

# 利用离去角度的无线传感器网络分布式节点定位方法

王文杰<sup>1,2</sup>, 张渭乐<sup>2</sup>, 殷勤业<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学智能网络与网络安全教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 针对现有无线传感器网络节点定位方法成本和复杂度较高的问题, 提出了一种利用离去角度估计的分布式节点定位方法(AODL). 锚节点利用阵列天线发射正交导频信号, 从而使得各传感节点仅需配备常规的单天线系统便可获得导频信号的离去角度信息. 结合锚节点的地理位置, 各节点进而可进行自身的三维位置估计. AODL方法仅利用无线通信设备进行定位, 节点的角度估计不需要配备阵列天线, 具有低成本和低能耗的优点, 同时各节点独立进行自身的角度估计和位置计算, 是一种分布式的定位方法. 仿真实验结果表明, 对于  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的定位区域, 借助于4个装备  $3 \times 3$  均匀面阵的锚节点, 各传感节点在信噪比为  $15\text{ dB}$  时的平均定位误差可以达到  $1\text{ m}$  以内.

**关键词:** 离去角度估计; 分布式定位; 无线传感器网络

**中图分类号:** TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)02-0061-06

## A Distributive Localization Method for Wireless Sensor Networks Using Angle of Departure

WANG Wenjie<sup>1,2</sup>, ZHANG Weile<sup>2</sup>, YIN Qinye<sup>1,2</sup>

(1. MOE Key Laboratory for Intelligent Networks and Network Security, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A novel distributive localization method using the angle of departure (AODL) is proposed to reduce the cost and complexity of existing localization methods for wireless sensor networks. The anchors emit time-division pilots to the network using multi-antenna system, and each sensor just utilizes single-antenna system to estimate the angle of departure (AOD) of the pilot, by which the sensor's position can be determined. The AODL only relies on radio transceivers, and the sensors estimate the angle information without the need of conventional multi-antenna system, so that the system complexity is greatly reduced. Moreover, the angle estimation and position calculation are conducted at each sensor in a completely distributed manner. The simulation results show that for a  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  region, with the assistance of four anchors equipped with  $3 \times 3$  uniform planar array, the average location error is within  $1\text{ m}$  when the signal-to-noise ratio of each sensor is  $15\text{ dB}$ .

**Keywords:** angle of departure estimation; distributive localization; wireless sensor network

在无线传感器网络(WSN)的众多应用中, 传感节点的定位信息十分重要<sup>[1]</sup>. 在已有的诸多节点定位方法中, GPS、TDOA<sup>[2]</sup>定位方法往往需要其他硬

件(如GPS接收机或超声信号的发送器和接收器), 然而由于节点体积和能耗的限制, 这些方法很难在无线传感器网络中得以实用. 由于无线传感器节点

本身就带有无线收发模块,如果能够使其同时发挥通信和定位功能,将非常有利于节点能耗和成本的降低. 仅利用无线收发模块的定位方法有与距离无关的定位算法<sup>[3]</sup>、基于 RSSI 的方法<sup>[4-6]</sup>和基于 DOA 的方法<sup>[7]</sup>等. 与距离无关的定位算法依据相邻节点间的连通性来定位,往往精度不高;基于 RSSI 的定位方法对环境的变化非常敏感;基于 DOA 的定位方法由于节点体积和成本的限制,往往很难在节点上配备多天线. 文献[8]在锚节点上配备多天线的情况下,提出了基于阵列天线到达角度(AOA)估计的定位方法,然而该方法不是分布式的定位方法,需要锚节点先后为每一个节点提供 AOA 估计,因此不适合用于节点数目较多的大规模网络.

本文提出一种利用离去角度(AOD)估计的 WSN 分布式定位方法,定位锚节点利用阵列天线系统发射正交的导频信号,各传感节点仅利用常规单天线系统对接收的基带信号进行伪快拍,并基于多次伪快拍结果进行 AOD 估计,可以获得与锚节点之间的角度信息,进而可进行位置估计. 该方法仅利用无线通信设备,而且节点在定位过程中只接收信号,不发送信号,角度估计不需要配备阵列天线,具有低成本和低能耗的优点. 另一方面,节点基于单天线伪快拍独立地进行角度估计,不需要锚节点单独为每个节点提供角度反馈信息,是一种分布式的定位方法.

## 1 定位方法

### 1.1 网络结构

在三维空间中,网络由若干个锚节点和大量传感节点构成,普通的传感节点能量有限,通信半径小,随机地散布在监测区域中,节点一旦放置便处于静止状态执行采样任务. 锚节点携带充足的能量供应,利用 GPS 等手段获得自身的地理位置,并且装备功能强大的阵列天线系统,可以大功率覆盖整个网络. 定位系统的网络结构示意图如图 1 所示.

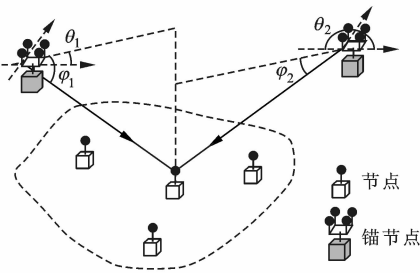


图 1 定位系统的网络结构示意图

### 1.2 节点 AOD 估计的基本原理

假设锚节点的阵列天线采用均匀面阵,以阵列平面作为 X-Y 平面构建阵列天线的本地坐标系,各阵元  $A_m$  分布于 X-Y 平面中,坐标为  $(x_m, y_m)$ ,  $m=1, 2, \dots, M$ . 在阵元之间同步的前提下,各阵元分时发射射频信号,接收节点可通过常规信道估计获得与锚节点发射天线阵之间的导向矢量,进而可进行 AOD 估计. 以阵元  $m$  发射单音导频  $e^{j(\omega t + \varphi_t)}$  为例,其中  $\omega$  为单音频率,  $\varphi_t$  为锚节点的本振初相,在视距环境中,该射频单音信号经过传输路径  $d_m$  到达某一待定位节点 S. 如果不考虑噪声的影响,节点 S 将接收射频信号进行下变频,得到的基带复信号可以表示为  $h_m e^{j\Delta\omega t}$ ,其中  $\Delta\omega$  为节点 S 与锚节点之间的本振频偏,  $h_m = e^{j(\varphi_t - \varphi_r - 2\pi d_m/\lambda)}$  可以看作是锚节点的第  $m$  阵元与接收节点之间的信道响应,其中  $\varphi_r$  为接收节点的本振初相,  $\lambda$  为射频信号波长. 如果节点与锚节点的本振频率同步,即  $\Delta\omega=0$ ,从而节点 S 将得到恒定不变的基带复信号  $h_m$ . 图 2 给出了 AOD 估计的原理示意图.

如果锚节点的  $M$  个阵元分时地发射上述单音信号,在各阵元的发射时间段,节点 S 采样基带复信号,可以得到一组  $M$  维复信号矢量

$$\mathbf{h} = [h_1 \quad h_2 \quad \cdots \quad h_M]^T =$$

$$e^{j(\varphi_t - \varphi_r)} [e^{-j2\pi d_1/\lambda} \quad e^{-j2\pi d_2/\lambda} \quad \cdots \quad e^{-j2\pi d_M/\lambda}]^T \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{h}$  为锚节点在一定离去角度时的阵列导向矢量. 我们将上述传感节点对时分正交信号采样得到一个  $M$  维复信号矢量的过程称为一次伪快拍. 在常规的 DOA 估计模式中,接收端利用阵列天线在同一时刻对来波信号进行的一次采样称为一次空域快拍,最终可基于多次快拍的结果进行 DOA 估计. 经过分析便可以发现,节点利用单天线采样时分正交信号得到的式(1)伪快拍矢量与常规的空域快拍是等价的. 从而,节点在多次伪快拍的基础上,仍然可以沿用传统的 DOA 估计算法进行二维角度  $\varphi$  和  $\theta$  的估计.

### 1.3 节点 AOD 的估计方法

由上所述,在接收节点与锚节点满足同频的条

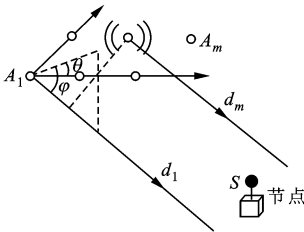


图 2 AOD 估计的原理示意图

件下,节点在不同时刻对发射信号的采样等价于常规的一次空域快拍,然而在无线传感器网络中,由于能耗、硬件成本等方面的限制,传感节点往往结构简单,因此要求节点能够实现精确的频率同步是相当苛刻的.因此,本文提出基于二阶统计量的 AOD 估计方法来抵消收发节点之间频差的影响.

在阵元之间校正为同相的条件下,锚节点作为信号源发射导频,以单音信号  $e^{j(\omega t + \varphi_1)}$  为例,如果锚节点的各阵元分时地发射该射频信号,则当锚节点的第  $m$  阵元发射时,接收节点的基带复信号可以表示为

$$x_m(t) = h_m e^{j\Delta\omega t} + n_m(t) \quad (2)$$

式中:  $n_m(t)$  ( $m=1,2,\dots,M$ ) 为接收节点基带信号的加性高斯白噪声,不同时刻的噪声互不相关,噪声与信号互不相关.将其中一个阵元作为参考阵元,以阵元 1 为例,依据式(2)可得到  $x_m(t)$  和  $x_1(t)$  之间的互相关函数如下

$$R_{x_mx_1}(\tau) = E(x_m(t+\tau)x_1^*(t)) = e^{j\Delta\omega\tau} h_m h_1^* \quad (3)$$

进而可构造矢量

$$\mathbf{R}(\tau) = [R_{x_1x_1}(\tau), R_{x_2x_1}(\tau), \dots, R_{x_Mx_1}(\tau)]^T = \mathbf{h}s(\tau) \quad (4)$$

式中:  $s(\tau) = h_1^* e^{j\Delta\omega\tau}$ . 式(4)表明,  $\mathbf{R}(\tau)$  等价于节点利用导向矢量为  $\mathbf{h}$  的阵列天线对虚拟信号源  $s(\tau)$  的一次空域快拍,从而在对矢量  $\mathbf{R}(\tau)$  进行多次快拍的基础上,节点仍然可以沿用常规的 DOA 估计算法进行离去角度(AOD)估计.

节点一次伪快拍过程由  $M$  个时隙组成,其时序图如图 3 所示,其中在第  $m$  时隙  $S_m$  中,各锚节点的阵元  $A_1$  和  $A_m$  先后在子时隙  $T_1$  和  $T_2$  发射时分单音信号.节点以间隔  $\Delta T$  采样基带信号,其中  $T_1$  和  $T_2$  的起始采样的时间间隔均为  $\tau$ .

节点的 AOD 估计算法具体描述如下.

(1)在每个时隙中,节点对 2 个子时隙的基带信号以等间隔  $\Delta T$  进行采样,分别获得 2 组采样点  $x_m^{(1)}(n)$  和  $x_m^{(2)}(n)$ ,  $n=0,1,\dots,N_s-1$ .

(2)对每个时隙的采样点,节点以连续的  $N_{\text{STF}}$  个采样点为一个短时帧,计算子时隙接收基带信号

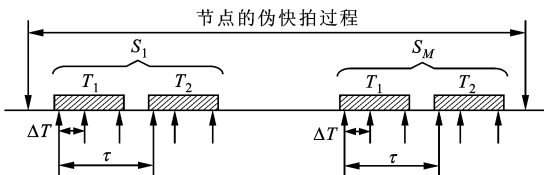


图3 节点伪快拍时序图

之间的互相关

$$R_m(k) = \frac{1}{N_{\text{STF}}} \sum_{n=0}^{N_{\text{STF}}-1} x_m^{(2)}(n+k) [x_m^{(1)}(n+k)]^* \quad (5)$$

式中:  $k=0,1,\dots,N_s-N_{\text{STF}}$ . 将  $\mathbf{R}_m = [R_m(0) \ R_m(1) \ \dots \ R_m(N_s-N_{\text{STF}})]^T$  作为  $m$  时隙的伪快拍矢量.

(3)在获得  $M$  个时隙伪快拍矢量的基础上,节点得到下述用于 AOD 估计的伪快拍矩阵

$$\mathbf{X} = [\mathbf{R}_1 \ \mathbf{R}_2 \ \dots \ \mathbf{R}_M]^T \quad (6)$$

不难发现,矩阵  $\mathbf{X}$  中的各列矢量为节点对式(4)中  $\mathbf{R}(\tau)$  的一次估计,即一次伪快拍,从而基于伪快拍的自相关矩阵  $\mathbf{R} = \mathbf{X}\mathbf{X}^H$ ,节点可利用常规 DOA 估计方法进行 AOD 估计,获得与锚节点之间的夹角信息.这里需要说明的是,由于此时信号子空间只具有一维特征向量,而该特征向量即反映了节点和锚节点阵列天线之间的导向矢量,因此节点可以通过对自相关矩阵进行特征值分解,根据信号特征向量利用线性拟合等方法即可直接得到 AOD 估计,无需进行谱峰搜索或者多项式迭代求根.

#### 1.4 节点的位置估计

在 WSN 定位系统中,  $N$  个锚节点分别位于网络上方的天空中,在大地坐标系中,其坐标分别记为  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i=1,2,\dots,N$ ,节点的位置估计示意图如图 4 所示.

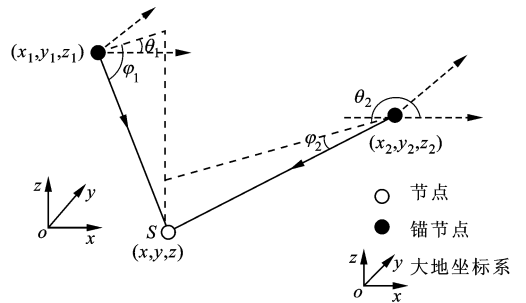


图4 节点的位置估计示意图

假设各锚节点采用  $M$  元均匀面阵,并且其面阵与大地坐标系保持一致,在定位过程中,各锚节点先后发射导频辅助节点的角度估计,从而位于大地坐标  $(x, y, z)$  的目标节点便得到  $N$  个二维角度估计结果,包括方位角  $\theta_i$  和俯仰角  $\varphi_i$ ,从而目标节点可得到  $N$  个用于位置估计的方程组

$$\left. \begin{aligned} \tan\theta_i(x_i - x) - (y_i - y) &= 0 \\ \tan\varphi_i \sec\theta_i(x_i - x) - (z_i - z) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7) \quad i=1,2,\dots,N$$

从而,待定位节点的位置估计可基于以下最小均方误差准则表达式

$$\sum_{i=1}^N ((\tan\theta_i(x_i - x) - (y_i - y))^2 + (\tan\varphi_i \sec\theta_i(x_i - x) - (z_i - z))^2) \rightarrow \min \quad (8)$$

由此,目标节点可依据最小二乘法得到最终的位置估计结果。

## 2 定位方法分析

### 2.1 与 DOA 定位模式的比较

本文提出的节点 AOD 估计模式与常规阵列信号处理中来波方向的估计过程截然不同。基于 DOA 估计的定位往往采用以下 2 种方式:一种是在各待定位节点上安装阵列天线,通过估计锚节点发射信号的来波方向,结合锚节点的地理位置,节点可得到自身的位置估计,但是这种方式不可避免地存在固有弊端,节点由于体积、成本等制约因素,通常不具备多天线系统,因此这种方式难以应用到大规模 WSN 的节点定位中;另一种则是锚节点安装阵列天线,待定位节点发射信号,由锚节点进行 DOA 估计,并进行角度反馈<sup>[8]</sup>,然而,这种方式同样存在许多问题,首先待定位传感节点往往发射功率有限,锚节点进行 DOA 估计时的信噪比不会很高,将导致节点定位精度较差,其次各节点需要协调有序地发射信号,势必带来较大的通信开销,再者所有角度信息都是由锚节点估计并反馈,因此这种方式是一种集总的、非分布式的定位方法。

需要注意的是,上述 2 种方式中均是由配备阵列天线的接收机进行角度估计,然而在本文方法中,由于角度信息对于上行(待定位节点到锚节点)和下行(锚节点到待定位节点)是互易的,因此通过在锚节点配备多天线,发射多个相互正交的信号,而待定位节点根据这些信号到达自身的相位差,利用单天线系统便可估计出与锚节点之间的方向角。

本文给出了 AOD 估计模式与传统的 DOA 估计模式的精度对比。在 DOA 模式中,单天线发射,4 天线接收,采用 MUSIC 算法估计来波角度;在 AOD 模式中,4 天线分时发射,单天线接收,采用本文算法估计离去角度。仿真中,实际 DOA 和 AOD 的角度均为  $90^\circ$ ,估计的实际快拍数均为 50。在 DOA 模式中,阵列天线的单通道与 AOD 模式中的单天线接收机具有相同的噪声功率。仿真中 2 种模式的发射天线保持平均发射功率的一致。图 5 给出了 2 种模式角度估计的均方根误差曲线。图 5 的结

果表明,由于 AOD 估计利用了发射端的多天线增益,其角度估计精度优于 DOA 估计。因此,本文基于 AOD 的定位方法在极大降低定位系统复杂度的同时,并不会带来定位精度的下降,而且在 AOD 方法中,锚节点可以简单地通过增大发射功率来提高各节点的信噪比,从而便可以达到提高全网定位精度的效果。因此,相比于基于 DOA 估计的定位方法,本文方法是一种更适用于 WSN 的分布式定位方法。

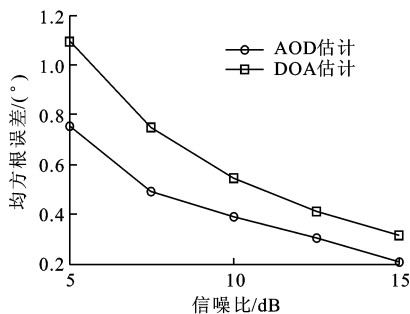


图5 AOD 模式与 DOA 模式的角度估计精度对比

### 2.2 定位方法的抗多径性能分析

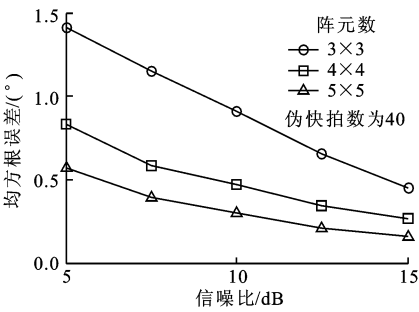
在无线传感器网络的大部分应用场景中,地面和周边反射体的存在将产生多径效应,此时节点的接收信号已不能认为仅仅只有直达径的存在,而是多条路径的叠加,因而具有良好的抗多径能力是无线传感器节点定位的又一基本需求。然而,在本文定位方法中,由于锚节点处于高空俯视状态,锚节点端与各传感节点的信道模型大不相同,各传感节点往往处于散射丰富的环境中,由于多径效应,其接收信号为各个路径的叠加。与此相反,由于锚节点处于散射体的高空,其发射信号的多径组成往往被限制在一个很小的角度范围,锚节点发射阵元的切换只会带来接收节点多径信号的整体时延。因此,在这样一些场景中,我们可以认为锚节点到达各节点的发射信号仅由一个主 AOD 构成<sup>[9]</sup>。此外,即使节点和锚节点之间存在较大的 AOD 角度扩展,此时节点的 AOD 估计与常规阵列信号处理中的相干源问题类似,因而采用空间平滑、矩阵重构等解相干处理方法,节点仍然能够得到直达径的方向估计,从而可以确保本文方法在多径环境中的定位有效性。

## 3 仿真实验

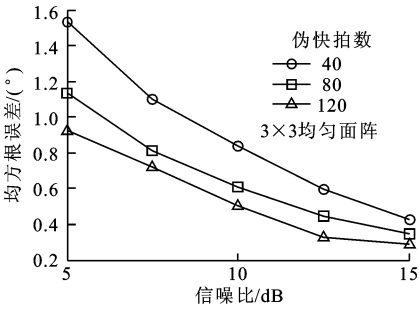
### 3.1 节点的 AOD 估计

仿真中,锚节点采用阵元间距为  $1/2$  射频波长的均匀面阵,实际 AOD 的俯仰角为  $30^\circ$ ,方位角为

90°,节点采样率为 4 kHz,利用均方根误差来衡量角度估计的性能.图 6 给出了不同条件下节点 AOD 估计误差与基带信号信噪比之间的关系曲线.图 6a 中,节点伪快拍数为 40,图中给出了锚节点采用不同阵元数的误差曲线.图 6b 中,锚节点采用 3×3 均匀面阵,图中给出了不同伪快拍数的误差曲线.结果表明,基带信号信噪比、锚节点天线阵元数及节点伪快拍数的增加均可以提高节点角度估计的精度.



(a)锚节点天线阵元个数对 AOD 估计性能的影响



(b)伪快拍数对 AOD 估计性能的影响

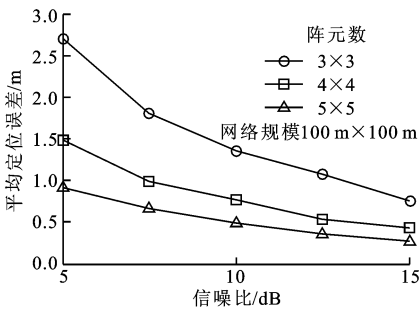
图 6 AOD 估计误差曲线

3.2 节点的位置估计

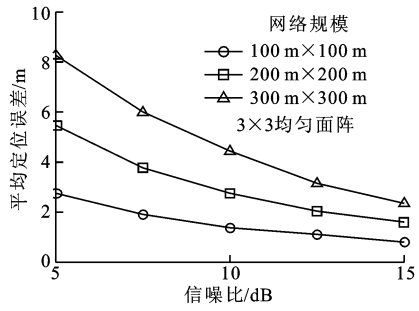
实验中,25 个待定位节点呈网格均匀分布在水平面上,组成一个无线网络,装备阵元间距为 1/2 射频频波长均匀面阵的 4 个锚节点位于网络上方的 100 m 高空.在定位过程中,各锚节点面阵与大地坐标系保持一致.节点对基带信号的采样率为 4 kHz,采用 40 次伪快拍进行 AOD 估计.

图 7a 给出了节点平均定位误差与锚节点天线阵元数之间的关系曲线,其中网络规模为 100 m×100 m.实验结果表明,随着锚节点天线阵元数的增加以及节点信噪比的提升,节点的平均定位误差均会降低.当锚节点采用 3×3 天线系统,节点基带信号信噪比为 15 dB 时,平均定位误差已经达到 1 m 以下.

图 7b 给出了节点的平均定位误差与网络规模之间的关系曲线,其中锚节点采用 3×3 均匀面阵.由图 7b 可以发现,随着网络规模的增大,定位误差曲线在上移,这是因为随着网络规模的增大,节点与锚节点的距离在增大,相同的角度估计误差会带来更大的定位误差.因此,针对大规模的网络,为了保证节点的定位精度,可以将整个网络划分为若干个小规模的子网络,在每个子网络中,锚节点均提供一次定位服务.



(a)锚节点天线阵元数对定位性能的影响



(b)网络规模对定位性能的影响

图 7 平均定位误差曲线

4 结 论

本文提出一种利用离去角度的无线传感器网络分布式节点定位方法.该定位方法仅需利用节点的无线通信设备,不需要额外的辅助测量装备,而且在定位过程中,节点只需要接收信号,不需要相互协调,位置的估计也不需要相邻节点的辅助,每个节点单独计算各自的位置,不需要进行集中处理,所以本文方法是一种适用于无线传感器网络的分布式定位方法,理论分析和仿真实验均验证了本文方法的可行性.

参考文献:

[1] MAO G, ANDERSON B. Wireless sensor network localization techniques [J]. Computer Networks, 2007,

- 51(10): 2529-2553.
- [2] PRIYANTHA N B, CHARKABORTY A, BALAKRISHNAN H. The cricket location-support system [C] // Proc of MobiCom 2000. New York, USA: ACM, 2000: 32-43.
- [3] HE T, HUANG C, BLUM B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks [C] // Proc 9th MobiCom. New York, USA: ACM, 2003: 81-95.
- [4] BAHL P, PADMANABHAM V N. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system [C] // Proc of INFOCOM. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 775-784.
- [5] 张渭乐,殷勤业,王文杰,等. 无线传感器网络分布式射频频干涉定位方法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(8): 48-52.
- ZHANG Weile, YIN Qinye, WANG Wenjie, et al. Distributed radio interference localization of wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(8): 48-52.
- [6] 张渭乐,殷勤业,韩玮,等. 基于 Doppler 效应的无线传感器网络射频频干涉定位方法[J]. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(8): 909-917.
- ZHANG Weile, YIN Qinye, HAN Wei, et al. Radio interferometric localization of WSNs based on Doppler Effect [J]. Science in China, F: Information Sciences, 2009, 39(8): 909-917.
- [7] NICULESCU D, NATH B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA [C] // Proc of INFOCOM. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1734-1743.
- [8] SHAN Z L, YUM TAK-SHING P. Precise localization with smart antennas in Ad-Hoc networks [C] // Proceedings of IEEE GLOBECOM. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1053-1057.
- [9] PEDERSEN K, MOGENSEN P. A stochastic model of the temporal and azimuthal dispersion seen at the base station in out door propagation environments [J]. IEEE Trans Veh Technol, 2000, 49: 437-447.

(编辑 刘杨)