

基于SL-TDOA的5G-A定位能力综合分析

Comprehensive Analysis of 5G-A Positioning Performance Based on SL-TDOA

张建国¹,李益锋¹,王 森²,杨 欣³(1. 华信咨询设计研究院有限公司,浙江 杭州 310052;2. 中讯邮电咨询设计研究院有限公司,北京 100048;3. 中国电信宁波分公司,浙江 宁波 315000)

Zhang Jianguo¹, Li Yifeng¹, Wang Sen², Yang Xin³(1. Huaxin Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310052, China; 2. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China; 3. China Telecom Ningbo Branch, Ningbo 315000, China)

摘 要:

介绍了SL定位技术支持的V2X、公共安全、工业物联网和商业4个用例,并给出了4个用例的目标精度需求。分析了SL-TDOA定位的基本原理、SL-PRS的结构和SL-TDOA距离估计的CRLB,SL-PRS支持完全交错和部分交错模式,随着SL-PRS带宽和SL-PRS符号数的增加,SL-TDOA距离估计的CRLB可以非常小,但是由于NLOS传播、RSU同步误差等因素,SL-TDOA的实际定位精度比CRLB至少要低2个数量级。最后给出了SL-TDOA的部署建议。

关键词:

5G-A; SL-TDOA; SL-PRS; 图样模式; 定位精度
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2026.06.009
文章编号: 1007-3043(2026)06-0044-05
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:

Firstly, it introduces four use cases supported by SL positioning technology, namely V2X, public safety, industrial IoT, and commerce, and provides the target accuracy requirements for the four use cases. Secondly, it analyzes the basic principles of SL-TDOA positioning, the structure of SL-PRS and the CRLB for SL-TDOA distance estimation. SL-PRS supports both full staggering structure and partial staggering structure. In theory, the CRLB for SL-TDOA is very small with the increase of SL-PRS bandwidth and SL-PRS symbols. SL-TDOA positioning accuracy is decreased by more than two orders of magnitude due to NLOS propagation and RSU synchronization error. Finally, it provides the deployment suggestions for SL-TDOA.

Keywords:

5G-A; SL-TDOA; SL-PRS; Pattern; Positioning accuracy

引用格式:张建国,李益锋,王森,等. 基于SL-TDOA的5G-A定位能力综合分析[J]. 邮电设计技术,2026(6):44-48.

0 引言

随着5G版本的更新,5G定位技术也在不断向前演进。在Rel-15版本中,基于NR小区,系统仅支持Cell ID定位技术。在Rel-16版本中,下行方向新增了定位参考信号(Positioning Reference Signal, PRS),上行方向新增了定位探测参考信号(Sounding Reference

Signal, SRS),支持的定位技术扩展到DL-TDOA、DL-AoD、Multi-RTT、UL-TDOA、UL-AoA。在Rel-17版本中,通过在RRC释放消息中携带定位SRS配置,允许UE在非激活状态发射定位SRS以节约功耗。作为5G-Advanced的第1个版本,Rel-18在定位技术方面有重大演进,包括支持直连通信(Sidelink, SL)定位技术、低功耗高精度定位技术,通过带内载波聚合和测量载波相位来实现更高的定位精度^[1]。

SL定位是通过测量PC5接口上传输的参考信号对UE进行定位以获得绝对位置、相对位置或测距的

通讯作者:杨欣,33028484@chinatelecom.cn

收稿日期:2026-04-15

定位技术。根据SL目标UE所在位置是否有5G蜂窝网信号,SL定位有覆盖范围内、覆盖范围外和部分覆盖3种场景。根据测量的参考信号的特征值不同,可以将SL定位技术分为SL-RTT、SL-AoA、SL-TDOA和SL-TOA。本文接下来主要分析SL到达时间差(SL Time Difference of Arrival,SL-TDOA)定位技术^[2]。

1 SL定位需求

SL定位技术支持V2X、公共安全、工业物联网(Industrial Internet of Things,IIoT)和商业等4个用例。

当车辆在密集城区、非视距传播(Non Line of Sight,NLOS)或GNSS接入受限的场景下,基于GNSS的定位技术精度将大大降低,因此需要开发新的定位技术,以便在车辆和锚点之间存在NLOS的环境下也能实现相当高的定位精度。根据定位精度的不同,V2X场景可分为3类:需要数十米级精度的V2X场景(包括交通堵塞警告、软件更新和高清内容传输)、需要米级精度的V2X场景(包括交叉路口移动辅助、变道警告、弱势道路使用者感知、车辆在稳定状态下的编队行驶、协作车道合并)和需要亚米级精度的V2X场景(包括基于基础设施的远程驾驶、紧急情况下的自动驾驶的协同操纵、弱势道路使用者碰撞警告)。V2X用例被认为是SL定位中最典型的用例^[3]。

对于公共安全用例,无线通信、态势感知和位置信息起着至关重要的作用,无论是在室内还是在室外,都需要随时找到第一响应者。

IIoT用例的关键场景是未来工厂、增强现实、自动引导车辆、地理围栏和物流等场景。其中移动设备和移动资产的跟踪在改善工业流程和提高灵活性方面变得越来越重要,定位跟踪提供了实时控制和优化物料流以及后续生产过程所需要的信息,因此高精度定位变得至关重要。在室内工厂场景中,对于移动物体的定位,需要使用SL定位来避免碰撞;在NLOS主导的场景下,由于缺乏视距传播(Line of Sight,LOS)路径,基于Uu的定位性能会显著下降,使用NR Uu和SL进行联合定位是提高定位精度的可行方案。除了高精度需求外,低功耗也是IIoT用例的关键需求,电池寿命需求在6个月到12年^[4]。

SL定位用于商业的场景包括工业控制、工业自动化、无人机控制。需要重点关注的是无人机控制,无人机控制服务需要更精确的定位信息,包括高度、速度、方向以及水平坐标。

V2X、公共安全、IIoT和商业等4个用例都有通过SL进行定位的需求,SL定位目标精度需求如表1所示^[5]。

需要注意的是,在表1中,并非所有场景都能达到目标精度需求,同时并非所有定位技术在所有情况下都能满足所有定位需求。

表1 SL定位目标精度需求

SL定位指标	V2X	公共安全	IIoT	商业
水平定位精度	集合A:90%的UE达到1.5 m(绝对或相对) 集合B:90%的UE达到0.5 m(绝对或相对)	90%的UE达到1 m(绝对或相对)	集合A:90%的UE达到1 m(绝对或相对) 集合B:90%的UE达到0.2 m(绝对或相对)	90%的UE达到1 m(绝对或相对)
垂直定位精度	集合A:90%的UE达到3 m(绝对或相对) 集合B:90%的UE达到2 m(绝对或相对)	90%的UE达到2 m(在2个UE之间,绝对或相对) 90%的UE达到0.3 m(1个UE的相对定位变化)	集合A:90%的UE达到1 m(绝对或相对) 集合B:90%的UE达到0.2 m(绝对或相对)	90%的UE达到2 m(绝对或相对)
相对速度	-	最高30 km/h	最高30 km/h	最高30 km/h
角度精度	集合A:90%的UE达到 $\gamma = \pm 15^\circ$ 集合B:90%的UE达到 $\gamma = \pm 8^\circ$			

2 SL-TDOA定位原理

SL-TDOA定位原理示意如图1所示。SL锚点UE向SL目标UE发送SL-PRS,SL目标UE执行参考信号

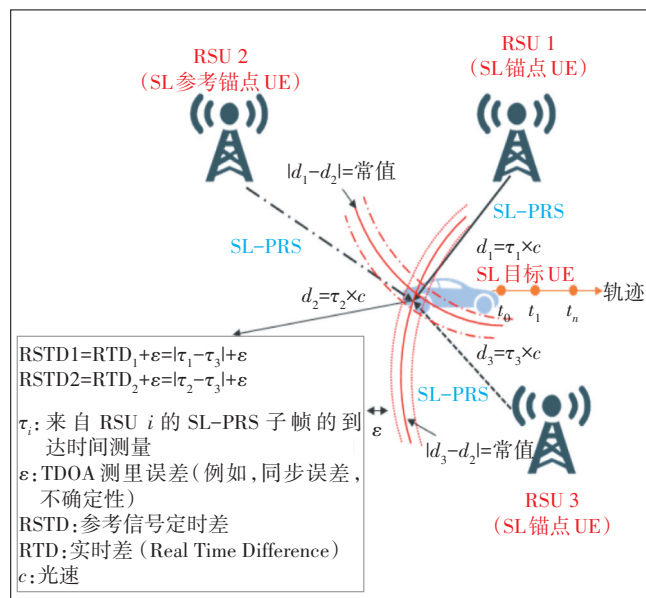


图1 SL-TDOA定位原理示意

时间差(Reference Signal Time Difference, RSTD)测量,并将测量结果报告给gNB/LMF以实现覆盖范围内定位,或报告给SL服务器UE以实现覆盖范围外定位^[6]。

SL-TDOA定位的基本原理是,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,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。由于SL-TDOA定位技术不需要在SL目标UE和SL锚点UE之间进行双向传输,因此在SL-PRS开销和延迟方面更有优势,作为对比,SL-RTT定位需要进行2次或者3次SL-PRS传输。

3 SL-PRS

为了支持SL定位和测距,3GPP在Rel-18版本中引入了SL定位参考信号(SL Positioning Reference Signal, SL-PRS)。如果SL-PRS与物理直连共享信道(Physical Sidelink Shared Channel, PSSCH)不在同一个时隙传输,则是专用SL-PRS资源池;如果SL-PRS与PSSCH在同一个时隙传输,则是共享SL-PRS资源池^[7]。本文接下来重点分析专用SL-PRS资源池。

SL-PRS的设计重点是SL-PRS的图样模式。SL-PRS的图样模式主要关注2点,一是SL-PRS在时域上的分布,即SL-PRS的符号数量(M),二是SL-PRS在频域上的分布,即SL-PRS的梳状尺寸(N)。

SL定位应用于具有不同要求的各种用例,因此应支持不同数量的 M 和不同数量的 N ,并可以灵活配置

和使用以适应不同的场景。如果 $M \geq N$,则是完全交错模式;如果 $M < N$,则是部分交错模式。SL-PRS完全交错模式和部分交错模式示例如图2所示。

对于SL-PRS完全交错模式,通过在频域上聚合信号可以实现更好的定位估计精度,还可以最大限度地重用DL-PRS设计,从而简化UE接收机实现。对于SL-PRS部分交错模式,可以在同一时间实例中复用更多SL-PRS传输,这有助于实现更高的复用容量。考虑到UE输出功率的限制,UE之间的距离相对较短,部分交错模式仍然可以提供不错的定位性能;除此之外,在许多情况下,部分交错有助于处理由于带内辐射引起的干扰。考虑到复用容量和定位性能之间的平衡,SL-PRS支持完全和部分交错模式^[8]。

对于专用SL-PRS资源池,由于物理直连控制信道(Physical Sidelink Control Channel, PSCCH)和SL-PRS以TDM方式复用,自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)和保护间隔(Guard Period, GP)分别占用1个OFDM符号,PSCCH和SL-PRS之间预留1个AGC符号,PSCCH占用2个符号,则在专用SL-PRS资源池中为SL-PRS分配的OFDM符号数量(M)被限制为9($14-5=9$)个。

对于DL-PRS,梳状尺寸(N)可以是2、4、6、12,专用SL-PRS资源池不支持 $N=12$,这是因为一个时隙内分配给SL-PRS的符号数最多为9个,如果 $N=12$,则无法支持SL-PRS完全交错模式;从支持SL定位的用例来看,SL-PRS的覆盖范围通常较小,没有动机使用更大的梳状尺寸来获得更大的覆盖范围。因此在专用SL-PRS资源池中,支持的梳状尺寸 $N=2、4$ 或 6 ^[9]。

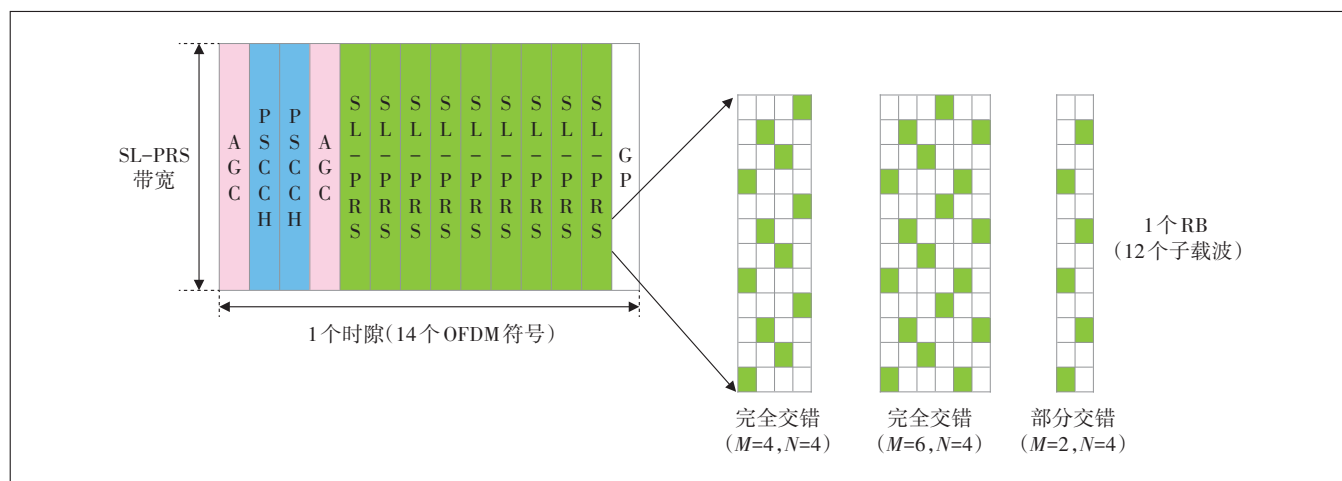


图2 SL-PRS完全交错模式和部分交错模式示例

4 SL-TDOA的性能分析

SL-TDOA是一种基于时间的定位方法,定位精度与时间差的估计偏差有关,时间差的估计偏差越小,定位精度越高,时间差估计偏差的评价方法是克拉美-罗下界(Cramer-Rao lower bound, CRLB),CRLB给出了无偏估计所能达到的精度下界^[10]。对于AWGN信道,SL-PRS的SL-TDOA方差 $\text{VAR}(\tau)$ 的CRLB为:

$$\text{VAR}(\tau) \geq \frac{1}{\text{SNR} \times 8\pi^2 \Delta f^2 \sum_{l=0}^{N_{\text{sub}}-1} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} k^2 |a_{k,l}|^2} \quad (1)$$

其中, Δf 是SL-PRS的子载波间隔(Sub-Carrier Spacing, SCS), N_{sub} 是SL-PRS总的OFDM符号数, N 是专用SL-PRS资源池内的子载波数,如果在资源单元RE(k, l)上没有SL-PRS,则 $|a_{k,l}| = 0$,如果在RE(k, l)上有SL-PRS,则 $|a_{k,l}| = 1$ 。根据式(1)可知,SL-TDOA的方差 $\text{VAR}(\tau)$ 与SNR和SL-PRS符号数成反比,与SCS的平方、SCS数量的平方成反比,SCS和SCS的数量是由SL-PRS带宽决定的。为了提高距离估计精度,应优先增加SL-PRS带宽,其次增加SL-PRS符号数,最后通过网络规划和SL-PRS资源分配,减少干扰以增加SNR。

SL-TDOA距离估计的标准差 $d(\sigma)$ 为:

$$d(\sigma) = c\sqrt{\text{VAR}(\tau)} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \times \sqrt{\text{VAR}(\tau)} \quad (2)$$

假设采用完全交错模式且 $M=N$,SL-PRS带宽分别是51、106、273个PRB,即子载波数 N 分别是612、1 272和3 276,当SCS=30 kHz时,分别对应着20 MHz、40 MHz和100 MHz带宽。根据式(1)和式(2),可以计算出在不同SNR的条件下,SL-TDOA距离估计的CRLB(见表2)。

表2 SL-TDOA距离估计的CRLB(单位:m)

SCS/ kHz	SINR=0 dB			SINR=10 dB			SINR=20 dB		
	612	1 272	3 276	612	1 272	3 276	612	1 272	3 276
15	0.515	0.172	0.042	0.163	0.054	0.013	0.052	0.017	0.004
30	0.258	0.086	0.021	0.081	0.027	0.007	0.026	0.009	0.002
60	0.129	0.043	0.010	0.041	0.014	0.003	0.013	0.004	0.001

从表2可以看出,随着SCS带宽、SCS数量和SNR的增加,SL-TDOA距离估计的CRLB迅速变小,对于SNR=10 dB、SCS=30 kHz,当 $N=612$ (20 MHz带宽)、 $N=1 272$ (40 MHz带宽)和 $N=3 276$ (100 MHz带宽)时,SL-

TDOA距离估计的CRLB分别是0.081、0.027、0.007 m。

文献[11]给出了SL定位的评估结果,本文给出基于SL-TDOA定位技术的结果(高速场景)作为参考,具体如表3所示。其中,SCS=30 kHz,50%、67%、80%、90%表示的是圆概率误差。

表3 基于SL-TDOA定位技术的结果——高速场景(单位:m)

指标	带宽/ MHz	定位方法	50%	67%	80%	90%	是否满足 集合A的 需求	是否满足 集合B的 需求
水平 定位 精度	100	SL-TDOA	0.239 7	0.395 2	0.586 9	0.834 8	是	否
	40	SL-TDOA	0.678 7	1.02	1.412	2.343	否	否
	20	SL-TDOA	1.013	1.542	2.405	3.08	否	否
	100	联合定位	0.111	0.150 5	0.186 1	0.216 9	是	是
	40	联合定位	0.351 7	0.458 3	0.620 7	0.735 4	是	否
	20	联合定位	0.665 1	0.849 8	1.104	1.287	是	否
垂直 定位 精度	100	SL-TDOA	7.236	8.714	9.927	11.81	否	否
	40	SL-TDOA	9.216	10.73	12.47	14.64	否	否
	20	SL-TDOA	12.12	14.2	17.62	23.06	否	否
	100	联合定位	0.784	1.193	1.445	1.578	是	是
	40	联合定位	1.423	1.57	2.965	4.481	否	否
	20	联合定位	2.725	7.534	9.946	12.76	否	否

从表3可知,SL-TDOA的定位精度比表2计算的CRLB要低至少2个数量级,主要原因包括信号传播误差和RSU定时误差。SL-PRS信号通常要经历多径传播,多径传播会影响定位性能,作为同频组网的系统,干扰也会造成定位精度下降。

从表3还可以得出以下结论。第一,仅使用SL-TDOA定位技术,水平定位精度可基本满足集合A的要求,即90%的UE在SL-PRS带宽等于100 MHz的条件下,水平定位精度小于1.5 m;80%的UE在SL-PRS带宽等于40 MHz的条件下,水平定位精度小于1.5 m;50%的UE在SL-PRS带宽等于20 MHz的条件下,水平定位精度小于1.5 m。第二,仅使用SL-TDOA定位技术,水平定位精度无法满足集合B的要求。第三,仅使用SL-TDOA定位技术,垂直定位精度无法满足集合A和集合B的要求。

5 SL-TDOA定位的部署建议

SL-TDOA定位方法对发射/接收SL-PRS的发射机和接收机之间同步要求非常严格,需要5 ns的时间同步精度来保证1.5 m的定位精度,为了提高SL-

TDOA的定位精度,在实际部署的时候,需要采取以下2个措施。

a) SL锚点UE之间的定时误差将对SL-TDOA的精度产生很大影响,尤其是SL锚点UE是高速移动的UE,则更难实现SL锚点UE之间的严格同步。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,因此对于SL-TDOA定位方法,建议只使用RSU作为SL锚点UE,且RSU和SL目标UE之间是视距传播。在其他场景中,建议以静态的UE充当SL参考锚点UE^[12]。

b) 作为UE类型的RSU,规范要求RSU的频率误差是 $\pm 0.1 \text{ ppm}^{[13]}$,即同步误差是 $\pm 100 \text{ ns}$,对应的距离不确定性是30 m,远远高于1.5 m精度的定位需求,为了达到低于1.5 m的距离不确定性,建议采用高精度晶振器,以使RSU的定时误差小于 $\pm 5 \text{ ns}$ 。除此之外,RSU位置误差会直接带入定位算法中,在实际部署时,应采用大地测量仪或高精度的GPS接收机,以使RSU的位置误差降低到米级以下。

SL-PRS的符号长度(M)和梳状尺寸(N)是SL-PRS的2个重要参数,直接决定了定位精度和时延,在实际配置中,应根据应用场景,自适应地配置SL-PRS的符号长度和梳状尺寸。对于工厂定位等短程定位,可以选择使用较小的符号长度和较大的梳状尺寸,即使用部分交错模式。相反,对于V2X等远程定位,可以选择较大的 M 值和较小的 N 值来积累更多的能量,从而获得足够大的信噪比,由于远近效应对远程定位的影响更为严重,因此不适合在频域中复用来自不同UE的多个SL-PRS^[14]。

单独使用SL-TDOA定位方法,无法完全满足表1的定位精度要求,建议使用NR Uu和SL联合定位技术以提高定位精度。从表3可知,在水平定位精度方面,使用联合定位技术后,所有SL-PRS带宽(20 MHz、40 MHz和100 MHz)条件下都能满足集合A的要求,即90%的UE的水平定位精度小于1.5 m,在足够高的带宽(100 MHz)条件下,满足集合B的要求,即90%的UE的水平定位精度小于0.5 m;在垂直定位精度方面,使用联合定位技术后,在SL-PRS带宽等于100 MHz的条件下,满足集合A和集合B的要求,即90%的UE的垂直定位精度分别小于3 m和2 m。

6 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,基于SL-TDOA的SL定位技术必将得到规模应用和普及。在实际部署中,可以根据本文确定的SL-PRS图样模式的配置原则,再结合定位精度的理论分析和仿真结果,找到最佳的参数配置,在定位精度和定位资源之间实现最佳平衡。

参考文献:

- [1] 3GPP. NG-RAN; stage 2 functional specification of user equipment (UE) positioning in NG-RAN; 3GPP TS 38.305[S/OL]. [2026-01-31]. <ftp://3gpp.org/specs/>.
- [2] 3GPP. NR; NR and NG-RAN overall description; stage-2; 3GPP TS 38.300[S/OL]. [2026-01-10]. <ftp://3gpp.org/specs/>.
- [3] Anon. Considerations on scenarios and target requirements for sidelink positioning; R1-2203057[S/OL]. [2026-01-10]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
- [4] Anon. On SL positioning scenarios and requirements; R1-2204806[S/OL]. [2026-01-10]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
- [5] 3GPP. Study on expanded and improved NR positioning; 3GPP TR 38.859[S/OL]. [2026-01-10]. <ftp://3gpp.org/specs/>.
- [6] Anon. On potential SL positioning solutions; R1-2206498[S/OL]. [2026-01-10]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
- [7] 3GPP. NR; physical layer procedures for data[S/OL]. [2026-01-10]. <ftp://3gpp.org/specs/>.
- [8] Anon. On SL positioning reference signals; R1-2300952[S/OL]. [2026-01-10]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
- [9] 3GPP. NR; physical channels and modulation; 3GPP TS 38.211[S]. [2026-01-10]. <ftp://3gpp.org/specs/>.
- [10] 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.
- [11] Anon. Discussion on evaluation of SL positioning; R1-2205900[S/OL]. [2026-01-10]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
- [12] Anon. Potential SL positioning solutions; R1-2209393[S/OL]. [2026-01-10]. ftp://3gpp.org/tsg_ran/.
- [13] 3GPP. NR; user equipment (UE) radio transmission and reception; part 1: range 1 standalone; 3GPP TS 38.101-1[S/OL]. [2026-01-10]. <ftp://3gpp.org/specs/>.
- [14] Anon. Design of SL positioning reference signal SL-PRS; R1-2302293[S/OL]. [2026-01-10]. 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;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;王森,高级工程师,硕士,主要从事移动通信网络规划建设和解决方案研究工作;杨欣,毕业于上海交通大学,工程师,学士,主要从事无线网络、电源配套的规划和项目管理工作。