

文章编号: 2095-4980(2019)06-1006-06

基于 Stackelberg 博弈的无线定位网络功率分配方案

林锦锐, 李广侠, 田世伟

(陆军工程大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 针对采用超宽带(UWB)信号进行测距定位的无线协同定位网络, 建立目标节点信号发射功率与网络均方位位置误差下界的函数关系模型。在目标节点发射总功率受限的情况下, 基于 Stackelberg 模型, 结合粒子群算法, 对目标节点的发射功率进行优化分配。仿真表明, 提出的功率优化分配方案相比功率平均分配方案, 使网络均方位位置误差下限降低了 3%, 实现网络定位精确度的提高。

关键词: 超宽带信号; 无线协同定位网络; 均方位位置误差下限; Stackelberg 模型; 功率优化分配

中图分类号: TN915.07

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.1006

Power allocation based on Stackelberg game in wireless location network

LIN Jinrui, LI Guangxia, TIAN Shiwei

(College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract: For the wireless cooperative location network using Ultra-Wideband(UWB) signal, a function model of the square position error bound of the network and the transmitting power of the agents is explored. Under the condition that the total power of the agent is limited, based on the Stackelberg model and the particle swarm optimization algorithm, the transmit power of the agent is optimally allocated. The simulation shows that the power optimization allocation proposed in this paper is more efficient than the power equal allocation. The square position error bound is reduced by 3%, which improves the positioning accuracy.

Keywords: UWB signal; wireless cooperative location network; square position error bound; Stackelberg game; optimal power allocation

超宽带(UWB)技术由于其自身的一些天然特性如测距精确度高、多径分辨力高等优势, 正越来越多地被应用到无线定位网络中。超宽带技术通过发送纳秒级及其以下的超窄脉冲来传输数据, 可以获得 GHz 级的数据带宽。因为其高带宽, 理论上基于到达时间(Time Of Arrival, TOA)或到达时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)方法可以实现厘米级的定位^[1]。近年来, 大量文献对超宽带定位技术的发展历程、实现原理以及研究前景进行综述^[2-3]。基于 TOA 的算法在部分文献中被详细介绍和分析, 并对 UWB 室内定位性能进行归纳总结^[4]。随着无线通信的迅猛发展, 人们对通信的传输速率和服务质量要求越来越高。在实际的通信系统中, 阴影衰落、路径损耗和多径效应等严重影响了通信的传输速率和服务质量。协作通信作为未来无线通信的关键技术之一, 很好地克服了以上问题^[5]。在协作通信中, 中继节点采用不同的中继技术进行数据转发。由于移动终端的资源有限, 而转发数据又需要消耗自身资源, 因此系统的功率分配问题是一个值得研究的问题^[6]。对于无线定位网络, 找到一个合适的误差评价标准尤为必要。其中, 卫星定位场景下的克拉美罗界作为定位精确度的评价标准。无线定位网络中的平方位置误差下界作为定位误差的标准^[7-8]。此外, 对于无线宽带定位网络, 如无线传感器网络, 因为受到系统成本、系统复杂度以及资源的限制, 资源分配和优化对定位精确度起到非常重要的作用。而在当前对无线定位网络的研究中, 关于无线宽带定位中资源受限时的优化分配的研究仍然较少^[9]。

收稿日期: 2018-04-18; 修回日期: 2018-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61601511)

1 无线协同定位网络模型

图 1 为无线协同定位网络模型, 网络中包含目标节点(agent)和锚节点(anchor)。目标节点位置信息未知, 锚节点位置信息可以通过卫星导航定位系统等技术获得^[8]。事实上, 平面定位中一个目标节点需要至少 3 个锚节点才能实现定位。这是目标节点只能从锚节点获得位置信息的情况。然而, 如果定位网络中目标节点可以从锚节点获得位置信息, 也可以与相邻节点进行距离测量, 那么称之为协同定位。这样的定位网络称之为协同定位网络^[10]。

图 2 是具有 3 个节点的无线定位网络。其中节点 k 与节点 j 的距离为:

$$d_{kj} = \|\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_j\| \quad (1)$$

式中: d_{kj} 为节点 k 与节点 j 之间的距离; $\mathbf{p}_k$ 和 $\mathbf{p}_j$ 为节点 k 和节点 j 的位置。

节点 k 与节点 j 的角度:

$$\phi_{kj} = \arctan\left(\frac{y_k - y_j}{x_k - x_j}\right) \quad (2)$$

式中: ϕ_{kj} 为节点 k 与节点 j 形成的倾斜角; $(x_k, y_k), (x_j, y_j)$ 分别为节点 k 与节点 j 的坐标。

节点 k 均方位置误差下限为^[11]:

$$E\{\|\hat{\mathbf{p}}_k - \mathbf{p}_k\|^2\} \geq f(\mathbf{p}_k) = \text{tr}\{J_e^{-1}(\mathbf{p}_k)\} \quad (3)$$

式中: $\hat{\mathbf{p}}_k$ 为节点 k 的估计位置; $\mathbf{p}_k$ 为节点 k 的真实位置; $\text{tr}\{\bullet\}$ 为 $\{\bullet\}$ 中矩阵 $\bullet$ 的迹; $J_e(\mathbf{p}_k)$ 为节点 k 的等效费舍尔矩阵(Equivalent Fisher Information Matrix, EFIM)。

拥有 N_b 个锚节点的协同定位网络中, N_a 个目标节点的 EFIM 为^[13]:

$$\mathbf{J}_e^G = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{1,1} & \cdots & \mathbf{J}_{1,N_a} \\ \cdots & \mathbf{J}_{ij} & \cdots \\ \mathbf{J}_{N_a,1} & \cdots & \mathbf{J}_{N_a,N_a} \end{bmatrix} \quad (4)$$

当 $i = j$,

$$\mathbf{J}_{ij} = \mathbf{J}_e^A(\mathbf{p}_i) + \sum_{k \neq i} \mathbf{C}_{ik} \quad (5)$$

当 $i \neq j$,

$$\mathbf{J}_{ij} = -\mathbf{C}_{ij} \quad (6)$$

其中,

$$\mathbf{J}_e^A(\mathbf{p}_k) = \sum_{j \in N_b} \lambda_{kj} \mathbf{q}_{kj} \mathbf{q}_{kj}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_{kj} = \mathbf{C}_{jk} = (\lambda_{kj} + \lambda_{jk}) \mathbf{q}_{kj} \mathbf{q}_{kj}^T \quad (8)$$

$$\mathbf{q}_{kj} = [\cos \phi_{kj}, \sin \phi_{kj}]^T \quad (9)$$

式中: $\mathbf{J}_e^A(\mathbf{p}_k)$ 为来自所有锚节点的测距信息强度之和; $\mathbf{C}_{kj}, \mathbf{C}_{jk}$ 为节点 k 与节点 j 之间的测距信息强度。

同步网络中的测距信息强度为:

$$\lambda_{kj} = \xi_{kj} \frac{p_k \beta_k^2}{d_{kj}^\delta} \quad (10)$$

式中: ξ_{kj} 为信道增益; p_k 为节点 k 的信号发射功率; β_k 为节点 k 发射信号的归一化有效带宽; δ 为路径衰减因子。

所有目标节点的均方位置误差下限^[4]为:

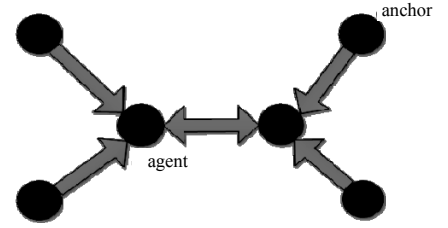


Fig.1 Cooperative location network
图 1 协同定位示意图

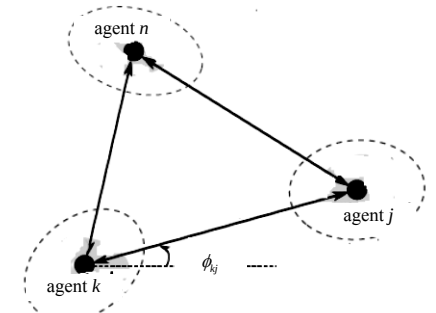


Fig.2 Wireless location network with three agents
图 2 三个节点的协同定位网络

$$\sum_{k=1}^{N_a} f(\mathbf{p}_k) = \text{tr} \left\{ \left(\mathbf{J}_e^G \right)^{-1} \right\} \quad (11)$$

式中 $\mathbf{J}_e^G$ 为无线定位网络所有目标节点的等效费舍尔矩阵。

根据所有目标节点的均方位位置误差下限, 就可以给出各个目标节点的均方位位置误差下限。网络中第 k 个目标节点的均方位位置误差下限可以表示为:

$$f(\mathbf{p}_k) = \text{tr} \left\{ \left(\mathbf{J}_e^G \right)^{-1}_{(2k-1:2k, 2k-1:2k)} \right\} \quad (12)$$

2 基于 Stackelberg 的优化算法

Stackelberg 模型是博弈论的重要理论模型。在该模型中存在主方和从方两类决策者, 主方处于较高层次, 而从方处于较低层次。处于较高层次上的决策者自上而下地控制和引导下一层若干决策者, 而下一层次上的决策者在这一前提下, 可以在其管理范围内行使一定的决策权^[9]。这种主从递阶决策问题最初是由德国经济学家 Von Stackelberg 于 1952 年提出, 故称 Stackelberg 博弈问题。

Stackelberg 博弈问题通常由处于不同决策层次的决策者组成, 而每个决策层次又可能存在多个决策者, 当组成这种系统的上下级关系多于一个时, 称为多级博弈系统。当只有一个上下级关系时, 即只有两个决策层次, 称为两级博弈系统。本文所应用的 Stackelberg 系统即为多级博弈系统。

针对协作网络中的功率分配问题, 提出基于 Stackelberg 博弈的分配策略。首先建立博弈模型, 源节点根据中继节点分配的功率给出价格; 中继节点根据自身资源情况、信道状态、位置信息以及源节点提出的价格, 进行协作传输功率的分配, 从而构建用户效用函数; 接着证明了该效用函数满足凹函数的条件, 且存在均衡点, 因此参与决策的用户可以通过求解协作功率和价格的 Stackelberg 均衡解(SE)最大化自己的效用^[11]。

在 underlay 认知无线电场中, 为了让认知用户能随机地接入主用户正在使用的授权频段, 且对主用户产生的干扰不高于主用户能够容忍的干扰温度门限, 采用 Stackelberg 博弈机制进行认知用户的发射功率分配。将主用户作为模型中的 leader, 认知用户作为 follower, 认知用户使用主用户的授权频段时需以干扰功率为单位支付给主用户相应的费用, 而主用户则可以通过调整价格, 限制认知用户产生的总干扰功率不高于其所能容忍的干扰温度门限, 以便获得最大收益。同时, 不同认知用户间根据主用户制定的价格, 进行非协作博弈^[12]。

对于无线定位网络, 目标节点与锚节点进行测距定位, 由于锚节点的分布、信道条件等因素的影响, 不同目标节点的定位精确度各有不同。当目标节点之间进行协同测距时, 不同定位精确度的目标节点在测距定位过程中所起的作用是不同的。对于定位精确度较高的目标节点, 作为主方决策者。对于定位精确度较低的目标节点, 作为从方决策者。由于网络存在多个目标节点, 可以形成多级博弈系统。

如果网络只有两个目标节点, 那么就形成两级博弈系统。定位精确度较高的目标节点 1 作为主方决策者, 其博弈可以表示为:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{p}_1) &= \text{tr} \left\{ \left(\mathbf{J}_e^G \right)^{-1}_{(1:2, 1:2)} \right\} \\ \text{s.t. } 0 &\leq p_1 \leq p_{\text{peak}} \\ p_1 + p_2 &= p_{\text{total}} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: p_1 为目标节点 1 的发射功率; p_2 为目标节点 2 的发射功率; p_{peak} 为功率峰值; p_{total} 为功率总和。

定位精确度较低的目标节点 2 作为从方决策者, 其博弈可以表示为:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{p}_2) &= \text{tr} \left\{ \left(\mathbf{J}_e^G \right)^{-1}_{(3:4, 3:4)} \right\} \\ \text{s.t. } 0 &\leq p_2 \leq p_{\text{peak}} \\ p_1 + p_2 &= p_{\text{total}} \end{aligned} \quad (14)$$

对于拥有 N_a 个目标节点的无线定位网络, 目标节点的效用函数记为 $u_k(p_1, p_2, \dots, p_{N_a})$, 那么:

$$u_k(p_1, p_2, \dots, p_{N_a}) = \text{tr} \left\{ \left(\mathbf{J}_e^G \right)^{-1}_{(2k-1:2k, 2k-1:2k)} \right\} \quad (15)$$

式中 $p_1, p_2, \dots, p_{N_a}$ 为目标节点 1, 2, $\dots, N_a$ 的发射功率。

应用 Stackelberg 模型^[13], 可以设计相应的功率分配方案。

步骤 1: 目标节点与锚节点进行测距定位, 并计算每个目标节点的均方位位置误差下限。根据目标节点的均方位位置误差下限, 对目标节点的定位精确度按从高到低进行排序, 即定位精确度最高的编号为 1, 其余目标节点

依次类推, 那么定位精确度最低的目标节点编号为 N_a 。

步骤 2: 编号为 N_a 的目标节点需要根据其他目标节点的发射功率来确定自己的发射功率, 若编号为 N_a 的目标节点的效用函数为 $u_{N_a}(p_1, p_2, \dots, p_{N_a})$, 对效用函数 $u_{N_a}(p_1, p_2, \dots, p_{N_a})$ 关于 p_{N_a} 求偏导, 并令偏导数为零。即

$$\frac{\partial u_{N_a}(p_1, p_2, \dots, p_{N_a})}{\partial p_{N_a}} = 0 \quad (16)$$

由式(16)解出:

$$p_{N_a} = R_{N_a}(p_1, p_2, \dots, p_{N_a-1}) \quad (17)$$

对于编号为 N_a-1 的目标节点, 其效用函数为 $u_{N_a-1}(p_1, p_2, \dots, p_{N_a})$, 将式(17)代入, 然后关于 p_{N_a-1} 求偏导, 那么可以解得

$$p_{N_a-1} = R_{N_a-1}(p_1, p_2, \dots, p_{N_a-2}) \quad (18)$$

其他目标节点可以依此类推。通过不断的迭代消元, 最终可以得到

$$p_2 = R_2(p_1) \quad (19)$$

对于编号为 1 的目标节点, 其效用函数为 $u_1(p_1, p_2, \dots, p_{N_a})$ 。事实上, 通过上述的迭代消元, 编号为 1 的目标节点的效用函数可以化简为 $\hat{u}_1(p_1)$, 对其关于 p_1 求导, 并令导数为零, 可以得到

$$\frac{d\hat{u}_1(p_1)}{dp_1} = 0, 0 \leq p_1 \leq p_{\text{peak}} \quad (20)$$

步骤 3: 方程(20)是一个高度非线性的方程, 对其求解并不容易。采用常规的求解方法难度极大。采用粒子群算法求解^[14], 求解之前, 需要对方程式(20)进行转化。

令 $f(p_1) = (\hat{u}_1(p_1))^2, 0 \leq p_1 \leq p_{\text{peak}}$, 由文献[10]可知, 方程(20)在 $[0, p_{\text{peak}}]$ 中的根等价于函数

$$f(p_1) = (\hat{u}_1(p_1))^2 \quad (21)$$

在 $[0, p_{\text{peak}}]$ 中的极小点。因此, 可以采用粒子群算法获得函数式(21)的极小值, 进而获得方程(20)的数值解。本文采用的粒子群算法的相关参数如表 1 所示。

3 仿真分析

设置这样的无线定位网络, 网络拥有 4 个锚节点、4 个目标节点。节点的分布示意图如图 3 所示。节点之间采用表 2 所示的 UWB 测距信号进行测距。anchor 代表锚节点, agent 代表目标节点。

应用本文提出的功率分配方案, 可以得到网络中各个目标节点的归一化功率分配值, 如图 4 所示。可见, 目标节点 1 分配的功率最低, 而目标节点 4 分配的功率最高, 目标节点 3 次之, 目标节点 2 分配的功率比目标节点 3 略低。目标节点 1 与目标节点 2 和 3 的距离比较近, 而且目标节点 1 正处于目标节点 2 和 3 之中间位置, 目标节点 1 与它们之间的测距所需要的信号发射功率被调低, 而目标节点 4 与目标节点 1, 目标节点 2 以及目标节点 3 的距离最远, 所以目标节点 4 所需的发射功率最大。

表 3 给出了两种功率优化方案的结果比较。可以看出, 本文提出的 Stackelberg 优化分配方案比起功率平均分配方案, 降低了网络的均方位置误差下限, 在原来的基础上降低了 3%, 由此提高了网络的定位精确度。

表 1 算法参数设置

Table1 Algorithm parameters	
parameter	value
number of particles N	30
learning factor c_1	1.496 2
learning factor c_2	1.496 2
inertia weight w	0.726 8
algorithm precision	10^{-6}
maximum number of iterations	50

表 2 UWB 信号参数

Table2 UWB signal parameters	
parameters	value
bandwidth	500 MHz
wavelength	0.1 m
ratio of DP(Direct Path, DP)	0.2
path overlap factor	0.32
power spectral density (PSD)	-41.3 dBm/MHz
noise power spectral density	-174 dBm/Hz

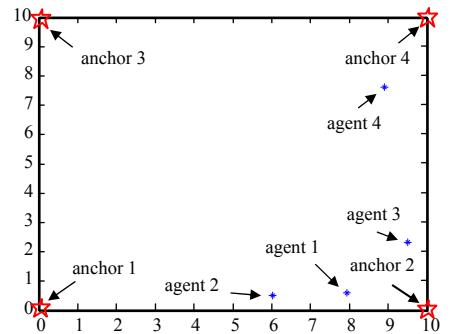


Fig.3 Location of anchors and agents
图 3 锚节点与目标节点示意图

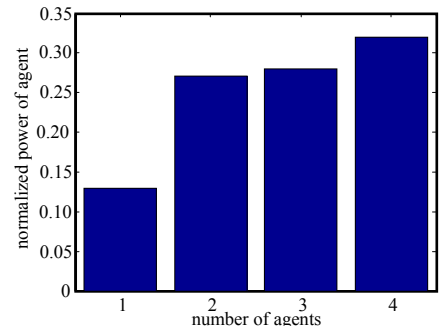


Fig.4 Agent power allocation
图 4 目标节点功率分配情况

表 3 优化结果
Table3 Optimization results

power optimization scheme	square position error bound/ m^2
Stackelberg optimized distribution plan	$3.348\ 987\ 429\ 695\ 320 \times 10^{-13}$
average distribution plan	$3.479\ 004\ 956\ 874\ 334 \times 10^{-13}$

图 5 更进一步给出了两种功率分配方案的结果比较。图中 1 代表本文提出的功率分配方案, 2 代表功率平均分配方案。图 5 还给出了各个目标节点在不同功率分配方案下的均方位置误差下限。可以看出, 相比方案 2, 方案 1 优化了各个目标节点的均方位置误差下限。也就是通过合理分配各个目标节点的信号发射功率, 实现降低网络的均方位置误差下限, 达到提高网络的定位精确度的目的。

本文在求解方程(20)的数值解的过程中, 采用了粒子群算法, 该算法避开了传统求解方程方法中需要反复求导等繁琐做法, 粒子群优化是一种基于群体智能的启发式全局搜索算法, 粒子群优化算法通过粒子间的竞争和协作以实现在复杂搜索空间中寻找全局最优点。它具有易理解、易实现、全局搜索能力强等特点, 倍受科学与工程领域的关注, 已经成为发展最快的智能优化算法之一。粒子群优化算法因形式简洁、收敛快速和参数调节机制灵活等优点, 同时一次运行可得到多个解, 且能逼近非凸或不连续的 Pareto 最优前端, 因而被认为是求解多目标优化问题最具潜力的方法之一^[15]。图 6 给出了求解方程(20)的过程中, 粒子群算法的收敛情况示意图。采用 3 种粒子群算法进行求解, 分别为收缩因子粒子群算法、惯性权重线性递减粒子群算法以及标准粒子群算法。可以看出, 收缩因子粒子群算法在迭代次数达到 30 次时即获得收敛, 惯性权重线性递减粒子群算法在迭代次数为 80 次时达到收敛, 标准粒子群算法在迭代次数为 33 次时达到收敛。可见, 收缩因子粒子群算法收敛速度更快。

4 结论

本文以基于 UWB 测距技术的无线定位网络为研究背景, 引入均方位置误差下限作为无线定位网络定位精确度的评价指标, 根据测距信号发射功率与网络均方位置误差下限的函数关系, 利用 Stackelberg 模型, 结合粒子群算法对目标节点的发射功率进行优化分配。优化结果表明, 通过优化目标节点的发射功率, 可以实现定位精确度的提高。其次, 与功率平均分配方案相比, 本文提出的功率分配方案降低了网络的均方位置误差下限。事实上, 网络中存在着两类节点, 即锚节点和目标节点, 并且锚节点和目标节点的发射功率对定位精确度的影响各有不同, 可以根据实际情况对两者进行优化。更进一步地, 如果对定位网络的锚节点和目标节点同时进行功率优化, 那么网络的定位精确度将获得进一步提高。

参考文献:

- [1] 庞艳, 乔静. UWB 无线定位技术探讨[J]. 电信快报, 2005(11):13-15. (PANG Yan, QIAO Jing. Discussion on UWB wireless location technology[J]. Telecommunications Express, 2005(11):13-15.)
- [2] 童凯翔, 田世伟, 李广侠. UWB 在无线定位技术中的应用综述[C]// 中国卫星导航学术年会. 南京: 陆军工程大学通信工程学院, 2014. (TONG Kaixiang, TIAN Shiwei, LI Guangxia. Overview of UWB application in wireless positioning technology[C]// China Satellite Navigation Academic Annual Conference. Nanjing, China: School of Communication Engineering, Army Engineering University, 2014.)
- [3] 童凯翔, 周轩, 李广侠, 等. 超宽带在无线定位技术中的应用综述[J]. 导航定位学报, 2015(1):10-14. (TONG Kaixiang, ZHOU Xuan, LI Guangxia, et al. Overview of the application of ultra-wideband in wireless positioning technology[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2015(1):10-14.)

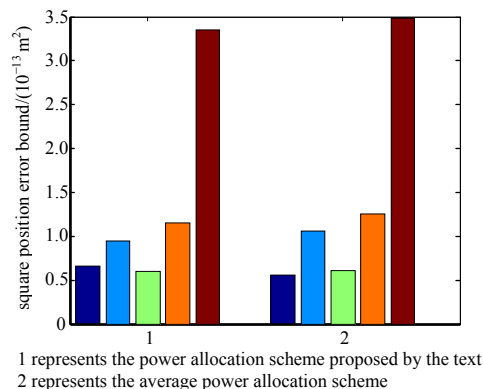


Fig.5 Comparison of two schemes
图 5 两种方案比较

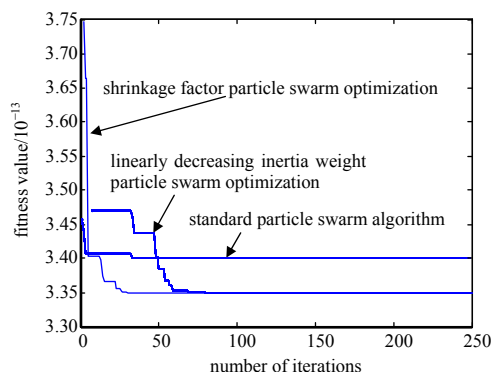


Fig.6 Convergence graph of particle swarm optimization algorithm
图 6 粒子群优化算法收敛情况图

- [4] 杨狄,唐小妹,李柏渝,等. 基于超宽带的室内定位技术研究综述[J]. 全球定位系统, 2015,40(5):34–40. (YANG Di, TANG Xiaomei, LI Baiyu, et al. Review of research on indoor positioning technology based on ultra-wideband[J]. Global Positioning System, 2015,40(5):34–40.)
- [5] 高龙年. 基于博弈论的协作通信网络中继选择和功率分配算法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012. (GAO Longnian. Research on relay selection and power allocation algorithm of cooperative communication network based on game theory[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2012.)
- [6] 李文佳. 基于协作通信的功率分配算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014. (LI Wenjia. Research on power allocation algorithm based on cooperative communication[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2014.)
- [7] 肖竹,黑永强,于全,等. 脉冲超宽带定位技术综述[J]. 中国科学:信息科学, 2009,39(10):1112–1124. (XIAO Zhu, HEI Yongqiang, YU Quan, et al. Overview of pulse ultra-wideband positioning technology[J]. Science in China, Information Science, 2009,39(10):1112–1124.)
- [8] PENNA F, CACERES M A, WYMEERSCH H. Cramer–Rao Bound for hybrid GNSS–terrestrial cooperative positioning[J]. IEEE Communications Letters, 2010,14(11):1005–1007.
- [9] CHEN J, DAI W, SHEN Y, et al. Power management for cooperative localization: a game theoretical approach[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016,64(24):6517–6532.
- [10] 裴凌,刘东辉,钱久超. 室内定位技术与应用综述[J]. 导航定位与授时, 2017,4(3):2–9. (PEI Ling, LIU Donghui, QIAN Jiuchao. Overview of indoor positioning technology and application[J]. Navigation and Timing, 2017,4(3):2–9.)
- [11] 卫萌茜,秦爽,孙三山. 基于 Stackelberg 博弈的协作网络功率分配策略[J]. 计算机应用, 2014,34(9):2482–2485. (WEI Mengqian, QIN Shuang, SUN Sanshan. Collaborative network power allocation based on Stackelberg game[J]. Computer Applications, 2014,34(9):2482–2485.)
- [12] 罗荣华,杨震. 认知无线电中基于 Stackelberg 博弈的分布式功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2010,32(12):2964–2969. (LUO Ronghua, YANG Zhen. Distributed power allocation algorithm based on Stackelberg game in cognitive radio[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010,32(12):2964–2969.)
- [13] 王安,陶越,蔡跃明. 博弈论在无线通信中的应用专题讲座(三) 第5讲 物理层安全中基于 Stackelberg 博弈的资源分配算法[J]. 军事通信技术, 2014(1):89–93. (WANG An, TAO Yue, CAI Yueming. Application of game theory in wireless communication(3) lecture 5 resource allocation algorithm based on Stackelberg game in physical layer security[J]. Military Communications Technology, 2014(1):89–93.)
- [14] 张建科,王晓智,刘三阳,等. 求解非线性方程及方程组的粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2006,42(7):56–58. (ZHANG Jianke, WANG Xiaozhi, LIU Sanyang, et al. Particle swarm optimization for solving nonlinear equations and system[J]. Computer Engineering and Applications, 2006,42(7):56–58.)
- [15] 胡旺, YEN Gary G, 张鑫. 基于 Pareto 熵的多目标粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2014,25(5):1025–1050. (HU Wang, YEN Gary G, ZHANG Xin. Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on Pareto entropy[J]. Journal of Software, 2014,25(5):1025–1050.)

作者简介:



林锦锐(1993–), 男, 广东省揭阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航定位与授时. email:1575069421@qq.com.

李广侠(1964–), 男, 浙江省永康市人, 硕士, 教授, 主要研究方向为卫星导航定位与授时.

田世伟(1983–), 男, 河南省周口市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为卫星导航定位与授时.