

基于NTN的手机直连卫星定位技术

孙晓南¹, 周世东², 康绍莉¹

(1. 中信科移动通信技术股份有限公司, 北京 100083;

2. 清华大学, 北京 100084)

摘要: 随着无线通信技术的飞速发展, 定位技术正经历从专用导航卫星系统向通信系统辅助定位, 甚至独立定位的方向转变。国际标准化组织3GPP自R18开展了基于5G NTN的定位技术研究, 推进通信导航一体化发展。考虑到终端可见的卫星数量, 目前在3GPP中研究的主要是单星定位技术, 存在收敛慢、定位精度低等不足。随着低轨巨型星座的发展, 终端未来可见的卫星数目越来越多, 因此多星定位成为可能, 并相对于单星定位具有收敛快、几何布局好、精度高等优势。针对5G NTN体制的手机直连卫星定位技术进行研究, 提出多种适合多星定位的算法, 分析影响定位性能的关键因素并开展定位性能仿真评估。

关键词: 通信导航一体化; 多星定位; TDOA; Multi-RTT; 多普勒定位

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024026

Non-Terrestrial Network Based Positioning Technologies for Direct-to-Satellite Service

SUN Xiaonan¹, ZHOU Shidong², KANG Shaoli¹

1. C-ICT Mobile Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: With the rapid evolution of wireless communication technologies, positioning technologies are undergoing a transformation from dedicated navigation satellite systems towards communication system-assisted positioning and even standalone positioning. The International Telecommunication Union's 3GPP, since Release 18, has embarked on researching 5G Non-Terrestrial Network (NTN) positioning technologies, fostering the integration of communication and navigation. Considering the limited visibility of satellites to terminals, the primary focus of current 3GPP research lies in single-satellite positioning technology, which suffers from drawbacks such as slow convergence and low accuracy. However, with the emergence of low-Earth orbit mega-constellations, terminals will access to an increasing number of visible satellites in the future, rendering multi-satellite positioning feasible. Compared to single-satellite positioning, multi-satellite positioning offers advantages such as faster convergence, improved geometric configurations and higher accuracy. This paper delves into the research of positioning technologies for Direct-to-Satellite Service (D2SS) within the 5G NTN framework, proposing various multi-satellite positioning algorithms, analyzing the critical factors influencing positioning performance, and conducting simulation assessments of positioning performance.

Keywords: navigation-communication integration, multi-satellite positioning, TDOA, Multi-RTT, Doppler-based positioning

0 引言

传统定位由专用导航卫星系统完成, 常用手段包括

伪距测量定位、多普勒测量定位和载波相位测量定位。专用导航卫星系统的轨道高、距离远等特性导致落地信号弱且易受干扰, 影响定位精度。通信业务和应用的激

收稿日期: 2024-05-30; 修回日期: 2024-08-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2022YFB2902600)

Foundation Item: National Key Research&Development Program of China(No. 2022YFB2902600)

增,使得人们对高精度定位的需求越来越强烈。因此,国际标准化组织3GPP自R16开始探讨基于地面移动通信系统的定位技术,研究了到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)定位、多次往返时间(Multi-Round Trip Time, Multi-RTT)定位等系列定位方法。与此同时,以卫星通信为代表的非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)自3GPP R15开始进行了研究^[1],并于R17完成了第1个标准版本。在手机直连卫星场景下,基于5G NTN来开展定位具有天然的优势,既能够继承5G地面基站定位已有的高精度定位算法,又能够充分发挥卫星通信系统的抗毁性等特点,因此业界积极探讨基于5G NTN的定位技术^[2-4]。考虑到终端可见的卫星覆盖区域等因素约束,3GPP R18阶段的5G NTN定位研究主要针对单星定位,开展了UE位置验证问题的定位技术等方面的研究。

越来越多的低轨星座在朝着巨型星座组网的方式发展,可以预见,终端在未来可见的卫星将远远不止1颗,由此定位技术也将由现有的单星定位向多星定位发展,从而具有收敛快、几何布局好、精度高、抗干扰能力强等优势。本文基于对经典定位方法和NTN单星定位方法的分析,面向应用热点手机直连卫星,研究基于NTN体制的多星定位技术,提出多种适合多星定位的高精度定位算法,并分析定位性能的影响因素,以及开展定位性能的仿真评估。本文的研究,将为3GPP针对NTN定位的后续研究和标准化提供有力

指导,为高精度定位技术的进步提供切实可行的参考。

1 经典定位方法分析

传统的导航卫星系统与5G地面移动通信系统^[5]所采用的定位方法,可分为基于距离信息和基于角度信息两大类,如图1所示。前者通过测量发射端与待测设备之间距离的相关信息来实现定位,后者通过测量发射端与待测设备之间角度的相关信息来实现定位。

(1) 基于距离信息的定位

距离信息既可以是绝对距离信息,也可以是差值距离信息。绝对距离信息直接反映了发射端(地面基站或卫星)与待测设备之间的距离,因此待测设备位于以发射端为中心,以该绝对距离为半径的球面上。多个绝对距离信息生成的多个球面相交时,即可确定待测设备的位置。差值距离信息反映了不同发射端到同一待测设备之间距离的差值,因此待测设备位于以两个发射端为焦点,差值距离为实半轴的双曲面上。多个差值距离信息生成的多个双曲面相交时,同样可确定待测设备的位置。

根据获取距离信息所采用的测量方法,可以进一步细分为时间测量、速度测量以及相位测量等多种方式。其中基于时间测量的定位方法包括传统导航卫星系统中的基于伪距测量定位方法,以及5G地面移动通信系统中的TDOA、Multi-RTT定位方法^[6];基于速度测量的定位

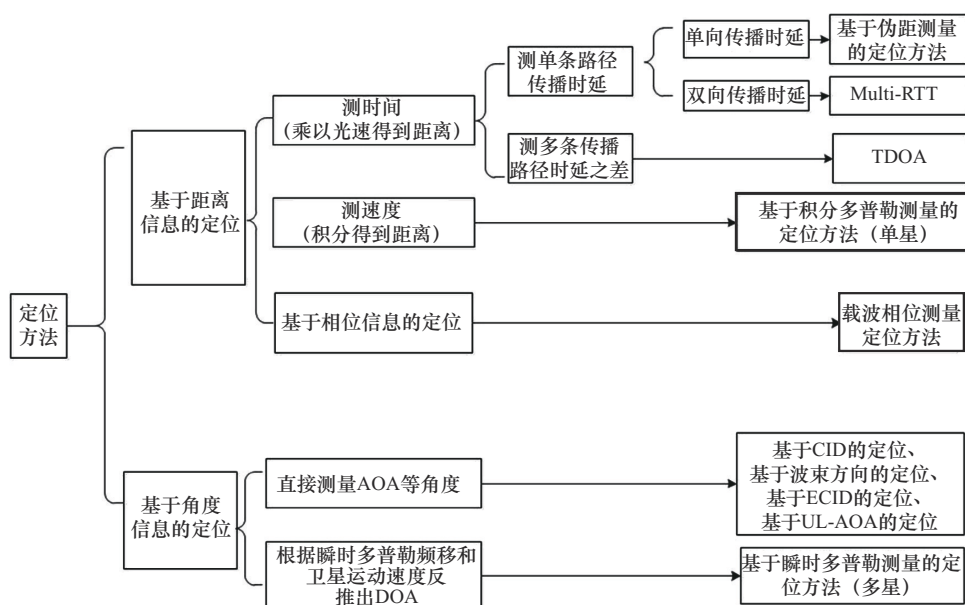


图1 经典定位方法

方法包括传统导航卫星系统中的积分多普勒测量定位方法^[7]；基于相位测量的定位方法包括传统导航卫星系统中的载波相位定位方法^[8]。

(2) 基于角度信息的定位

基于角度信息的定位方法利用到达角信息，在收发端之间形成射线，多个角度测量值生成的多条射线相交时，即可确定待测设备的位置。定位方法包括导航定位系统中的瞬时多普勒频移测量定位方法，通信系统初期采用的基于用户接入的小区身份（Cell Identity, CID），波束方向的定位方法以及现代5G通信系统采用的增强小区标识（Enhanced Cell Identity, ECID）定位方法，AOA定位方法。角度测量对天线阵列精度要求较高，成本较高。

在实际应用中，基于距离信息和基于角度信息的融合定位方法可以有效减少用户的位置误差，从而提高定位的精确度。例如，将ECID与Multi-RTT或TDOA定位方法相结合。

2 NTN单星定位方法

3GPP自R18开始探讨NTN的定位研究^[9]，成立了UE位置验证研究项目，探讨UE上报位置不准确的情况下，网络如何有效地进行位置校验，确保网络提供的服务能够遵守当地法律法规及符合监管要求^[10]。在无线接入网第一工作组（RAN1）第109次会议中，主要涉及NR基于无线接入技术的各类定位方案在NTN中的可行性及理论精度，NTN场景在重叠覆盖少、信噪比低、工作频段高等方面的特殊性，以及大子载波间隔下的CP长度不足等诸多议题。在RAN1的第110次会议中，主要讨论了基本定位场景、采用的定位方法以及所需的仿真参数等内容。在RAN1的第110 bis次会议中，进一步分析了DL-TDOA和Multi-RTT这两种定位算法。随后的会议，进一步分析了在不同几何构型下以及在UE时钟存在漂移情况下的定位精度等问题，并最终在RAN1的第115次会议结束相关研究工作^[11-16]。此外，3GPP建议研究通过广播^[17]附加导航信息（如精确星历、大气及电离层校正等）及LEO卫星轨道、时钟偏差信息等进行辅助定位的方法。

目前3GPP所开展的NTN定位研究主要针对单星定位，其存在诸多局限性。例如，单星定位的收敛速度较慢，因其依赖于对一颗卫星的多个历元进行测量，以解算出用户的位置，而短测量间隔下几何布局欠佳，定位精度较低。由此，为了确保定位精度，测量间隔需要足

够长，从而导致收敛时间较长，这也限制了单星定位在高动态用户、运行轨迹复杂的车辆导航中的应用潜力。此外，即使是低动态用户，在单星定位的收敛过程内，可能仍然处于运动状态中，因此各历元测量值所对应的用户位置不同，这为定位解算带来了不可忽略的误差。同时，在单星定位的收敛过程中，卫星及接收机可能会存在时钟漂移、频率漂移等问题，也削弱了定位精度。

考虑到未来的低轨卫星通信系统面向巨型星座发展，对于终端来讲可见的卫星数目远不只一颗，因此可以综合利用可见的多颗卫星来进行定位，以节省定位用时并提升定位精度。

3 NTN多星定位方法

本节研究基于NTN系统的多星定位问题，结合手机直连卫星应用^[18]，探讨多星定位的算法，分析定位性能的影响因素，并开展相应的性能评估。

3.1 定位原理

多星定位模式在算法核心上延续了单星定位的策略，但显著改进了信号测量方式，由原先的单星分时测量转变为多星并行测量，极大地缩短了定位时间。

以常用的定位算法TDOA为例，图2给出了单星定位和多星定位的方法示意。可以看出，多星TDOA定位模式类似于GNSS系统，UE需要同时测量多颗卫星的定位参考信号（Positioning Reference Signal, PRS），并选择其中的1颗卫星为基准（例如0号卫星），得到其他相邻卫星相对于基准卫星的PRS信号到达时间差，然后再结合参与定位的所有卫星的三维坐标位置计算UE的最终位置。

3.2 定位算法

基于上述的定位方法分析，本文提出适用于NTN系统手机直连卫星应用的多星定位算法，包括TDOA定位算法、Multi-RTT定位算法、多普勒定位算法。

3.2.1 TDOA定位算法

TDOA定位是一种利用到达终端的时间差信息进行定位的方法，通过检测多个基站的信号到达终端的相对时间差，而不是到达的绝对传输时间来确定终端位置，降低了信号源与各个基站的时间同步要求，但增加了对各个基站之间的时间同步要求。以下行为例，图3给出了利用3个基站进行TDOA定位的原理示意，可以测到两组TDOA数据，终端位于两组TDOA数据所确定的双曲面交点处。

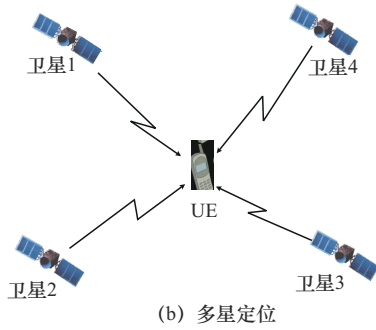
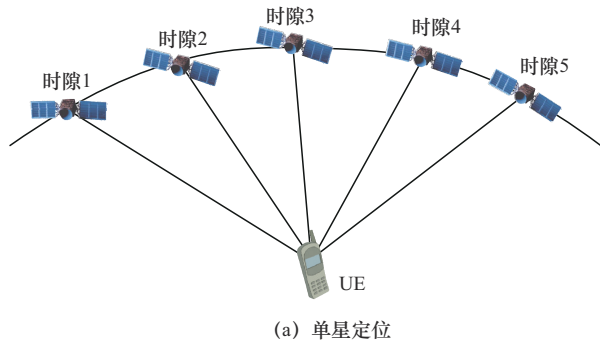


图2 TD OA定位方法示意

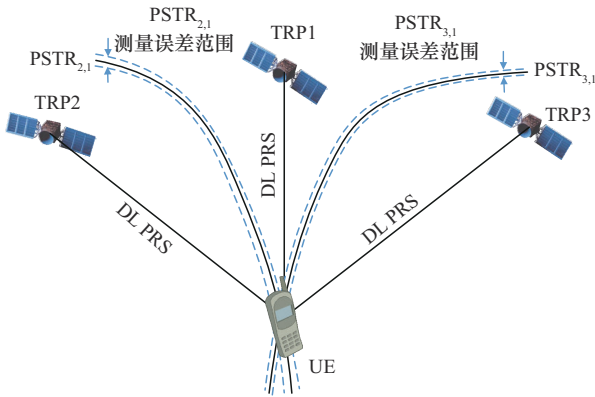


图3 DL-TDOA定位示意

针对手机直连卫星场景,考虑到不同用户所处的高度可能不同,NTN需要进行三维的立体定位,意味着终端至少需要测量得到3个相对信号时延差(Relative Signal Time Difference, RSTD),由此终端需要对4颗卫星进行测量。假设UE的位置为 (x,y,z) ,卫星 i 的位置为 (x_i,y_i,z_i) ,卫星到UE的距离 R_i 可以表示为

$$R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (1)$$

其中, $i=1, \dots, N$ 。假如设置第1颗卫星为基准卫星,则第 i 颗卫星测量与基准卫星测量所得的距离之差可以表示为

$$\begin{aligned} R_i^2 - R_1^2 &= (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 - \\ &\quad (x - x_1)^2 - (y - y_1)^2 - (z - z_1)^2 \\ &= 2(x_1 - x_i)x + 2(y_1 - y_i)y + 2(z_1 - z_i)z + \\ &\quad x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \end{aligned} \quad (2)$$

对式(2)进行变换得到

$$R_i^2 - R_1^2 = 2 \begin{bmatrix} (x_1 - x_i) & (y_1 - y_i) & (z_1 - z_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + K_i - K_1 \quad (3)$$

其中, $K_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$, $K_1 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2$ 。

当 i 的最大取值为4时,表示UE测量了4次,得到了3个RSTD。通过解算该方程组即可求得UE的三维坐标位置。当UE观测到的数据组大于4个时,TD OA测量值的数目大于未知参数的数目,可以采用加权最小二乘法来充分利用冗余的数据,以此提高数据解算的精度。

3.2.2 Multi-RTT定位算法

如图4所示,Multi-RTT定位算法根据测量的用户与基站之间的距离,以基站为球心构建一个球面,利用最少3个基站的信息,可以得到一个交叠区域,进而利用定位方法对用户位置进行最终估计。

Multi-RTT定位算法采用的测量值为UE与基站之间的往返传输时间。UE测量来自传输接收点(Transmission Receiving Point, TRP)的下行PRS的到达时间与UE发送上行导频信号(Sounding Reference Signal, SRS)的时间差(UE Rx-Tx时间差),TRP测量来自UE的SRS-Pos的到达时间与TRP发送DL PRS的时间差(gNB Rx-Tx时间差)。如图5所示,UE与TRP之间的信号往返时间(Round Trip Time, RTT)可由UE Rx-Tx时间差($t_{UE}^{Rx} - t_{UE}^{Tx}$)加上gNB Rx-Tx时间差($t_{TRP}^{Rx} - t_{TRP}^{Tx}$)得到,而UE与TRP的距离可由1/2 RTT乘以光速 c 得到。从UE和各TRP的信号发送和接收的角度来说,Multi-RTT定位能力隐含了对DL-TDOA和UL-TDOA的同时支持。

$$\begin{aligned} RTT &= (\Delta T_1 + \Delta T_2) \\ &= (t_{UE}^{Rx} - t_{UE}^{Tx}) + (t_{TRP}^{Rx} - t_{TRP}^{Tx}) \\ &= (t_{UE}^{Rx} - t_{UE}^{Tx}) + (t_{TRP}^{Rx} - t_{TRP}^{Tx}) \end{aligned} \quad (4)$$

Multi-RTT定位算法中RTT测量既可以采用gNB先发送PRS,然后UE发送SRS的方式,也可以采用UE先发送SRS,然后gNB发送PRS的方式。具体的测量过程如图6所示,其中图6(a)中的 $RTT=T_2-T_1$,而图6(b)中的 $RTT=T_1-T_2$ 。

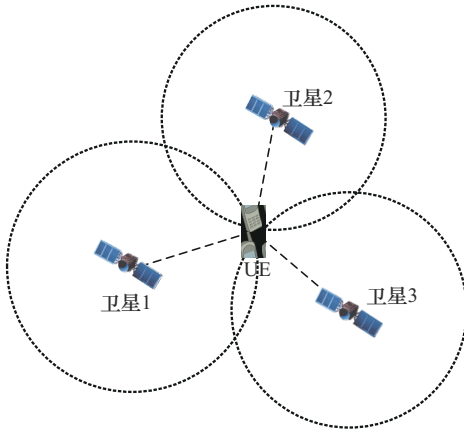
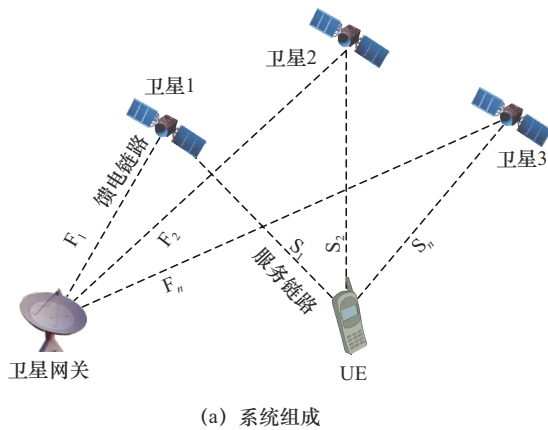


图4 Multi-RTT 用户定位示意

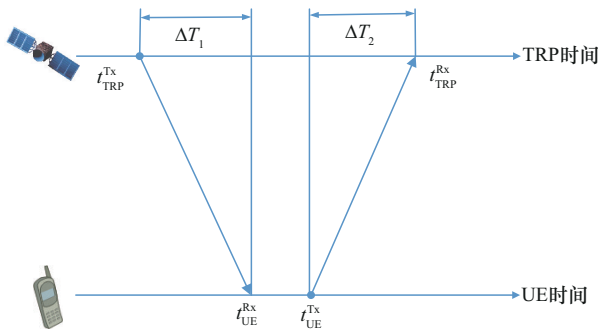


图5 信号往返时间示意

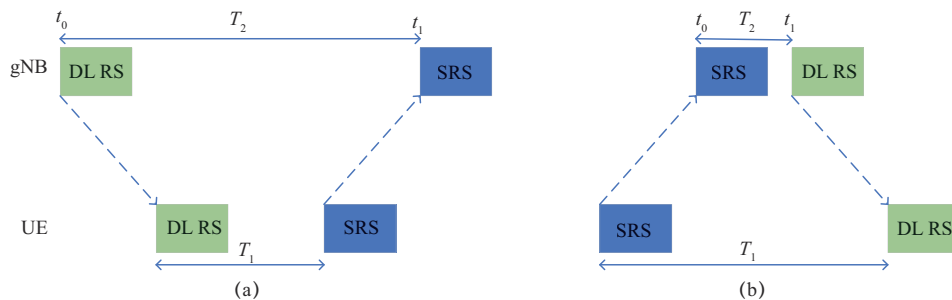


图6 Multi-RTT的RTT测量过程示意

3.2.3 多普勒定位算法

高轨卫星与地球之间的相对速度小，地面移动通信系统中基站位置固定，因此多普勒频移均不明显。低轨卫星由于其轨道低，运行速度快，多普勒频移显著。因此，低轨卫星通信系统相比传统导航卫星系统及地面移动通信系统更适合采用多普勒定位算法。此外，由于低轨卫星的运行速度快，同样的采样间隔下，低轨卫星的几何构型分散，定位精度高。同样的几何构型下，低轨卫星定位的采样间隔小，收敛时间短。

多普勒定位算法利用多普勒效应，即当收发端之间有相对运动时，接收到的信号频率不再是发端的载频，而是存在一定的多普勒频移，与发端载频、收发端相对运动速度方向在收发端径向方向之间的投影有关。接收机会产生一个频率为 f_0 的本振信号并与接收到的频率为 f_R 的卫星信号混频，然后在时间段 $[t_1, t_2]$ 进行积分，对一段时间内多普勒频移进行积分，即可得出这段时间内卫星与接收机距离的变化量。两者之间的关系为

$$D_2 - D_1 = \frac{c}{f_s} [G - (f_0 - f_s)(t_2 - t_1)]$$

$$= \lambda_s [G - (f_0 - f_s)(t_2 - t_1)] \quad (5)$$

其中， λ_s 表示发端载频的波长。因此接收端位于以 t_1 时刻卫星位置和 t_2 时刻卫星位置为焦点， $D_2 - D_1$ 为实半轴的双曲面上。选择多个积分空间，可以得到多个双曲面。这些双曲面的交点即为接收端位置。

当卫星的运动速度矢量已知时，测量瞬时多普勒频移可以得出运动速度矢量与收发端径向位置之间的夹角 θ 。即

$$\cos \theta = \frac{c \Delta f}{v f_s} \quad (6)$$

因此接收端位于以卫星运动速度矢量为轴，以 θ 为锥角的锥面上。多个测量值形成的锥面相交即可得出接收端的位置。

3.3 影响因素分析

对于支持手机直连卫星的NTN系统,其多星定位性能与星座构型和参考信号测量的准确度等因素相关。

从星座构型来看,卫星的布局会影响定位算法的精度。当多颗卫星在空间分布上趋于聚集,即形成紧凑的几何结构时,TDOA和Multi-RTT定位方法均面临挑战。例如,紧凑的卫星布局导致RSTD减小,生成的多个双曲面间产生显著重叠,进而引发定位解算的模糊性。类似地,Multi-RTT定位也因多颗卫星相近的位置和RTT值,使得所构建的球面模型存在广泛重叠,降低了定位解的准确性与唯一性。为了量化接收机与多颗卫星的几何分布,引入了精度稀释因子(Dilution of Precision, DOP)的概念,其值越小,表示几何分布对定位误差的放大作用越弱,定位精度越高。在三维空间定位中,多颗卫星与接收机构成的多面体体积是评估DOP值的重要指标,体积越大,DOP值越小,定位性能越好。

此外,参考信号的测量精度同样是决定卫星定位精度不可忽视的要素。基于时间测量的定位技术,其核心在于从收发端格式已知的参考信号中准确提取出时间信息。参考信号的成功检测是后续相关性计算、距离估算及最终定位解算的前提。因此,参考信号的测量精度直接关联并限制着整个定位系统的精度表现。提升参考信号的检测与测量精度是优化卫星定位系统性能的重要途径之一。

3.4 性能评估

本文以低频段的手机直连卫星应用为例,针对TDOA定位算法和Multi-RTT定位算法,进行了NTN多星定位性能评估,并与3GPP在讨论的NTN单星定位性能进行对比。

3.4.1 仿真条件假设

基本的仿真条件见表1,假设卫星轨道高度为600 km,系统工作在2 GHz的低频段,用户终端处于乡村的开阔地区,卫星通信链路以直射径(Line of Sight, LOS)为主。在链路预算受限的情况下,假设系统支持最大带宽为10 MHz(对应有效带宽8.64 MHz);假设终端工作的最低仰角为30°。

表1 仿真假设

仿真参数	参数值
卫星轨道高度	600 km
频率	2 GHz
信道条件	NTN-TDL-C
带宽	8.64 MHz, 48物理资源块
子载波间隔	15 kHz
定位信号	下行PRS, 上行SRS
梳状因子	2
终端类型	手持终端
终端最低仰角	30°

3.4.2 星座构型影响评估

对于手机直连卫星场景,建立了轨道高度为600 km,轨道倾角为60°,相位因子为3,60×60总计3 600颗卫星的低轨卫星Walker星座。针对单星和多星定位场景下的DOP计算结果分别见表2至表4。其中,HDOP代表水平精度稀释因子,VDOP代表垂直精度稀释因子,基于HDOP和VDOP可以获得PDOP,其代表位置(3D)精度稀释因子。各类精度稀释因子的关系如下

$$PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2} \quad (7)$$

卫星间的分散程度及其间距是决定DOP的主要因素。在单星定位模式下,多次测量时对应的卫星分布紧凑且

表2 LEO卫星轨道高度600 km情况下,单星定位DOP计算结果(采样间隔10 s, 4次测量)

时间		0 s	10 s	20 s	30 s
卫星位置	X/km	-2 391.094 217	-2 414.944 936	-2 438.585 056	-2 462.012 624
	Y/km	5 141.104 752	5 091.531 45	5 041.395 467	4 990.702 385
	Z/km	4 049.225 074	4 097.482 293	4145.256638	4 192.542 487

HDOP: 8 432.72; VDOP: 4 533.54; PDOP: 9 574.11

表3 LEO卫星轨道高度600 km情况下,单星定位DOP计算结果(采样间隔30 s, 4次测量)

时间		0 s	30 s	60 s	90 s
卫星位置	X/km	-2 391.094 217	-2 462.012 624	-2 531.000 749	-2 598.007 261
	Y/km	5 141.104 752	4 990.702 385	4 835.337 306	4 675.165 227
	Z/km	4 049.225 074	4 192.542 487	4 331.413 704	4 465.691 674

HDOP: 1 045.2; VDOP: 564.12; PDOP: 1 187.80

表 4 LEO 卫星轨道高度 600 km 情况下，多星定位 DOP 计算结果（卫星数量：4 颗）

卫星编号		Sat 1	Sat 2	Sat 3	Sat 4
卫星位置	X/km	−2 391.094217	−2 111.325 856	−2 133.012 291	−2 925.524 135
	Y/km	5 141.104 752	5 604.199 205	4 897.725 24	4 837.936 554
	Z/km	4 049.225 074	3 560.233 792	4 473.460 473	4 071.907 637
HDOP:1.467 8;VDOP:0.972 4;PDOP:1.760 7					

沿同一轨道面，导致 DOP 值增大，对定位精度构成不利影响。在多星定位模式下，卫星间位置分散且间距较大，具有更好的几何布局，导致 DOP 值明显缩小，有利于提升定位精度。这一结果不仅印证了多星定位的优越性，也预示了其发展的必然趋势。

在单星定位模式下，虽然可以通过牺牲采样间隔来获取更理想的 DOP 值，但在收敛时间严格受限的应用场景中显然不切实际。相比之下，多星定位策略无须受制于采样间隔，用户能够灵活选取其视野内 DOP 值最优的卫星组合进行即时测量与定位解算，从而显著缩短收敛时间，展现出更高的实用价值与效率。

3.4.3 参考信号测量精度影响评估

对于 3GPP NTN 体制，定位技术所使用的下行参考信号是 PRS，上行参考信号是 SRS，其在表 1 所给定的仿真条件下的测量误差见表 5。

表 5 PRS/SRS 测量信号的测量误差（8.64 MHz，48PRB）

仰角/(°)	PRS 测量			SRS 测量		
	平均	测量误差/ns		平均	测量误差/ns	
	SNR/dB	50%	90%	SNR/dB	50%	90%
80~90	3.68	3.99	9.52	−13.96	5.38	20.70
70~80	3.44	4.18	9.61	−14.20	5.42	20.80
60~70	2.93	4.04	9.54	−14.71	5.70	20.29
50~60	2.13	4.08	9.69	−15.52	5.64	20.32
40~50	1.00	4.16	10.00	−16.64	6.01	22.04
30~40	−0.25	4.29	10.14	−17.90	6.19	22.34

从信噪比（Signal to Noise Ratio，SNR）来看，当用户到卫星的仰角较大时，SNR 水平较好。这是因为仰角较大时，卫星位于用户的正上方附近，卫星与用户之间的距离较近，信号衰减较小。从卫星天线能力方面来讲，当用户位于卫星正下方时，卫星天线的指向精准；而当用户位于卫星覆盖范围的边缘时，天线存在转向损耗，即最大天线增益会有损失。因此仰角较大时，SNR 较好，测量误差较小；随着仰角逐渐变小，SNR 变差，测量误差变大。

从上下行链路对比来看，在同样的 UE 仰角条件下，由于 UE 上行发射功率低于卫星下行发射功率，因此，

SRS 的 SNR 水平要远低于 PRS 的 SNR 水平。

从测量误差来看，PRS 和 SRS 的测量误差均随 UE 仰角变小而增大，这主要归因于低仰角下 SNR 水平的恶化，因此测量精度较差。在后续仿真过程中，根据 LEO 卫星 600 km 轨道场景的链路计算结果，结合对下行 PRS 信号以及上行 SRS 信号测量误差的评估结果进行仿真。

3.4.4 定位算法性能评估

在 UE 的仰角 30° 的情况下，卫星覆盖范围的半径大于 800 km。对于手机直连卫星场景，建立了轨道高度为 600 km，轨道倾角为 60°，60×60 总计 3 600 颗卫星的低轨卫星星座，用户可见范围内（以最大仰角 30° 进行评估）存在十余颗卫星，选取其中的 4 颗卫星进行定位，卫星位置见表 4，并将其性能与单星定位性能进行对比，单星定位时卫星位置分别见表 2 及表 3。

DL-TDOA 定位误差仿真结果如图 7 所示。可以看出，四星定位的性能明显好于给定采样间隔的单星定位性能。单星定位即便采用 30 s 的测量间隔，总计 90 s 的定位时长，其误差范围均处于千米量级，而四星定位的最大误差不超过 280 m。这是因为单星定位需要合理设定采样间隔，过短的采样间隔会导致 TDOA 测得的 RSTD 较小，多次测量所生成的双曲面重叠区域较大，从而引入定位模糊。

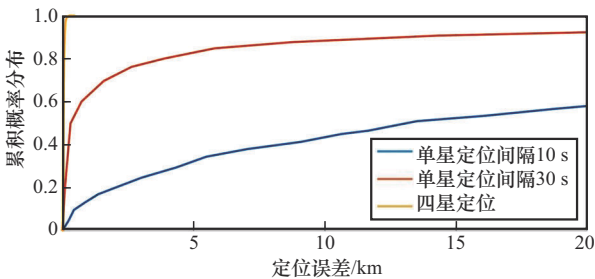


图 7 DL-TDOA 定位误差仿真结果

Multi-RTT 定位误差仿真结果如图 8 所示。可以看出，四星定位的性能好于给定采样间隔的单星定位性能。单星定位的误差范围均处于千米量级，而四星定位的最大

误差不超过 160 m。这是因为 Multi-RTT 机制下, 短的采样间隔会使得所测的 RTT 较接近, 且卫星位置变化较小, 多次测量所生成的多个球面交集扩大, 同样加剧定位的不确定性。

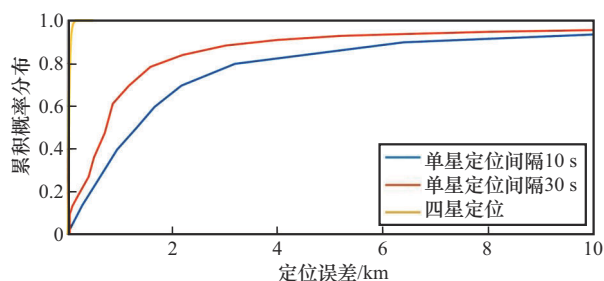


图8 Multi-RTT定位误差仿真结果

和单星定位相比, 多星定位策略通过选取用户视野内空间分布较好的卫星群, 单次测量即可捕获多组测量值, 不仅简化了测量流程, 更在定位精度上超越了受收敛时间限制而采用短间隔采样的单星定位方法, 展现出显著的性能优势。

4 结束语

本文研究了基于 5G NTN 体制的手机直连卫星定位技术, 提出了多种适合多星定位的算法, 分析了影响定位性能的因素, 并进行了定位性能仿真评估。仿真结果表明, NTN 多星定位相对于 NTN 单星定位具有更高的定位精度和更快的定位速度。可以预见, 随着低轨巨型星座卫星数量的不断增加, 多星定位将成为 NTN 定位发展的重要技术方向。此外, 随着手机直连卫星成为业界热点, 基于 NTN 的手机直连卫星多星定位技术将与通信系统深度融合, 形成通信与导航的综合服务体系, 促进星地融合领域的通信导航一体化发展。

参考文献:

- [1] 缪德山, 柴丽, 孙建成, 等. 5G NTN 关键技术研究及演进展望[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 10-21.
MIAO D S, CHAI L, SUN J C, et al. Key technologies and evolution of 5G non-terrestrial network[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(3): 10-21.
- [2] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [3] 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G 星地融合移动通信关键技术[J].

中国科学: 信息科学, 2024, 54(5): 1177-1214.

CHEN S Z, SUN S H, KANG S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2024, 54(5): 1177-1214.

- [4] 康绍莉, 缪德山, 索士强, 等. 面向 6G 的空天地一体化系统设计和关键技术[J]. 信息通信技术与政策, 2022(9): 18-26.
KANG S L, MIAO D S, SUO S Q, et al. System design and key technologies for the integrated air-space-terrestrial communication toward 6G[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2022(9): 18-26.
- [5] 王映民, 孙韶辉. 5G 移动通信系统设计与标准详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.
WANG Y M, SUN S H. Detailed explanation of the design and standard of 5G mobile communication system[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2020.
- [6] 3GPP. Study on NR positioning support: TR 38.855[S]. 2019.
- [7] 陈俊勇. 卫星多普勒定位[M]. 北京: 测绘出版社, 1983.
CHEN J Y. Satellite Doppler positioning[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1983.
- [8] KHALIFE J, NEINAVAIIE M, KASSAS Z M. The first carrier phase tracking and positioning results with starlink LEO satellite signals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(2): 1487-1491.
- [9] 3GPP. Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in NG-RAN (Release 15): TS 38.305[S]. 2018.
- [10] RP-220953, NR NTN (Non-Terrestrial Networks) enhancements [R]. 2022.
- [11] 3GPP. Study on requirements and use cases for network verified UE location for Non-Terrestrial-Networks (NTN) in NR (Release 18): TR 38.882[S]. 2022.
- [12] R1-2210952, FL Summary #4: Network verified UE location for NR NTN[R]. 2022.
- [13] RP-223534, Revised WID: NR NTN (Non-Terrestrial Networks) enhancements[R]. 2022.
- [14] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16): TR 38.821 v16.1.0[S]. 2021.
- [15] R1-2207691, FL Summary #2 for improved accuracy based on NR carrier phase measurements[R]. 2022.
- [16] RP-223534, Revised WID: NR NTN (Non-Terrestrial Networks) enhancements[R]. 2022.
- [17] YANG H, HOU X Y, JING X J, et al. Broadcast service technology empowered by integrated communication and navigation[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [18] 孙晓南, 周世东, 侯利明, 等. 存量 5G 手机直连低轨卫星通信技

术研究[J]. 信息通信技术, 2023, 17(5): 22-31.

SUN X N, ZHOU S D, HOU L M, et al. Research on technologies of existing 5G mobile phone direct accessing to LEO satellite communication[J]. Information and Communications Technologies, 2023, 17(5): 22-31.

[作者简介]



孙晓南（1974—），男，中信科移动通信技术股份有限公司总经理，长期从事移动通信新技术研究，主要研究方向为5G、卫星通信等。



周世东（1969—），男，清华大学信息技术研究院无线中心副主任、电子系教授、博士生导师，主要研究方向为无线与移动通信系统体制、扩频与码分多址技术、信道编译码技术、多天线系统与技术等。



康绍莉（1974—），女，中信科移动通信技术股份有限公司系统研究高级技术专家，长期从事地面移动通信和卫星通信的新技术研究，在中国通信标准化协会担任航空通信委员会系统组副组长。