



综述

无源物联网定位技术发展现状及演进趋势

钱泓宇, 李源, 王晴, 王亚敏, 肖善鹏

(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 基于无源物联网的定位系统具有低成本、可标记的特点, 适用于需要对大量目标进行定位的场景。传统无源物联网定位多应用于资产管理、物料跟踪等室内场景, 随着蜂窝无源物联网的兴起, 无源物联网定位技术将拥有更广阔的应用空间。基于此背景, 在分析不同定位技术的原理及特点的基础上, 介绍了无源物联网定位的最新研究进展, 并根据实现原理将无源物联网定位技术总结为基于几何测量、基于指纹特征和基于成像技术的3类定位方法。鉴于当前研究大多采用在传统无源物联网架构和协议下获取的数据进行定位, 从架构、协议、数据3个层面分析无源物联网定位技术的未来发展方向, 以期在无源物联网定位技术研究提供新的思路。

关键词: 无源物联网; 定位; RFID

中图分类号: TN926

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024085

Passive IoT-based positioning technology development status and evolutionary trends

QIAN Hongyu, LI Yuan, WANG Qing, WANG Yamin, XIAO Shanpeng

China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: Passive IoT-based positioning systems are low-cost and taggable, making them suitable for scenarios that require the positioning of a large number of targets. Traditional passive IoT positioning is mostly applied to indoor scenarios such as asset management, material tracking. With the emergence of cellular passive IoT, passive IoT positioning technology will have a broader range of applications. On the basis of analyzing the principles and characteristics of different positioning technologies, the latest research progress of passive IoT positioning was introduced, and the passive IoT positioning technologies were summarized into three categories: geometrical measurement-based positioning methods, fingerprint feature-based positioning methods, and imaging technology-based positioning methods, according to their implementation principles. In view of the fact that most of the current research adopted the data obtained under the traditional passive IoT architecture and protocol for localization, the future development direction of passive IoT positioning technology was analyzed from three dimensions: architectures, protocols and data. The aim is

收稿日期: 2024-01-08; 修回日期: 2024-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U21B2029)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.U21B2029)

to provide new ideas for researching passive IoT positioning technology.

Key words: passive IoT, positioning, RFID

0 引言

近年来,随着数字产业化和产业数字化的融合发展,物联网的连接能力与覆盖范围得到极大的提升,人们对基于位置的服务需求日益增长。在室外场景下,全球定位系统(global positioning system, GPS)是获取位置信息的主要手段,然而在建筑物墙壁遮挡的室内场景下, GPS 不能准确识别待定位目标的位置,难以满足家庭、商超、仓储等场景中对于定位服务的需求。因此,基于诸如超声波、红外线、超宽带(ultra-wideband, UWB)、无线局域网(Wi-Fi)、蓝牙、无源物联网等无线技术的定位方案受到广泛关注。

基于超声波的定位技术通常利用反射回波测距,然后根据三边定位法得到目标的位置,从而可达到较高的定位精度。但是,由于室内场景中超声波传输衰减明显且需要部署大量造价高昂的底层专用硬件设备^[1],超声波定位系统无法得到广泛应用。基于红外线的定位技术通过发射带有标识信息的红外射线进行定位,可以达到较高的定位精度^[2],但是只适用于视距和短距离传输环境,在实际应用中存在较大的局限。UWB 技术通过发射纳秒级的短脉冲来传输数据,可达到 GHz 级带宽,抗干扰能力强,若采用基于到达时间的方法可以达到厘米级的定位精度^[3],但部署成本较高。Wi-Fi 定位系统通常采用接收信号强度^[4]或信道状态信息^[5]作为特征,运用指纹法实现定位。随着无线局域网的普及和发展,基于 Wi-Fi 的定位方法得到广泛关注,但不适合在对能耗有限制的场景下进行定位。蓝牙协议可以提供接收信号强度指示(received signal strength indicator, RSSI)、到达角(angle of arrival, AOA)等信息用于定位^[6],具有低成本、低功耗的特

点,但存在覆盖范围有限等缺点。相比于上述定位技术,以射频识别(radio frequency identification, RFID)为代表的无源物联网技术利用反向散射进行通信,因而具有功耗极低、成本极低、易于部署等特点,在资产管理、物流跟踪、工业制造等需要对海量目标提供位置信息服务的场景中具有广阔的应用前景。蜂窝无源物联网的兴起,将进一步扩展无源物联网定位技术的应用场景。

在这样的背景下,本文从无源物联网定位原理入手,将现有研究分为3类:基于几何测量的定位方法、基于指纹特征的定位方法和基于成像技术的定位方法,分析了3类方法最新研究进展,并总结3类方法的优势、劣势。然后,从架构、协议、数据3个层面分析无源物联网定位技术未来发展趋势,即架构多元化、协议蜂窝化、数据智能化。

1 无源物联网定位原理及研究进展

1.1 基于几何测量的定位方法

基于几何测量的定位方法通过标签反向散射信号参数估计阅读器和标签之间的距离或角度,根据几何关系计算出目标的位置,其采用的信号参数主要有3类:传播时间、RSSI和相位^[7]。下面对这3类参数用于定位的原理进行介绍。

1.1.1 传播时间

常见基于传播时间的定位方法有到达时间(time of arrival, TOA)法^[8]和到达时间差(time difference of arrival, TDOA)法。TOA 乘以电磁波传播速度可计算阅读器和标签之间的距离,然后通过三边定位法对标签进行定位。TDOA 法并不直接计算标签到阅读器的距离,而是通过标签与多个阅读器的距离差构建双曲线,进而求交点实现定位。测量标签与两个不同的阅读器天线之



间的到达时间差可以计算距离差,从而可以构建一条以两个阅读器天线为焦点的双曲线,多个阅读器可以构建双曲线方程组。TDOA 原理示意图

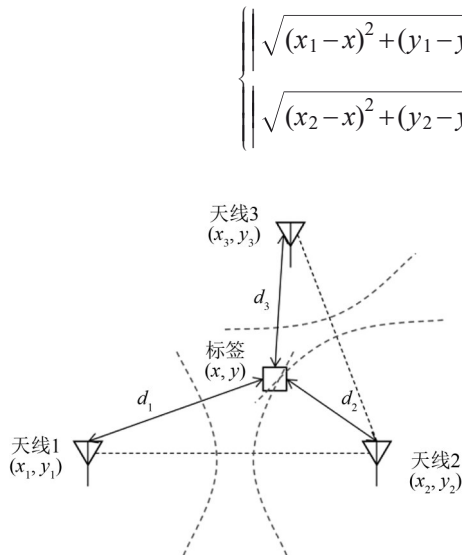


图1 TDOA 原理示意图

其中, d_1 、 d_2 、 d_3 分别为标签到天线 1、天线 2、天线 3 的距离。方程组可以通过最小二乘法^[9]、Fang 算法^[10]、Chan 算法^[11]等方法求解。当双曲线存在多个交点时,需要通过先验条件对目标标签的位置进行筛选。然而,由于电磁波以光速传播,微小的时间测量误差会导致较大的距离估计误差,传播时间的测量精度对定位结果有很大影响。因此,基于传播时间的方法需要高精度的硬件时钟,成本较高,目前应用较少。

1.1.2 RSSI

电磁波在自由空间的传播模型可以由弗里斯传输方程表示:

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \lg \left(\frac{c}{4\pi f d} \right) \quad (2)$$

其中, P_t 、 P_r 、 G_t 和 G_r 分别为发射信号功率、接收信号功率、发射天线增益和接收天线增益, c 为电磁波传播速度, f 为信号频率, d 为信号传播距离。通过测量标签的 RSSI 可以估计标签到阅读器的距离,进而通过三边定位法实现定位。由于不同环境中的信号衰减参数和模型不同,仅

如图 1 所示, 3 个天线的坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 和 (x_3, y_3) , 目标标签的坐标 (x, y) 可以通过一对双曲线的交点来确定, 其方程如下。

$$\begin{cases} \left| \sqrt{(x_1-x)^2+(y_1-y)^2} - \sqrt{(x_2-x)^2+(y_2-y)^2} \right| = |d_1-d_2| \\ \left| \sqrt{(x_2-x)^2+(y_2-y)^2} - \sqrt{(x_3-x)^2+(y_3-y)^2} \right| = |d_2-d_3| \end{cases} \quad (1)$$

通过信号模型方程难以准确描述 RSSI 与距离之间的对应关系, 因此基于指纹特征的定位方法受到关注。

RSSI 信息易于获取, 所以基于 RSSI 的定位方法得到了广泛应用。然而, RSSI 容易受环境因素的影响, 波动较大, 基于 RSSI 的定位方法通常精度有限。

1.1.3 相位

相比于 RSSI, 相位信息的稳定性更高。阅读器可以采用正交解调的方式获取信号相位。载波相位的变化量是信号传播时间与信号角频率的乘积, 因此通过相位信息计算信号的传播时间, 可得到标签与阅读器的距离信息。距离 r 与载波相位 φ 的关系可表示如下。

$$r = \frac{c\varphi}{4\pi f} \quad (3)$$

由于相位以 2π 为周期呈周期性变化, 所以基于相位的定位方法首先要解决的是相位的整周模糊问题。利用到达相位差 (phase difference of arrival, PDOA) 可以在一定程度上减小整周模糊的影响, 时间域 (time domain, TD)-PDOA^[12]、空间域 (spatial domain, SD)-PDOA^[13] 和频率域 (frequency domain, FD)-PDOA^[14] 是 3 种主要的方法。

(1) TD-PDOA

TD-PDOA 可以用来计算标签相对阅读器天线的径向运动速度, TD-PDOA 原理示意图如图 2 所示。假设标签匀速移动且硬件和环境引起的相位偏移是固定的, 那么标签的移动速度可以通过

相位差与时间差计算。径向速度可表示为：

$$v_r = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4\pi f \cdot \Delta t} \quad (4)$$

其中, $\Delta\varphi = \varphi_{t1} - \varphi_{t2}$, $\Delta t = t_1 - t_2$, φ_{t1} 和 φ_{t2} 分别为标签移动前后往返信号的相位变化量, t_1 和 t_2 分别为标签移动前后往返信号的传播时间。考虑相位差仍存在整周模糊的限制, TD-PDOA 不适用于标签快速移动或标签静止不动的情况。

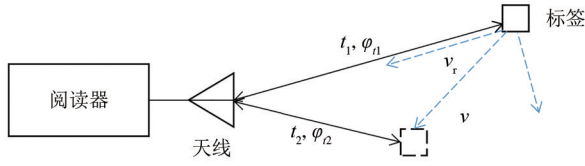


图2 TD-PDOA原理示意图

(2) SD-PDOA

SD-PDOA 可以通过多个阅读器天线接收到的相位差来计算标签到不同天线的距离差, 然后采用与 TDOA 类似的双曲线定位法估计目标距离。SD-PDOA 原理示意图如图3所示。假设硬件和环境引起的相位偏移是固定的, 由式(3)可得标签到天线1和天线2的距离差为:

$$\Delta r = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4\pi f} \quad (5)$$

其中, $\Delta r = r_1 - r_2$, $\Delta\varphi = \varphi_{r1} - \varphi_{r2}$, r_1 和 r_2 分别为天线1和天线2到标签的距离, φ_{r1} 和 φ_{r2} 分别为天线1和天线2发射信号与接收信号的相位变化量。进一步地, 利用多组距离差的约束关系即可确定待定位标签的具体坐标。

此外, 当 $d \ll r$ 时:

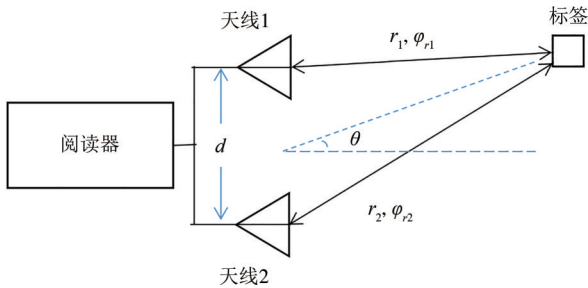


图3 SD-PDOA原理示意图

$$\Delta r = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4\pi f} \approx d \sin \theta \quad (6)$$

其中, d 为天线间的距离, θ 为标签与天线中线的夹角。因而, SD-PDOA 也可用于估计标签相对于阅读器天线的角度, 可以采用基于 AOA 的方法实现定位。为了避免相位差 $\Delta\varphi$ 的整周模糊并实现对天线前方的整个平面的监测, SD-PDOA 要求两天线之间的距离 d 小于半波长。相反地, 若要解除对天线间距离的要求, 则需要划定算法可行区域, 限制标签到天线间的距离差小于半波长^[15]。随着角度的增大, 即使相位误差很小, 也会引起很大的测量误差, 这意味着当标签偏离天线时, SD-PDOA 的定位性能会下降。

(3) FD-PDOA

FD-PDOA 通过测量不同频率下的标签相位差来估计标签与阅读器天线之间的距离。FD-PDOA 原理示意图如图4所示。假设硬件和环境引起的相位偏移是固定的, 则可以通过相位差与频率差计算距离:

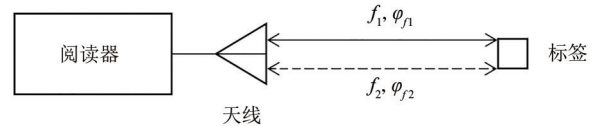


图4 FD-PDOA原理示意图

$$r = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4\pi \cdot \Delta f} \quad (7)$$

其中, $\Delta\varphi = \varphi_{f1} - \varphi_{f2}$, $\Delta f = f_1 - f_2$, f_1 和 f_2 分别为两次信号的频率, φ_{f1} 和 φ_{f2} 分别表示频率为 f_1 和 f_2 时发射信号与接收信号的相位变化量。FD-PDOA 方法中的频率差会影响测距的范围和精度。由于相位差存在整周模糊, 当 $\Delta\varphi = 2\pi$ 时可以得到双频 FD-PDOA 测得的最远距离, 因而频率差越小, 可测距离越远。两个信号的频率差越大, 距离变化引起的相位差变化越小, 即测距分辨率越小。为了解决测距范围与测距精度的矛盾, 多频相位差的方法受到关注^[16-17]。融合多个频率下的标签相位信息, 可以克服相位模



糊性, 实现较好的定位精度并对复杂环境具有一定鲁棒性。

1.2 基于指纹特征的定位方法

基于几何测量的定位方法原理简单, 但是计算量大, 计算过程复杂。此外, 无源物联网系统是窄带系统, 难以从受多径效应影响的混合信号中准确提取视距信号的RSSI、相位等参数信息, 从而导致基于几何测量的定位方法在复杂的室内环境中精度较低。与基于几何测量的定位方法不同, 基于指纹特征的定位方法不需要在信号参数与距离或角度之间建立确切的数学模型, 而是通过比对目标标签的参数特征与指纹库或参考标签的参数特征的相似度来估计目标标签的位置。

基于指纹特征的定位方法已在Wi-Fi等无线信号的定位系统中得到大量的研究和应用, 然而当系统的应用环境相较于采集指纹库的环境发生改变时, 定位结果将发生较大偏差。无源标签价格低廉、易于部署, 因而可以通过在待测环境中部署大量参考标签, 达到实时指纹库的效果。LANDMARC系统就是一个典型代表^[8], LANDMARC原理示意图如图5所示。LANDMARC系统需要同时读取参考标签和待测目标标签的信号强度, 计算参考标签与目标标签的欧氏距离, 基于 k 近邻(k -nearest neighbor, KNN)算法, 找到 k 个与目标标签最近的参考标签, 并根据参考标签的位置加权平均得到目标标签的位置。LANDMARC算法的精度与参考标签的部署密度相关。理论上, 参考标签部署越密集, 定位精度越高。然而, 密度过高的参考标签也会增加系统部署成本以及标签之间的信号干扰。文献[19]提出基于虚拟参考标签的VIRE算法, 不在待测区域部署大量真实参考标签, 而是根据真实参考标签的RSSI分布进行线性插值形成虚拟参考标签, 在保持较低的参考标签部署密度的同时, 提高定位精度。

除了应用最多的KNN外, 其他机器学习算法也被用于从指纹特征中提取位置信息。Xu等^[20]采

用支持向量回归(support vector regression, SVR)方法和加权路径长度来提高传统LANDMARC定位的精度。与传统的RFID定位方法相比, 使用高斯-卡尔曼滤波来解决噪声问题, 并使用SVR预测位置, 从而提高定位精度。实验结果表明, SVR-LANDMARC算法的定位误差可降低至20.243 cm。经典的定位模型在射频信号非线性变化的情况下不能很好地发挥作用, Wen等^[21]提出了一种室内定位算法BP_LANDMARC, 该算法利用反向传播神经网络解决了这一问题。BP_LANDMARC将参考标签的RSSI值作为输入数据, 参考标签的实际坐标作为输出数据来训练神经网络。实验结果表明, 在应用于物流仓库管理系统时, 所提出的算法表现出了高效的性能。Wu等^[22]则结合径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络和量子粒子群优化(quantum particle swarm optimization, QPSO)算法, 对获取的信号进行预处理, 将RSSI映射为目标位置, 提高定位系统在定位精度、自适应能力和优化收敛速度等方面的性能。

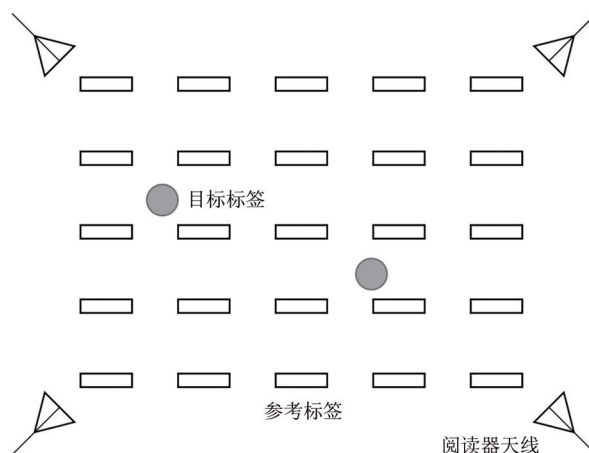


图5 LANDMARC原理示意图

随着标签与读取器天线之间距离的增加, RSSI值的变化会越来越缓慢, 这导致对标签的高精度定位难以实现。由于相位信息对距离的变化更为敏感, 可以引入相位信息来表示标签信息。

Mo等^[23]提出了一种虚拟参考标签相似度测量方法,将相位和RSSI结合起来作为指纹信息,有利于消除环境误差,大幅提高定位精度。实验结果表明,15个测试标签中80%的误差在4 cm以内,90%的误差在10 cm以内。加入相位属性后,虚拟标签相似性测量的稳定性和准确性都得到了提高。Peng等^[24]则利用RSSI和PDOA的联合指纹特征,提出了一种基于深度CNN的无源RFID标签定位方法。实验发现,PDOA数据集的定位效果优于RSSI数据集,而RSSI和PDOA联合数据集的定位效果最好。同时,实验结果表明,基于深度学习的方法优于传统的基于指纹的方案,更适合复杂室内环境中的RFID标签定位。

1.3 基于成像技术的定位方法

RFID脱胎于雷达技术。近年来雷达成像技术开始被用来实现基于无源物联网的定位,实现高分辨率成像的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)技术就是其中的代表。基于SAR的RFID定位系统结构简单,只需要一个可移动的天线。天线在移动过程中形成虚拟天线阵列,对标签进行连续盘存,通过多个采样相位值的相干叠加来确定目标位置^[25]。

基于SAR的定位方法需要将待测区域划分成网格,然后建立全息图,每个网格对应一个像素,SAR原理示意图如图6所示。为了确保定位精度,需要增加网格密度,相应地,系统的计算量也会增大。Wu等^[26]建立了一个相位解缠绕模型,并采用非线性最小二乘算法列文伯格—马夸尔特(Levenberg-Marquardt, L-M)方法来估计模型未知参数,降低了计算复杂度。Jiang等^[27]提出一种基于多粒度思想的静态标签定位方法以降低计算复杂度。该方法在粗粒度定位阶段,通过重建场景的反射系数,找到目标位置的高概率区域,然后在细粒度定位阶段,遍历区域内网格,计算相应的评估系数,确定最终的定位结果,从而减少定位计算的耗时。Tzitzis等^[28]提出

对相位数据进行解缠绕处理并将位置求解构建为一个凸优化问题,通过标准非线性优化算法可快速解算,避免了执行计算成本高昂的搜索。实验结果表明,与基于网格的SAR定位相比,该方法的标签估计速度快了几个数量级,同时精度也略有提高。随后,Tzitzis等^[29-30]利用以曲线轨迹移动的单天线和多天线,将该方法扩展至三维定位,可以实现平均误差小于20 cm的三维定位。Bernardini等^[31]和Garcis等^[32]则采用基于粒子群优化的方法降低计算成本,同时将定位误差降到厘米级。

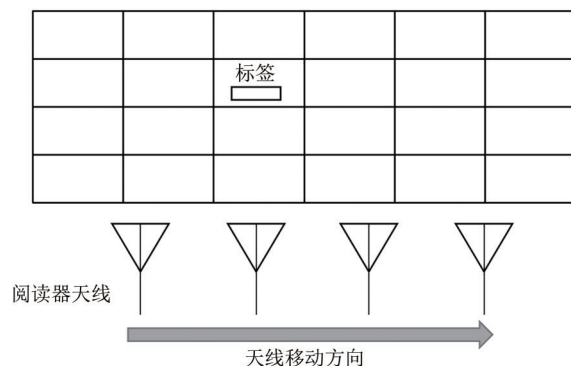


图6 SAR原理示意图

另一种新兴的基于成像的定位方法是射频层析成像(radio tomographic imaging, RTI)技术^[33-34],该方法利用无线信号的阴影模型构建监控区域内的信号衰减图像,具有实时性好、计算复杂度低、定位精度高等特点。RTI不需要目标携带标签,RTI原理示意图如图7所示,只需要在监测区域内部署标签和阅读器,就可利用目标对无线信号的影响估计目标的位置。随着目标数量增加,如何识别多径干扰产生的假目标是基于RTI的定位需要解决的问题。近年来,Ma^[35-37]团队先后提出了扫描环链路分析(scanning circle link analysis, SCLA)、交叉多维特征分析、特征区域组合等方法,以消除多目标定位中的虚假目标,实现单目标的亚米级定位及多目标的米级定位。

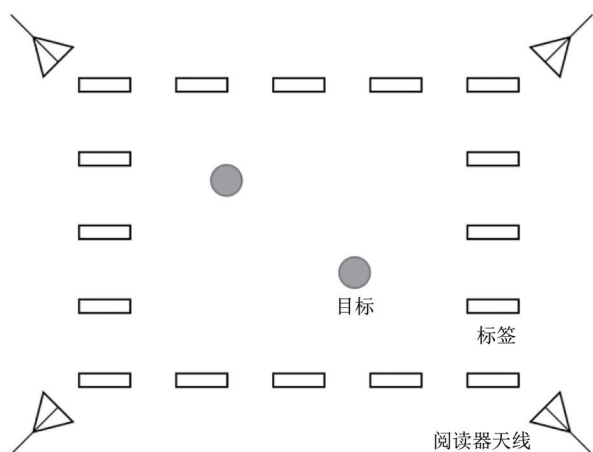


图7 RTI原理示意图

1.4 3类定位方法总结

无源物联网定位技术研究进展见表1，总结了近年来无源物联网定位技术部分代表性研究采用的信号参数、系统需求、监测区域大小及达到的定位效果。

基于几何测量的定位方法是模型驱动的方法，其优势在于对系统需求简单，不需要部署大

量参考标签，也不需要阅读器按特定轨迹运动，但瓶颈在于难以通过模型准确描述随机因素对定位效果的影响。此外，参数的测量准确度也会限制定位的准确度。例如，传播时间的测量精度与信号的带宽有关，而无源物联网信号带宽较窄，难以获取精确的信号传播时间，所以当前无源物联网定位的相关研究更多关注基于RSSI和相位的方法。

基于指纹特征的定位方法的优势在于数据驱动，不需要建立确切的信号传播模型，并且可以通过参考标签根据环境的变化实时更新指纹特征信息。基于指纹特征的定位方法的首要问题是如何通过离散部署的参考标签估计目标在连续空间中的位置。为了解决这一问题，具有强大的数据拟合能力的人工智能算法越来越多地被应用于无源物联网定位系统。

基于成像技术的定位方法优势在于定位精度高，但其代价是需要增加硬件和计算上的开销。

表1 无源物联网定位技术研究进展

方法	代表文献	参数	系统需求	监测区域大小	定位效果
基于几何测量	文献[8]	TOA	高精度时钟，仅测距	10 m	实时测距精度约为1.6 m；1 000次的平均估计误差小于0.5 m
	文献[15]	相位	4个阅读器天线放置在一条直线上，并限制标签可行区域	5 m×8 m	定位误差均值为12.8 cm
	文献[17]	相位	多个天线，放置在同一平面，朝向监测区域	2 m×2 m	7.61 cm的平均定位误差
基于指纹特征	文献[20]	RSSI	4个阅读器天线，每隔60 cm部署参考标签	3.6 m×3.6 m	定位误差达到20.243 cm
	文献[22]	RSSI	阅读器固定在仓库的4个角落，参考标签均匀分布在货架上	10 m×10 m×5 m	仿真三维定位误差为0.25~0.92 m
	文献[23]	RSSI+相位	4个阅读器天线，每隔10 cm部署参考标签	0.7 m×0.7 m	80%的误差在4 cm以内，90%的误差在10 cm以内
	文献[24]	RSSI+相位	8个阅读器天线，49个参考标签均匀分布	12 m×12 m	平均误差为0.667 m
基于成像技术	文献[27]	相位	可移动天线安装在直线导轨上	1 m×1.2 m	平均定位精度为6.47 cm
	文献[30]	相位	在机器人的不同高度上分别安装4个天线	4 m×6 m×2 m	平均三维定位误差小于20 cm
	文献[31]	相位	在机器人的不同高度上分别安装2个天线	7 m×5 m×1.5 m	三维定位误差可达厘米级
	文献[37]	RSSI	6个阅读器天线，24个标签环绕监测区域放置	4 m×8 m	1~4个目标的平均定位误差分别为0.367 6 m、1.047 1 m、1.256 2 m和1.460 5 m

基于成像技术的定位方法结合模型驱动和数据驱动的特点,通过运动的阅读器(SAR)或位于不同位置的阅读器(RTI)多次采集标签信号的相位或RSSI,建立完整监测区域的图像,可实现厘米级的定位。然而,SAR定位计算复杂度高,RTI定位精度随目标数目增加而明显下降,如何解决这些问题是近年来研究者关注的重点。

2 无源物联网定位未来发展趋势

无源物联网定位系统自底向上涉及的系统架构、空口协议、数据处理都会影响最终的定位效果。然而,当前无源物联网定位技术研究者大多采用传统无源RFID架构及协议获取数据,并在此基础上开展数据处理算法研究,很少向下触及架构和协议。随着无源物联网的演进,在新的多元化架构、蜂窝化协议下充分利用数据进行智能化融合分析以实现基于无源物联网的定位将是未来的发展方向。

2.1 架构多元化——新型无源物联网架构下的定位

传统的无源UHF RFID系统由标签、阅读器、上位机3部分组成。阅读器向标签发送指令和能量,并接收来自标签的反向散射信号,实现标签信息的读取。上位机处理经阅读器解调后的标签信息,执行定位算法,估算目标位置。

这种传统无源RFID系统架构主要存在两点问题:一是系统采用收发一体的结构,同一阅读器发送的供能和指令信号与接收的标签反向散射信号之间会发生自干扰,多个不同阅读器的信号之间也会产生相互干扰,进而限制了传统无源RFID系统的覆盖范围,影响信号参数的获取;二是系统不支持大规模的组网与统一的资源调度,从而导致维护成本的增加和部署效率的降低。这些问题严重影响了无源物联网的定位应用范围和精度。

为突破传统无源系统的限制,学术界和产业

界积极探索新型无源物联网架构。收发分离架构因可以有效降低系统的自干扰而受到关注^[38]。分离式架构将传统的收发一体阅读器分为两个独立的设备:激励器和接收器,降低了接收器端激励信号和反向散射信号之间的干扰,进而提高了系统的覆盖距离和通信效率。为了进一步提升系统运维能力及通信距离,将蜂窝网络技术与无源物联网结合,构建蜂窝无源物联网逐渐成为产业共识^[39-40]。

新型架构在扩展无源物联定位应用范围的同时,也对无源定位算法提出新的需求和挑战。现有无源定位算法都是基于信号往返路径相同的收发一体架构进行设计的,在信号收发路径不对称的分离式架构下无法直接复用。目前已有部分针对分离式架构下的定位算法优化的研究^[41],将更多收发一体架构下的定位算法迁移至收发分离架构下将是无源物联网定位的一个重要研究方向。进一步地,蜂窝无源物联网系统的潜在架构更加丰富多样^[42],如何面向不同场景下的定位需求实现天线和标签的灵活快速部署,以及在这样的架构部署下如何实现对目标的准确定位也是无源物联网定位需要解决的问题。

2.2 协议蜂窝化——面向蜂窝无源的定位协议设计

当前,传统无源RFID系统采用ISO/IEC 18000-6c协议,其中定义的交互信息和通信过程主要面向标签盘存功能而设计,并未对定位需求进行针对性优化。

从标签角度来看,传统无源RFID协议缺少用于定位的测量信号。标签的反向散射信号有两种,即RN16信号和EPC信号,因此可以利用RN16信号或EPC信号计算定位所需的标签信号参数。Yang等^[43]认为数据包的长度越短,信号RSSI和相位的偏移越小,而RN16数据包的长度相较于EPC数据包更短,因而RN16更适用于信号参数的测量。然而,Tang等^[44]则认为EPC更



适用于信号参数的测量。由于协议定义的防碰撞机制,当标签碰撞时,阅读器接收到的信号是两个标签反射的RN16信号的矢量和,此时测得的信号参数就会产生偏差。而无论标签是否发生碰撞,只有一个标签会返回EPC信号,从而避免了信号叠加产生的参数偏差。综上所述,为达到更好的定位效果,无源物联网需要一种长度短且存在防碰撞机制的测量信号用于提取定位参数。

从阅读器角度来看,传统无源RFID协议未考虑多阅读器重叠覆盖情况下的干扰协调。为了实现对无源物联网标签的定位,通常需要3个以上阅读器对监测区域重叠覆盖。然而,当多个阅读器启动对标签的盘存时,标签会收到多个彼此干扰的信号,无法正确解析指令,导致响应失败。此外,阅读器的信号发射功率远大于标签反向散射信号的功率,多阅读器同时发送信号,也会干扰阅读器对标签信号的接收。

随着无源物联网向着与蜂窝融合的方向演进,可参考蜂窝网络中现有的定位参考信号和干扰协调机制,针对蜂窝无源物联网的定位设计新的通信协议和交互流程,为无源物联网的定位算法提供更加准确的信号参数,提升无源物联网的定位效果。

2.3 数据智能化——基于人工智能算法的融合定位

如前文所述,无源物联网信号的不同参数各有其优势和劣势。基于到达时间的定位方法相对成熟,但无源物联网信号作为窄带信号较难获取精准的到达时间;RSSI信息易于获取,但受环境影响严重;信号相位相对RSSI更稳定,但存在整周模糊的限制。因此融合信号不同的参数以提升无源定位精度逐渐成为研究者的选择^[45-47]。除了多参数信息融合外,无源物联网信号与其他定位技术结合的多源数据融合定位也是一个重要的发展方向。例如,Zhao等^[48]将UWB终端和RFID

阅读器都安装在叉车上,实现货物信息和货物位置的双重感知。此外,无源物联网信号还可与惯性传感器的运动数据^[49]或摄像机采集的视觉信息结合^[50-51]。

然而,当前多参数及多源数据融合定位方法仍面临两个问题:一是无源物联网的信号参数除了与位置有关,还会受标签方向、环境参数、多径效应等其他因素的影响,进而影响定位精度;二是由于不同定位技术获取的数据异构,现有多源融合在无源定位研究多停留在决策级融合,并未充分利用无源物联网信息与其他信息的相关性。

上述问题难以通过建立数学模型准确描述并解决,基于人工智能的融合定位方法将是一个有效的工具。得益于无源物联网低成本、易于部署的特点,研究者可以方便地获取大量数据用于训练人工智能算法。通过在定位监测区域中预先部署参考标签,收集学习参考标签的数据特征,可以训练算法对复杂的电磁干扰环境的适应性。同时,采用卷积神经网络、自动编码器等人工智能算法,可以实现多源异构数据的特征级融合,充分发掘无源物联网数据价值。

3 结束语

本文将无源物联网定位技术分为基于几何测量、基于指纹特征和基于成像技术的3类定位方法,并列举了这3类方法最新的研究进展。由于当前的无源物联网定位技术研究大多聚焦于获取信号数据后的处理,而对如何获取数据关注不多,本文从架构、协议、数据3个层面分析无源物联网定位技术的未来发展趋势,即架构多元化、协议蜂窝化、数据智能化,提出新型无源物联网架构下的定位、面向蜂窝无源的定位协议设计和基于人工智能算法的融合定位将是实现无源物联网定位技术突破的关键方向,为无源物联网定位技术研究及应用扩展提供新的思路。

参考文献:

- [1] PULLANO S A, BIANCO M G, CRITELLO D C, et al. A recursive algorithm for indoor positioning using pulse-echo ultrasonic signals[J]. *Sensors*, 2020, 20(18): 5042.
- [2] PHAM N Q, MEKONNEN K, TANGDIONGGA E, et al. User localization and upstream signaling for beam-steered infrared light communication system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(11): 545-548.
- [3] QIAN H Y, YANG X Z, ZHANG X Y, et al. PLA-JPDA for indoor multi-person tracking using IR-UWB radars[C]//Proceedings of the 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [4] GUO X S, ELIKPLIM N R, ANSARI N, et al. Robust WiFi localization by fusing derivative fingerprints of RSS and multiple classifiers[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(5): 3177-3186.
- [5] GAO Z H, GAO Y F, WANG S L, et al. CRISLoc: Reconstructable CSI fingerprinting for indoor smartphone localization[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(5): 3422-3437.
- [6] ZHUANG Y, ZHANG C Y, HUAI J Z, et al. Bluetooth localization technology: principles, applications, and future trends[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(23): 23506-23524.
- [7] LI C Y, MO L F, ZHANG D K. Review on UHF RFID localization methods[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2019, 3(4): 205-215.
- [8] XIONG T W, LIU J J, YANG Y Q, et al. Design and implementation of a passive UHF RFID-based real time location system[C]//Proceedings of 2010 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test. Piscataway: IEEE Press, 2010: 95-98.
- [9] ZHANG L, ZHANG T, SHIN H S. An efficient constrained weighted least squares method with bias reduction for TDOA-based localization[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(8): 10122-10131.
- [10] ZHOU T, CHENG Y. Positioning algorithm of UWB based on TDOA technology in indoor environment[C]//Proceedings of the 2021 11th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME). Piscataway: IEEE Press, 2021: 261-266.
- [11] ZHOU R H, SUN H M, LI H, et al. Time-difference-of-arrival location method of UAV swarms based on Chan-Taylor[C]//Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1161-1166.
- [12] NIKITIN P V, MARTINEZ R, RAMAMURTHY S, et al. Phase based spatial identification of UHF RFID tags[C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2010). Piscataway: IEEE Press, 2010: 102-109.
- [13] ZHOU J R, ZHANG H J, MO L F. Two-dimension localization of passive RFID tags using AOA estimation[C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [14] QIU L X, HUANG Z Q, ZHANG S H, et al. Multifrequency phase difference of arrival range measurement: principle, implementation, and evaluation[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 11(11): 715307.
- [15] 刘天赐. 超高频射频识别标签反向散射信号的研究和应用[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- LIU T C. Backscatter communication signals of UHF RFID tags: study and applications[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [16] CHEN R, HUANG X Y, LIU W, et al. RFID-based vehicle localization scheme in GPS-less environments[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1237-1241.
- [17] JIN M, HE Y, YANG S Z, et al. Versatile RFID-based sensing: model, algorithm, and applications[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 22(10): 6223-6236.
- [18] NI L M, LIU Y H, LAU Y C, et al. LANDMARC: indoor location sensing using active RFID[C]//Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2003). Piscataway: IEEE Press, 2003: 407-415.
- [19] ZHAO Y Y, LIU Y H, NI L M. VIRE: active RFID-based localization using virtual reference elimination[C]//Proceedings of the 2007 International Conference on Parallel Processing (ICPP 2007). Piscataway: IEEE Press, 2007: 56.
- [20] XU H, WU M X, LI P, et al. An RFID indoor positioning algorithm based on support vector regression[J]. *Sensors*, 2018, 18(5): 1504.
- [21] WEN Q G, LIANG Y C, WU C G, et al. Indoor localization algorithm based on artificial neural network and radio-frequency identification reference tags[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(12): 168781401880868.
- [22] WU X, DENG F M, CHEN Z B. RFID 3D-LANDMARC localization algorithm based on quantum particle swarm optimization[J]. *Electronics*, 2018, 7(2): 19.
- [23] MO L F, LI C Y. Passive UHF-RFID localization based on the similarity measurement of virtual reference tags[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(8): 2926-2933.
- [24] PENG C, JIANG H, QU L D. Deep convolutional neural network for passive RFID tag localization via joint RSSI and



- PDOA fingerprint features[J]. IEEE Access, 2021, (9): 15441-15451.
- [25] MIESEN R, KIRSCH F, VOSSIEK M. Holographic localization of passive UHF RFID transponders[C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on RFID. Piscataway: IEEE Press, 2011: 32-37.
- [26] WU H B, TAO B, GONG Z Y, et al. A fast UHF RFID localization method using unwrapped phase-position model[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(4): 1698-1707.
- [27] JIANG Y, MA Y T, LIU H K, et al. RF-SML: a SAR-based multi-granular and real-time localization method for RFID tags[J]. Electronics, 2020, 9(9): 1447.
- [28] TZITZIS A, MEGALOU S, SIACHALOU S, et al. Localization of RFID tags by a moving robot, via phase unwrapping and non-linear optimization[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2019, 3(4): 216-226.
- [29] TZITZIS A, MEGALOU S, SIACHALOU S, et al. Trajectory planning of a moving robot empowers 3D localization of RFID tags with a single antenna[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2020, 4(4): 283-299.
- [30] TZITZIS A, RAPTOPOULOS CHATZISTEFANOU A, YIOULTSIS T V, et al. A real-time multi-antenna SAR-based method for 3D localization of RFID tags by a moving robot[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2021, 5(2): 207-221.
- [31] BERNARDINI F, BUFFI A, MOTRONI A, et al. Particle swarm optimization in SAR-based method enabling real-time 3D positioning of UHF-RFID tags[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2020, 4(4): 300-313.
- [32] GAREIS M, FENSKE P, CARLOWITZ C, et al. Particle filter-based SAR approach and trajectory optimization for real-time 3D UHF-RFID tag localization[C]//Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on RFID (RFID). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-8.
- [33] WILSON J, PATWARI N. Radio tomographic imaging with wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(5): 621-632.
- [34] WAGNER B, PATWARI N, TIMMERMAN D. Passive RFID tomographic imaging for device-free user localization[C]//Proceedings of the 2012 9th Workshop on Positioning, Navigation and Communication. Piscataway: IEEE Press, 2012: 120-125.
- [35] MA Y T, ZHANG Y, WANG B B, et al. SCLA-RTI: a novel device-free multi-target localization method based on link analysis in passive UHF RFID environment[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(3): 3879-3887.
- [36] FU H Y, MA Y T, GONG X L, et al. Device-free multitarget localization with weighted intersection multidimensional feature for passive UHF RFID[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(7): 7300-7310.
- [37] LU Y W, MA Y T, NING W R, et al. Multitarget localization for RTI based on constructing feature region combination[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(17): 20002-20011.
- [38] YU S C, PENTY R, CRISP M. Analysis of phase noise performance in spatially separated backscatter systems[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Piscataway: IEEE Press, 2021: 169-172.
- [39] 3GPP. Study on ambient power-enabled internet of things: TR 22.840[S]. 2021.
- [40] 中国通信标准化协会. 基于蜂窝通信的无源物联网应用需求研究: 2021B108[S]. 2021.
- CCSA. Research on application requirements for passive IoT technology based on mobile communications: 2021B108[S]. 2021.
- [41] WANG X Z, DING H Y, LUO Z H, et al. The indoor positioning method time difference of arrival with conic curves utilizing a novel networking RFID system[J]. Electronics, 2023, 12(15): 3236.
- [42] 李源, 张雨露, 丁郁, 等. 无源物联网通信研究进展与演进思考[J]. 物联网学报, 2023, 7(3): 15-23.
- LI Y, ZHANG Y L, DING Y, et al. Research progress and evolution prospect of passive Internet of Things communication[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2023, 7(3): 15-23.
- [43] YANG S, PENTY R, CRISP M. Wirelessly retrieving phase and RSSI of UHF RFID using commodity SDR sniffer[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Piscataway: IEEE Press, 2021: 297-300.
- [44] TANG H, ZHOU Y, SONG W, et al. Anti-collision phase extraction in RFID systems[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Piscataway: IEEE Press, 2022: 232-235.
- [45] LI C L, TANGHE E, PLETS D, et al. ReLoc: hybrid RSSI-and phase-based relative UHF-RFID tag localization with COTS devices[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 8613-8627.
- [46] LI C L, TANGHE E, SUANET P, et al. ReLoc 2.0: UHF-RFID relative localization for drone-based inventory management[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 8003313.
- [47] LIU Z, FU Z, LI T Y, et al. A phase and RSSI-based method for indoor localization using passive RFID system with mobile

platform[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2022, 6: 544-551.

- [48] ZHAO K, ZHU M H, XIAO B, et al. Joint RFID and UWB technologies in intelligent warehousing management system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(12): 11640-11655.

- [49] JONES R D, DIENER J E, CHEN Y, et al. Underground localization system using a combination of RFID and IMU technologies[C]//Proceedings of the 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-4.

- [50] TZITZIS A, FILOTHEOU A, SIACHALOU S, et al. Real-time 3D localization of RFID-tagged products by ground robots and drones with commercial off-the-shelf RFID equipment: challenges and solutions[C]//Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on RFID (RFID). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-8.

- [51] WANG Z Q, XU M, YE N, et al. Computer vision-assisted 3D object localization via COTS RFID devices and a monocular camera[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(3): 893-908.

[作者简介]



钱泓宇 (1996-), 男, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, 主要研究方向为无源物联网、无线感知等。



李源 (1990-), 女, 中国移动通信有限公司研究院工程师, 主要研究方向为无源物联网、车联网、物联网体系架构、无线通信技术等。



王晴 (1994-), 女, 中国移动通信有限公司研究院工程师, 主要研究方向为 RFID 定位。



王亚敏 (1979-), 女, 博士, 中国移动通信有限公司研究院副教授, 主要研究方向为物联网、复杂系统调度优化、无源物联网、多目标优化等。



肖善鹏 (1976-), 男, 中国移动通信有限公司研究院物联网技术与应用研究所所长、高级工程师, 主要研究方向为物联网新技术和产业数字化等。