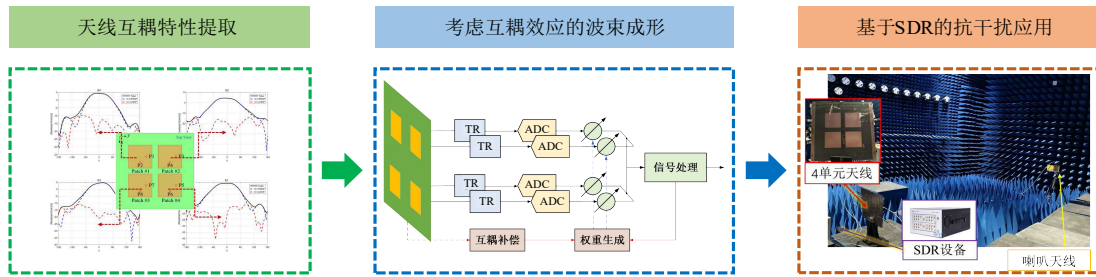
软件定义信号处理技术通过动态调配计算资源,能够根据不同的任务实施多波束形成、波束到达方向角估计(Direction Of Arrival, DOA)、干扰抑制等信号处理算法。通过灵活的软件算法,可以对天线阵列的波束方向进行实时调整,从而实现对目标信号的精准跟踪。例如在实际应用中,全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)面临接收信号强度较弱和工作频率相对固定等挑战,因此容易受到干扰,进而影响定位精度和整体性能。为了应对这些挑战,软件无线电技术可以结合自适应算法,有效增强系统的抗干扰能力,从而确保在复杂电磁环境中,测控通信系统能够稳定运行。

在GNSS信号干扰生成方面,基于软件无线电技术信号可编程的特点,可以灵活生成压制式和欺骗式干扰。文献[108]提出了一种基于软件无线电平台的干扰器,能够针对GPS导航系统生成多种干扰信号,包括宽带干扰、扫频干扰、连续脉冲干扰、窄带干扰等。实际系统的测试结果表明,所实现的干扰能够有效地导致无人机的定位和导航功能丧失。

同时,对抗GNSS干扰的技术也在不断升级。基于SDR的自适应调零天线主要用于提高接收信号的质量,特别是在存在强干扰源的情况下。对于天线阵列,软件无线电技术允许对每个阵元的射频收发链路进行

独立幅相调节,从而容易实现空域、空时域、空频域等信号处理操作,抑制干扰信号^[109]。文献[110]和文献[111]对接收卫星信号的DOA进行了估计,进而检测和抑制欺骗信号和干扰信号,在GNSS反欺骗、导航安全以及卫星通信等领域具有重要应用价值,但需要专用的高成本接收器,因此并不适合所有应用。文献[113]介绍了一种用于GNSS干扰抑制的SDR系统,使用FPGA采集并打包信号并上传计算机,并在软件中实现了一种基于广义似然比的检测技术,结合用于信号跟踪的零点转向空间滤波器,展示了对于干扰信号的抑制能力。文献[112]介绍了一种基于软件无线电技术的DOA估计的方法,通过组合多个Ettus USRP X310软件无线电设备形成多通道相干接收器,分析了相位相干对接收器的同步要求,证明了软件无线电技术在无源雷达应用的适用性。综上所述,SDR在自适应调零天线中发挥了关键作用,通过灵活的软件定义和通用硬件处理器,能够实时适应不同类型的干扰信号并进行高效处理。其开放的架构使得干扰抑制算法可以根据实际需求进行快速更新和优化,从而增强系统的抗干扰能力和可靠性。

特别地,针对北斗阵列天线阵元间互耦合使得GNSS干扰抑制能力降低的问题,文献[113]提出了一种考虑互耦效应的数字波束成形(Digital Beamforming, DBF)算法,如图25所示,使用ADRV9009 RF-SOM

图25 考虑互耦效应的GNSS天线抗干扰波束成形方法^[113]

软件无线电平台搭建了GNSS接收抗干扰系统,实现了算法的快速验证与测试,结果表明所提出的系统能够形成深度精确的零陷,证明软件无线电技术在天线抗干扰性能评估与测试中具备独特优势。

5.2 软件定义通信协议

软件无线电的一个重要特点是能够在不改变硬件的情况下,通过修改软件来支持多种通信协议。这一特点在通信与导航深度融合的背景下显得尤为重要。SDR技术实现了通信与导航协议之间的无缝切换,为“通导一体”系统的建设提供了强大的技术支撑,从而推动了这一系统的发展。这种灵活性使得测控通信系统能够同时满足信息传输和位置信息获取的需求,提高了系统的多功能性和整体性能。

在测控通信功能方面,SDR技术已经在空空、空地数据链路中得到了广泛应用。文献[113]针对现代无人驾驶航空系统(UAS)和地面控制站(GCS)之间的可重构空地数据链路,开发了一种软件定义无线电硬件平台(SDRP),可响应信道条件变化,实现多频段、多标准、自适应调制等通信功能。上述特征可以在软件中进行实现,而不需要替换板载部件。在飞行的所有阶段(起飞、滑行、巡航和着陆)实现可靠的通信。文献[115]表明SDR提供了一种简单的方法来解决传统接收器的典型问题,比如射频硬件损伤、采样信号同步等,并针对航空甚高频(VHF)链路上的飞机通信寻址和报告系统(AVARS),在非理想同步的情况下设计了一种基于GNU Radio的MSK调制接收器以及软件定义的帧解析器。

在导航功能方面,SDR技术的优势同样显著。SDR技术将复杂的信号处理过程迁移到PC端,从而简化了硬件处理器的设计。文献[120]提出了基于SDR概念的GNSS接收机设计,实现了一种纯软件实现的实时接收机,信号在专用的操作系统RT Linux中直接进行处理,而无需经过FPGA或DSP处理器;同时,基于SDR能够轻易实现GNSS信号同步、捕获和跟踪算法的实现。例如,文献[116]基于软件无线电平台,实现了北斗卫星导航信号的接收和处理,对于精确单点定位(PPP)的B2b信号进行处理,得到PPP业务信息,包括轨道校正、时钟校正和差分码偏置校正,验证了SDR技术在北斗

卫星导航接收系统中应用的可行性。

图26为软件无线电技术与通信导航一体化融合框架。随着北斗三号全球卫星导航系统的建成,以及通信技术的不断发展,通导一体化技术逐渐成为未来测控通信系统的研究重点^[117]。而SDR技术利用其独特的协议可重构特点,在通导一体化信号设计、通导一体化信道模型、通导一体化信号接收处理、通导一体化网络架构、通导一体化网络管理方面,助力了通信导航业务能力的协同增强,在未来一体化、智能化的飞行器测控通信体系中发挥着不可替代的作用。

5.3 软件定义收发模式

传统的收发模式受制于硬件架构,而软件无线电能够根据系统需求动态调整时分双工(Time Division Duplexing, TDD)和频分双工(Frequency Division Duplex, FDD)模式,实现更高效的资源利用。此外,软件无线电还具备全双工通信的能力,同时进行发送和接收,使得测控通信系统能够在不增加带宽的前提下提升通信效率。这种灵活的收发模式大幅提高了系统的适应能力,适合复杂多变的应用场景。

在传统的飞行器测控通信领域,TDD通过在同一频率的不同时间槽上交替进行发送和接收信号,而FDD则在不同的频率上同时进行发送和接收。文献[121]介绍了一种宽带全集成软件定义收发器,支持FDD和TDD操作。该研究提出了一种新的电路概念,通过分布式发射机在接收端口引入发射信号作为对消信号,同时在发射端口引入补偿信号。文献[122]提出了一种全集成的软件定义FDD无线电(SDFDD),能够在0.3~1.6 GHz范围内实现了高隔离度的收发。SDR技术通过提供灵活、可编程的无线电平台,使得能够在不同的频率和标准下动态调整和优化无线通信系统的性能。在全双工通信系统中,SDR技术支持多个发射(Tx)和接收(Rx)通道的独立调节,对于同时收发技术的实现起到至关重要的作用。文献[118]提出了一种基于软件的实时全双工中继系统,能够同时从源接收分组信号,并将其向目的地转发,实现了全双工中继系统。解决了传统时分双工^[121,123]和频分双工^[122]半双工通信系统中中继延迟大和频谱占用度高的缺陷。

针对 SDR 设备在全双工通信系统中, Tx 和 Rx 通道之间自干扰的挑战, 文献[119]提出了一种数字域对消算法, 如图 27 所示. 算法利用了 SDR 设备的典型架构, 直接从 Tx 通道提取发射信号, 通过幅度控制、相位对齐与翻转算法, 在 Rx 通道中进行对消, 而无需借助额外的硬件. 在商用 SDR 设备(USRP B210)上开展了实

验, 并使用 GNU-Radio 平台实现对消算法, 实验结果表明, 对于单音信号的平均对消水平可以达到 42 dB, 对于 200~6 000 MHz 频带内的单边带调制信号可以达到 35 dB 抑制水平. 为基于 SDR 设备的同时收发全双工通信系统的自干扰抑制提供了一种低成本、简单、高效的方案.

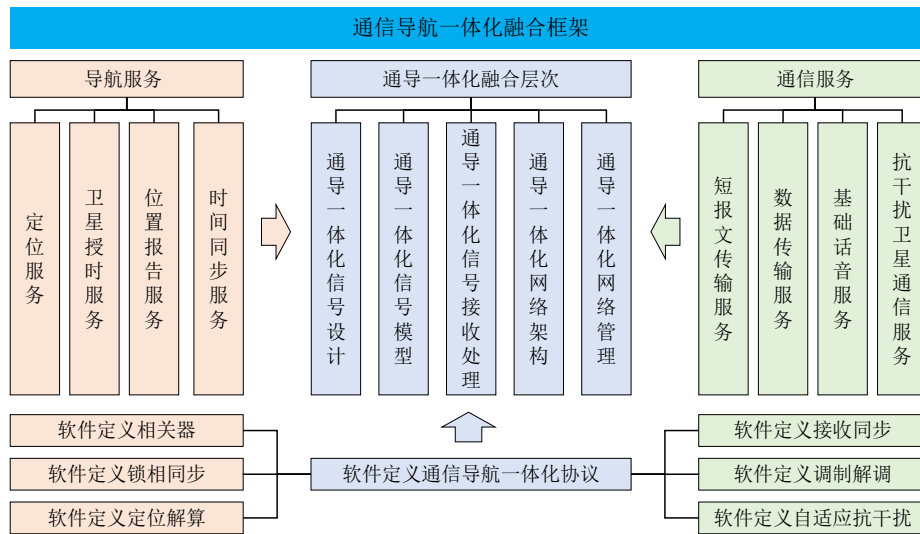


图 26 软件无线电技术与通信导航一体化融合框架

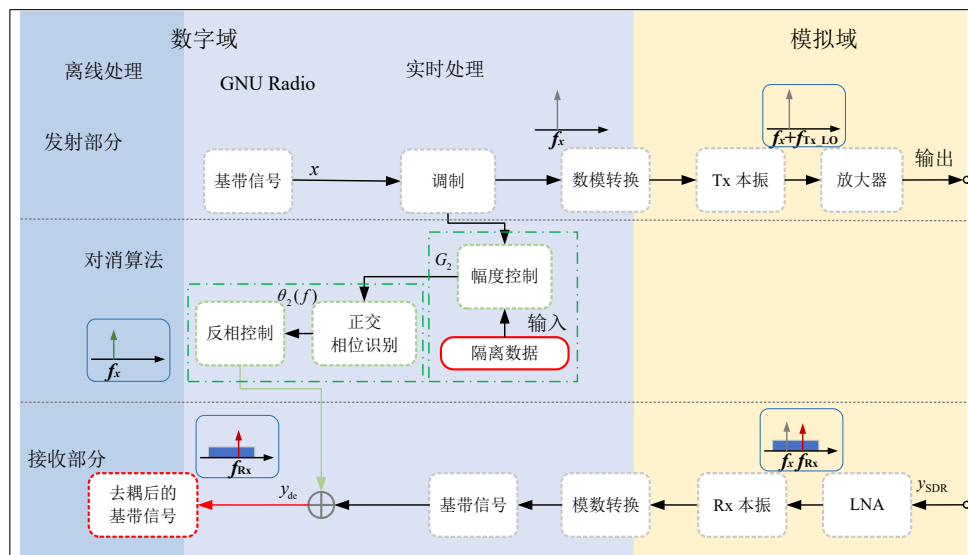


图 27 SDR 自耦合数字域对消算法^[119]

6 总结与展望

随着先进测控通信平台不断向小型化、集成化、多功能化发展, 飞行器的测控通信系统对天线孔径综合提出了越来越高的需求. 本文对用于飞行器测控通信天线孔径综合的三项关键技术——多频多极化天线技术、共孔径天线技术以及天线阵列的耦合抑制技术进行了综述和讨论. 利用多频多极化天线技术能够将多

个分立的单元进行综合, 结合双工天线技术能够使单个天线实现发射端口和接收端口间大于 50 dB 的端口隔离度. 该技术可应用于遥测与遥控系统的天线集成化设计、北斗短报文发射与接收系统的天线集成化设计等, 从而有效缩减测控通信系统所需天线数量. 进一步, 介绍了将多个天线放置于同一个孔径的共孔径技术, 阐述了基于集成滤波响应的耦合抑制设计方

法及原理,给出了叠层式布局中遮挡效应的分析方法及设计案例.该技术可应用于测控通信系统与其他宽带系统(例如干扰对抗系统)的天线孔径综合中,从而减少飞行器平台所需要的天线孔径数量.针对飞行器天线阵列布局空间受限带来的耦合问题,本文介绍了基于耦合模式调控、寄生元件、去耦合网络的同频天线耦合抑制方法,可有效提高天线阵列性能.最后,结合软件无线电系统功能特点,阐述了使用软件无线电系统实现测控通信的可行性及其优势.使用软件无线电设备能够实现 SDR 双工天线、GNSS 抗干扰天线进行设计.

随着飞行器测控系统的形态逐步升级为软件可定义、在线可升级,仍然存在一些需要解决的问题,可归结为以下几个方面:

其一,天线与软件无线电结合实现智能可重构是飞行器测控通信技术的重要发展方向.智能可重构技术具备集成化、小型化、智能化和自主化的特点,具有灵活性与适应性强、资源利用效率高的优势,也对天线提出了多频段覆盖、多极化特性以及可重构辐射方向图的需求.结合软件无线电技术可对天线的功能可重构提供新的设计思路.如何结合软件无线电的特点对天线进行设计,从而充分发挥软件可定义的优势是智能可重构天线设计的重点.

其二,当前测控通信系统天线由单天线向多天线发展、由单波束向多波束发展、由收发分立向收发复用发展,同时多波束可支持测控系统同一时刻多节点同时通信,同时也可利用相控阵天线波束控制能力在干扰方向形成零陷,提高系统抗干扰能力.当前的天线孔径综合技术主要针对单天线开展,对于同时多波束先进相控阵天线的孔径综合技术亟待突破.

其三,测控通信系统功能众多,实际使用时需要分析不同功能的工作流程、资源需求,并对各种功能进行类型的归并和组合.如何结合软件无线电的特点,发挥软件功能可定义的优势,形成同一硬件平台具备多种通信功能的能力成为未来发展的重要方向.

致谢 感谢谷胜明博士给本文提出的参考意见.

参考文献

- [1] 贺涛,李滚.航天测控通信原理及应用[M].北京:国防工业出版社,2022.
HE T, LI G. Principle and Application of Space TT&C Communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2022. (in Chinese)
- [2] 韩帅,郭航,孟维晓,等.智能天地一体化网络的卫星跟踪测控技术综述[J].遥测遥控,2024,45(1): 1-11.
HAN S, GUO H, MENG W X, et al. Overview of satellite TT & C technology for intelligent space-ground integrated network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(1): 1-11. (in Chinese)
- [3] 魏兴.一体化测控技术,商业航天测控的未来[J].卫星与网络,2020,(8): 42-47.
WEI X. Integrated measurement and control technology, the future of commercial space measurement and control[J]. Satellite & Network, 2020, (8): 42-47. (in Chinese)
- [4] 鲁郁.北斗/GPS双模软件接收机原理与实现技术[M].北京:电子工业出版社,2016.
LU Y. Principle and Implementation Technology of Beidou/GPS Dual-Mode Software Receiver[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016. (in Chinese)
- [5] 雒明世,冯建利.卫星通信[M].北京:清华大学出版社,2020: 3-5.
LUO M S, FENG J L. Satellite Communications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020: 3-5. (in Chinese)
- [6] 全栋梁,时光辉,关成启,等.结构优化技术在高速飞行器上的应用与面临的挑战[J].力学与实践,2019,41(4): 373-381,415.
QUANDL, SHIGH, GUANCQ, et al. Applications and challenges of structural optimization in high-speed aircraft[J]. Mechanics in Engineering, 2019, 41(4): 373-381, 415. (in Chinese)
- [7] 孙聪,张澎.先进战斗机对机载射频孔径系统隐身的需求及解决方案[J].航空学报,2008,29(6): 1472-1481.
SUN C, ZHANG P. LO requirements and solutions of avionics/RF system for advanced aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1472-1481. (in Chinese)
- [8] 杨勇军,梅进杰,雷云龙.综合射频系统技术研究进展及发展前景[J].舰船电子对抗,2018,41(5): 6-11.
YANG Y J, MEI J J, LEI Y L. Research progress and development prospect of integrated RF system technology[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2018, 41(5): 6-11. (in Chinese)
- [9] 张远利,蒋东,胡来平.航空电子系统综合化设计之“害”[J].中国电子科学研究院学报,2019,14(2): 151-157.
ZHANG Y L, JIANG D, HU L P. Harm of integrated design of avionics system[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2019, 14(2): 151-157. (in Chinese)
- [10] 吴琦,王晓明,孙宏涛,等.先进飞机平台天线孔径综合的总体设计技术[J].宇航总体技术,2021,5(4): 7-13.
WU Q, WANG X M, SUN H T, et al. Overall design technology of integrated aperture antennas for advanced air-

- craft platform[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2021, 5(4): 7-13. (in Chinese)
- [11] VOGEL M, GAMPALA G, LUDICK D, et al. Characteristic mode analysis: Putting physics back into simulation[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2015, 57(2): 307-317.
- [12] ZHANG X, ZHU L. Dual-band high-gain differentially fed circular patch antenna working in TM₁₁ and TM₁₂ modes[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(6): 3160-3165.
- [13] LIU N W, CHEN X P, ZHU L, et al. Low-profile triple-band microstrip antenna via sharing a single multi-mode patch resonator[J]. *IET Microwaves, Antennas&Propagation*, 2019, 13(10): 1580-1585.
- [14] LIU J H, XUE Q, WONG H, et al. Design and analysis of a low-profile and broadband microstrip monopolar patch antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(1): 11-18.
- [15] SQUADRITO P, ZHANG S, PEDERSEN G F. Wide-band or dual-band low-profile circular patch antenna with high-gain and sidelobe suppression[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(6): 3166-3171.
- [16] DAI X W, ZHOU T, CUI G F. Dual-band microstrip circular patch antenna with monopolar radiation pattern[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 15: 1004-1007.
- [17] ZHANG D L, WU Q. A dual-band low-profile circular patch antenna[C]//2021 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM). Piscataway: IEEE, 2021: 1-3.
- [18] FAZAL D, KHAN Q U. Dual-band dual-polarized patch antenna using characteristic mode analysis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(3): 2271-2276.
- [19] ZHANG D L, WU Q. A tri-band microstrip antenna with triple polarization characteristics[C]//2021 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Piscataway: IEEE, 2021: 1-3.
- [20] YANG H C, FAN Y, LIU X Y. A compact dual-band stacked patch antenna with dual circular polarizations for BeiDou navigation satellite systems[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(7): 1472-1476.
- [21] LIU Y, LI X, YANG L, et al. A dual-polarized dual-band antenna with omni-directional radiation patterns[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(8): 4259-4262.
- [22] YANG X J, GEL, J I Y, et al. Design of low-profile multi-band half-mode substrate-integrated waveguide antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(10): 6639-6644.
- [23] HU W, YIN Y Z, YANG X, et al. Compact multiresonator-loaded planar antenna for multiband operation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(5): 2838-2841.
- [24] CHOUKIKER Y K, SHARMA S K, BEHERA S K. Hybrid fractal shape planar monopole antenna covering multiband wireless communications with MIMO implementation for handheld mobile devices[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(3): 1483-1488.
- [25] HONG J S, LANCASTER M J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*[M]. New York: Wiley, 2001.
- [26] POZAR D M. *Microwave Engineering*[M]. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [27] HARRINGTON R, MAUTZ J. Theory of characteristic modes for conducting bodies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1971, 19(5): 622-628.
- [28] CHEN Y K, WANG C F. *Characteristics Modes: Theory and Applications in Antenna Engineering*[M]. Hoboken: Wiley, 2015.
- [29] CABEDO-FABRES M, ANTONINO-DAVIU E, VALE-RO-NOGUEIRA A, et al. The theory of characteristic modes revisited: A contribution to the design of antennas for modern applications[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2007, 49(5): 52-68.
- [30] RAHOLA J, LUDICK D, FUTTER P. Characteristic modes and antenna bandwidth[C]//2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-SURSI). Piscataway: IEEE, 2014: 1415-1416.
- [31] HIKITA M, SAKIYAMA K, HIKINO O, et al. New low-distortion band-switching techniques for SAW antenna duplexers used in ultra-wide-band cellular phone[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, 52(1): 38-45.
- [32] YAN Q B, XIANG K R, WEI L Y, et al. Duplex dual circular polarization antenna array base on half-Vivaldi structure[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2023, 170: 154845.
- [33] CHEONG P, CHANG K F, CHOI W W, et al. A highly integrated antenna-triplexer with simultaneous three-port isolations based on multi-mode excitation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(1): 363-368.
- [34] UPADHYAYA T, PABARI J, SHEEL V, et al. Compact

- and high isolation microstrip diplexer for future radio science planetary applications[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2020, 127: 153497.
- [35] TIAN H L, LIU H W. Compact filtering balun diplexer with independently tuned channels and constant fractional bandwidth[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2023, 172: 154973.
- [36] WONG S W, LIN J Y, YangYang, et al. Cavity balanced and unbalanced diplexer based on triple-mode resonator[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(6): 4969-4979.
- [37] LU Y C, LIN Y C. A mode-based design method for dual-band and self-diplexing antennas using double T-stubs loaded aperture[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(12): 5596-5603.
- [38] IQBAL A, AL-HASAN M, BEN MABROUK I, et al. SIW-based frequency-adjustable antenna for IoT-based duplex wireless devices[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2024, 173: 155019.
- [39] JI S S, DONG Y D, FAN Y. Low-profile dual-band filtering antenna with a shared SIW cavity[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(10): 2053-2057.
- [40] CHATURVEDI D, KUMAR A, RAGHAVAN S. A nested SIW cavity-backing antenna for Wi-Fi/ISM band applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(4): 2775-2780.
- [41] POURMOHAMMADI P, NASERI H, MELOUKI N, et al. Highly-isolated compact self-diplexing antenna[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2024, 173: 155025.
- [42] CHEN J X, ZHANG X K, YANG L L. Broadband co-polarized antenna using monolithic slotted dielectric patch for full-duplex system[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2023, 170: 154825.
- [43] IQBAL A, AL-HASAN M, BEN MABROUK I, et al. Ultracompact quarter-mode substrate integrated waveguide self-diplexing antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(7): 1269-1273.
- [44] CHATURVEDI D, KUMAR A. A QMSIW cavity-backed self-diplexing antenna with tunable resonant frequency using CSRR slot[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(1): 259-263.
- [45] HU K Z, TANG M C, WANG Y, et al. Compact, vertically integrated duplex filtenna with common feeding and radiating SIW cavities[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(1): 502-507.
- [46] MAO C X, GAO S, WANG Y, et al. Compact highly integrated planar duplex antenna for wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(7): 2006-2013.
- [47] LEE Y J, TARNG J H, CHUNG S J. A filtering diplexing antenna for dual-band operation with similar radiation patterns and low cross-polarization levels[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 16: 58-61.
- [48] LIN X J, XIE Z M, ZHANG P S, et al. A broadband filtering duplex patch antenna with high isolation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1937-1940.
- [49] MAO C X, ZHANG L, KHALILY M, et al. A multiplexing filtering antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(8): 5066-5071.
- [50] DHWAJ K, JIANG L J, ITOH T. Dual-band filtering antenna with novel transmission zero characteristics[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(12): 2469-2473.
- [51] LIN X J, ZHANG Y, YE L F, et al. Dual-polarized duplex patch antenna based on a multiport ring feeding structure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(9): 2315-2319.
- [52] ZHANG D L, XIA S Y, REN A K, et al. A diplexer antenna with extremely high isolation for co-site duplex applications[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2024, 182: 155344.
- [53] WU Q, SU W, LI Z, et al. Reduction in out-of-band antenna coupling using characteristic mode analysis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(7): 2732-2742.
- [54] LIANG P Y, WU Q. Duality principle of characteristic modes for the analysis and design of aperture antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(6): 2807-2817.
- [55] MA Z P, YANG Z, WU Q, et al. Out-of-band mutual coupling suppression for microstrip antennas using characteristic mode analysis and shorting pins[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 102679-102688.
- [56] SAFIN E, MANTEUFFEL D. Manipulation of characteristic wave modes by impedance loading[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(4): 1756-1764.
- [57] OBEIDAT K A, RAINES B D, ROJAS R G. Application of characteristic modes and non-foster multiport loading to the design of broadband antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(1): 203-207.

- [58] OBEIDAT K A, RAINES B D, ROJAS R G, et al. Design of frequency reconfigurable antennas using the theory of network characteristic modes[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(10): 3106-3113.
- [59] ELGHANNAI E A, RAINES B D, ROJAS R G. Multiport reactive loading matching technique for wide band antenna applications using the theory of characteristic modes[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(1): 261-268.
- [60] ZHANG Y, ZHANG X Y, YE L H, et al. Dual-band base station array using filtering antenna elements for mutual coupling suppression[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(8): 3423-3430.
- [61] CHEN Y K, ZHAO J C, YANG S W. A novel stacked antenna configuration and its applications in dual-band shared-aperture base station antenna array designs[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(12): 7234-7241.
- [62] LI Y X, CHU Q X. Self-decoupled dual-band shared-aperture base station antenna array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(7): 6024-6029.
- [63] LI M, WANG R, YASIR J M, et al. A miniaturized dual-band dual-polarized band-notched slot antenna array with high isolation for base station applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(2): 795-804.
- [64] ZHANG Y, ZHANG X Y, LIU Q H. Dual-polarized filtering magnetoelectric dipole antenna utilizing intrinsic highpass filter network and integrated lowpass filter network[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(12): 8090-8099.
- [65] JIANG Z H, WERNER D H. A compact, wideband circularly polarized co-designed filtering antenna and its application for wearable devices with low SAR[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(9): 3808-3818.
- [66] JI S S, DONG Y D, FAN Y. Bandpass filter prototype inspired filtering patch antenna/array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(5): 3297-3307.
- [67] ZHANG Y Q, YANG W C, XUE Q, et al. Broadband dual-polarized differential-fed filtering antenna array for 5G millimeter-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(3): 1989-1998.
- [68] FAN C, WU B, WANG Y L, et al. High-gain SIW filtering antenna with low H-plane cross polarization and controllable radiation nulls[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(4): 2336-2340.
- [69] WEI Z H, ZHOU Z, TANG Z Y, et al. Broadband filtering magnetoelectronic dipole antenna with quasi-elliptic gain response[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(4): 3225-3230.
- [70] ZHANG J F, CHENG Y J. K-/ka-band planar shared-aperture beam-scanning array antenna for simultaneous transmitting and receiving low earth orbit satellite communication terminal[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(8): 6617-6627.
- [71] SERUP D E, PEDERSEN G F, ZHANG S. Dual-band shared aperture reflectarray and patch antenna array for S and ka bands[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(3): 2340-2345.
- [72] DING X H, YANG W W, QIN W, et al. A broadside shared aperture antenna for (3.5, 26) GHz mobile terminals with steerable beam in millimeter-waveband[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(3): 1806-1815.
- [73] MEI P, ZHANG S, PEDERSEN G F. A dual-polarized and high-gain X/ka-band shared-aperture antenna with high aperture reuse efficiency[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(3): 1334-1344.
- [74] HE Y J, PAN Z Z, CHENG X D, et al. A novel dual-band, dual-polarized, miniaturized and low-profile base station antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(12): 5399-5408.
- [75] SUN H H, DING C, ZHU H, et al. Suppression of cross-band scattering in multiband antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(4): 2379-2389.
- [76] ZHU J F, YANG Y, LIAO S W, et al. Aperture-shared millimeter-wave/sub-6 GHz dual-band antenna hybridizing fabry-Pérot cavity and Fresnel zone plate[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(12): 8170-8181.
- [77] CHANG Y L, CHU Q X, JIANG J. Split-slot resonator loaded dual-polarized electromagnetic transparent antenna for cross-band scattering suppression[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2022, 32(10): 23310.
- [78] CAO Y F, ZHANG X Y, XUE Q. Compact shared-aperture dual-band dual-polarized array using filtering slot antenna and dual-function metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(2): 1120-1131.
- [79] JI S S, DONG Y D, WEN S C, et al. C/X dual-band circu-

- larly polarized shared-aperture antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(12): 2334-2338.
- [80] HE D L, CHEN Y K, YANG S W. A low-profile triple-band shared-aperture antenna array for 5G base station applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(4): 2732-2739.
- [81] ZHANG D L, WU Q. A shared-aperture antenna with high-aperture reuse efficiency and high isolation based on the quasi-yagi structure[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(11): 8504-8513.
- [82] WANG Z T, WU Q. An equivalent circuit model of characteristic modes with lumped loads[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2022, 32(12): e23500.
- [83] MA Z, WU Q. Reduction of mutual coupling for broadband vivaldi antennas using characteristic modes analysis and lumped loads[J]. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2019, 34(6): 921-926.
- [84] KING H. Mutual impedance of unequal length antennas in echelon[J]. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1957, 5(3): 306-313.
- [85] WANG Z T, WU Q. A decoupling method for collinear dipoles based on differential and common mode decomposition[C]//2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium. Piscataway: IEEE, 2021: 1-2.
- [86] CHENG Y F, LI D, CHEN S C, et al. A novel wideband decoupling method based on even-odd-mode analysis and genetic algorithm optimization[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(10): 2507-2511.
- [87] REN X F, ZHU Z J, YANG K, et al. Design of dual-frequency MIMO antenna with high isolation based on odd-even mode analysis method and defected ground structure[C]//2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET). Piscataway: IEEE, 2021: 632-637.
- [88] WANG Y Q, XUE Q, HU Z P, et al. Mixed-modes-enabled element-level beamforming antenna with enhanced isolation for phased array applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(5): 4577-4582.
- [89] WU C H, ZHOU G T, WU Y L, et al. Stub-loaded reactive decoupling network for two-element array using even-odd analysis[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12: 452-455.
- [90] LAI Q X, PAN Y M, ZHENG S Y. A self-decoupling method for MIMO antenna array using characteristic mode of ground plane[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(3): 2126-2135.
- [91] SU D L, YANG Z, WU Q. Characteristic mode assisted placement of antennas for the isolation enhancement[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(2): 251-254.
- [92] WU K L, WEI C N, MEI X D, et al. Array-antenna decoupling surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(12): 6728-6738.
- [93] LIU B, CHEN X M, TANG J Z, et al. Co- and cross-polarization decoupling structure with polarization rotation property between linearly polarized dipole antennas with application to decoupling of circularly polarized antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(1): 702-707.
- [94] LI M, WU D, XIAO B, et al. A novel calculation method to design parasitic decoupling technique for two antennas[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 116041-116051.
- [95] TRAN H H, HUSSAIN N, PARK H C, et al. Isolation in dual-sense CP MIMO antennas and role of decoupling structures[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(6): 1203-1207.
- [96] CHEN Z Y, TANG M C, LI M, et al. Wideband, high-density circularly polarized array with reduced mutual coupling and enhanced realized gain[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(2): 1132-1143.
- [97] NIE D, HOCHWALD B M, STAUFFER E. Systematic design of large-scale multiport decoupling networks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2014, 61(7): 2172-2181.
- [98] WANG Z T, WU Q. A 4-to-4 decoupling feeding network with port-pairing capability for compact phased arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(7): 5682-5693.
- [99] LI M, JIANG L J, YEUNG K L. A novel wideband decoupling network for two antennas based on the Wilkinson power divider[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(7): 5082-5094.
- [100] WANG Z T, WU Q. A novel decoupling feeding network for circularly polarized patch arrays using orthogonal mode decomposition[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(2): 1448-1457.
- [101] HAN J H, MYUNG N H. Novel feed network for circular polarization antenna diversity[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 979-982.
- [102] 曹倩, 王健. 面向 5G、6G 的智能频谱管理研究[J]. 中

- 国无线电, 2020(9): 13-15.
- CAO Q, WANG J. Research on the intelligent spectrum management for 5g and 6g[J]. China Radio, 2020(9): 13-15. (in Chinese)
- [103] 李玮. 智能天线技术在广播通信中的优化与应用[J]. 中国新通信, 2024, 26(3): 74-76.
- LI W. Optimization and application of smart antenna technology in broadcast communication[J]. China New Telecommunications, 2024, 26(3): 74-76. (in Chinese)
- [104] 孟晓磊. 面向异构网络融合的通信框架及关键技术研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
- MENG X L. Research on Communication Framework and Key Technologies for Heterogeneous Network Convergence[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2023. (in Chinese)
- [105] Research Ettus. UBX 10-6000 Rx/TxMHz (160 MHz, X Series only)[EB/OL]. [2024-07-03]. <https://www.ettus.com/all-products/ubx160/>.
- [106] LI Z T, ZHAO B Y, HU X G, et al. Research on reconfigurable technology and a design of application[C]// 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Piscataway: IEEE, 2020: 1647-1651.
- [107] Xilinx. Advanced ZU19EG/ZU17EG/ZU11EG Zynq UltraScale + MPSoC System on Module[EB/OL]. [2024-07-03]. <https://china.xilinx.com/products/boards-and-kits/1-14u9g6z.html>.
- [108] FERREIRA R, GASPAR J, SEBASTIÃO P, et al. Effective GPS jamming techniques for UAVs using low-cost SDR platforms[J]. Wireless Personal Communications, 2020, 115(4): 2705-2727.
- [109] SCHMIDT E, RUBLE Z, AKOPIAN D, et al. Software-defined radio GNSS instrumentation for spoofing mitigation: A review and a case study[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(8): 2768-2784.
- [110] DANESHMAND S, JAFARNIA-JAHROMI A, BROU-MANDAN A, et al. A GNSS structural interference mitigation technique using antenna array processing[C]// 2014 IEEE 8th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). Piscataway: IEEE, 2014: 109-112.
- [111] FERNÁNDEZ-PRADES C, ARRIBAS J, CLOSAS P. Robust GNSS receivers by array signal processing: Theory and implementation[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(6): 1207-1220.
- [112] ARRIBAS J, CLOSAS P, FERNÁNDEZ-PRADES C. Interference mitigation in GNSS receivers by array signal processing: A software radio approach[C]// 2014 IEEE 8th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). Piscataway: IEEE, 2014: 121-124.
- [113] 陈逸隆, 吴琦. 考虑互耦效应的GNSS天线波束成形算法[C]//第30届全国电磁兼容学术会议论文集. 贵阳: 中国电子学会, 2024: 41-44.
- CHEN Y L, WU Q. GNSS antenna beamforming algorithm considering mutual coupling effect[C]// Proceedings of the 30th National Conference on Electromagnetic Compatibility. Guiyang: CIE, 2024: 41-44.
- [114] MANCO A, CASTRILLO V U. An FPGA scalable software-defined radio platform for UAS communications research[J]. Journal of Communications, 2021, 2(16): 42-51.
- [115] CHAMAILLARD B, LASTERA M, ROQUE D. A flexible VHF-band aeronautical datalink receiver based on software defined radio[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2018, 33(1): 58-61.
- [116] LU X C, CHEN L, SHEN N, et al. Decoding PPP corrections from BDS B2b signals using a software-defined receiver: An initial performance evaluation[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7871-7883.
- [117] 蔚保国, 鲍亚川, 杨梦焕, 等. 通导一体化概念框架与关键技术研究进展[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 1-14.
- YU B G, BAO Y C, YANG M H, et al. Conceptual framework and research progress on communication and navigation integration[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 1-14. (in Chinese)
- [118] AMJAD M S, DRESSLER F. Software-based real-time full-duplex relaying: An experimental study[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2020, 4(3): 647-656.
- [119] XIA S Y, WU Q. Mitigating the electromagnetic coupling between the tx and rx channels in software-defined radio through a digital-domain cancellation algorithm[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2024, 66(5): 1389-1398.
- [120] PRESTI L L, DI TORINO P, FALLETTI E, et al. Software defined radio technology for GNSS receivers[C]// 2014 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace). Piscataway: IEEE, 2014: 314-319.
- [121] YÜKSEL H, YANG D, BOYNTON Z, et al. A wide-band fully integrated software-defined transceiver for FDD and TDD operation[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(5): 1274-1285.

[122] YUKSEL H, YANG D, BOYNTON Z, et al. Broadly tunable frequency division duplex transceiver: Theory and operation[C]//2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). Piscataway: IEEE, 2016: 688-691.

[123] XU B, COLOMBI D, TÖRNEVIK C, et al. On actual maximum exposure from 5G multicolumn radio base station antennas for electromagnetic field compliance assessment[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021, 63(5): 1680-1689.

作者简介



吴 琦 男,1983年5月出生于江西省南昌市。2009年毕业于上海交通大学电子工程系。现为北京航空航天大学教授。主要从事天线与电磁兼容相关研究。
E-mail: qwu@buaa.edu.cn



夏思雨 女,1998年6月出生于河南省周口市。2020年毕业于郑州大学通信工程学系。现为北京航空航天大学在读博士生。从事软件无线电系统电磁兼容方面的研究工作。
E-mail: by2202110@buaa.edu.cn



王梓潼 男,1997年7月出生于天津市滨海新区。2019年本科毕业于北京航空航天大学电子信息工程学院。现为北京航空航天大学电路与系统专业博士生。主要研究天线阵列设计、天线耦合抑制相关方向。
E-mail: wangzt@buaa.edu.cn



范文琪 女,2000年1月出生于河北省沧州市。2022年毕业于吉林大学电子信息工程学院。现为北京航空航天大学在读博士生。从事微波电路方面的研究工作。
E-mail: sy2202205@buaa.edu.cn



张栋梁 男,1997年5月出生于安徽省合肥市。主要研究方向为天线孔径综合及雷达阵面系统。
E-mail: zdl1502@buaa.edu.cn



陈逸隆 男,2001年8月出生于北京市。2023年本科毕业于北京航空航天大学电子信息工程学院,目前在北京航空航天大学电子信息工程学院攻读研究生,主要研究方向为阵列信号处理。
E-mail: chenylong@buaa.edu.cn