面向被动式低功耗蓝牙背向散射标签的差分先验近场SAR定位系统

蒋震宇[1]，李蔚明[2]，张夏楠[1]，黄伟[3]，黄朝颖[2,3]，王巍[1*]
（1. 武汉大学计算机学院，湖北 武汉 430072；2. 华中科技大学，湖北 武汉 430074；3. vivo通信研究院，广东 深圳 518101）

摘　要：面向钥匙、行李等低功耗物品查找场景，主动标签需配置射频载波产生与发射电路，增加了标签侧能耗和硬件开销。设计了一种被动式低功耗蓝牙背向散射定位系统，以 Wi-Fi 信号提供外部激励和下行同步，利用双环形器、低噪声放大器和现场可编程门阵列生成蓝牙周期广播与包含恒定音调扩展的蓝牙定位信号。接收端采集同相正交样本、接收信号强度指示和视觉惯性导航系统位姿，并通过数据包级相位补偿、差分合成孔径雷达测角及差分先验辅助近场搜索估计标签位置、到达角和距离。室内外视距与非视距实验表明，系统可持续获取定位观测；四类场景下 95% 测距误差为 0.59～1.02 m，95% 测角误差为 13°～25°，验证了所提方法在多径和遮挡条件下的定位能力。

关键词：被动式低功耗蓝牙；背向散射；定位系统；合成孔径雷达；近场定位；差分先验
中图分类号：TN296
文献标志码：A
doi：10.11959/j.issn.2096−3750.

A differential-prior-assisted near-field SAR localization system for passive Bluetooth low energy backscatter tags

JIANG Zhenyu[1], LI Weiming[2], ZHANG Xianan[1], HUANG Wei[3], HUANG Chaoying[2,3], WANG Wei[1]
1. School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China
2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
3. vivo Communication Research Institute, Shenzhen 518101, China; *.Corresponding author

Abstract: A localization system for passive Bluetooth low energy (BLE) backscatter tags was designed for low-power item-finding applications, where carrier-generation and transmission circuits increase the power consumption and hardware complexity of active tags. External excitation and downlink synchronization were provided by a Wi-Fi signal. BLE-compatible periodic advertising packets with a constant tone extension (CTE) were generated using a dual-circulator structure, a low-noise amplifier, and a field-programmable gate array. CTE in-phase and quadrature samples, received signal strength indicator measurements, and visual-inertial navigation system pose estimates were acquired at the receiver. Packet-level phase compensation, differential synthetic aperture radar (SAR) angle-of-arrival (AoA) estimation, and differential-prior-assisted near-field search were combined to estimate tag position, AoA, and range. Indoor and outdoor line-of-sight and non-line-of-sight tests showed that valid BLE observations could be continuously acquired. Across four scenarios, 95th-percentile ranging errors of 0.59-1.02 m and AoA errors of 13°-25° were achieved. The results indicate that the proposed method can support localization under multipath and blockage conditions.

Key words: passive Bluetooth low energy, backscatter, localization system, synthetic aperture radar, near-field localization, differential prior

收稿日期：XXXX−XX−XX；**修回日期：**XXXX−XX−XX
通信作者：王巍，wangw@whu.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金（No.62522214，No.62471194）；湖北省重点研发计划（No.2025BAB023）
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62522214, No.62471194), The Key Research and Development Program of Hubei Province (No.2025BAB023)

0 引言

面向钥匙、钱包、行李和遥控器等日常物品查找应用，标签应在小体积和低维护成本条件下持续提供位置线索。主动式低功耗蓝牙（BLE, bluetooth low energy）或超宽带标签常需要集成本振、调制、功率放大及协议处理链路，并依赖电池供电；背向散射通过改变天线反射状态将外部激励调制为回波，可显著降低标签端射频复杂度。近年BLE背向散射已在可靠链路、商用设备兼容、扩展广播激励和双向通信等方面取得进展[2-8]，为低功耗物品查找提供了可行的通信基础。

另一方面，BLE 5.1方向寻找机制中的恒定音调扩展（CTE, constant tone extension）为相位定位提供了稳定载波片段。已有工作[9-14,20-22]围绕BLE到达角（AoA, angle of arrival）相位补偿、阵列流形、多基站异常值处理、室外导航以及接收信号强度指示（RSSI, received signal strength indicator）与AoA融合等展开研究；国内研究[15-19]也对蓝牙AoA实时定位和任意阵列方向估计进行了探索。B2Loc[26]通过低功耗背向散射调制形成相位连续的CTE，利用多个固定BLE阵列接收节点协同实现室内定位。本文面向移动接收端的物品查找，利用双天线运动形成虚拟孔径，并将差分测角与近场位置搜索结合，以改善多径和遮挡条件下的方向模糊与距离误差。

具体而言，双天线开关采样与残余载波频偏会使时间相位漂移混入空间相位差；便携式接收端的双天线孔径有限，单次静态观测难以稳定区分邻近方向；而近场相位定位又会受到整数周模糊、多径和轨迹几何退化影响。因此，硬件、BLE兼容通信和定位算法需要围绕同一观测链路联合设计，而非作为相互独立的模块。

针对上述问题，本文的主要贡献如下：1）设计一套被动式BLE背向散射定位系统，给出标签反向放大、下行同步、BLE周期广播与CTE定位信号的形成方式；2）提出数据包级双天线相位补偿、差分合成孔径雷达（SAR, synthetic aperture radar）方向估计和差分先验近场联合搜索方法，以差分SAR方向和RSSI粗距离建立先验，辅助当前近场相位的位置搜索；3）搭建完整原型并在室内外视距（LoS, line of sight）/非视距（NLoS, non-line of sight）场景下开展通信和定位实验，验证从信号发射、反射信号生成、BLE观测获取到位置解算的完整链路。

1 被动式蓝牙背向散射定位系统

1.1 系统总体架构

系统由Wi-Fi激励端、被动式BLE背向散射标签、BLE接收端、视觉惯性导航系统（VINS, visual-inertial navigation system）位姿模块及定位算法组成。激励端向标签提供连续波和下行同步；标签将BLE周期广播及CTE字段调制到反射信号；接收端同步采集CTE同相正交（IQ, in-phase and quadrature）样本、RSSI和运动位姿。定位算法将通信观测与位姿约束统一处理，输出标签位置、相对AoA及距离。该架构将背向散射通信、BLE接收与定位解算串联为同一条数据链路。为直观说明上述内容，图1给出了被动式BLE背向散射定位系统总体架构。

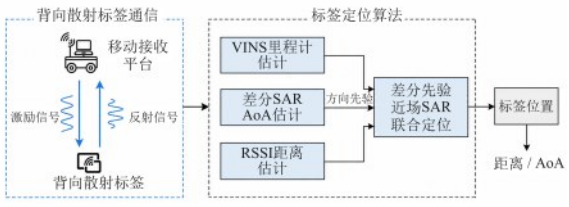


图1　被动式BLE背向散射定位系统总体架构

1.2 标签硬件与BLE兼容通信设计

标签采用双环形器反向放大结构，如图2所示。入射激励首先经环形器1进入放大支路，低噪声放大器提高反射信号幅度，环形器2与射频开关控制放大后信号的回注方向。包络检波电路从激励中恢复下行同步，现场可编程门阵列（FPGA, field-programmable gate array）根据同步时序控制反射状态，使标签无需配置完整主动发射机即可形成稳定的背向散射信号。

本文所称“被动式”是指标签复用外部射频载波进行背向散射调制，并非完全无源。LNA及控制电路仍需供电，但标签无需独立产生2.4 GHz射频载波，可减少主动发射链路的电路开销。基于65 nm CMOS工艺的芯片级仿真表明，标签上、下行工作功耗均低于1 mW。作为器件级参考，nRF52833在3 V供电、DC/DC模式和0 dBm射频输出下的射频发射电流典型值为4.9 mA，对应电功

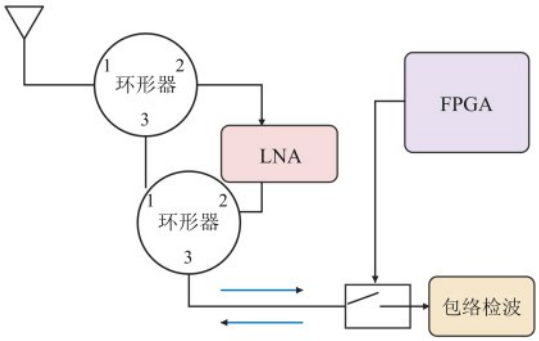


图2　被动式BLE背向散射标签的硬件结构与控制关系

耗14.7 mW。该结果体现了背向散射方案降低标签侧工作功耗的潜力。

为使反射信号进入商用BLE接收链路，标签按BLE周期广播组织数据，并在定位时段插入CTE字段。下行同步保证周期广播时序与调制状态一致；BLE帧的循环冗余校验（CRC, cyclic redundancy check）、白化和动态跳频等机制保持与接收端解析流程兼容。这些设计的目标并非单独提供通信功能，而是稳定生成可被接收端解析并用于CTE IQ采集的定位观测。

1.3　通信环境与观测可用性

通信环境直接决定背向散射标签能否持续产生可解析的BLE观测。本文采用2.4 GHz频段外部激励，标签端通过下行同步和反向放大结构形成兼容BLE周期广播与CTE字段的反射信号；接收端使用商用BLE链路获取CTE IQ样本、RSSI和数据包时间戳。该设计将通信可用性与定位观测统一起来，使后续相位处理和运动轨迹采样使用同一批有效数据。

实验中同时关注有效数据包数量、平均包速率和丢包率。LoS条件主要用于观察直达链路下的稳定性，NLoS条件则用于检验遮挡和反射对数据连续性的影响。通信指标用于判断定位输入是否连续可用，定位误差则由后续相位、位姿和候选位置联合解算得到，二者分别反映链路可用性和系统最终性能。

1.4　观测采集与定位流程

接收端记录CTE IQ样本、RSSI和数据包时间戳，VINS提供接收端（RX, receiver）的位置与航向，并将位姿对齐到数据包时刻。包内相位补偿后，差分SAR利用旋转观测估计全局方向，结合RSSI粗距离形成标签位置先验；近场SAR利用平移观测中的相位变化搜索候选位置，差分先验用于抑制方向模糊和位置伪峰。最终位置由联合得分最大点确定，AoA和距离由该位置相对观测窗口末态RX位姿计算。

2　定位方法

2.1　双天线相位补偿与差分SAR测角

蓝牙标准[1]通过CTE和天线切换提供相位观测，相关研究[9-10]进一步讨论了相位补偿对BLE AoA估计稳定性的影响。

在世界坐标系-XY中，令第i个数据包对应的RX位置为$p_i=[x_i,y_i]^{\mathrm{T}}$、航向角为$\psi_i$，标签候选位置为$p=[x,y]^{\mathrm{T}}$。BLE CTE采样中，由于蓝牙板卡仅存在单接收链路，需要通过射频开关切换来分别采集两根天线的信号，且RX本振与背向散射载波之间存在残余载波频偏。为避免时间漂移被误认为空间相位差，本文在每个数据包内对两路天线独立展开相位并进行线性拟合。残余频偏引起的相位关系可简记为：

$$\varphi(t)=2\pi\int f(\tau)d\tau+\varphi_0 \tag{1}$$

其中，$\varphi(t)$为时刻t的接收相位，$f(\tau)$为瞬时频率，τ为积分变量，φ_0为初始相位。将瞬时频率分解为标称载波与残余频偏项，可得：

$$\varphi(t)=2\pi f_0 t+2\pi\int\Delta f(\tau)d\tau+\varphi_0 \tag{2}$$

式中，f_0为标称载波频率，Δf为残余频偏。两路采样时刻不同，需先补偿包内相位漂移，再进行差分测角。设第m根天线第k个样本的展开相位为$\varphi_m(k)$，其线性模型为：

$$\varphi_m(k)=\alpha_m k+\beta_m+\varepsilon_m(k),\quad m\in\{1,2\} \tag{3}$$

式中，m∈{1,2}为天线编号，k为采样索引，α_m和β_m分别为线性漂移系数与截距，ε_m为残差。在两路采样索引的共同中位位置k_c比较两条拟合直线，可得到数据包级差分相位$\Delta\varphi$，并映射为单位复数相位观测：

$$\Delta\varphi=(\alpha_2 k_c+\beta_2)-(\alpha_1 k_c+\beta_1) \tag{4}$$

$$h=\exp(\mathrm{j}\Delta\varphi)$$

具体补偿流程如图3所示。已有射频识别定位工作[23-25]利用移动采样扩展有效孔径，并结合AoA全息图和差分相位在位置域恢复标签坐标。

补偿并取中位做差后，所有不同航向下的双天线基线端点可等效为虚拟天线阵列。候选全局方位

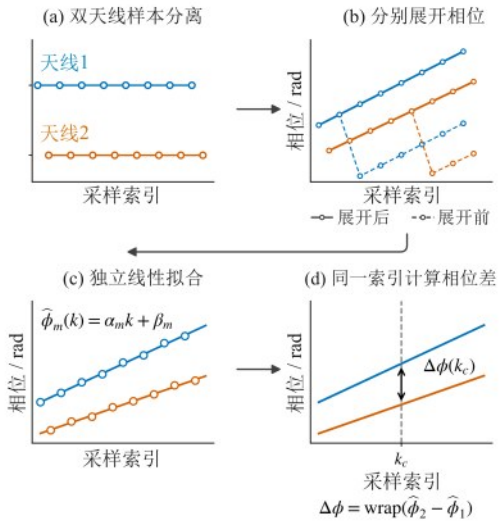


图3　双天线CTE包内相位补偿流程

角对应的导向向量元素表示为：

$$a_i(\theta)=\exp\left(-\mathrm{j}\frac{2\pi d}{\lambda}\cos(\theta-\psi_i)\right) \tag{5}$$

式（5）中，a_i表示导向向量，λ为信号波长，d为双天线间距，θ为候选全局方位角，ψ_i为第i个数据包的RX航向角。基于式（5）的导向矢量，AoA谱采用最大似然谱估计：

$$P_{\mathrm{ML}}(\theta)=\frac{\left|x^{\mathrm{H}}a(\theta)\right|^2}{Ma^{\mathrm{H}}a} \tag{6}$$

其中，P_{ML}为候选角度的谱值，x为相位观测向量，$a(\theta)$为导向向量，上标H表示共轭转置，M为有效观测数量。差分SAR通过不同航向下的相位投影估计全局方向，为首次定位及后续近场搜索提供方向先验；标签距离和精细位置则由移动观测进一步确定。

2.2　近场传播模型与候选位置搜索

从阵列传播模型看，远场方向估计通常采用平面波近似，而近场定位需要保留球面波引起的距离相关相位项[32]；已有研究[14,20-22]表明，AoA与RSSI具有互补性，将两者融合可以同时提供方向和距离约束。

差分SAR提供全局方向，RSSI用于估计粗距离。在当前场景内选取两个不同的已知距离，分别采集平均RSSI，联立求得路径损耗截距b和指数n。LoS与NLoS分别标定，不共用路径损耗参数。距离d处的RSSI及其反演距离为：

$$\mathrm{RSSI}(d)=b-10n\log_{10}d \tag{7}$$

$$\hat{d}=10^{\frac{b-\mathrm{RSSI}}{10n}} \tag{8}$$

式中，$\mathrm{RSSI}(d)$为距离d处的接收信号强度，$\hat{d}$为反演粗距离。粗距离与差分SAR方向共同生成粗标签坐标，用于初始化近场搜索中心及位置先验。候选区域以粗标签坐标和当前RX位置为参考设置，并采用由粗到细的网格搜索；RSSI只为差分SAR提供粗略距离估计，精细位置仍由相位观测确定。第i个RX位置到候选标签位置p的距离为：

$$r_i(p)=\left\|p-p_i\right\|_2 \tag{9}$$

其中，r_i为候选位置到第i个RX位置p_i的欧氏距离。该路径的传播相位近似为：

$$\varphi_i(p)\approx-\frac{2\pi r_i(p)}{\lambda}+\varphi_0 \tag{10}$$

式中，φ_i为传播相位，φ_0为公共初相。RX沿合成孔径运动时，各候选点相对RX的位置关系不同，对应的传播相位随轨迹变化，如图4所示。实际定位使用同一数据包内的双天线差分相位消除公共初相，并累积各观测位置的相位残差以区分候选点。

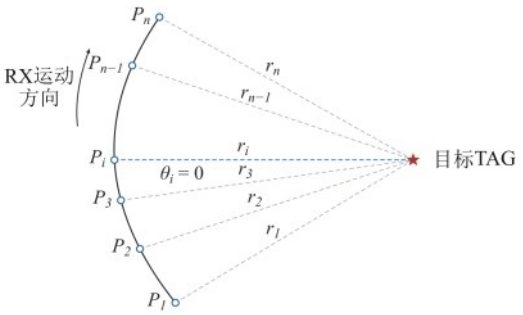


图4　RX运动轨迹与近场传播距离-相位模型

相对于6 cm双天线基线，标签可采用局部平面波近似；在整个运动孔径内，仍需保留候选点方位随RX位置的变化。候选点相对第i个RX位置的全局方位γ_i及其预测差分相位为：

$$\gamma_i(p)=\mathrm{atan}\,2(x-x_i,y-y_i) \tag{11}$$

$$\hat{\varphi}_i(p)=-\frac{2\pi d}{\lambda}\cos\left(\gamma_i(p)-\psi_i\right) \tag{12}$$

式中，γ_i由候选标签坐标和RX坐标计算，$\hat{\varphi}_i$为预测差分相位。将预测相位与实测相位作圆周差，得到候选点的加权相位残差：

$$J_{\text{phase}}(p)=\frac{\sum_{i=1}^{N} w_i \operatorname{wrap}\left(\varphi_i-\hat{\varphi}_i(p)\right)^2}{\sum_{i=1}^{N} w_i} \tag{13}$$

其中，J_{phase}为相位一致性代价，w_i为第i个观测权重，N为有效观测数量，φ_i为实测双天线差分相位。$wrap(u)=atan2(\sin u,\cos u)$将相位差映射至$[-\pi,\pi]$，用于消除相位跨周造成的数值跳变。搜索采用由粗到细的网格策略，并将相位代价的相反数作为相位得分S_{phase}。

2.3　差分先验联合定位

短轨迹、横向跨度不足或强多径会使近场相位搜索出现多个候选峰[11,30-31]。本文引入上一组有效差分SAR结果作为先验，其中全局测角结果提供方向先验θ_{prior}，该方向与RSSI粗距离及对应RX位置共同确定历史标签坐标p_{prior}。两类先验得分为：

$$G_\theta(p)=\exp\left(-\frac{\operatorname{wrap}\left(\theta(p)-\theta_{\text{prior}}\right)^2}{2\sigma_\theta^2}\right) \tag{14}$$

$$G_p(p)=\exp\left(-\frac{\left\|p-p_{\text{prior}}\right\|_2^2}{2\sigma_p^2}\right) \tag{15}$$

式中，$G_\theta(p)$为方向先验得分，$\theta(p)$为候选点相对先验观测参考RX位置的全局方位，G_p为位置先验得分；σ_θ和σ_p分别控制方向和位置约束尺度。将相位得分与两类先验组合，定义联合得分为：

$$\begin{aligned}S_{\text{joint}}(p)&=S_{\text{phase}}(p)+\alpha G_\theta(p)\\&-\beta\min\left\{-2\ln G_p(p),c_p\right\}\end{aligned} \tag{16}$$

其中，S_{joint}为联合得分，α和β为先验权重，c_p限制位置先验的最大惩罚，减轻历史坐标误差对当前搜索的影响。图5给出联合搜索示意。最终位置取联合得分最大点，再相对当前窗口末态RX计算AoA和距离。首次定位先完成一组旋转差分SAR观测，结合RSSI建立初始先验；此后以新的有效差分SAR结果更新。先验不依赖真实标签坐标，标签移动或先验明显失配时重新采集。

3　实验平台与实验设置

3.1　原型平台与观测链路

实验平台由被动式背向散射标签、通用软件无线电外设（USRP, universal software radio peripheral）X310、收发天线、2.4 GHz射频前端、nRF52833 BLE板卡、微型计算机和VINS组成，终端侧配置1根激励发射天线及2根BLE接收天线，两接收天线间距为6 cm，通过射频开关共用接收链路。USRP提供外部激励，BLE板卡负责接收周期广播并输出CTE IQ和RSSI，微型计算机统一记录观测时间戳、VINS位姿与定位结果。软件和硬件共同构成从反射信号生成到位置解算的完整原型链路。图6展示了背向散射BLE定位实验平台实物图。

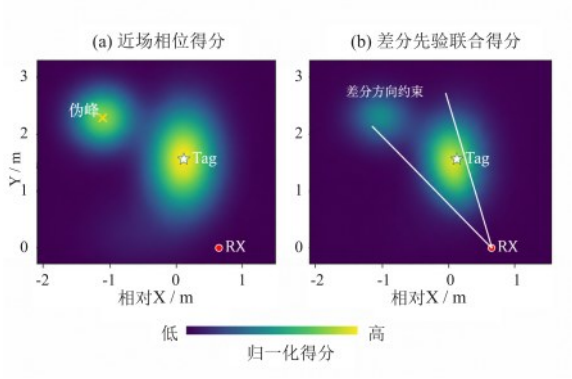


图5　近场相位得分与差分先验联合得分示例

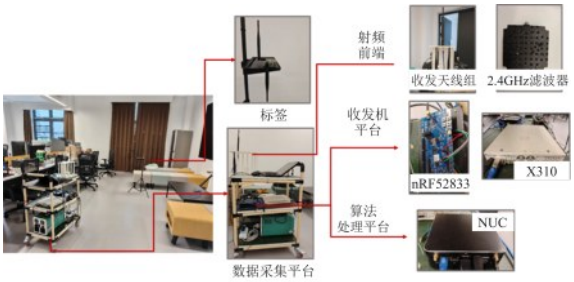


图6　背向散射BLE定位实验平台

通信与定位使用同一采集链路。接收端记录CTE IQ、RSSI和数据包编号，并将RX位置和航向角对齐到数据包时刻。系统以100个CTE包作为观测窗口进入SAR处理的最低采集量，经包内相位拟合和异常包剔除后，保留包及其对应VINS位姿构成有效观测集合。有效观测以数据包为单位计数，同一包内的多个采样点不作为独立观测重复计入。

3.2　场景、指标与数据组织

通信观测在室内办公室和走廊中完成，外部激励中心频率为2.41625 GHz、发射功率为20 dBm。定位测试分为室内、室外LoS与NLoS四类场景，工作距离分别在10 m和20 m以内。差分SAR通常采用正、反各旋转一圈的观测，近场定位采集中的累计行走路程约为1～5 m。有效孔径取RX轨迹的

最大空间跨度；较充分的航向覆盖有利于测角，较大的横向跨度可增强距离分辨能力。图7给出代表性测试场景。

本文以同一观测窗口内RX位置的最大空间跨度作为有效合成孔径D。实验中实际位移约为1～3 m，近似直线运动时可据此估计D。以$2D^2/\lambda$为远场参考边界，2.4 GHz下λ约为0.125 m，D约为1～3 m时，边界约为16～144 m。该边界随轨迹变化，并非系统的最大定位距离；整段运动观测保留位置相关相位，单次双天线观测则采用局部平面波近似。

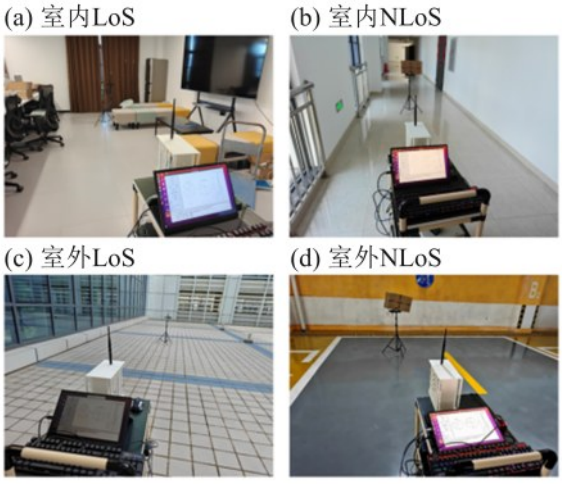


图7　室内外LoS/NLoS代表性测试场景

每次测试将标签固定于已知坐标，RX完成旋转或平移观测，同步采集CTE IQ、VINS位姿和RSSI。真实角度与距离仅用于误差评价。室内、室外的LoS与NLoS各采集50组定位结果；同一环境下，两类传播条件合并绘制累积分布函数（CDF, cumulative distribution function），每条曲线包含100个误差样本，分场景的95%误差由各自50组结果统计。通信性能以RSSI、丢包率和协议解析结果评价，定位性能以AoA误差、距离误差及其CDF评价。

4　实验结果与分析

4.1　BLE通信与定位观测可用性

从系统使用角度看，通信链路的可用性决定了后续相位差分和轨迹采样能否连续执行。本文将有效CTE包数、平均包速率和丢包率作为辅助指标。9 m测试范围内，标签信号RSSI均高于-90 dBm，商用BLE板卡能够持续获得可用于定位的广播观测。随着距离增大，路径损耗、室内反射、天线朝向和残余自干扰会造成包接收波动，因此，RSSI和丢包率用于说明定位观测的获取条件，而不直接代替位置误差指标。具体的RSSI与丢包率随测试距离的变化如图8和图9所示。

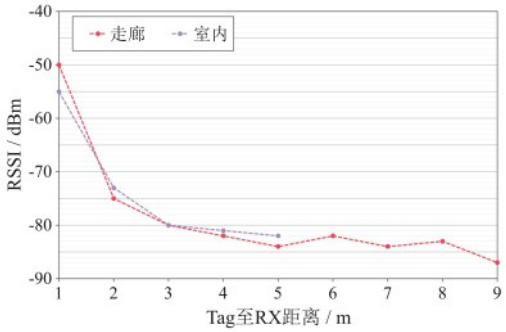


图8　背向散射BLE观测链路的RSSI

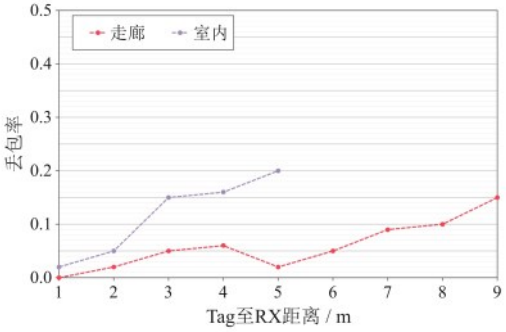
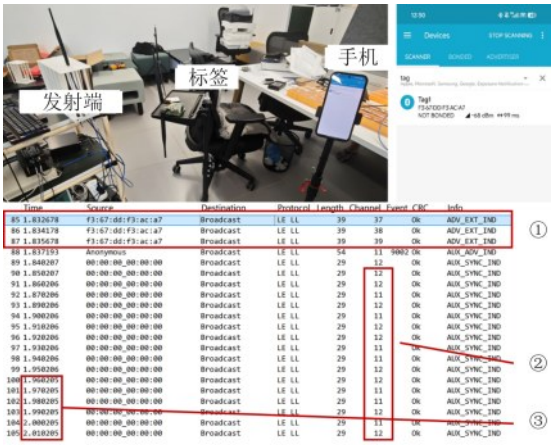


图9　背向散射BLE观测链路的丢包率

协议兼容性方面，手机端可发现标签广播；基于nRF52833的嗅探器可解析参数广播和周期广播，并观察CRC、白化、动态跳频及发包时序等协议行为，具体的广播发现与周期广播解析结果如图10所示。该结果验证了反射信号能够进入商用BLE接收与解析链路，为后续CTE IQ采集和相位定位提供基础。

4.2　室内定位性能

室内实验比较差分SAR-RSSI、单独近场SAR和差分先验近场SAR。前者以差分测角与RSSI粗测距为基准，单独近场SAR不引入差分先验，联合方法则加入方向与位置先验。LoS与NLoS下，单独近场SAR的95%AoA误差分别为120°和165°；加入先验后降至16°和25°，说明差分先验有助于抑制错误方位峰。



① BLE广播包：指示周期广播参数。
② 用于定位的周期广播包采用跳频算法2。
③ 发包间隔为10 ms。

图10　BLE广播发现与周期广播解析结果

距离估计进一步反映了近场相位与差分先验的互补性。近场相位利用轨迹中的空间变化细化RSSI粗距离，历史方向和位置先验则辅助筛选候选峰。室内AoA误差与距离误差的CDF如图11和图12所示。

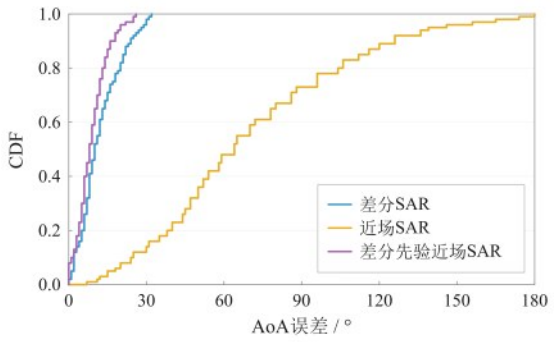


图11　室内LoS/NLoS场景AoA误差CDF

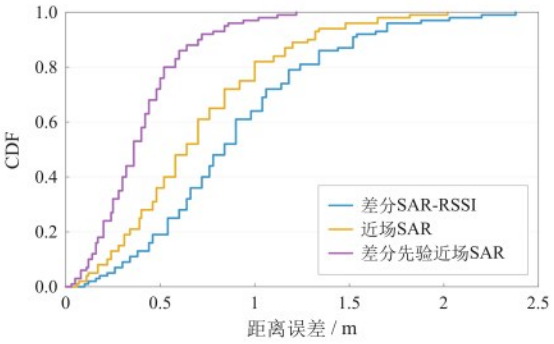


图12　室内LoS/NLoS场景距离误差CDF

室内LoS场景下，差分SAR-RSSI、单独近场SAR和联合方法的95%距离误差分别为1.44 m、1.20 m和0.70 m；联合方法较前两者分别降低51.4%和41.7%。NLoS下，三种方法对应误差为2.03 m、1.65 m和1.02 m，降幅分别为49.8%和38.2%。单独近场SAR已改善RSSI测距结果，而差分先验进一步抑制了多径和弱几何条件下的错误选峰。

4.3　室外定位性能

由于室外主传播路径较为集中，差分SAR本身已可提供较稳定的全局方向，联合方法对AoA的提升主要表现为尾部微调；其更明显的收益体现在距离恢复。

室外测试用于检验算法在较长移动轨迹和不同遮挡条件下的稳定性。LoS场景中直达路径占主导，差分SAR通常能够提供可靠的全局方向；NLoS场景则更容易出现局部峰值和测距波动。本文因此将差分SAR作为方向基准，将近场相位信息与标签坐标先验用于候选位置筛选。在此基础上，对室外场景下的AoA与距离误差分别进行CDF统计，如图13和图14所示。

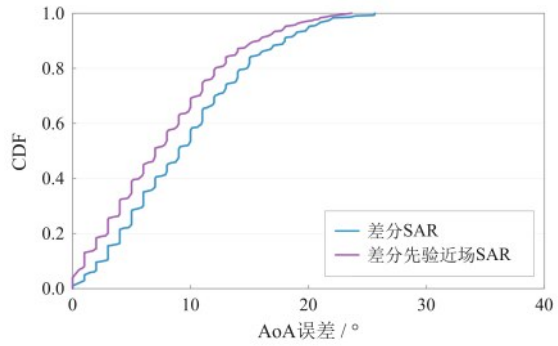


图13　室外LoS/NLoS场景AoA误差CDF

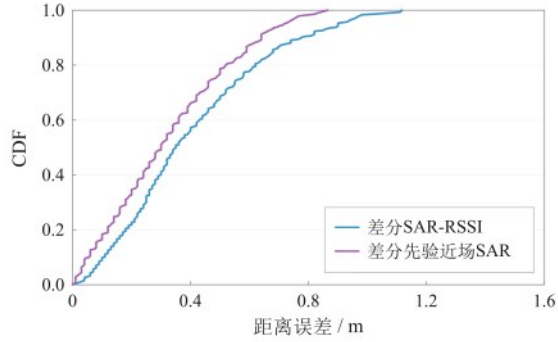


图14　室外LoS/NLoS场景距离误差CDF

室外LoS与NLoS下，差分SAR-RSSI的95%距离误差分别为0.74 m和0.98 m，联合方法降至0.59 m和0.77 m，分别降低20.3%和21.4%。相应

的95%AoA误差由15°和22°降至13°和21°。相较室内，室外差分SAR的方向估计已较稳定，近场联合方法的收益主要体现在距离恢复。

为进一步比较联合方法在不同传播环境下的误差离散程度，在CDF统计基础上补充给出AoA与距离误差的箱线分布，如图15和图16所示，可直观反映LoS/NLoS条件下误差的中位水平、分布范围。

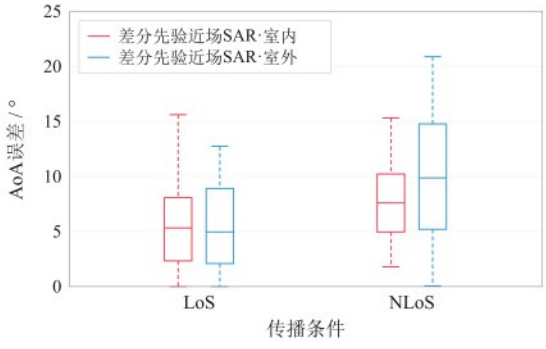


图15　差分先验近场SAR AoA误差箱线图

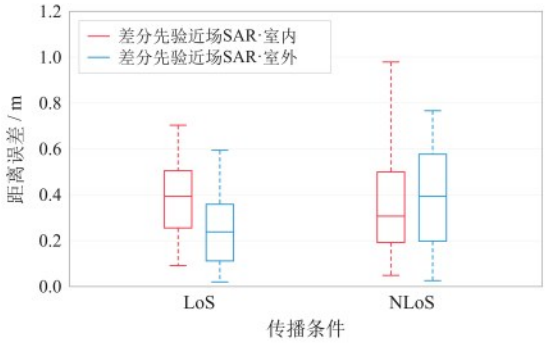


图16　差分先验近场SAR距离误差箱线图

4.4　与已有BLE背向散射定位系统的比较

已有BLE背向散射定位系统B2Loc[26]采用4个固定BLE接收节点协同定位，每个节点配置12根天线。其在办公室和走廊场景中的中位位置误差分别为0.49 m和0.76 m，中位方位角误差分别为5.0°和9.1°，定位范围为7～9 m。

本文采用单个移动双天线接收端形成虚拟孔径，接收节点由4个减少至1个，接收天线总数由48根减少至2根，分别减少75%和95.8%。在相近室内环境下，本文LoS场景的中位AoA误差为5.5°，与B2Loc办公室场景的5.0°接近。测距比较中，本文室内LoS和走廊NLoS场景的中位测距误差分别为0.40 m和0.33 m，较B2Loc办公室和走廊场景分别降低18.4%和56.6%。

本文室内LoS和NLoS条件下的95%测角误差分别为16°和25°，95%测距误差分别为0.70 m和1.02 m；室外对应的95%测角误差分别为13°和21°，95%测距误差分别为0.59 m和0.77 m。室内和室外测试工作距离分别在10 m和20 m以内。上述结果表明，移动合成孔径能够减少对固定阵列节点的依赖，在精简接收端配置的同时实现多径和遮挡条件下的角度与距离联合估计，适用于便携式物品查找。

5　结束语

本文面向低功耗物品查找应用，设计了由背向散射标签、BLE兼容通信、CTE IQ接收、VINS位姿和联合定位方法组成的完整定位系统。标签通过外部激励、下行同步和反向放大结构生成可解析的BLE周期广播与CTE定位信号；接收端通过数据包级相位补偿与差分SAR获得稳定方向，以差分方向和RSSI粗距离建立先验，辅助近场相位完成位置搜索。室内外实验验证了完整通信与定位链路，联合方法在多径、遮挡和弱几何条件下能够降低定位误差尾部。后续将进一步面向便携终端实时部署、多标签并发和动态目标条件优化系统。



李蔚明（2002.08—），男，华中科技大学博士，主要研究方向为低功耗通信与感知、无线室内定位、无线感知等。



张夏楠（1994.07—），男，博士，武汉大学计算机学院，主要研究方向为低功耗物联网、通感一体、嵌入式智能。



黄伟（1989.08—），男，博士，高级工程师，vivo通信研究院工程师，主要研究方向为低功耗通信与感知、6G物理层技术、短距离无线通信和定位等。



黄朝颖（2002.01—），男，华中科技大学硕士生，vivo通信研究院助理通信预研工程师，主要研究方向为低功耗物联网、背向散射、室内定位等。



王巍（1988.01—），男，博士，武汉大学教授（通信作者），主要研究方向为无线通信、低功耗物联网设计、智能无人系统、毫米波雷达感知等。

参考文献：

[1] Bluetooth SIG. Bluetooth Core Specification Version 5.1[S]. Kirkland: Bluetooth SIG, 2019.

[2] LI X M, YUAN Y, AN Y B, et al. A BLE 5.0 extended advertising backscatter with commodity devices in passive IoT scenarios[J]. Electronics, 2024, 13(5): 961.

[3] CHEN S, ZHANG M L, ZHAO J, et al. Reliable and practical Bluetooth backscatter with commodity devices[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2021, 29(4): 1717-1729.

[4] ZHANG M L, CHEN S, ZHAO J, et al. Commodity-level BLE backscatter[C]//Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2021: 402-414.

[5] HUANG Z X, DING Y, WU D O, et al. Bitalign: bit alignment for Bluetooth backscatter communication[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(10): 10191-10201.

[6] JIANG M R, GONG W. Bidirectional Bluetooth backscatter with edges[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23: 1601-1612.

[7] DONG H X, WU Y J, LI F Y, et al. PassiveBLE: towards fully commodity-compatible BLE backscatter[C]//Proceedings of the 31st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2025: 139-153.

[8] CHANG S J, DING Y. Development in ambient backscatter communications[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2023, 17(13): 963-973.

[9] WAN Q, WU T, ZHANG K H, et al. A high precision indoor positioning system of BLE AOA based on ISSS algorithm[J]. Measurement, 2024, 224: 113801.

[10] YUAN Y Z, LIU C, ZHOU L L, et al. Improving AOA accuracy in BLE-based localization with a hierarchical estimation framework and phase correction mechanism[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-10.

[11] BOQUET G, BOQUET-PUJADAS A, PISA I, et al. Indoor position estimation using angle of arrival measurements: an efficient multi-anchor approach with outlier rejection[J]. Internet of Things, 2024, 26: 101236.

[12] SOLLIE M L, GRYTE K, BRYNE T H, et al. Outdoor navigation using Bluetooth angle-of-arrival measurements[J]. IEEE Access, 2022, 10: 88012-88033.

[13] CRISAFULLI O, PIAZZESE N I, PAVONE S C, et al. Performance analysis of BLE-5.1 angle of arrival estimation using embedded radiation patterns on a 3×3 uniform rectangular array[J]. IEEE Access, 2024, 12: 42572-42584.

[14] KANDULA H, CHIDURALA V, CAO Y, et al. Localization of a

BLE device based on single-device RSSI and DOA measurements [J]. Network, 2024, 4(2): 196-216.

[15] 杨彪，叶红运，龙志强. 基于蓝牙 AOA 的室内实时定位系统研究[J]. 传感技术学报，2022.
YANG B, YE H Y, LONG Z Q. Research on indoor real-time positioning system based on Bluetooth AOA[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022.

[16] 洪优佳，简志华，潘鹏，等. 任意结构阵列的 AOA 估计方法研究[J]. 电信科学，2025，41(4): 117-131.
HONG Y J, JIAN Z H, PAN P, et al. Research on AOA estimation methods for arbitrary structured arrays[J]. Telecommunications Science, 2025, 41(4): 117-131.

[17] 齐子森，彭大林，许华，等. 柱面共形阵列 DOA 与极化参数高效联合估计算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版)，2021，22(3): 55-61.
QI Z S, PENG D L, XU H, et al. A DOA and polarization parameters efficient estimation algorithm of cylindrical conformal array antenna[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(3): 55-61.

[18] 孙仕礼，刘帅，金铭. 基于欧拉旋转和极化投影的共形阵列建模方法[J]. 信号处理，2021，37(8): 1430-1440.
SUN S L, LIU S, JIN M. Conformal array modeling method based on Euler rotation and polarization projection[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(8): 1430-1440.

[19] 刘学承，朱敏，武岩波. 基于变换域 APSO 的任意阵列宽带 DOA 估计算法[J]. 信号处理，2022，38(6): 1306-1315.
LIU X C, ZHU M, WU Y B. Based-on transformed-domain accelerated particle swarm optimization wideband DOA estimation algorithm for arbitrary arrays[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(6): 1306-1315.

[20] WU C X, WANG Y P, KE W, et al. A dual-branch convolutional neural network-based Bluetooth low energy indoor positioning algorithm by fusing received signal strength with angle of arrival[J]. Mathematics, 2024, 12(17): 2658.

[21] YEN H C, OU YANG L Y, TSAI Z M. 3-D indoor localization and identification through RSSI-based angle of arrival estimation with real Wi-Fi signals[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(10): 4511-4527.

[22] FURFARI F, GIROLAMI M, MAVILIA F, et al. Indoor localization algorithms based on angle of arrival with a benchmark comparison[J]. Ad Hoc Networks, 2025, 166: 103691.

[23] RIGALL E, WANG X L, ZHANG S, et al. A fast and accurate RFID tag positioning method based on AoA hologram and hashtables[J]. Computer Communications, 2023, 202: 135-144.

[24] WANG H Y, CHEN S, GONG W. Mobility improves accuracy: precise robot manipulation with COTS RFID systems[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Piscataway: IEEE, 2021: 1-10.

[25] LIU H K, MA Y T, JIANG Y, et al. Crucial or unnecessary? Analysis on phase differential in holographic SAR RFID localization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(2): 1984-1988.

[26] LUO Z Q, LI W M, WU Y J, et al. Accurate Indoor Localization for Bluetooth Low Energy Backscatter[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(2): 1805-1816.

[27] ZHANG S K, WANG W, TANG S Y, et al. Robot-Assisted Backscatter Localization for IoT Applications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(9): 5807-5818.

[28] ZHANG X N, WANG W, XIAO X D, et al. Peer-to-Peer Localization for Single-Antenna Devices[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2020, 4(3): 105:1-105:25.

[29] ZHANG S K, WANG W, ZHANG N, et al. LoRa Backscatter Assisted State Estimator for Micro Aerial Vehicles With Online Initialization[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21 (11): 4038-4050.

[30] YANG L, CHEN Y, LI X Y, et al. Tagoram: real-time tracking of mobile RFID tags to high precision using COTS devices[C]//Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2014: 237-248.

[31] WANG J, KATABI D. Dude, where's my card? RFID positioning that works with multipath and non-line of sight[C]//Proceedings of ACM SIGCOMM. New York: ACM, 2013: 51-62.

[32] SKOLNIK M I. Radar handbook[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2008.