引文格式:朱平,王坚,于亦龙,等.大高差阵列GNSS拓扑约束解耦的形变提取模型[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(7):1336-1347.DOI:10.13203/j.whugis20260123

Citation:ZHU Ping,WANG Jian,YU Yilong,et al.A Deformation Extraction Model for Large Height-Difference Array GNSS Decoupled by Topological Constraints[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(7):1336-1347.DOI:10.13203/j.whugis20260123

大高差阵列GNSS拓扑约束解耦的形变提取模型

朱 平[1,3] 王 坚[1,3] 于亦龙[2] 韩厚增[1,3]
姜玉龙[2] 吴耐明[1,3] 汪鹏飞[1,3]

1 北京建筑大学测绘与城市空间信息学院,北京,102616
2 中建宏达建筑有限公司,北京,100125
3 建筑遗产精细重构与健康监测北京市重点实验室,北京,100044

摘 要:针对超高层建筑施工期受限空间下全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)动态解算发散与参数恶性耦合的问题,提出一种大高差阵列GNSS拓扑约束解耦的形变提取模型。在观测域,构建融合预测新息残差、高度角与信噪比的抗差观测模型;在状态域,通过对阵列GNSS共享残余对流层延迟参数建模,将结构先验物理信息通过增广矩阵约束滤波量测更新环节,实现误差脱耦。结果表明,多维特征定权模型能将高仰角下的畸变信号观测噪声标准差自适应放大1.8~2.0倍;四天线阵列协同残余对流层延迟的标准差下降至0.179 mm/s,较单节点下降了44.06%,模糊度固定率提高了14.02%;三维形变的平面95%误差概率圆半径缩减49.88%,高程最大误差较线状约束降低37.78%,为大型复杂工程的受限空间长周期动态安全监测提供稳定的算法。

关键词:超高层建筑;受限空间多径;阵列GNSS;对流层延迟解耦;拓扑约束

中图分类号:P237;TP208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-04-08

DOI:10.13203/j.whugis20260123 **文章编号**:1671-8860(2026)07-1336-12

A Deformation Extraction Model for Large Height-Difference Array GNSS Decoupled by Topological Constraints

ZHU Ping[1,3] *WANG Jian*[1,3] *YU Yilong*[2] *HAN Houzeng*[1,3]
JIANG Yulong[2] *WU Naiming*[1,3] *WANG Pengfei*[1,3]

1 School of Geomatics and Urban Spatial Informatics, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China
2 China State Construction Hongda Engineering Co., Ltd., Beijing 100125, China
3 Beijing Key Laboratory for Architectural Heritage Fine Reconstruction & Health Monitoring, Beijing 100044, China

Abstract: **Objectives**: To address the problems of solution divergence and severe parameter coupling in global navigation satellite system (GNSS) dynamic positioning under confined environments during the construction of super-tall buildings, a deformation extraction model based on topology-constrained decoupling of large height-difference array GNSS is proposed. **Methods**: In the observation domain, a robust observation model integrating predicted innovation residuals, satellite elevation angles, and signal-to-noise ratio was constructed. In the state domain, a shared residual tropospheric delay parameter was modeled for the GNSS array, and the prior structural physical information was incorporated into the filter measurement update process through an augmented matrix constraint, thereby achieving parameter decoupling. **Results**: The results show that the multi-dimensional feature-weighting model can adaptively enlarge the observation noise standard deviation of distorted signals at high elevation angles by 1.8-2.0 times. Under the four-antenna array collaborative scheme, the standard deviation of the residual tropospheric delay de-

基金项目:国家自然科学基金(42274029);北京建筑大学博士研究生科研能力提升项目(DG2025032)。

第一作者:朱平,博士生,研究方向为GNSS超高层结构健康监测。1108140024008@stu.bucea.edu.cn

通信作者:王坚,博士,教授。wangjian@bucea.edu.cn

creases to 0.179 mm/s, which represents a reduction of 44.06% compared with the single-node solution, while the ambiguity fixing rate increases by 14.02%. In addition, the 95% circular error probable of three-dimensional deformation is reduced by 49.88%, and the maximum vertical error decreases by 37.78% compared with the linear-constraint solution. **Conclusions:** The proposed method provides a stable algorithmic framework for long-term dynamic safety monitoring of large-scale complex engineering structures in confined environments.

Key words: super-tall building; confined space multipath; array GNSS; tropospheric delay decoupling; topological constraint

随着智能建造理念不断推进,数字孪生技术已成为大型复杂工程施工管理的核心驱动力,而结构安全感知技术则构成了孪生系统不可或缺的数据底座[1]。在超高层建筑较长的施工期内,核心筒结构由于高度大、柔度高,极易在风荷载、日照温差等动态环境激扰下发生复杂的空间三维形变。因此,如何通过长周期、高精度的结构健康监测获取海量时空数据,实现对结构的实时数智化映射,已成为当前测绘与土木交叉领域的研究热点[2]。全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)凭借其全天候、高精度的优势,结合建筑爬模系统跟随建筑核心筒施工同步抬升的特性,为超高层建筑全生命周期的高精感知提供了完美的工程范式[3]。

然而,将传统GNSS实时动态(real-time kinematic,RTK)定位技术应用于超高层爬模施工场景时,存在环境与算法两大问题。爬模系统内部的核心筒墙体与外部的金属防护网会导致卫星天空视图残缺,并伴随强烈的信号反射与瞬时衍射。针对高遮挡、强多径的复杂观测环境,文献[4]深入分析受限峡谷环境下的多径畸变机理,并提出了兼顾质量控制的高维模糊度处理策略;文献[5]提出一种基于信噪比(signal-to-noise ratio,SNR)的改进随机模型,并建立了载波相位精度与SNR观测值之间的联系;文献[6]提出一种基于卫星仰角和载噪比(carrier-to-noise density ratio,C/N_0)的实时自适应加权模型来减少多径误差。但是,仅依靠高度角与SNR特征建模,忽视严重的载波相位畸变,缺乏滤波状态反馈的预测校验,会导致隐蔽的劣质信号直接向状态估计域渗透。

单天线独立解算具有视野与质量的物理极限,部分学者采用多天线阵列协同定位技术提高受限空间环境下的位置估计精度。文献[7]验证了分布式多基线联合解算的空间几何冗余可有效弥补局部遮挡造成的数据缺失;文献[8]进一步将GNSS多天线与惯性测量单元紧密耦合,通过引入已知天线基线长度作为几何约束,有效修正高频动态监测中的对准误差。但是,现有阵列算法的空间约束多局限于微观的相对基线保持,并未考虑建筑整体的力学特征。现有模型无法区分大楼的水平低频振荡与多径引起的高程异常突变,一旦遭遇严重多径激扰,整个阵列极易发生系统性的共模漂移。

在超高层大楼监测中,地面基准站与高空监测阵列之间通常存在几百米的大高差,且存在一定程度的残余天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD)[9]。为解决大高差与高频激扰下的滤波发散,文献[10]通过融合数值气象数据来削弱残余ZTD对山区大型桥梁监测的影响;文献[11]在模糊度函数法(ambiguity function method,AFM)中引入相对ZTD参数进行联合解算,有效补偿高程维度的形变误差。但二者均未能解决法方程列秩亏这一数学底层问题。垂直坐标增量与对应的偏导数投影函数存在高度的近似线性相关性[12],导致雅可比矩阵出现严重的秩亏特性。一旦隐蔽多径误差未被改正,卡尔曼滤波器为了平滑局部观测残差,会以牺牲大气参数估值精度为代价降低定位误差。

针对上述问题,本文提出了一种大高差阵列GNSS拓扑约束协同解耦的形变动态提取模型。首先,通过构建融合新息残差、高度角与SNR的三维特征等价权模型,实现了对隐蔽多径与衍射信号的瞬时前端隔离;然后,通过对阵列GNSS共享残余ZTD参数建模,构建顾及结构物理刚度的异构拓扑增广约束模型;最后,将防共模漂移的先验容差与节点保形弹簧以矩阵增广形式切入扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter,EKF)量测更新环节,实现大高差残余ZTD与结构三维形变的脱耦,为大型复杂工程的长周期动态安全监测提供稳定可靠的算法。

1 大高差阵列GNSS拓扑约束解耦方法

针对超高层建筑施工受限空间高精定位需求,本文提出了大高差阵列GNSS拓扑约束协同解耦模型,技术路线如图1所示。首先,输入地面基准站与阵列监测站数据,经多端共视参考星优选构建载波差分后,利用新息、高度角与SNR等多维惩罚因子对单星观测质量进行自适应抗差定权,隔离多径干扰。其次,构建阵列形变量、共享残余ZTD及整周模糊度的EKF联合状态向量。然后,在量测更新环节,利用爬模物理刚度特征构建虚拟拓扑矩阵,约束阵列浮点解结果。最后,在满足位置精度衰减因子[13](position dilution of precision,PDOP)和最少固定卫星数的前提下,通过最小二乘模糊度降相关平差(least-squares ambiguity decorrelation adjustment,LAMBDA)算法[14]获取高可靠固定解,实现大高差环境下残余ZTD脱耦后的结构三维形变提取。

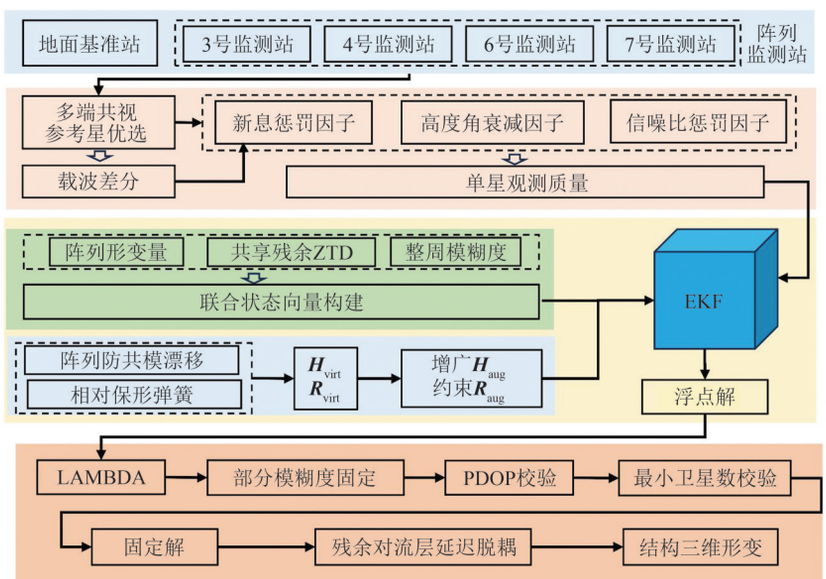


图1 本文方法的技术路线图

Fig. 1 Flowchart of the Proposed Method

1.1 构建阵列GNSS抗差观测模型

在超高层建筑施工环境下,爬模上的GNSS天线由于建筑核心筒、塔吊等重型装备的作业以及施工现场强电磁反射等影响,导致卫星天空视图残缺、信号产生瞬时衍射与多径现象[15]。在这种复杂受限空间中,传统RTK算法依赖单一高度角的选星机制与随机定权模型呈现出显著的局限性,难以满足毫米级施工位置监测的连续性与高可靠要求。为此,本文从超高层物理特性出发,构建了复杂受限空间下的阵列GNSS抗差观测模型。

针对核心筒遮挡导致基准站最高星在流动站频繁失锁的问题以及阵列GNSS协同解算的连续性,构建多端共视参考星优选模型,其计算式为:

$$i = \arg_{k\in(\Omega_b\cap\Omega_r)} \max(E_s) \tag{1}$$

式中,i为参考卫星;Ω_b为基准站可见卫星集;Ω_r为阵列流动站内所有共同可见的卫星集;s为共视候选卫星集合中的任意卫星索引,E_s为该卫星的高度角。该准则要求同一历元所有接收机均可观测到参考星,且在发生参考星切换时,进行双差模糊度映射以保持滤波的连续性[16]。基于参考卫星i与非参考卫星j,阵列中第r个节点的载波相位双差观测方程为:

$$\nabla\Delta\Phi_{rb}^{ij} = \nabla\Delta\rho_{rb}^{ij} + \nabla\Delta T_{rb}^{ij} - \nabla\Delta I_{rb}^{ij} + \lambda\nabla\Delta N_{rb}^{ij} + \varepsilon_\Phi \tag{2}$$

式中,$\nabla\Delta$为双差算子;$\nabla\Delta\Phi_{rb}^{ij}$为基准站$b$与流动站$r$之间、参考卫星$i$和非参考卫星$j$构成的双差载波相位观测值;$\nabla\Delta\rho_{rb}^{ij}$为双差几何距离项;$\nabla\Delta T_{rb}^{ij}$为双差对流层延迟项;$\nabla\Delta I_{rb}^{ij}$为双差电离层延迟项;$\lambda$为载波波长;$\nabla\Delta N_{rb}^{ij}$为双差整周模糊度;$\varepsilon_\Phi$为包含多径与系统噪声的综合残差。

在传统的浮点解算中,通常仅采用高度角作为观测量的定权指标,在复杂多径的铝制护栏环境中易导致EKF发散。为应对超高层建筑施工环境中定位信号衍射与多径现象,本文打破单一

高度角定权机制构建了融合高度角、SNR及预测新息残差的三维特征等价权协方差模型。观测值的先验方差计算式为:

$$\sigma_s^2 = \sigma_0^2 \cdot f(E_s) \cdot g(R_s) \cdot h(v_s) \tag{3}$$

式中,σ_s^2为第s颗卫星双差载波相位观测值的先验方差;σ_0^2为载波相位基础噪声方差;$f(E_s)$第s颗卫星的高度角衰减因子;$g(R_s)$第s颗卫星的信噪比惩罚因子;R_s为第s颗卫星的信噪比;$h(v_s)$为第s颗卫星的新息惩罚因子;v_s为第s颗卫星的验前新息残差。

针对基础大气折射与天线增益衰减,$f(E_s)$的计算式为:

$$f(E_s) = a^2 + (a/\sin E_s)^2 \tag{4}$$

式中,a为基础测距误差。

针对信号衍射衰减,$g(R_s)$的计算式为:

$$g(R_s) = \begin{cases} 1, R_s \geqslant T_s \\ 1 \times 10^{\frac{T_s - R_s}{10}}, R_s < T_s \end{cases} \tag{5}$$

式中,T_s为信噪比惩罚阈值,基于以往的经验性实测研究[17-19],本文T_s设定为38 dB-Hz。

在强多径现象下,高仰角卫星的SNR往往无明显衰减,但相位已产生畸变。本文引入EKF验前新息[20]的$h(v_s)$,其计算式为:

$$h(v_s) = \begin{cases} 1, |v_s| \leqslant T_{\text{inn}} \\ \left(\dfrac{|v_s|}{T_{\text{inn}}} \right)^2, |v_s| > T_{\text{inn}} \end{cases} \tag{6}$$

式中,T_{inn}为新息残差判别阈值。根据文献[21]的实测研究,城市受限环境下载波的历元间单差多径畸变被严格限制在0.02 m以内,依据误差传播定律,v_s等效的物理容限与标准差均被放大$\sqrt{2}$倍,即等效极限约0.028 m。因此,本文T_{inn}设定为0.03 m。

在复杂受限空间下,阵列GNSS抗差观测模型利用事前物理SNR与滤波新息残差的双重校验,通过平方级与指数级惩罚机制,实现了对隐藏在正常仰角下的严重畸变观测值的自适应瞬时降权,从算法前端阻断了多径向滤波状态的渗透,为后续的阵列拓扑约束与参数解耦提供了极度纯净的量测信息。

1.2　阵列GNSS共享残余ZTD参数建模

超高层建筑施工监测往往采用RTK算法进行高精度位置测量,其基准站与监测站之间往往存在几百米的高差,即便采用标准大气模型(如Saastamoinen模型[22])进行修正,势必也会产生残余ZTD。在传统的单节点大高差动态定位中,每个天线需独立估计自身的ZTD[23]。然而,超高层建筑爬模阵列的节点空间分布相对密集,通常在几十米范围内,其视距内的大气剖面具有极强的一致性[24]。因此,在阵列GNSS解算流程中,本文构建了大高差阵列共享残余ZTD估计模型。

在阵列GNSS联合状态向量$\boldsymbol{X}$的构建中,强制阵列内n个节点共享唯一ZTD参量δZ_{shared},其表达形式为:

$$\boldsymbol{X} = [\delta \boldsymbol{r}_1^{\mathrm{T}}, \delta \boldsymbol{r}_2^{\mathrm{T}}, \cdots, \delta \boldsymbol{r}_n^{\mathrm{T}}, \delta Z_{\text{shared}}, \nabla\Delta N_1, \nabla\Delta N_2, \cdots, \nabla\Delta N_m]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{X}$为阵列GNSS联合状态向量;n为阵列节点数量;$\boldsymbol{r}_n$为各节点的三维位置改正数;$\nabla\Delta N_m$为双差整周模糊度。此时,GNSS观测向量$\boldsymbol{Y}_{\text{GNSS}}$的计算式为:

$$\boldsymbol{Y}_{\text{GNSS}} = \boldsymbol{H}_{\text{GNSS}} \boldsymbol{X} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{GNSS}} \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{H}_{\text{GNSS}}$为观测方程的雅可比矩阵;$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{GNSS}}$为观测噪声向量,$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{GNSS}} \sim N(0, \boldsymbol{R}_{\text{robust}})$,$\boldsymbol{R}_{\text{robust}}$为§1.1中构建的融合多维环境特征的等价权矩阵。

标准的EKF量测更新过程中,卡尔曼增益矩阵$\boldsymbol{K}_k$的计算式为:

$$\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_{k|k-1} \boldsymbol{H}_{\text{GNSS}}^{\mathrm{T}} \left(\boldsymbol{H}_{\text{GNSS}} \boldsymbol{P}_{k|k-1} \boldsymbol{H}_{\text{GNSS}}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}_{\text{robust}} \right)^{-1} \tag{9}$$

状态与协方差更新计算式为:

$$\boldsymbol{X}_{k|k} = \boldsymbol{X}_{k|k-1} + \boldsymbol{K}_k (\boldsymbol{Y}_{\text{GNSS}} - \boldsymbol{H}_{\text{GNSS}} \boldsymbol{X}_{k|k-1}) \tag{10}$$

$$\boldsymbol{P}_{k|k} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{H}_{\text{GNSS}}) \boldsymbol{P}_{k|k-1} \tag{11}$$

式中,$\boldsymbol{X}_{k|k-1}$、$\boldsymbol{X}_{k|k}$分别为历元k的先验、后验状态估计;$\boldsymbol{P}_{k|k-1}$、$\boldsymbol{P}_{k|k}$分别为历元k的先验、后验状态协方差矩阵;$\boldsymbol{I}$为单位矩阵。

然而,依赖EKF无法解决受限空间下的解算发散问题。从数学解析看,在$\boldsymbol{H}_{\text{GNSS}}$矩阵中,节点垂直参数对应的偏导数与ZTD对应的投影函数之间存在高度的近似线性相关性,导致系统的法方程(或$\boldsymbol{H}_{\text{GNSS}}$矩阵)出现严重问题与列秩亏。在受限空间中,一旦某节点遭遇强烈多径或遮挡,传统EKF为了平滑局部观测残差,会将多径误差泄露给处于严重耦合状态的高程与ZTD参数。

1.3　顾及结构物理刚度的异构拓扑增广约束模型

未引入外部物理约束的单天线GNSS定位解算,在受限空间下呈几何脆弱性,隐蔽多径误差在缺乏外部约束时极易向共享大气参数泄漏。在工程实际中,依据《整体爬升钢平台模架技术标准》(JGJ 459—2019),超高层液压爬模系统属于重型整体刚性钢结构。在作业期间,其依靠支承牛腿与水平限位装置严密紧固于核心筒墙体。

同时,阵列中的GNSS监测节点均直接焊接锚固于爬模主受力钢梁上,确保了各天线节点在物理空间上保持着相对固定的几何拓扑构型。本文以物理实体先验信息为基础,结合协方差约束卡尔曼更新的数学框架[25],构建了顾及结构物理刚度的异构拓扑增广约束模型。通过对标准EKF的雅可比矩阵和量测噪声矩阵强制增广,实现对各天线相对位移量的严格限制。

为防止大楼在受限空间多径冲击下发生系统性的共模漂移,本文对阵列参考节点施加绝对坐标先验约束。绝对锚定方程计算式为:

$$\delta \boldsymbol{r}_{\mathrm{ref}} = \boldsymbol{v}_{\mathrm{abs}} \tag{12}$$

式中,$\delta \boldsymbol{r}_{\mathrm{ref}}$为参考节点的三维坐标改正向量;$\boldsymbol{v}_{\mathrm{abs}}$为绝对拓扑约束噪声向量,$\boldsymbol{v}_{\mathrm{abs}} \sim N(0, \boldsymbol{R}_{\mathrm{abs}})$,$\boldsymbol{R}_{\mathrm{abs}}$为绝对先验协方差对角矩阵。其数学设定依据为:假设阵列节点在正交三维方向上的物理位移容差相互独立,即非对角线协方差元素恒为零。在对角线方差阈值的设定上,结合超高层建筑结构物理摆幅特性[26],由于大楼在风载下水平摆幅较大而轴向形变极小,本文对水平方向施加较宽松的容差,而对高程方向施加紧缩的容差。

绝对拓扑约束雅可比矩阵$\boldsymbol{H}_{\mathrm{abs}}$的计算式为:

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{abs}} = \frac{\partial \delta \boldsymbol{r}_{\mathrm{ref}}}{\partial \boldsymbol{x}} = [\, \boldsymbol{I} \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \,] \tag{13}$$

式中,0为零矩阵。

由于超高层建筑各立面的液压爬模钢平台是相互独立的爬升单元,为限制受扰节点的局部相对发散,将约束节点p与节点q的相对位移增量保持同步,相对保形虚拟量测方程的表达式为:

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel}} = \delta \boldsymbol{r}_p - \delta \boldsymbol{r}_q \tag{14}$$

式中,$\delta \boldsymbol{r}_p$、$\delta \boldsymbol{r}_q$分别为节点p、q的三维位置改正向量;$\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel}}$为相对拓扑约束噪声向量,$\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel}} \sim N(0, \boldsymbol{R}_{\mathrm{rel}})$,$\boldsymbol{R}_{\mathrm{rel}}$为相对拓扑约束协方差矩阵。

对应的几何矩阵$\boldsymbol{H}_{\mathrm{rel}}$呈现差分拓扑结构,其计算式为:

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{rel}} = [\, \cdots \quad \boldsymbol{I}_3 \quad \cdots \quad -\boldsymbol{I}_3 \quad \cdots \,] \tag{15}$$

式中,$\boldsymbol{I}_3$为3×3单位矩阵。

针对相对拓扑约束,本文遵循爬模结构设计规范与多面独立爬升的物理形变边界,对$\boldsymbol{R}_{\mathrm{rel}}$的对角方差阈值进行严格设置。

1)强刚性约束。对于布设在同一个独立模块内的节点集合,由于其通过重型钢桁架焊接固结,在物理上构成一个整体刚体,刚性模块内部的局部相对变形(如竖向挠度)被严格限制在5 mm以内[27]。因此,本文将其相对形变容差设为水平1 cm与高程5 mm。

2)弱刚性约束。由于大楼各立面的爬模模块是相互分离且独立运行的,在风载和日照非均匀作用下,主体结构会带动不同立面产生不对称的位移与扭转,超高层施工平台在风载下迎风面与侧/背风面的位移差异显著[26]。为防止全局强刚性约束掩盖真实的模块间相对运动特征,本文对跨立面节点的相对形变容差进行适当放宽,设为水平4 cm与高程2 cm,从而在保障全局滤波稳定性的同时,保留了各独立模块真实的形变冗余度。

将上述绝对与相对物理约束拼接,构成总体虚拟拓扑雅可比矩阵$\boldsymbol{H}_{\mathrm{virt}} = [\, \boldsymbol{H}_{\mathrm{abs}}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{H}_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{T}} \,]^{\mathrm{T}}$与虚拟量测噪声阵$\boldsymbol{R}_{\mathrm{virt}} = \mathrm{blkdiag}(\boldsymbol{R}_{\mathrm{abs}}, \boldsymbol{R}_{\mathrm{rel}})$。最终,对GNSS量测系统进行矩阵增广,增广后的雅可比矩阵$\boldsymbol{H}_{\mathrm{aug}}$与量测噪声阵$\boldsymbol{R}_{\mathrm{aug}}$的计算式分别为:

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{aug}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_{\mathrm{GNSS}} \\ \boldsymbol{H}_{\mathrm{virt}} \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{aug}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{\mathrm{robust}} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{R}_{\mathrm{virt}} \end{bmatrix} \tag{17}$$

由于$\boldsymbol{H}_{\mathrm{virt}}$仅对状态向量中的坐标分量$\delta \boldsymbol{r}_n$产生偏导,而对$Z_{\mathrm{shared}}$的偏导为0,打破了原有的参数共线性。当局部节点受到多径冲击时,$\boldsymbol{R}_{\mathrm{aug}}$中强弱刚性约束会将其坐标牵制在物理容许的形变域内。在阵列GNSS的冗余机制下,滤波器无法再通过篡改Z_{shared}来平滑测量残差,从而迫使残余大气参数仅能响应真实的大气厚度变化,实现了结构动态形变与残余ZTD的高精度脱耦提取。

2 实验分析与验证

2.1 实验场景与受限空间特征分析

本文实验数据依托天津市某在建超高层建筑项目,当前实测监测高程约265 m。为构建短基线大高差阵列协同解算架构,GNSS基准站位于周边开阔的低矮建筑物顶部,以保障静态参考基准的绝对稳定性与天空视图的完整性。流动站监测阵列在大楼的液压爬模系统进行外围布设,包含监测节点3、4、6、7号。为充分验证算法在遮挡与多径环境下的解耦性能,本文截取北京时间2025-09-17 0时至2时的1 Hz采样频率的连续观测数据作为核心实验样本,该时段大楼无施工作业,且无明显环境载荷扰动,爬模结构在宏观物理层面上处于准静止状态,实验部署方案如图2所示。

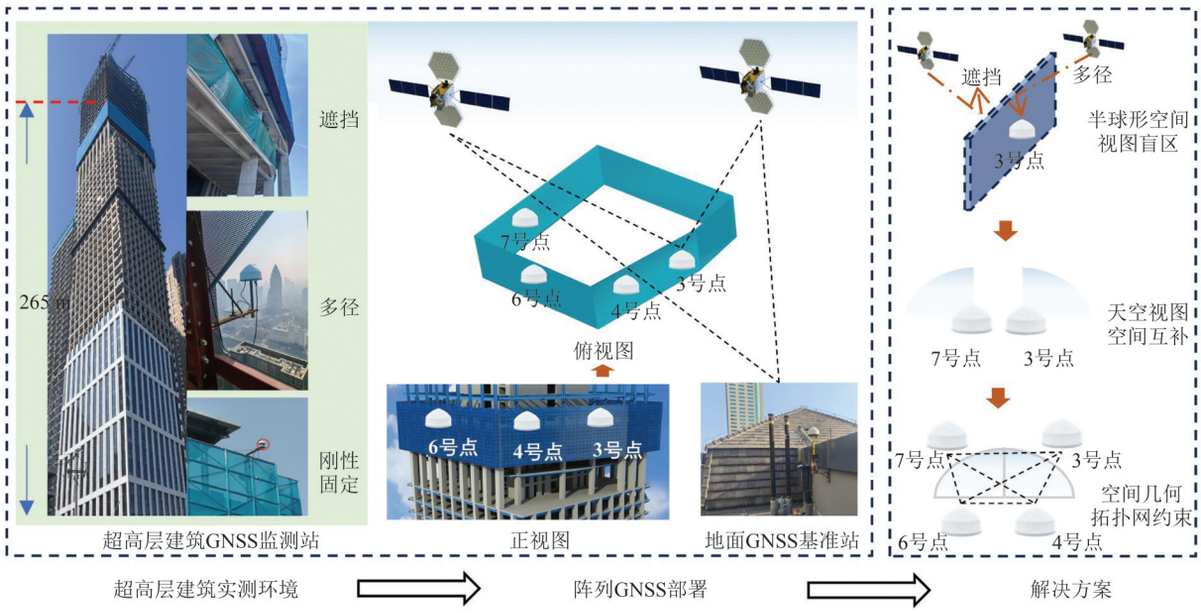


图 2　实验综合部署方案

Fig. 2　Comprehensive Deployment Scheme of the Experiment

受核心筒遮挡的直接影响,单节点天线呈现出严重的视图盲区。以 3 号和 7 号节点天线星空图为例,天线 3 的有效观测卫星集中分布于 240°～60°方位角(顺时针旋转)的范围内,而天线 7 完美捕获 60°～240°方位角(顺时针旋转)内的卫星信号。两者在空间方位角上形成的天空视图空间互补图如图 3 所示。

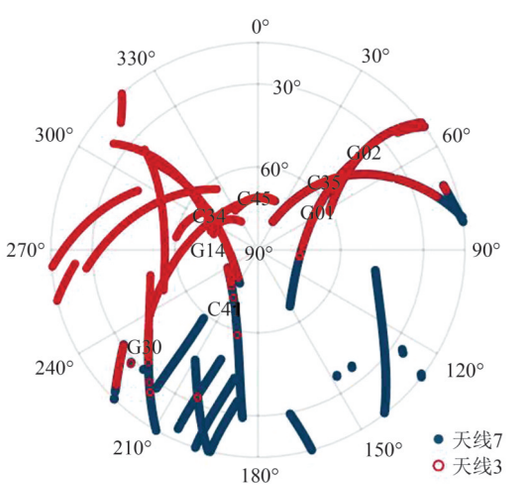


图 3　天线 3 和天线 7 的天空视图空间互补图

Fig. 3　Spatial Complementary Characteristics of SkyViews for Antenna 3 and Antenna 7

卫星数对比图如图 4 所示,在复杂遮挡且高度角大于等于 15°的情况下,3、4、6、7 号天线各自的独立有效可见卫星数剧烈波动,导致解算结果发生频繁断裂。相较于单节点独立解算,阵列联合将分散的残缺视野进行拼合,其全局可用卫星数稳定保持在 20 颗以上,证明受限空间下阵列协同的必要性。

除了视野受限,施工设备也对观测质量有影响,为进一步识别阵列各节点中受扰较明显的典型卫星,本文提取了阵列内各节点典型受扰卫星的 SNR 与高度角时序变化。为便于区分不同卫星,本文采用伪随机噪声码编号(pseudo random noise,PRN)作为卫星标识(PRN 141、134、17、145),阵列 GNSS 天线卫星高度角和 SNR 间的关系如图 5 所示。可以看出,各卫星的高度角始终保持在 40°～80°的观测区间内,但受铝制护栏和吊机械臂影响,高仰角卫星的 SNR 发生了衰减。

综上实测数据分析可知,超高层爬模环境下的多径干扰具有极强的隐蔽性与突发性。若继续沿用传统的单一高度角定权模型,将丧失对高仰角劣质信号的隔离能力,致使严重的多径残差渗透至 EKF 状态域,最终引发参数估计的整体发散。

2.2　复杂多径下的多维特征降权有效性验证

阵列节点所处的超高层爬模环境极其复杂,多径干涉现象严重。基于图 5 中识别出的典型受扰卫星,为进一步验证其 SNR 异常是否与多径干扰有关,本文采用无几何的伪距-载波组合载波减码(code minus carrier,CMC)提取纯净的非差多径误差,以量化阵列节点的基带信号畸变程度,其结果如图 6 所示。

图 6 展示了同一观测时段内 4 个不同位置的天线节点及各自对应的受扰卫星的伪距多径时间序列。上述卫星为各天线节点中选取的典型代表卫星,由于不同天线节点周围遮挡和反射条

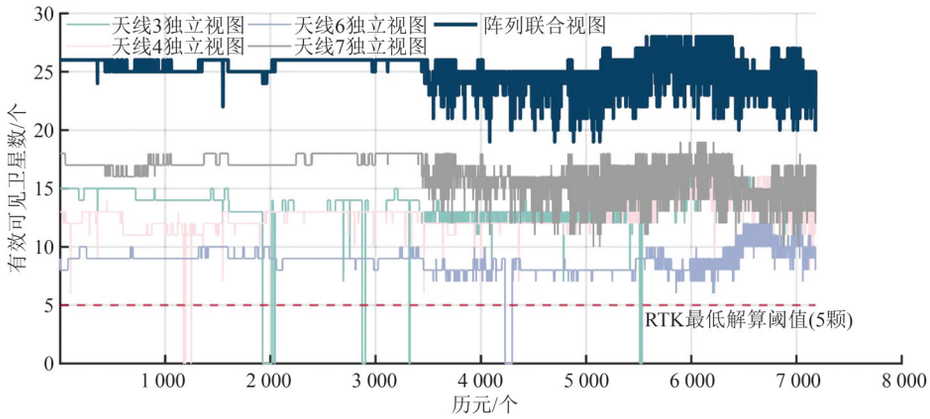


图4 单节点和阵列可见卫星数对比图

Fig. 4 Comparison of Visible Satellite Number Between Single Node and the Array Union

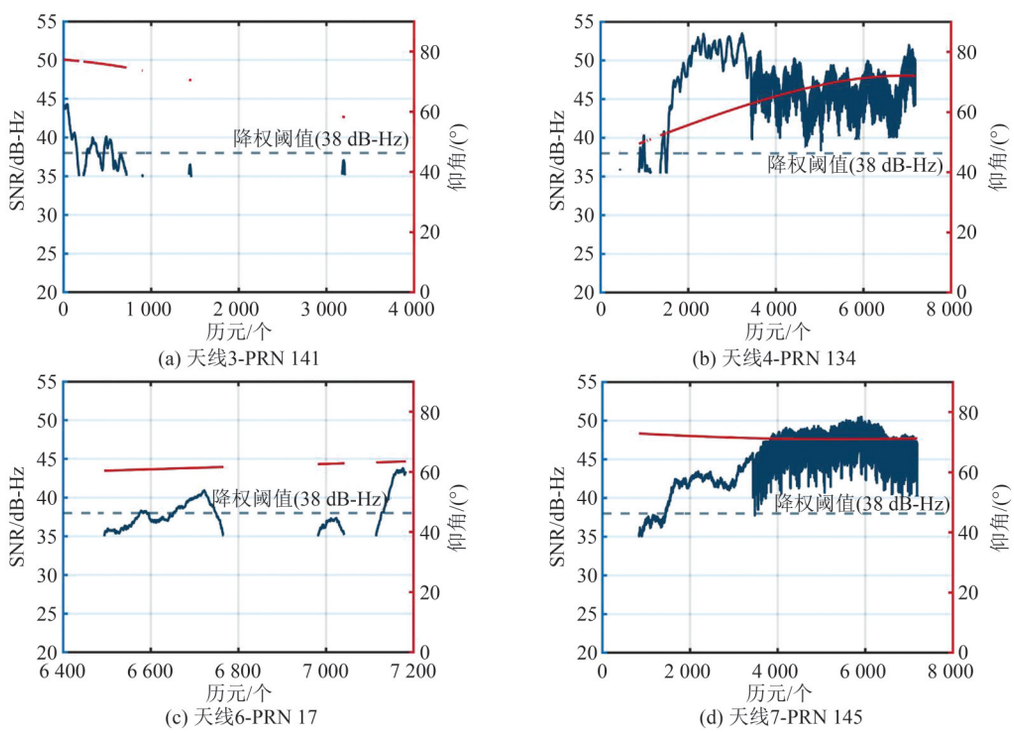


图5 阵列GNSS天线卫星高度角和SNR间的关系

Fig. 5 Relationship Between Satellite Elevation Angles and SNR for Array GNSS Antennas

件存在差异,各节点的代表卫星受多径影响并不完全一致。定量统计分析表明,受密集的重型钢结构反射影响,多径效应呈现出极其强烈的阵列空间异构性与非高斯突变特征。例如,天线3的PRN 141卫星与天线4的PRN 134卫星的多径最大绝对误差分别高达14.87 m和13.25 m,峰谷差值分别达到了17.26 m与15.90 m。从误差的全局能量来看,受扰最严重的天线4其多径均方根(root mean square,RMS)高达6.95 m,即使是受遮挡较轻的天线7的PRN 145卫星,其RMS也达到4.05 m,若不加干预,将严重污染EKF的量测更新环节。

在图6验证典型卫星存在明显CMC多径异常的基础上,本节进一步对4颗典型受扰卫星进行多维环境特征定权模型的有效性分析。本文定权模型与传统的高度角定权相比,观测标准差对比如图7所示。可以看出,通过引入SNR惩罚因子和新息惩罚因子,本文模型能够针对单颗卫星的观测质量变化进行自适应定权。在常态平稳观测历元,本文模型与传统高度角定权模型保持相近的定权特性;当某颗卫星出现SNR衰减或新息残差突变时,模型会自动增大该卫星观测标准差,从而实现单星级动态降权。结果表明,在典型受扰卫星异常观测历元,本文模型可将对应观测噪声标准差自适应放大1.8~2.0倍,从而降低异常观测在滤波更新中的权重,实现对受多径

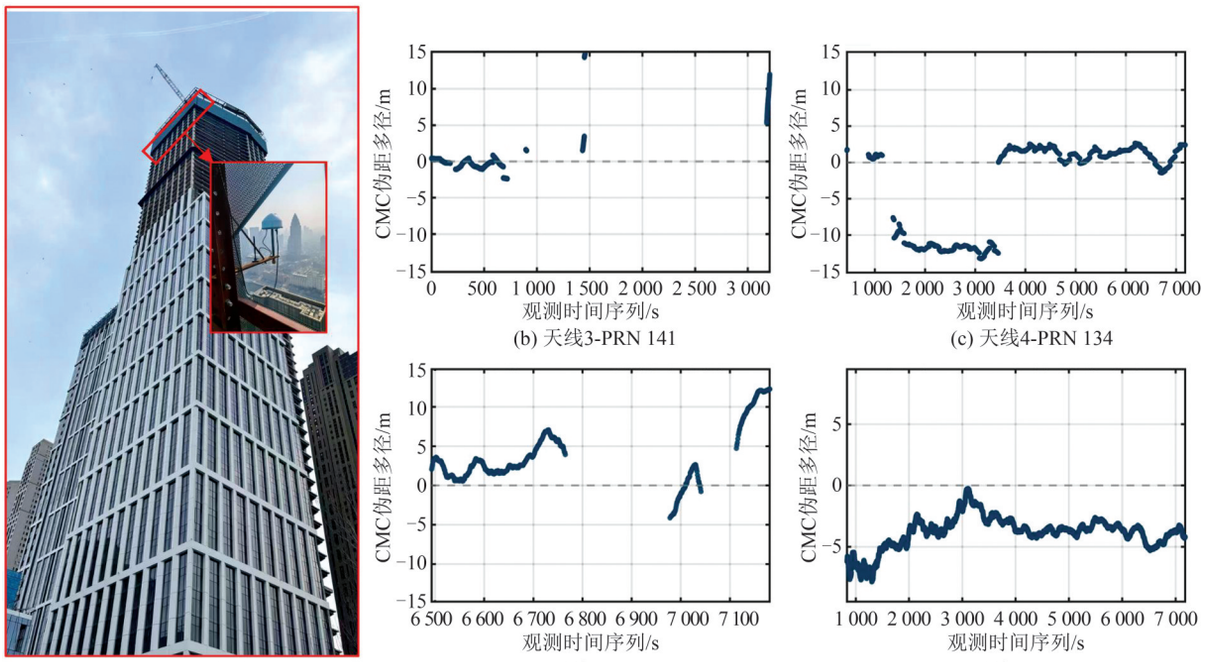


图 6　复杂钢结构下的阵列GNSS天线的CMC图

Fig. 6　CMC Diagram of Array GNSS Antennas Under Complex Steel Structure

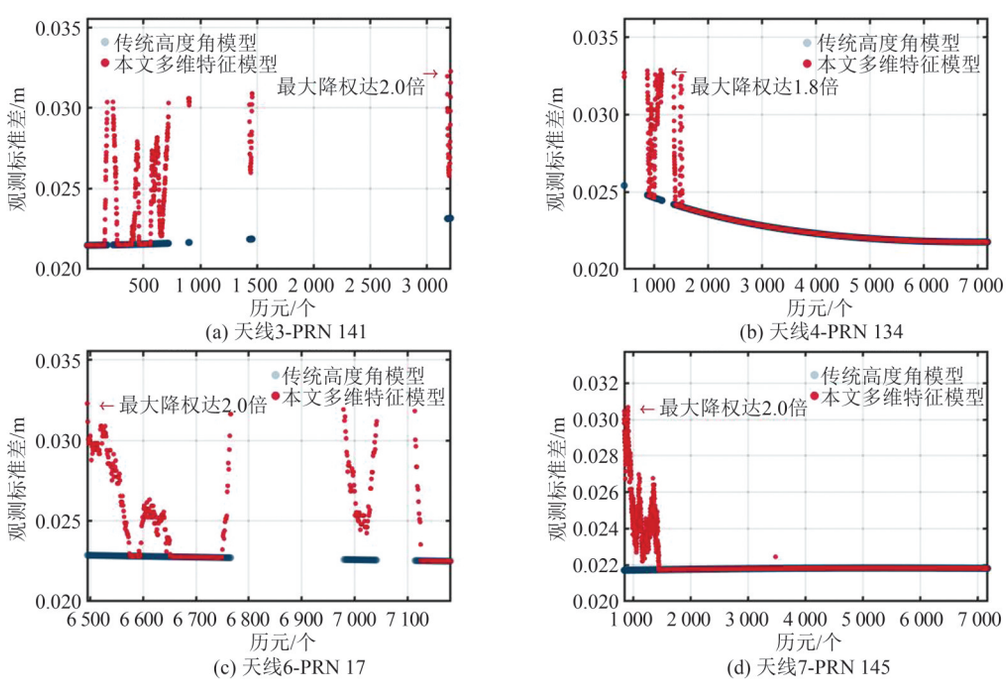


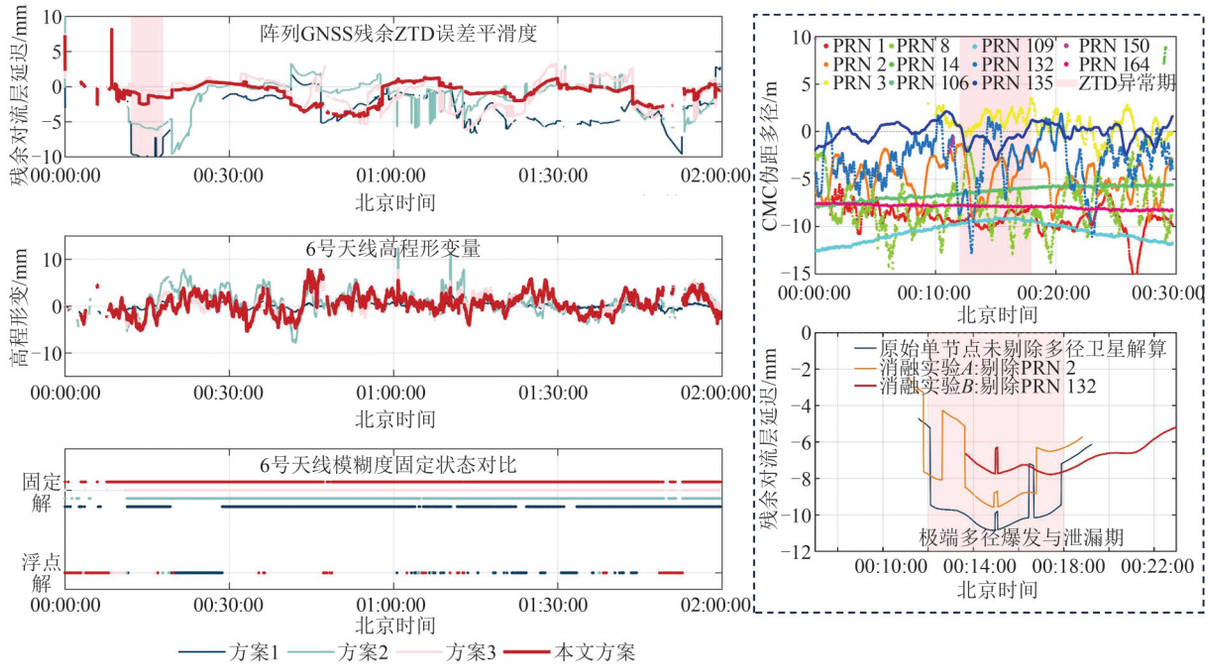
图 7　多维特征定权模型自适应响应对比图

Fig. 7　Comparison of Adaptive Responses for the Multi-dimensional Feature Weighting Model

污染观测的动态降权,避免隐蔽多径误差进一步向状态参数传播。

2.3　阵列刚柔拓扑与ZTD绝对脱耦机理验证

在超高层大高差动态解算中,观测方程的垂直坐标分量与对流层投影函数存在极强的近似线性相关性。为验证本文构建的大高差阵列GNSS异构拓扑约束与协同解耦模型,本节以6号天线为评估对象,进行四天线阵列的消融对比实验。对比实验方案包括:6号单节点无约束(方案1)、4、6号双节点线状约束(方案2)、3、4、6号三节点面状约束(方案3),以及3、4、6、7号四天线阵列异构刚柔约束(本文方案)。6号天线通过各方案估计的残余ZTD、垂直高程形变及模糊度连续固定率[28]的对比时序如图8所示,定量指标如表1所示。



(a) ZTD脱耦与高程形变精度对比 (b) 大高差单节点对流层残差的多径泄漏消融对比

图8 阵列ZTD协同脱耦效果与多径泄漏机理验证

Fig. 8 Verification of Array ZTD Collaborative Decoupling Effectiveness and Multipath Leakage Mechanism

表1 多拓扑构型消融实验残余ZTD标准差与模糊度固定率

Table 1 Residual ZTD Standard Errors and Ambiguity Fix Rates in Ablation Experiments with Multiple Topological Configurations

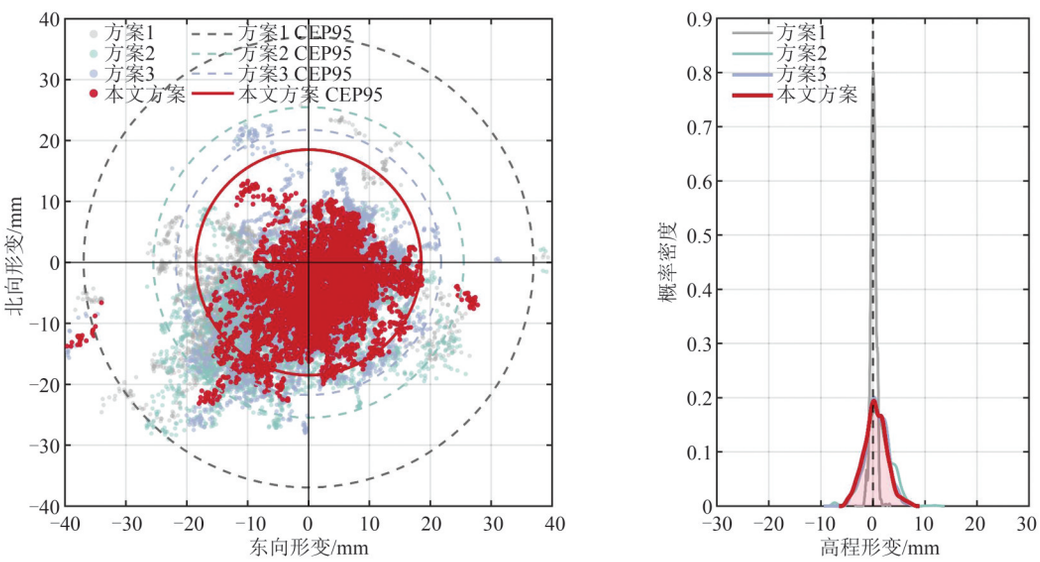
方案	模糊度固定率/%	残余ZTD标准差/(mm·s^{-1})
1	75.52	0.320
2	87.80	0.297
3	86.69	0.223
本文	89.54	0.179

由图8(a)可知,单节点独立解算由于缺失阵列空间的几何冗余约束,系统抗差能力较弱,且GNSS观测方程中垂直高程分量与对流层投影函数之间存在强共线性。本文通过对图8(a)中残余ZTD估计量在T00:12:00—00:18:00的异常跳变进行了多径溯源分析。如图8(b)上图所示,该时段处于PRN 132卫星多径爆发期,CMC降至−12 m,且多径序列存在复杂的高频振荡过程。如图8(b)下图所示,当在观测方程中强制剔除受扰卫星PRN 132后,残余ZTD变得更加平稳。为了排除单一卫星的偶然性,本文对另一颗存在剧烈多径跳变的PRN 2卫星也进行了剔除实验,同样观察到了残余ZTD激变现象得到缓解。实验表明,在遭遇隐蔽多径干扰时,单节点EKF滤波器为最小化量测残差,会将未模型化的高频多径误差泄漏给具有相同垂直投影特性的ZTD参数。但是即便剔除了多径受扰卫星,单节点ZTD序列的波动性仍显著高于本文阵列解算方案。

由表1可知,单节点残余ZTD序列呈现出剧烈的非物理跳变,其历元间平滑度标准差高达0.320 mm/s,违背了残余大气延迟低频缓变的物理特征。随着阵列协同机制与物理拓扑约束的引入,多径误差向大气的渗透被阻断,本文方案在四天线的协同观测约束下,残余ZTD标准差收敛至0.179 mm/s。相较于方案1(单节点)、方案2(线状约束)和方案3(面状约束),本文模型的平滑度分别提升了44.06%、39.73%和19.73%。在垂直形变提取方面,6号节点高程轨迹在物理刚度边界的约束下,打破了单点独立解算的过拟合假象,能够敏锐地保留高频波动细节。在系统可用性方面,相比于单节点频繁陷入浮点解,本文四天线阵列在极其恶劣的环境下展现出了极强的抗差韧性,其模糊度固定率稳定在89.54%的高水平,相较于方案1(75.52%)、方案2(87.80%)和方案3(86.69%),分别提高了14.02%、1.74%和2.85%。这表明阵列冗余观测和拓扑约束能够有效削弱高程参数与残余ZTD参数之间的耦合关系,抑制局部多径误差向残余ZTD参数的泄漏,使ZTD估计更符合大气延迟低频缓变的物理特征。同时,参数耦合的减弱改善了浮点解质量和法方程稳定性,从而有利于提高模糊度固定的可靠性。

2.4　复杂环境下结构三维形变特征提取

在§2.3证实本文算法能够有效隔离受限空间高频多径并实现残余大气参数绝对脱耦的基础上,本节进一步对系统的最终定位精度进行定量评估。获取四天线阵列固定解数据,计算各方案在三维方向的精度,其二维平面形变散点及95%误差概率圆[29](95% circular error probable, CEP95)分布如图9(a)所示,高程方向形变的概率密度函数(probability density functions,PDF)如图9(b)所示,综合定量统计指标如表2所示,其中表2中方案1的高程RMS呈现极低值0.56 mm,是由于多径误差严重泄漏至ZTD参数所引发的滤波过拟合假象,并未反映真实的静态测距精度,具体机理详见本文§2.3剖析。



(a) 二维平面形变轨迹与CEP95边界对比　　(b) 高程方向形变PDF对比

图9　三维动态形变量图

Fig. 9　Three-Dimensional Dynamic Deformations

表 2　监测节点6顾及结构刚度的受限空间三维形变精度综合对比表

Table 2　Comprehensive Comparison of Three-Dimensional Deformation Accuracy for Monitoring Node 6 Considering Structural Rigidity in Confined Spaces

方案	一维高程精度/mm		二维平面精度/mm	
	RMS	最大极限误差	RMS	CEP95半径
1	0.56	3.33	18.48	36.93
2	2.73	12.52	15.07	25.48
3	2.21	8.27	11.96	21.76
本文	2.26	7.79	10.49	18.51

由图9(a)的二维平面形变散点分布及表2统计结果可知,在传统单节点独立解算中,由于缺乏空间冗余观测的制约,状态估计受到严重污染,其动态水平位移的CEP95半径高达36.93 mm,二维RMS达到了18.48 mm。当引入本文构建的大高差阵列异构拓扑模型后,随着约束维度的提升,多径诱导的虚假漂移逐渐减小。本文四天线阵列的约束下,CEP95误差边界收缩至18.51 mm,相较于单节点、线状约束和面状约束,其半径分别显著缩减了约49.88%、27.35%和14.94%;同时,二维RMS减小至10.49 mm,较单点解算提升了约43.24%。

高程方向会受残余ZTD的影响。结合表2的统计数据与图9(b)的高程概率密度分布可知,单节点解算呈现出0.56 mm的极低高程RMS值。然而,由图9(b)可见,其概率密度分布呈现出极其尖锐且反常的峰态。这是在列秩亏状态下,系统以牺牲参数发散为代价,强行吸收高程残差造成的过拟合。在应用阵列异构刚柔拓扑机制后,系统从数学底层实现了参数脱耦。监测节点6在线状约束下的高程最大误差为12.52 mm,高程RMS为2.73 mm,而在本文四天线阵列的约束下,高程最大误差降低至7.79 mm,高程RMS降低至2.26 mm,降幅分别为37.78%和17.22%。这证明本文算法成功滤除了复杂环境噪声,实现了大高差残余ZTD解耦后的三维结构动态形变提取,能反映超高层大楼在静风期稳定的低频微震形态。

3　结　语

超高层建筑施工环境复杂,受限空间特征突

出,长周期结构健康监测难度较大。爬模系统能够随建筑施工进度同步爬升,为GNSS连续监测提供了稳定的平台。但是存在严重的金属护栏镜面全反射与结构半盲区遮挡和数百米大高差带来的ZTD残余误差,易引发传统GNSS动态解算发散。针对测绘与建筑结构健康监测交叉领域的痛点问题,本文提出了一种大高差阵列GNSS拓扑约束解耦的形变动态提取模型。主要研究结论如下:

1)揭示了受限空间隐蔽多径的物理特征,实现了高频畸变信号的瞬时前端隔离。针对在超高层爬模受限空间,传统单一高度角随机模型难以隔离大高度角的多径干扰。本文构建了复杂受限空间下阵列GNSS抗差观测模型,通过增加SNR惩罚因子和新息惩罚因子,实现了对隐蔽畸变信号的瞬时隔离。能够将原本使用高度角未隔离的劣质信号标准差自适应放大1.8~2.0倍,避免了未模型化的多径误差渗透至量测更新环节。

2)突破了法方程列秩亏的数学局限,实现了大高差ZTD脱耦与系统可用性的提升。针对大高差环境下垂直坐标分量与残余ZTD因投影函数近似线性相关而引发的恶性耦合灾难,本文通过构建顾及结构物理刚度的异构拓扑增广约束模型,突破了观测域的几何局限,打破了单节点独立解算中牺牲大气参数换取高程的过拟合假象,实现了共享残余ZTD参数的解耦。在本文四天线阵列协同下,残余ZTD的历元间跳变标准差下降至0.179 mm/s,较单节点独立解算平滑度提升44.06%,完美符合残余大气低频缓变的物理特征。在固定率方面,本文四天线阵列协同解算的固定率依然稳定在89.54%,较独立解算跃升14.02%,验证了本文算法在受限空间动态监测中兼具参数高保真度与极高的工程可靠性。

3)消除了受限空间多径诱导的系统性伪漂移,实现了大楼三维形变特征的提取。在二维平面,四天线阵列协同约束下的动态水平位移CEP95半径缩小至18.51 mm,较单节点独立解算显著缩减了49.88%,二维RMS减小至10.49 mm,较单节点独立解算精度提升43.24%。在垂直高程方向,彻底剥离单节点过拟合假象后,本文四天线阵列约束下的高程最大极限误差较线状拓扑约束进一步降低了37.78%,高程RMS降低17.22%。本文模型成功滤除了复杂施工环境下的强观测噪声,为大型复杂工程的长周期动态安全监测提供了稳定的算法引擎。

在后续研究中,将考虑在现有阵列拓扑架构的基础上,引入变分模态分解与时间卷积网络等深度学习时序预测模型,对超高层结构的高频振动特征与低频风偏趋势进行多尺度特征提取与深度挖掘,从而构建端到端的结构动态形变预测框架。

参 考 文 献

[1] 陈珂, 丁烈云. 我国智能建造关键领域技术发展的战略思考[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 64-70.
CHEN Ke, DING Lieyun. Development of Key Domain-Relevant Technologies for Smart Construction in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(4): 64-70.

[2] MENG X L, NGUYEN D T, XIE Y L, et al. Design and Implementation of a New System for Large Bridge Monitoring-GeoSHM[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 775.

[3] 王坚, 于亦龙, 柳根, 等. 超高层建筑变形GNSS多源融合监测方法及进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(6): 1065-1076.
WANG Jian, YU Yilong, LIU Gen, et al. Method and Progress for GNSS Multi-source Fusion Deformation Monitoring in Super-Tall Buildings[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(6): 1065-1076.

[4] ZHANG Z T, YUAN H J, HE X F, et al. Best Integer Equivariant Estimation with Quality Control in GNSS RTK for Canyon Environments[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(4): 4105-4117.

[5] XI R J, MENG X L, JIANG W P, et al. A Refined SNR Based Stochastic Model to Reduce Site-Dependent Effects[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 493.

[6] ZHANG Z T, LI B F, SHEN Y Z, et al. Site-Specific Unmodeled Error Mitigation for GNSS Positioning in Urban Environments Using a Real-Time Adaptive Weighting Model[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1157.

[7] 王颖, 舒海翅, 唐卫明. GNSS形变监测静态基线网中多基线联合解算两步法[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(1): 67-71.
WANG Ying, SHU Haichi, TANG Weiming. Two-Step Method of GNSS Static Baseline Network Solution for Deformation Monitoring[J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(1): 67-71.

[8] DAI W J, LI X, YU W K, et al. Multi-antenna Global Navigation Satellite System/Inertial Measurement Unit Tight Integration for Measuring Displacement and Vibration in Structural Health Monitoring

[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(6): 1072.

[9] CHEN Y, ZHOU X Y, HU X W, et al. Optimized GNSS Tropospheric Delay Model for High-Precision Dam Deformation Monitoring in Large Height Difference Environments [J]. *Array*, 2025, 28: 100600.

[10] LIU G L, HUANG G W, LI X, et al. Fusion of Numerical Meteorological Data to Mitigate Residual Tropospheric Error in GNSS RTK for Large Bridge Monitoring in Mountainous Areas [J]. *Measurement*, 2025, 243: 116442.

[11] LI X, HUANG G W, ZHANG Q, et al. A New GPS/BDS Tropospheric Delay Resolution Approach for Monitoring Deformation in Super High-Rise Buildings [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 90.

[12] ZHANG L, ZHANG Q, YAO Y B, et al. Refining Empirical Tropospheric Model with Meteorological Stations for Large Height Difference RTK Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(3): 138.

[13] WANG Z T, SONG S L, JIAO W H, et al. A Unified PDOP Evaluation Method for Multi-GNSS with Optimization Grid Model and Temporal-Spatial Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 36.

[14] ZHANG C L, DONG D N, KUBO N, et al. Evaluation of Different Constrained LAMBDAs for Low-Cost GNSS Attitude Determination in an Urban Environment [J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 42.

[15] WANG P F, LIU G, WANG J, et al. Monitoring Method and Performance Analysis of Climbing Scaffolds in Super High-Rise Buildings Based on BeiDou/GNSS Technology [J]. *Buildings*, 2025, 15(6): 964.

[16] TEUNISSEN P J G, MONTENBRUCK O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems [M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 633-636.

[17] STRODE P R R, GROVES P D. GNSS Multipath Detection Using Three-Frequency Signal-to-Noise Measurements [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 399-412.

[18] KUUSNIEMI H, LACHAPELLE G, TAKALA J H. Position and Velocity Reliability Testing in Degraded GPS Signal Environments [J]. *GPS Solutions*, 2004, 8(4): 226-237.

[19] BHAMIDIPATI S, KOUSIK S, GAO G. Set-Valued Shadow Matching Using Zonotopes for 3D-Map-Aided GNSS Localization [J]. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 2022, 69(4): 547.

[20] CHEN Y, LU R, ZHOU X Y, et al. A Refined Multipath Correction Model for High-Precision GNSS Deformation Monitoring[J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(15): 2694.

[21] JI S Y, PENG Q X, XU Y, et al. Novel Real-Time Detection Method of Cycle Slips Using Ultra-High Rate GNSS Observations in Urban Environments[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2025, 275: 106600.

[22] FENG P, LI F, YAN J G, et al. Assessment of the Accuracy of the Saastamoinen Model and VMF1/VMF3 Mapping Functions with Respect to Ray-Tracing from Radiosonde Data in the Framework of GNSS Meteorology [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(20): 3337.

[23] LI L H, ZHANG H X, YUAN Y B, et al. On the Real-Time Tropospheric Delay Estimates Using Low-Cost GNSS Receivers and Antennas[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(3): 119.

[24] CHEN X Y, MI X L, YUAN Y B, et al. Array-Aided GNSS for Precise Determination of Ionospheric and Tropospheric Delays with Integer Ambiguity Resolution [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 5801514.

[25] WANG D P, ZHANG H. A Multi-step Pseudo-Measurement Adaptive Kalman Filter Based on Filtering Performance Evaluation and Its Application in the INS/GNSS Navigation System [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(5): 926.

[26] FANG T C, GONG J, DONG X, et al. Aerodynamic Characteristics and Structural Effects of Suspending Scaffolds for Super High-Rise Building Construction [J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 107: 112718.

[27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 整体爬升钢平台模架技术标准: JGJ 459—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Standard for Self-Climbing Integrated Scaffolding and Formwork Equipment with Steel Platform: JGJ 459—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

[28] GENG J H, WEN Q, ZHANG Q Y, et al. GNSS Observable-Specific Phase Biases for All-Frequency PPP Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(2): 11.

[29] ZHANG T S, ZHOU L, FENG X, et al. INS-Aided GNSS Pseudo-Range Error Prediction Using Machine Learning for Urban Vehicle Navigation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(6): 9135-9147.