

城市峡谷场景中北斗接收机多径效应抑制算法优化

彭旭东

中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081

DOI: 10.61369/TACS.2025130004

摘 要 : 针对城市峡谷环境中建筑物密集、信号反射严重导致北斗接收机多径效应显著增强的问题, 围绕多径误差建模与抑制方法开展算法优化研究。结合城市峡谷场景下信号传播特性, 对直达波与反射波的相关畸变规律进行分析, 在传统多径抑制算法基础上, 引入改进的相关函数判别机制与自适应权重调节策略, 实现对多径分量的精细识别与动态抑制。通过融合信噪比特征与伪距残差约束, 优化多径误差估计精度, 提升复杂环境下定位解算的稳定性与可靠性。仿真结果表明, 优化算法在城市峡谷条件下可有效降低伪距误差和定位偏差, 对提升北斗系统在高密度城市环境中的导航定位性能具有一定工程应用价值。

关 键 词 : 城市峡谷; 北斗接收机; 多径效应抑制; 自适应算法; 伪距误差建模

Optimization of Multipath Effect Suppression Algorithm for Beidou Receivers in Urban Canyon Scenarios

Peng Xudong

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050081

Abstract : Addressing the significant enhancement of multipath effects in Beidou receivers caused by dense buildings and severe signal reflections in urban canyon environments, this study focuses on optimizing algorithms for multipath error modeling and suppression methods. By analyzing the correlation distortion patterns of direct and reflected waves based on the signal propagation characteristics in urban canyon scenarios, an improved correlation function discrimination mechanism and adaptive weight adjustment strategy are introduced on the basis of traditional multipath suppression algorithms. This enables precise identification and dynamic suppression of multipath components. By integrating signal-to-noise ratio features with pseudorange residual constraints, the accuracy of multipath error estimation is optimized, enhancing the stability and reliability of positioning solutions in complex environments. Simulation results demonstrate that the optimized algorithm effectively reduces pseudorange errors and positioning deviations in urban canyon conditions, offering practical engineering value for improving the navigation and positioning performance of the Beidou system in high-density urban environments.

Keywords : urban canyon; Beidou receiver; multipath effect suppression; adaptive algorithm; pseudorange error modeling

引言

随着北斗系统在城市交通、应急导航及智能终端中的广泛应用, 城市峡谷环境下的定位可靠性问题日益凸显。高层建筑引起的信号遮挡与多径反射, 已成为制约北斗接收机定位精度提升的关键因素。传统抑制方法在复杂反射条件下适应性不足, 难以满足高精度应用需求。围绕城市峡谷多径效应的形成机理与误差特征, 对抑制算法进行针对性优化研究, 不仅具有重要的理论意义, 也对提升北斗系统在复杂城市环境中的工程应用价值具有现实意义。

一、城市峡谷场景下北斗信号多径效应特征分析

1. 城市峡谷环境下多径效应的形成条件与传播特点

在城市峡谷场景中, 高层建筑密集分布, 街道空间狭窄, 北斗卫星信号在传播过程中易受到遮挡、反射与绕射等多种影响。直达信号在进入接收机天线前, 常伴随来自建筑立面、地面及其

他人工结构的反射信号同步到达, 形成典型的多径传播环境。由于反射路径长度与传播介质差异, 多径信号在相位、幅度和到达时间上均与直达波存在偏差, 从而破坏接收信号的理想相关性。

城市峡谷中多径传播具有明显的空间相关性 with 方向性特征, 不同街道走向、建筑高度及材料差异会导致多径分量数量与能量

分布存在显著变化。这种复杂的传播条件使得多径效应呈现出非平稳、时变特性，增加了信号处理与误差抑制的难度^[1]。

2. 多径效应对北斗接收机观测量的影响特征

多径效应对北斗接收机的主要影响体现在伪距、载波相位及信号相关峰形态等观测量上。反射信号叠加会引起相关函数畸变，导致相关峰偏移或展宽，使伪距测量产生系统性偏差。在低仰角卫星条件下，多径信号能量占比进一步提高，伪距误差幅度明显增大，定位解算稳定性受到影响。

此外，多径效应具有周期性与时变性的特点，在静态或准静态场景中表现出一定重复规律，而在动态应用中则随接收机位置与环境变化快速波动。这种特性使传统基于时间平均或固定阈值的抑制方法难以兼顾实时性与抑制效果。

3. 城市峡谷场景多径效应的典型表现形式

在实际城市峡谷应用中，多径效应常表现为定位结果抖动、解算收敛速度下降及短时定位跳变等现象。尤其在道路转弯、交叉口或高楼阴影区域，卫星可见性与信号质量快速变化，多径误差易集中爆发，造成定位精度明显下降。

同时，多径效应与信噪比衰减、非视距接收等问题相互叠加，形成复合误差源，进一步放大对北斗接收机定位性能的影响。因此，准确刻画城市峡谷多径效应的特征规律，是开展针对性抑制算法优化与性能提升的关键基础^[2]。

二、北斗接收机多径误差建模与影响机理研究

1. 多径误差的组成形式与建模思路

北斗接收机多径误差主要来源于反射信号与直达信号在时间、相位及幅度上的叠加效应，其本质是非理想信号传播条件下相关处理结果的系统性偏移。根据传播路径差异，多径误差可划分为短延迟多径与长延迟多径两类，其中短延迟多径对相关峰形态影响显著，易直接引入伪距测量偏差。建模过程中通常将多径分量视为具有独立幅度衰减、相位偏移及附加时延的叠加信号，通过参数化描述其对接收信号相关函数的扰动特性。

在城市峡谷场景下，多径分量数量多且变化快，单一静态模型难以准确反映误差演化规律。因此，多径误差建模需引入时变特性描述，将反射路径变化、环境遮挡及接收机运动等因素纳入模型参数，使误差表达更贴近实际应用环境。如图1所示。

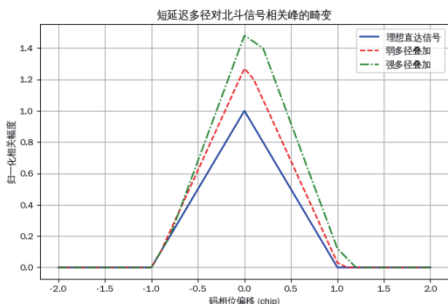


图1 短延迟多径对北斗信号相关峰的畸变

2. 多径误差对伪距与载波观测的作用机理

多径误差对伪距观测量的影响主要表现为相关峰位置偏移和

幅度失真。反射信号与直达信号相互干涉后，相关函数的主峰位置发生偏移，直接导致伪距测量出现正负不定的系统误差。该误差幅值与多径信号的相对延迟、功率比例及相位关系密切相关，在低仰角和遮挡严重条件下尤为明显。

在载波相位观测中，多径误差虽然幅度相对较小，但其高频波动特性会引入相位噪声，影响模糊度解算的稳定性。多径引起的相位扰动具有一定周期性，与卫星相对运动及反射体几何关系变化密切相关，对高精度定位应用构成潜在风险。

3. 城市峡谷环境下多径误差的时空变化特征

城市峡谷中多径误差呈现出明显的时空非均匀性。空间上，不同街道位置、建筑布局及地表材料差异导致多径强度与分布存在显著变化；时间上，随着卫星高度角变化和接收机运动，多径误差表现出快速起伏和突变特征。这种时空耦合特性使多径误差难以通过简单滤波手段加以消除。

此外，多径误差往往与非视距信号问题相互叠加，使误差机理更加复杂。反射信号在部分时刻可能占据主导地位，导致观测量偏离真实几何距离，从而影响定位解算结果的可靠性。因此，深入分析多径误差的形成机理及变化规律，是开展多径抑制算法优化与精细化建模的重要前提^[3]。

三、面向城市峡谷环境的多径效应抑制算法优化方法

1. 城市峡谷多径效应抑制算法的设计原则

城市峡谷环境下多径效应具有反射路径复杂、误差变化快及非视距信号频发等特点，对抑制算法的适应性与实时性提出了更高要求。算法设计需兼顾多径识别准确性与计算复杂度控制，在保证接收机实时处理能力的前提下，实现对多径分量的有效抑制。基于场景特征的算法应具备动态调整能力，能够随环境与信号状态变化自适应修正参数，避免固定阈值方法在复杂条件下失效。

同时，多径抑制算法应尽量减少对原始信号结构的破坏，在抑制反射分量的同时保持直达信号的相关特性与测量精度。这一原则为后续相关域处理、权重设计及约束条件引入提供了基础^[4]。

2. 基于相关函数特征的多径分量识别方法

相关函数形态是反映多径效应的重要特征信息。在理想条件下，相关函数主峰对称且形态稳定，而多径存在时主峰会出现偏移、展宽或旁瓣增强等异常特征。通过对相关函数对称性、峰值位置变化及斜率分布进行分析，可实现对多径干扰的初步识别。

针对城市峡谷多径变化快的特点，引入改进的相关函数判别机制，通过多点采样与动态门限调节方式，提高多径识别的灵敏度与鲁棒性。该方法能够在多径分量能量较低或快速变化情况下，保持较好的检测效果，为后续抑制处理提供可靠依据。

3. 自适应权重调节的多径抑制策略

在多径抑制过程中，自适应权重调节的核心在于依据观测特性动态调整不同相关点在伪距估计中的贡献比例。多径干扰通常集中于相关函数的非对称区域或幅度畸变明显的区段，因此可根据相关峰形态变化、幅度梯度及能量分布对相关区间进行等级划分。对于幅度扰动超过设定阈值（如相对偏差超过10%）、斜率

变化异常或旁瓣增强显著的点，可自动降低其权重，以削弱反射分量的影响。

权重因子的更新可结合多项特征实现，例如根据信噪比下降幅度（如下降超过 3 dB）、残差序列波动强度（如连续多历元偏差增大）、历史相关峰对称性评价指标等进行调节，使权重分布随环境变化实时更新。对于连续稳定且接近直达波特性的相关点，提高其权重，可增强估计的可靠性。此类动态调节机制可使算法在复杂城市环境中避免固定权重策略可能出现的“抑制不足”或“抑制过强”问题，使多径抑制力度与场景状态匹配。通过控制权重变化范围与更新周期，可保持伪距估计的平稳性，减少突变，提高算法在动态街区、高反射区域及低仰角信号条件下的整体适应性与精度表现，为优化北斗接收机性能提供更具工程可行性的路径^[5]。

4. 多特征融合约束下的抑制算法优化

为进一步提升城市峡谷环境下的多径抑制效果，可将信噪比、伪距残差及卫星仰角等多种特征引入算法约束条件。通过构建多特征联合判别模型，对多径误差进行综合评估，可有效区分直达信号与异常反射信号，提高抑制决策的可靠性。

多特征融合方法能够降低单一特征失效带来的风险，使算法在信号遮挡严重或观测条件快速变化时仍保持稳定性能。通过对融合策略与参数更新机制进行优化，可显著提升北斗接收机在城市峡谷场景下的定位精度与运行可靠性。

四、多径抑制优化算法的仿真验证与性能评估

1. 仿真场景构建与多径环境建模

仿真验证基于典型城市峡谷环境构建三维电磁传播模型，通过引入建筑物高度、街道宽度、反射面材质及卫星几何构型等参数，模拟真实城市峡谷条件下多径信号的传播路径。模型中设置多组卫星高度角、方位角及接收机运动轨迹，以覆盖直达波接收受限、低仰角多径增强及动态环境快速变化等典型场景，使多径效应的复杂性得到充分体现。

在信号生成过程中，分别叠加短延迟与长延迟两类多径分量，通过调节反射系数、相位偏移及时延参数实现多径强度与变化速度的精确控制。为保证仿真数据的代表性，采用统计特性接近真实城区的多径功率衰减模型，使反射信号分布具有随机性与场景相关性。该建模方法在保持可控性的同时，增强了仿真条件与实际应用环境的一致性^[6]。

2. 优化算法的性能指标与对比实验设计

优化算法的性能评估主要围绕伪距误差、定位偏差、相关峰畸变程度以及多径抑制率等关键指标展开。为检验算法在不同多径强度、不同信号噪声水平及不同卫星高度角条件下的适应性，对比实验设置传统判别门限法、固定权重法与改进自适应权重算法等多种算法版本。实验在相同的多径环境下独立运行各算法，获取完整的伪距残差序列与定位结果，以便进行横向对比分析。

在指标计算过程中，采用均方根误差（RMSE）、相关函数偏移量（ $\Delta Peak$ ）、抑制后伪距异常率等参数对算法性能进行定量评估。为了反映算法在动态场景中的稳定性，还设置接收机沿城

市街区移动的模拟路径，并实时计算定位轨迹偏差，分析算法应对快速变化多径的能力。该设计使实验结果具备全面性与可重复性，为优化效果评价提供可靠依据^[7]。

3. 仿真结果分析与性能提升评估

仿真结果显示，优化后的多径抑制算法在城市峡谷环境中显著改善伪距测量质量。改进的相关函数判别机制能够更准确识别多径畸变，使主峰偏移量明显减小；自适应权重调节策略有效降低反射信号对测量值的影响，使伪距误差保持在稳定区间。与传统算法相比，优化算法在强多径场景下表现出更高的抑制效率，尤其在低仰角与街道狭窄区段，误差改善幅度更为显著。

同时，多特征融合约束机制进一步提升了算法的鲁棒性。信噪比与残差联合判别能够减少误识别现象，使定位结果更加稳定。动态场景试验表明，在接收机运动过程中，多径误差呈现的快速波动被有效平滑，定位轨迹偏离明显下降。整体来看，该优化算法在复杂城市环境下能显著增强北斗接收机的抗多径能力，为高精度定位提供更可靠的数据支撑。如表 1 所示。

表 1 多径抑制优化算法与传统算法性能对比

指标类型	传统门限法	固定权重法	优化自适应算法
伪距 RMSE (m)	2.84	1.92	1.03
主峰偏移量 $\Delta Peak$ (chips)	0.082	0.047	0.018
多径抑制率 (%)	41.6	58.3	79.5
动态定位偏差均值 (m)	3.21	2.47	1.36
异常伪距比例 (%)	12.4	7.9	3.2

五、结语

城市峡谷环境中多径效应复杂多变，是影响北斗定位精度的关键因素。本研究围绕多径误差特征建模、影响机理分析及抑制策略优化展开系统探讨，通过引入相关函数精细识别、自适应权重调节和多特征融合约束等方法，实现对多径干扰的有效抑制。仿真结果表明，优化算法在伪距误差控制、定位稳定性与动态场景适应性方面均表现突出，为北斗系统在高密度城市环境中的可靠应用提供技术支撑，对复杂场景下的高精度导航具有重要工程价值^[8]。

参考文献

[1] 李阳. 城市峡谷中基于注意力机制的多径抗干扰定位方法研究 [D]. 广东工业大学, 2025. DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2025.000172.
[2] 张义琅. 城市峡谷场景下基于无监督学习的非视距识别方法研究 [D]. 北京邮电大学, 2024. DOI: 10.26969/d.cnki.gbydu.2024.001225.
[3] 陈朝, 朱梦双, 周一帆, 等. 高动态北斗接收机 PLL 性能优化研究 [J]. 天地一体化信息网络, 2025, 6(03): 110-117.
[4] 都旭煌, 牟猷, 邹璇, 等. 国产单北斗接收机多路误差建模与性能评估 [J]. 测绘科学, 2024, 49(09): 11-17. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2024.09.002.
[5] 刘瑞华, 周童, 刘亮. 基于箕舌线函数的北斗导航信号干扰抑制算法 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2025, 46(03): 330-336.
[6] 王奕方. 北斗接收机窄带干扰抑制技术研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2019. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2019.000834.
[7] 程琦. 城市环境 GNSS 定位导航关键技术研究 [D]. 南京航空航天大学, 2021. DOI: 10.27239/d.cnki.gnhhu.2021.001148.
[8] 王勋, 崔先强, 高天杭. 城市环境下数据缺失定位算法比较 [J]. 导航定位学报, 2020, 8(02): 43-48. DOI: 10.16547/j.cnki.10-1096.20200208.