

## 5G 多站定位精度分析与提升方法

赵飞龙<sup>1,2</sup>, 王丽莉<sup>1,2</sup>

(1. 中国移动通信集团海南有限公司, 海南 海口 571250;  
2. 新一代移动通信技术国家工程研究中心海南自贸港分中心, 海南 海口 571250)

**摘要:** RAT-dependent 是 5G 自带的依赖卫星的定位技术。3GPP 给出了单站理想条件下的定位精度克拉默-拉奥下界 (CRLB, Cramer-Rao lower bound) 并给出了多站在不同网络配置下的仿真定位精度。基于实际组网条件提出了多站定位精度的分析框架和精度范围, 并提出相应的提升方法, 实验结果表明, RAT-dependent 定位精度与组网技术紧密相关, 优化方案相对于非优化方案定位精度可提升 20%~30%。

**关键词:** 5G; RAT-dependent 定位; 定位精度

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00342

## Multi-station positioning accuracy and enhancement method for 5G

ZHAO Feilong<sup>1,2</sup>, WANG Lili<sup>1,2</sup>

1. China Mobile Group Hainan Co., Ltd., Haikou 571250, China  
2. National Engineering Research Center for New Generation Mobile Information and Communication Technology Hainan Branch, Haikou 571250, China

**Abstract:** RAT-dependent is a satellite independent positioning technology of 5G. 3GPP gives the Cramer-Rao lower bound (CRLB) of the positioning accuracy under the ideal condition of a single station and the simulation positioning accuracy of multi-station under different network configurations. Based on the actual network conditions, the analysis framework, accuracy range of multi-station positioning accuracy and the corresponding improvement method were proposed. The experimental results show that the RAT-dependent positioning accuracy is closely related to network technologies, and the positioning accuracy of the optimized scheme can be improved by 20%~30% compared with the non-optimized scheme.

**Key words:** 5G, RAT-dependent positioning, positioning accuracy

### 0 引言

基于全球导航卫星系统 (GNSS, global navigation satellite system) 的定位由终端设备执行, 按需将定位结果上报给上层应用系统, 在地面定标网络的辅助下, 定位精度已经达到厘米级<sup>[1]</sup>。但在许多应用场景中, 如低功耗设备定位、卫星受阻挡的室内定位和终端无感知的被动定位, 需要由网络执行

终端定位。3GPP 长期致力于无 GNSS 辅助的精准定位技术研究, 3GPP Release16 (Rel-16) 定义了 5G 的定位架构并将 3GPP 定位技术统称为 RAT-dependent 定位技术 (也称为带内定位技术), 发布了一些相关定位的精度技术报告<sup>[2-10]</sup>。Rel-17 提出了增强 RAT-dependent 定位精度的相关技术方案<sup>[11]</sup>, 明确了定位精度的具体目标为 90% 的情况下水平定位精度不低于 50 m。但是根据 3GPP 的技术

收稿日期: 2023-02-21; 修回日期: 2023-04-18

通信作者: 赵飞龙, somethingnothing@163.com

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2022YFB3900011)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB3900011)

报告<sup>[2-10]</sup>，高通等公司认为当前的定位技术不能满足预期目标。文献[1,12-13]综述了 RAT-dependent 定位技术的发展。文献[14-15]初步分析了 RAT-dependent 定位精度及网络参数的影响。文献[16-17]分析了 RAT-dependent 定位技术发展路线和系统架构演进。目前，相关的研究大多基于 3GPP 单站理想条件下的定位精度克拉默-拉奥下界 (CRLB, Cramer-Rao low bound) 开展，未能给出真实网络条件下，多站联合定位可以得到的实际定位精度。本文基于实际组网条件的约束，给出多站定位精度的分析框架和精度范围，并提出相应的提升方法。

### 1 RAT-dependent 定位原理

3GPP RAT-dependent 定位技术框架如图 1 所示，终端测量多个基站发送和接收点 (TRP, transmission and reception point) 的到达时间 (TOA,

time of arrival)，进而计算出各相邻基站  $TRP_i$  与参考基站  $TRP_1$  之间的参考信号时间差 (RSTD, reference signal time difference)。基于下行链路 RSTD 的定位技术 (如观测到达时间差 (OTDOA, observed time difference of arrival)) 和基于上行链路 RTOA 的定位技术 (如上行链路到达时间差 (UTDOA, uplink time difference of arrival))，在定位方法上完全一样，本文统一称为到达时间差 (TDOA, time difference of arrival)。UE 或 gNB 将生成的测量报告 (MR, measurement report) 上报到定位管理功能 (LMF, location management function) 进行定位计算<sup>[18]</sup>。在 LMF 上，可以形成 UE 到两个 TRP 的距离差值 (即 TDOA) 为定值的双曲线轨迹，构建两条这样的双曲线，其交点即终端的位置。因此，UE 要求至少能测量到两个异址的相邻 TRP 的定位参考信号 (PRS, positioning reference signal)。

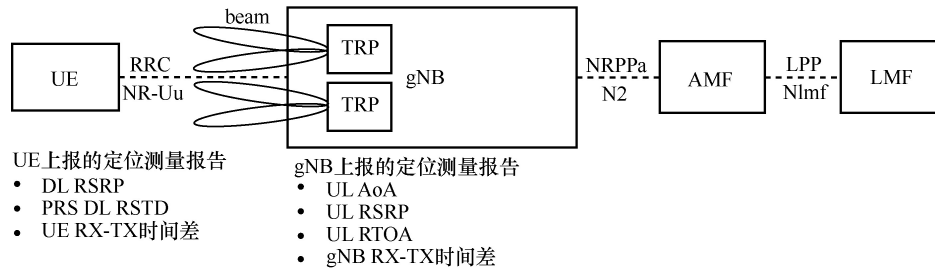


图1 3GPP RAT-dependent 定位技术框架

TDOA 测量过程如图 2 所示， $TRP_i$  在偏离标准时钟  $\delta_i$  时刻发出一个 PRS，经过  $d_i$  传播距离后到达终端接收天线处，由于多径效应到达终端接收天线处存在时延色散  $\tau$ ，因此  $TOA_i$  为

$$TOA_i = \frac{1}{c} d_i + \delta_i + \tau_i \quad (1)$$

其中， $c$  为电磁波在空气中的传播速度。那么，终端检测  $TRP_1$  到  $TRP_i$  的  $RSTD_{i,1}$  为式(1)两个 TOA 的差值，表示为

$$RSTD_{i,1} = \frac{1}{c} (d_i - d_1) + (\delta_i - \delta_1) + (\tau_i - \tau_1) \quad (2)$$

代入  $TRP_i$  经纬度  $(x_i, y_i)$  和终端经纬度  $(x_t, y_t)$ ，式(2)可以进一步改写为

$$\sqrt{(x_t - x_i)^2 - (y_t - y_i)^2} - \sqrt{(x_t - x_1)^2 - (y_t - y_1)^2} = c \cdot (RSTD_{i,1} - \Delta\delta_{i,1} - \Delta\tau_{i,1}) \quad (3)$$

根据式(3)，单站定位的误差主要来自工参误差、RSTD 误差、同步误差和不同的时延色散 4 个部分。

因此，多站定位算法就是解式(3)的方程组，求解  $(x_t, y_t)$ 。根据可测量到的 TRP 个数，方程组有可能超定，也可能欠定。文献[19]已经给出了相应的解决办法。

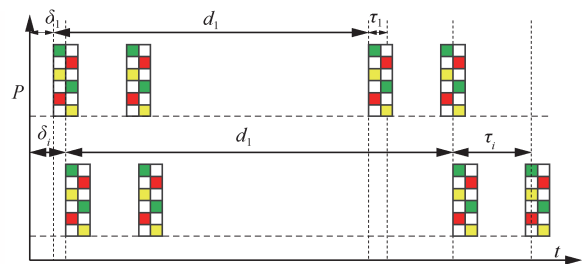


图2 TDOA 测量过程

### 2 多站定位精度分析

根据文献[20]，多站定位总误差  $\sigma_{pos} = GDOP \times \sigma_{single}$ ，其中 GDOP 为几何精度衰减因子 (GDOP, geometric dilution of precision) 表征多站联合定位可降低单站测距误差的影响。测量到的基站

数越多, GDOP 越小, 定位精度越高。

单站定位精度  $\sigma_{\text{single}}$  与 RSTD 精度  $\sigma_{\text{RSTD}}$ 、多径时延色散  $\sigma_{\text{MP}}$ 、基站间的同步精度  $\sigma_{\text{BS}}$  和基站数据库精度  $\sigma_{\text{ant}}$  均有关<sup>[21-22]</sup>。一般, 4 个因素统计不相关, 则单站定位精度可以表示为

$$\sigma_{\text{single}} = \sqrt{\sigma_{\text{RSTD}}^2 + \sigma_{\text{BS}}^2 + \sigma_{\text{ant}}^2 + \sigma_{\text{MP}}^2} \quad (4)$$

## 2.1 RSTD 定位精度

根据图 2, 终端测量的参考信号时间差  $\text{RSTD}_{i,l} = \text{TDOA}_{i,l} + \Delta\epsilon_{i,l}$  可以分解为两大部分, 用于计算终端到  $\text{TRP}_1$  和  $\text{TRP}_i$  之间的  $\text{TDOA}_{i,l}$  和测量误差  $\Delta\epsilon_{i,l}$ , 即

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{RSTD},i,l}^2 &= \sigma_{\text{TDOA},i,l}^2 + \Delta\epsilon_{i,l}^2 = \\ 4\sigma_{\text{TOA},i,l}^2 + \Delta\epsilon_{i,l}^2 &\geq 4c^2\text{CRLB} + \Delta\epsilon_{i,l}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 测量误差  $\Delta\epsilon_{i,l}$  为终端测量 PRS 到达时刻的误差, 与 5G 网络的时域基本时间单位有关, 可以表示为

$$\Delta\epsilon_{i,l} = cT_c = \frac{c}{\Delta f_{\text{max}} N_{\text{FFT}}} \quad (6)$$

其中,  $T_c$  为 3GPP 38.211<sup>[23]</sup> 定义的 5G 最小时间单位, 3GPP 规定  $\Delta f_{\text{max}}$  最大子载波间隔为 480 kHz,  $N_{\text{FFT}}$  傅里叶变换级数取值 4096, 因此  $T_c$  为 0.509 ns。

TDOA 误差与 PRS 的 TOA 测量有关, 精度受限于信道的多径效应, 视距 (LOS, line of sight) 测量精度高, 非视距 (NLOS, non-line of sight) 测量精度低, 且多径程度越严重测量精度越差。在 TOA 距离误差估算方面, 文献[24]给出了 TOA 距离估计的标准差上界为 1 667 m。文献[25]假设加性白高斯噪声 (AWGN, additive white Gaussian noise) 信道, 不考虑各种干扰、多径和 NLOS 传播导致的测量误差, 给出了 TOA 距离估计标准差的 CRLB 为 1.591 m。文献[2-10]给出了不同公司提交的基于系统仿真的 TDOA 距离估计的评估结果, 在考虑网络同步误差 50 ns 的情况下, 在 80% 的位置概率下可达 40~65 m。

根据文献[26-27],  $\sigma_{\text{TOA}}$  的 CRLB 为

$$\text{CRLB}(\tau) = \frac{1}{\text{SNR} \cdot 8\pi^2 \cdot \Delta f^2 \cdot \sum_{l=0}^{N_{\text{PRs}}^{\text{PRs}}-1} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} k^2 |a_{k,l}|^2} \quad (7)$$

其中, SNR 为信道信噪比,  $\Delta f$  为子载波带宽 (单位: kHz),  $N_{\text{PRs}}^{\text{PRs}}$  为一个定位周期内 PRS 可使用的正交

频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 符号数,  $N$  为 PRS 带宽内的子载波数,  $k$  为频域子载波序号,  $l$  为时域符号序号, 当  $\text{RE}(k,l)$  有 PRS 时,  $|a_{k,l}| = 1$ , 否则  $|a_{k,l}| = 0$ 。

对于典型的 5G 网络<sup>[2-4]</sup>,  $k$  和  $a_{k,l}$  为 1, 式(7)可以改写为

$$\text{CRLB}(\tau) = \frac{3}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{\text{SNR}\Delta f^2} \cdot \frac{1}{N_{\text{PRs}}^{\text{PRs}} N \left( \frac{N^2}{2} + 1 \right)} \quad (8)$$

TOA 的定位精度  $\sigma_{\text{TOA}}$  与  $\Delta f$ 、 $N_{\text{PRs}}^{\text{PRs}}$  和  $N$  有关, 提升定位精度可以通过增大  $\Delta f$ 、 $N_{\text{PRs}}^{\text{PRs}}$  和  $N$  来实现。

5G 采用 Massive MIMO 阵列天线, 其信道硬化后  $\text{SNR} = \frac{|h_0|^2}{\sigma_{\text{noise}}^2}$ ,  $\sigma_{\text{noise}}^2 = N_f K T N \Delta f$  为 PRS 带宽内的热噪声功率, 其中  $K$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $N_f$  为接收机的噪声放大系数, 式(8)又可以进一步改写为

$$\text{CRLB}(\tau) = \frac{3}{4\pi^2} \cdot \frac{N_f K T}{|h_0|^2} \cdot \frac{1}{\Delta f N_{\text{PRs}}^{\text{PRs}} \left( \frac{N^2}{2} + 1 \right)} \quad (9)$$

由于  $N = \text{CBW}_{\text{PRs}} / \Delta f$ ,  $N_{\text{PRs}}^{\text{PRs}} = L_{\text{PRs}} / K_{\text{comb}}^{\text{PRs}}$ , 式(9)可以进一步改写为

$$\text{CRLB}(\tau) = \frac{3}{2\pi^2} \cdot \frac{N_f K T}{|h_0|^2} \cdot \frac{K_{\text{comb}}^{\text{PRs}}}{L_{\text{PRs}}} \cdot \frac{\Delta f}{\text{CBW}_{\text{PRs}} + 2\Delta f / \text{CBW}_{\text{PRs}}} \quad (10)$$

由于  $\text{CBW}_{\text{PRs}} \gg \Delta f$ , 式(10)可以简化为

$$\text{CRLB}(\tau) \approx \frac{3}{2\pi^2} \cdot \frac{N_f K T}{|h_0|^2} \cdot \frac{K_{\text{comb}}^{\text{PRs}}}{L_{\text{PRs}}} \cdot \frac{\Delta f}{\text{CBW}_{\text{PRs}}} \quad (11)$$

由于  $\Delta f$  典型值 30 kHz 远小于 PRS 信号占用的公共资源块带宽  $\text{CBW}_{\text{PRs}}$  (典型值为 24 MHz), 所以增大子载波带宽  $\Delta f$  对提升定位精度基本没有作用。 $|h_0|^2$  为信道冲击响应, 与信道特性有关, 增加天线阵子数和校正多普勒频偏不会提升定位精度。可选的方法是在时域或频域增加 PRS 资源。

1) 在频域增加 PRS 可使用的子载波数量  $N$ , 从式(11)可知增加  $\text{CBW}_{\text{PRs}}$  载波带宽  $n$  倍, 精度也仅提升  $1/\sqrt{n}$  倍。在实际网络中, 一般都会在满足测量要求的前提下尽可能减小 PRS 的频域资源以降

低无效的开销。

2) 在时域增加 PRS 可使用的符号数  $N_{\text{sym}}^{\text{PRS}}$ ，增加单时隙 PRS 符号数  $L_{\text{PRS}}$  和采用小的梳齿尺寸  $K_{\text{comb}}^{\text{PRS}}$  都可以提升定位精度，网络设定  $L_{\text{PRS}}$  必须是  $K_{\text{comb}}^{\text{PRS}}$  的整数倍可保证相干合成后的自相关值只有一个主峰，以提高定位精度。为补偿增加资源单元 (RE, resource element) 来提升定位性能带来的开销，可以采用大的 PRS 定位周期  $T_{\text{per}}^{\text{PRS}}$  和减少重复次数  $T_{\text{rep}}^{\text{PRS}}$ ，其负面影响是会增加 UE 的测量响应时间  $T_{\text{TFF}}$  和定位的不确定性。5G 网络参数设置见表 1。

参数	3GPP 规范名称	取值
工作频段		2 600 MHz
载波带宽	$\text{CBW}_{\text{PRS}}$	100 MHz
子载波带宽 (SCS)	$\Delta f$	30 kHz
PRS 占用 RB 数 <sup>①</sup>	$N_{\text{RB}}^{\text{PRS}}$	24
梳齿尺寸	$K_{\text{comb}}^{\text{PRS}}$	6
PRS 单时隙符号数	$L_{\text{PRS}}$	6
PRS 发射周期	$T_{\text{per}}^{\text{PRS}}$	160 ms
PRS 重复次数	$T_{\text{rep}}^{\text{PRS}}$	1

注：①  $N = 12 \cdot N_{\text{RB}}^{\text{PRS}}$

## 2.2 多径时域色散

TDOA 的定位精度目前都是基于仿真给出的评估，各个机构发布的数值差异很大<sup>[2-10]</sup>。仿真的精度受信道模型的影响很大，LOS 信道比 NLOS 信道的定位精度要高，信道的时域色散越小，定位精度越高。目前讨论的是基于扩展步行信道模型 A (EPA, extended pedestrian A) EPA1 和扩展典型城市 (ETU, extended typical urban) ETU1 两个信道模型的仿真结果<sup>[20]</sup>，实际情况往往要复杂得多 (特别是密集城区的反射、折射造成的多径带来的时域色散)，定

位精度也会下降很多。时域的色散即频域的选择性衰落，大带宽可以更好地区分两个不同的路径，例如，20 MHz 可以较好区分相差 10 m 左右两个路径<sup>[27]</sup>，因此带宽越大定位精度也越高。但为克服 PRS 自身的频域选择性衰落，可以采用小的  $K_{\text{comb}}^{\text{PRS}}$  和大  $T_{\text{per}}^{\text{PRS}}$ ，甚至小的  $\Delta f$  设置。

多径时延色散带来的定位误差为

$$\sigma_{\text{MP}} = cT_d \quad (12)$$

其中， $T_d$  为距离  $d$  km 处的时延色散中值，其值小于循环前缀 (CP, cyclic prefix) 取值。

## 2.3 基站间的同步精度

TDOA 的测量精度主要取决于基站间的同步时间精度，高精度的定位需要基站间有 ns 级的同步精度，3GPP 要求时钟同步精度不低于 100 ns<sup>[28]</sup>。由于从时钟源到基站天线口还存在射频放大、馈线传输等时延，GPS 时钟基本可满足要求，北斗和 IEEE 1588v2 则存在较大误差。主要时钟定时精度<sup>[29]</sup>见表 2。

基站间时钟不同步带来的定位误差为

$$\sigma_{\text{BS}} = c\Delta\delta \quad (13)$$

其中， $\Delta\delta$  为同步误差，实际网络时钟同步误差多为 260~3 000 ns，理想的定位精度需要在时钟同步精度提升到 50 ns 左右才能获得。

## 2.4 基站数据库精度

高精度的 TDOA 需要 LMF 保存高精度的基站数据库 (包括经纬度和站高)，理想情况下要求站址偏差小于 5 m。这要求在登记基站的工参经纬度时必须严格要求精确到 0.1 s (相当于 3 m)。因为式(3)假设 TRP 和终端处于同一水平面，这要求 TRP 站高 (相比终端的高度) 要足够小 (一般要求不超过 80 m)，否则受地球曲率半径和大气折射率的影响斜距与平距之间将引入较大的误差。TRP 经纬度和站高对定位精度的影响如图 3 所示。

对比项	GPS	基于 NTP <sup>①</sup> 的网络时钟	北斗	原子钟	IEEE 1588v2
典型授时精度	20 ns	10 ms	100 ns	10 ns	100 s
锁定时间	40 s	30 ns	60 s		60 ns
可靠性	中	高	中	高	高

注：①网络时钟协议 (NTP, network time protocol)

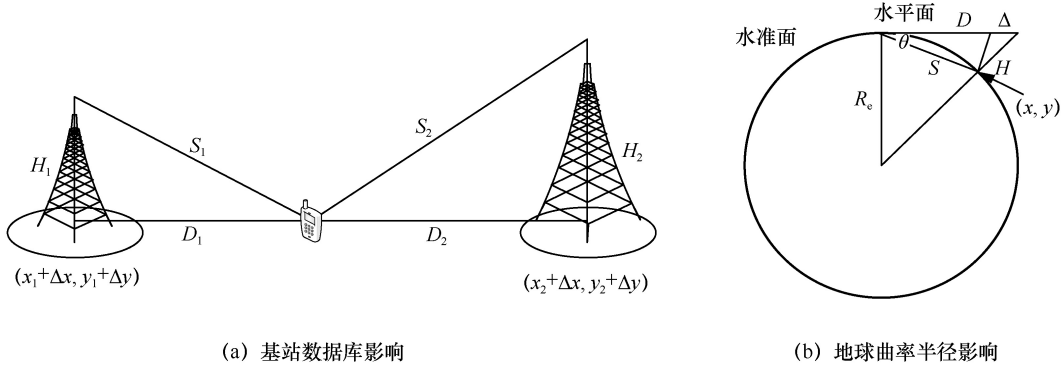


图3 TRP 经纬度和站高对定位精度的影响

地球曲率半径形成的非平面化带来的定位误差为

$$\sigma_{\text{height}}^2 = \frac{H^2}{D} = \frac{D^3}{(2R_e)^2} \approx \frac{(H/\theta)^3}{(2R_e)^2} \approx \left(\frac{H^\alpha}{2R_e}\right)^2 \quad (14)$$

基站经纬度测量误差带来的定位误差为

$$\sigma_{\text{ant}}^2 = \frac{16}{9}\sigma_{\text{latlong}}^2 + \left(\frac{H^\alpha}{2R_e}\right)^2 \quad (15)$$

其中,  $\sigma_{\text{latlong}}$  为基站经纬度误差, 与所使用 GNSS 的定位能力有关 (见表 2)。使用无线干放、分布式天线、中继等设备增加了 TRP 与终端之间的距离, 需要对经纬度进行相应的修正。 $H$  为基站高度,  $\alpha$  为常数通常取值为 2.6,  $R_e$  为地球半径 6371 km。

### 2.5 测量到的基站数量

基于 5G PRS 的 TDOA 定位要求参考基站 TRP 和相邻基站 TRP 的 SINR > -6 dB<sup>[29]</sup>, 因此小于 2 个异局址 TRP 的测量采样点比例非常多<sup>[19]</sup>。提高可测量到的异局址 TRP 数可以较好地减小 TDOA 的测量偏差和方差。为估算不同数量异局址 TRP 的定位精度, 引入 GDOP。

根据文献[20], 多站测量的误差缩放因子为

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{P})} \quad (16)$$

其中,  $\mathbf{P}$  为式(3)构成定位方程组系数矩阵的迹。3 个 TRP GDOP 典型值是 1.8, 5 个 TRP GDOP 典型值是 0.9, 即要测量到 5 个异局址 TRP 才能有效提升定位精度, 但这在实际网络中往往难以满足。

### 2.6 定位精度分析

为估算综合定位误差, 现假设一个同频的 5G 网络, 所有 gNB 的空口时间同步精度小于 50 ns, 天线经纬度误差小于 3 m, 平均站高 40 m, 多径传播时延小于 0.1  $\mu\text{s}$ 。UE 测量可到 5 个非同站小区且 PRS SINR 均大于 -13 dB。定位精度计算如下。

对于子载波带宽为 30 kHz、Comb-6 图样的 PRS, TOA 测量的 CRLB=3.56 m。

$$\sigma_{\text{RSTD}} = \sqrt{4\sigma_{\text{TOA}}^2 + \Delta\varepsilon^2} = 7.12 \text{ m}$$

$$\sigma_{\text{BS}} = 50 \text{ ns} \times 3 \times 10^8 = 15 \text{ m}$$

$$\sigma_{\text{ant}} = \sqrt{\left(\frac{4}{3} \times 3\right)^2 + \left(\frac{40^{2.6}}{2} / 6371\right)^2} = 4.16 \text{ m}$$

$$\sigma_{\text{MP}} = 0.1 \mu\text{s} \times 3 \times 10^8 = 30 \text{ m}$$

$$\text{总链路误差 } \sigma = \sqrt{\sigma_{\text{RSTD}}^2 + \sigma_{\text{BS}}^2 + \sigma_{\text{ant}}^2 + \sigma_{\text{MP}}^2} = 34.54 \text{ m}$$

测量到 5 个异址 TRP, GDOP=0.9

$$\sigma_{\text{pos}} = \text{GDOP} \cdot \sigma = 0.9 \times 34.54 = 30.15 \text{ m}$$

假设定位结果呈高斯分布, 90%对应的百分位数 1.645, 因此相应的定位精度为: 1.645×30.15=51.14m@90%。该结论与 3GPP TR38.855<sup>[2]</sup>中考虑网络同步误差 50 ns 的宏基站定位误差 (UMa Case9~12) 相当接近。

## 3 定位精度提升方法

从第 2.6 节的分析可知, 定位精度主要受限于 TRP 同步定时精度、可测量到的基站数及无线环境的多径效应, 上述的 50 m 定位精度只能在理想的条件下实现。实际网络中 TRP 同步定时精度仅为 3  $\mu\text{s}$ 、超过 30%的 MR 采样点少于 2 个异局址 TRP、密集城区的多径效益显著 (Rank>1 的比例超过 60%), 因此 3GPP Rel-17 的设计目标水平精度 50 m@80%实际难以达成。因此, 针对三大影响因素进行优化提升, 才能在局部区域达成预期目标。

### 3.1 提升 TOA 估计精度

加大子载波带宽和减小多普勒频移对定位提升作用基本可以忽略, 优化表 1 参数对提升定位精度有较大的帮助。除此之外做好 PRS 规划则尤为重

要<sup>[30]</sup>。PRS 规划主要是为了避免多个小区的 PRS 出现冲突和混淆,良好的 PRS 隔离度对于 OTDOA 的定位精度意义重大。3GPP 为 PRS 提供了 3 层隔离措施。

1) 码域: 每个小区赋予一个正交的伪随机四相移相键控(QPSK, quadrature phase-shift keying)序列,与 OFDM 的符号索引、时隙索引和 PRS ID 有关。

2) 频域: PRS 有 6 个频域偏置值(mod(PCI,6)),相邻小区应采用不同的频域偏置。

3) 时域: 当频域出现冲突时,轮流发射 PRS 以增加 PRS 的复用因子,其代价是增加了  $T_{\text{TFF}}$  时间。静默参数有静默图案(静默比特字符串)和静默周期。

CRLB 估计的前提是终端与基站之间存在一条 LOS 径,实际网络中多为 NLOS 径。因此,文献[2-10]的仿真结果都远大于 CRLB。提升 TOA 估计精度等价于提升 LOS 径的比例。5G 采用了大规模阵列天线,网络通过利用多径效应实现 MIMO,这天然与提升定位精度相冲突。因此,对于 PRS,发送时应采用波束扫描方案,接收时网络侧要设置为采用最大比合并,而在定位计算中要尽量选择流数为 1 的采样点。

### 3.2 增加基站数量

做好 PRS 规划有助于增加可测量到的相邻 TRP 数量,但最根本的还是要增加基站密度,这既可以提高 LOS 径的概率又可以提高异址 TRP 数量。以成熟的 4G 网络为例,约 30%~50%的 MR 采样点的 TRP 数量少于 2 个(与设置的起测门限有关),要满足 90%的定位有 3 个以上 TRP 需要增加 2 倍基站数量。该方法在室内分布式 TRP 下有显著的提升效果,但对于室外宏基站,则受限于庞大的投入而

失去意义。一个可行的方案就是充分利用已经建设的 4G 基站和其他运营商的 5G 基站。3GPP 提供了这样的测量方法,文献[28]规定终端至少可以测量 7 个 5G 频点和至少 7 个 4G 频点,且总 TRP 数不超过 64 个(不考虑小区合并等复杂组网)。

### 3.3 提升 TRP 时钟同步精度

5G 下行采用各基站向 GNSS 同步来实现基站间时钟同步,但受限于信号干扰、GNSS 接收器能力、时钟信号传输等因素,3GPP 仅要求 5G 网络的 TRP 间的下行时钟同步精度为  $3 \mu\text{s}$ (相当于 900 m),显然这无法满足所需的定位精度要求。室内分布式 TRP 由于同站的多个 TRP 可以同时接收到一个 UE 的 PRS,利用 UTDOA 定位技术可以消除同步时间差而获得理想的精度。对于室外宏基站,一方面,采用云无线接入网(CRAN, cloud radio access network)组网,多个基站的 TRP,共用一套基带资源池(BBUP, baseband unit pool),可以借鉴室内定位的方法提升定位精度;另一方面,两个 CRAN 的 DU(DU, data unit)之间可以通过同步线统一时钟源进一步实现更好的同步性能。

### 3.4 定位精度提升分析

为验证上述 3 个定位精度提升方法的有效性,搭建的实验站点拓扑结构如图 4 所示。6 个 TRP 异址成环形分布,每 3 个 TRP 等距连接同一个 DU,再连接到同一个控制单元(CU, control unit)。多站云化方案共用一个 CU,改进的云化方案在 DU 之间增加一条同步线,将两个 DU 配对为主从模式,在主 DU 接入 GPS 时钟,从 DU 则通过同步线从主 DU 获得时钟,从而使得不同 DU 下的多个 TRP 间有更好的同步。

基于表 1 的参数开展 5 个实验。以实验 1 为基

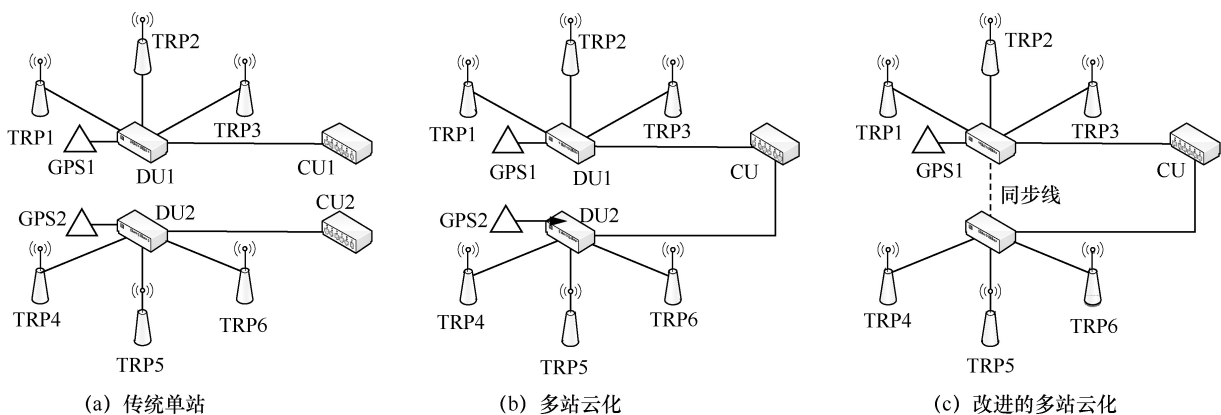


图 4 实验站点拓扑结构

准, 实验 2 对比实验 1 在单站可测量到 3 个异址 TRP, 且优化 LOS 径时的定位精度提升; 实验 3 在实验 2 的基础上将可测量得到的异址 TRP 数量增加到 6 个, 分析 GDOP 优化的效果; 实验 4 在实验 3 的基础上通过云化将 TRP 间时钟同步精度从  $\pm 520$  ns 提升到  $\pm 260$  ns, 验证 TRP 间的时钟同步精度对定位精度的影响; 实验 5 在实验 4 的基础上利用同步线技术结合时钟人工校准进一步将 TRP 间时钟同步精度提升到  $\pm 65$  ns, 分析理想时钟同步精度下的极限定位能力。

每个实验分别在 2 种典型的无线环境(密集城区和开阔农村)下开展, 实验时终端以 40 km/h 的移动速度沿基站做绕圈测试, 从靠近基站 20 m 开始向外移动, 直到链路中断, 以遍历不同的覆盖电平。每个实验采集 10 000 个 MR 同时记录对应点的 GPS 定位结果。取各个实验的 RAT-dependent 定位与 GPS 定位结果做对比, 不同方案的定位方差见表 3。

对比实验 1 和实验 2, 优化 LOS 径提升定位精度仅 5%, 在密集城区相对有效, 在开阔农村基本无效。对比实验 2 和实验 3, 增加基站数量能提升定位精度 50%~100%, 效果最为显著。对比实验 3 和实验 4, TRP 间时钟高同步能提升定位精度 10%~15%, 效果较为显著。对比实验 4 和实验 5, 可以看到高同步 TRP 超过 3 个之后, 提升幅度在密集城区相比开阔农村更有价值。实验 3 是当前实际通信网络的组网技术, 实验 5 通过采用云化、加同步线等组网技术的优化, 定位精度较实验 3 可整体提升 20%~30%。

综合来看, 提升 FAP(优化 LOS 径)、提升 GDOP(增加可测得 TRP 数量)、提升 TRP 间时钟同步精度 3 种方案在开阔农村的定位精度都要高于密集城区。较常规组网, 通过优化组网技术(如云化组网)

使得可以测到更多的 TRP, 采用时钟同步线连接两个 DU 使得 TRP 间时钟同步精度更高, 定位精度得以最大化提升, 但在密集城区仍受限于多径效应, 定位精度不如开阔农村。

## 4 结束语

RAT-dependent 定位技术在基站高度同步、密集部署且存在 LOS 径的场景下可以获得较为理想的定位精度。影响定位精度的最大因子是基站时钟同步精度, 其次是可测量的异址 TRP 数量, 最后是 LOS 径。云化是超密集组网的必然趋势, 但会因为远端无线单元(RRU, remote radio unit)与 BBU 距离差距显著导致同步精度下降。因为, 在当前以 Sub 6 GHz 频段建设的 5G 网络在许多场景下 TRP 间时钟同步精度只能保证控制在  $3 \mu\text{s}$  以内<sup>[31]</sup>, 即使采用线路自动补偿等技术, 也不会超过 260 ns, 实际定位精度在 100 m 左右。未来毫米波频段的引入、载波带宽的增加以及密集分布式 TRP 的建设, 都为提升定位精度创造了较好条件, 但仍需要解决好基站间的高度同步问题, 将 TRP 间时钟同步精度控制在 50 ns 以内才能获得理想的定位效果。

## 参考文献:

- [1] 张平, 陈昊. 面向 5G 的定位技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 1-12.  
ZHANG P, CHEN H. A survey of positioning technology for 5G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(5): 1-12.
- [2] 3GPP. Study on NR positioning support: TR 38.855 V16.0.0[S]. 2019.
- [3] HiSilicon. Performance evaluation for NR positioning: R1-1901577[EB]. 2019.
- [4] Qualcomm. Evaluation results for RAT-dependent positioning techniques: R1-1903342[EB]. 2019.
- [5] Samsung. System-level performance evaluation for RAT-dependent positioning techniques: R1-1902246[EB]. 2019.

表 3 不同方案的定位方差

方案	实验 1 单站 TOA (无优化 LOS 径)	实验 2 单站 TOA (有优化 LOS 径)	实验 3 多站 OTDOA (非云化)	实验 4 多站 OTDOA (云化)	实验 5 改进 OTDOA
对应站点拓扑	图 4(a)	图 4(a)	图 4(a)	图 4(b)	图 4(c)
TRP 时钟同步精度	$\pm 190$ ns	$\pm 190$ ns	$\pm 520$ ns	$\pm 260$ ns	$\pm 65$ ns
提升技术	对比基准	提升 FAP <sup>①</sup>	+提升 GDOP	++提升同步精度	++进一步提升同步精度
密集城区-方差	173.02	126.75	83.31	66.11	63.23
开阔农村-方差	111.67	110.22	69.56	58.74	58.03

注: ①第一到达路径(FAP, first arrival path)

- [6] LG Electronics. Discussion on performance evaluation for RAT-dependent positioning techniques: R1-1902102[EB]. 2019.
- [7] Vivo. Evaluation for RAT-dependent positioning techniques: R1-1901717[EB]. 2019.
- [8] ZTE, Sanechips. System-level evaluations on RAT-dependent positioning: R1-1901781[EB]. 2019.
- [9] Ericsson. System level performance evaluation for RAT-dependent positioning techniques: R1-1903142[EB]. 2019.
- [10] CATT. Updated system-level performance evaluation for NR positioning: R1-1903222[EB]. 2019.
- [11] 3GPP. Study on NR positioning enhancements: TR38.857 V17.0.0[S]. 2021.
- [12] 张毅, 徐昌庆, 万群. 移动网络定位研究进展[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(2): 1-11.  
ZHANG Y, XU C Q, WAN Q. Research progress in mobile network positioning[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(2): 1-11.
- [13] ZEKAVAT S A R, BUEHRER R M. Handbook of position location: theory, practice, and advances[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [14] 张建国, 徐恩, 周鹏云, 等. 基于 OTDOA 的 5G 定位性能综合分析[J]. 邮电设计技术, 2021(5): 38-42.  
ZHANG J G, XU E, ZHOU P Y, et al. Comprehensive analysis of 5G positioning performance based on OTDOA[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021(5): 38-42.
- [15] HUANG S Y, CHEN H M, WANG B X, et al. Positioning performance evaluation for 5G positioning reference signal[C]//Proceedings of 2022 2nd International Conference on Frontiers of Electronics, Information and Computation Technologies (ICFEICT). Piscataway: IEEE Press, 2022: 497-504.
- [16] 洪学敏, 许雪婷, 彭敖, 等. 基于 5G 移动通信系统融合定位的关键技术与系统架构演进[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(3): 571-585.  
HONG X M, XU X T, PENG A, et al. Key technologies and system architecture evolution of fusion positioning based on 5G mobile communication systems[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, 60(3): 571-585.
- [17] DWIVEDI S, SHREEVASTAV R, MUNIER F, et al. Positioning in 5G networks[C]//Proceedings of IEEE Communications Magazine. Piscataway: IEEE Press, 2021: 38-44.
- [18] ZTE, Sanechips. RN positioning impacts on NRPPa: R3-19663[EB]. 2019.
- [19] 陈敏. 一种新的 MR 三圆定位算法的实现与应用[J]. 信息通信, 2019, 32(9): 34-37.  
CHEN M. Research and application of new tri-circle location algorithm based on measurement report[J]. Information & Communications, 2019, 32(9): 34-37.
- [20] 杜金香, 张本茂. 基于 TOA 的水下目标定位算法克拉美罗界[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(5): 871-877.  
DU J X, ZHANG B M. Cramér-Rao lower bound of target localization method based on TOA measurements[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(5): 871-877.
- [21] Huawei, HiSilicon. Error source for NR RAT-dependent positioning: R1-2205869[EB]. 2022.
- [22] Xiaomi. Error source for NR RAT-dependent positioning integrity: R1-2206650[EB]. 2022.
- [23] 3GPP. Physical channels and modulation: TS38.211 V17.2.0[S]. 2022.
- [24] Huawei. DL and UL reference signals for NR positioning: R1-1904004[EB]. 2020.
- [25] Qualcomm. Evaluation results for RAT-dependent positioning techniques: R1-1903021[EB]. 2019.
- [26] CATT. Further discussion of NR RAT-dependent DL positioning: R1-1901980[EB]. 2020.
- [27] LUAND. Fundamental performance limits on time of arrival estimation accuracy with 5G radio access[EB]. 2017.
- [28] 3GPP. Measurements: TS36.214 V16.2.0[S]. 2021.
- [29] MENSING C, PLASS S. Positioning algorithms for cellular networks using TDOA[C]//Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings. Piscataway: IEEE Press, 2006: IV.
- [30] FERRE R M, SECO-GRANADOS G, LOHAN E. Positioning reference signal design for positioning via 5G[EB]. 2019.
- [31] 3GPP. Requirements for support of radio resource management: TS 38.133 V17.7.0[S]. 2022.

## [作者简介]



赵飞龙 (1977- ), 男, 博士, 中国移动通信集团海南有限公司正高级工程师, 主要研究方向为电磁波传播及其应用、移动通信、算力网络。



王丽莉 (1976- ), 女, 中国移动通信集团海南有限公司高级工程师, 主要研究方向为网络安全、算力网络、人工智能。