

文章编号: 1001-0920(2009)02-0231-05

传感器网络中无线电干涉定位系统的多径误差分析

黄艳^{1,2}, 臧传治¹, 于海斌¹

(1. 中国科学院 a. 沈阳自动化研究所, b. 工业信息学重点实验室 沈阳 110016; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 根据多径信号的物理特性, 从理论上推导了镜反射的多径误差简便模型, 基于该模型进行了无线电干涉定位系统的多径误差分析. 讨论了衰减因子、天线高度和水平距离等多径参数对测量结果的影响, 并且进行了仿真计算和分析. 结果表明, 高精度定位必须考虑多径效应.

关键词: 无线传感器网络; 干涉定位; 多径误差; 模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Multipath error analysis of radio interferometric positioning system in wireless sensor networks

HUANG Yan^{1,2}, ZANG Chuan-zhi¹, YU Hai-bin¹

(1a. Shenyang Institute of Automation, 1b. Key Laboratory of Industrial Informatics, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China. Correspondent: YU Hai-bin, E-mail: yhb@sia.cn)

Abstract: A simple model of multipath error is proposed in condition of mirror's reflecting according to the physical characteristic of multipath signal. Then multipath error analysis of radio interferometric positioning system (RIPS) is presented. The relationships between RIPS measurement and multipath parameters including attenuation factor, antenna height and horizontal distance of sensor nodes are studied. The results of simulation analysis verify that high precision localization must take multipath effect into account.

Key words: Wireless sensor networks; Interferometric positioning; Multipath error; Model

1 引言

无线传感器网络 (WSN) 是由大量无处不在、具有通信与计算能力的微小传感器节点构成的自治网络系统, 具有根据环境自主完成监控任务的“智能”, 在军事、工业、家居、环境等诸多领域有着广阔的应用前景. 随着 WSN 研究的深入, 节点精确定位的重要性也越来越突出, 因为节点位置信息是许多 WSN 应用的基础^[1].

根据定位过程中是否测量实际节点间的距离, 把定位算法分为基于距离的和距离无关的算法. 距离无关的定位算法^[2,3] 虽然无需额外硬件, 但是测距误差较大. 为了提高定位精度, 必须采用基于距离的定位算法. 最近几年, 研究人员在这方面的研究取得了初步的成果. Patwari 等^[4] 以及孙佩刚等^[5] 利用

接收到的无线电波的信号强度估算节点之间距离, 无须额外硬件, 但定位误差较大. Stoleru 等^[6] 利用激光测距原理组建了 Spotlight 定位系统, 精度达到厘米级, 但是需要昂贵的中央激光信标、光传感器和感知环境精确的感知地图. Girod 等^[7] 利用声传感器组建了 ENSBox 定位系统, 精度也达到厘米级.

WSN 的定位方法中, 长距离、高精度、低成本定位方法一直是研究人员追求的目标. 上述定位方法要么成本高, 要么定位精度不够理想. Maroti 等^[8] 提出一种适用于 WSN 的无线电干涉测距方法, 进而组建了无线电干涉定位系统 (RIPS), 实现了 WSN 的长距离、高精度定位, 而且无需额外硬件. 但是, 多径效应的存在严重限制了 RIPS 的应用范围^[9].

本文根据无线电信号的传播特性, 考虑信号传

收稿日期: 2007-12-07; 修回日期: 2008-01-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60434030, 60704046, 60725312); 中国科学院知识创新工程人才领域前沿基金项目 (07A3100301).

作者简介: 黄艳 (1981—), 女, 南京人, 博士生, 从事无线传感器网络、信息融合的研究; 于海斌 (1964—), 男, 黑龙江密山人, 研究员, 博士生导师, 从事无线通信、分布控制系统及网络化制造的研究.

播过程中的信号衰减和 RIPS 的定位原理,建立了多径误差简便数学模型,在此基础上进行了 RIPS 的多径误差分析,讨论了衰减因子、传感器节点天线高度和水平距离等参数对多径误差的影响,并且进行了仿真计算和分析。

2 无线电干涉定位系统

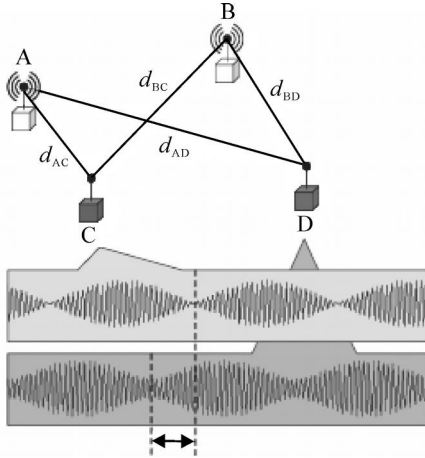


图1 适用于 WSN 的无线电干涉测距方法

已知由 4 个节点 A, B, C, D 组成的系统,如图 1 所示,其中 A, B, D 的位置已知, C 节点的位置未知. 那么如何对 C 节点进行定位呢? 基于传统的干涉理论, Maroti 等人提出一种适用于 WSN 的无线电干涉定位方法, 见图 1. 传感器节点 A, B 发射未经调制的、频率极为接近的标准正弦波, 假设 A, B 发射信号的频率和相位分别为 $f_1, f_2 (f_1 > f_2)$ 和 φ_1, φ_2 . 两个或两个以上的传感器节点 (如 C, D) 接收干涉后的正弦波, 滤去高频部分, 测量低频波 $r(t)$ 的频率和绝对相位偏移量. 根据文献 [8] 中的定理 1, 可得

$$r(t) = k \cdot \log[(a_1^2 + a_2^2)/2 + \tilde{n}(t) + a_1 a_2 \cos(2(f_1 - f_2)t + \varphi_1 - \varphi_2)]. \quad (1)$$

其中: a_1 和 a_2 分别为接收到的 A 和 B 发射信号的强度, $\tilde{n}(t)$ 为带宽有限的高斯白噪声, k 为一常数. 由式 (1) 可知, $r(t)$ 的频率和绝对相位偏移量分别为 $f_1 - f_2$ 和 $\varphi_1 - \varphi_2$.

两个接收传感器节点 C 和 D 的绝对相位偏移量 φ_c 和 φ_d 的差, 即相对相位偏移量, 与节点 A, B, C, D 之间距离的线性组合值 d_{ABCD} 有如下关系^[10]:

$$\varphi_c - \varphi_d = 2 \frac{d_{ABCD}}{c/f} \pmod{2\pi}, \quad (2)$$

$$d_{ABCD} = d_{AD} - d_{BD} + d_{BC} - d_{AC}. \quad (3)$$

其中: $f = (f_1 + f_2)/2$; c 为信号传播速度, 即光速. 从式 (2) 可以看出, 有多个甚至无数个 d_{ABCD} 满足此关系式, 记所有满足式 (2) 的 d_{ABCD} 为 d_{ABCD} 集合. 让 A 和 B 在不同的频率上发射无线电波, 即 f_1, f_2 不

同, 相应的 f 也不同; 根据不同的 f 值, 从式 (2) 可以获得不同的 d_{ABCD} 集合, 理想情况下不同 d_{ABCD} 集合的交集只有一个, 即为由节点 A, B, C, D 的坐标计算出的准确的 d_{ABCD} . 但是因为存在各种噪声 (环境噪声、测量噪声), 不同 d_{ABCD} 集合的交集可能为空集, 此时可找出满足不同 d_{ABCD} 集合间最短距离的 d_{ABCD} , 作为准确 d_{ABCD} 的近似值. 从式 (3) 可以看出, 即使有了准确的 d_{ABCD} 值和 A, B, D 节点的坐标, 也无法直接计算出 C 点的坐标. 可利用基于遗传算法的最优化方法, 计算出待定位节点 C 的坐标.

由式 (2) 可知, 绝对相位偏移量的精度决定了节点间距离线性组合值 d_{ABCD} 的精度, 进而决定了节点位置的精度. 因此, 要分析多径效应等因素是如何影响定位精度的问题, 便可归结为分析多径效应等因素是如何影响相位测量的问题.

3 基于多径误差简便模型的误差分析

3.1 多径效应对 RIPS 的影响

多径效应对 GPS 测量的影响受到了广泛关注^[10, 11]. 多径效应也是 RIPS 中测距误差的两个主要来源之一. 多径误差与天线附近的自然反射面性质、天线的结构和高度等有关. 一般情况下, 多径效应引起的测量误差可分为两种情况: 一种是散射多径, 不存在起反射作用的反射物, 它对测量的影响很小, 一般可不予考虑; 另一种为镜面多径, 它是指反射信号经地面或水面反射后到达接收天线, 即存在起反射作用的反射物, 它的强度远远大于散射信号, 某些情况下会引起很大的多径误差.

多径干扰信号具有以下特性: 1) 由于传播距离长, 多径信号总是比直接信号到达时间晚; 2) 由于在反射过程中能量衰减, 多径信号一般比直接信号功率低, 除非直接信号被遮蔽; 3) 多径延迟信号与直接信号相混合, 引起直接信号的波形失真.

RIPS 中干涉信号接收节点 (如 C 点) 除接收直接来自发射节点 (如 A, B 点) 的信号 (称为直接波) 外, 还接收天线四周的反射面经过一次或多次反射的信号 (称为反射波). 因此, 接收节点得到的信号是直接波和反射波产生干涉后的合成信号. 由于直接波与反射波的路径不同, 导致相位不同. 同时, 两种信号的幅度也不同, 最终使合成信号的波形发生扭曲, 从而使接收节点的绝对相位偏移量出现误差, 进而影响了收发节点间距离线性组合值的精度以及节点位置信息的精度. 本文在 RIPS 多径误差分析时只讨论多径效应对接收节点绝对相位偏移量的影响.

3.2 RIPS 多径误差分析

多径误差的模型随天线附近的地形、地物而异, 很复杂. 由于镜反射情况不仅常见而且影响相对很

大,本文只讨论镜反射的多径误差简便模型,即只有 RIPS 所在地面镜反射的一般情况.下面分析一个多径信号在接收节点处引起的相位变化.尽管大部分情况下,多径信号有多个,但是对一个多径信号的分析已经很有说服力.假设地面平坦并有良好导电性,图 2 为无线电干涉时的镜反射几何图.其中,A 和 B 为两个发射节点,C 为接收节点.天线中心的离地高度分别为 h_A, h_B 和 h_C .O 和 T 分别为 A 和 B 发射信号的反射信号在地面的反射点.C 与 A 和 B 的水平距离分别为 dh_{AC} 和 dh_{BC} .

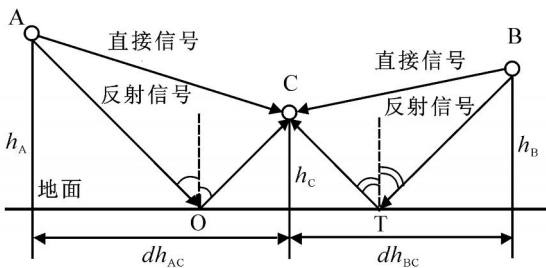


图 2 镜反射几何图

对于发射节点 A,直接信号的路程为

$$d_{AC} = \sqrt{dh_{AC}^2 + (h_A - h_C)^2}, \quad (4)$$

反射信号的路程为

$$d_{AOC} = d_{AO} + d_{OC} = \sqrt{h_A^2 + h_A^2 dh_{AC}^2 / (h_A + h_C)^2} + \sqrt{h_C^2 + h_C^2 dh_{AC}^2 / (h_A + h_C)^2}. \quad (5)$$

直接信号与反射信号之间的相位差为

$$\varphi_{AC} = (d_{AOC} - d_{AC}) \times \frac{2\pi}{\lambda} = (d_{AOC} - d_{AC}) \times \frac{2\pi f_1}{c}. \quad (6)$$

假设发射信号强度随着距离平方的增大而降低.直接信号的强度 S_d 可表示成

$$S_d = A_d / d_{AC}^2, \quad (7)$$

其中 A_d 为距离发射节点 1 m 处的信号强度.反射信号同直接信号相比要经过反射点的衰减,假设反射点不引起信号的相位延迟,幅度衰减因子为 (< 1) ,则反射信号的强度 S_r 为

$$S_r = A_d / d_{AOC}^2. \quad (8)$$

由直接信号和反射信号合成的混合信号与直接信号的相位差就是反射信号引起的多径误差.直接信号、反射信号和混合信号之间的关系如图 3 所示.

图 3 中 S_m 为混合信号, φ_{AC} 为混合信号与直接信号的相位差.由正弦定理可得

$$\frac{A_d / d_{AOC}^2}{\sin \varphi_{AC}} = \frac{A_d / d_{AC}^2}{\sin [\varphi_{AC} - (\varphi_{AC} - \varphi_{AC})]}, \quad (9)$$

解方程(9)可以得到

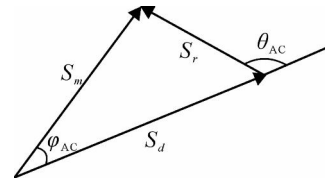


图 3 矢量关系示意图

$$\varphi_{AC} = \arctan \frac{d_{AC}^2 \sin \varphi_{AC}}{d_{AOC}^2 + d_{AC}^2 \cos \varphi_{AC}}, \quad (10)$$

将式(6) 代入(10),可得

$$\varphi_{AC} = \arctan \frac{d_{AC}^2 \sin [(d_{AOC} - d_{AC}) 2\pi f_1 / c]}{d_{AOC}^2 + d_{AC}^2 \cos [(d_{AOC} - d_{AC}) 2\pi f_1 / c]}. \quad (11)$$

对于发射节点 B,同理可得:

直接信号的路程为

$$d_{BC} = \sqrt{dh_{BC}^2 + (h_B - h_C)^2}; \quad (12)$$

反射信号的路程为

$$d_{BTC} = d_{BT} + d_{TC} = \sqrt{h_B^2 + h_B^2 dh_{BC}^2 / (h_B + h_C)^2} + \sqrt{h_C^2 + h_C^2 dh_{BC}^2 / (h_B + h_C)^2}. \quad (13)$$

混合信号与直接信号的相位差为

$$\varphi_{BC} = \arctan \frac{d_{BC}^2 \sin [(d_{BTC} - d_{BC}) 2\pi f_2 / c]}{d_{BTC}^2 + d_{BC}^2 \cos [(d_{BTC} - d_{BC}) 2\pi f_2 / c]}. \quad (14)$$

由式(1) 可知,反射信号引起的发射节点 A,B 干涉信号的绝对相位偏移量的多径误差为

$$\varphi_c = \varphi_c - \varphi_c = (\varphi_{BC} - \varphi_{AC}) - (\varphi_{BC} - \varphi_{AC}) = \varphi_{BC} - \varphi_{AC} =$$

$$\arctan \frac{d_{BC}^2 \sin [(d_{BTC} - d_{BC}) \frac{2\pi f_2}{c}]}{d_{BTC}^2 + d_{BC}^2 \cos [(d_{BTC} - d_{BC}) \frac{2\pi f_2}{c}]} - \arctan \frac{d_{AC}^2 \sin [(d_{AOC} - d_{AC}) \frac{2\pi f_1}{c}]}{d_{AOC}^2 + d_{AC}^2 \cos [(d_{AOC} - d_{AC}) \frac{2\pi f_1}{c}]}. \quad (15)$$

从式(4), (5), (12), (13) 和(15) 可以看出,多径信号的影响与 $f_1, f_2, dh_{AC}, dh_{BC}, h_A, h_B, h_C$ 和 φ 有关. RIPS 中 $f_1 \approx f_2$. 如果 $h_A = h_B = h_C$, 则 $dh_{AC} = dh_{BC}$ 时 $\varphi_c = 0$. 也就是当两个发射节点 A, B 和接收节点 C 高度相同且水平距离相等时,两个发射节点的多径误差可以相互抵消.

本文讨论的是低反射环境下一路镜反射信号对绝对相位偏移量测量的影响.在高反射环境下可能有多路镜反射信号,反射点也可能引起信号的相位延迟,多径误差数学模型更为复杂,难以建模分析.

但可以肯定的是,在高反射环境下,多径效应对相位观测值的影响会更大,多径误差可能成倍增大.

根据接收节点间的相对相位偏移量 $\phi_c - \phi_d$, 计算4个节点之间距离的线性组合值 d_{ABCD} 的过程很复杂,可归结为数学上的丢番图方程组求解问题.多径效应给绝对相位偏移的测量带来了误差,相应的丢番图方程组往往无解或解的误差很大,因此必须设计好恰当的测量方案,设法寻找方程的近似解.多径效应对测距误差影响的理论分析必须建立在对丢番图方程组进行有效求解的基础之上,后续将给出详细分析.

4 仿真与分析

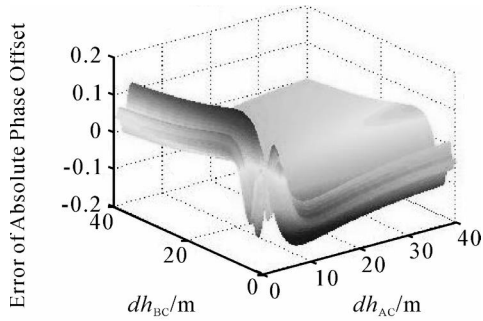
RIPS可以在MICA2平台上运行,由射频芯片CC1000发出标准正弦波.以 $f_1 = 430.1 \text{ MHz}$, $f_2 = 430.100325 \text{ MHz}$ 为例.令 $h_A = h_B = h_C = h$,在不同的衰减因子 α 和天线高度 h 情况下,对绝对相位

偏移量的多径误差 c 随水平距离 dh_{AC} 和 dh_{BC} 的变化进行仿真.图4给出了 $h = 1 \text{ m}$, $\alpha = 0.1, 0.5$ 和 0.7 时 c 随 dh_{AC} 和 dh_{BC} 变化的仿真曲面.图5给出了 $\alpha = 0.5$, $h = 2 \text{ m}, 4 \text{ m}$ 和 7 m 时 c 随 dh_{AC} 和 dh_{BC} 变化的仿真曲面.

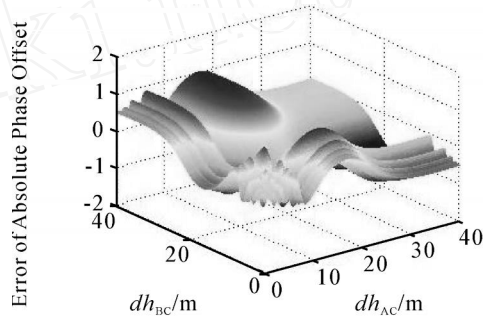
从图4中可以看出,衰减因子 α 对绝对相位偏移量的多径误差 c 的大小起着决定性作用.当 $\alpha = 0.1$ 时, $c_{\text{max}} = 0.1741$; 当 $\alpha = 0.5$ 时, $c_{\text{max}} = 0.9063$; 当 $\alpha = 0.7$ 时, $c_{\text{max}} = 1.3254$.随着 α 的增大,反射信号的强度在增大,引起的多径误差也在增大.

从图5中可以看出,天线高度 h 不同,多径误差 c 的频率也不同. h 较小时 c 的频率也较低, c 随 dh_{AC} 和 dh_{BC} 变化的曲线也相对简单(如 $h = 1 \text{ m}, 2 \text{ m}$). c 的频率随着 h 的增加而增加,同 α 无关.

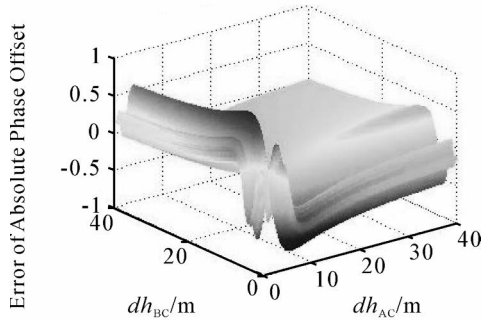
从图4和图5中还可以看出,天线高度较小时



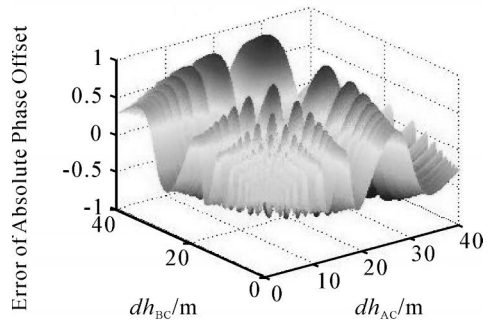
(a) $\alpha=0.1$



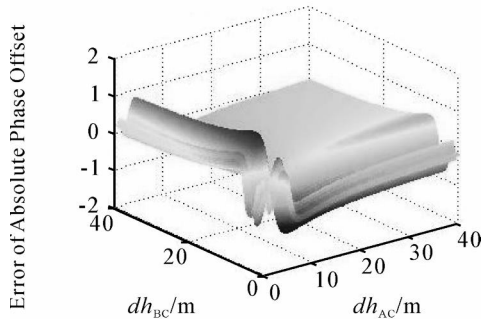
(a) $h=2 \text{ m}$



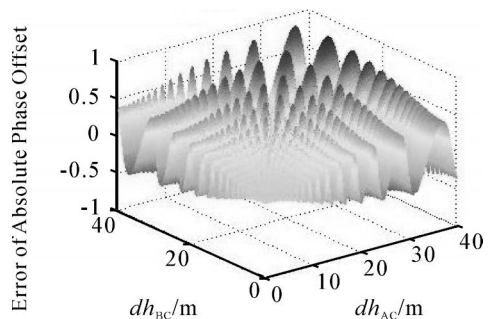
(b) $\alpha=0.5$



(b) $h=4 \text{ m}$



(c) $\alpha=0.7$



(c) $h=7 \text{ m}$

图4 $h = 1 \text{ m}$,不同 α 时 c 随 dh_{AC} 和 dh_{BC} 变化的曲面

图5 $\alpha = 0.5$,不同 h 时 c 随 dh_{AC} 和 dh_{BC} 变化的曲面

($h = 1\text{ m}, 2\text{ m}$), 两个发射节点和接收节点的水平距离 dh_{AC} 和 dh_{BC} 相差较大时多径误差也较大. h 较小时, 可以先用无线电波的信号强度粗略地估算 dh_{AC} 和 dh_{BC} 的大小, 进而选择最佳发射节点对, 以便削弱多径误差. 如果 h 较大, c 随 dh_{AC} 和 dh_{BC} 变化的曲面过于复杂, 则很难选择最佳发射节点对. 实际应用时, h 不宜太大.

5 结 论

RIPS 采用适用于 WSN 的无线电干涉测距方法, 实现了 WSN 的长距离、高精度、低成本定位. 多径效应是 RIPS 中测距误差的两个主要来源之一. 本文推导了镜反射的多径误差简便模型, 在此基础上进行了 RIPS 的多径误差分析. 仿真结果表明, 当所有传感器节点天线高度相同时, 多径误差的大小取决于衰减因子, 频率取决于天线高度; 如果天线高度较小, 两个发射节点和接收节点的水平距离相差较大时多径误差也较大. 实际应用时, 天线高度不宜太大. 后续将进行多径效应对测距误差影响的理论分析, 进而提高 RIPS 的定位精度.

参考文献(References)

- [1] He Tian, Krishnamurthy S, Stankovic J, et al. An energy-efficient surveillance system using wireless sensor networks [C]. Proc of MobiSys '04. Boston: ACM Press, 2004: 270-283.
- [2] Patwari N, A O Hero III, Perkins Matt, et al. Relative location estimation in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2003, 51(8): 2137-2148.
- [3] Niculescu Drago, Nath Badri. DV based positioning in ad hoc networks[J]. J of Telecommunication Systems, 2003, 22(1-4): 267-280.
- [4] Patwari N, A O Hero III. Using proximity and quantized RSS for sensor localization in wireless networks[C]. Proc of WSNA '03. San Diego: ACM Press, 2003: 20-29.
- [5] 孙佩刚, 赵海, 罗玳玳. 智能空间中 RSSI 定位问题研究[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1240-1245.
(Sun P G, Zhao H, Luo D D. Research on RSSI based location in smart space [J]. Chinese J of Electronics, 2007, 35(7): 1240-1245.)
- [6] Stoleru R, He T, Stankovic J A, et al. A high-accuracy, low-cost localization system for wireless sensor networks[C]. Proc of SenSys '05. San Diego: ACM Press, 2005: 13-26.
- [7] Grod L, Lukac M, Trifa V, et al. The design and implementation of a self-calibrating acoustic sensing platform[C]. Proc of SenSys '06. Boulder: ACM Press, 2006: 71-84.
- [8] Maroti M, Kusy B, Balogh G, et al. Radio interferometric geolocation[C]. Proc of SenSys '05. San Diego: ACM Press, 2005: 1-12.
- [9] Kusy B, Ledeczi A, Maroti M, et al. Node-density independent localization [C]. Proc of IPSN '06. Nashville: ACM Press, 2006: 441-448.
- [10] Betaille D F, Cross P A, Euler H J. Assessment and improvement of the capabilities of a window correlator to model GPS multipath phase errors[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(2): 705-717.
- [11] 郝文辉, 张瑜. GPS 测量中多径误差简便模型[J]. 全球定位系统, 2006, 31(1): 12-15.
(Hao W H, Zhang Y. Simple model of multi-channel error in GPS measurement[J]. GNSS World of China, 2006, 31(1): 12-15.)