

文章编号: 2095-4980(2019)04-0577-07

基于 ES-DOA 估计的室内非法信号源定位方法

陈章, 施伟, 刘斌, 周强

(国防科技大学 第六十三研究所, 江苏 南京 210007)

摘要: 针对室内非法信号源定位应用的特点, 提出一种基于到达方向(DOA)估计的无源定位方法。采用具有解相干能力的基于特征空间的到达角(ES-DOA)估计算法估计来波到达角度空间谱和对应的信号功率; 采用一种新的直达路径集成搜寻算法判断信号的直达路径方向, 并通过交叉测量法估计非法信号源的位置。仿真实验表明, ES-DOA算法在处理相干阵列信号时, 具有高分辨力和较强的抗噪声能力, 提出的直达路径识别算法能够在不同室内环境中准确识别信号的直达路径方向, 具有较强的鲁棒性。研究证明, 该定位方法具有较强的系统可实现性, 既能单站定位, 又可多站协同工作, 部署方便, 使用灵活, 是一种有效的室内非法信号源定位解决方案。

关键词: 室内定位; 到达方向估计; 基于特征空间的到达角估计算法; 阵列天线; 集成学习

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0577

A kind of ES-DOA estimation based method for indoor illegal signal source localization

CHEN Zhang, SHI Wei, LIU Bin, ZHOU Qiang

(The 63th Institute, National University of Defense Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract: In recent years, the illegal signal source localization applications of the indoor environment have become rather significant to the public information security, radio management and anti-terrorism scenarios. However, the popular indoor positioning methods, such as fingerprint-based positioning technologies, are not able to deal with the illegal signals for lacking of the priori information. In this paper, a kind of Direction of Arrival(DOA) estimation based method for indoor illegal signal source localization is proposed. The received array data are processed by the Eigen Space DOA(ES-DOA) algorithm to obtain azimuth spectrum and signal power estimation. A novel direct-path recognition approach is proposed to identify the real bearing from the azimuth spectrum. The position of the illegal signal source could be estimated by multiple crossover measurements. The simulation result shows that the ES-DOA algorithm could reach high resolution and has strong anti-noise capability dealing with the coherent array signals, and the proposed direct-path recognition algorithm shows high reliability and robustness in different indoor environments. The realization of the proposed indoor illegal signal source positioning method is convenient and flexible that the deployment could be in single station mode or multiple stations mode.

Keywords: indoor positioning; Direction of Arrival(DOA); Eigen Space DOA(ES-DOA); antenna array; ensemble learning

近年来, 以人工智能、大数据、物联网等为代表的信息技术迅猛发展, 信息安全、网络安全、数据安全已经成为关系国家稳定发展和国防巩固的战略性问题。国家要害部门、重点国防设施、科研保密单位等场所都面临信息窃取的风险。此外, 黑广播等非法信号源在民用设施内活动猖獗, 严重影响社会秩序和公共安全^[1]。对非法无线信号的侦测以及信号源的快速、准确定位, 已成为信息情报防护和反恐维稳工作的迫切需求。而现有的反窃听、反窃视侦测设备大多是通过检测信号场强来搜寻信号源, 存在侦测能力弱, 定位效率低等问题, 难以满足需求。因此, 深入研究室内无源定位技术具有非常重要的军事意义和社会价值。

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2018-12-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61801497)

1 室内无源定位技术研究现状

当前主流的室内定位技术可以归纳为以下几类：a) 基于接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)，利用信号传播模型或特征指纹库来估计信号源位置；b) 利用多个侦测站点测量信号的时间到达差(Time Difference of Arrival, TDOA)，绘制双曲线方程，计算信号源的位置；c) 通过估计信号的到达方向(DOA)，交叉定位信号源位置^[2-3]。以 RADAR, Horus 等系统为代表的指纹定位系统^[4-6]，通过将接收信号强度与特征指纹库进行匹配，实现目标定位，成为基于 RSS 的室内定位场景的主流解决方案。但指纹定位法需要对目标的信号类型和参数进行预先设定和指标约束，而在对非法信号源定位时，并没有这些先验知识，所以该方法难以应用于非法信号源定位场景。基于 DOA 估计的定位方法，具有较高的定位精确度，且无需预先训练，可以实现单站定位或多站协同定位^[7]，应用广泛。近年来，也出现了一些运用 DOA 估计的室内定位研究成果。其中 Array-Track 系统通过 8×2 的天线阵列接收 WiFi 信号，利用多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)算法估计信号的到达方向角，并通过多站点交叉的方法定位目标的位置^[8]；Spot-Fi 系统^[9]通过对 WiFi 信号的信道状态信息(Channel State Information, CSI)做空间平滑处理，实现三阵元均匀线性天线对多目标信号的检测能力，同时通过估计各路径的飞行时间(Time of Flight, TOF)判断信号直达路径；此外，还有 CUPID, LTEyE, FILA 和 Phaser 等具有代表性的基于信号 DOA 估计技术来实现目标定位的方法和系统^[10-13]。由于在室内环境中的信号传播可能存在多条路径，且多径信号之间易存在较强的相关性，这对基于 DOA 估计的定位算法带来极大挑战。

综上所述，现有的基于 DOA 估计的定位研究方法尽管已经能实现较高的定位精确度，但大多存在需要关于信号的先验知识以及需要多站协同配合等不足，难以满足室内非法信号源定位场景对时效性、灵活性和通用性的要求。为解决这一问题，本文提出一种基于 DOA 估计算法的室内非法信号源定位方法，通过均匀线性阵列天线检测非法信号，采用抗相干的 ES-DOA 算法对接收的阵列信号进行 DOA 估计和功率估计，并利用估计值设计一种新的直达路径集成搜寻算法，实现对非法信号源的快速、准确定位。

2 基于 DOA 估计的室内定位方法

2.1 均匀线性阵列模型

假设波长为 λ 的远场窄带信号 $s(t)$ 以方向角 θ 入射到由 N 个间距为 d 的阵元组成的均匀阵列天线上。若以阵元 1 为参考点，则各阵元接收信号可以表示为：

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T = s(t)\mathbf{a}(\theta) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中： $\mathbf{n}(t)$ 是 $N \times 1$ 维噪声矢量； $\mathbf{a}(\theta)$ 为方向矢量，表达式为：

$$\mathbf{a}(\theta) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(N-1)d\sin\theta} \right]^T \quad (2)$$

当空间中存在 K 个信源 $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$ 时，阵元接收信号可表示为：

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) = \sum_{i=1}^K \mathbf{a}(\theta_i)s_i(t) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

式中 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_K)]^T$ 是方向矩阵。此时，阵列信号的协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 可表示为：

$$\mathbf{R} \approx E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}(t)^H] = \mathbf{U}_S \mathbf{\Sigma}_S \mathbf{U}_S^H + \mathbf{U}_N \mathbf{\Sigma}_N \mathbf{U}_N^H \quad (4)$$

通过对 $\mathbf{R}$ 进行特征值分解，得到的 $\mathbf{U}_S$ 和 $\mathbf{U}_N$ 分别是对应 K 个较大特征值的特征矢量构成的信号子空间，以及对应 $N-K$ 个较小特征值的特征矢量构成的噪声子空间； $\mathbf{\Sigma}_S$ 和 $\mathbf{\Sigma}_N$ 分别是大特征值和小特征值构成的对角阵。

根据信号矢量与噪声空间的正交关系，由 MUSIC 算法^[14]可以得到阵列空间谱函数：

$$P_{\text{MUSIC}} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{U}_N\mathbf{U}_N^H\mathbf{a}(\theta)} \quad (5)$$

通过变化 θ 值来搜索空间谱函数峰值，得到估计信号到达的方向角。

2.2 ES-DOA 算法

在室内环境下，由于信号多径传播的存在，会导致接收阵列信号存在较强的相关性，而 MUSIC 等超分辨率算法难以处理相干或强相关阵列信号，需要对信号进行解相干处理。传统的空间平滑法可以解相干，但是会减小有效阵列孔径，降低自由度^[7]。

ES-DOA 算法是一种用于均匀线阵的非降维处理算法,其利用 Toeplitz 性质对接收信号协方差矩阵进行修正,再对重构后的矩阵进行特征值分解,能够在不牺牲自由度的前提下对相干信源进行 DOA 估计,还能估计各方向上的信号强度^[15]。此外,该算法的鲁棒性和抗噪声能力强,在低快拍和低信噪比时仍具有较好性能,非常适合应用在室内多径环境中。

ES-DOA 算法流程如下:

首先根据接收的阵列信号,对式(4)中的信号协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 进行 Toeplitz 矩阵化处理:

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{R} + \mathbf{I}_v \mathbf{R}^* \mathbf{I}_v \quad (6)$$

式中 $\mathbf{I}_v$ 是 $N \times N$ 反向单位矩阵(即仅有斜对角线上的元素为 1,其余元素均为零)。将式(6)得到的 $\mathbf{R}_x$ 做特征值分解,选择其信号子空间定义为矩阵 $\mathbf{R}_A$:

$$\mathbf{R}_A = \mathbf{U}_s \mathbf{\Sigma}_s \mathbf{U}_s^H \quad (7)$$

计算 $\mathbf{R}_A$ 的广义逆矩阵 $\mathbf{R}_A^+$:

$$\mathbf{R}_A^+ = \mathbf{U}_s \mathbf{\Sigma}_s^{-1} \mathbf{U}_s^H \quad (8)$$

ES-DOA 算法构建了一个同时包含信号子空间和噪声子空间的空间谱函数:

$$P_{ES}(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R}_A^+ \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (9)$$

在 $[-\pi, \pi]$ 范围内扫描 θ 的值计算 P_{ES} , 其中峰值对应的 θ 即为信号到达角的估计值。

对应 θ_i 方向信号的功率估计值 p_i 为:

$$p_i = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta_i) \mathbf{R}_A^+ \mathbf{a}(\theta_i)} \quad (i=1, 2, \dots, K) \quad (10)$$

2.3 信号直达路径识别方法

由于信号的多径传播,在室内使用 DOA 估计算法得到的方位角图谱中通常会包含由信号直达路径和反射路径组成的多个到达角峰值。判别直达路径方位角是基于 DOA 估计的室内定位方法的难点和关键点。有研究通过估计每个到达角信号对应的 TOF,并将 TOF 最小的到达角判断为直达路径的方向^[9],但这种方法需要关于信号源的先验知识,并不适合非合作的定位场景;有研究表明,室内环境中直达信号的估计值通常十分稳定,即使直达路径中有障碍物阻挡,其到达角在 DOA 估计的方向角图谱中也会产生非常明显的谱峰,而反射路径的 DOA 峰值非常易受环境干扰,在动态场景中会随时间波动^[8]。所以可以通过对比持续时间段内的 DOA 估计空间谱的方法,筛选出稳定的估计值作为直达路径的方向。

基于上述思想,本文提出一种集成 DOA 估计和信号功率估计的直达路径识别算法:

设接收机的均匀线阵天线阵元数为 N ,传播环境中强多径信号数量为 K ,且 $K < N$ 。若在连续时间 Δt 内接收到 M 组快拍数为 v 的阵列数据,则通过 ES-DOA 算法可以得到 M 组 DOA 估计值以及对应的信号功率估计值,记作 (θ_i, p_i) ,并构成估计值集合:

$$\{\Theta, P\} = \{(\theta_{i,j}, p_{i,j}) | (i=1, 2, \dots, K), (j=1, 2, \dots, M)\} \quad (11)$$

对以上得到的 DOA 估计值和功率估计值进行分类处理,并根据它们的统计特性构造分类器,最终借鉴集成学习的思想^[16],对多分类器集成后的结果采用绝对多数投票法判决直达路径的方位角。

算法流程:

1) 采用直方图法对式(11)中 Θ 的分布情况进行统计处理,根据多径数量值 K 以及室内实际空间环境,选择角度区间 $\Delta\phi$,一般可设 $\Delta\phi$ 为 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。筛选出包含 DOA 估计值最多的 K 个角度区间,得到集合 $C = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_K\}$,其中 ϕ_i 中包含对应区间内所有的 DOA 估计值。

由于信号的直达路径具有相对稳定、集中的 DOA 估计值,通过以上统计分类处理,可以保留直达路径的 DOA 估计值,并滤除由环境波动导致的部分离群值,有效提高数据集合的纯净度。

2) 计算集合 C 中的各类别 DOA 估计值的 0 范数、均值和标准差,得到 $(l_i^0, \bar{\theta}_i, \sigma_i)$ 。

3) 根据式(10)计算各类别 $\bar{\theta}_i$ 对应的信号功率估计值以及功率估计值的标准差,得到 (p_i, ζ_i) 。

4) 将上述参数组合成对应区间的特征向量 $(l_i^0, \bar{\theta}_i, \sigma_i, p_i, \zeta_i)$,构成新的特征向量集合:

$$C' = \{(l_1^0, \bar{\theta}_1, \sigma_1, p_1, \zeta_1), (l_2^0, \bar{\theta}_2, \sigma_2, p_2, \zeta_2), \dots, (l_K^0, \bar{\theta}_K, \sigma_K, p_K, \zeta_K)\} \quad (12)$$

5) 根据各类的 0 范数、方位角标准差以及信号功率标准差等特征分别构造分类器 $h_i(C')$ 。通过集成各分类器的输出结果,可以得到一组分类集合 $H(C')$:

$$H(C') = \left\{ h_1(C') = \underset{i}{\operatorname{argmax}}(l_i^0), h_2(C') = \underset{i}{\operatorname{argmin}}(\sigma_i^0), h_3(C') = \underset{i}{\operatorname{argmin}}(\zeta_i^0) \right\}, i \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (13)$$

式中:分类器 h_1 的输出结果是 0 范数最大的一个或多个类别的序号,为保证分类结果有意义,使输出结果 c_j 满足直达路径具有稳定、集中的 DOA 估计值,增加约束: $l_j^0 \geq 0.8M$ 。显然 h_1 的输出结果有可能为“空”;分类器 h_2 的输出结果是方位角标准差最小类别的序号;分类器 h_3 的输出结果是信号功率标准差最小类别的序号。

6) 由于室内环境中干扰和噪声的影响,导致分类器 h_1, h_2 和 h_3 在单独输出时易出现误判的情况。为提高算法的鲁棒性和抗噪声性能,本文借鉴集成学习的思想,将几个弱分类器集成为一个更强的分类器集合 H ,并采用绝对多数投票法从集合 H 中选出直达路径对应的类别序号:

$$\hat{\theta} = \begin{cases} \bar{\theta}_j, & \sum_{i=1}^3 h_i^j > 0.5 \sum_{i=1}^K \sum_{i=1}^3 h_i^i \\ \text{无直达路径}, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中 $\hat{\theta}$ 为直达方向角估计结果。

在集成学习中,常用的结合策略有平均法、学习法和投票法等。平均法是对各弱分类器的输出结果进行平均处理,显然不适合直达路径的判别;学习法则需要通过采用一个学习器将各个分类器结合起来,需要样本训练过程,也不适用于当前场景。

为了应对复杂的室内定位场景,本文选择绝对多数投票法作为组合策略。如当直达路径的信号很弱时,可能会出现 DOA 估计方位角谱中没有直达方向的情况;而在静止无干扰场景中,多径信号方向和直达方向的信号都很稳定,各个分类器 h 可能会输出多个结果。针对以上的问题,采用绝对多数投票法可以判断“无直达路径”的情况,有效提高系统的可靠性。

7) 若在上一步中输出结果为“无直达路径”,则开始动态辅助判定模式:阵列天线沿径向缓慢匀速运动一段距离,并提取过程中 Δt 时间内的 DOA 估计值,重复步骤 1)~6),持续判断信号直达方向。

2.4 DOA 交叉定位算法

根据每次测量点的坐标和对应的估计信号直达方向,结合目标区域的空间分布图,采用交叉定位的方法即可得到信号源的位置坐标^[17]。但由于每次估计的方位角都存在一定误差,会导致在交叉定位时出现多个交点。设从 n 个不同测试点 (x_k, y_k) 做交叉定位,则最多可能出现 $n(n-1)/2$ 个交点。可采用质心法计算目标位置坐标 $(\hat{x}, \hat{y})$:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \sum_{k=1}^{\frac{n(n-1)}{2}} (x_k, y_k) \quad (15)$$

交叉定位过程可以通过单站多点测量后实现,也可以多站多点协同测量后实现。其中,对于快速移动目标,需多站协同结合行人航迹推算方法实现定位,或依靠单站方向估计融合视频监控信号等异构数据融合算法实现定位,受篇幅所限,不再赘述。

3 仿真实验验证

3.1 仿真条件

设定位场景为 $50 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的室内空间,存在单个静止状态的非法信号源;接收阵列信号属于平面波入射窄带信号;阵列天线结构为理想均匀线阵,阵元数为 4,间隔距离 $d = \lambda/2$;各接收通道之间的固有相位误差为 0。

3.2 DOA 估计性能仿真

设信号入射到阵列天线的方位角分别为 $-10^\circ, -30^\circ$ 和 20° ,接收阵列信号的快拍数为 100,信噪比为 10 dB。通过仿真实验,评估 ES-DOA 算法的 DOA 估计性能,并与传统 MUSIC 算法作对比。

阵列信号为非相干信号时,ES-DOA 与 MUSIC 算法的 DOA 估计结果见图 1(a)。此时,ES-DOA 算法和 MUSIC 算法均能得到正确的 DOA 估计值。对比谱峰可以发现,ES-DOA 算法得到的空间谱比 MUSIC 算法的空间谱更加尖锐,旁瓣的幅度更加低。MUSIC 算法的估计精确度受信噪比和快拍数影响较大,估计的谱峰不够尖锐,且在 -10° 方向较为模糊。当 -30° 和 20° 的入射信号相干时,ES-DOA 与 MUSIC 算法的 DOA 估计结果见图 1(b)。对

比谱峰可以发现,传统的 MUSIC 算法得到的方位角谱只有一个峰值,而 ES-DOA 算法估计出的谱峰位置与信号的到达角(图中黑色竖线)基本对应。

仿真结果证明:ES-DOA 算法在处理非相干信号和相干信号时均具有良好的性能,在处理非相干阵列信号时,ES-DOA 算法分辨率和鲁棒性都要优于 MUSIC 算法,而且 ES-DOA 算法能有效估计相干阵列信号到达角。

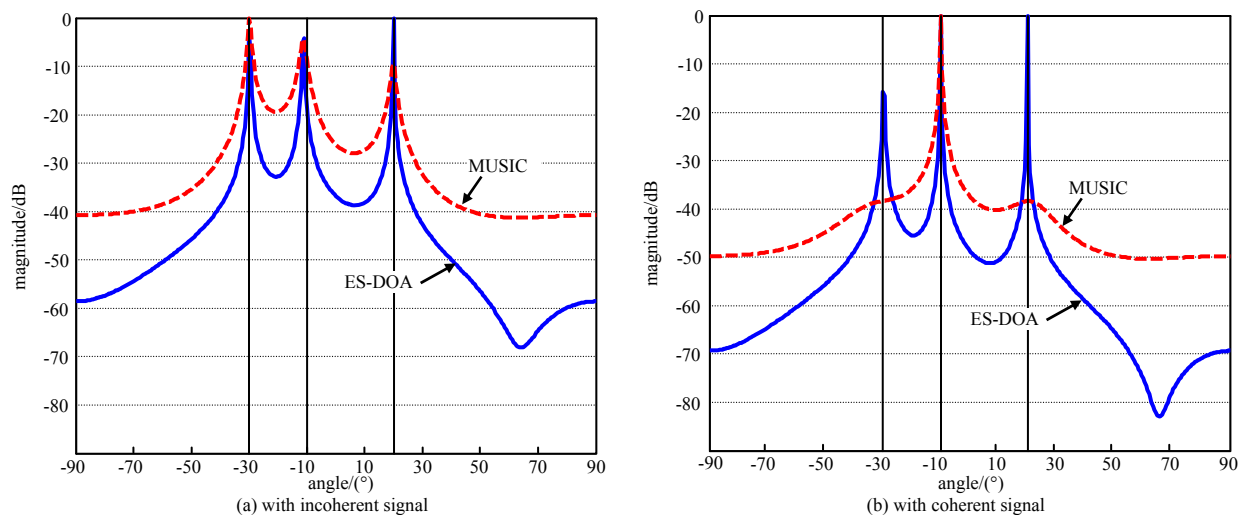


Fig.1 Azimuth spectra of ES-DOA and MUSIC algorithms

图1 ES-DOA 与 MUSIC 算法输出的空间谱

3.3 直达路径识别算法仿真

为验证所提直达路径识别算法的通用性和鲁棒性,针对不同的室内环境条件,采用 ES-DOA 算法对连续接收的 50 组快拍数为 100 的阵列信号进行 DOA 估计,入射到阵列天线的方位角分别为 -10° 、 -30° 和 20° 的相干信号,其中直达路径方向为 -30° 。分别综合不同环境下的 DOA 估计结果,合成的方位角空间谱见图 2:图 2(a)为室内空间处于相对稳定的静态环境时的方位角空间谱,此时直达路径方向的方位角谱峰非常集中,反射路径方向略微发散一些,但没有出现离群值;图 2(b)为室内环境存在较多动态干扰时,合成的方位角空间谱中的反射路径方向的谱峰明显发散,而且出现少量离群点,而直达路径方向的谱峰仍较为集中;室内环境有时还存在环境波动剧烈,且信号强度在直达路径方向非常微弱的情况,见图 2(c)。该条件下方向角空间谱随时间剧烈波动,谱峰发散杂乱。

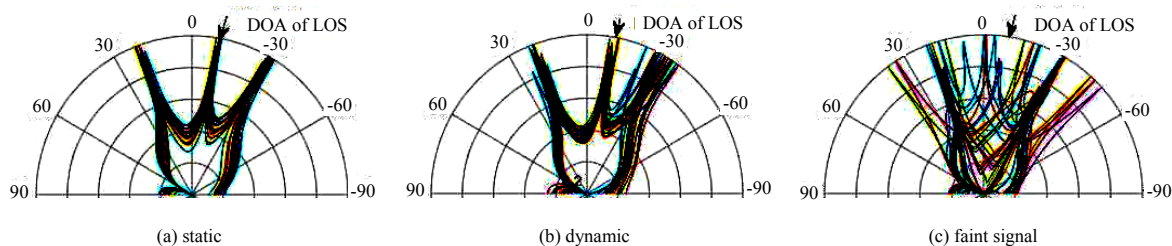


Fig.2 Azimuth spectrum synthesis of multiple continuous snapshot packets

图2 连续多组 DOA 估计方位角空间谱合成图

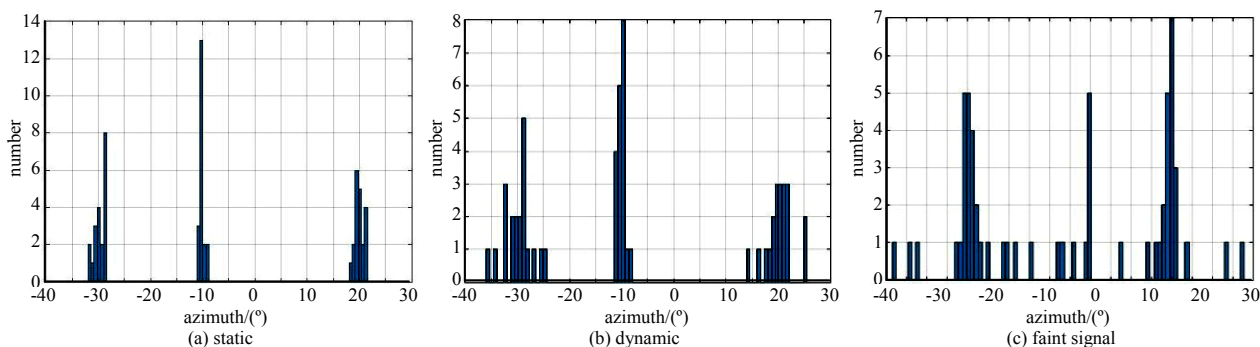


Fig.3 Statistical histogram of azimuth spectrum synthesis

图3 不同环境下 DOA 估计方位角峰值统计直方图

图 3 为合成方位角空间谱对应的统计直方图。根据式(11)构建估计值集合, 设置角度区间 $\Delta\phi=10^\circ$, 并根据直方图统计得到各个类别的方向角均值、标准差以及信号功率标准差等参数, 代入各分类器中并将输出结果进行集成, 得到最终的直达路径估计结果, 见表 1, 其中 C_i 代表第 i 个类别的序号。

仿真结果表明, 本文提出的直达路径识别算法在稳定环境和动态环境中都能够准确估计出直达路径方向角, 而在极端情况下, 能够判断出“无信号直达路径”, 并可为后续定位策略选择提供依据。

表 1 不同情景直达路径识别算法分类器输出结果对比

	static environment	dynamic environment	NLOS case
$\hat{\theta}_i$	$\{-29.4^\circ, -10.4^\circ, 19.8^\circ\}$	$\{-29.2^\circ, -10.1^\circ, 20.4^\circ\}$	$\{-29.5^\circ, -0.2^\circ, 18.6^\circ\}$
h_1	C_1, C_2, C_3	C_2	none
h_2	C_2	C_2	C_2
h_3	C_2	C_2	C_3
H	$-10.4^\circ(C_2)$	$-10.1^\circ(C_2)$	no direct-path

4 结论

针对室内非法信号源定位应用的特点, 本文提出一种基于到达方向(DOA)估计的无源定位方法。通过采用具有解相干能力的 ES-DOA 算法处理阵列观测数据, 可以同时估计入射信号到达角度空间谱和对应的信号功率值, 并结合提出的直达路径集成搜寻算法实现对信号源真实方向的准确判断, 有效克服了由于信号多径传播引起的干扰。仿真实验表明, ES-DOA 算法在处理相干阵列信号时, 具有高分辨力和较强的抗噪声能力, 提出的直达路径识别算法能够在不同室内环境中准确识别信号的直达路径方向, 具有较强的鲁棒性。此外, 该方法既能单站定位, 又可多站协同工作, 具有较强的系统可实现性。本文所提方法是针对静止非法信号源的定位场景, 而对于移动的非法信号源, 可以引入辅助算法, 如扩展卡尔曼滤波算法等, 来实现对信号源方向和轨迹的持续估计和跟踪。

参考文献:

- [1] LAOUDIAS C, MOREIRA A, KIM S, et al. A survey of enabling technologies for network localization, tracking, and navigation[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4):3607–3644.
- [2] YASSIN A, NASSER Y, AWAD M, et al. Recent advances in indoor localization: a survey on theoretical approaches and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2):1327–1346.
- [3] 刘鹏, 卢潭城, 高翔. 基于射频识别的室内定位技术综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(2):195–201. (LIU Peng, LU Tancheng, GAO Xiang. A review of Radio Frequency identification based indoor localization technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(2):195–201.)
- [4] BAHL V, PADMANABHAN V. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system[C]// INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Tel Aviv, Israel: IEEE, 2000:775–784.
- [5] YOUSSEF M, ASHOK A. The horus wlan location determination system[C]// International Conference on Mobile Systems. Seattle, WA, USA: [s.n.], 2005:205–218.
- [6] CHEN Z, WANG J. GROF: indoor localization using a multiple-bandwidth general regression neural network and outlier filter[J]. Sensors, MDPI AG, 2018, 18(11):3723.
- [7] 田中成, 刘聪锋. 无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015. (TIAN Zhongcheng, LIU Congfeng. Passive locating technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.)
- [8] XIONG J, JAMIESON K. ArrayTrack: a fine-grained indoor location system[C]// Usenix Conference on Networked Systems Design and Implementation. Lombard, IL, United States: [s.n.], 2013:71–84.
- [9] KOTARU M, JOSHI K, BHARADIA D, et al. SpotFi: decimeter level localization using WiFi[C]// ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication. London, United Kingdom: [s.n.], 2015:269–282.
- [10] GJENGSET J, XIONG J, MCPHILLIPS G, et al. Phaser: enabling phased array signal processing on commodity WiFi access points[C]// 20th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Maui, HI, United States: [s.n.], 2014:153–164.
- [11] KUMAR S, HAMED E, KATABI D, et al. LTE radio analytics made easy and accessible[C]// 2014 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication. Chicago, IL, United States: [s.n.], 2014:211–222.
- [12] WU K, XIAO J, YI Y, et al. FILA: fine-grained indoor localization[C]// IEEE Conference on Computer Communications. Orlando, FL, United States: IEEE, 2012:2210–2218.

(下转第 598 页)