

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.04.004

多功能射频综合一体化技术研究及展望

杨易陆, 夏飞扬, 徐 进

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘 要: 多功能射频综合一体化技术正处于快速发展阶段, 为了能够充分满足新时代发展下多功能综合作战需求, 需要优化多功能射频综合技术的硬件构架, 扩展相关功能、提升集成度, 促进该项技术的快速发展。首先提出了多功能射频综合一体化系统构架, 梳理出超宽带阵列技术、同时收发技术和一体化波形技术等多功能综合射频系统的关键技术。其次对射频综合系统的关键技术进行了研究, 分析了低剖面宽带宽角扫描天线阵、多功能集成芯片和高密度下的芯片布局等超宽带阵列技术的关键点; 梳理了时域、射频域与数字域提升隔离度方法的特点; 针对时分复用、频分复用、空分复用和信号共享法等一体化波形技术进行了对比分析。最后对多功能射频综合系统的发展进行了展望。

关键词: 多功能射频系统技术; 多功能软件; 一体化系统

中图分类号: TN974; TN929

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2023)04-0027-06

Research and prospect of multifunctional RF integrated technology

YANG Yilu, XIA Feiyang, XU Jin

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: Multifunctional radio frequency (RF) integrated technology is in the process of rapid development, in order to fully meet the multifunctional integrated operational requirements in the new era, it is necessary to optimize the hardware architecture of multi-function RF integrated technology, expand related functions and improve the integration density, and promote the rapid development of the technology. The architecture of a multifunctional RF integrated system is firstly proposed in this article, and the key technologies of multifunctional RF systems such as ultra wideband array technology, simultaneous transceiver technology, and integrated waveform technology is summarized. Then, the key technologies of the RF integrated system were studied, and the key points of ultra wideband array technology such as low profile broadband wide-angle scanning antenna array, multifunctional integrated chip, and high-density chip layout were analyzed. The characteristics of the methods for improving isolation in time domain, radio frequency domain and digital domain are summarized; The integrated waveform technologies such as time-division complex, frequency-division complex, space-division complex and signal sharing are compared and analyzed. Finally, the development prospect of multi-function RF integrated system is proposed.

Key words: multi-function radio frequency system technology; multifunctional software; integrated system

收稿日期: 2023-01-08; 修回日期: 2023-02-16

引用格式: 杨易陆, 夏飞扬, 徐进. 多功能射频综合一体化技术研究及展望[J]. 空间电子技术, 2023, 20(4): 27-32. YANG Y L, XIA F Y, XU J. Research and prospect of multifunctional RF integrated technology[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(4): 27-32.

0 引言

目前,随着信息技术的发展,军舰、导弹、战斗机和卫星平台上的电子设备等越来越多,所需的功能也越来越复杂,使用传统功能单一的电子设备将使得平台的设备数量多、重量大且功耗巨大。各个设备之间各自为战,缺乏设备的协同性,设备数量增多同时将导致设备之间会产生电磁干扰,难以发挥设备的最大效能。

基于此,多功能射频综合一体化技术应运而生,多功能射频综合一体化系统将电子战、雷达、通信和导航等不同功能的电子系统集成于一个通用平台,通过软件能够同时实现多种功能,具备执行多种任务的能力。由于多功能射频综合一体化系统共用硬件平台,能够很大程度降低电子设备的重量、功耗和体积,减小载体平台的负载压力^[1-8]。多功能射频综合一体化技术在国外的海军平台以及空军平台有着广泛的应用,利用射频综合技术能够减小系统的体积和重量,以达到减小系统散射截面和增加平台机动性的目的^[9-10]。多功能综合技术在国内的武器平台同样有着广泛的应用^[11-13],例如通信、导航和识别 (communication navigation iff, CNI) 等功能能够通过射频综合技术实现航电系统一体化设计,在 CNI 系统采用高速模拟数字 (analogue-digital, AD) 对信号进行采样,结合宽带自动增益控制以提升系统的动态范围,通过硬件共用和软件可重构的方式实现系统的各种功能。

多功能射频综合一体化技术采用多功能宽带天线孔径代替现有平台中大量的天线,能够有效减小天线的数量和天线的尺寸^[14]。系统通过宽带阵列天线,能够满足不同工作模式的使用需求。在信号侦收过程中,宽带天线阵列能够通过波束形成技术在空域中形成不同的波束接收信号,经过通用化射频通道后由宽带 AD 采样进行信号处理,信号处理完成后进行数据处理,并在显控界面上显示。在发射过程中,系统在上位机软件控制下,可生成所需的信号波形,合理分配信号的频谱资源,通过波束形成将能量辐射到不同空域。因此多功能射频综合一体化系统能够实现多种功能,包括雷达、通信和导航,在同步的时钟下,通过计算机的资源对

这些工作进行调配^[15-16]。

1 多功能射频综合一体化技术的体系架构

为实现雷达、通信和导航等功能的兼容性,需要通过利用单独的发射、接收阵列,使硬件平台实现各个效果的优势,当发射与接收共同采用同一个天线阵列的情况下,时间上发射与接收不可重叠。在多功能射频系统中,通信和雷达系统可能要求具备同时收发功能,若采用收发天线共用,发射天线辐射的信号将对信号接收产生干扰^[17],因此需要采用收发分开的方式增加发射天线和接收天线的隔离度。多功能射频综合系统框图如图 1 所示。通过整合雷达、通信等不同功能,在整合前期阶段中需要详细对比并分析各个功能^[18]。在各个功能中存在的共性表现为它们所需要的硬件设备相同,其设备主要包括信号的处理和接收存在较大的差异性。在具体工作过程中,雷达系统需要产生在空域上副瓣低、频域上频谱纯净的信号,其主要工作频段为 L、S、C、X、Ku、Ka 和 W 等波段;而通信系统在工作中要求准确无误的传输信息,对误码率和信息速率的较高要求,主要工作在 S、X、Ku、Ka 波段。在电子侦察过程中需要对电磁对抗空域的信号特征进行监测并实时预警,与此同时对高截获概率提出一定的要求,根据电子侦察的结果进行电子防御或者电子干扰^[19]。

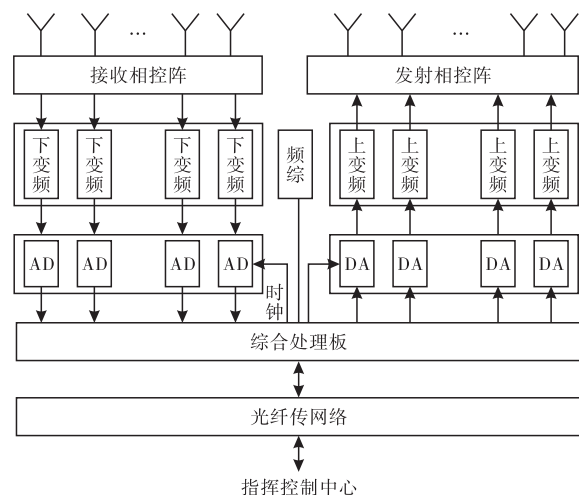


图 1 多功能射频综合系统框图

Fig. 1 Multi-function RF integrated system block diagram

对于电子战、通信、雷达这些系统需要相同的

硬件,需要满足以下两点。

1) 多工能射频综合系统的硬件需要足够宽的工作带宽,能够有效覆盖各个系统的工作带宽,满足各个系统的工作需求;

2) 针对不同功能的系统需要在时间域、空间域和频域方面进行隔离,减少不同系统之间的干扰,使得多功能射频综合系统能够最大程度发挥工作效能,实现合理分配。

2 多功能射频综合一体化关键技术

2.1 超宽带阵列技术

射频综合系统所集成的不同功能工作频段存在较大差别,并且在天线参数、系统接收灵敏度和系统发射功率方面有很大的差异^[20]。因此在空间有限的舰载或者机载平台上集成不同频段或者不同功能系统的具有较大的难度。

超宽带阵列技术能够轻松的实现带宽内的频率复用等,极大的提高了装备应对战场多样化的能力,包括多功能、多系统融合。在军事作战中不仅能够提高目标识别能力,同时提供了丰富的频谱资源,超宽带集成也能够将多个频段分离工作的平台实现集成化。超宽带阵列技术构架如图 2 所示,主要包含超宽带低剖面天线阵、超宽带多通道多功能集成芯片和高密度互连结构^[21-23]。

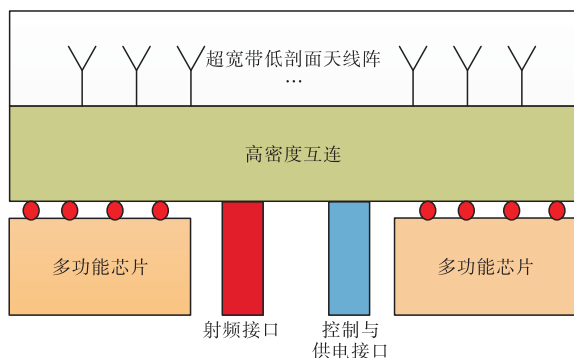


图 2 超宽带阵列技术构架

Fig. 2 Ultra-wide band array technology architecture

1) 低剖面超宽带宽角扫描天线阵:(a) 研究在天线阵中非平衡式的集成馈电结构的工作特性,提出宽频带内共模去谐的方法和实现结构,简化高集成度的宽带馈电结构,进一步优化低剖面下天线阵的工作带宽;(b) 分析低剖面下宽频带范围内天线阵波束扫描的特性,研究低剖面下介质加载结构对天线阵工作带宽、扫描范围的影响,优化宽角匹配介质层厚度,增加宽角扫描匹配结构以增加天线的

扫描范围;

2) 超宽带多通道、多功能集成芯片:(a) 优化宽带功放与可变混合器(variable mixer, VM)的精度与动态范围,研制适用于片上集成的超宽带功放与 VM;(b) 优化芯片功能划分的拓扑布局,解决在高密度和高功率情况下通道间隔离和散热问题;

3) 高密度下的芯片布局:(a) 分析天线与收发组件(transmitter and receiver, T/R)芯片垂直互连之间的耦合效应,研究多层结构中天线与 T/R 芯片之间高效、紧凑的三维垂直互连结构;(b) 分析高密度布局下超宽带相控阵模块内部热分布对通道影响的特点,在高密布局下设计最优热分布的拓扑布局结构,研制高密度拓扑结构中片内与片间高效率的散热结构。

2.2 同时收发技术

同时收发技术即全双工技术,要实现同频全双工工作,需要在空间域、射频域和数字域抑制发射端对接收的干扰,减小发射端和接收端的耦合,使得接收端有较高的灵敏度,从而满足多功能综合射频系统全双工工作要求^[24-25]。同时收发技术的关键在于利用空间域、射频域和数字域抑制结合的方式实现收发性能的最优化。

空间域抑制自干扰技术即通过在收发天线之间增加额外的结构或者电路,以达到增加发射天线和接收天线的隔离度的目的。增加收发天线隔离度的方法包含直接隔离和对消法。直接隔离法通过在收发天线之间加入隔离结构增加收发天线的隔离度,隔离结构包括隔离挡板、EBG 结构和吸波材料等,细节隔离天线构架如图 3 所示。对消法通过加入对消去耦结构抵消发射天线产生的场,从而增加收发天线的隔离度。对消结构可以通过在天线外部加入对消结构,通过电磁感应产生相反的场,抵消原有的耦合场;或者在天线之间加入去耦对消网络,以减小发射和接收天线的耦合,同时加入匹配网络调节收发天线的适配度,对消去耦收发天线构架如图 4 所示。

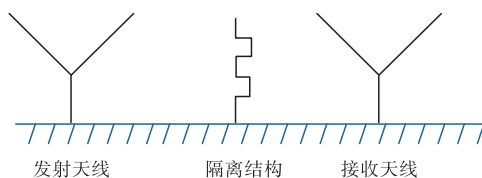


图 3 直接隔离收发天线构架

Fig. 3 Directly isolated transceiver antenna architecture

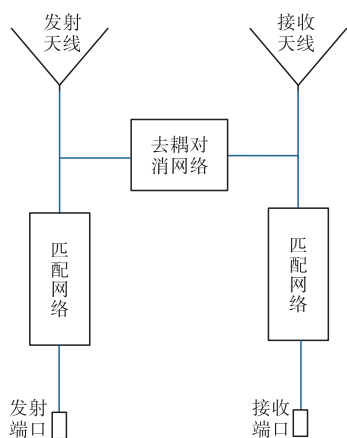


图4 对消去耦收发天线构架

Fig.4 Decoupling transceiver antenna architecture

射频频域消除干扰的方法即射频对消,射频对消通过误差监测网络计算泄露发射信号和对消信号的幅度差和相位差,由 DSP 模块控制对消信号的幅度相位,使得泄露发射信号能够和对消信号抵消,从而减小发射对接收的干扰,射频对消系统框图如图 5 所示^[26]。

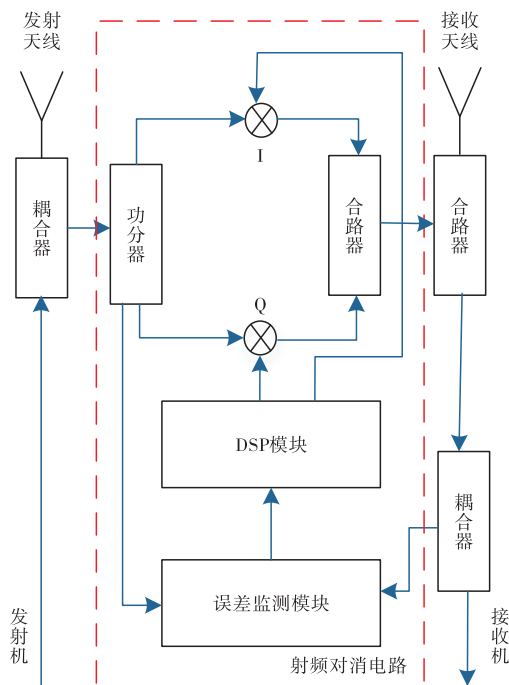


图5 射频对消系统框图

Fig.5 RF cancellation system block diagram

数字域消除干扰在收发天线之间添加辅助天线,接收的信号经过放大、滤波和 AD 采样,同时考虑相位幅度、相位误差和延迟,在数字域消除发射信号干扰^[27]。

2.3 一体化波形技术

雷达和通信波形一体化设计是在共用硬件平

台的基础上,对雷达波形和通信波形进行一体化设计^[28-29]。设计一体化波形能够共享硬件平台,使得雷达和通信功能实现优势互补,提高系统的抗截获能力和机动能力,从而提升系统的生产能力,并且能够大大节约频谱资源。一体化波形技术关键为在能耗有限的机载或者星载平台中通过波形复用减少系统能耗。

一体化波形设计方法包含时分复用、频分复用、空分复用和信号共享法^[30-31]。其中时分复用可通过开关切换分时进行通信或者雷达探测,为确保雷达探测性能不受影响,此方式适用于某些特殊的通信信号,无法完全替代现有通信系统的功能。频分复用是将雷达信号和通信信号调制在不同的频率,雷达信号和通信信号合成后的信号存在幅度的波动。空域复用法在空间形成多个子波束,形成的子波束包含通信波束和雷达探测波束,空域复用能够同时实现通信和雷达探测,由于空域能量形成多波束,能量有所分散,对雷达探测距离和通信距离有一定影响。采用信号共享法的雷达信号和通信信号在时域和空域没有分开,而是将通信信号调制到雷达信号上,此方法的系统能量利用率较高。信号共享法主要采用的信号形式包括 OFDM 信号、MCPC 信号和线性调频信号等。

3 多功能射频综合一体化技术发展前景

3.1 射频综合系统一体化、集成化越来越高

促进多功能射频系统的多方面发展、实现系统开放式体系架构、多任务分配、优化资源配置等功能,对综合射频系统进行模块化、标准化和通用化设计^[32]。未来需对多功能芯片进行更加深入的研究,提升天线和射频通道的带宽,从而提升系统的一体化和集成化程度。射频综合系统将雷达、通信和电子战等电子系统的功能进行有机结合,能够满足复杂作战环境的需求,能够提供多种作战模式,有效的提升装备的作战效能^[33-34]。

3.2 射频综合系统信息化程度将越来越高

现代战争的信息化程度越来越高,同时要求射频综合系统具备足够的信息化。现代战争以信息作为主要战略争夺资源,在信息化的支撑下,能够实现联合作战和体系作战,对目标实施精确的打击。射频综合系统同时集成雷达、通信导航和电子战系统的功能,具备丰富的作战资源,能够针对目

标进行准确的探测,同时能够信息准确无误的传输,由于设备集成度,设备的尺寸明显减小,同时也能够增加设备的隐蔽性^[35]。

在大数据时代快速发展下,在各个国家陆、海、空、天一体化作战体系的逐渐出现后,在网络协同作战中通过信息融合、资源共享作为现代化、信息化战争胜利的重要基础。同时,在利用大数据技术的作用下,能够将不同战术数据链有效结合战场信息动态,使战场信息港安置、获取信息以及综合处理信息等各方面的能力得到显著提升,不断加强多平台协同作战的能力。

3.3 射频综合系统重量、体积、成本、功耗将不断降低

飞机、舰船、卫星搭载的电子设备越来越多,射频综合系统能够将其中的某些电子设备进行整合,能够有效减少电子设备的数量。通过一体化设计,进一步对系统的硬件构架进行升级优化,同时达到减少射频综合系统的重量、体积、成本和功耗的目的^[36]。

充分探究不同电子设备的共同点,采用集成化构架,有机结合和集成通信、雷达、导航和电子战功能,有效减小设备的重量、体积和功耗。对射频综合系统的模块采用标准化和模块化设计,系统接口采用标准化设计,不同电子设备能够共用相同的模块,在生产过程对此模块进行量产化,能够有效降低成本。

3.4 射频综合系统在新型武器平台中的应用更为广泛

近些年,军事电子技术发展迅速,能够不断增加各个武器装备的整体攻击力。为了在复杂电子作战环境中充分发挥武器的效能,需要有效结合射频综合技术。新型作战武器平台表现为智能化、小型化、高机动性,传统的功能独立的电子设备难以满足。在新型武器平台中使用射频综合技术符合现代战争发展趋势,具备攻防一体和快速精确打击功能。目前,该种综合射频系统深受各国重视与关注,射频综合设备已经在多个军兵种实现列装,是实现军事强国和部队现代化的有效途径。同时射频综合系统在民用等多方面进行全面的推广与宣传,具有良好的发展前景和趋势。

4 结论

综上所述,在作战需求的驱动下,多功能射频

综合一体化技术得到了迅猛的发展,具备显著的优势和广泛的应用。各国都给予了一定的重视和关注,对此进行深入研究,同时获取了相应的成果,多功能射频综合一体化技术在飞行器和舰船等武器平台中有着广泛的应用,其发展前景广阔。针对多功能射频综合系统的发展特点,研究了综合射频系统的关键技术。采用超宽带阵列技术、同时收发技术和一体化波形技术,能够提升系统的集成度,减少系统的重量体积及功耗,提升系统的信息化程度,从而促进射频综合一体化技术在新型武器系统的应用。该技术在理论上已经经过充分的研究和验证,然而在工程化和量产化等方面亟需突破。

参考文献:

- [1] 吴远斌. 多功能射频综合一体化技术的研究[J]. 现代雷达, 2013, 35(8): 70-74.
- [2] 齐飞林, 李朋涛, 姚近, 等. 新一代综合射频系统关键技术研究[J]. 现代导航, 2022, 13(2): 127-133.
- [3] 张蕾, 邓大松, 韩长喜, 等. 国外新一代综合射频系统发展综述[J]. 电子工程信息, 2022(2): 1-9.
- [4] 胡元奎, 靳学明, 范忠亮. 多功能综合射频系统技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(3): 233-239.
- [5] WEST J B. Low-cost distributed multifunction radio frequency (MFRF) swarming unmanned aircraft systems (UAS): US11009867[P]. 2021-05-18.
- [6] TAVIK G C, HILTERBRICK C L, EVINS J B, et al. The advanced multifunction RF concept[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(3): 1009-1020.
- [7] 关中锋. 基于软件无线电的多功能射频综合一体化设计[J]. 通信技术, 2014, 47(11): 1333-1337.
- [8] LIN Z Y. Development and key technologies of the multifunction integrated RF system(MFIRFS)[J]. Telecommunication Engineering, 2006(5): 1-5.
- [9] MOO P W, DIFILIPPO D J. Overview of naval multifunction RF systems[C]//2018 15th European Radar Conference (EuRAD), 2018: 178-181.
- [10] HUGHES P K, CHOE J Y. Overview of advanced multifunction RF system (AMRFS)[C]//Proceedings 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology. USA: IEEE, 2000: 21-24.
- [11] 赵远志. 航电系统 CNI 射频综合技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [12] 刘闯, 杜自成, 王伟. 多功能综合射频技术在地面无人战车上的应用[J]. 火控雷达技术, 2020, 49(4): 23-26.
- [13] 朱峰. 对有源电子扫描阵(AESA)综合射频系统的干扰技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2014.

- [14] 任斌,徐家富,娄苗苗,等. 基于无线射频技术的多功能监护仪管理系统[J]. 电子设计工程,2021,29(9): 15-19.
- [15] 周强,朱蕾. 面向多功能综合射频系统的多通道全数字发信机[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2022,20(9):953-958.
- [16] 谷瑞,朱慧惠,郑昕. 射频综合浅析[J]. 数字通信世界,2020,187(7):117+121.
- [17] 刘闯,杜自成,王伟. 多功能综合射频技术在地面无人战车上的应用[J]. 火控雷达技术,2020,49(4):23-26.
- [18] 周加全,李志明,吴建生. 基于射频识别技术的多功能安全帽的研究与设计[J]. 现代信息科技,2020,4(1): 168-170.
- [19] 毕胜,郭琳,张德智. 面向多功能射频的综合射频前端技术研究[J]. 雷达科学与技术,2016,14(6):625-629.
- [20] 宗文锦,朱启兵,李明泽,等. 基于 RFID 技术的多功能试剂管理系统设计[J]. 传感器与微系统,2021,40(5):94-97.
- [21] 阿泽. 低剖面宽带宽角扫描天线阵[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- [22] 周守利,张景乐,吴建敏,等. X 波段宽带幅相多功能芯片设计[J]. 电子科技大学学报,2020,49(5): 680-689.
- [23] 王磊. 基于多层板的多功能组件微波互联技术研究[J]. 电子技术应用,2019,45(6):7-10.
- [24] 张宇晖. CNI 系统 L 波段接收机射频前端综合化设计方案探讨[J]. 电子技术应用,2022,48(10):1-4+8.
- [25] 王轶,季帅. 可重构射频数字收发组件关键技术探讨[J]. 电子质量,2022,418(1):141-146.
- [26] 杨广超,王建明,伍光新. 射频干扰抵消技术在大型舰船平台的应用[J]. 电子测量技术,2017,40(10): 104-108.
- [27] 秦碧野,饶世钧. 舰载多功能综合射频系统应用与发展[J]. 舰船电子工程,2019,39(6):11-14+55.
- [28] 袁刚. 雷达通信一体化波形应用研究[J]. 现代雷达,2014,36(3):19-22+28.
- [29] 康振梅. 基于射频综合化的多功能二次雷达设计[J]. 电子世界,2019,562(4):165-167.
- [30] 李国琳,郭文彬. 雷达通信一体化波形设计综述[J]. 移动通信,2022,46(5):38-44.
- [31] 李梦姣. 雷达通信一体化波形设计研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- [32] 折贝. RFID 射频技术在鞋服仓储管理系统中的运用[J]. 中国皮革,2022,51(8):118-121.
- [33] 张晶声,张旭,金闻名,等. 射频识别技术在牲畜电子耳标检测上的运用[J]. 中国兽药杂志,2022,56(6): 39-43.
- [34] 张雪莲. 多功能综合射频技术发展研究[J]. 现代雷达,2020,42(7):78-81.
- [35] 秦碧野,饶世钧,吉泽. 舰载综合射频系统探测资源分配方法[J]. 现代雷达,2019,41(8):1-6+11.
- [36] 刘文学,韩斌,冯伟,等. 基于软件无线电的机载射频信号综合处理技术[J]. 电子测试,2017,363(4): 62-64.

作者简介:杨易陆(1978—),甘肃天水人,本科,工程师。主要研究方向为飞行器与卫星通信技术。E-mail:41570555@qq.com

通讯作者:徐进(1972—),陕西西安人,博士,研究员。主要研究方向为飞行器与卫星通信技术。E-mail:xuj504@163.com

夏飞扬(1993—),四川广安人,硕士研究生,工程师。主要研究方向为飞行器与卫星通信技术。E-mail:18251982908@163.com