

一种新型的无线传感器网络三维定位算法

李辉 熊盛武 段鹏飞

(武汉理工大学计算机科学与技术学院 武汉 430070)

摘要 节点定位在无线传感器网络的应用中起着重要作用,一直备受学术界和工业界的关注。现有的大多数定位算法针对平面应用而设计,而现实应用中的无线传感器网络节点往往分布在三维空间中,研究三维空间定位更加符合实际节点的应用情况。针对目前三维空间定位算法的不足,提出了一种新型的无线传感器网络三维定位算法。该算法无需额外的硬件支持,根据未知节点通信范围内锚节点数目,建立空间向量模型进行定位;并且在估计未知节点坐标时,根据该未知节点通信范围的锚节点对其所在位置进行约束。仿真结果表明,该算法通信开销小,提高了节点定位覆盖率和定位精度。

关键词 节点定位,无线传感器网络,三维定位,未知节点,锚节点

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Novel Three-dimensional Localization Algorithm in Wireless Sensor Networks

LI Hui XIONG Sheng-wu DUAN Peng-fei

(School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070 China)

Abstract Node localization is crucial to wireless sensor network and both academia and industry pay much attention to it all the times. Existing localization methods are not suitable for three-dimensional terrains due to their design for planar applications, but in realistic application, the sensor nodes always distribute in three-dimensions, so study on the localization in three-dimensions will be much more in line with the actual application. According to the shortage of some existing algorithms proposed for three-dimensional space, a novel three-dimensional localization algorithm in wireless sensor networks was proposed. This algorithm needs no additional hardware support. This scheme establishes a vector space model based on the number of the anchor nodes from the communication range of unknown node, and when estimating unknown node coordinate, anchors in the unknown node communication region constraint the estimation range of unknown nodes. The simulation results demonstrate that the algorithm is of great advantages in low communication overhead and improving coverage rate of location and location accuracy.

Keywords Node localization, Wireless sensor network, Three-dimensional localization, Unknown node, Anchor nodes

1 引言

无线传感器网络^[1,2]是一种由大量具有无线通信功能的传感器构成的动态、分布式、自组织网络,其目的是通过协作的方式感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并发送给观察者。无线传感器网络具有十分广阔的应用前景^[3],能应用于军事国防、城市管理、医疗卫生、环境监测、抢险救灾、危险区域远程控制等诸多领域,对人们的生活和工作方式产生革命性的影响。

定位技术是传感器网络的一项支撑技术^[4],是传感器网络进行目标识别、监控、跟踪等众多应用的前提,也是传感器网络研究中的热点问题之一。目前绝大多数算法是针对无线传感器的二维网络开展定位,三维空间下的研究十分有限。但在实际中,无线传感器网络节点经常处于三维环境中,如森林、海洋等,因此需要提供节点的三维位置信息。

2 传感器网络节点定位算法研究现状和相关工作

迄今为止,针对不同的问题和应用,人们已经提出多种WSN三维定位算法。文献[5]提出了一种Landscape-3D定位算法,即借助移动的辅助装置LA(Location-assistant)周期性地广播其自身位置信息,网络中未知节点通过接收到的位置信息以及通过RSSI(received signal strength indicator)方法计算的与LA之间的距离来确定自身位置。但Landscape-3D定位算法主要依靠LA装置,LA的健壮性和安全性是定位成败的关键,这提高了LA装置的硬件需求,且算法的即时迭代过程虽然对普通节点的硬件要求不高,但增加了网络的计算量;而离线迭代过程虽然降低了计算量,但对节点的存储能力有较高的要求。文献[6]提出了一种限定空间内的三维定位算法Constrained 3-D,其主要原理是基于传统的三角计算,未知节点依靠测量与邻近锚节点之间的距离来推算自身位置。

到稿日期:2011-08-16 返修日期:2011-11-04 本文受国家自然科学基金(40971233,61170202)资助。

李辉(1984—),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络与智能算法,E-mail:lipeilin1984xyz@163.com;熊盛武(1967—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能计算与自然计算、机器学习与模式识别。

为了解决空间多解问题,该算法假设所有锚节点都部署在同一个平面内,以这个平面为中心向上或向下定位,但是所有未知节点都与之分离的假设限定了算法的应用。文献[7]提出了一种基于球壳交集的 APIS 算法,但其定位覆盖率受锚节点数量变化的影响很大。

针对以上不足,本文提出一种新的距离无关的三维定位算法,它无需测距装置和其他辅助设施,未知节点根据监听到其通信范围内的锚节点消息,建立三维模型来进行定位。最后通过仿真对此三维定位算法进行分析。

3 三维定位算法

3.1 前提假设

为了讨论方便,本文做如下假设:

- (1)每个传感器节点有唯一的 ID,传感器节点随机部署;
- (2)空间信号传输模型为理想的球体;
- (3)所有传感器节点都是一样的,电量和计算能力有限;
- (4)信标节点能够通过 GPS 接收装置或其他手段^[8,9]即时地获取三维坐标信息;

(5)所有传感器节点和锚节点通信半径相同,且是时间同步的。

3.2 三维空间模型

假设图 1 所示的三维无线传感器网络空间中部署了 N 个传感器节点,表示为 $A_i (i=1,2,\dots,N)$ 。第 i 个节点的坐标表示为 $A_i(a_{i1}, a_{i2}, a_{i3})$,其中 a_{i1} 、 a_{i2} 和 a_{i3} 分别表示第 i 个节点的 XYZ 三维坐标;所有 N 个节点的通信半径都设为 R 。此时,如果存在另一个节点 $A_j(a_{j1}, a_{j2}, a_{j3})$,则它们之间的距离为

$$d_{ij} = \sqrt{(a_{i1} - a_{j1})^2 + (a_{i2} - a_{j2})^2 + (a_{i3} - a_{j3})^2} \quad (1)$$

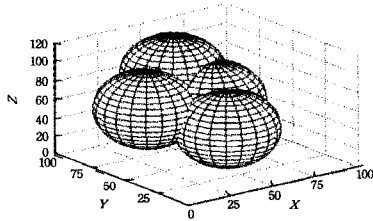


图 1 三维空间模型

3.3 算法描述

首先,所有锚节点向网络广播消息,消息中包括表 $\{ID, X_i, Y_i, Z_i\}$, ID 是锚节点的唯一标识, X_i, Y_i, Z_i 是锚节点的坐标。这样,未知节点监听到其通信范围内的所有锚节点消息。设某未知节点在其通信范围内可参考的锚节点数为 k ,则当 k 大于或等于 4 时,设在未知节点 A 通信范围内的锚节点为 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_k$,取离未知节点 A 最近的 4 个锚节点为 P_1, P_2, P_3, P_4 。

$$[P_1P_2, P_2P_3, P_3P_4] = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 & z_3 - z_2 \\ x_4 - x_3 & y_4 - y_3 & z_4 - z_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据空间向量的理论进行判断如下:

(1)如果 P_1P_2, P_2P_3 和 P_3P_4 的混合积为 0,即式(2)检验为 0,说明 4 个锚节点在同一平面,不构成空间四面体。此时去掉锚节点 P_1, P_2, P_3, P_4 中离节点 A 最远的一个,重新选取除节点 P_1, P_2, P_3, P_4 以外距离节点 A 最近的锚节点

P_5 ,然后返回重新判断。

(2)如果 P_1P_2, P_2P_3 和 P_3P_4 的混合积不为 0,说明未知节点参考的 4 个锚节点构成空间四面体,则有:

引理 1 在直角坐标系,假设空间四面体的顶点 A_i 坐标为 $(x_i, y_i, z_i) (i=1,2,3,4)$,则这个四面体的体积 V 可以表示为:

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{vmatrix} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 & z_3 - z_2 \\ x_4 - x_3 & y_4 - y_3 & z_4 - z_3 \end{vmatrix} \quad (3)$$

引理 2 空间中四面体的体积可由如下行列式表示:

$$V^2 = \frac{1}{288} \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & r_{12}^2 & r_{13}^2 & r_{14}^2 \\ 1 & r_{12}^2 & 0 & r_{23}^2 & r_{24}^2 \\ 1 & r_{13}^2 & r_{23}^2 & 0 & r_{34}^2 \\ 1 & r_{14}^2 & r_{24}^2 & r_{34}^2 & 0 \end{vmatrix} \quad (4)$$

式中, r_{ij} 为四面体顶点 A_i 与 A_j 间的距离。

引理 3 若在体积坐标系 $(A_1A_2A_3A_4)$ 中, M 在直线 M_1M_2 上,且有 $M_1M/MM_2 = \lambda$,则 M 的体积坐标 (v_1, v_2, v_3, v_4) 可用下式计算:

$$v_i = \frac{v_i^1 + \lambda v_i^2}{1 + \lambda}, i=1,2,3,4 \quad (5)$$

式中, v_i^1 和 v_i^2 分别是点 M_1 和 M_2 的体积坐标。

$$\text{设 } A = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{vmatrix}. K(x, y, z) \text{ 为未知节点坐}$$

标, (x_i, y_i, z_i) 是第 i 个锚节点坐标。取该未知节点通信范围内的 4 个锚节点 A_1, A_2, A_3, A_4 ,当这 4 点不在一个平面时,则形成一个四面体,使用引理 1 可以得出未知节点 K 的体积坐标 (v_1, v_2, v_3, v_4) 为:

$$\begin{aligned} v_1 &= V_{KA_2A_3A_4} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{vmatrix} \\ &= \frac{1}{6} (A_{11} + A_{21}x + A_{31}y + A_{41}z) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_2 &= V_{A_1KA_3A_4} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x & x_3 & x_4 \\ y_1 & y & y_3 & y_4 \\ z_1 & z & z_3 & z_4 \end{vmatrix} \\ &= \frac{1}{6} (A_{12} + A_{22}x + A_{32}y + A_{42}z) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} v_3 &= V_{A_1A_2KA_4} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x & x_4 \\ y_1 & y_2 & y & y_4 \\ z_1 & z_2 & z & z_4 \end{vmatrix} \\ &= \frac{1}{6} (A_{13} + A_{23}x + A_{33}y + A_{43}z) \end{aligned} \quad (8)$$

$$v_4 = V_{A_1A_2A_3K} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x \\ y_1 & y_2 & y_3 & y \\ z_1 & z_2 & z_3 & z \end{vmatrix}$$

$$= \frac{1}{6}(A_{14} + A_{24}x + A_{34}y + A_{44}z) \quad (9)$$

因此可以得出:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} & A_{41} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} & A_{42} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} & A_{43} \\ A_{14} & A_{24} & A_{34} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{6} A^* \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于 $A^* = A^{-1}|A|$, 因此式(10)可以表示成:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = VA^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (11)$$

设 $A^{-1} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix}$, 则式(10)可转换为:

$$h_c = G_c Z_c \quad (12)$$

式中, $Z_c = [x, y, z]^T$, $h_c = \frac{1}{V} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}$, $G_c =$

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & d_1 \\ b_2 & c_2 & d_2 \\ b_3 & c_3 & d_3 \end{bmatrix}.$$

由此可以得到:

$$Z_c = (G_c^T G_c)^{-1} G_c^T h_c \quad (13)$$

具体求解方法如图2所示。 $A_1 A_2 A_3 A_4$ 为空间四面体, M 为 $A_2 A_4$ 的中点, N 是三角形 $A_2 A_3 A_4$ 的重心, O 为空间四面体的重心, 因此 A_1, A_2, A_3, A_4 的体积坐标分别为 $(V, 0, 0, 0), (0, V, 0, 0), (0, 0, V, 0), (0, 0, 0, V)$ 。因为 $A_2 M / MA_4 = 1$, 所以通过引理3可以得出 M 的体积坐标为 $(0, V/2, 0, V/2)$ 。又因为 $A_3 N / NM = 2$, 通过引理3可得 $(0, V/3, V/3, V/3)$ 。这样, 重心 O 的体积坐标为 $(V/4, V/4, V/4, V/4)$ 。通过 O 的体积坐标可以得出式(14):

$$h_c = \frac{1}{V} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 \\ 1/4 \\ 1/4 \\ 1/4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

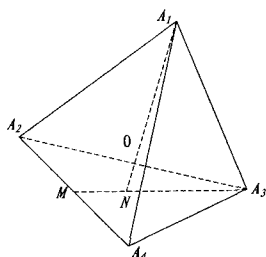


图2 空间四面体

当 K 小于或等于 3 时, 未知节点可参考的锚节点小于或等于 3。此时按文献[7]将锚节点做为球心, 找到一系列最薄的球壳, 最后取这些最薄球壳的交集作为待定位节点最可能存在的小区域。取这个小区域的重心坐标作为未知节点的估

计坐标。

3.4 算法分析

(1) 算法不需要普通节点广播信息, 只需锚节点广播一次, 这样大大节省了能量, 延长了整个网络的生存期。

(2) 算法占用的内存空间与每个普通节点监听到的锚节点个数有关, 记为 n , 则占用内存大小仅为 $O(n)$ 。

(3) 算法利用未知节点通信范围内的锚节点构成的空间四面体来估计坐标, 所需要的只是锚节点的坐标, 并不需要准确测量两点间的距离。它是一种距离无关的定位算法, 不需要计算锚节点的距离, 与已有的将二维 DV-Hop 和 APIT 定位算法改进后引入到三维空间中的定位算法相比, 节省了计算量, 进一步减少了节点能量消耗。

4 实验仿真及分析

为了验证和分析算法的性能, 实验在 MATLAB 的环境下进行^[10,11]。网络中共有 300 个传感器节点, 随机地布设在 $100 \times 100 \times 100 \text{m}^3$ 的三维区域内。实验结果为运行 20 次的平均值。

图3为上述环境下锚节点比例为 20% 的节点随机分布图。图4为在上述节点分布环境下节点通信半径为 30m 时, 各未知节点与其通信范围内锚节点的关系图。图中, 黑色为未知节点, 红色为锚节点, 蓝线表示该未知节点能够监听到的锚节点。

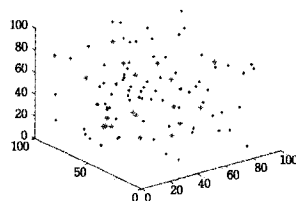


图3 节点随机分布图

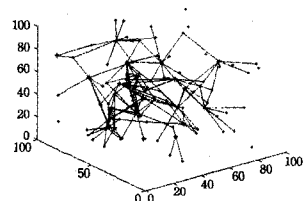


图4 未知节点与锚节点关系图

图5和图6分别示出了节点通信半径、锚节点比例对定位覆盖率的影响。图5锚节点比例为 20%，可以看出，本文提出的算法在通信半径为 40m 时定位覆盖率达到 95%，在通信半径为 50m 时定位覆盖率已经达到 100%。图6中通信半径为 30m，可以看出，锚节点比例为 30% 时定位覆盖率达到 91.71%，而在锚节点比例为 55% 时定位覆盖率已经达到 100%。这主要是本文算法中未知节点只需在其通信范围内获得一个以上锚节点就可估计自身位置，从而提高了定位覆盖率。

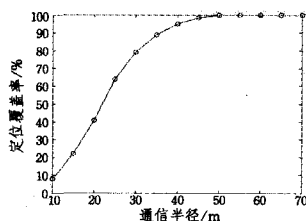


图5 节点通信半径对定位覆盖率的影响

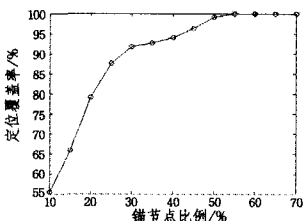


图6 锚节点比例对定位覆盖率的影响

图7示出了实验中节点通信半径 30m、锚节点比例为 30% 时每个未知节点的定位精度。可以看出, 大部分未知节点的定位精度都在 40% 以内。图8示出了锚节点分别为

(下转第 95 页)

表1 CC-LSSVM和GA-LSSVM性能对比

样本集	CC-LSSVM		GA-LSSVM	
	RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
训练集	4.31	4.87%	0.17	0.97%
测试集	11.77	8.56%	0.60	1.93%

结束语 由于受到多种因素的综合影响,网络流量具有时变性、混沌性。针对该特点,本研究提出了一种 GA-LSSVM 的网络流量预测模型。结果表明,相对于传统的预测模型,GA-LSSVM 的网络流量预测结果误差更小,预测精度进一步提高,能更好地满足大规模网络流量预测的实时性需求。

参考文献

- [1] 谢高岗,闵应骅,张大方,等.一个基于实际测试的网络流量模型[J].计算机工程与科学,2001,23(5):51-54
- [2] 高姜明,吴春明,胡大民,等.网络流量预测中的时间序列模型比较研究[J].电子学报,2009,37(11):2353-235
- [3] 孙韩林,金跃辉,崔毅东,等.粗粒度网络流量的灰色模型预测[J].北京邮电大学学报,2010,33(1):7-11
- [4] 侯家利. Elman 神经网络的网络流量预测[J]. 计算机仿真, 2011,28(7):154-156
- [5] Silva C G. Time series forecasting with a nonlinear model and

the scatter search meta-heuristic[J]. Information Sciences, 2008,178(16):3288-3299

- [6] Wang W S, Jin J J, Li Y Q. Prediction of inflow at three gorges dam in yangtze river with wavelet network model[J]. Water Resources Management, 2009,23(13):2791-2803
- [7] 陆锦军,王执铨.基于混沌特性的网络流量预测[J].南京航空航天大学学报,2006,38(2):217-221
- [8] 叶美盈,汪晓东,张浩然.基于在线最小二乘支持向量机回归的混沌时间序列预测[J].物理学报,2005,54(6):2568-2573
- [9] 马红光,李夕海,王国华,等.相空间重构中嵌入维和时间延迟的选择[J].西安交通大学学报,2004,38(4):335-338
- [10] 纪玲玲,林振山,王昌雨,等.最小二乘回归支持向量机对非线性时间序列预测的试验分析[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2009,10(1):92-98
- [11] 吴景龙,杨淑霞,刘承水.基于遗传算法优化参数的支持向量机短期负荷预测方法[J].中南大学学报:自然科学版,2009,40(1):180-184
- [12] 陈果.基于遗传算法的支持向量机时间序列预测模型优化[J].仪器仪表学报,2006,27(9):1080-1084
- [13] 石贵民,林宏基.基于旁路的网络流量监控模式[J].重庆工学院学报:自然科学版,2011,25(9):63-69

(上接第 57 页)

10%~60%时两种三维算法定位精度的比较情况。从仿真结果可知,在节点总数不变的情况下,两种定位算法的定位精度总体上都随锚节点的增加而提高。从图上可以看出,在锚节点比例小于 20%时,APIS 定位算法优于本文算法,主要是因为本文的定位算法在锚节点较少时,在未知节点通信范围内无法获得更多的参考点进行准确估计,随着锚节点数的增加,利用本文的三维定位算法则可以估计出更精确的位置。从总体上看,本文算法的定位精度优于 APIS 定位算法。

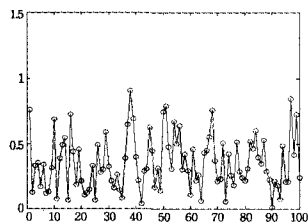


图7 每个未知节点的定位精度

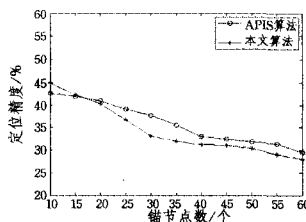


图8 锚节点比例对定位误差的影响

结束语 节点定位在无线传感器网络的应用中起着重要作用,尤其是三维定位有着更广阔的应用前景。本文提出了一种新的无线传感器网络三维定位算法,有效地解决了无线传感器网络的空间定位问题。仿真实验表明,本文的三维定位算法通信开销小,进一步减少了节点能量消耗,且具有较高的定位覆盖率,在网络规模一定的情况下,与 APIS 定位算法相比,定位精度优于 APIS 算法。本文算法仍需要布设一定数量的锚节点来计算校正值,虽然数量不大,但增加了成本。下一步将致力于研究采用单个移动锚节点来对三维空间中未知节点进行定位,使算法更加优化。

参考文献

- [1] Demirkol I, Ersoy C, Alagoz F. MAC protocols for wireless sensor networks; a survey [J]. IEEE Communications Magazine, 2006,44(4):115-121
- [2] 杜治高,钱德沛,刘铁.无线传感器网络中的地址分配协议[J].软件学报,2009,20(10):2787-2798
- [3] Cullar D, Estrin D, Strvstava M. Overview of sensor network [J]. Computer, 2004,37(8):41-49
- [4] 丘岩,赵冲冲,戴桂兰,等.无线传感器网络节点定位技术研究[J].计算机科学,2008,35(5):47-50,63
- [5] Zhang Li-qiang, Zhou Xiao-bo, Cheng Qiang. Landscape-3D: A Robust Localization Scheme for Sensor Networks over Complex 3D Terrains[C]// Proc. of 31st IEEE Conference. South Bend, IN: Indiana Univ., 2006:239-246
- [6] Liang Jian-lin, Shao Jun, Xu Ying, et al. Sensor Network Localization in Constrained 3-D Spaces[C]// Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang, China, 2006:49-54
- [7] 吕良彬,曹阳,高洵,等.基于球壳交集的传感器网络三维定位算法[J].北京邮电大学学报,2006,29(5):48-51
- [8] Sundaramurthy M C, Chayapathy S N, Kumar A. Wi-Fi assistance to SUPL-based assisted-GPS simulators for indoor positioning[C]// IEEE Consumer Communications and Networking Conference(CCCN' 2011). San Antonio, TX, USA, 2011:918-922
- [9] Wang E, Zhang Shu-fang, Zhang Zhi-xian. Research on the Incomplete Constellation GPS Positioning Algorithm by a Combined Altitude and Clock Bias Model[C]// Information Engineering(ICIE). Shenyang, China, 2010:219-222
- [10] 查普曼. MATLAB 编程(第四版)[M]. 北京:科学出版社,2011
- [11] 张葛祥,李娜. MTLAB 仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003