

基于LCMV的低轨卫星干扰规避 波束赋形算法研究

LCMV Beamforming Algorithm for Interference Mitigation in LEO Satellite Communication

王昱皓, 范现瑞, 王 森, 孙志远, 左亚聪(中讯邮电咨询设计院有限公司, 北京 100048)

Wang Yuhao, Fan Xianrui, Wang Sen, Sun Zhiyuan, Zuo Yacong (China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China)

摘 要:

针对低轨(LEO)卫星飞行速度快且系统内干扰源复杂的特性,研究一种基于线性约束最小方差(LCMV)的自适应波束赋形算法,通过展宽干扰方向零陷区域来规避干扰。首先,使用卡尔曼滤波算法提升信号估计精度,减少动态环境下干扰不确定性;然后,增加约束条件展宽LCMV自适应波束算法的零陷区域,将宽零陷区域对准干扰方向,提升算法的动态抗干扰能力和多系统间的抗干扰能力;最后,使用特征子空间投影方法减少低快拍数的影响,提高算法的稳定性。

关键词:

低轨卫星;波束赋形;零陷展宽;干扰规避

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.12.002

文章编号:1007-3043(2025)12-0006-05

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Based on the characteristics of low-earth-orbit satellites with high flight speed and complex interference sources within the system, it proposes an adaptive beamforming algorithm using Linear Constraint Minimum Variance (LCMV) to achieve interference avoidance by widening the null region toward interference directions. Firstly, the Kalman filtering algorithm is employed to enhance signal estimation accuracy and reduce interference uncertainty in dynamic environments. Secondly, additional constraints are introduced to broaden the null region of the LCMV adaptive beamforming algorithm, aligning the widened null with interference directions to improve dynamic and inter-system anti-jamming capabilities. Finally, the eigen-subspace projection method is applied to mitigate the impact of low snapshot numbers and enhance algorithm stability.

Keywords:

LEO satellite; Beamforming; Null-widening; Interference mitigation

引用格式:王昱皓, 范现瑞, 王森, 等. 基于LCMV的低轨卫星干扰规避波束赋形算法研究[J]. 邮电设计技术, 2025(12): 6-10.

1 概述

LEO卫星通信系统可通过巨型星座设计和组网技术实现全球无缝覆盖,且具有传输延迟低、高容量和高可靠性通信等优势,已经形成多国竞逐的格局^[1]。近年来,全球LEO卫星通信公司(如:SpaceX、OneWeb、中国星网等)已在相应轨道高度完成战略部署,正通过构建高通量卫星星座,致力于实现全域覆盖,打造全域泛在、天地一体的通信网络,给传统通信架

构带来深刻变革^[2-3]。

LEO卫星通信频谱和轨道资源拥挤,且易受到地面雷达、其他星座、大气环境等多种干扰源影响,导致接收信号信噪比降低或出现同频、邻频干扰,严重影响接收机信号估计的精度与可靠性,这是当前亟需解决的问题之一^[4-5]。国内外学者在卫星通信抗干扰技术方面进行了大量研究,主要包括功率控制、空间隔离、认知无线电、相控阵天线自适应调零、频域滤波、时频信号窄带干扰消除以及空时/空频联合信号处理等^[6-7]。文献[8]提出干扰隔离角法,通过设置LEO卫星与地球静止轨道(GSO)卫星最小夹角规避干扰,并

收稿日期:2025-10-09

引入“GSO带”量化隔离区,实现干扰规避;文献[9]通过蒙特卡洛仿真分析了国际移动通信地面基站对LEO卫星的干扰情况,并探讨了不同部署场景下的干扰特性;文献[10]提出了基于轨道外推和卫星位置概率分析的干扰分析方法,通过设置隔离角和GSO减少干扰。

针对LEO卫星轨道高度低、相对移动速度快、实际环境中干扰源复杂的特性,传统窄零陷波束在干扰方向快速变化时易失效的问题,本文基于LCMV自适应波束算法做出如下改进:首先使用卡尔曼滤波算法提升输入信号的稳定性和准确性;然后通过展宽干扰方向零陷宽度增加波束赋形算法的抗干扰能力;最后使用特征子空间投影法提升算法在低快拍数下的稳定性。

2 阵列天线波束展宽算法

2.1 卡尔曼滤波信号估计

波达方向(DOA)估计方法在静态或低动态场景下表现优异,但在动态环境中如空基平台抖动、移动信号源等,易受角度随机抖动、噪声干扰等因素的影响,估计结果波动大、精度下降^[11]。卡尔曼滤波是一种递归的最优估计方法,可有效滤除测量过程中的噪声,提升动态环境下期望信号和干扰信号的估计精度和稳定性,为后续LCMV算法提供可靠的空间信息基础^[12]。将DOA估计的信号和干扰方向作为初始状态估计,并分别使用卡尔曼算法进行滤波,具体如下。

a) 根据状态方程,利用前一时刻的最优估计预测当前时刻的状态和协方差:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{n|n-1} &= F_n \hat{x}_{n-1|n-1} \\ P_{n|n-1} &= F_n P_{n-1|n-1} F_n^T + Q_n\end{aligned}$$

其中, $\hat{x}_{n|n-1}$ 表示先验状态估计; $P_{n|n-1}$ 表示先验估计误差协方差;状态转移矩阵 F_n 设为1;过程噪声方差 Q_n 设为0.01,表示状态动态变化的不确定性。

b) 利用当前时刻DOA观测值,结合预测状态,计算卡尔曼增益并修正状态估计:

$$\begin{aligned}K_n &= P_{n|n-1} C_n^T (C_n P_{n|n-1} C_n^T + R_n)^{-1} \\ \hat{x}_{n|n} &= \hat{x}_{n|n-1} + K_n (y_n - C_n \hat{x}_{n|n-1}) \\ P_{n|n} &= (1 - K_n C_n) P_{n|n-1}\end{aligned}$$

其中, K_n 为卡尔曼增益,用来平衡预测与观测的权重; C_n 为观测矩阵,设置期望信号方向为4,干扰方向为1; R_n 为观测噪声方差,设为4; $P_{n|n}$ 为根据先验估计得到修正的误差协方差; $\hat{x}_{n|n}$ 为输出的状态估计; y_n 为当前

时刻的观测状态,受快拍数影响,将其设置为100。

2.2 基于LCMV自适应波束零陷展宽

LCMV自适应波束形成算法可在目标方向上保持最大增益,同时抑制其他方向的干扰,具有良好的抗干扰能力,被广泛应用于通信雷达、声学阵列、高光谱图像处理等领域。但该算法生成的窄零陷难以避免因信源快速移动导致干扰适配的问题。在LCMV算法的基础之上通过增加导向矢量的约束条件,在干扰方向附近形成宽角度抑制区,提高算法在快速移动场景下的稳定性。

LCMV算法核心目标是在满足线性约束条件下,最小化阵列输出的方差,通过调整阵列加权系数,在保证期望信号方向获得单位增益(即无失真响应)的同时,在干扰方向形成零陷,从而有效抑制干扰并提升目标信号信噪比。该算法约束条件通常可表示为:

$$\begin{cases} \min_{\omega} \omega^H R \omega \\ s.t. \omega^H C = f \end{cases}$$

其中, R 是接收信号的协方差矩阵; ω 是阵列的加权向量; C 是所有信源的导向矢量, $C=[a(\theta_0, \varphi_0), a(\theta_1, \varphi_1), \dots, a(\theta_n, \varphi_n)]$; f 是响应向量, $f=[1, 0, \dots, 0]$ 。再通过拉格朗日乘数法,可以求解出最优的加权矩阵:

$$\omega_{opt} = R^{-1} C (C^H C)^{-1} f$$

在此基础之上对LCMV算法进行改进:首先使用卡尔曼滤波算法提高DOA估计精度的期望信号和干扰信号作为LCMV算法中的导向矢量,增强协方差矩阵的可靠性。主瓣对准期望方向,使信号增益最大化,旁瓣零陷区域对准干扰方向达到干扰抑制最大化。

a) 为了在干扰方向形成宽零陷区域,在LCMV算法基础上增加约束条件,使用展宽俯仰角和方位角的方法形成宽零陷区域:

$$s.t. \omega^H a(\theta_i \pm \Delta\theta, \varphi_i \pm \Delta\varphi) = 0$$

其中, $a(\theta_i, \varphi_i)$ 为干扰方向的导向矢量, $\Delta\theta$ 和 $\Delta\varphi$ 分别为展宽的俯仰角和方向角的大小,当零陷展宽较大时,会影响主瓣和旁瓣性能, $\Delta\theta$ 和 $\Delta\varphi$ 设置为 5° 。

b) 为防止生成的协方差矩阵为奇异矩阵,同时减少因快拍数不足导致稳定性较差问题,对生成的协方差矩阵进行对角加载处理:

$$R = CC^H + \sigma I$$

其中, σ 为与 R 的迹相关的较小正实数, I 为与天线阵元数量相同的单位矩阵。

2.3 特征子空间投影法增强稳定性

当高速移动的LEO卫星与地面终端通信时,通信时间窗口短且系统需实时补偿多普勒频移和时延变化,算法复杂度高,占用计算资源大,严重限制快拍效率。为进一步增强LCMV算法中协方差矩阵在低快拍数下的稳定性,使用特征子空间投影法对阵列数据的协方差矩阵 R 进行特征分解,将空间划分为信号子空间和噪声子空间,利用特征子空间投影技术提取干扰的主要成分。具体为:

a) 对协方差矩阵 R 进行特征分解。在LCMV算法中,将对角加载的协方差矩阵进行特征分解。降序排列特征值,并存储对应的特征向量,获取信号子空间和噪声子空间的基础结构。

b) 基于特征值阈值确定信号子空间维度。将信号功率阈值设置为噪声功率的1/4,筛选出大于该阈值的特征值数量,以此确定信号子空间的维度。

c) 将干扰导向矢量投影到信号子空间。通常强干扰位于信号子空间内,通过投影操作将干扰导向矩阵限制在信号子空间内,可有效去除噪声子空间的影响。

d) 使用奇异值分解(SVD)提取干扰子空间基向量。对投影后的干扰导向矩阵进行SVD分解以提取其主成分,避免因噪声或快拍数少导致的虚假奇异值。最后,将提取的干扰子空间信息融入LCMV的约束条件中,增强算法在快拍数不足时的抗干扰性。

3 实验结果与分析

本次实验的仿真参数为:阵列天线阵元数为 32×32 二维均匀平面阵,阵元间距为半波长,设置通信频率为Ka频段,频率为30 GHz,快拍数为100,信噪比SNR为10 dB,干噪比INR为20 dB,设置期望信号方向

俯仰角和方位角为 $(30^\circ, 0^\circ)$ 和 $(20^\circ, -10^\circ)$ 。干扰信号方向俯仰角和方位角为 $(30^\circ, 40^\circ)$ 和 $(45^\circ, -10^\circ)$ 。并采用最大旁瓣电平值(SLL)和半功率波束宽度(HPBW)作为评价波束赋形质量指标的依据。

3.1 卡尔曼滤波性能分析

为验证所采用的卡尔曼滤波算法对估计信号的滤波效果,设计2组对比实验:实验中固定俯仰角为 30° ,方位角的期望信号和干扰信号分别设为 0° 、 40° 左右,通过100次快拍观察方位角信号的变化情况。其中,第1组实验将期望信号与干扰信号的方差均设为4,模拟期望信号角度动态变化场景下的波束估计性能;第2组实验设置期望信号方差为2,干扰信号方差为8,模拟期望信号与干扰信号波动程度差异较大场景下的波束估计性能,实验结果如图1所示。

从图1(a)和图1(b)可以看出,随着快拍数增加卡尔曼滤波能够有效地过滤期望信号动态变化时的波动,呈较平滑的上升趋势,可实现信号估计;从图1(c)和图1(d)可以看出,仿真设置的DOA估计的期望信号呈轻微波动,干扰信号波动情况稍微剧烈,信号通过卡尔曼滤波后,输出的期望信号和干扰信号均能达到相对平稳的水平,由此可知,卡尔曼滤波算法能够有效地减少因平台轻微抖动、信号动态变化等因素导致的接收信号不稳定情况。

3.2 基于LCMV算法波束展宽性能分析

为验证基于LCMV算法零陷区域展宽性能,将干扰信号 $(30^\circ, 40^\circ)$ 和 $(45^\circ, -10^\circ)$ 分别设定为零陷方向,并对该方向上的俯仰角和方位角各展宽 $\pm 5^\circ$,形成对应干扰的零陷区域,并加入未展宽的LCMV算法进行对比。图2所示为俯仰角固定为 30° 时对应视角下的归一化方向图,图3所示为方位角固定为 -10° 时对应视角下的归一化方向图。

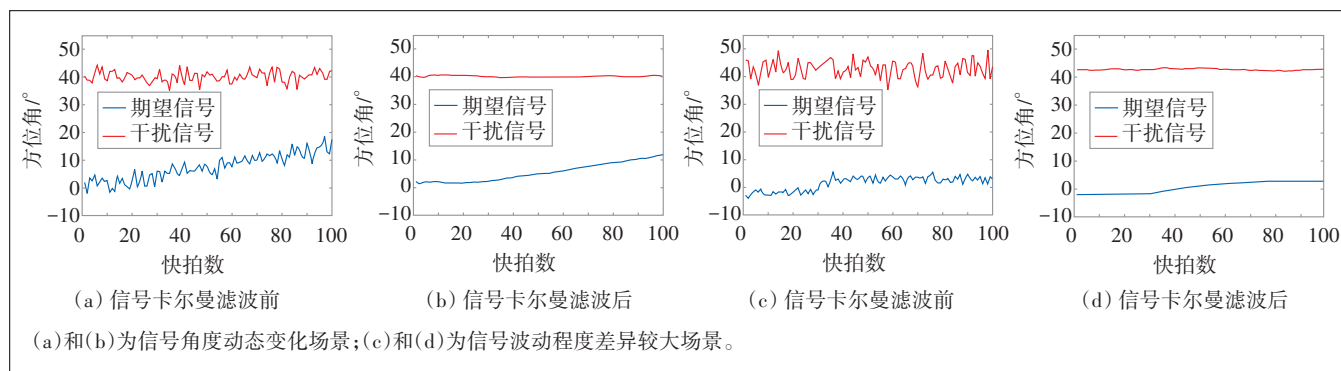


图1 卡尔曼滤波前后信号变化情况

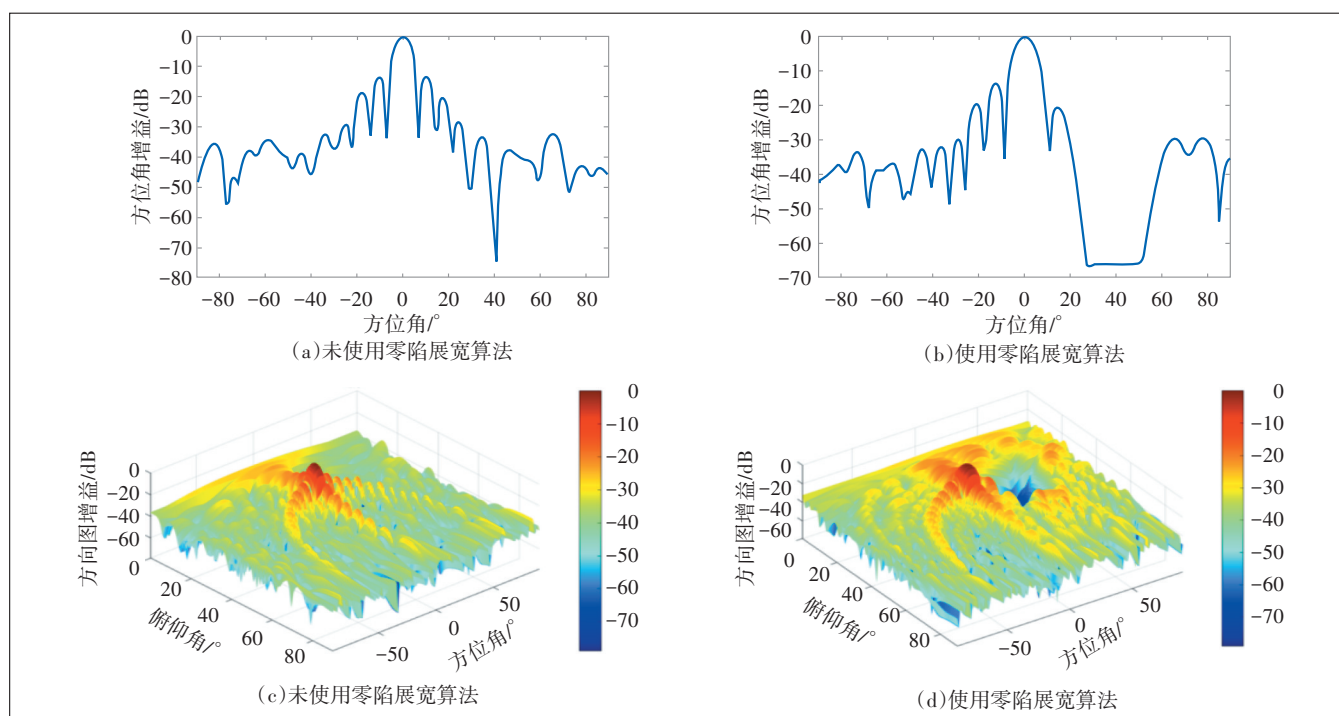


图2 俯仰角固定为 30° 时对应视角下的归一化方向图

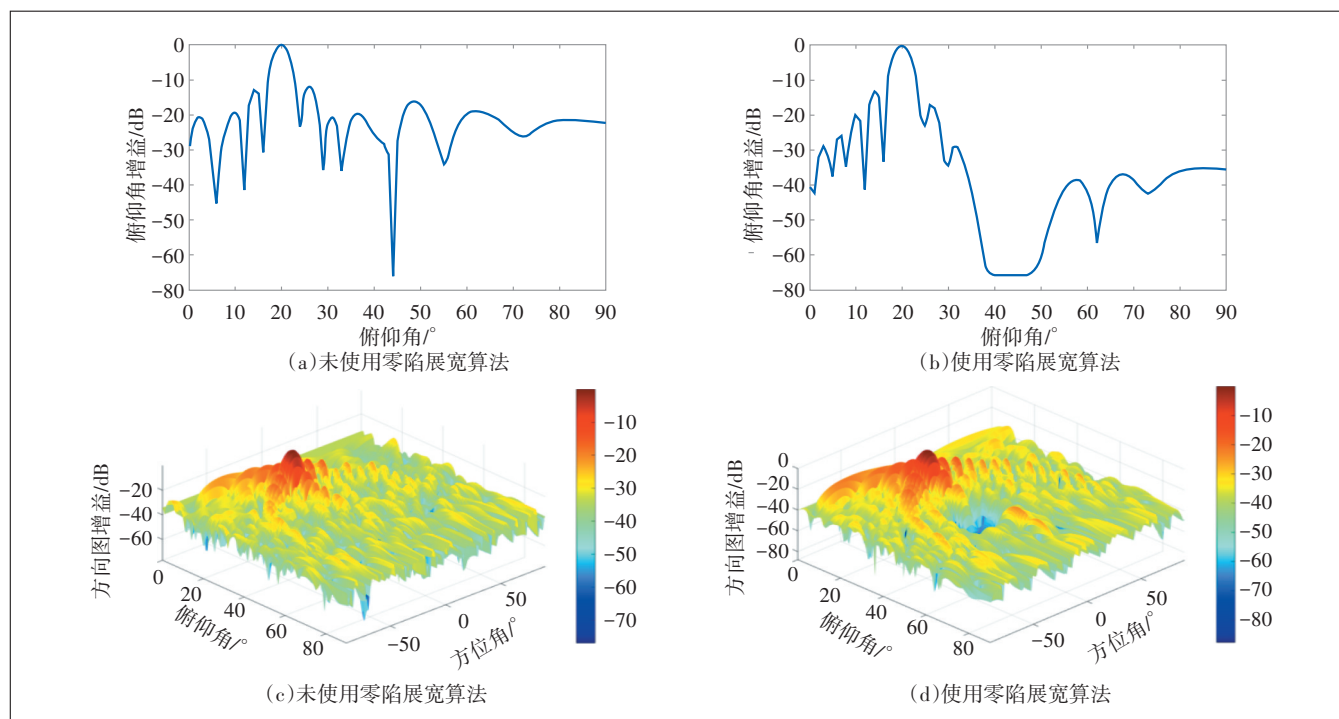


图3 方位角固定为 -10° 时对应视角下的归一化方向图

从图2(a)和图2(b)可以看出,未使用零陷展宽算法的波束宽度较窄,SLL为 -16.519 dB,主瓣俯仰角的HPBW为 4° ,方位角的HPBW为 8° 。使用零陷展宽的波束赋形算法后,零陷区域俯仰角和方位角波束宽度

均扩宽 10° ,SLL为 -16.596 dB,主瓣的俯仰角HPBW为 4° ,方位角HPBW为 9° 。因此,可以说明本算法在降低少量波束性能的情况下,能够有效地展宽零陷区域的波束宽度。

从图3(a)和图3(b)可以看出,未使用零陷展宽算法的波束宽度较窄,SLL为-12.931 dB,主瓣俯仰角的HPBW为 4° ,方位角的HPBW为 10° 。使用零陷展宽的波束赋形算法后,零陷区域俯仰角和方位角波束宽度均扩宽 10° ,SLL为-13.763 dB,主瓣的俯仰角HPBW为 4° ,方位角HPBW为 10° 。因此,可以说明本算法在降

低少量波束性能的情况下,能够有效地展宽零陷区域的波束宽度。

3.3 特征子空间投影性能分析

为验证特征子空间投影法对算法的影响,更清晰展示算法效果,分别固定俯仰角 30° 、方位角 -10° ,对比2种算法在对应视角下的归一化方向图(见图4)。

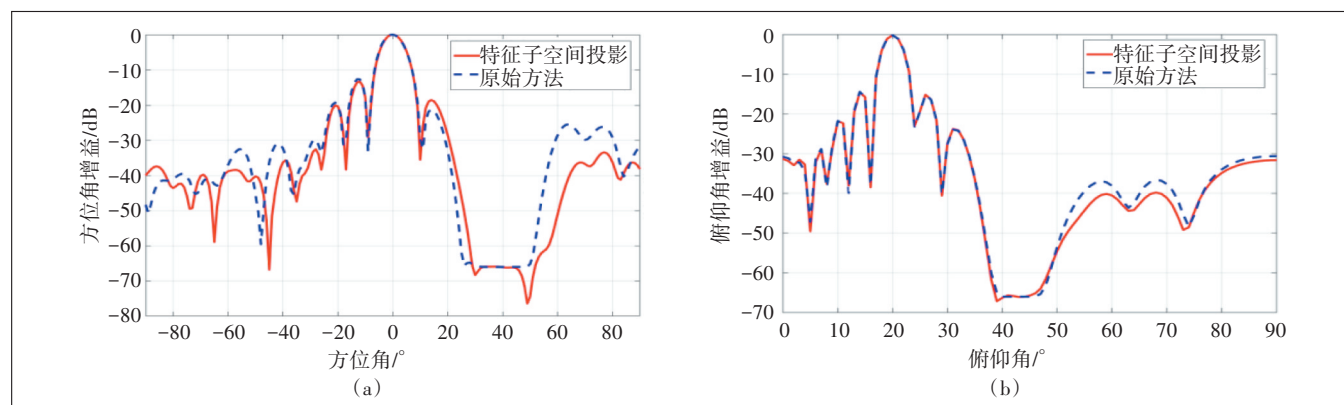


图4 固定俯仰角和方位角使用特征子空间投影算法对比

从图4(a)可以看出,与原始算法相比,在对协方差矩阵使用特征子空间投影算法后,图4(a)中SLL从-16.899 dB下降到-17.442 dB,图4(b)中SLL从-12.534 dB下降到-12.765 dB,同时俯仰角和方位角的HPBW和零陷波束深度和宽度基本保持一致。因此,可以说明特征子空间投影法可以在保证主瓣和零陷区域性能基本一致的情况下,增强算法稳定性,提升波束赋形性能。

4 结论

针对LEO卫星高速运动与系统内干扰源复杂导致的干扰规避失效问题,从信号稳健接收、展宽干扰源零陷区域和增强系统稳定性3个方面展开研究,提出一种基于LCMV的自适应干扰规避波束赋形算法。实验结果表明,该算法能够在基本不影响波束赋形性能的前提下,有效展宽干扰方向的零陷区域,实现良好的干扰规避效果,对保障LEO星座在高速移动和复杂电磁环境中的可靠运行具有一定潜在价值。

参考文献:

- [1] 解宁宇,陈任翔,马广辉,等. 低轨高通量星座系统波束设计方案研究[J]. 邮电设计技术,2023(1):47-50.
- [2] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学,2020,36(6):1-13.
- [3] 陈任翔,钟志刚,解宁宇. 基于低轨通信卫星的差分定位性能仿真

研究[J]. 无线电工程,2023,53(3):686-692.

- [4] 王运峰. 面向低轨卫星的协同频谱感知与共享技术研究[D]. 南京:南京邮电大学,2022.
- [5] 姜元山,陈礼波,王运付,等. 一种双波束相控阵卫星天线的设计与实现[J]. 邮电设计技术,2024(4):54-60.
- [6] 王海旺,邹诚,常家超,等. 基于发射波束旁瓣零陷的低轨卫星干扰规避策略[J]. 中国科学院大学学报(中英文),2024,41(4):541-549.
- [7] 余文科,程媛,李伟. 面向低轨互联网星座的频率干扰仿真研究[J]. 中国电子科学研究院学报,2022,17(5):501-507.
- [8] 张泓澍,蒋伯峰. 基于空间隔离的低轨卫星系统频谱共享方法[J]. 北京航空航天大学学报,2018,44(9):1909-1917.
- [9] 施艳,谢卓辰,刘会杰. 国际移动通信地面基站对低轨卫星的细化干扰建模与分析[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(3):132-139.
- [10] 邹诚. 低轨卫星通信系统频谱兼容技术研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院微小卫星创新研究院),2023.
- [11] 赵汇强,张玉萍,全厚德. 运动目标DOA自适应跟踪算法[J]. 火力与指挥控制,2012,37(6):152-156.
- [12] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. 软件导刊,2009,8(11):32-34.

作者简介:

王昱皓,工程师,硕士,主要从事卫星互联网和新技术研究工作;范现瑞,高级工程师,学士,主要从事卫星互联网和移动网络的规划设计运营等工作;王森,高级工程师,注册咨询师,硕士,主要从事运营商移动通信网络规划建设和解决方案课题研究工作;孙志远,工程师,硕士,主要从事网络智慧运营及网络运营分析相关工作;左亚聪,工程师,硕士,主要从事卫星互联网和新技术研究工作。