SL定位方法性能的综合分析

Comprehensive Analysis of SL Positioning Method Performance

张建国[1]，王　森[2]，李益锋[1]，杨东来[1]（1. 华信咨询设计研究院有限公司，浙江 杭州 310052；2. 中讯邮电咨询设计院有限公司，北京 100048）
Zhang Jianguo[1]，Wang Sen[2]，Li Yifeng[1]，Yang Donglai[1]（1. Huaxin Consulting Co.，Ltd.，Hangzhou 310052，China；2. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co.，Ltd.，Beijing 100048，China）

摘　要：
介绍了SL定位技术的需求和NG-RAN定位总体架构，分析了SL定位方法可以提供绝对位置、相对位置或测距信息，并对SL-RTT、SL-TOA、SL-TDOA和SL-AOA 4种定位方法进行了详细分析。最后对SL定位方法的性能进行了分析，并提出了在不同定位场景选择SL定位方法的具体方案建议。

关键词：
定位；SL-RTT；SL-TOA；SL-TDOA；SL-AOA
doi：10.12045/j.issn.1007-3043.2026.10.007
文章编号：1007-3043（2026）10-0042-06
中图分类号：TN929.5
文献标识码：A
开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

Abstract：
It introduces the SL positioning requirements and NG-RAN positioning overall architecture. Secondly, it analyzes that SL positioning methods can provide absolute positioning, relative positioning and ranging, and provides a detailed analysis on four positioning methods: SL-RTT, SL-TOA, SL-TDOA, and SL-AOA. Finally, it analyzes the performance of SL positioning methods and proposes specific suggestions for selecting SL positioning methods in different positioning scenarios.

Keywords：
Positioning；SL-RTT；SL-TOA；SL-TDOA；SL-AOA

引用格式：张建国，王森，李益锋，等. SL定位方法性能的综合分析[J]. 邮电设计技术，2026（10）：42-47.

1 概述

无线定位技术分为卫星定位、蜂窝网定位、无线局域网定位以及其他定位技术四大类。由于蜂窝网的覆盖范围较广，在室内也能完成定位，基于蜂窝网的定位技术应用范围越来越广[1]。LTE在Rel-9引入了定位参考信号（Positioning Reference Signal，PRS），可以支持多种定位方法，开创了蜂窝网高精度定位的先河。在Rel-16中，NR的下行方向新增了PRS，上行方向新增了定位探测参考信号（Sounding Reference Signal，SRS），在提高定位精度的同时降低了UE功耗；3GPP在Rel-18中制定了直通链路（Sidelink，SL）定位技术规范，进一步扩大了定位技术的应用场景。

SL定位是通过测量PC5接口上的SL定位参考信号（SL Positioning Reference Signal，SL-PRS），以获得UE绝对位置、相对位置或测距的定位技术[2]。

SL定位技术支持车联万物（Vehicle-to-everything，V2X）、公共安全、工业物联网（Industrial Internet of Things，IIoT）和商业等应用场景。针对V2X的

通讯作者：李益锋，liyf.hx@chinaccs.cn
收稿日期：2026-08-28

定位服务分为3类：交通拥堵警告等场景（达到数十米定位精度即可）、变道警告等场景（需要米级定位精度）和远程驾驶等场景（需要达到亚米级的定位精度）[3]。公共安全场景的水平定位精度需求小于1 m，垂直定位精度需求小于2 m，所需的定位精度水平需求比商用场景5G用户严格得多。IIoT场景的水平定位精度需求为5 m至20 cm以下，相对定位精度需求低于1 m。除了高精度定位需求外，低功耗也是IIoT场景的关键需求，电池寿命需求在6个月到12年[4]。商业场景没有对覆盖范围外的绝对定位提出需求，但是对测距服务提出了较高的需求，根据使用情况，测距精度需求在10 m到10 cm。

本文接下来对SL定位架构和SL定位方法进行研究。

2 SL定位架构

下一代无线接入网（NG-RAN）的定位总体架构如图1所示，方框代表参与定位的功能实体，连接线表示实体间的通信接口以及相关协议。该架构支持UE通过新空口（NR）或者LTE接入，也支持NR PC5接口，UE在NG-RAN覆盖范围内（图1中的UE A和UE B）和NG-RAN覆盖范围外（图1中的UE C和UE D），系统均可以支持SL定位[5]。

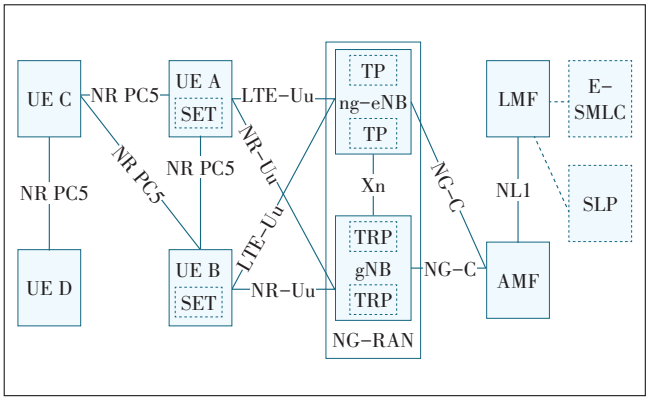


图1　NG-RAN定位总体架构

根据目标UE所在位置是否有蜂窝网络信号，SL定位分为覆盖范围内、覆盖范围外和部分覆盖3种场景。部分覆盖和覆盖范围外场景的关键用例包括隧道、地下停车场和没有蜂窝网覆盖的偏远地区。在覆盖范围外场景，UE可以执行独立的SL定位；在覆盖范围内场景，UE既可以执行独立的SL定位，也可以执行SL与Uu组合定位，依赖于具体的操作模式，蜂窝网络能够或多或少地控制SL定位。

3 SL定位方法

根据场景和可用锚点位置，SL定位方法可以提供绝对位置、相对位置或测距信息。

a）绝对位置。即UE在全球坐标系中的位置，计算SL目标UE的绝对位置（经度和纬度）需要一个已知位置的锚点（gNB、路侧单元〔Road Side Unit，RSU〕或其他UE）。绝对定位精度定义为坐标系内测量的绝对位置与真实绝对位置的偏差。

b）相对位置。SL目标UE在本地坐标系中相对第2个UE的位置，即计算SL目标UE与锚点之间的距离或相对角度等相对位置。相对定位精度定义为测量的相对位置与其他网元或者其他UE的真实相对位置的偏差。

c）测距。2个UE之间的距离，也可能包括方向信息，测距可以视为相对位置的子集。测距精度定义为2个UE之间测量的距离和/或方向与真实距离和/或方向的偏差。

对于SL相对定位，SL定位精度与UE之间的距离及UE的速度有关。如果UE A想知道与UE B的距离，如果距离较大，则UE A有足够的时间避免碰撞，因此不需要亚米级精度，即使定位精度只有几米也可能足够了；如果距离小，那么UE之间有可能发生碰撞，则需要非常高的定位精度来避免碰撞。如果UE A和UE B的移动速度非常快，即使在相对较大的距离内，也需要更高的定位精度，因为几米的定位误差也可能导致这些UE在很短的时间内相互碰撞。

SL定位方法共有4种，分别是SL环回时间定位（Sidelink Round Trip Time Positioning，SL-RTT）、SL到达时间（Sidelink Time of Arrival，SL-TOA）、SL到达时间差（Sidelink Time Difference of Arrival，SL-TDOA）和SL到达角度（Sidelink Angle-of-Arrival，SL-AOA）。其中SL-RTT、SL-TOA和SL-TDOA属于基于时间的定位方法，定位精度与SL-PRS带宽密切相关，增加带宽可以提高定位精度；SL-AOA属于基于角度的定位方法，定位精度与SL-PRS带宽无关。

3.1 SL-RTT

SL-RTT定位方法的基本原理为：SL目标UE接收从SL锚点UE发射的SL-PRS并执行Rx-Tx时间差测量，SL锚点UE接收SL目标UE发射的SL-PRS并执行Rx-Tx时间差测量。一对UE完成Rx-Tx时间差测量

后可以确定UE之间的距离，SL目标UE和多个SL锚点UE的距离测量可以确定SL目标UE相对于SL锚点UE的位置。作为基于RTT的定位方法，SL-RTT不需要gNB之间的严格同步，测量精度不会受到gNB之间同步精度的影响，但UE需要知道信号开始发射的确切时间。当UE之间的同步精度不太理想时，应考虑SL-RTT定位方法，特别是测距服务。

对于SL-RTT，UE之间可以只发射和接收SL-PRS一次，称为单边RTT（Single-Sided RTT，SS-RTT），也可以发射和接收SL-PRS多次，称为双边RTT（Double-Sided RTT，DS-RTT）。SL-RTT定位原理示意如图2所示。

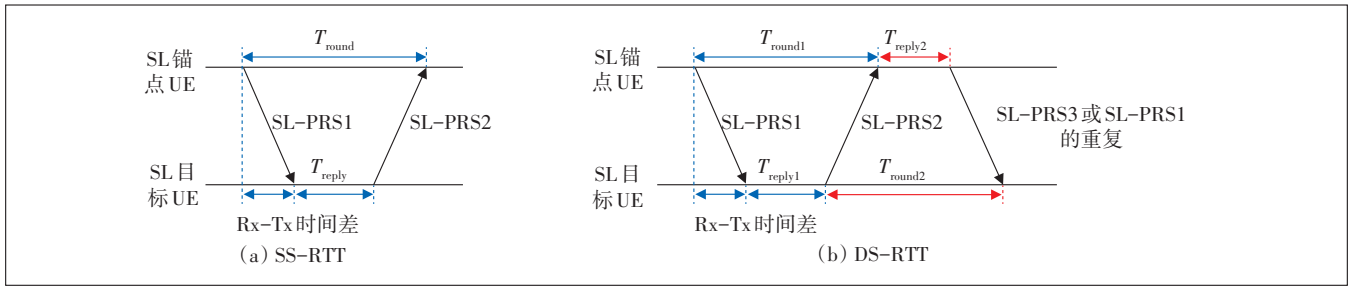


图2　SL-RTT定位原理示意

由于UE的振荡器精度有限，SL-RTT定位方法的精度将受到时钟误差的影响。SS-RTT的估计误差与T_{reply}成正比，假设2个UE之间的时钟误差为0.2 ppm，如果T_{reply}为1 s，则传播延迟误差将达到数十ns。DS-RTT的传播时延估计误差是时钟误差和估计传播时延的倍数，考虑到估计的传播时延小于循环前缀（Cyclic Prefix，CP）长度，假设2个UE之间的时钟误差为0.2 ppm，则DS-RTT将引入约0.02 ns的估计误差[6]。

与SS-RTT相比，DS-RTT由于时钟误差导致的传播时延估计误差显著减少，但是由于需要多次测量，DS-RTT会产生额外的时延。DS-RTT适用于定位精度要求高、响应时间长（大于1 s）、时钟漂移大或时钟同步参考在响应时间内发生改变等场景。

3.2 SL-TOA

SL-TOA定位方法的基本原理为：SL目标UE发射SL-PRS，SL锚点UE接收SL-PRS并完成相对到达时间（Relative Time of Arrival，RTOA）测量，可以做出以SL锚点UE为圆心，以RTOA对应的距离为半径的圆。利用三角定位技术，多个SL锚点UE完成RTOA测量后可确定SL目标UE相对于SL锚点UE的位置。由于只需SL目标UE发射SL-PRS，因此SL-TOA的优点是节省资源；为了准确测量SL目标UE和SL锚点UE之间的传播时间，要求SL目标UE和SL锚点UE都具有非常准确的时钟，并且这些时钟需要严格同步。多个SL锚点UE的RTOA测量原理如图3所示。

对于基于SL-PRS的RTOA测量，一个关键问题是如何选择参考时间T_0+t_{SL-PRS}。RTOA参考时间T_0可以

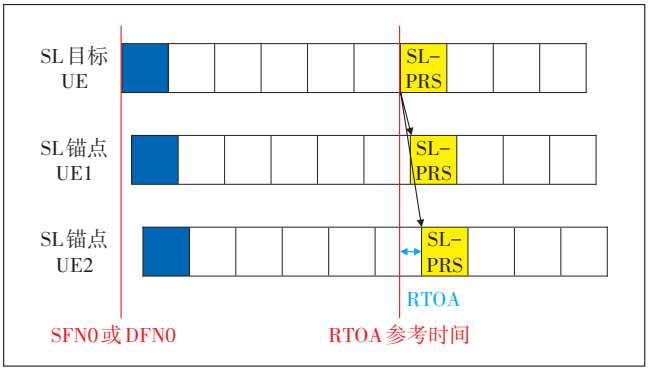


图3　多个SL锚点UE的RTOA测量

选择SFN0或DFN0，取决于SL锚点UE是否与gNB同步。如果SL锚点UE直接与gNB同步，则SL锚点UE的同步定时直接由gNB的下行SFN导出，因为下行SFN是SL锚点UE的公共定时源，SFN0定时可以作为T_0。当UE同步到其他UE或使用GNSS等外部同步源时，RTOA参考时间T_0选择DFN0。SFN0和DFN0分别通过系统帧号（System Frame Number，SFN）和直接帧号（Direct Frame Number，DFN）的初始化时间提供[7]。

3.3 SL-TDOA

SL-TDOA定位的基本原理为：SL锚点UE向SL目标UE发送SL-PRS，SL目标UE执行参考信号时间差（Reference Signal Time Difference，RSTD）测量，通过比较SL-PRS到达SL目标UE的时间差，可以做出以SL锚点UE为焦点，RSTD对应的距离差为长轴的双曲线，3个不同的SL锚点UE可以得到2条双曲线，2条双曲线的交点就是SL目标UE的位置，当SL锚点UE的

绝对位置信息已知时，就可以提供SL目标UE的精确绝对位置。SL-TDOA定位原理示意如图4所示[8]。

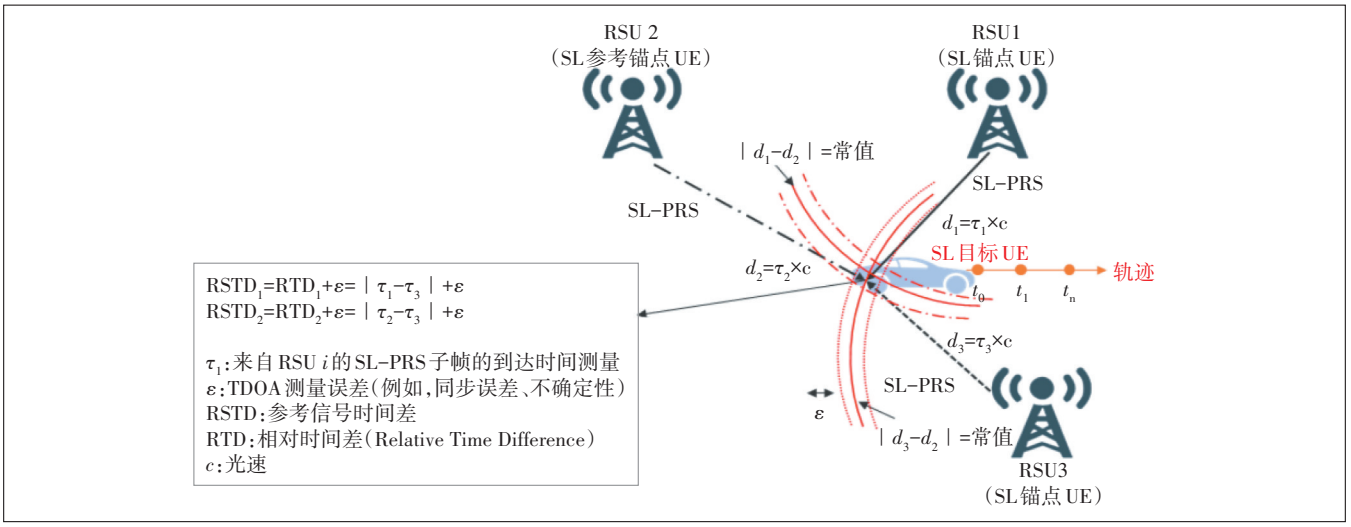


图4　SL-TDOA定位原理示意

与SL-TOA定位方法相比，SL-TDOA定位方法的优点是不需要SL目标UE和SL锚点UE之间的时钟同步，只需要SL锚点UE的时钟同步即可，在V2X场景中，路侧单元（Road Side Unit，RSU）通常部署在高速公路旁或交通路口，其位置是已知且固定的，因此非常适合充当SL锚点UE。除此之外，由于SL-TDOA定位方法不需要在SL目标UE和SL锚点UE之间进行双向传输，在SL-PRS开销和延迟方面更有优势。因此，SL-TDOA定位方法得到了广泛应用。

对于SL-TDOA定位方法，不同SL锚点UE之间的相对定时差用RSTD来定义，对于RSTD的测量，有2个关键问题需要解决，一个是SL参考锚点UE的选择，一个是同步误差的减轻。

对于SL参考锚点UE的选择，由执行RSTD测量的UE决定，UE选择具有最高参考信号接收功率（RSRP）的SL锚点UE作为SL参考锚点UE，该方法的优点是可以根据信道条件变化快速确定和调整SL参考锚点UE。

对于如何减轻SL锚点UE之间同步误差，其解决方案是指示/报告同步误差、同步源类型或同步信息质量。同步误差可以确保不同同步源之间实现精确的时间同步。同步源信息可以帮助多个SL锚点UE使用相同的同步源来减轻同步误差，在SL通信中，有多种同步源可供选择，例如全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）（UE同步到GNSS）、gNB（UE同步到gNB）、UE（具有本地定时的独立UE）。同步信息质量指标携带定时的不确定度或定时分辨率等信息，可以用来辅助UE选择同步源[9]。

3.4 SL-AOA

SL-AOA定位方法的基本原理为：SL目标UE接收从SL锚点UE发射的SL-PRS信号并执行AOA测量，或者SL锚点UE接收从SL目标UE发射的SL-PRS信号并执行AOA测量。UE接收对端UE发射的SL-PRS并完成AOA测量后可以确定UE之间相对于参考方向的估计到达方位角（Azimuth Angle of Arrival，A-AOA）和估计到达垂直角（Zenith Angle of Arrival，Z-AOA），SL目标UE和多个SL锚点UE的方向测量可用于确定SL目标UE相对于SL锚点UE的位置。SL-AOA定位原理示意如图5所示[10]。

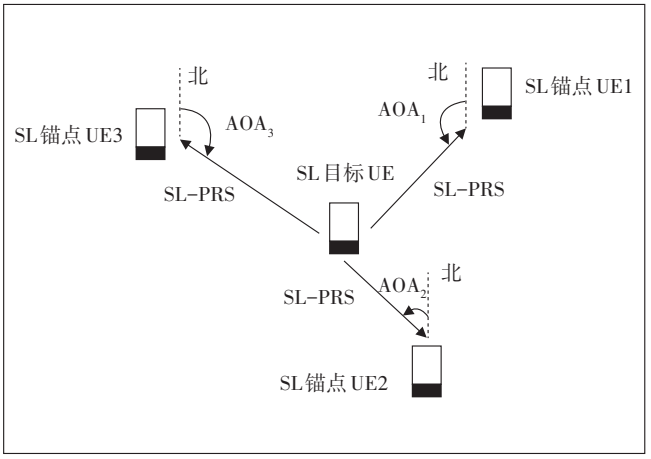


图5　SL-AOA定位原理示意

作为基于角度的定位方法，SL-AOA对SL-PRS带宽不敏感，时间不同步也不影响其定位性能，其缺点是要求UE具有多个天线，因此增加了对UE能力的要求。SL-AOA定位的精度高度依赖于UE的天线配置，为了在FR1中以高分辨率和精度进行AOA测量，需要大型线性或平面天线阵列，每个天线阵列的天线越多，估计就越准确。对于一维天线阵列，假设目标UE沿同一平面移动，适合测量方位角；对于二维天线阵列，更适合测量方位角和垂直角。如果波束成形技术用于SL角度定位，可以通过简单地识别波束索引来估计角度，通过比较天线单元的Tx/Rx信号之间的相位差，可以提供更精确的角度估计，因此SL-AOA定位技术尤其适合窄的SL-PRS波束。对于V2X场景，RSU具有更先进的天线阵列和更多数量的天线面板，同时如果车辆上安装了面板天线，通过对每个天线面板进行定位可以准确计算出车辆的确定位置。

根据3GPP TS 38.133协议，A-AOA的报告范围是-180°到+180°，分辨率是0.1°，Z-AOA的报告范围是0°到180°，分辨率是0.1°[11]。

3.5 SL定位方法总结

表1给出了各种SL定位方法需要的测量值以及影响定位精度的因素[12]。

4 SL定位方法的性能分析

SL定位方法可以提供绝对位置、相对位置或测距信息，针对V2X场景，本文接下来给出不同SL定位方法的仿真结果。

表1　SL定位方法总结

定位方法	测量量	对同步误差是否敏感？	精度是否依赖于天线配置？	带宽增加能否改善精度？	移动性降低性能？	时钟漂移降低性能？
SL-RTT	Rx-Tx时间差	否	否	是	是	是
SL-TOA	RTOA	是	否	是	是	是
SL-TDOA	RSTD	是	否	是	是	是
SL-AOA	A-AOA和Z-AOA	否	是（接收）	否	否	否

V2X场景的目标精度要求如下：水平定位精度集合A的要求是90%的UE达到1.5 m（绝对或相对），水平定位精度集合B的要求是90%的UE达到0.5 m（绝对或相对）；角度精度集合A的要求是90%的UE达到Y=±15°，角度精度集合B的要求是90%的UE达到Y=±8°[13]。

主要仿真参数如下：载波频率为6 GHz，子载波间隔为30 kHz，每个SL-PRS资源占用4个OFDM符号，梳状尺寸是4，SL目标UE和SL锚点UE之间完全同步[14]。

不同SL定位方法的水平精度仿真结果如表2所示。50%、67%、80%、90%表示的是圆概率误差。

从表2可以看出，对于SL-TDOA定位方法提供的绝对位置，在高速场景下，在100 MHz带宽的条件下，可以满足集合A的要求，在任何带宽条件下，都无法满足集合B的要求；在城区场景下，任何带宽都无法满足集合A和集合B的要求。对于SL-RTT定位方法提供

表2　不同SL定位方法的水平精度仿真结果（单位：m）

序号	定位方法	基本描述	提供的定位信息	50%	67%	80%	90%
1	SL-TDOA	100 MHz带宽，4个SL锚点UE，高速	绝对位置	0.49	0.649	1.059	1.413
2	SL-TDOA	40 MHz带宽，4个SL锚点UE，高速	绝对位置	1.224	1.92	2.611	3.45
3	SL-TDOA	20 MHz带宽，4个SL锚点UE，高速	绝对位置	1.566	2.42	3.31	4.301
4	SL-TDOA	100 MHz带宽，4个SL锚点UE，城区	绝对位置	1.83	2.83	3.85	5.1
5	SL-TDOA	40 MHz带宽，4个SL锚点UE，城区	绝对位置	2.66	4.04	5.57	7.34
6	SL-TDOA	20 MHz带宽，4个SL锚点UE，城区	绝对位置	3.01	4.71	6.23	8.15
7	SL-RTT(SS)	100 MHz带宽，1个SL锚点UE，高速	测距	0.49	0.74	0.963	1.23
8	SL-RTT(SS)	20 MHz带宽，1个SL锚点UE，高速	测距	0.86	1.25	1.7	2.2
9	SL-RTT(DS)	100 MHz，1个SL锚点UE，高速	测距	0.35	0.5	0.67	0.83
10	SL-RTT(SS)	100 MHz带宽，1个SL锚点UE，城区	测距	0.39	0.565	0.92	0.97
11	SL-RTT(SS)	20 MHz带宽，1个SL锚点UE，城区	测距	0.52	0.75	0.97	1.29
12	SL-RTT(SS)+AOA	100 MHz带宽，1个SL锚点UE，高速场景	相对位置	0.144	0.229	0.339	0.45
13	SL-RTT(SS)+AOA	20 MHz带宽，1个SL锚点UE，高速	相对位置	0.228	0.37	0.8	1.08
14	SL-RTT(SS)+AOA	100 MHz带宽，1个SL锚点UE，城区	相对位置	0.133	0.202	0.3	0.38
15	SL-RTT(SS)+AOA	20 MHz带宽，1个SL锚点UE，城区	相对位置	0.59	0.72	0.81	1.05

的测距，在高速场景下，不管是SS-RTT还是DS-RTT，在100 MHz带宽条件下，都可以满足集合A的要求，任何带宽都无法满足集合B的要求；在城区场景下，在任何带宽条件下，都可以满足集合A的要求，但是无法满足集合B的要求。对于SL-RTT+AOA提供的相对位置，在高速场景，任何带宽都可以满足集合A的要求，只有在100 MHz带宽条件下，才能满足集合B的要求；在城区场景，任何带宽都可以满足集合A的要求，只有在100 MHz带宽条件下，才能满足集合B的要求。

SL-AOA定位方法的角度精度仿真结果如表3所示[15]。

表3　SL-AOA定位方法的角度精度仿真结果（单位：°）

序号	基本描述	50%	67%	80%	90%
1	20 MHz带宽，UE之间的最大距离为100 m，高速	2.143	3.571	5.357	8.52
2	20 MHz带宽，UE之间的最大距离为25 m，城区	6.051	8.873	12.010	16.47

从表3可以看出，对于SL-AOA定位方法，在高速场景，90%以上的UE的角度误差小于15°，完全满足集合A的要求；80%以上的UE的角度误差小于8°，基本满足集合B的要求。在城区场景，80%以上的UE的角度误差小于15°，基本满足集合A的要求；UE角度误差小于8°的比例低于67%，不能满足集合B的要求。

根据表2和表3的仿真结果，本文建议根据定位场景的不同，选择不同的定位方法。SL-AOA适合提供角度信息，在超车、避障等场景，建议采用SL-AOA定位方法，以提高自动驾驶的安全性和可靠性；SL-TDOA适合提供绝对位置信息，建议在交通管控场景，采用SL-TDOA定位方法获取车辆的绝对位置信息，以便实时监测交通流量和进行交通信号控制；SL-RTT适合提供测距信息，建议在应急救援场景，采用SL-RTT定位方法，快速定位受困人员位置并测量距离；SL-RTT和SL-AOA联合使用适合提供相对位置信息，建议在无人机编队表演场景，采用SL-RTT和SL-AOA联合定位方法获取相对位置信息，以确保队形的稳定。

5　结束语

SL定位技术在V2X、公共安全、工业物联网和商业等场景具有广阔的应用前景，随着5G-Advanced的规模部署，SL定位技术必将得到规模应用和普及。不同的SL定位方法适合提供的定位信息也不尽相同，在实际部署时，可以根据本文提供的SL定位方法和仿真结果，在不同的定位场景，选择合适的SL定位方法，促进SL定位技术的发展。

参考文献：

[1]　刘琪，冯毅，邱佳慧. 无线定位原理与技术[M]. 北京：人民邮电出版社，2017.
[2]　3GPP TS 38.300　NR；NR and NG-RAN overall description；stage-2[S].
[3]　R1-2203057：Considerations on scenarios and target requirements for sidelink positioning [EB/OL]. [2026-05-04]. ftp://3gpp. org/tsg_ran/.
[4]　R1-2204806：On SL positioning scenarios and requirements，Intel Corporation[EB/OL]. [2026-05-04]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
[5]　3GPP TS 38.305　NG-RAN；stage 2 functional specification of user equipment(UE)positioning in NG-RAN[S].
[6]　R1-2203566：Discussion on potential solutions for sidelink positioning，vivo[EB/OL]. [2026-05-04]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
[7]　R1-2302927：Discussion on measurements and reporting for SL positioning，LG Electronics [EB/OL]. [2026-05-04]. ftp://3gpp. org/tsg_ran/.
[8]　R1-2206498：On potential SL positioning solutions，lenovo[EB/OL]. [2026-05-04]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
[9]　3GPP TS 38.355　NR；sidelink positioning protocol (SLPP)[S].
[10]　R1-2204253：Discussions on potential solutions for SL positioning，Apple Inc[EB/OL]. [2026-05-04]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
[11]　3GPP TS 38.133　NR；requirements for support of radio resource management[S].
[12]　R1-2209058：potential solutions for SL positioning，Intel Corporation [EB/OL]. [2026-05-04]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
[13]　3GPP TR 38.859　Study on expanded and improved NR positioning：[S].
[14]　R1-2211739：SL positioning evaluation and performance；lenovo[EB/OL]. [2026-05-04]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
[15]　R1-2208980：Evaluation methodology and performance evaluation for SL positioning，CATT，GOHIGH[EB/OL]. [2026-05-04]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.

作者简介：
张建国，毕业于南京邮电学院，正高级工程师，一级注册建造师，硕士，主要从事无线网络的规划和设计工作；王森，高级工程师，注册咨询师，硕士，主要从事运营商移动通信网络规划建设和解决方案课题研究工作；李益锋，毕业于浙江工业大学，高级工程师，主要从事无线网络的规划与设计工作；杨东来，毕业于北京邮电大学，高级工程师，学士，主要从事无线网络的规划和设计工作。