

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.05.021

一种适于无源 LANDMARC 算法的定位性能评价方法

史伟光, 韩晓迪, 李建雄, 于 洋, 杜凯旋, 宋战伟

(天津工业大学 电子与信息工程学院, 300387 天津)

摘 要: 针对现有基于无源 LANDMARC 算法的改进研究主要以提高定位精度为目标, 并没有考虑无源半双工通信机制引起的标签读取耗时较长的问题, 引入路径损耗公式推导出基于辐射半径的功率能级映射模型. 通过分析阅读器最大功率能级、参考标签布设密度对定位精度及系统耗时的影响, 结合多目标优化的联合控制机制, 提出一种适用于无源 LANDMARC 算法的定位性能评价方法. 多种环境下的仿真结果表明, 所提评价方法具有良好的稳定性和实用性, 对于无源 RFID 定位系统的参数选择及性能评定具有一定的实际意义.

关键词: 射频识别技术; 室内定位; LANDMARC 算法; 最大功率发射能级; 定位性能评价方法

中图分类号: TN925.93 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)05-0127-07

A performance evaluation mechanism suitable for passive LANDMARC algorithm

SHI Weiguang, HAN Xiaodi, LI Jianxiong, YU Yang, DU Kaixuan, SONG Zhanwei

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, 300387 Tianjin, China)

Abstract: Considering most advanced LANDMARC algorithms based on passive RFID mainly aimed at enhancing the accuracy of the localization but neglecting the long time consumed in reading tags because of the by half-duplex mechanism, we leverage the distance loss formula and put forward power level model based on the radiation radius. After analyzing the influences of the maximum power grades of the RF reader and the arrangement density of the reference tags, an evaluation method of localization is proposed for the passive LANDMARC algorithm. Simulation results in a wide range of environments showed that the proposed method has the good stability and practicability. The method also makes sense of system evaluation and parameter selection for the passive RFID Localization Algorithms.

Keywords: radio frequency identification; indoor location; LANDMARC algorithm; maximum emission level; evaluation method of location performance

射频识别 RFID(radio frequency identification)技术是 20 世纪 90 年代开始兴起的一种自动识别技术, 通过近场耦合或远场耦合方式可以实现阅读器与标签之间的非接触双向数据通信. 相比于传统的条码识别技术, RFID 技术无需人工干预即可完成信息的输入和处理, 且具有更大的存储容量, 因此广泛应用于运输、医疗、防伪、跟踪、设备和资产管理等领域^[1-2].

目前, 无线室内定位是 RFID 技术的一个重要应用领域, 现有基于 RFID 的室内定位研究主要围绕 LANDMARC 系统开展^[3-6]. LANDMARC 系统的核心思想是通过引入位置固定的有源参考标签动态捕捉环境信息, 计算定位标签和参考标签在多个阅

读者上的场强欧式距离, 依据经验残差算法对近邻参考标签的位置加权, 进而完成定位标签的位置估计. 典型的 LANDMARC 定位系统采用 RF Code 公司的 Spider 射频模块搭建, 由阅读器和有源标签两部分组成, 工作频率为 308 MHz. 其中, 阅读器具备 8 个可测功率能级, 功率能级 1 对应最小的识别范围, 功率能级 8 对应最大的识别范围, 阅读器通过检测接收到的有源标签的信号强度, 完成对定位标签的信息读取等操作.

近年来, 得益于无源超高频 RFID 技术的迅速发展, 为进一步降低系统成本、降低标签的体积以增强系统的适用性, 越来越多的研究人员搭建了基于 915 MHz 的无源 LANDMARC 定位系统, 并提出了相应的改进措施. 文献[7]提出一种收信场强矫正机制以剔除无用的参考标签. 文献[8]采用 Intel 公司

收稿日期: 2015-05-30.

基金项目: 国家自然科学基金(61372011).

作者简介: 史伟光(1985—), 男, 博士, 讲师.

通信作者: 史伟光, shiweiguang12345@126.com.

的 R1000 开发平台分析算法性能,因此定位精度较高.文献[9]充分发挥 R1000 平台的多路射频端口和二次开发优势,采用多天线复用串行工作方式替代多阅读器并行工作方式进一步降低了系统成本,并提出了动态 k 值设定机制和误差校正机制.

现有基于 UHF RFID 的无源 LANDMARC 定位相关研究主要以提高定位精度为目标,而对定位系统的工作效率分析较少,因此系统性能的评价方式也较为简单,实际指导意义略差.针对上述问题,本文结合路径损耗模型,依据阅读器最大功率能级、参考标签布设密度对无源 LANDMARC 算法的定位精度及定位效率进行量化分析,提出一种适用于无源 LANDMARC 定位系统的定位性能评价方法.

1 无源 LANDMARC 算法的定位原理

现有射频阅读器并不能提供标签的连续、准确的收信场强值,只能依据离散的功率能级提供环境场强信息.在无源定位初始阶段,阅读器将发射功率调至最大,即以最大功率能级工作,当标签收到阅读器的连续波请求信号后,激活自身电路,并回发应答信号.阅读器收到应答信号后,逐级降低功率能级,当不能再继续收到标签应答信号时,则认定当前功率能级为标签的收信场强指示.假设定位环境中共有 U 个阅读器,依据 LANDMARC 算法原理,对于第 l 次定位过程,第 i 个定位标签的位置可以估计为

$$(x_i^{l'}, y_i^{l'}) = \sum_{j=1}^k w_j (x_j^l, y_j^l), \tag{1}$$

$$w_j = \frac{(E_{LT}^j)^{-2}}{\sum_{j=1}^k (E_{LT}^j)^{-2}}, \tag{2}$$

$$E_{LT}^j = \sqrt{\sum_{u=1}^U (G_{pl}^{ui} - G_{pT}^{uj})^2}. \tag{3}$$

式中参数意义如表 1 所示.

表 1 无源 LANDAMRAC 算法参数设置

属性	变量名称	变量含义
第 i 个 定位标签	$(x_i^{l'}, y_i^{l'})$	估计位置
	G_{pl}^{ui}	在第 u 个阅读器上的功率能级
第 j 个 参考标签	w_j	经验权重
	(x_j^l, y_j^l)	实际位置
	G_{pT}^{uj}	在第 u 个阅读器上的功率能级
关联关系	E_{LT}^j	在第 u 个阅读器的场强距离

2 无源 LANDMARC 算法的定位性能评价

2.1 基于辐射半径的功率能级映射模型

为研究无源 UHF RFID 定位系统中功率能级对系统定位性能的影响,依据文献[10]中的式(11),

首先建立基于辐射半径的阅读器功率能级映射模型,可以得到

$$P_r = P_t \cdot \frac{\lambda^2 R_0^{(\varepsilon-2)}}{16\pi^2 R^\varepsilon} \cdot G_r \cdot G_t, \tag{4}$$

式中: P_r 表示无源标签接收到的信号功率; P_t 表示阅读器的发射功率; R 表示 P_t 对应的读写区域辐射半径; R_0 表示参考距离; G_r 、 G_t 分别表示阅读器和标签的天线增益; ε 表示路径损耗指数,表 2 列出了典型室内环境下 ε 的参考值.

表 2 室内常见情况下路径损耗指数 ε 参考值

环境	ε
仓库	1.8~2.2
工厂	1.6~3.3
家庭	3
自由空间	2
Two-ray 模型	4

对式(4)两边取对数运算,可得

$$P_r = P_t - 10\lg(\frac{16\pi^2 R^\varepsilon}{\lambda^2 R_0^{(\varepsilon-2)}}) + G_r + G_t, \tag{5}$$

对式(5)展开有

$$P_r = P_t - 20\lg\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) - 10\varepsilon\lg(R) + 10(\varepsilon - 2)\lg(R_0) + G_r + G_t. \tag{6}$$

设定阅读器最大发射功率为 $P_t^{\max}$, 最大功率能级、最小功率能级分别为 1 、 $G^{\max}$, 定义相邻功率能级的功率步长为 I_p , 单位 dBm. 显然,当功率能级为 i 时,阅读器的发射功率可以表示为

$$P_t^i = P_t^{\max} - (G^{\max} - i) * I_p, \tag{7}$$

其中 $i \in [1, G^{\max}]$. 结合式(6)、式(7),可得功率能级为 i 时的无源标签理想收信功率为

$$P_r^i = P_t^{\max} - (G^{\max} - i) * I_p - 20\lg\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) - 10\varepsilon\lg(R^i) + 10(\varepsilon - 2)\lg(R_0) + G_r + G_t. \tag{8}$$

针对室内环境中由人为扰动和障碍物阻挡引起的幅度衰落,使得无源标签收信功率降低进而造成的漏读现象,本文引入服从正态分布、期望为 0、标准差为 σ 的高斯白噪声 X_σ 对式(5)中的无源标签收信功率进行修正,从而有

$$P_r' = P_r - |X_\sigma|, \tag{9}$$

其中 P_r' 为无源标签的实际收信功率. 结合式(8)、(9),可得到功率能级为 i 时的无源标签实际收信功率为

$$P_r' = P_t^{\max} - (G^{\max} - i) * I_p - 20\lg\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) - 10\varepsilon\lg(R^i) + 10(\varepsilon - 2)\lg(R_0) + G_r + G_t - |X_\sigma|.$$

依据文献[11]中的式(4),设定标签激活门限

值 P_r^{th} , 则若满足 $P_r^{i'} \geq P_r^{\text{th}}$, 读写区域内的无源标签即可激活, 从而可得当前功率能级条件下的读写区域辐射半径为

$$R^i \leq e^{\frac{P_t^{\text{max}} - P_r^{\text{th}} - (G^{\text{max}} - i) \cdot I_p - 20\lg(\frac{4\pi}{\lambda}) + 10(\varepsilon - 2) \lg(R_0) + G_r + G_t - |X_\sigma|}{10\varepsilon}}.$$

为便于分析说明, 本文以自由空间为例, 由表 2 令 $\varepsilon = 2$, 则有

$$R^i \leq \frac{\lambda}{4\pi} e^{\frac{P_t^{\text{max}} - P_r^{\text{th}} - (G^{\text{max}} - i) \cdot I_p + G_r + G_t - |X_\sigma|}{20}}.$$

2.2 无源 LANDMARC 算法的定位精度评价

以系统完成 L 次定位服务的估计误差均值 AE_{tol} 为指标, 来评价定位算法的性能. AE_{tol} 越小, 即定位精度越高. 显然有

$$e_{\text{tol}}^l = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C \sqrt{(x_i^{l'} - x_i^l)^2 + (y_i^{l'} - y_i^l)^2},$$
$$\text{AE}_{\text{tol}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L e_{\text{tol}}^l.$$

式中: C 为定位环境中的标签个数, (x_i^l, y_i^l) 为第 i 个标签的实际位置, e_{tol}^l 为第 l 次定位服务的估计误差.

2.3 无源 LANDMARC 算法的定位效率评价

以系统对 C 个定位标签完成 L 次定位服务的系统耗时均值 T_{tol} 为指标, 来评价无源 LANDAMRC 系统的定位效率. T_{tol} 越小, 定位速度越快, 则单位时间内完成定位功能的标签数量越多, 即定位效率越高.

显然有

$$T_{\text{tol}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L T_{\text{tol}}^l,$$

其中 T_{tol}^l 为第 l 次定位服务的系统耗时, 为便于仿真分析, 选取 $C = 50$.

设定如表 3 所示的定位环境, 假设各阅读器调至最大功率能级时, 环境中的全部标签均能被读取到. 下面以第 u 个阅读器为例, 结合定位服务实施过程, 分析影响 T_{tol}^u 的因素.

表 3 定位环境参数设置

变量名称	变量含义
U	阅读器个数
B	参考标签个数
C	定位标签个数
t_z	相邻功率能级切换时间
t_c	单个标签定位耗时

步骤 1 阅读器首先工作于最大功率能级, 读到的参考标签数目为 $B_0^u = B$, 读到的定位标签数目为 $C_0^u = C$, 未读到的定位标签数目为 $c_0^u = C - C_0^u = 0$. 此时读取全部标签耗时可表示为 $T_m^0 = J(B_0^u, C_0^u, \delta)$, 其中, J 为时隙 ALOHA 防碰撞算法的耗时函数, δ

为时隙个数.

典型的时隙 ALOHA 算法在纯 ALOHA 算法基础上将时间分成多个离散时隙, 标签在响应过程中选择不同的时隙向阅读器发送数据, 当单个时隙中仅有一个标签发送数据时, 则该标签被阅读器成功识别. 各时隙存在碰撞、空闲、成功 3 种可能状态, 分别代表该时隙内有多个标签响应、无标签响应、唯一标签响应.

结合当前阅读器状态, 假设系统经历 Q 次轮询识别 $B_0^u + C_0^u$ 个标签, 各轮识别的标签数目分别为 $A_q, q = 1, 2, \dots, Q$, 显然有 $\sum_{q=1}^Q A_q = B_0^u + C_0^u$ 和 $A_q \leq \delta$.

不同于有源 RFID 系统可以采用标签先发言的单工通信机制, 无源 UHF RFID 通信必须采用基于阅读器先发言的半双工通信机制, 阅读器读取全部标签的耗时主要受阅读器请求时间 t_E 和时隙响应时间 t_D 影响^[12]. 则对于耗时函数有

$$J(B_0^u, C_0^u, \delta) = \sum_{q=1}^Q (t_E + \delta t_D).$$

需指出, 本文选取动态帧时隙 DFSA (dynamic frame slotted ALOHA) 以进一步降低标签读取过程中的不必要耗时^[13]. DFSA 算法在时隙 ALOHA 算法上对时间进一步离散, 将多个时隙打包成一个帧, 并依据各轮时隙碰撞数目动态调节帧长度. 假设初始帧长度为 δ_1 , 首轮标签识别过程结束后, 分别统计帧中的空闲时隙数目 $\delta_1(\xi, 1)$ 、碰撞时隙数目 $\delta_1(v, 1)$ 和成功时隙数目 $\delta_1(\psi, 1)$, 依据文献[13]的公式(4)调整得到第二轮的最佳帧长度为 $\delta_2 = 2.39 \cdot \delta_1(v, 1)$, 依次类推动态更新各轮帧长直至全部标签均被读到, 则对于 DFSA 算法的耗时函数有 $J = \sum_{q=1}^Q (t_E + \delta_i t_D)$.

步骤 2 阅读器降低一个功率能级, 读到的参考标签数目为 B_1^u , 读到的定位标签数目为 C_1^u , 未读到的定位标签数目为 $c_1^u = C - C_1^u$, 新增未读到的定位标签数目为 $\beta_1^u = c_1^u - c_0^u$, 则认定当前功率能级为该 β_1^u 个定位标签为收信场强. 假设此时读取标签平均耗时为 $T_m^1 = J(B_1^u, C_1^u, \delta)$.

步骤 3 逐级降低功率能级, 假设当降低了 h_u 个能级后, 读到的参考标签数目为 B_h^u , 读到的定位标签的数目是 $C_h^u = 0$, 未读到的定位标签数目为 $c_h^u = C$, 新增未读到的定位标签数目为 $\beta_h^u = c_h^u - c_{h-1}^u$. 此时读取标签平均耗时为 $T_m^u = J(B_h^u, 0, \delta)$. 考虑到不再有定位标签被读到, 阅读器停止发射功率信号, 切换至休眠模式, 结束定位操作, 等待上位机系统的下一轮启动指令.

在上述调整功率过程中, 第 u 个阅读器的读取

标签耗时可以记为 T_{ru} , 且有

$$T_{ru} = \sum_{i=0}^{h_u} J(B_i^u, C_i^u, \delta).$$

相应地,第 u 个阅读器的功率能级切换耗时可以记为 T_{zu} , 且有

$$T_{zu} = h_u \cdot t_z.$$

步骤 4 上位机系统依据各阅读器关于参考标签和定位标签的功率能级信息,依据式(1)~(3)得定位标签的估计位置.

综上,无源 RFID 定位系统完成一次定位服务的耗时可以描述为

$$T_{\text{tol}}^l = T_c + T_z + T_r.$$

式中: T_c 为系统对 C 个定位标签执行 LANDMARC 算法运算的耗时, T_z 为系统中全部阅读器功率能级调整的综合耗时, T_r 为系统中全部阅读器读取标签的综合耗时.

对于 T_c , 显然有

$$T_c = C \cdot t_c.$$

以典型多阅读器并行工作和文献[9]中的多天线复用串行工作两种方式为例,分析 T_{tol}^l 的表达方法.

若系统采用并行方式工作,则有

$$\begin{aligned} T_r &= \max_{u \in [1, U]} T_{ru} = \max_{u \in [1, U]} \left(\sum_{i=0}^{h_u} J(B_i^u, C_i^u, \delta) \right), \\ T_z &= \max_{u \in [1, U]} T_{zu} = t_z \max_{u \in [1, U]} (h_u). \end{aligned} \quad (10)$$

从而系统耗时 T_{tol}^l 可以表示为

$$\begin{aligned} T_{\text{tol}}^l &= C \cdot t_c + \max_{u \in [1, U]} \left(\sum_{i=0}^{h_u} J(B_i^u, C_i^u, \delta) \right) + \\ &\quad t_z \max_{u \in [1, U]} (h_u). \end{aligned} \quad (11)$$

若系统采用串行方式工作,则有

$$\begin{aligned} T_r &= \sum_{u=1}^U T_{ru} = \sum_{u=1}^U \sum_{i=0}^{h_u} J(B_i^u, C_i^u, \delta), \\ T_z &= \sum_{u=1}^U T_{zu} = t_z \sum_{u=1}^U h_u. \end{aligned} \quad (12)$$

从而系统耗时 T_{tol}^l 可以表示为

$$T_{\text{tol}}^l = C \cdot t_c + \sum_{u=1}^U \sum_{i=0}^{h_u} J(B_i^u, C_i^u, \delta) + t_z \sum_{u=1}^U h_u. \quad (13)$$

由式(11)、式(13)可知,在定位标签数目一定的前提下,阅读器的最大功率能级和参考标签布设密度将直接影响系统耗时,采用复用串行方式尽管能够降低系统成本,但却以更大的系统耗时为代价.

2.4 基于联合控制机制的品质函数构建

结合文献[14]中的全局优化目标函数的构建方法,本文采用联合控制机制,以估计误差均值最小化、系统耗时均值最小化为目标,构建适于评价无源 LANDMARC 算法的定位性能品质函数为

$$M(G_p^{\max}, \rho) = k_1 \cdot \text{AE}_{\text{tol}} + k_2 \cdot T_{\text{tol}}, \quad (14)$$

其中 k_1, k_2 为权重系数. 因此基于无源 LANDMARC 算法的定位性能评价可以描述为:联合比较多组 $G_p^{\max}$ 和 ρ 的配置方式,并从中选取一组从而使得品质函数达到最小.

需指出,权重系数的选取至关重要,并决定估计误差和系统耗时在定位性能品质函数中的比重. 本文分别引入 CWA (conventional weight aggregation 典型权重聚焦) 算法和 DWA (dynamic weight aggregation 动态权重聚焦) 算法实现权重系数的优化选取.

2.5 基于 CWA/DWA 算法的权重系数选取

CWA 算法的核心思想是依据寻优先验信息,建立权重系数与先验信息的关系等式,从而选取合适的权重系数^[15]. 首先选取 CWA 算法,结合定位需求先验信息,引入可接受估计误差均值的极限值 $\text{AE}_{\text{tol}}^{\text{lim}}$ 、可接受系统耗时均值的极限值 $T_{\text{tol}}^{\text{lim}}$, 令 k_1, k_2 满足

$$k_1 \cdot \text{AE}_{\text{tol}}^{\text{lim}} = k_2 \cdot T_{\text{tol}}^{\text{lim}}. \quad (15)$$

假设 $\text{AE}_{\text{tol}}^{\text{lim}} = 0.45 \text{ m}$, $T_{\text{tol}}^{\text{lim}} = 45 \text{ s}$, 若 $k_1 = 1$, 则 $k_2 = 0.01$.

然后选取 DWA 算法对式(15)中的权重系数的关系进行性能评价. DWA 算法的核心思想是通过优化过程中目标函数的权重系数的周期性变化以得出帕雷托边界曲线. 需指出,帕雷托边界曲线是 DWA 算法中判断权重系数是否为最优值的重要标准. 帕雷托边界是指在某种既定的资源配置状态下,任何改变都不可能使当前的状况变好或变坏. 满足帕雷托最优状态标准的资源配置可以被认为是最优配置方法.

依据 DWA 算法寻优机理,令权重系数按式(16)、(17)周期变化,以获得基于帕雷托边界的多种权重系数配置方式^[16]:

$$k_1(f) = |\sin(2\pi f/F)|, \quad (16)$$

$$k_2(f) = 1.0 - k_1(f). \quad (17)$$

其中 F 表示权重系数变化的频率, f 表示权重系数的寻优尺度. 令 $F = 200, f = 0, 1, 2, \dots, 200$, 则可得到如图 1 所示的 f/F 和 $k_1(f)/k_2(f)$ 的关系. 结合图 1 中呈现的周期性和对称性,为提高仿真运行效率,在本文仿真分析中限定 f 的最大值为 $F/4$.

若依据式(15)得出的 k_1, k_2 在帕雷托边界曲线上,且基于当前 k_1, k_2 得到的最小 M 满足 $\text{AE}_{\text{tol}} \leq \text{AE}_{\text{tol}}^{\text{lim}}$ 和 $T_{\text{tol}} \leq T_{\text{tol}}^{\text{lim}}$, 则可认定 CWA 算法选取的 k_1, k_2 有效. 否则,在帕雷托边界曲线上重新选取同时满足 $\text{AE}_{\text{tol}} \leq \text{AE}_{\text{tol}}^{\text{lim}}$ 和 $T_{\text{tol}} \leq T_{\text{tol}}^{\text{lim}}$ 的一组 k_1, k_2 进而得到定位性能品质函数的具体表达形式.

最后,将多组 $G_p^{\max}$ 和 ρ 的配置方式带入到式(14)中,则品质函数取值最小的一组 $G_p^{\max}$ 和 ρ 具有

最佳的定位性能.

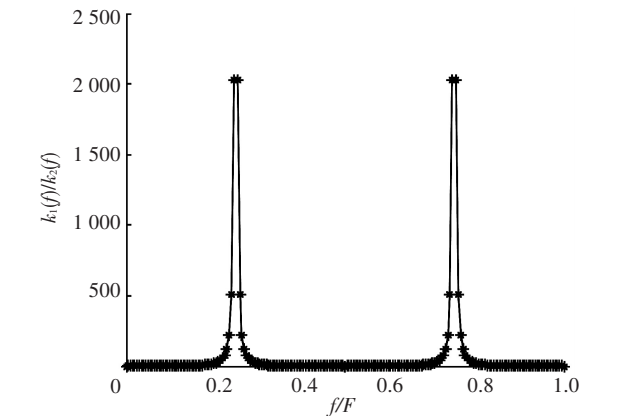


图 1 DWA 算法中 f/F 和 $k_1(f)/k_2(f)$ 的关系

3 仿真分析

为分析所提方法在多种噪声环境中的适应能力,令 σ 分别取值 0.3、1.1、1.5、1.8、2、4、6. 在室内环境中部署 4 个工作频率为 915 MHz 的阅读器, $G_p^{\max}$ 分别取值 8、16、32、64、128, 对应的 I_p 分别取值 4、2、1、0.5dB. 参考标签以 $\rho \times \rho$ 方式均匀布设, $\rho \in [4, 5, \dots, 15]$, 标签和阅读器采用 ISO18000-6C 协议通信, 依据动态帧时隙 ALOHA 算法实现标签防碰撞读取, 令 $t_E = 52 \text{ ms}$, $t_D = 4.9 \text{ ms}$, $t_z = 50 \text{ ms}$, $t_c = 10 \text{ ms}$, $F = 200$, $f = 1, 1.25, \dots, 49.75, 50$, 随机放置 50 个定位标签并进行 300 次蒙特卡罗实验验证上述定位性能评价方法, 相关仿真参数见表 4.

表 4 仿真参数设置

监测区域/ m	噪声标准差	DFSA 初始帧长	阅读器位置/m	发射功率/ W	$AE_{tol}^{\lim} -$ 并行方式/m	$AE^{\lim_{tol}} -$ 串行方式/m	$T_{tol}^{\lim} -$ 并行方式/s	$T_{tol}^{\lim} -$ 串行方式/s
$[1, 11] \times [1, 11]$	0.3、1.1、1.5、 1.8、2、4、6	64	(2, 2)、(10, 2)、 (2, 10)、(10, 10)	4	0.70	0.80	40	80

3.1 权重系数选取分析

结合表 3 中参数, 首先选取 CWA 算法确定权重系数. 对于并行工作方式和串行工作方式, 分别有 $k_1/k_2 = 40/0.7 = 57.14$ 和 $k_1/k_2 = 80/0.8 = 100$. 图 2 反映了在多种噪声环境下两种工作方式的权重系数配置方式及帕雷托边界. 观察可见, 在噪声较小的环境中, 即 $0.3 \leq \sigma \leq 2$, 对于两种工作方式, 由 CWA 算法推荐的权重配置均有 $AE_{tol} < AE_{tol}^{\lim}$ 和 $T_{tol} < T_{tol}^{\lim}$, 且推荐的权重配置处于 DWA 算法的帕雷托边界上, 因此 CWA 算法选取的 k_1 、 k_2 有效. 而当 $\sigma \geq 4$

时, 人为扰动及障碍物阻隔对电波传播的影响已经较为明显, 定位精度严重下降, 帕雷托边界上任意一点均难以同时满足 $AE_{tol} < AE_{tol}^{\lim}$ 和 $T_{tol} < T_{tol}^{\lim}$, 因此应重新设置系统的 $AE_{tol}^{\lim}$ 、 $T_{tol}^{\lim}$, 结合式 (15) 更新 CWA 算法的推荐权重配置.

3.2 基于品质函数的性能评价

依据图 2 结论, 选取 $0.3 \leq \sigma \leq 2$ 的室内环境进行分析, 得到两种工作方式的品质函数表达式为

$$M_{\text{并}} = 0.982\,8 \cdot AE_{tol} + 0.017\,2 \cdot T_{tol}, \quad (18)$$

$$M_{\text{串}} = 0.990\,1 \cdot AE_{tol} + 0.009\,9 \cdot T_{tol}. \quad (19)$$

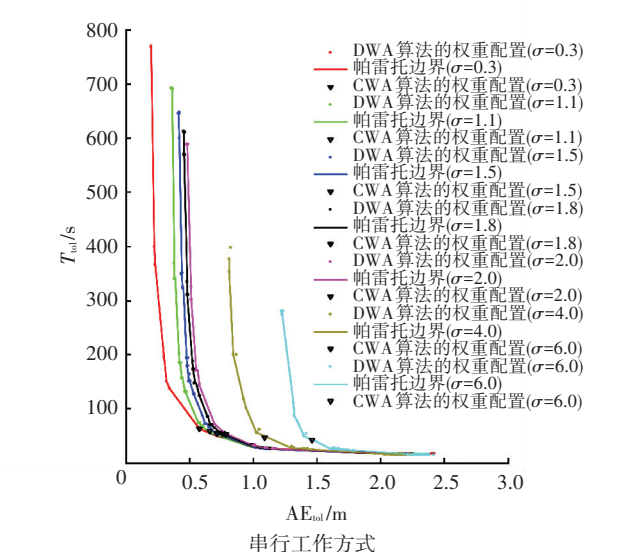
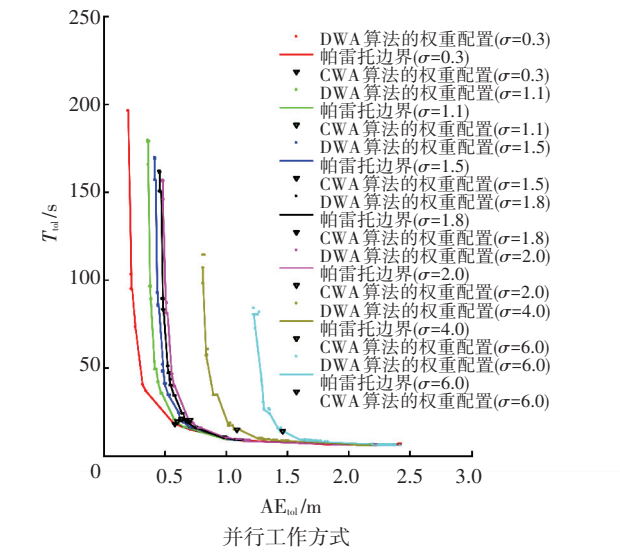


图 2 权重系数配置及帕雷托边界

表 5 反映了基于式 (18)、式 (19) 得到的多噪声环境下的最优资源配置方式及系统性能. 分析可知,

对于并行工作方式, 随着环境噪声的逐渐增大, 最优参考标签排列方式由 8×8 提高为 9×9 以缓解收信功

率失真对定位精度的影响,并在 $\sigma \in [0.3, 2]$ 区间内稳定在 10×10 均匀排列. 尽管在上述渐变过程中,参考标签数量由 64 增大至 100 会增加系统耗时,但最优 $G^{\max}$ 始终稳定在 16,将 T_{tol} 始终控制在 $[18.15, 20.61]$ 范围内,并满足 40 s 的上限要求. 对于串行工作方式,随着环境噪声逐渐增大,最优 $G^{\max}$ 仍稳定在 16,而最优参考标签排列方式由 8×8 降低为 7×7 ,上述变化趋势与并行工作方式显然相同. 对比式(10)和式(12)可知,串行工作方式中的阅读器采用时分复用方式调用系统射频通信资源,叠加效应使得系统耗时随参考标签布设密度的提升而急剧加大. 以 $\sigma = 1.5$ 为例,当 $\rho = 10$ 、 $G^{\max} = 16$ 时,并行工作方式下达到最优性能且 $T_{\text{tol}} = 19.25$ s,若串行工作方式也采用上述资源配置方式,其系统耗时将逼近 80 s 的上限要

求,而若采用参考标签 7×7 方式排列,其系统耗时将控制在 55 s,远低于 80 s 的上限要求.

图 3 反映了多种噪声环境下两种工作模式下的估计误差和系统耗时均值的累计分布函数 CDF (cumulative distribution function) 曲线性能. 在多种噪声环境下,两种工作模式的 CDF 曲线平滑,反映出本文建立的定位精度评价模型和定位效率评价模型具有良好的稳定性和适应性. 以 $\sigma = 1.1$ 为例,对于并行工作方式,估计误差的最小值为 0.382 6 m,以 92.33% 的概率低于 0.7 m,系统耗时的最小值为 15.9340 s,以 100% 的概率低于 40 s;对于串行工作方式,估计误差的最小值为 0.4316 m,以 94% 的概率低于 0.8 m,系统耗时的最小值为 45.12 s,以 100% 的概率低于 80 s.

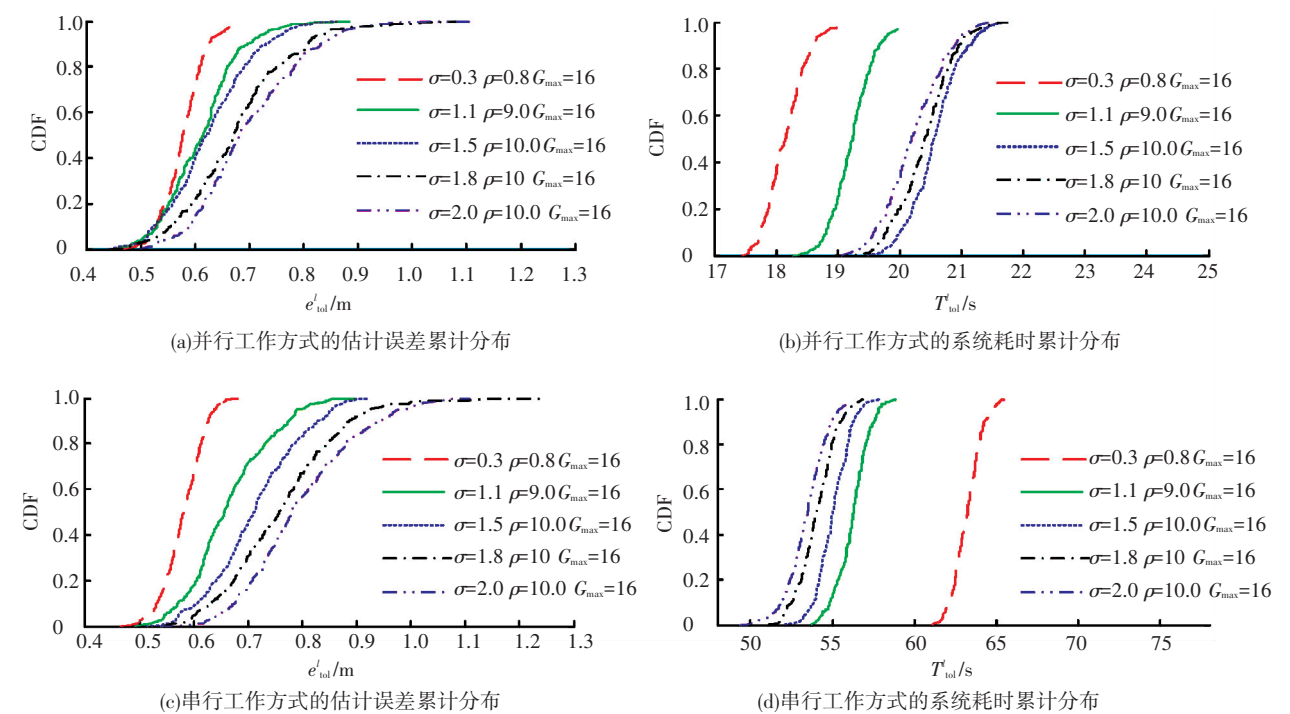


图 3 两种工作模式下的估计误差和系统耗时的累计分布函数

表 5 多噪声环境下的最优资源配置方式及系统性能

并行工作方式						串行工作方式					
σ	ρ	$G^{\max}$	AE_{tol}	T_{tol}	M	σ	ρ	$G^{\max}$	AE_{tol}	T_{tol}	M
0.3	8	16	0.58	18.15	0.88	0.3	8	16	0.58	63.23	1.20
1.1	9	16	0.60	19.25	0.92	1.1	7	16	0.66	58.19	1.21
1.5	10	16	0.63	20.61	0.98	1.5	7	16	0.72	55.00	1.26
1.8	10	16	0.67	20.35	1.01	1.8	7	16	0.76	54.01	1.29
2	10	16	0.70	20.18	1.04	2.0	7	16	0.78	53.51	1.31

同时,由图 3(a)可知,对于并行工作方式,在相同资源配置条件下如 $\rho = 10$ 、 $G^{\max} = 16$,当 σ 由 1.5 增大到 2 时,估计误差的累计分布曲线向右平移. 且由图 3(c)可得到关于串行工作方式的相似结论. 由图 3

(b)可知,对于并行工作方式,在相同资源配置条件下如 $\rho = 10$ 、 $G^{\max} = 16$,随着 σ 由 1.5 增大到 2,系统耗时的累计分布曲线缓慢左移. 其原因是:基于本文仿真设置中的关于阅读器和标签增益等相关参数,在发

射功率为 4 W 时,阅读器的理想辐射半径可达 15.049 4 m,远大于仿真环境中阅读器到监测区域边界的最大距离 $d = \sqrt{((11-2))^2 + (11-2)^2} = 12.729\ 2\text{ m}$,因此在理想情况下,阅读器从最大功率能级开始发送广播信号,至逐步降低功率能级以获得第一批无源标签收信能级信息的过程中,势必存在不必要的能级切换.而在人为扰动和障碍物阻挡的作用下,环境噪声引起的幅度衰落使得即便阅读器的实际最大辐射半径低于 15.049 4 m,从而降低了上述不必要的能级切换时间,且随着噪声增大,系统耗时呈缓慢递减趋势.且由图 3(d)可得到关于并工作方式的相似结论.

综上,并行工作模式以提高系统成本的方式降低系统耗时,而串行工作模式以时分复用方式提高资源的利用率,降低系统成本要求,但系统耗时急剧增加,且在环境噪声较大的环境中,系统不得不降低参考标签布设密度以牺牲定位精度来换取系统耗时,从而保证全局定位性能的最优,显然这一结论与实际应用情况吻合.

4 结 语

针对现有基于无源 LANDMARC 算法的改进研究主要采用定位误差评价系统性能,而没有考虑无源半双工机制引起的系统效率较低的问题,本文结合路径损耗模型,通过分析阅读器最大功率能级、参考标签布设密度对定位精度及定位实时性的影响,构建系统耗时模型,并以估计误差均值的最小化、系统耗时均值的最小化为目标,引入基于联合控制机制构建的品质函数,同时采用 CWA 算法和 DWA 算法选取权重系数,提出了一种适用于无源 LANDMARC 算法的定位性能评价方法.多种噪声环境中的仿真结果表明,所提评价方法对于无源 RFID 定位系统的参数选择及性能评定,具有一定的指导意义.

参考文献

[1] ZHOU J, SHI J. RFID localization algorithms and applications—a review [J]. Journal of International Manufacturing, 2008, 20(6):695–707.

[2] SANPECHUDA T, KOVAVISARUCH L. A review of RFID localization: applications and techniques [C]//Proceeding of the 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Krabi: IEEE, 2008:769–772.

[3] NI L M, LIU Y, LAU Y C, et al. LANDMARC: indoor location sensing using active RFID[J]. Wireless Networks,

2004, 10(6):701–710.

[4] ZHAO Yiyang, LIU Yunhao. VIRE: Active RFID-based localization using virtual reference elimination [C]//Proceeding of International Conference on Parallel Processing. Xi'an: IEEE, 2007:56.

[5] 史伟光,刘开华,于洁潇,等.基于加权欧式算子的射频识别定位算法[J].计算机工程, 2011, 37(9): 22–24, 28.

[6] HAN K, CHO S H. Advanced LANDMARC with adaptive k-nearest algorithm for RFID location system [C]//Proceeding of the 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content. Beijing: IEEE, 2010: 595–598.

[7] CHOI J S, LEE H, ELMASRI R, et al. Localization systems using passive UHF RFID [C]//Proceeding of 5th International Joint Conference on INC, IMS, and IDC. Seoul: IEEE, 2009:1727–1732.

[8] KHAN M A, ANTIWAL V K. Location estimation technique using extended 3-D LANDMARC algorithm for passive RFID tag [C]//Proceeding of International Advance Computing Conference. Patiala: IEEE, 2009: 249–253.

[9] 王远哲,毛陆虹,刘辉,等.基于参考标签的射频识别算法研究与应用[J].通信学报, 2010, 31(2): 86–92.

[10] 任智,李晴阳,陈前斌.无线网络衰落和损耗的建模与仿真研究[J].系统工程与电子技术, 2009, 31(12): 2813–2819.

[11] 佐磊,何怡刚,李兵,等.无源超高频射频识别系统路径损耗研究[J].物理学报, 2013, 62(14): 150–157.

[12] CHEN W. A feasible and easy-to-implement anticollision algorithm for the EPCglobal UHF class-1 generation-2 RFID protocol [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(2):485–491.

[13] SCHOUTEF C. Dynamic frame length ALOHA [J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31(4):565–568.

[14] MANMUEL L, JAVIER O R, ANTONIO R J, et al. Diversified local research for the optimal layout of beacons in an indoor positioning system [J]. IIE Transactions, 2009, 41(3):247–259.

[15] FLEMING P J. Computer aided control systems using a multi objective optimization approach [C]//Proceeding of IEEE Control '85 Conference. Cambridge: IEEE, 1985: 174–179.

[16] JIN Y, OLHOFFER M, SENDHO B. Dynamic weighted aggregation for evolutionary multi-objective optimization: why does It work and how? [C]//Proceeding of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. San Francisco: ACM, 2001:1042–1049.

(编辑 王小唯 苗秀芝)