

# 基于 5G 同步信号的高速列车定位方法

王小可, 孔青宁

(西安铁路职业技术学院, 西安 710014)

**摘要:** 通过特定无线电 (NR) 同步信号研究了 5G 网络中高速列车的定位问题, 对 3GPP 指定的无线信道模型路径损耗、阴影和快衰落效应进行了仿真; 从波束成形的 NR 同步信号中测量到达时间 (TOA) 和出发角 (AOD); 根据给定的测量值和假设列车运动模型, 使用扩展卡尔曼滤波器 (EKF) 对列车位置进行跟踪; 结果表明, TOA 测量 (平均定位精度 0.66 m) 能够达到比 AOD 测量更好的精度, 同时考虑两个测量值, 可获得最佳跟踪性能; 该方法可以在大部分跟踪时间内实现亚米级跟踪精度, 从而达到了 5G NR 预期的定位精度要求。

**关键词:** 列车定位; 5G 无线电; 同步信号; 扩展卡尔曼滤波

## High Speed Train Positioning Method Based on 5G Synchronous Signal

Wang Xiaoke, Kong Qingning

(Xi'an Railway Vocational & Technical Institute, Xi'an 710014, China)

**Abstract:** The problem of high-speed train location in 5G network had been studied by using specific radio (NR) synchronization signal. The path loss, shadow and fast fading effects of 3GPP specified radio channel model are simulated. Time of Arrival (TOA) and Angle of Departure (AOD) are measured from the beam-forming NR synchronous signal. The extended Kalman filter (EKF) is used to track the train position according to the given measured values and the assumed train motion model. The results show that TOA (the average positioning accuracy 0.66 m) measurement can achieve better accuracy than AOD measurement, and the best tracking performance can be obtained by considering two measurements at the same time. This method can achieve submicron tracking accuracy in most of the tracking time, thus achieving the expected positioning accuracy requirements of 5G NR.

**Keywords:** train positioning; 5G New Radio; synchronous signal; extended kalman filtering

## 0 引言

5G 技术的发展为移动通信开辟了新的载波频率<sup>[1-2]</sup>, 它与毫米波信道一起, 允许设计供高铁专用的多千兆位无线网络。同时, 5G 网络为列车的高精度和高可用性定位技术带来了发展机遇。根据所考虑的位置信息, 在特定应用场景的可用性要求下, 需追求分表的定位精度, 如安全行驶场景中自动列车驾驶, 最低可用性要求需高于 99.9%。在此场景中, 列车充当一个中继站, 聚合高速列车乘客产生的数据流量, 并在下行链路和上行链路中进行中继交换<sup>[3]</sup>。因为, 在列车中可采用更复杂的硬件解决方案, 所以可以在设备中采用大量天线元素、良好的数据处理能力的大容量内存。除了低延迟和高吞吐量通信外, 5G 还提供了出色的无线电接口, 可在列车端或网络端准确跟踪列车位置<sup>[4-5]</sup>。

由于仅依靠全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 不能保证连续和准确的定位性能, 因此需要附加定位技术, 尤其是在高层建筑、山地、隧道等多障碍复杂地形环境中, 多径传播降低了卫星能见度, 导致 GNSS 性能下降。另外, 众所周知, GNSS 容易受到各

种恶意攻击。一般而言, 通过为列车配备多个定位传感器 (例如惯性导航传感器、转速计和多普勒雷达) 来减轻对 GNSS 的依赖性, 但是, 这些列车内置传感器对累积误差传播相当敏感, 并且不能提供独立的定位解决方案。然而, 5G 技术迅速发展, 包括对亚米级定位精度的特定要求, 已使基于 5G 网络的定位技术成为补充未来高铁定位系统的优先选择<sup>[6-8]</sup>。

基于无线网络的定位技术在国内外学者都进行了广泛而深入的研究。例如, 诸多学者<sup>[9-10]</sup>考虑使用当前 4G 长期演进 (Long Term Evolution, LTE) 网络进行定位, 在彭友志等<sup>[11]</sup>、Koivisto M 等<sup>[12]</sup>考虑使用 5G 网络进行定位。但是, 由于缺乏对 5G 信号和帧结构的详细描述。本文考虑基于 3GPP (3rd Generation Partnership Project) 指定的 5G 新无线电下行链路同步信号 (Synchronization Signals, SS) 对 HST 进行定位<sup>[13-14]</sup>。在 HST 网络环境中, 这些信号由 5G NR 基带单元 (BBU) 控制的远程无线电头 (RRH) 传输。同步信号由主同步信号 (PSS)、次同步信号 (SSS) 和物理广播信道 (PBCH) 组成, 其中 PSS 和 SSS 信号具有非常好的内置相关性, 可提供准确的到达时间 (TOA) 和

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-11-16。

基金项目: 西安铁路职业技术学院 2020 年度重点课题 (XTZY20J08)。

作者简介: 王小可 (1983-), 男, 河南开封人, 硕士, 讲师, 主要从事城市轨道交通通信信号教学与研究工作。

引用格式: 王小可, 孔青宁. 基于 5G 同步信号的高速列车定位方法 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 159-163.

离场角 (AOD) 测量。通过使用 SS, 考虑将其定位在列车端, 在该端使用 TOA 和 AOD 测量, 并结合扩展卡尔曼滤波器 (EKF) 来跟踪列车的位置、速度和加速度。凭借基于 5G NR 通信服务的精确定位服务, 降低专用列车定位解决方案的维护成本。

### 1 系统模型

假设 HST 网络场景是基于 3GPP 指定的高速场景, 如图 1 所示, 其中载波部署为 30 GHz。在这种情况下, 具有波束成形功能的远程无线电头 (RRH) 沿轨道分布, 以便为列车服务。本节讨论最基本的系统模型假设, 包括无线电传播、传输的下行链路信号结构以及 RRH 和列车中的假定天线模型。RRH 位于轨道旁边, 以 5 ms 的间隔发送同步信号突发集。假设列车上的天线波束沿轨道固定, 波束形成器通过将同步信号突发集中的每个同步信号块发射到单独的方向来扫描轨道区域<sup>[15]</sup>。

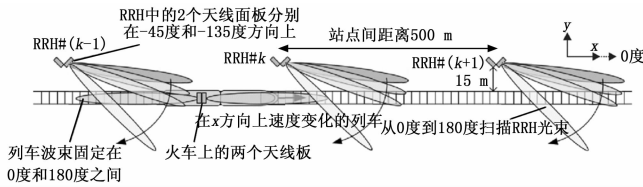


图 1 列车无线电传输和定位方案示意图

#### 1.1 大规模无线电传播和天线模型

在位置  $p(t) = [x(t), y(t)]^T$  处, 从位于  $p_0(t) = [x_0(t), y_0(t)]^T$  的单个 RRH 发送信号的平均接收信号功率 (dBm) 被定义为式 (1):

$$P_R(p(t)) = P_T - L(d(t)) + S(p(t)) + G_T(\theta_T(t)) + G_R(\theta_R(t)) \quad (1)$$

其中:  $P_T$  是发射功率 (dBm),  $L(d(t))$  是路径损耗 (Path Loss, PL) (dB), 它是传播距离  $d(t) = \|p(t) - p_0(t)\|$  的函数, 而  $S(p(t))$  是阴影函数 (dB)。此外,  $G_T(\theta_T(t))$  和  $G_R(\theta_R(t))$  是作为 AOD  $\theta_T(t)$  和 AOA  $\theta_R(t)$  的函数给出的波束形成增益 (dB), 其中 AOD 和 AOA 是根据发射器和接收器的天线方向定义的。

本文考虑了具有视线路径的城市微路径损耗模型和具有适当空间相关性的高斯分布阴影函数。另外, 分别使用从均匀线性阵列获得的波束方向图, 定义了波束形成增益  $G_T(\theta_T)$  和  $G_R(\theta_R)$ , 其中  $M_T$  和  $M_R$  水平天线元件分别作为发射器和接收器。此外, 假设 RRH 能够在列车沿轨道固定波束的同时进行波束转向。

#### 1.2 快衰落和接收信号模型

快衰落信道模型是基于均方根 (RMS) 延迟扩展为 20ns 的抽头延迟线 D (TDL-D) 模型指定的多径信道, 最大多普勒频移为  $\Delta f_{max} = |v|/\lambda_c$ , 其中  $v$  为接收器的速度, 而  $\lambda_c$  为载波的波长。在时刻  $t$  从单个 RRH 接收到的信号可以写为式 (2):

$$z(t) = \tilde{z}(t) + v(t) \quad (2)$$

其中:  $\tilde{z}(t) = \gamma(t) \int_{-\infty}^{\infty} b(\xi)h(t-\xi, \xi)d\xi, b(t)$  为发射信号,

$h(t-\xi, \xi)$  为对在时间  $\xi$  时发送的脉冲的信道脉冲响应, 而  $v(t)$  为加性高斯白噪声。此外, 将  $b(t)$  的功率和  $h(t-\xi, \xi)$  的所有多径分量的预期总功率归一化。因此, 尺度函数  $\gamma(t) = 10^{P_e(p(t))/10}$  包含了大规模传播模型的影响, 包括波束形成收益, 如式 (1) 中所述。在整个单独的波束中,  $h(t-\xi, \xi)$  的格式保持不变。

#### 1.3 传输信号结构

传输的信号基于 3GPP 5G NR 规范中描述的循环前缀正交频分复用 (Cyclic-Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing, CP-OFDM) 波形<sup>[16-17]</sup>。根据高速场景的建议, 可以使用  $\Delta f = 240$  kHz 的子载波间隔来增强多普勒电阻。假设总共有 50 个调度的物理资源块 (Physical Resource Blocks, PRB), 这将导致通带宽度为  $50 \cdot 12 \cdot \Delta f = 144$  MHz。此外, 选择快速傅立叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 大小为  $N_{FFT} = 1024$  (具有 600 个有源子载波), 因此, 基本物理层处理速率为  $F_s = 245.76$  MHz。一个子帧的长度为 1 ms, 包括 16 个时隙, 其中每个时隙由 14 个 OFDM 符号组成。子帧中的第一个符号和中间符号的扩展 CP 长度为 200 个样本, 而所有其他 OFDM 符号的正常 CP 长度为 72 个样本。

同步信号以 SS 块的形式发送, 图 2 所示的 SS 块包括 PSS、SSS 和 PBCH 信号。每个 SS 块在频域中保留 24 个连续的 PRB, 在时域中保留 4 个 OFDM 符号。PSS 和 SSS 的结构基于  $m$  序列,  $m$  序列被映射到 127 个连续子载波中 SS 块分配中间的 6 个中心 PRB 内。根据基站的给定物理身份, 可以使用 3 种不同的 PSS 和 336 种不同的 SSS 序列。

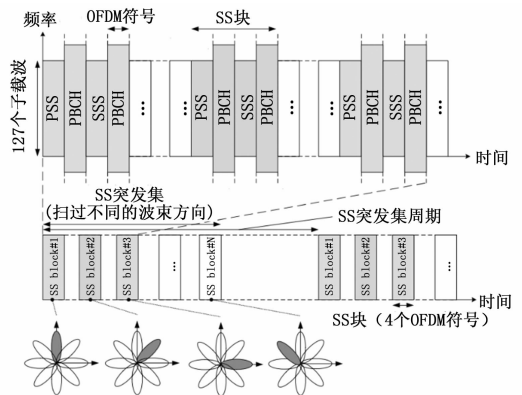


图 2 SS 块和 SS 突发集的结构示意图

在 5G NR 中, 同步信号也可以使用波束成形的方法进行传输。因此, 为了覆盖不同位置的用户终端, SS 块在不同的方向上传输<sup>[15]</sup>。覆盖在选定方向上一个 SS 块传输周期的一组 SS 块, 称为 SS 突发集。本文假设一个 SS 突发集中总共有 64 个 SS 块 (即 64 个不同的波束方向), 并且从第一个子帧开始的每个时隙都包含两个 SS 块, 直到传输完所有 SS 块。因此, 传输一个 SS 突发集的总持续时间为 2 ms。

## 2 基于5G同步信号的TOA和AOD估计

TOA和AOD估计是基于接收信号与来自独立RRH的已知PSS和SSS之间的相关性。在考虑的估计方法中,假设发送器和接收器的时钟是同步的,并且接收器已知传输时间。利用式(2),并考虑列车与RRH之间的距离,接收信号的第 $n$ 个样本为式(3)所示:

$$\tilde{z}[n] = \sum_{k=0}^{N_{\text{RRH}}-1} \tilde{z}_k[n - \delta_k] + v[n] \quad (3)$$

其中 $\tilde{z}_k[n - \delta_k]$ 是来自第 $k$ 个RRH的 $\tilde{z}_k(t)$ 的采样信号,而 $\delta_k$ 是样本中对应的传播时延。为了获得多个RRH的AOD和TOA估计,需对每个可用RRH重复相同的过程。

在一个SS突发集周期内,来自单个RRH的PSS和SSS序列与接收信号 $\tilde{z}[n]$ 之间的互相关函数的绝对值可以给出式(4):

$$r[m] = \left| \sum_{n=0}^{N_{\text{SB}}-1} z^*[n] b[n+m] \right| \quad (4)$$

其中 $N_{\text{SB}}$ 是样本中设置的SS突发的长度, $\tilde{b}[k]$ 是已知的参考信号,由专用子载波中的PSS和SSS序列组成,其他子载波为空。由于在一个SS突发集内传输了多个SS块,所以相关函数包括多个峰值。各个峰值之间的相对幅度取决于式(1)和式(2)中给出的接收信号模型。但是,由于在接收一个SS突发集期间接收器的位置相当固定,因此对相对相关峰值的最大影响是AOD,它在每个SS块之间都会改变。当然,多普勒现象也会影响时域信号的强度,但是这会在相邻相关峰上逐渐改变功率水平。

假定已知SS突发集中每个SS块使用的AOD,AOD估计可以基于观测到的所测量相关峰的相对幅度水平。由于信道、噪声和干扰的影响,一些SS块没有明显的相关峰值。根据已知的SS块在信号中的位置,可以将式(4)中的相关函数划分为单独的SS块相关函数,如下式:

$$\tilde{r}_i[k] = r[v_i + k], k = 0, \dots, K-1, K = \min_{i,j} |v_i - v_j| \quad (5)$$

其中: $\tilde{r}_i[k]$ 和 $v_i$ 分别为第一个SS块的相关函数和第一个样本索引, $\Omega_{\text{peak}}$ 为一组所有检测到的SS块索引的集合。此外,如果满足式(6),则认为第 $i$ 个SS块检测成功。

$$\eta_i = \max_k \tilde{r}_i[k] > \mu_i + 4\sigma_i \quad (6)$$

其中: $\eta_i$ 、 $\mu_i$ 和 $\sigma_i$ 分别表示第 $i$ 个SS块的相关函数的最大值、平均值和标准偏差。

为了平均输出噪声,并使在SS块状波束形成中使用的离散AOD角之间能够获得AOD估计,通过取3个最大相关峰的加权平均为AS,得到了在这个SS突发集周期下列车位置的AOD估计,即式(7)组合:

$$\hat{\theta}_T = \omega_j \theta_{T,j} \quad (7)$$

$$\omega_j = \frac{\eta_j}{\sum_{i \in \Omega_{\text{largest}}} \eta_i}$$

其中: $j \in \Omega_{\text{largest}}$ , $\eta_j = \max_k \tilde{r}_j[k]$ 、 $\theta_{T,j}$ 是第 $j$ 个SS块的已用AOD角度, $\Omega_{\text{largest}}$ 是3个具有最大相关值的SS块索引的

集合,而 $\tilde{r}_j[k]$ 为式(5)中给出的SS块相关函数。

当考虑在假定的LOS条件下的TOA估计时,希望在所有检测到的SS块上利用观测到的相关函数的循环性质,因此,为了包含来自多个SS块的时序信息,将各个SS块的相关函数组合为式(8):

$$\tilde{r}_{\text{comb}}[k] = \sum_{i \in \Omega_{\text{peak}}} \tilde{r}_i[k] \quad (8)$$

在此之后,可以确定样本持续时间中的TOA估计值为式(9):

$$\hat{\delta} = \underset{k}{\text{argmax}} \tilde{r}_{\text{comb}}[k] \quad (9)$$

相应的TOA估计(以秒为单位)为 $\hat{\tau} = \hat{\delta}/F_s$ 。

## 3 列车定位

考虑的跟踪方法基于EKF,该方法能够处理非线性状态转换和测量模型,通过函数线性化围绕当前可用的列车状态进行估计。除了定位列车的位置外,还考虑了速度和加速度的跟踪。因此,列车在时刻 $n$ 的状态向量被确定为式(10):

$$s[n] = [x[n], y[n], v_x[n], v_y[n], a_x[n], a_y[n]]^T \quad (10)$$

其中: $x[n]$ 、 $y[n]$ 分别为 $x$ 坐标和 $y$ 坐标, $v_x[n]$ 、 $v_y[n]$ 分别为 $x$ 轴和 $y$ 轴中的速度, $a_x[n]$ 和 $a_y[n]$ 分别为 $x$ 轴和 $y$ 轴中的加速度。假设系统具有线性状态转移模型和非线性测量模型,式(11):

$$\begin{aligned} s[n] &= \mathbf{F}s[n-1] + q[n] \\ y[n] &= h(s[n]) + w[n] \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $\mathbf{F}$ 是状态转换矩阵, $h(s[n])$ 为状态 $s[n]$ 的非线性测量函数, $q[n] \sim N(0, \mathbf{Q})$ 和 $w[n] \sim N(0, \mathbf{W})$ 分别为过程噪声向量和测量噪声向量。

在每个估计时间步长中,列车定位过程包括两个单独的阶段,即预测阶段和更新阶段。在预测阶段,状态 $\hat{s}^- [n]$ 的先验估计可以通过状态 $\hat{s}^+ [n-1]$ 的后验估计得到,即式(12):

$$\begin{aligned} \hat{s}^- [n] &= \mathbf{F}\hat{s}^+ [n-1] \\ \hat{P}^- [n] &= \mathbf{F}\hat{P}^+ [n-1]\mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\hat{P}^- [n]$ 和 $\hat{P}^+ [n]$ 分别为状态协方差的先验估计和后验估计,根据现有的测量值 $y[n]$ ,可以得到更新阶段的后验估计为式(13):

$$\begin{aligned} \mathbf{K}[n] &= \hat{P}^- [n]\mathbf{H}[n]^T(\mathbf{H}[n]\hat{P}^- [n]\mathbf{H}[n]^T + \mathbf{W})^{-1} \\ \hat{s}^+ [n] &= \hat{s}^- [n] + \mathbf{K}[n](y[n] + h(\hat{s}^- [n])) \\ \hat{P}^+ [n] &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}[n]\mathbf{H}[n])\hat{P}^- [n] \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $\mathbf{K}[n]$ 表示卡尔曼增益, $\mathbf{H}[n]$ 为测量函数 $h(\cdot)$ 在 $\hat{s}^- [n]$ 处取值的雅可比矩阵。可认为列车的加速度在两个连续的瞬间之间几乎是恒定的。

通过考虑上节中给出的AOD和TOA估计,测量向量可以写成 $y[n] = [y_0[n], \dots, y_{N_R-1}[n]]^T$ ,其中 $y_k[n] = [\hat{\theta}_{T,k}, \hat{\tau}_k]^T$ 包括来自单个RRH的AOD和TOA估计, $N_R - 1$ 是可用RRH的总数。对于第 $k$ 个可用的RRH,与测量向量 $y_k[n]$ 相关的非线性测量函数可以写为式(14):

$$h_k(s[n]) = \begin{bmatrix} \arctan \frac{\Delta y_k[n]}{\Delta x_k[n]} \\ \frac{\|p[n] - p_k\|}{c} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中： $\Delta y_k[n] = y[n] - y_k$  和  $\Delta x_k[n] = x[n] - x_k$  分别为第  $k$  个可用 RRH 与列车在  $x$  方向和  $y$  方向上的距离， $p_k = [x_k, y_k]^T$  和  $p[n] = [x[n], y[n]]^T$  是第  $k$  个可用 RRH 和列车的位置， $c$  为光速。包括所有可用的 RRH 的整体测量函数可以写成  $h(s[n]) = [h_0(s[n]), \dots, h_{N_k-1}(s[n])]^T$ 。元素通过以下方法得到：取式 (16) 中非线性测量函数对状态向量  $s[n]$  的偏导数；在估计的先验状态  $\hat{s}^- [n]$  处评估得到的雅可比矩阵。

### 4 结果与讨论

为了研究基于 SS 块的高速列车定位问题，考虑了一条超过 43 km 的铁路轨道，在 HST 场景中研究了位置感知的 5G 通信。由于假设的高速场景，铁路的最大曲率是非常有限的。根据图 1 所示的系统几何图形，轨迹可近似为获得定位信号的最近 RRH 附近的直线。因此，将铁路的  $y$  坐标固定为零，这样列车的位置和速度完全由  $x$  坐标及其导数决定。轨迹的轮廓如图 3 所示，其中  $x$  方向上的位置和速度都表示为时间的函数。

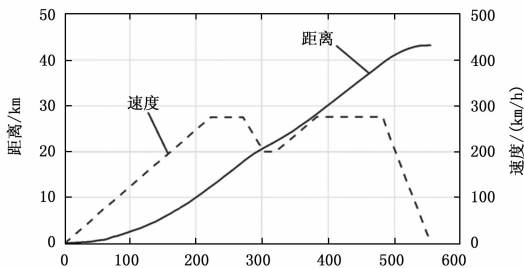


图 3 模拟过程中列车在  $x$  方向上的位置和速度

如图 1 所示，RRH 均匀位于铁路的上侧，间隔为 500 m，与铁路的距离为 15 m。同步 RRH 对 64 个单独波束形成的 SS 块突发集在  $0 \sim 180$  度的角范围内进行均匀扫描。使用的载波频率为 30 GHz，每个 RRH 的传输功率固定为 33 dBm。此外，每个 RRH 具有两个分别为  $-45$  度和  $-135$  度方向安装的天线面板。为 RRH 分配了单独的 PSS/SSS 序列标识，使得在同一位置不能从多个 RRH 中监听到相同的 PSS 和 SSS 序列组合，并且相邻 RRH 的 PSS 序列总是不同的。除了 SS 块外，每个 RRH 都以完整的缓冲区流量模型在整个频带上传输用户数据。

假设列车通过使用上文描述的估计器，以 100 ms 的间隔从 SS 突发集中获得 AOD 和 TOA 测量值。根据 SS 突发集的周期性，测量也可以以相当高的间隔进行，例如 5 ms，这将提高对噪声和干扰的容忍度。为简单起见，仅从 3 个最大功率 RRH 中考虑 AOD 和 TOA 测量。使用第二部分中描述的信道模型，将列车接收器的噪声系数定义为 5 dB，将基本热噪声功率密度定义为  $-174$  dBm/Hz。但是，需要

注意的是，在仿真过程中，无线电信道的属性，特别是多普勒扩展，会随着列车速度的变化而变化。在列车中，有两个天线板安装在火车的机头和尾部，并且天线波束固定在面板的方向。

AOD 估算误差和 TOA 距离的累积分布如图 4 所示，其中  $x$  轴的值以基于 AOD 估计的角度误差（度数）为单位，基于 TOA 估计的距离误差以米为单位。可以观察到，对于 AOD 估计，95% 的估计误差值低于 1.3 度，对于基于 TOA 的距离估计，其误差低于 1.6 m。

由于 TOA 估计的离散性，其中传播时延估计的分辨率受限于使用的采样率，因此基于 TOA 距离估计的累积误差分布函数具有明显的线性表现误差区域。由于使用的采样频率为  $F_s = 245.76$  MHz，所以距离估计的分辨率为  $c/F_s = 1.21$  m。

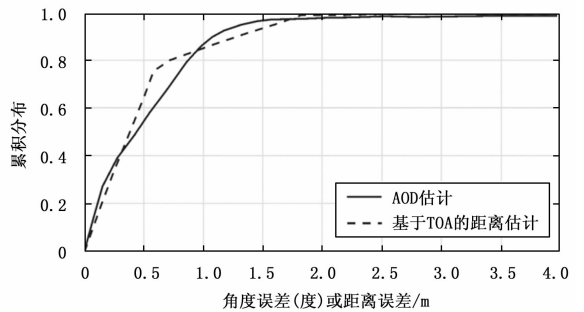


图 4 AOD 估算值（角度误差）和 TOA 距离估算值（距离误差）的累积误差分布

AOD 测量、TOA 测量和两种测量（AOD + TOA）的绝对定位误差累积误差分布如图 5 所示。由于特定的系统几何结构，当列车在 RRH 之间时，AOD 在很长一段时间内保持恒定，因此仅使用 AOD 无法提供令人满意的定位性能。但是，由于基于 TOA 的估计仅在靠近测得的 RRH 时性能下降，并且大多数时候列车距离测得的 RRH 相对较远，因此基于 TOA 的方法能够显著提高定位性能。尽管如此，当同时使用 AOD 和 TOA 测量时，由于两种测量类型从系统几何角度相互补充，因此定位性能还可以提高。

从跟踪的角度来看，AOD 测量、TOA 测量或同时使用这两个测量之间的计算负荷差异相对较小，因为使用的测量集只影响雅可比矩阵的行数。通过同时考虑 AOD 和 TOA 测量，平均误差精度为 0.66 m，低于 5G 的目标（1 m）。此外，95% 的定位误差在 1.7 m 以下，而 99% 的在 2.3 m 以下，目标子表定位精度可以在大约 75% 的时间内达到。另外，尽管在图中未示出，但是在列车加速度的各个单独值中，定位精度是相似的。然而，每当列车加速度发生变化时，跟踪算法都会出现滞后现象，这会在一定的状态收敛周期内影响跟踪精度。

### 5 结束语

利用 5G NR 移动网络及其特定的同步信号研究了高速列车的定位性能，首先在处理接收到的同步信号的基础上

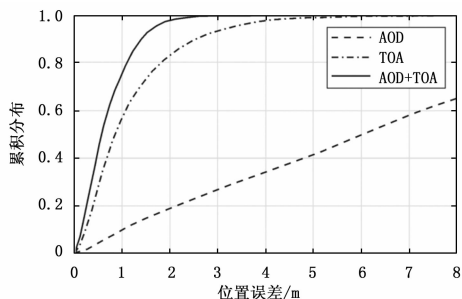


图 5 列车位置误差的累积误差分布

开发了实用的 TOA 和 AOD 估计器。通过使用针对所考虑场景描述的通道模型, 模拟了一条长度超过 43 km 的列车轨道。基于 AOD 和 TOA 的测量结果以及基于 EKF 的跟踪模型, 获得了 0.66 m 的平均定位精度, 其中 1.7 m 以下的误差为 95%。由于特定的系统几何形状, 与使用 AOD 测量相比, 使用 TOA 测量可获得更好的定位性能。但是, 通过所使用的 EKF 跟踪算法中同时包含 TOA 和 AOD 测量值, 定位性能得到了进一步提高, 并实现了低于 5G 目标值的平均跟踪精度。对于将来的研究, 重要的是要考虑具有适当通道模型的不同定位环境。此外, 包括时钟同步误差对跟踪解决方案和定位性能评估的影响, 将为解决方案的实际可行性提供重要的见解。但是, 由于提出的定位性能已经处于非常较先进的水平, 因此可以认为, 基于 5G 的高速列车定位解决方案具有巨大的潜力。

参考文献:

[1] 张越良. 5G 新空口下行同步和广播信道的仿真与 FPGA 实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.  
 [2] 程飞, 章平, 陈新泉, 等. 5G 移动通信系统中协作定位技术展望 [J]. 天津理工大学学报, 2020, 36 (2): 45-51.  
 [3] 杨熙. 基于大规模 MIMO 的中继传输技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.

(上接第 135 页)

参考文献:

[1] 方红伟, 陶月, 肖朝霞, 等. 并网逆变器并联系统的鲁棒控制与环流分析 [J]. 电工技术学报, 2017, 32 (18): 248-258.  
 [2] 花文波. 基于  $H_\infty$  鲁棒控制的稳定跟踪平台扰动抑制方法研究 [J]. 红外技术, 2017, 39 (9): 859-863.  
 [3] 任立通, 谢寿生, 王磊, 等. 不确定航空发动机分布式控制系统自适应滑模控制 [J]. 航空动力学报, 2017, 32 (8): 2032-2040.  
 [4] 蔡超豪. 直驱式永磁同步风力发电机的  $H_\infty$  控制 [J]. 电气自动化, 2011, 33 (5): 21-23.  
 [5] Walters E, Amrhein M, O'Connell T, et al. INVENT Modeling, Simulation, Analysis and Optimization [A]. Aiaa Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum &

[4] 张书楠. 基于 5G 毫米波信号的 TOA 估计及定位算法的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.  
 [5] 李世党. 面向 B4G/5G 无线网络的干扰对齐与干扰管理技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.  
 [6] 张平, 陈昊. 面向 5G 的定位技术研究综述 [J]. 北京: 北京邮电大学学报, 2018, 41 (5): 1-12.  
 [7] 丁科休. 5G 车联网节点自适应组网控制方法及其应用 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.  
 [8] 胡雪畅. 基于 5G 网络的列控系统车车通信无线资源分配算法研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.  
 [9] 胡威. 基于 LTE-R 的高速列车定位方法研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.  
 [10] 王晓明, 王晨, 王志强, 等. LTE 系统上行链路调度算法研究 [J]. 通信技术, 2020 (3): 667-672.  
 [11] 彭友志, 田野, 张炜程, 等. 5G/GNSS 融合系统定位精度仿真分析 [J]. 厦门, 厦门大学学报 (自然科学版), 2020, 59 (1): 101-107.  
 [12] Koivisto M, Hakkarainen A, Costa M, et al. Continuous high-accuracy radio positioning of cars in ultra-dense 5G networks [A]. Wireless Commun and Mobile Computing Conf (IWCMC) [C]. 2017, 115-120.  
 [13] 王新宇. 基于软件无线电平台的 NB-IoT 下行链路物理层设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.  
 [14] 李先驰, 朱宇. 一种鲁棒的 3GPP-LTE 下行链路初始同步算法 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14 (2): 212-218.  
 [15] 蒋锐, 尹惠, 徐友云. 基于毫米波高铁车地通信的自适应多波束成形方法 [J]. 计算机科学, 2020, 47 (6): 272-276.  
 [16] 陈诗军, 王慧强, 陈大伟. 面向 5G 的高精度融合定位及关键技术研究 [J]. 中兴通讯技术, 2018 (5): 1-9.  
 [17] 潘峰. 基于 GIS、无线定位、无线通讯的移动空间信息综合应用模型的研究 [D]. 广州: 中国科学院研究生院 (广州地球化学研究所), 2006.

Aerospace Exposition [C]. 2013.  
 [6] 熊攀, 韩建定, 陈卓. 航空高压直流起动/发电机系统非线性建模研究 [J]. 微电机, 2012, 45 (12): 40-44.  
 [7] 王广雄, 袁欣.  $H_\infty$  设计: 两块还是三块问题 [J]. 电机与控制学报, 2001 (2): 81-83.  
 [8] 阮阳, 袁荣湘, 万黎, 等. 同步发电机的非线性鲁棒电压控制 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (9): 9-16.  
 [9] Yoeh S S, Yang T, Tarisciotti L, et al. More electric aircraft starter-generator system with utilization of hybrid modulated model predictive control [A]. International Conference on Electrical Systems for Aircraft [C]. IEEE, 2017.  
 [10] Yeoh S S, Gao F, Bozhko S, et al. Control design for PMM-based starter generator system for More Electric Aircraft [A]. 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications [C]. Lappeenranta, 2014, 1-10.