

工程测量工作中 GNSS-RTK 技术实践探究

王双峰

(沧州测绘院有限公司, 河北 沧州 061000)

【摘要】随着 GNSS-RTK 技术的不断发展, 其精确度和可靠性在工程测量领域得到广泛认可。本文旨在概述 GNSS-RTK 技术的基本原理、系统构成及功能, 并深入探讨其在工程测量中的具体应用, 包括技术部署、数据采集与处理流程以及实际工程案例分析。同时, 本文对多路径效应、信号遮挡以及系统误差的识别与校正等关键问题提出解决策略。通过对前述方面的综合研究, 旨在提高 GNSS-RTK 技术在工程测量中的应用效率和准确性。

【关键词】GNSS-RTK 技术; 工程测量; 多路径效应; 信号遮挡; 系统误差

一、引言

伴随全球导航卫星系统 (GNSS) 与实时动态差分技术 (RTK) 的融合, GNSS-RTK 为工程测量带来了创新的转变。作为一种高精度且高效的定位方法, 它支撑起现代工程测量的核心, 无论是在基础设施建设, 土地资源管理还是灾害监测中均显示出其巨大潜力。

二、GNSS-RTK 技术概述

(一) GNSS-RTK 基本原理

GNSS-RTK 技术以其在工程测量中的高精度和实时性备受青睐, 实践中不断表现出对测绘领域的深远影响。RTK 即实时动态差分定位技术 (Real-Time Kinematic), 它是基于全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 进行实时差分运算以达到厘米级精度的一种技术手段, 逐渐成为现代测量学科的核心。

该技术涉及到传播延迟估计问题, 主要利用 L1 和 L2 两个频率的载波相位信息进行解算。RTK 系统利用一台或多台固定站接收卫星信号, 并且几乎瞬时计算出与载波相位间的误差, 这一过程形成了实时差分 (Real-Time Differential, RTD) 数据流。流动站则接收此数据流, 并将实时差分数据应用于自身的卫星信号解算中, 以消除或减少离子层延迟、对流层延迟、卫星轨道误差、卫星钟差等因素所造成的影响。

(二) GNSS 系统的组成与功能

全球导航卫星系统 (GNSS) 作为区域或全球覆盖的卫星导航系统, 允许小型电子接收机确定在地球任何地方的位置 (纬度、经度和高度)。GNSS 系统的关键组成部分和功能交织成一张精密的网络, 旨在提供无缝、连贯且高精度的定位服务。

此类系统的架构必须包括空间段、控制段和用户

段三大关键模块, 它们共同实现了广泛的卫星导航和定位任务。空间段由轨道上的卫星构成, 并根据特定的星座部署方案分布在预定轨迹上, 它们持续发射带有时间信息的信号。控制段主要由地面站组成, 负责监视和管理卫星的健康状况、控制卫星轨道及调整卫星时钟, 确保空间段正常运行。用户段则涵盖了接收器和相应的数据处理设备, 以获取空间段传输来的信号并转换为定位信息。

在空间段, 现代 GNSS 系统往往不局限于单一的全球性系统, 而是通过多系统混合星座的方式来增强覆盖范围与定位的准确度。例如, GPS、GLONASS、Galileo 及北斗等系统之间可以相互补充, 降低单一系统可能的服务中断风险, 从而提供更可靠的服务。

功能方面, GNSS 的应用域涵盖精密测量、位置跟踪、导航、时间传递等。其中, 在工程测量的具体实践中, GNSS 技术不仅可以实现测点的快速定位, 还能提供连续、实时的监测数据, 对于建筑工程布线、大型基础设施建设和地理信息系统更新等均有不可替代的重要性。

三、工程测量中 GNSS-RTK 技术的应用

(一) 工程测量场景中的技术部署

工程测量领域的进展与种种技术创新息息相关, 其中 GNSS-RTK 技术以其高效、精确的特点, 每个工程场景都有其特定需求, 这些需求定义了 GNSS-RTK 系统设置的初衷。在广阔开阔地区, 如大型基础设施建设现场, 空间段信号获取通常不受限制, 此时重点放在通过合理布站确保足够的卫星覆盖, 从而获得数据的连续性与可靠性。相应的流动站设备需承担起实时移动测量的任务, 赋予测量成果以毫秒级的即时性。

例如, 在进行桥梁施工或道路铺设时, 精确控制

测量网的布局和流动站的轨迹对于成功解算 RTK 整周模糊度至关重要^[1]。解算速度与精度直接影响到后续工程活动的安排与结构件的精准安装。与此同时，测量团队需具备敏锐的现场观察能力，以识别并减少潜在会造成信号遮挡和多路径效应的环境因素，保障测量数据的准确性和完整性。

在城市环境中，建设项目由于信号干扰复杂，采用 GNSS-RTK 所面临的挑战更为多样。建筑密集和信号反射严重的城市峡谷效应要求高度优化的信号处理策略和硬件选择。针对这一复杂性，恰当地配置控制站及辅助测量手段可以显著提高定位结果的稳定性。

在实际执行中，策划前期的仔细规划同后期技术的灵活适应能力同等重要。具体包括了解并最大限度利用现有地面控制网络资源，评估和采纳最佳的观测策略，以及实施高效的数据后处理工作。不断更新的软硬件和先进算法使得 GNSS-RTK 在工程测量中体现了超凡的性能，而这正是现代测量工程师们力求的目标。

（二）数据采集与处理流程

在 GNSS-RTK 技术的采集阶段，高精度的原始观测数据必须不断地从多颗 GNSS 卫星获取，并同步传输至基站与流动站单元。流动站通过计算自身与卫星和基站之间的相对位置，利用基站提供的差分数据修正由卫星钟差、大气延迟等因素引起的误差，从而加强数据准确度。

处理流程则是对采集到的数据进行详尽分析和解算。这一过程首先涉及对原始数据进行清洗，识别并排除受到干扰或错误的信号，例如由于多径效应或遮挡所引起的异常数据。经过这一步骤，确保了数据的质量，为后续解算提供了坚实基础。

随后，数据处理的核心在于解算流动站相对于基站的精确位置。这需要通过复杂的数学模型和算法来完成整周模糊度的固定。模糊度固定后得到的解通常比单独使用 GPS 更为精确和稳定。这一步骤对于实现厘米级甚至毫米级的测量精度至关重要。

为实现这些目标，现代 GNSS-RTK 系统辅以高级的软件工具，这些工具能够执行从数据存储、检查、处理到最终成果报告的全过程管理。此外，系统的内置智能算法能够识别最佳的卫星信号组合，以优化模糊度解算的结果，同时有助于评估成果的质量控制标准。

（三）实际工程案例分析

在近年来一项规模庞大的基础设施项目中，

GNSS-RTK 技术的实施显现了其前所未有的潜力和优势。该项目涉及新建一段连接两个主要城市的高速公路，测量工作的准确性直接关系到整个工程的成功与否。项目之初，面对复杂地形与严酷的环境条件，工程团队利用 GNSS-RTK 技术在短时间内完成了起止点间 100 多公里区域的精密控制网络构建^[2]。通过布设多个高稳定性的基站，确保了整个项目区域内具备连续且一致的卫星信号覆盖，并为流动站提供了必要的差分信号参考。各个施工点利用得到的高精度坐标数据，无巨大偏差地启动了土木工程作业。

值得特别提及的是，项目中一座设计复杂、跨度极大的桥梁的建造过程。在此过程中，GNSS-RTK 系统扮演了不可或缺的角色。构件安装前，利用 RTK 技术进行实时监测，为施工机械提供了实时导航，确保了各部分的准确对接与安放。此外，工程团队在整个施工期间，对桥梁进行三维实时变形监测，借以评估负载和环境变化对结构的影响，从而为决策者提供关键数据支持。

在另一工程案例中，GNSS-RTK 技术被应用于城市地下管网的更新工程。这一工程背景为高建筑密度和复杂土地利用状况，使得传统测量方法变得效率低下且成本高昂。RTK 系统的引入，颠覆了传统的工作方式，能够在不影响交通和周边日常活动的情况下，快速获得精确测绘数据。此举不仅提高了作业精确度，还大大加快了工程进度，降低了总体成本。

四、GNSS-RTK 技术实践中的关键问题与解决策略

（一）多路径效应与其影响最小化

在 GNSS-RTK 测量实践中，多路径效应是一个顽固难题，它描述了卫星信号抵达接收器的途中遇到反射或绕射现象，导致非直视 (NLOS) 信号与直视 (LOS) 信号共同被接收器捕捉，进而影响测量结果的情况^[3]。为此，一项有效做法是调整接收器位置以远离可能产生反射的对象，如大型金属物体或高建筑物。在规划测站点时需谨慎考量周边环境，力求确保开阔且清晰的天线视域。

另外，在硬件日渐进步的今日，选择具备高抗多路径能力的 GNSS 设备成为减轻此类效应的有力措施。部分先进型号的接收器配备专门的多路径减缓技术，例如采用合成孔径技术 (CRP) 加强信号处理能力，从而可以在一定程度上识别并抑制非直视信号。并且软件上的处理也不可或缺，现代 RTK 数据处理程序能够识别可能受多径效应影响的数据并进行筛选排除。通过手动或自动识别多路径特征，从时间序列分析中

剔除异常值，能够提升解算后定位数据的稳态性和可靠性。

除了上述硬件和软件措施，实时动态监测系统环境并做出行之有效的预案至关重要。在实际操作过程中，必要时应重新安置接收器或进行定时测量，利用不同时间段卫星配置的变化来规避多路径影响。这要求测量人员具备周密的观察力和灵活多变的应变能力。

（二）信号遮挡与信号整合问题

由于 GNSS 信号需直接从卫星传输到接收器，任何物体的阻挡都可能引起信号丢失，导致定位信息不完整或不可靠。此外，信号的遮挡还可能导致接收器难以解算卫星的精确位置，从而影响最后的测量精度^[4]。在多种环境下，建筑物、树木甚至地形起伏都可能导致信号遮挡问题。为应对此情况，信号整合技术发挥着至关重要的作用。利用多系统 GNSS 整合，例如将 GPS 与 GLONASS、Galileo 或 BeiDou 等其它系统整合使用，能够缓解独立系统可能遭遇的局限性。通过接收多系统信号，能够增大可见卫星数量，提高信号的可靠性，并优化覆盖范围与几何分布。

此外，在重点地区布置辅助基站也能够有效改善局部地区的遮挡问题。这些辅助基站能够提供额外的差分信号，用于强化那些由信号遮挡严重影响的区域。并且先进的 GNSS 数据处理软件具备信号质量监控功能。这些工具可以实时评估授时信号质量，识别并排除受遮挡影响的低质量数据，确保数据整合过程中的质量。

创新性解决策略如机器学习和人工智能在 GNSS 领域也开始被研究。通过对历史数据的分析，建立模型来预测并识别信号遮挡情况，从而允许系统预先调整传感器部署方案，减少信号丢失情况的发生。在自然环境中，信号遮挡的影响可以通过战术性地规划测量时间来降低。例如，在树木落叶期进行作业，或在一天中卫星位置最有利于信号传播的时段进行数据采集。

（三）系统误差的识别与校正

卫星轨道误差和卫星钟差误差一般通过 GNSS 系统提供的精密星历和钟差产品来进行纠正。该数据由全球范围的跟踪站采集，并通过数据处理中心处理后公布。利用这些修正数据可以极大地提升位置解算的准确性。

大气误差，包括电离层和对流层延迟，也可通过模型和改正策略进行校正。例如，在单频测量中，可应用 Klobuchar 模型对电离层延迟进行预测和补偿；而对流层延迟则可利用 Hopfield 或 Saastamoinen 模

型对其进行近似计算。在双频测量中，通过测量两个不同频率上的信号延迟差异，可以直接从观测值中消除电离层影响。

多路径效应的识别和校正常常比较复杂。在现代 GNSS 接收器中，普遍集成了先进的多路径抑制技术，如使用抗多径天线和信号处理算法^[5]。结合场地选择、测站设置和时段规划等实地操作措施，通过增加观测冗余度，还原真实信号，进一步降低多路径效应误差。

接收器噪声主要依赖硬件性能来控制，选择高质量的接收器以提升噪声水平是必要的。处理接收器噪声的一个策略是使用适宜的观测数据平滑和滤波技术，比如卡尔曼滤波和最小二乘估计等。在测量实践中，系统误差的识别通常通过定期收集和分析测量数据来实现。相关的校正参数可以通过软件工具自动提取和应用，有经验的测量师还可以进行手动校正以确保更高的精度。不断积累的测量数据及其分析结果，同时为系统误差模型的优化提供了基础，有助于未来的测量活动更精准地识别和校正误差。

五、结语

构建在精囊空间的全球定位基础之上，GNSS-RTK 技术已成为工程测量不可或缺的工具。不仅如此，随着技术的不断研磨与完善，它的应用范围和深度亦将不断拓展。在此过程中，必须注重对多路径效应、信号遮挡和系统误差等关键问题的持续分析与解决。通过实施有效的策略，最大限度地消除这些因素对测量精度的负面影响，GNSS-RTK 技术将更好地服务于工程测量，促进相关行业的飞速发展。

参考文献：

- [1] 周化龙, 曹戈. 基于 GNSS-RTK 的轮式起重机吊臂旁弯测量系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2023, (07): 82-87.
- [2] 张笑蓉. GNSS-RTK 技术在建筑工程测量中的应用及其对策研究 [J]. 四川建材, 2023, 49 (07): 20-22.
- [3] 付宁波, 钟世彬, 赵忠海. 基于 JXCORS 的 GNSS-RTK 检定方法研究及结果分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46 (05): 149-151+155.
- [4] 王琨. 改进通信网络的 GNSS-RTK 高精度定位系统 [J]. 福建电脑, 2023, 39 (04): 85-89.

作者简介：

姓名：王双峰（1991.12—），性别：男，民族：汉，籍贯：河北省沧州市，学历：本科，职称：中级工程师，研究方向：测绘。