



专题：手机直连卫星通信

低轨通信卫星双向测量差分定位方法

王鑫洋, 赵亚飞, 李锦康, 彭木根

(北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876)

摘要: 在非地面网络中, 依托低轨通信卫星的星地链路、卫星载荷以及地面终端等资源, 实现定位解算, 是实现未来6G通感一体化的重要技术手段之一。在手机直连卫星等场景下, 终端设计上往往只与一颗卫星进行通信, 探索单星定位方法具有十分迫切的意义。针对以往单星连续观测定位精度因子差、时钟同步困难、收敛速度慢等难题, 提出了一种低轨星座场景下的双向测量差分定位方法, 并基于卫星位置精度因子设计了位置更新策略。利用星地链路, 采用单程双向测距方法消除时钟误差, 通过时间累计测量、终端随机切换的方式弥补单星观测的空间缺陷, 优化了终端定位性能。在仿真场景下, 基于SpaceX的卫星轨道参数, 对所提方案进行了验证, 结果表明, 采用随机切换卫星的方法进行测量, 相比于未切换保持单星测量的终端, 定位性能提升近100%; 联合解算多个时刻观测数据, 能够提升精度收敛速度, 减小定位误差, 在180 s的仿真时间内利用512次观测数据, 当终端切换次数为19次时, 最优定位精度可达299.5 m。

关键词: 低轨通信卫星; 双向测量; 单星定位; 随机切换

中图分类号: TN961

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024092

Bidirectional measurement differential positioning method for LEO communication satellites

WANG Xinyang, ZHAO Yafei, LI Jinkang, PENG Mugen

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: In non-terrestrial network, leveraging resources such as satellite-to-earth links, satellite payloads, and ground terminals of low earth orbit (LEO) communication satellites to achieve positioning calculations is one of the important technical means for realizing the integration of sensing and communication in future 6G network. In scenarios such as direct-to-handset satellite, terminal designs were often configured to communicate with only one satellite, making the exploration of single-satellite positioning methods of urgent significance. Addressing the challenges of poor positioning accuracy, difficulty in clock synchronization, and slow convergence speed associated with previous single-satellite continuous observation, a bidirectional measurement differential positioning method was proposed

收稿日期: 2024-03-15; 修回日期: 2024-04-15

基金项目: 北京邮电大学研究生创新创业项目 (No.2024-YC-T001)

Foundation Item: BUPT Innovation and Entrepreneurship Support Program (No.2024-YC-T001)

in the context of low-orbit constellations. Additionally, a position updating strategy based on the satellite position accuracy factor was designed. Utilizing the satellite-to-earth link, the method employed a one-way bidirectional ranging technique to eliminate clock errors and compensated for the spatial deficiency of single-satellite observation through cumulative time measurement and random terminal switching, thereby optimizing terminal positioning performance. The results show that measurement through random satellite switching, compared to terminals that maintain single-satellite measurement without switching, enhances positioning performance by nearly 100%. By jointly solving multiple observation data over time, the accuracy convergence speed can be increased, and positioning error can be reduced. Within a simulation time of 180 s, using 512 observation data, with a terminal switching frequency of 19 times, the optimal positioning accuracy can reach 299.5 m.

Key words: low earth orbit communication satellite, bidirectional measurement, single-satellite positioning, random switching

0 引言

随着人们对应急服务、物联网、自动驾驶等应用需求的增加,如何获取空间信息实现通信、导航定位愈发重要。传统的蜂窝网络、全球定位系统所提供的位置服务,无法克服信号功率弱、多径以及非视距等因素的影响,特别在密集城区、室内场所、森林峡谷等场景中。非地面网络(non-terrestrial network, NTN)成为解决这一问题的有效途径,也是实现6G通感一体化的重要技术手段^[1-3]。低轨卫星具有星座数量大、轨道低、路损小、抗干扰等特点,在通信和导航定位服务中有广阔的应用前景。依托于低轨通信卫星建立的星地链路、卫星载荷以及地面终端等资源,实现定位解算,是实现未来6G的重要技术手段之一^[4-5]。然而,当前卫星通信终端的设计是依靠单星完成相关业务,在此背景下研究单星导航定位方法对发展非地面网络,实现星地融合具有现实性的重要意义^[6-7]。

从第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)发布Release18标准以来,手机直连卫星的NTN定位服务引起广泛关注。然而,其中所涉及的定位技术仍处于早期阶段,并仅限于用户终端的位置验证^[8]。文献[9-10]给出了单颗卫星在导航定位中的一些应用范式,特别是

在无源定位方面。文献[11-12]利用单星多普勒信息的测量进行定位,然而定位精度对多普勒测量精度依赖性大,动态目标精度下降较快。文献[13]利用天线空间稀疏性完成定位估计,所提算法受角度测量误差的影响较大。文献[14]采用组合导航的形式,提出一种消除卫星钟差的方法,但仍无法完全消除。在NTN方面的研究也有很多,目前已有一些NTN定位的研究提出诸多有效的问题解决途径。例如,无人机辅助应急响应人员的NTN定位技术^[15-16],基于铱星低地球轨道(low earth orbit, LEO)星座的分布式多普勒信息的方法^[17-18],采用非线性最小二乘和滤波算法,实现对目标位置和速度的估计,完成搜索和救援服务,还有利用差分载波相位的方式^[19-20],实现高精度的终端定位。尽管这些方法提供了部分有用的见解,但不是单星的服务场景,不具备普适性。因此,对NTN星地融合的场景中的导航定位而言,存在单颗LEO卫星观测的运动轨迹变化不显著、用户定位精度衰减因子(dilution of precision, DOP)异常、性能极差,以及终端测量时间过长导致终端与卫星时钟不同步等诸多问题^[4-5,21]。

本文针对星地通信链路中的单星导航定位过程中,定位精度因子突变、精度低等难题,基于3GPP地面移动通信体制,开展低轨通信卫星的单星双向测量差分定位方法研究,期望通过该研



究, 实现静止通信终端卫星测距信息的获取, 同时克服由终端和卫星时钟误差带来的定位问题, 弥补单星空间分布差的缺陷, 解决单颗LEO卫星连续观测带来卫星精度因子异常的难题。

1 系统模型

本节首先从基于星地通信链路的单程双向终端测距方法出发, 介绍终端获取卫星测距信息的方式, 然后提出基于多个时刻观测数据的差分定位解算方法, 从而构建终端导航定位的系统框架。

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{(T_{\text{UE}}^{\text{S}} + \delta t_{\text{UE}} - T_{\text{LEO}}^{\text{R}} - \delta t_{\text{LEO}}) + (T_{\text{LEO}}^{\text{S}} + \delta t_{\text{LEO}} - T_{\text{UE}}^{\text{R}} - \delta t_{\text{UE}})}{2} \cdot c \\ &= \frac{(T_{\text{UE}}^{\text{S}} - T_{\text{UE}}^{\text{R}}) + (T_{\text{LEO}}^{\text{S}} - T_{\text{LEO}}^{\text{R}})}{2} \cdot c \approx \Delta t \cdot c\end{aligned}\quad (1)$$

其中, δt_{UE} 和 δt_{LEO} 分别为地面终端、LEO卫星与世界标准时之间的钟差, c 为光速, 物理层处理时延 T_p 可以通过系统补偿的方法消除, 最终得到地面终端和LEO卫星的距离测量值 ρ , 消除了钟差所带来的影响。

1.2 差分定位方法

为了进一步提升定位精度, 本节基于多个时刻观测信息对差分定位方法展开介绍。假设第 k 时刻, 第 j 个终端接收机通过到达时间估计得到的卫星伪距测量值为 $\rho_{\text{r,LEO}}^k$, 则地面终端伪距测量模型可表示为:

$$\begin{aligned}\rho_{\text{r,LEO}}^k &= \|\mathbf{r}_{\text{r}}^k(j) - \mathbf{r}_{\text{LEO}}^k(i)\|_2 + c \cdot [\delta t_{\text{r}}^k(j) - \\ &\quad \delta t_{\text{LEO}}^k(i)] + c \cdot \delta t_{\text{trop},i,j}^k + c \cdot \delta t_{\text{iono},i,j}^k + v_{i,j}^k\end{aligned}\quad (2)$$

其中, $\mathbf{r}_{\text{LEO}}^k(i)$ 和 $\mathbf{r}_{\text{r}}^k(j)$ 分别为第 i 颗LEO卫星和第 j 个地面终端在第 k 时刻的位置向量, $\delta t_{\text{iono},i,j}^k$ 和 $\delta t_{\text{trop},i,j}^k$ 分别为第 k 时刻的星地链路传输中的电离层和对流层时延, $k=1, 2, \dots, T$ 为观测时间, $v_{i,j}^k$ 可建模为均值为0、方差为 σ_{pr}^2 的高斯测距噪声, 并设第 i 颗LEO卫星和第 j 个地面终端的每次测量过程中测距噪声相互独立且同分布。

1.1 基于星地通信链路的单程双向终端测距方法

非地面的星地融合网络不仅提供了星地通信链路, 同时也为终端获取位置信息建立了通道。基于星地通信链路的单程双向终端测距示意图如图1所示, 地面终端于 $T_{\text{UE}}^{\text{S}} + \delta t_{\text{UE}}$ 时刻发起位置请求指令, LEO卫星于 $T_{\text{LEO}}^{\text{R}} + \delta t_{\text{LEO}}$ 时刻接收, 并经过 T_p 的处理时延后, 于 $T_{\text{LEO}}^{\text{S}} + \delta t_{\text{LEO}}$ 时刻返回相关信息, 包含位置等信息, 最后在 $T_{\text{UE}}^{\text{R}} + \delta t_{\text{UE}}$ 时刻接收。基于星地通信链路的单程双向测距方法获取的测距信息可以完全消除钟差所带来的影响, 见式 (1)。

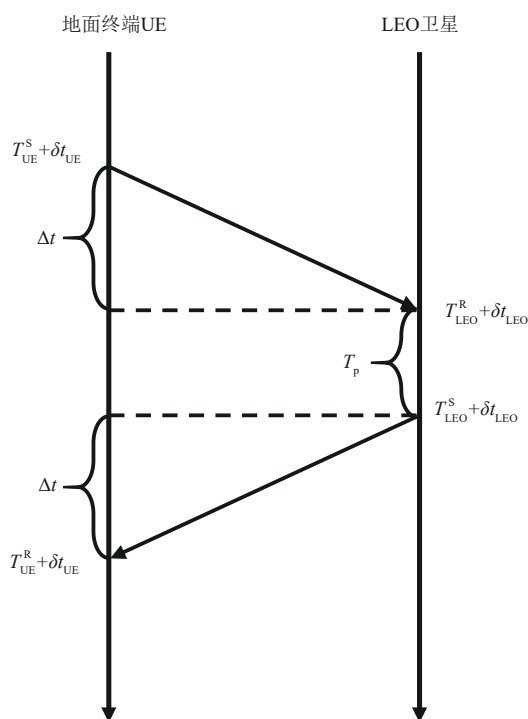


图1 基于星地通信链路的单程双向终端测距示意图

由于地面终端在同一时刻仅可接收一颗卫星的导航信号, 传统四星定位解算的方式不可适用。本文基于多个时刻观测数据进行联合定位解算, 利用 N 次观测获取的测距信息, 通过时间累

计弥补空间单星缺陷。同时,终端每经过一次新的测量,测量矩阵更新一次,以此完成在线的定位更新服务,其中基于多个时刻观测数据的终端定位解算示意图如图2所示。然而,对单星的连续观测,可能会带来定位精度因子突然恶化。这是由卫星相对终端运动不显著以及终端观测空间信息的有限性所带来的。因此,新的测量信息不一定会带来定位性能的提升,针对位置信息更新策略的研究有十分重要的意义。

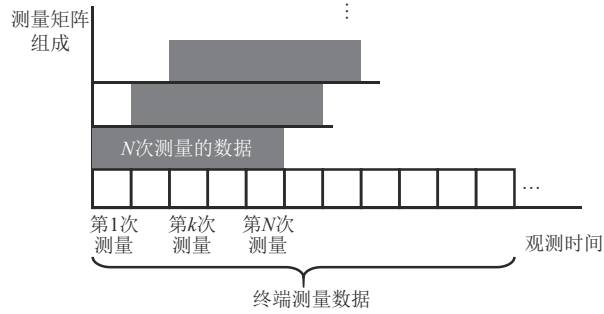


图2 基于多个时刻观测数据的终端定位解算示意图

同时,为了进一步消除信号传播过程中的误差,本文通过相邻第 $k+1$ 时刻和第 k 时刻测量值差分的方式,并基于扩展卡尔曼滤波器(extended Kalman filter, EKF)得到测量残差,如式(3)所示。

$$\delta p = \rho_{LEO}^{k+1} - \rho_{LEO}^k \quad (3)$$

对于终端极短时间间隔的两次相邻测量,卫星信号经过电离层和对流层的误差具有相似的统计特性,所造成的大气层时延大致相同,可以抵消。因此,本文基于星地通信链路的单程双向终端测距和差分定位方法可以较为理想地消除测距过程中的各项误差,基于低轨通信单星导航系统架构如图3所示。

2 位置信息更新策略

本节提出一种基于卫星几何分布的终端位置信息更新策略。更新策略主要针对测量过程中卫星位置精度衰减因子(position dilution of preci-

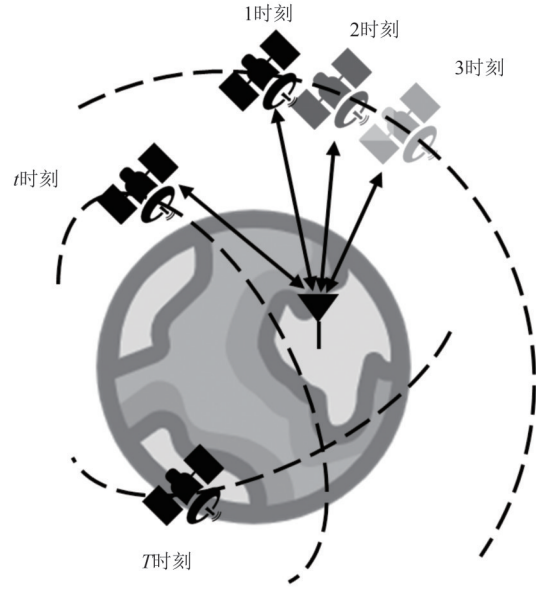


图3 基于低轨通信单星导航系统架构

sion, PDOP)进行评估比较,并进行位置信息的更新。同时,如图3的系统架构所示,为了更好地利用空间资源,弥补单一卫星连续观测的卫星几何构型的不足,终端在随机时刻进行卫星切换,实现定位精度的进一步提升。

2.1 卫星几何分布评估

结合差分测量残差,终端观测模型可表示为:

$$\delta y = H_{LEO} \delta x + R_{LEO} \quad (4)$$

其中, δx 为位置信息状态变量,由 $[\delta l \ \delta \lambda \ \delta h]^T$ 组成, l 、 λ 和 h 分别为WGS-84坐标系下终端的经度、纬度、高度值; R_{LEO} 为测量协方差矩阵; H_{LEO} 为卫星测量矩阵,如式(5)所示。

$$H_{LEO} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^1}{\partial p} - \frac{\partial P_1^1}{\partial p} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_k^1}{\partial p} - \frac{\partial P_{k-1}^1}{\partial p} \\ \frac{\partial P_{k+2}^m}{\partial p} - \frac{\partial P_{k+1}^m}{\partial p} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_T^M}{\partial p} - \frac{\partial P_{T-1}^M}{\partial p} \end{bmatrix} \quad (5)$$



其中, $\mathbf{p}_2^1$ 为第2时刻终端得到的第1颗距离测量向量, 并且基于差分定位方法, 终端于第 k 时刻由第1颗卫星切换至第 m 颗卫星继续进行测量, 终端总测量时间为 T 。由于每一时刻的测量噪声相互独立, 因此测量协方差矩阵 $\mathbf{R}_{\text{LEO}}$ 可表示为:

$$\mathbf{R}_{\text{LEO}} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \ddots & & 1 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 & 2 \end{bmatrix}_{(T-1) \times (T-1)} \sigma_{\text{pr}}^2 \quad (6)$$

卫星的DOP值是评估接收机位置可估计性的重要指标, 在卫星定位中发挥着重要的作用, 特别是在协同滤波与差分定位领域。其中, PDOP是卫星空间几何分布的重要表现。对于利用单星进行导航定位的终端而言, 选择并持续跟踪接收空间位置好的卫星信号可以极大程度地提升定位性能。

$$\text{PDOP} = \sqrt{\text{trace} \left[\left(\mathbf{D}_e^n \mathbf{D}_w^e \mathbf{H}_{\text{LEO}} \right)^T \left(\mathbf{D}_e^n \mathbf{D}_w^e \mathbf{H}_{\text{LEO}} \right) \right]^{-1}} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{D}_e^n$ 和 $\mathbf{D}_w^e$ 分别为地心地固坐标系 (earth-centered, earth-fixed, ECEF) 向导航坐标系 (north east down coordinate system, NED) 的转化矩阵和世界大地坐标系 (world geodetic system-1984 coordinate system, WGS-84) 向 ECEF 坐标系的转化矩阵, trace 为矩阵的迹。

2.2 终端位置信息更新策略

本文基于卫星几何分布因子 (PDOP) 提出终端位置信息更新策略, 如图4所示。该策略基于终端 N 个时刻观测数据结果, 并结合下一时刻观测数据, 对比PDOP的变化, 选择LEO卫星位置好的时刻的测量信息进行位置信息的更新迭代, 从而优化定位精度。终端测量信息更新示意图如图5所示。

(1) 判断终端能否进行 N 次观测

- 若不满足, 则直接输出测量信息, 进行终端的位置解算。

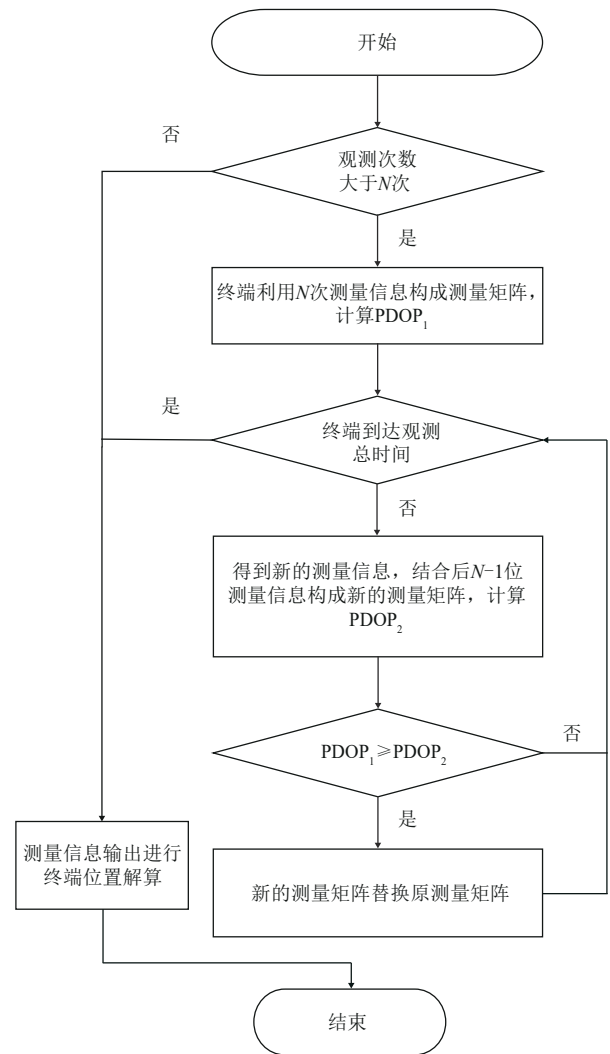


图4 终端位置信息更新策略

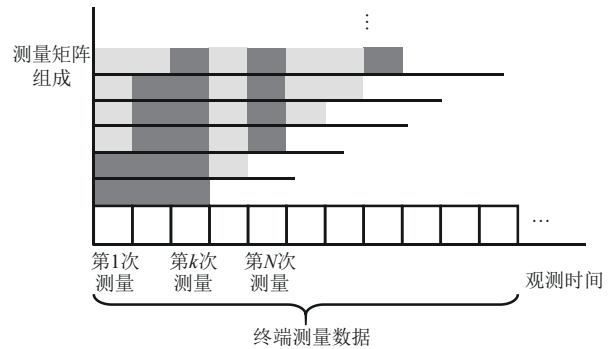


图5 终端测量信息更新示意图

- 若满足, 终端将 N 次测量的数据构成测量矩阵, 计算PDOP值, 并记为 PDOP_1 。该值反映了 N 次测量的卫星几何构型好坏,

用于评估测量过程中卫星位置好坏。

(2) 判断终端是否到达观测总时间

- 若满足，则直接输出测量信息，进行终端的位置解算。
- 若不满足，将后 $N-1$ 次测量信息和测量得到的新数据结合，构成新的测量矩阵并计算 PDOP，记为 PDOP₂，该值反映加入此次观测后的卫星几何构型的改善程度。

(3) 探究卫星几何构型的变化，比较 PDOP₁ 和 PDOP₂，实现测量信息更新

- 若 PDOP₁ ≥ PDOP₂，则利用新的测量矩阵替换原矩阵，更新终端测量信息。
- 若 PDOP₁ < PDOP₂，保留原测量矩阵不变。

重复上述方案直至终端观测结束，最后输出的测量信息解决了由单星连续观测带来 DOP 值异常的情况，极大程度地提升了终端的定位精度，为 NTN 定位提供解决方案。同时，在测量过程中，终端通过随机切换接入不同 LEO 卫星进行测量，使得空间资源得到充分利用。

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真参数设计

本文使用 SpaceX 低轨卫星星座参数构建卫星轨道模型，基于星地双向通信链路，设置用户侧信号传送频率采用 Ku 波段，下行链路总可用带宽共 2 GHz，上行链路总可用带宽为 500 MHz，针对地面静止终端的单星切换测量的终端差分定位方法以及位置更新策略进行仿真验证。为了模拟更真实的地面终端的测量情况，终端随机接入卫星并进行单程双向测量，在某一时刻随机切换接入另一颗卫星。同时，设定每个终端设备在同一时间仅具备一路信号通道，仿真实验参数见表 1。

表 1 仿真实验参数

参数描述	数值
卫星数量/颗	1 600
轨道高度/km	1 150
轨道倾角/(°)	53
轨道面数量	32
每个轨道卫星数量	50
用户下行链路频率范围/GHz	10.7~12.7
用户下行单载波带宽/MHz	250
用户上行链路频率范围/GHz	14.0~14.5
用户上行单载波带宽/MHz	125

3.2 仿真结果与分析

为了测试本文所提方法，分别基于 128 次、256 次、512 次的测量信息，在终端未切换、切换 15 次（依次连接 16 颗星）、切换 19 次（依次连接 20 颗星）3 种条件下，进行仿真实验。无位置更新策略的终端北向定位精度见表 2，由表 2 可以看出，在相同卫星服务时间内，终端通过多次切换接入卫星可以显著降低定位误差，并在此基础上，增加终端定位解算的观测数据的数量，能够进一步提升定位性能，抑制误差波动。与无切换的单星接入终端相比，切换服务卫星能够在相同观测数据数量的解算条件下实现定位性能提升 98%、99.85%、99.53%，但在这种情况下，仍存在测量值与真实值的均方根误差（root mean square error, RMSE）过大、定位精度波动显著的特点。

表 2 无位置更新策略的终端北向定位精度

终端切换次数	观测数据数量	RMSE/m	最小值/m
0	128	1.5×10^7	2.1×10^6
	256	2.0×10^6	3.8×10^5
	512	1.7×10^5	8.4×10^4
15	128	5.7×10^5	1.1×10^3
	256	2.0×10^3	773.2
	512	714.7	435.2

采用位置更新策略的终端北向定位精度见表 3。对比表 2 和表 3 可以得出，采用位置更新策略后，15 次切换的终端定位性能进一步提升



99.91%、56.06%、16.68%，并且定位精度在更新策略的作用下可以收敛至最小值附近，最优定位精度可达到299.5 m。同时，增加定位解算的观测数据数量在一定程度上也可以弥补更新策略的不足，最小可达435.2 m，但与采用位置更新策略的终端定位精度相比，RMSE高，定位误差波动大，收敛困难，因此仅能实现在特定时刻的定位精度短暂提升。

表3 采用位置更新策略的终端北向定位精度

终端切换次数	观测数据数量	RMSE/m	最小值/m
15	128	1.6×10^3	1.1×10^3
	256	835.9	814.6
	512	582.8	582.8
19	128	1.7×10^3	1.6×10^3
	256	709.2	503.2
	512	418.2	299.5

在采用位置更新策略后，卫星切换频率过高对定位精度的收敛不一定有利，例如，基于128次观测数据进行定位解算时，在终端分别切换15次和19次的情况下，前者精度的收敛值更小，这是因为过多的切换可能导致终端错失最佳定位服务的卫星位置，同时还会增加初始建链的开销。

终端北向、东向、天向定位误差分别图6~图8所示，分别为终端采用切换策略在NED坐标系下3个方向的定位误差变化，终端北向时间累计定位误差见表4，展示了采用位置更新策略进行15次卫星切换的终端北向定位误差时间变化。综合图6~图8和表4可以看出，切换策略使终端定位误差随时间阶梯式下降，并逐渐收敛。特别对基于少量的观测数据和较少切换次数的终端进行定位解算时终端的精度提升有明显优势，具有千米级别的增强。同时，在终端相同切换频率的条件下，参与定位解算的观测数据越多收敛越快，精度越高。但终端利用大量观测数据进行定位解算，所带来的计算和观测时间的开销不可忽略。从图8可以看出，不同情况下终端天向定位

误差收敛情况基本相同，这可能是由地面终端位置导致的。

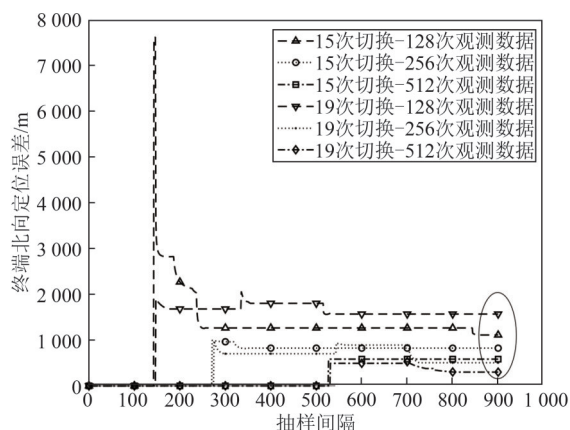


图6 终端北向定位误差

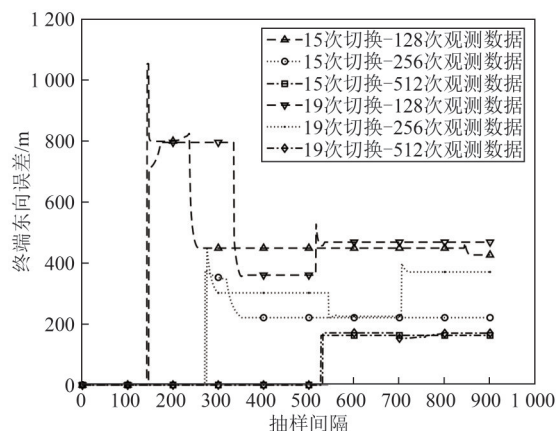


图7 终端东向定位误差

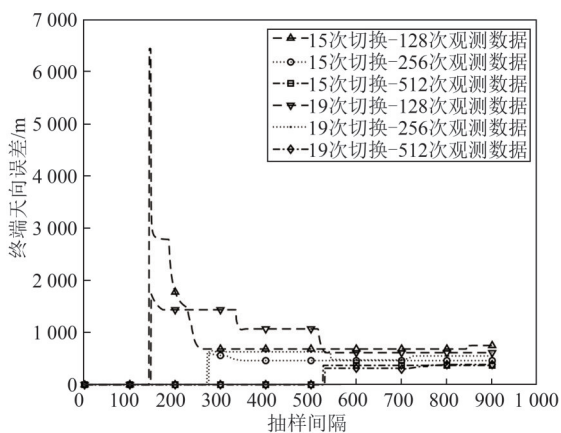


图8 终端天向定位误差

终端15次和19次切换卫星轨迹运行仿真分别如图9和图10所示，可以看出，终端通过切换

策略与位置更新策略，利用时间累计弥补单星空间定位信息的缺失，所接入的卫星分布表现良好。因此，本文所提方法在实现单星位置解算的同时，也极大抑制了定位误差，良好的切换和位置更新策略可以实现单星百米级的终端定位精度。

表4 终端北向时间累计定位误差

时间/s	终端服务策略		
	128次观测值/m	256次观测值/m	512次观测值/m
30	3.1×10^3	0	0
60	1.3×10^3	962.8	0
150	1.3×10^3	822.8	582.8
180	1.1×10^3	822.8	582.8

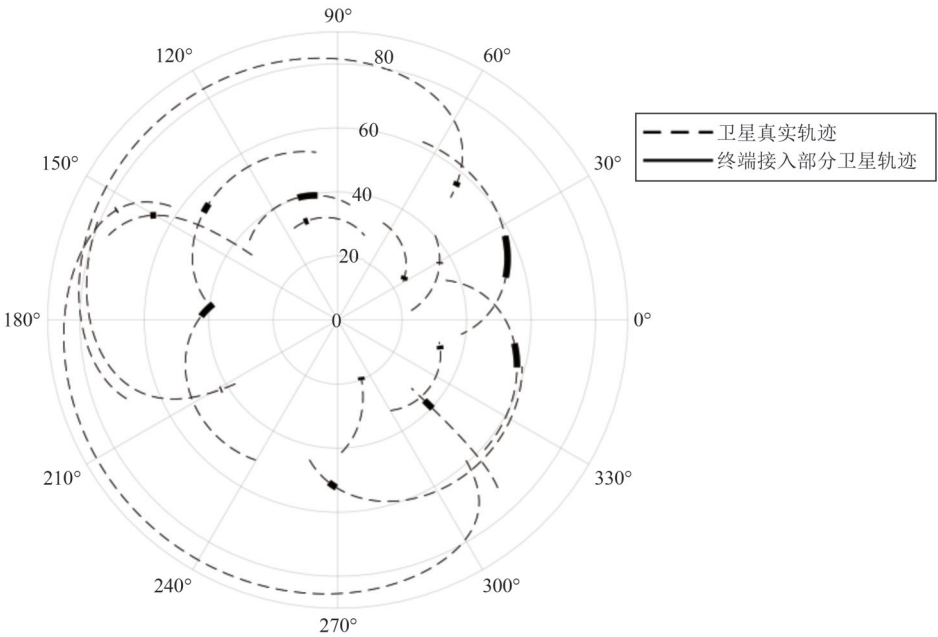


图9 终端15次切换卫星轨迹运行仿真

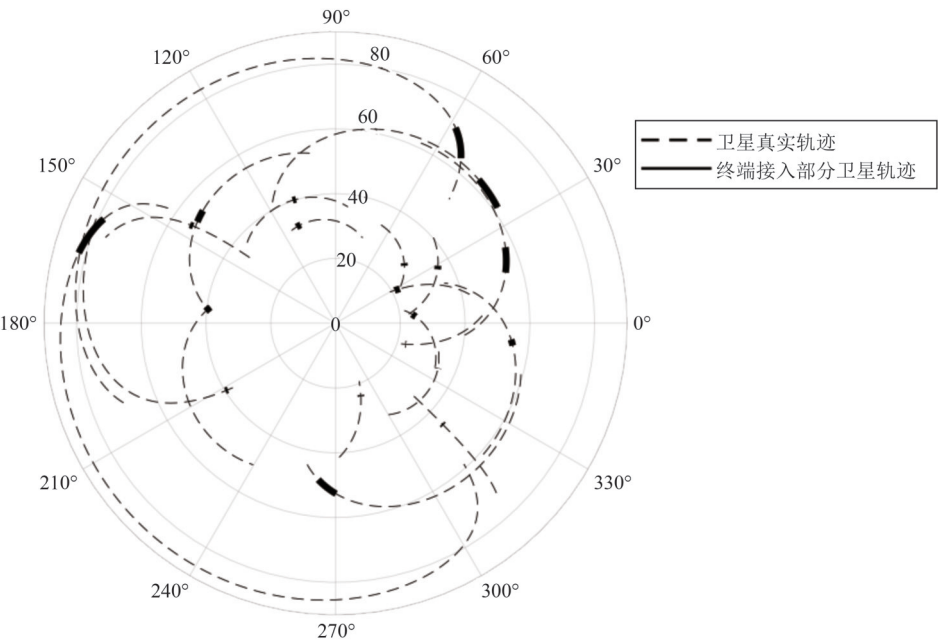


图10 终端19次切换卫星轨迹运行仿真



4 结束语

本文基于低轨通信卫星的星地通信链路，提出了一种基于低轨星座单星切换测量的终端差分定位方法，通过多个时刻的伪距测量值构建测量矩阵，利用星间切换弥补了单星服务的空间缺陷，并以卫星PDOP为评价指标，建立位置信息更新策略，实现定位精度的提升与快速收敛。仿真结果表明，在相同卫星服务时间内，终端通过切换接入卫星可以显著降低定位误差，并在此基础上，增加参与定位解算的观测数据数量能够进一步提升定位性能，抑制误差波动。在一定的终端切换频率和卫星切换策略下，更可以实现终端与单星通信情况下299.5 m的定位精度。

参考文献：

- [1] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [2] XYU H, SUN Y H, ZHAO Y F, et al. Joint beam scheduling and beamforming design for cooperative positioning in multi-beam LEO satellite networks[J]. arXiv preprint, 2024, arXiv: 2404.01148.
- [3] VAEZI M, AZARI A, KHOSRAVIRAD S R, et al. Cellular, wide-area, and non-terrestrial IoT: a survey on 5G advances and the road toward 6G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 1117-1174.
- [4] DUREPPAGARI H K, SAHA C, DHILLON H S, et al. NTN-based 6G localization: vision, role of LEOs, and open problems[J]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2305.12259.
- [5] SHAH A F M S, KARABULUT M A, RABIE K. Multiple access schemes for 6G enabled NTN-assisted IoT technologies: recent developments, prospects and challenges[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2024, 7(1): 48-54.
- [6] LIN X Q, CIONI S, CHARBIT G, et al. On the path to 6G: embracing the next wave of low earth orbit satellite access[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(12): 36-42.
- [7] 孙耀华, 许宏涛, 彭木根. 手机直连低轨卫星通信: 架构、关键技术 and 未来展望[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 103-110.
SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.
- [8] 3GPP. TSG RAN; study on requirements and use cases for network verified UE location for non-terrestrial-networks (NTN) in NR (Release 18): TR 38.882, version 18.0.0[S]. 2022.
- [9] WANG Y Q, HAN L, ZHANG X, et al. A passive signal focusing algorithm based on synthetic aperture technique for multiple radiation source localization[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024(62): 1-16.
- [10] CHAN Y T, TOWERS J J. Passive localization from doppler-shifted frequency measurements[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(10): 2594-2598.
- [11] ZHU Y F, ZHANG S S. Passive location based on an accurate doppler measurement by single satellite[C]//In 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1424-1427.
- [12] LI A, HUAN H, TAO R, et al. Passive synthetic aperture high-precision radiation source location by single satellite[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022(19): 1-5.
- [13] LI H, ZHANG M, -GUO F C. A novel single satellite passive location method based on one-dimensional cosine angle and doppler rate of changing[C]//In 2018 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [14] YE L Y, YANG Y K, JING X, et al. Single-satellite integrated navigation algorithm based on broadband LEO constellation communication links[J]. Remote Sens, 2021(13): 703.
- [15] DUREPPAGARI H K, EMENONYE D R, DHILLON H S, et al. UAV-aided indoor localization of emergency response personnel[C]//Proceedings of the 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1241-1249.
- [16] ZHAO N, LU W, SHENG M, et al. UAV-assisted emergency networks in disasters[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 45-51.
- [17] KASSAS Z M, KOZHAYA S, KANJ H, et al. Navigation with multi-constellation LEO satellite signals of opportunity: starlink, OneWeb, orbcomm, and iridium[C]//Proceedings of the 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 338-343.
- [18] PROL F, FERRE R M, SALEEM Z, et al. Position, navigation, and timing (PNT) through low earth orbit (LEO) satellites: a survey on current status, challenges, and opportunities[J]. IEEE Access, 2022(10): 83971-84002.

- [19] LIANG X, HUANG Z G, QIN H. A new rapid integer ambiguity resolution of GNSS phase-only dynamic differential positioning[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021(19): 1-5.
- [20] MAHBOOB S, LIU L J. Revolutionizing future connectivity: a contemporary survey on AI-empowered satellite-based non-terrestrial networks in 6G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024.
- [21] 赵亚飞, 闫冰, 孙耀华, 等. 低轨星座通导一体化: 现状、机遇和挑战[J]. 电信科学, 2023, 39(5): 90-100.
- ZHAO Y F, YAN B, SUN Y H, et al. Communication and navigation integration for LEO constellations: status, opportunities, and challenges[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(5): 90-100.

[作者简介]



王鑫洋 (1999-), 男, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室博士生, 主要研究方向为低轨卫星通导一体化、无人机集群相对定位等。



赵亚飞 (1987-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室特聘副研究员, 主要研究方向为低轨星座通信导航一体化、星地融合网络等。



李锦康 (2001-), 男, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为基于 5G 基站的移动通信终端协同定位技术。



彭木根 (1978-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室教授, 主要研究方向为空间信息通信、通感算一体化、雾无线电接入网络等。