

基于OFDM索引调制的通信定位方法



Communication and Positioning Method Based on OFDM Index Modulation

杨旭旭/Yang Xuxu, 刘炳宏/Liu Binghong,
彭木根/Peng Mugen

(北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 中国 北京, 100876)
(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing
University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202601007

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260224.1641.002>

网络出版日期: 2026-02-25

收稿日期: 2025-12-26

摘要: 针对全球导航卫星系统 (GNSS) 拒止环境下传统定位方法抗干扰能力弱、频谱利用率低及峰均功率比高等问题, 提出一种融合惯导与正交频分复用 (OFDM) 网格编码索引调制的通信定位方案。该方法通过将激活子载波位置作为索引传递基站坐标等导航辅助信息, 结合网格编码规则实现导航辅助信息的高效嵌入与解码, 同时保留部分子载波用于测距。接收端融合惯性测量单元 (IMU) 推算与多基站测距结果, 采用扩展卡尔曼滤波实现协同定位。仿真结果表明, 在多径衰落信道下, 所提方案在保障通信性能的同时, 定位精度显著优于传统方法, 尤其在低信噪比区域具有更强的鲁棒性。

关键词: 通信定位一体化; 惯性导航; 融合定位; 索引调制

Abstract: To address the weaknesses of traditional positioning methods in global navigation satellite system (GNSS)-denied environments, including poor anti-jamming capability, low spectrum efficiency, and high peak-to-average power ratio, this paper proposes a communication-positioning solution integrating inertial navigation with orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) grid-coded index modulation. By using activated subcarrier positions as indices to transmit navigation-aided information such as base station coordinates, combined with grid-coding rules, this method achieves efficient embedding and decoding of navigation data while reserving some subcarriers for ranging. The receiver integrates inertial measurement unit (IMU)-derived estimates with multi-base station ranging results, employing extended Kalman filtering for cooperative positioning. Simulation results demonstrate that under multipath fading channels, the proposed scheme significantly outperforms conventional methods in positioning accuracy while maintaining communication performance, exhibiting enhanced robustness particularly in low signal-to-noise ratio regions.

Keywords: integrated communication and positioning; inertial navigation; fusion positioning; index modulation

引用格式: 杨旭旭, 刘炳宏, 彭木根. 基于OFDM索引调制的通信定位方法 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(1): 38-45. DOI: 10.12142/ZTETJ.202601007

Citation: Yang X X, Liu B H, Peng M G. Communication and positioning method based on OFDM index modulation [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(1): 38-45. DOI: 10.12142/ZTETJ.202601007

随着5G的商用部署, 移动通信系统的定位能力正在从传统的辅助性服务向核心网络功能转变。面向6G时代的无人系统、应急通信、低空通航等新兴应用需求, 定位技术需要在精度、可靠性、覆盖范围等方面实现显著提升, 以适应更加多样化和苛刻的应用环境。

现有的定位解决方案包括全球导航卫星系统 (GNSS)

和第3代合作伙伴计划 (3GPP) 定义的基于网络的方法^[1]。GNSS广泛应用于民用、工业和军事等多个领域, 但其信号易受遮挡与干扰等因素影响, 在城市峡谷、隧道、室内及低空飞行等典型非视距环境中, 常常出现定位精度下降甚至完全失效的问题, 难以满足关键场景下对连续、可靠、高精度定位的需求。近年来, 基于5G新空口 (5G NR) 的蜂窝定位成为研究热点, 其在室内外环境中均能兼顾精度与覆盖范围, 尤其适用于移动目标定位^[2]。

3GPP在第16版标准TS38.855中明确规定了多种5G定位方法, 包括下行链路到达时差 (DL-TDOA)、上行链路到

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62401073); 中国通信学会青年人才托举项目 (2024-2026QNRC001)

达时差 (UL-TDOA)、多次往返时间 (Multi-RTT)、下行链路离开角 (DL-AOD)、上行链路到达角 (UL-AOA) 以及增强型小区识别 (E-CID)^[3]。其中, 时延与角度信息被视为 5G 定位中最核心的信号特征。TDOA 方法具备较高精度, 但严重依赖多个基站之间的亚纳秒级时间同步^[4], Multi-RTT 方法则可以在无同步场景下实现测距, 但定位精度依赖可观测基站数量^[5], 文献[5]将多天线的 AOD 能力集成到 Multi-RTT 定位中, 建立了 5G RTT/AOD 定位模型, 能够解决基站数量小于 3 个场景下采用 RTT 定位效率低的问题。结果表明, AOD 的加入使水平与垂直精度分别提升约 25% 和 65%。然而, 该研究未考虑信号的非视距和多径传播的问题, 且 AOD 测量对天线校准要求较高, 部署成本高。3GPP Release 18 引入了对侧链 (SL) 定位的增强支持, 扩展了自 Release 14 以来 SL 技术的应用范围。SL 定位允许通过 SL 接口传输的定位参考信号 (SL PRS) 实现目标用户设备 (UE) 的测距与测角, 可根据绝对位置、相对位置或范围信息确定 UE 的位置。该方法可在覆盖范围内、覆盖外及部分覆盖场景下工作, 具备良好的灵活性与环境适应性^[6], 但在实际应用中仍面临诸多挑战, 例如可用于传输 SL PRS 的带宽资源有限, 以及定位锚点的可用性难以保障等问题。文献[7]评估了影响二维绝对定位精度的关键因素。结果表明, 要实现 90% 用户设备达到 1 m 精度至少需要 100 MHz 带宽。尽管增加锚点数量有助于提升定位精度, 但其随着数量增加逐渐趋于饱和, 同时仍受限于锚点间的同步误差与非视距传播等因素。

尽管 TDOA、AOA 和 SL 等无线定位技术在多种场景中具备较高精度, 但其本质上仍依赖于外部信号的时频特性与质量。在无外部传感器辅助下, 当通信链路质量恶化或定位参考信号出现中断时, 这些方法难以实现连续稳定的轨迹估计。为提升导航定位的自主性与连续性, 惯性测量单元 (IMU) 被广泛用于短时间无外部定位信号下的导航补偿。但 IMU 的累积漂移问题不可忽视, 若缺乏准确的外部定位修正, 其误差将迅速扩散, 对最终融合精度构成威胁。近年来, 惯导系统与其他外部定位源融合定位获得高度关注。文献[8]指出, 视觉、超宽带 (UWB) 与 IMU 等混合感知是实现连续室外无人机定位的关键路径。文献[9]利用动态协方差估计结合 IMU 预积分与滑动窗口因子图优化实现 UWB 与 IMU 融合定位, 在复杂室内环境中精度较传统方法提升 38%, 动态条件下均方根误差达 12.3 cm。文献[10]对基于误差状态卡尔曼滤波器与图优化方法的 5G 到达时间测距数据与惯性传感器数据融合方案进行了对比分析, 验证了其在微型飞行器室内精确定位中的应用潜力。文献[11]依靠正交频分复用 (OFDM) 信号进行无人机间通信测距, 实现无人机

集群内部高精度相对测距, 修正惯导定位误差。

鉴于传统网络定位在同步依赖、复杂环境及连续估计等方面的不足, 本文面向终端自主定位需求, 提出一种融合惯导与 OFDM 网格编码索引调制的通信定位方案。地面基站通过组合数索引映射方式将自身坐标编码为网格编号, 并嵌入至 OFDM 子载波的激活模式中进行广播。无人机终端接收信号后, 首先进行能量检测解码出基站坐标信息, 随后基于 TOA 测距原理, 利用 OFDM 符号中的测距序列获得测距值, 将其作为观测量输入扩展卡尔曼滤波器 (EKF)。在 EKF 框架下, 结合基站位置信息与本地 IMU 提供的短时导航信息, 可实现对无人机自身轨迹的连续、高精度估计。

1 信号模型与定位流程

融合通信定位系统的总体架构如图 1 所示, 发射端为地面基站, 接收端为无人机。一体化信号由测距序列、通信数据以及用于辅助定位的系统信息共同构成。利用 OFDM 子载波的正交特性, 将测距序列与通信数据分别映射到不同的正交子载波上, 实现通信与测距的并行传输。

接收端集成惯性导航单元, 通过测距序列相关检测获得距离观测值, 并解调通信数据恢复基站位置信息。系统将距离测量值、基站坐标与惯导数据输入扩展卡尔曼滤波器进行融合处理, 实现高精度实时定位。

2 基于范围的常用定位算法

本节将介绍几种常用的定位算法, 该类算法通过测量信号的物理属性 (如时间、角度) 来估计距离或位置, 通常需要至少 3 个参考点来实现二维定位。

2.1 TOA

TOA 测量信号从 UE 到基站的传播时间, 结合多基站距离数据进行三边定位。假设信号以光速 c (约 3×10^8 m/s)

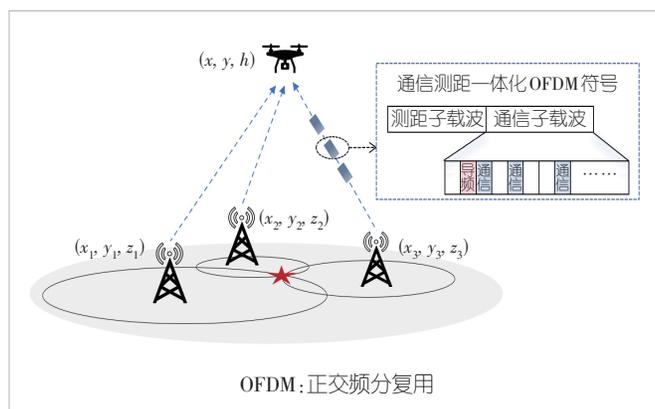


图1 通信定位融合系统架构图

传播，距离 $d_i = c \times t_i$ ，其中 t_i 是传播时间。对于基站坐标 (x_i, y_i, z_i) 和距离 d_i ，目标位置 (x, y, z) 满足公式 (1)：

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2 \quad (1)$$

该算法精度高，可以直接计算距离，但需要精确的时钟同步，易受多径传播和非视距影响。

2.2 TDOA

TDOA 通过测量信号从 UE 到达多个基站的到达时间差来定位。在 5G 中，TDOA 常使用 UL-TDOA，即 UE 发送信号，基站接收并计算时间差。对于基站 i 和 j ，时间差 $\Delta t_{ij} = t_i - t_j$ ，对应距离差 $d_{ij} = c \times \Delta t_{ij}$ ，通过双曲线定位求解公式 (2)：

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2} = d_{ij} \quad (2)$$

该算法优点是无需 UE 与基站时钟同步，但其计算复杂度高且需要基站间纳秒级高精度同步。

2.3 AOA

AOA 通过基站的天线阵列测量信号的入射角度，结合多个基站的 AOA 数据确定位置。5G 利用大规模多输入多输出 (MIMO) 技术，增强角度分辨率。对于基站 i 和角度 θ_i ，

位置关系满足公式 (3)：

$$y - y_i = (x - x_i) \tan \theta_i \quad (3)$$

该算法无需距离测量，但需要复杂天线阵列，多径效应会导致角度误差。

3 网格索引调制融合定位算法

尽管 TOA、TDOA、AOA 等传统几何定位算法在理论上具有较高的定位精度，但这些传统方法存在固有缺陷。一方面，基站坐标等辅助信息通常采用直接传输方式，需要消耗大量频谱资源；另一方面，算法均为单一信息源定位，高度依赖无线信号的传输质量，一旦出现信号中断、严重衰落或非视距传播等情况，定位功能将完全失效。

本节介绍所提出的融合定位算法，该算法基于 TOA 算法，通过构建扩展卡尔曼滤波框架，将测距观测量、网格索引调制隐式传递的基站位置信息以及惯导数据进行融合，其框图如图 2 所示。该方案在保持通信功能正常运行的前提下，实现复杂环境下的高精度实时定位。

3.1 网格索引映射方法

由于 OFDM 系统存在峰均功率比 (PAPR) 高和对多普勒频移敏感的问题，本系统采用基于 OFDM 的索引调制技术，在激活的子载波上传输通信数据，同时利用激活子载波

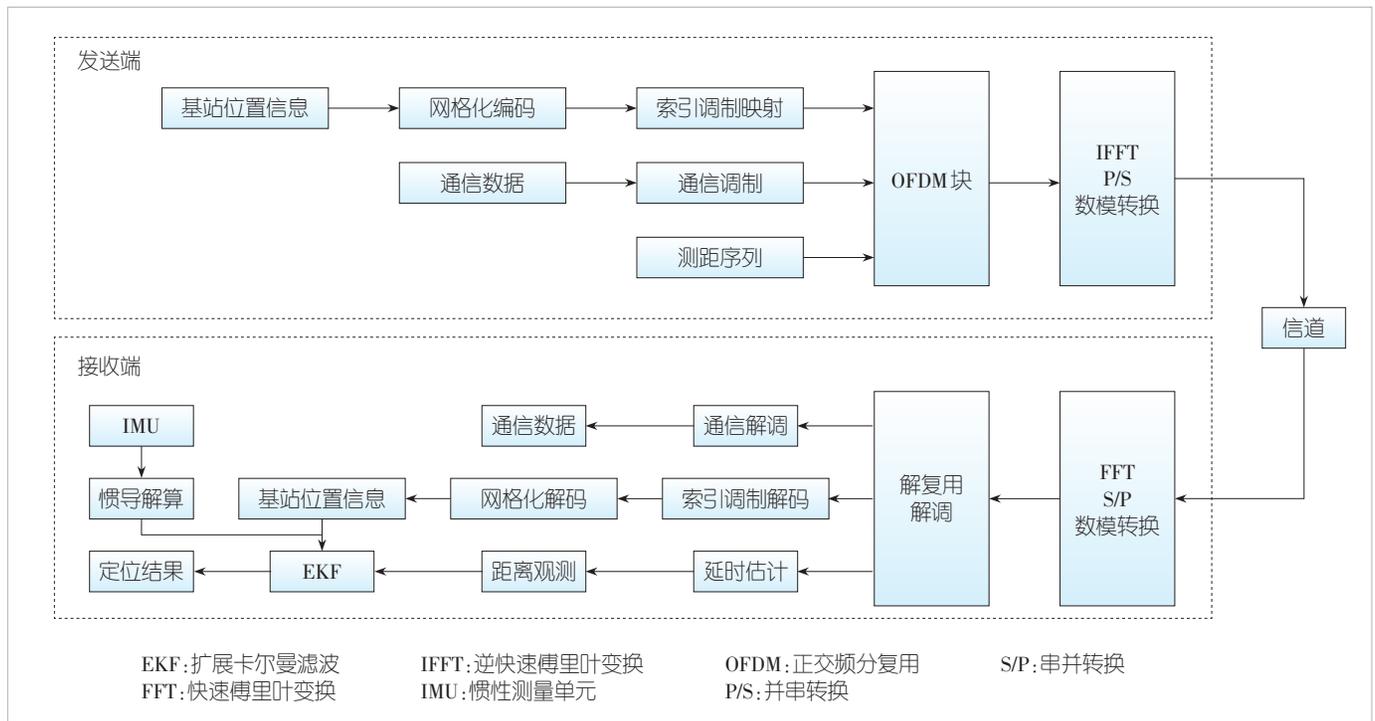


图 2 基于网格索引调制的通信定位融合框图

的索引组合传输基站位置坐标等导航辅助信息。此外，为抑制多普勒效应引起的载波频率偏移，本系统在每个子块的激活子载波中固定首个子载波用于导频传输，由于频偏会导致接收信号的子载波间存在相位旋转，因此可利用导频子载波在频域上的相位变化进行频偏估计与补偿。

图3为网格编码索引映射示意图，将所有可用子载波按预设规则划分为多个子块，每个子块仅部分子载波被激活用于传输通信数据，其余非激活子载波保持静默状态。为了实现基站位置的高效隐式传递，系统采用预配置网格映射机制，在覆盖区域内预先建立规则网格划分，网格分辨率根据定位精度按需确定。设每个子块包含 n 个子载波，其中激活 k 个子载波，则纵横坐标各自可表示 $C(n,k)$ 种状态，共可表示 $C(n,k) \times C(n,k)$ 个网格位置。根据基站的实际二维位置（固定高度），将其映射至对应的网格，并提取该网格的坐标编号。随后，将纵横坐标分别映射为激活子载波的位置索引，索引的确定采用组合数映射方法，从而完成基站位置信息的编码与传输，组合数映射算法流程见图4。

首先初始化剩余激活子载波数和当前搜索子载波起始位置，判断 $C(p,r)$ 与要传递的十进制编号数 Z 的关系。若 $C(p,r) > Z$ ，说明当前索引 p 处未被激活。令 $p = p - 1$ ，若 $C(p,r) \leq Z$ ，说明当前位置 p 为激活位置。记录 $I_r = p$ ，更新 $Z = Z - C(p-1,r)$ ， $r = r - 1$ ， $p = p - 1$ ，直到 $r > 0$ 不满足，输出激活位置索引集合 $\{I_1, I_2, \dots, I_k\}$ 。

接收端根据能量检测识别的激活子载波位置，并根据编号与组合数映射关系 $Z = C(I_1,1) + C(I_2,2) + \dots + C(I_k,k)$ ，还原网格编号，进一步查找该编号在地图上的实际坐标，从

而完成坐标解码。

3.2 融合定位算法

基站与无人机利用OFDM测距序列实现基于TOA的测距，估计信号的传播时延为：

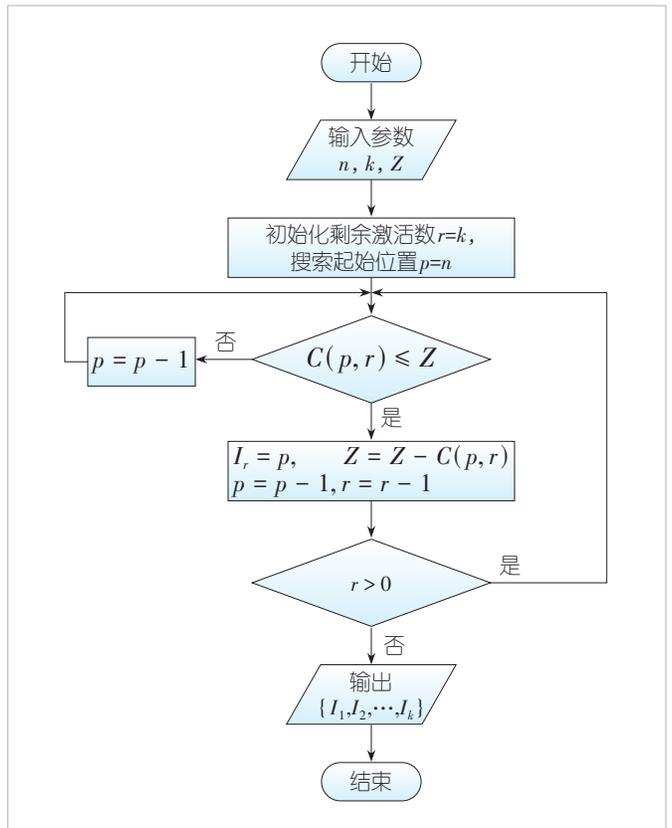


图4 组合数索引映射流程图

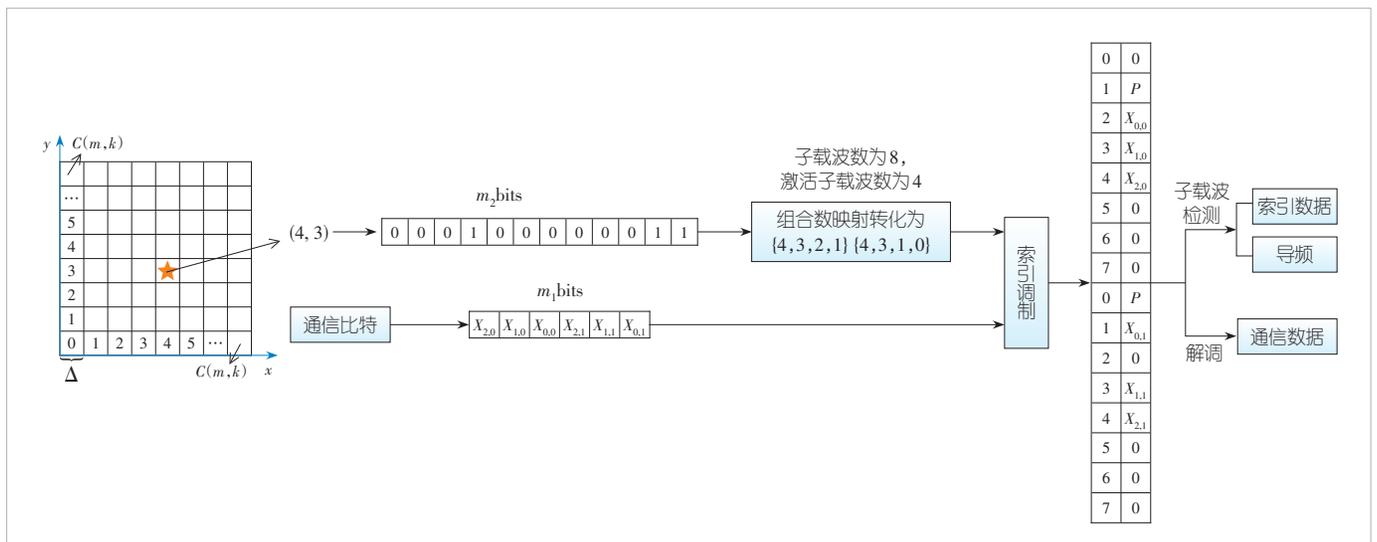


图3 网格编码索引映射示意图

$$\hat{\tau}_i = \frac{\arg \max_{\tau} \left| \int r_i(t) s^*(t - \tau) dt \right|}{f_s} \quad (4),$$

其中, $r_i(t)$ 为接收到第 i 个基站的发射信号, $s(t)$ 为已知 OFDM 测距符号, f_s 为采样率。

测距值可写成公式 (5) 的形式:

$$\hat{d}_i = c \cdot \hat{\tau}_i \quad (5),$$

其中, c 为光速。该处理可同时获得多个基站的观测测距值, 记为:

$$\mathbf{Y}_k^T = [\hat{d}_1 \ \hat{d}_2 \ \hat{d}_3] \quad (6)。$$

无人机配备 IMU, 可连续输出加速度 $\mathbf{a}_k = [a_{x,k}, a_{y,k}]^T$ 及角速度 ω_k 。结合这些观测量可建立系统的状态预测模型, 设状态向量为:

$$\mathbf{X}_{k-1} = [x_{k-1} \ y_{k-1} \ v_{x,k-1} \ v_{y,k-1} \ \psi_{k-1} \ \omega_{k-1}]^T \quad (7),$$

其中, x_{k-1} 、 y_{k-1} 为 $k-1$ 时刻终端的二维平面位置, $v_{x,k-1}$ 、 $v_{y,k-1}$ 为对应方向速度, ψ_{k-1} 为航向角, ω_{k-1} 为角速度。

在输入 IMU 加速度后, 状态预测模型可表示为:

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + v_{x,k-1} \Delta t \\ y_k = y_{k-1} + v_{y,k-1} \Delta t \\ v_{x,k} = v_{x,k-1} + (a_{x,k-1} \cos \psi_{k-1} - a_{y,k-1} \sin \psi_{k-1}) \Delta t \\ v_{y,k} = v_{y,k-1} + (a_{x,k-1} \sin \psi_{k-1} + a_{y,k-1} \cos \psi_{k-1}) \Delta t \\ \psi_k = \psi_{k-1} + \omega_{k-1} \Delta t \\ \omega_k = \omega_{k-1} \end{cases} \quad (8),$$

其中, 加速度 $(a_{x,k-1}, a_{y,k-1})$ 为机体坐标系下的测量值, 而速度 $(v_{x,k-1}, v_{y,k-1})$ 通常定义在导航坐标系中, 因此需要通过航向角 ψ_{k-1} 将加速度从机体坐标系转换到导航坐标系中。

本系统采用 EKF 实现 IMU 预测信息与 OFDM 测距信息的融合定位。EKF 包含预测与更新两个步骤。预测步骤中, 利用状态转移方程:

$$\hat{\mathbf{X}}_k^- = \mathbf{F}_k \cdot \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B}_k \cdot \mathbf{u}_{k-1} \quad (9),$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (10),$$

其中, \mathbf{F}_k 为状态转移矩阵, \mathbf{B}_k 为控制矩阵, \mathbf{u}_{k-1} 为控制输入向量, \mathbf{Q}_k 为过程噪声协方差矩阵。

当接收到多基站 OFDM 测距观测后, 更新步骤为:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (11),$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{Y}_k - h(\hat{\mathbf{X}}_k^-)) \quad (12),$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^- \quad (13),$$

其中, $\mathbf{Y}_k = [\hat{d}_1, \hat{d}_2, \hat{d}_3]^T$ 为当前时刻的测距观测量, $h(\cdot)$ 为非线性观测函数, \mathbf{H}_k 为其雅可比矩阵, \mathbf{R}_k 为测距观测噪声协方差矩阵。观测函数具体为:

$$h_i(\hat{\mathbf{X}}_k^-) = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} \quad (14),$$

其中, (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个基站的三维坐标, z_0 为接收端已知高度。

4 仿真与分析

本节基于 MATLAB 仿真平台构建了完整的系统仿真环境。仿真场景为典型城市密集区无人机配送环境, 包括 3 个基站和 1 个无人机的场景。场景设定为城市建筑物密集分布区域, 基站间距 200 ~ 300 m。在信道建模中综合考虑路径损耗、阴影衰落和多径衰落复杂信道特性, 以模拟复杂城市传播环境。路径损耗建模为 $PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10}(d/d_0) + X_\sigma$, 其中参考距离 $d_0 = 1$ m, $PL(d_0) = 32.4 + 20 \log_{10}(f_c)$ 处的路径损耗 ($f_c = 3.5$ GHz 时 $PL(d_0) = 43.3$), 路径损耗指数 $n = 3$ 反映城市环境的高衰减特性, 阴影衰落 X_σ 服从零均值高斯分布, 标准差 $\sigma = 7.8$ dB, 相比郊区环境 ($\sigma = 4 \sim 6$ dB) 更大, 体现了复杂传播特性, 多径数目为 5, 包含多条建筑物反射/散射径, 信道冲激响应为 $h(t, d) = \sqrt{10^{-\frac{PL(d)}{20}}} \times \sum_{i=1}^L \alpha_i \delta(t - \tau_i)$, 其他仿真参数如表 1 所示。

4.1 通信性能分析

4.1.1 PAPR 与频谱效率分析

在 OFDM 系统中, 由于多个子载波在时域叠加, 容易出现信号瞬时功率远大于平均功率的情况, 这种功率起伏用 PAPR 来衡量。PAPR 的定义如公式 (15) 所示:

表1 仿真参数与数值

仿真参数	数值
带宽	15.36 MHz
调制方式	QPSK
载波间隔	15 kHz
总子载波数	1 024
每个子块内子载波数	8
每个子块内激活子载波数	4

QPSK: 正交相移键控

$$PAPR = \frac{\max_{0 \leq n < N} |x[n]|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2} \quad (15)$$

PAPR值越高，功率放大器具有的线性范围就越大。这会降低其工作效率，增加系统的功耗与成本。因此，在实际系统设计中，应尽量控制PAPR的大小，确保发射信号的功率特性在功放可承受范围内，提升系统能效。

在传统部分子载波激活方案中，未被激活的子载波通常置零，不传输任何有效信息，导致频谱利用率降低。索引调制通过将导航辅助信息映射到子载波激活模式中，使这些原本闲置的子载波位置也能承载信息，从而有效弥补了部分子载波未被激活所带来的频谱利用率损失。设每个子块包含 n 个子载波，其中有 k 个被激活用于传输通信数据，其余子载波置零，则可能的激活模式组合数为 $C(n,k) = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ ，由此可映射的索引比特数为 $N_b = \lfloor \log_2 C(n,k) \rfloor$ 。这种方式在不增加带宽的前提下实现导航辅助信息嵌入，从而提升了频谱利用效率。系统的频谱总效率可表示为：

$$\eta = \frac{k \log_2 M + \lfloor \log_2 C(n,k) \rfloor}{n} \quad (16)$$

其中， M 为通信子载波的调制阶数。

本文进一步分析了激活子载波数量对PAPR的影响。选取每个子块内子载波数 $n = 8$ ，改变激活子载波数量 $k = 1, 3, 4, 6$ 进行仿真，绘制其PAPR的互补累积分布函数(CCDFF)曲线如图5所示。可以看出，激活子载波数量越少，其PAPR值越低。

为综合评估所提方案中采用的OFDM_IM技术的频谱效率(SE)和PAPR，本文构建如下综合性能指标：

$$J = \alpha \cdot \frac{SE}{SE_{\max}} + \beta \cdot \left(1 - \frac{PAPR}{PAPR_{\max}} \right) \quad (17)$$

其中，权重系数 $\alpha + \beta = 1$ ， SE_{\max} 和 $PAPR_{\max}$ 分别为频谱效率和PAPR的归一化基准。考虑到无人机的功耗敏感特性，设置 $\alpha = 0.2$ ， $\beta = 0.8$ 。归一化基准采用传统OFDM的性能参

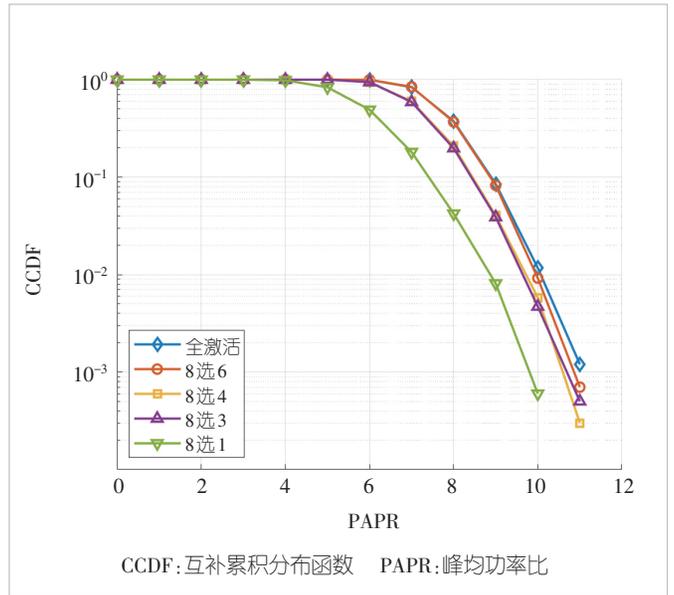


图5 不同激活子载波数目下PAPR的CCDF曲线

数，调制方式为QPSK。基于PAPR的CCDF仿真结果，在 $CCDF = 10^{-2}$ 处提取各系统性能参数，由公式(16)计算得出 $SE_{\max} = 2.0 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ，由图4得到 $PAPR_{\max} = 10.2 \text{ dB}$ 。计算的综合性指标如表2所示。

结果显示，适当的OFDM索引调制激活方案能够提升系统的综合性能。在所测试的方案中，OFDM_IM(8选6)相比传统OFDM性能提升12%，但其组合数只有28，这意味着在相同的范围内，其网格精度更低。而OFDM_IM(8选4)相比传统OFDM实现了11.0%的性能提升，且组合数最多，在相同的范围内网格精度更高。索引调制的关键在于找到合适的子载波激活比例，既不能过度追求频谱效率而忽略PAPR性能，也不能过分降低激活子载波数量导致频谱利用率严重下降。

4.1.2 误比特率分析

图6展示了所提出的网格索引调制的OFDM通导一体化方案与传统OFDM通导一体化方案的误码率性能对比。从仿

表2 不同子载波激活方案的综合性对比

子载波激活方案	组合数	SE/(bit·s ⁻¹ ·Hz ⁻¹)	PAPR/dB	综合指标J	性能提升/%
传统OFDM	—	2.000	10.2	0.200	—
OFDM_IM(8选6)	28	2.000	9.9	0.224	12.0
OFDM_IM(8选4)	70	1.750	9.6	0.222	11.0
OFDM_IM(8选3)	56	1.375	9.5	0.192	-4.0
OFDM_IM(8选1)	8	0.625	8.8	0.172	-14.0

IM:索引调制 OFDM:正交频分复用 PAPR:峰均功率比 SE:频谱效率

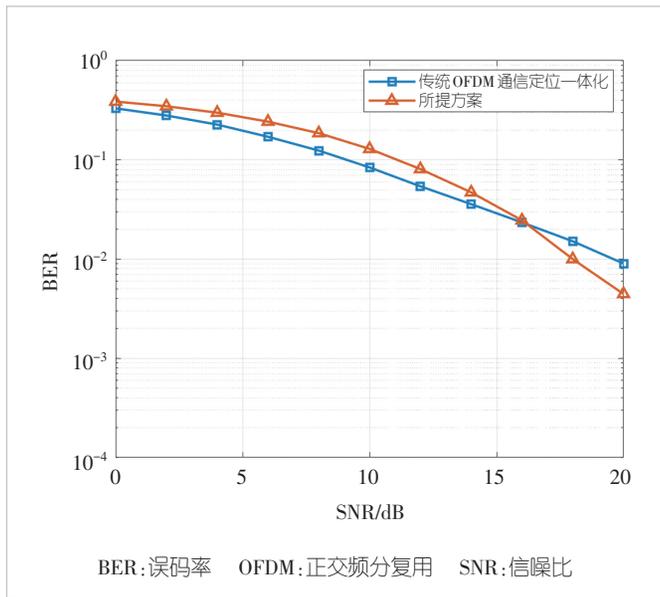


图6 通信性能仿真比较

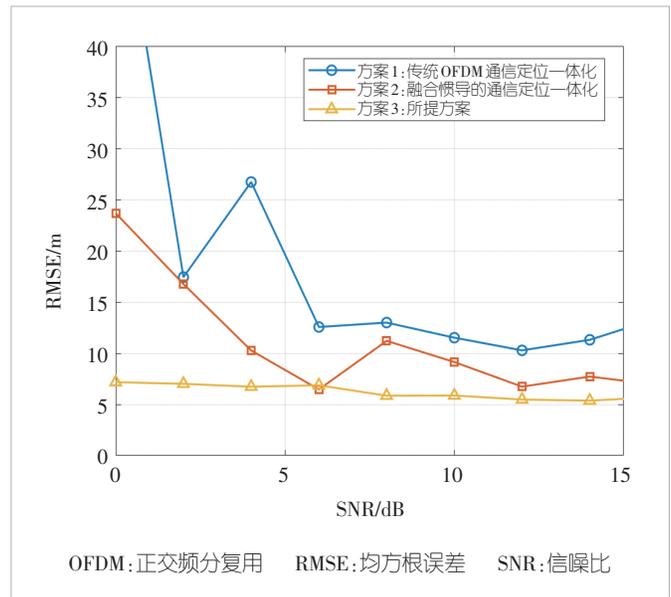


图7 定位性能仿真比较

真结果可以看出，两种方案的BER性能都随着信噪比的增加呈现指数级下降趋势。在低SNR区域，所提方案略高于传统OFDM方案。这是因为所提方案需要同时进行索引检测和数据解调两个过程。在低信噪比条件下，噪声功率较大导致索引子载波识别容易出现错误。索引检测错误会影响后续的数据解调过程，从而导致BER性能的轻微恶化。

随着信噪比的提升，所提方案逐渐显现出性能优势。这主要归因于索引检测准确性的显著提高。能量检测算法能够准确识别激活子载波的位置。所提方案在信噪比为20 dB处，误码率性能提升约3 dB。

4.2 定位性能分析

图7展示了3种不同方案的定位RMSE随信噪比变化的性能对比。其中，方案1为传统OFDM通信定位一体化，方案2为融合惯导的通信定位一体化，方案3为本文所提出的网格索引调制OFDM通信定位一体化。方案2与方案3的主要区别在于基站坐标传输方式：方案2采用传统直接调制传输，易受噪声干扰导致坐标信息丢失；方案3通过网格编码索引调制隐式嵌入坐标，减少子载波占用并提升低SNR下的解码准确性。

从仿真结果观察到，在低SNR区域，方案1的RMSE表现出较大的波动性，这种不稳定性主要源于传统方案在恶劣信道条件下测距精度的显著恶化；方案2通过融合惯性导航信息，定位误差基本维持在20 m以内，但仍存在较大的波动；相比之下，本文所提出的方案3在整个SNR范围内都表

现出优异且稳定的定位性能。这种显著的性能优势主要归因于以下几个方面：首先，索引调制通过激活子载波模式直接传输基站坐标信息，避免了传统方案中基站位置信息传输的不确定性；其次，即使在低SNR条件下出现部分索引检测错误，由于坐标信息的网格编码索引特性，仍能保证基站位置信息的基本准确性；最后，EKF融合算法能够有效平滑瞬时的测距误差，进一步提升定位精度的稳定性。

随着SNR的增加，3种方案的定位性能都逐渐改善并趋于收敛，在高SNR区域性能差异逐渐减小。这表明在良好的信道条件下，测距精度不再是限制定位性能的主要因素。此时系统性能更多地取决于几何精度稀释因子和算法的内在精度限制。值得注意的是，方案3不仅在低信噪比下具有显著优势，在整个SNR范围内都保持了稳定的性能，曲线波动最小。在SNR=14 dB下，相比方案1和方案2，方案3的性能分别提升6.4 dB和3.1 dB。这一结果验证了网格索引调制OFDM通导一体化方案的有效性，证明了该方案能够在保证通信质量的同时，显著提升系统的定位性能，特别是在恶劣信道环境下的定位鲁棒性。

5 结束语

本文提出了一种改进的融合通信定位方法。为提升基站坐标索引调制在噪声环境下的解码准确性，引入了网格编码索引映射机制，通过在基站服务区域内建立网格划分结构，将实际坐标离散映射为格点编号，并采用索引激活方式进行编码。该网格编码索引映射方案具有良好的扩展性，可灵活

传输设备姿态信息、环境参数、网络配置等多维度数据,通过合理的量化策略和自适应网格设计进一步降低系统误差并提升信息传输效率。基站位置坐标等导航辅助信息与终端惯导系统相结合,实现了终端的连续稳定定位。同时,该方法基于OFDM索引调制技术,通过减少子载波激活数量,有效降低了系统产生极高功率峰值的概率。仿真结果表明,所提设计在复杂环境尤其是低信噪比条件下仍可保持较低的定位误差,表现出良好的鲁棒性,为GNSS拒止环境下的高精度、连续性定位提供了一种有效解决方案。

参考文献

- [1] Jornod G, Stark M. Positioning evolutions in 5G standardization: potential, solutions, and challenges of sidelink positioning for connected mobility [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2025, 20(3): 106–114. DOI: 10.1109/MVT.2024.3519080
- [2] Abuyaghi M, Si-Mohammed S, Shaker G, et al. Positioning in 5G networks: emerging techniques, use cases, and challenges [J]. IEEE Internet of Things journal, 2025, 12(2): 1408–1427. DOI: 10.1109/JIOT.2024.3487822
- [3] Liu Y, Shi X F, He S B, et al. Prospective positioning architecture and technologies in 5G networks [J]. IEEE network, 2017, 31(6): 115–121. DOI: 10.1109/MNET.2017.1700066
- [4] Camajori Tedeschini B, Brambilla M, Italiano L, et al. A feasibility study of 5G positioning with current cellular network deployment [J]. Scientific reports, 2023, 13: 15281. DOI: 10.1038/s41598-023-42426-1
- [5] Guo W F, Deng Y, Guo C, et al. Performance improvement of 5G positioning utilizing multi-antenna angle measurements [J]. Satellite navigation, 2022, 3: 17. DOI: 10.1186/s43020-022-00078-y
- [6] Le T K, Wagner S, Kaltenberger F. 5G sidelink positioning in 3GPP release 18 and release 19 [C]//Proceedings of IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). IEEE, 2023: 171–176. DOI: 10.1109/CSCN60443.2023.10453143
- [7] Şahin T, Chiarello L, Michalopoulos D S, et al. Performance evaluation of 5G sidelink positioning [C]//Proceedings of IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). IEEE, 2023: 177–182. DOI: 10.1109/CSCN60443.2023.10453141
- [8] Jarraya I, Al-Batati A, Kadri M B, et al. GNSS-denied unmanned aerial vehicle navigation: analyzing computational complexity,

- sensor fusion, and localization methodologies [J]. Satellite navigation, 2025, 6: 9. DOI: 10.1186/s43020-025-00162-z
- [9] Zhang F Y, Li J, Zhang X Q, et al. Indoor fusion positioning based on “IMU-ultrasonic-UWB” and factor graph optimization method [EB/OL]. arXiv(2025-03-17) [2026-01-16]. <https://arxiv.org/abs/2503.12726>
- [10] Kabiri M, Cimarelli C, Bavle H, et al. Graph-based vs. error state Kalman filter-based fusion of 5G and inertial data for MAV indoor pose estimation [J]. Journal of intelligent & robotic systems, 2024, 110(2): 87. DOI: 10.1007/s10846-024-02111-5
- [11] 樊邦奎, 刘德康, 张瑞雨, 等. 大规模无人机集群通信定位一体化技术 [J]. 信号处理, 2024, 40(1): 7–16. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2024.01.001

作者简介



杨旭旭, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室在读硕士研究生; 主要研究方向为通信导航一体化。



刘炳宏, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室博士后; 主要研究方向为低轨卫星通信和通信导航一体化。



彭本根, 北京邮电大学副校长、教授, IEEE Fellow, 中国电子学会会士, 中国通信学会会士, 连续多年入选科睿唯安ESI全球高被引科学家、爱思唯尔中国高被引学者、全球前2%顶尖科学家“终身科学影响力”和“年度科学影响力”榜单; 长期致力于移动通信和卫星通信的组网基础理论、关键技术及工程应用研究; 发表论文100余篇, Google学术引用2.4万余次。