

TDOA/AOA 数据融合算法在铁路场景下的定位应用

赵洪蕾

(北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

摘要:在铁路场景下,基于通信的无线网络定位技术中的定位误差主要来自系统测量误差,且参与定位的基站数目有限。文中结合 TDOA 算法和 AOA 算法中系统测量误差在定位误差中影响的互异特性,并利用铁轨路径方程,采用 TDOA/AOA 数据融合算法,有效地减小了系统测量误差带来的定位影响,提高了定位精度。在仿真实验中,用定位均方根误差作为评价指标,对 TDOA 算法、AOA 算法和 TDOA/AOA 数据融合算法分别在不同条件下进行仿真分析。结果表明,在铁路场景下,本算法的定位均方根误差要小于 TDOA 算法和 AOA 算法,即该数据融合算法具有更好的定位性能。

关键词:铁路场景;TDOA;AOA;数据融合;定位

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)04-0075-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.04.018

Location Application of TDOA/AOA Data Fusion Algorithm in Railway Scenario

ZHAO Hong-lei

(State Key Lab. of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In the railway scenario, based on wireless network location technology, the systematic measurement error leads to the location error, and the number of base stations which can locate is limited. In this paper, a TDOA/AOA data fusion algorithm is proposed, which can effectively reduce the location error and improve the accuracy. In this algorithm, TDOA algorithm, AOA algorithm, and the path equation are combined. In the simulation experiment, compared with TDOA algorithm and AOA algorithm, TDOA/AOA data fusion algorithm has the smaller location root-mean-square error under different simulation conditions. Result shows this algorithm has better location performance.

Key words: railway scenario; time difference of arrival; angle of arrival; data fusion; location

0 引言

在铁路运输中,列车定位系统能够随时随地确定车载台的具体位置,在对列车进行调度指挥、行进安全、运行控制及货物运输等中有十分关键的作用。目前,我国铁路交通中采用的定位技术主要包括轮轴速度传感器、全球卫星定位系统(GPS)、惯性导航系统、查询/应答器、多普勒雷达和基于通信的无线定位技术等^[1-3]。其中,随着3G等通信技术飞速发展及应用,

基于通信的无线网络定位技术由于能充分利用现有的通信网络,且不需进行较大的设备改动,从而节省了大量成本,其覆盖范围日趋广阔。

无线网络定位技术主要包括基于信号到达时间(TOA, time of arrival)定位、基于信号到达强度(SOA, strength of arrival)定位、基于信号到达时间差(TDOA, time difference of arrival)定位、基于信号到达角度(AOA, angle of arrival)定位及混合定位等^[4-7]。目前,随着多天线阵列和智能天线的应用与发展,服务基站能够提供较为准确的AOA测量值,而TDOA定位不需要基站与移动台间进行严格的时间同步、适用面广、精度高。因此,在铁路定位场景下TDOA/AOA数据融合定位方法有很好的应用性能。

收稿日期:2012-07-26;修回日期:2012-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60830001);轨道交通控制与安全国家重点实验室项目(RCS2008ZZ007);中央高校基本科研业务费(2010JBZ008);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0949)

作者简介:赵洪蕾(1986-),女,硕士研究生,研究方向为无线通信与个人通信。

1 铁路场景中定位的情况分析

我国铁路专用数字移动通信(GSM-R)系统中的

定位存在特殊性 & 局限性^[8]:

(1) 基于公网的定位算法, 如 Taylor 算法^[9]、基于迭代思想的算法^[10]、卡尔曼滤波法^[11]等, 至少需要 3 个基站才能实现定位, 且为了减小定位误差, 通常会增加参与定位的基站数目。而在铁路沿线各基站以链状蜂窝式结构分布, 小区较大, 基站间的距离较远, 因此能够参与定位的基站数目十分有限(1 到 2 个)。

(2) 铁路沿线大多比较开阔, 通常情况下, 基站与列车之间的通信信号存在视距(LOS)传播。此时, 系统的测量误差在定位误差中起主导作用。因此, 需要提出能有效减小系统测量误差的定位方案。

(3) 铁路轨道在设计施工时, 有较为精确的勘测数据, 且列车的行进过程只能在铁轨上完成, 而对铁轨路径的测量误差远小于无线定位时产生的误差, 因此可以将铁轨路径作为约束条件来增强定位精度。

在测量误差一定时, TDOA 技术中, 测量误差对离基站较近的列车定位的影响大于离基站较远的情况。而对于 AOA 技术而言, 情况相反, 定位误差与基站和列车间距离成正比, 即对距基站较近的列车的定位性能要优于距基站较远的情况。因此, 可利用此特性, 将分别基于 TDOA、AOA 方法下得到的车载台位置, 采用一种数据融合方法, 得到一个新的车载台, 达到优于单独使用其中任何一种技术的定位效果。

2 铁路场景下 TDOA/AOA 数据融合定位方法

2.1 TDOA 定位方法

2.1.1 TDOA 测量误差模型

设 t_i 为基站与车载台之间信号传播时间(TOA)的测量值, 可表示为:

$$t_i = t_i^0 + n_i, i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

式中, t_i^0 为 LOS 传播下基站与车载台间的 TOA 值; n_i 为服从高斯分布的系统测量误差, 记为: $n_i \sim N(0, \sigma_{n_i}^2)$; M 为参与定位的基站的数目。

在上行链路中, 可利用各基站与第一个基站之间的 TOA 测量值之差获取 TDOA 测量值, 则第 i 个基站与第 1 个基站之间的 TDOA 测量值可表示为:

$$t_{i,1} = t_i - t_1 = (t_i^0 - t_1^0) + (n_i - n_1) = t_{i,1}^0 + n_{i,1}, i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

式中, $t_{i,1}^0$ 为 LOS 传播下基站与车载台间的 TDOA 值; $n_{i,1}$ 为服从高斯分布的系统测量误差, 记为: $n_{i,1} \sim N(0, \sigma_{n_{i,1}}^2)$; M 为参与定位的基站的数目。

2.1.2 TDOA 算法

在铁路场景下, 结合铁轨路径方程, TDOA 定位需两个基站完成定位, 其原理如图 1 所示。

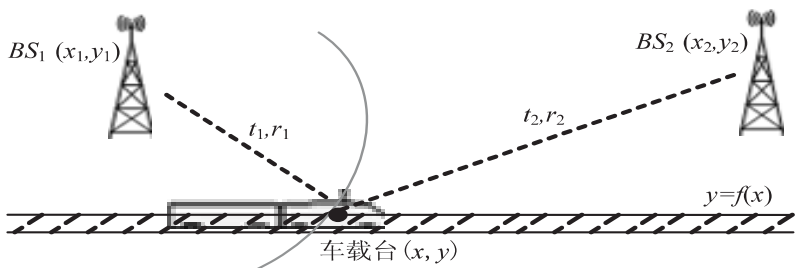


图 1 TDOA 定位原理示意图

设车载台坐标为 (x, y) , 参与定位的基站 BS_i 坐标为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2$, BS_1 为服务基站, 车载台到 BS_2 和 BS_1 之间的距离差为 $r_{2,1}$, 电波传播速度为 c , 根据车载台信号到达各基站的传播时间可建立以下方程:

$$r_i = ct_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (3)$$

$$r_{2,1} = r_2 - r_1 = ct_{2,1} = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (4)$$

结合铁轨路径方程:

$$y = f(x) \quad (5)$$

即可得到车载台位置测量值 (x, y) , 为便于计算与分析, 文中取多个车载台位置测量值的均值 $X_T = (\hat{x}_T, \hat{y}_T)$ 作为 TDOA 算法下的车载台位置估计值。

2.2 AOA 定位方法

2.2.1 AOA 测量误差模型

若第 i 个基站的智能天线或天线阵列测得来自车载台的上行信号的到达角度为 θ_i , 可表示为:

$$\theta_i = \theta_i^0 + m_i, i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

式中, θ_i^0 为 LOS 传播下基站与车载台间的 AOA 值; m_i 为服从高斯分布的系统测量误差, 记为: $m_i \sim N(0, \sigma_{m_i}^2)$; M 为参与定位的基站的数目。

2.2.2 AOA 算法

在铁路场景下, 结合铁轨路径方程, AOA 定位仅需其服务基站即可完成定位。设车载台坐标为 (x, y) , 参与定位的服务基站 BS_1 坐标为 (x_1, y_1) , θ 为服务基站的 AOA 测量值, 可建立以下方程:

$$y - y_1 = \tan(\theta) * (x - x_1) \quad (7)$$

结合铁轨路径方程:

$$y = f(x)$$

即可得到车载台位置测量值 (x, y) , 同理, 文中取多个车载台位置测量值的均值 $X_A = (\hat{x}_A, \hat{y}_A)$ 作为 AOA 算法下的车载台位置估计值。

2.3 TDOA/AOA 数据融合定位方法

2.3.1 最佳线性数据融合

设 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 为分别采用 N 种定位算法

下得到的车载台的位置测量值,它们之间是相互独立的,每种算法的测量值均值和方差可表示为:

$$E[x_i] = k_i, Var[x_i] = \sigma_i^2, i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

文中采用计算较为简单的线性数据融合^[12],结合多个数据结果,通过加权系数的计算,得到一个新的估计值,使其具有比 N 个测量标准差都小的估计偏差,即具有更高的测量精度。

定义 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)^T = \frac{(\frac{1}{\sigma_1^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_N^2})^T}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}}$ 为加

权向量,则车载台的最终位置为:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} k_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (9)$$

2.3.2 TDOA/AOA 数据融合算法

假设分别用 TDOA 和 AOA 算法定位车载台位置估计值的均值和方差为 $X_T = (\hat{x}_T, \hat{y}_T)$ 、 σ_T^2 和 $X_A = (\hat{x}_A, \hat{y}_A)$ 、 σ_A^2 。TDOA/AOA 数据融合算法得到的新的车载台位置估计值为 $X_F = (\hat{x}, \hat{y})$, 则:

$$X_F = \frac{\frac{1}{\sigma_T^2} X_T + \frac{1}{\sigma_A^2} X_A}{\frac{1}{\sigma_T^2} + \frac{1}{\sigma_A^2}} \quad (10)$$

3 TDOA/AOA 数据融合仿真实验

3.1 仿真条件

将 TDOA 测量值和 AOA 测量值分别与铁轨路径方程进行方程联立,得到分别基于 TDOA 算法和 AOA 算法的车载台的位置估计值,并对产生的结果进行线性数据融合,得到最终的位置估计值。

文中通过 Matlab 对 TDOA/AOA 数据融合算法在不同条件下的定位性能进行了仿真,并与 TDOA 算法和 AOA 算法进行了定位性能的比较与分析。铁路场景下的基站分布及参数设置如图 2 所示:

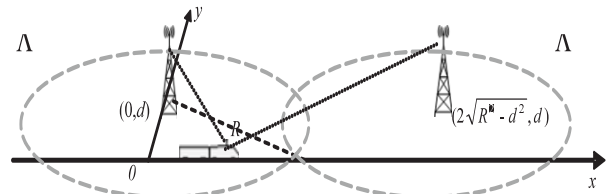


图2 铁路场景下的基站分布及参数设置示意图

其中, d 为基站距铁轨的垂直距离, R 为基站到小区边缘的距离。在仿真过程中,为了方便计算,令 $R = 2d$, 铁轨路径方程为 $y = 0$ 。列车在 $[0, \sqrt{R^2 - d^2}]$ 均匀分布。选取 1000 个位置,每个位置计算 10000 次进

行仿真分析。
定位准确率的评价指标用定位的均方根误差 RMSE 表示:

$$RMSE = \sqrt{E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2]} \quad (11)$$

其中, (x, y) 为车载台的实际位置, (\hat{x}, \hat{y}) 为车载台的估计值。

3.2 仿真结果与分析

(1) 基站距铁轨距离对定位性能的影响。

TDOA、AOA 系统测量误差均取均值为 0 的独立同分布的高斯随机变量,标准差分别为: $0.1 \mu s$ (30m) 和 $0.01 rad$ 。在取不同的基站距铁轨距离 d 的情况下仿真结果如图 3 所示:

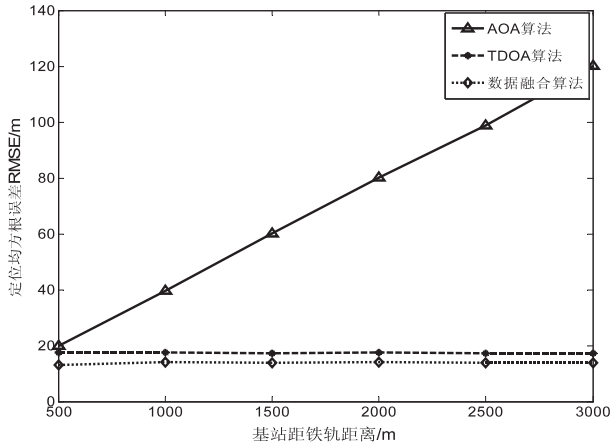


图3 基站距铁轨距离对定位性能的影响

图 3 表明,随着基站距铁轨距离的增大,TDOA/AOA 数据融合算法和 TDOA 算法定位的均方根误差变化不大,这是由于 TDOA 的测量误差在距离越大的情况下对定位精度的影响越小,且有铁轨路径方程的约束,因而这两种算法的定位精度变化不大。而 AOA 定位均方根误差快速增大,这是由于随着基站距铁轨距离的增大,车载台与基站之间的距离也相应变大,此时测角误差导致的定位误差与距离成正比的缘故。由仿真结果还可看出,数据融合算法定位精度高于 TDOA 和 AOA 算法。

(2) TDOA 测量误差对定位性能的影响。

AOA 系统测量误差取独立同分布的高斯随机变量,其均值为 0,标准差为 $0.01 rad$ 。基站距铁轨的距离为 1500m。在取不同的 TDOA 测量误差的情况下仿真结果如图 4 所示:

图 4 表明,随着 TDOA 测量误差的增大,TDOA/AOA 数据融合算法和 TDOA 算法的定位均方根误差也相应变大,AOA 算法的定位均方根误差变化不大。在 TDOA 测量误差大于 90m 后,数据融合算法的定位均方根误差的增大趋势明显变缓,这是由于数据融合算法结合了 TDOA 和 AOA 的定位性能优点,而 AOA

算法定位性能一直无剧烈变化,根据线性数据融合原理,此时它的定位估计值对定位结果的影响变大。同时由仿真结果还可看出,数据融合算法定位精度高于 TDOA 和 AOA 算法。

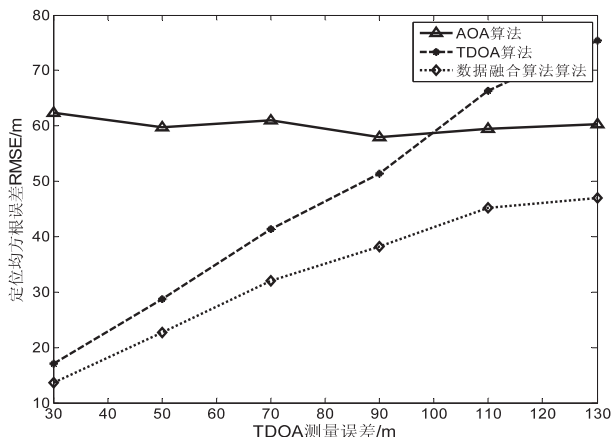


图 4 TDOA 测量误差对定位性能的影响

(3) AOA 测量误差对定位性能的影响。

TDOA 系统测量误差取独立同分布的高斯随机变量,其均值为 0,标准差为 $0.1\mu\text{s}$ (30m);基站距铁轨的距离为 1500m。在取不同的 AOA 测量误差的情况下仿真结果如图 5 所示:

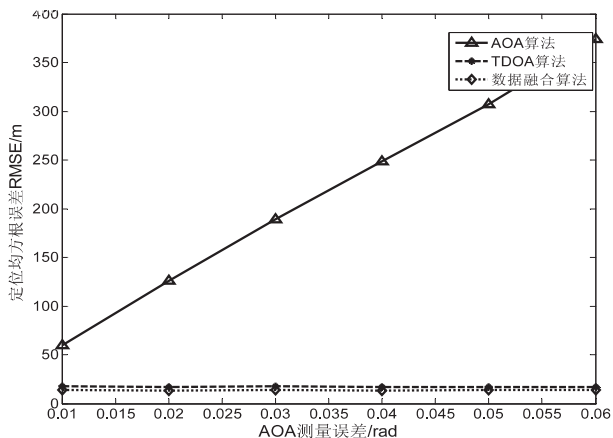


图 5 AOA 测量误差对定位性能的影响

图 5 表明,随着 AOA 测量误差的增大,AOA 算法定位均方根误差迅速变大,而 TDOA/AOA 数据融合算法和 TDOA 算法定位性能变化不大。数据融合算法定位精度高于 TDOA 和 AOA 算法。

4 结束语

文中提出了 TDOA/AOA 数据融合算法在铁路场景下的定位分析与应用。该算法结合 TDOA、AOA 测量数据和铁轨路径方程,利用 TDOA 算法和 AOA 算法中系统测量误差在定位误差中影响的差异性,在铁路场景可利用定位基站数目较少情况下具有较好的定位性能。在不同的仿真条件下,仿真结果表明该算法定位精度和可靠性优于 TDOA 算法和 AOA 算法。

参考文献:

- [1] 张源,张洪宇. 现代铁路列车跟踪与定位技术研究[J]. 铁路计算机应用,2011,20(4):1-3.
- [2] 邓超. 多传感器定位在高速铁路的应用[J]. 铁道通信信号,2006,42(12):28-30.
- [3] 韩亚军. GPS 技术在京沪高速铁路中的应用[J]. 科技信息,2012(11):406-408.
- [4] Sayed A H, Tarighat A, Khajehnouri N. Network-based Wireless Location[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4):24-40.
- [5] Scheuing J, Yang Bin. Disambiguation of TDOA Estimation for Multiple Sources in Reverberant Environments[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2008, 16(8):1479-1489.
- [6] 刘信新,陈鲲. 基于 RSSI 与 TDOA 的混合测距加权定位算法[J]. 计算机与数字工程,2011,39(4):25-28.
- [7] 赵明冬,张军,刘筠筠. 基于 WCDMA 网络的非视距下 TDOA/AOA 混合定位算法研究[J]. 无线互联科技,2011(6):47-49.
- [8] 熊磊,朱刚,谈振辉. 铁路交通中基于通信的无线定位问题分析[J]. 铁道学报,2004,26(1):73-76.
- [9] Foy W H. Position Location Solution by Taylor Series Estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1976, 12(2):187-194.
- [10] 毛永毅. TDOA/AOA 数据融合定位算法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(35):183-186.
- [11] 孟祥飞. 基于扩展卡尔曼滤波算法的无源定位效果分析[J]. 电子科技,2012,25(3):25-27.
- [12] 阚云鹤. 蜂窝网中基于 TDOA 的无线定位算法研究[D]. 大连:大连理工大学,2008.
- [13] 田添. 利用控件 MSComm 实现计算机的串口通信[J]. 数字通信,2012,39(2):95-97.
- [14] 鞠阳,陈锦涛. 用 VB 设计 CDT 循环规约[J]. 江西电力,2005,29(4):27-29.
- [15] 樊群才,樊毅. 基于电力规约的遥测量系数的讨论[J]. 电学学报,2005,20(4):429-436.
- [16] 李启林. 循环式 CDT 规约运动下行通道自动监视的实现[J]. 继电器,2006,34(18):42-46.

(上接第 74 页)

- [11] 田添. 利用控件 MSComm 实现计算机的串口通信[J]. 数字通信,2012,39(2):95-97.
- [12] Verm M P. An ActiveX component to determine fluid flow in a pipeline[J]. Computers & Geosciences, 2010, 36(8):1091-1096.
- [13] Microsoft. MSDN Library Visual Studio 6.0[M]. [s. l.]: Microsoft Corporation, 1998.

- [14] 鞠阳,陈锦涛. 用 VB 设计 CDT 循环规约[J]. 江西电力,2005,29(4):27-29.
- [15] 樊群才,樊毅. 基于电力规约的遥测量系数的讨论[J]. 电学学报,2005,20(4):429-436.
- [16] 李启林. 循环式 CDT 规约运动下行通道自动监视的实现[J]. 继电器,2006,34(18):42-46.

TDOA/AOA数据融合算法在铁路场景下的定位应用

作者: [赵洪蕾](#)
作者单位: [北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044](#)
刊名: [计算机技术与发展](#)
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2013(4)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201304020.aspx