

基于 UKF 滤波的 FDOA 和 TDOA 联合定位跟踪算法

赵 侃,漆德宁

(解放军陆军军官学院,安徽 合肥 230031)

摘 要:三星座时差定位是一个非线性估计问题,当辐射源高程所带来的误差无法忽略时,仍然使用基于 WGS-84 地球模型的时差定位算法对目标进行跟踪定位的方法具有一定的局限性。当数据残缺时,传统的定位算法无法精确估计高程目标位置。为了提高传统的基于三星的时差定位系统的跟踪性能,提出了基于 UKF 滤波的 TDOA/FDOA 联合定位算法对单个目标的位置和速度进行估计。仿真结果证明了 TDOA/FDOA 联合定位算法拥有更好的跟踪性能,以及该算法的稳定性和有效性。

关键词:目标跟踪;时差频差;联合定位;无味卡尔曼滤波

中图分类号:TN96

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)05-0127-03

A Tracking TDOA/FDOA Joint Location Algorithm Based on UKF

ZHAO Kan, QI De-ning

(Army Officer Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: To get the position of target by TDOA in three satellites constellation TDOA location system is a nonlinear location problem. The tri-station time difference of arrival (TDOA) location algorithm based on WGS-84 ellipsoid model has some limitations when the altitude of target can not be ignored. A conventional algorithm, target localization through TDOA measurements cannot estimate target position when the number of TDOA measurements are not enough for localization. In order to enhance the performance of conventional satellite target localization based on three satellites systems, propose a target positioning algorithm using TDOA (Time Difference of Arrival) and FDOA (Frequency Difference of Arrival) joint measurements based on unscented Kalman filter for a single target to compute the position and velocity estimates. The simulation results prove the fact that the joint TDOA/FDOA has better location performance, and illustrates the reliability and effectiveness of this new method.

Key words: target tracking; TDOA/FDOA; joint location; UKF

0 引 言

三星座时差定位系统通过三颗卫星采集到的目标信号到达时间差来进行定位,无需依赖于角度测量就可以实现目标高精度定位。然而,该系统存在两个主要问题。一是多径现象。二是工程应用中可能由于辐射源波束不能同时覆盖三星等诸多因素而造成大量的时差观测数据残缺,即某时刻只有双星或单星接收到信号^[1]。非线性滤波技术是三星座定位系统对目标辐射源进行定位跟踪的一种十分重要的技术,可以有效实现目标定位,跟踪滤波器通过观测辐射源信息对其位置进行估计预测。文献[2]提出了一种时差滤波算

法,该算法无需计算定位点实现了脱离地球模型直接利用时差信息作为量测方程对辐射源进行滤波跟踪。充分利用有限的先验信息,可以有效提高定位精度。

文中提出了基于 UKF 滤波算法的 TDOA 和 FDOA 双星联合定位算法,UKF 直接利用观测到的时差频差信息估计目标速度与位置。因此,仿真结果表明该算法具有更优越的性能。

1 双星 TDOA/FDOA 联合定位原理

在众多的卫星定位方法中,时差定位法比较成熟,在目标跟踪以及卫星定位等领域已取得极为广泛的应用。定位精度高是时差定位的最大优点,但是往往存在时差模糊问题,使它在定位高机动目标时有一定的困难。而频差定位主要是利用接收机和目标之间的相对运动所产生的多普勒频差对目标进行定位的一种定位技术。比起单独时差、频差定位技术还不够成熟,因

收稿日期:2011-10-22;修回日期:2012-02-02

基金项目:安徽省自然科学基金(090412043);中国博士后科学基金(200801493,20080430223)

作者简介:赵 侃(1987-),男,硕士研究生,研究方向为目标定位与跟踪、空间信息处理。

此联合时差频差定位来提高卫星定位的精度。

假设 i 时刻在地固坐标系中, 双星 O_1 、 O_2 分别接收某一在地面上由相对运动的辐射源发射的同一脉冲信号, 可分别得到一组时差 (TDOA) 和频差 (FDOA)^[3,4]。在三维空间中, 每一组时差测量可以确定一个单叶双曲面定位面, 每一组多普勒频差测量同样可以确定一个近似轮胎的曲面, 由于目标处于地面上或接近地面, 以上三个定位面的交点就是目标所处的位置。假设 i 时刻卫星的位置和速度矢量分别为: $s_1 = [x_1 \ y_1 \ z_1]^T$, $\dot{s}_1 = [\dot{x}_1 \ \dot{y}_1 \ \dot{z}_1]^T$, 如果测得的时差值为 Δt_{21} , 那么可得时差方程为:

$$\begin{cases} r_1^2 = (s_1 - u)^T (s_1 - u) = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \\ r_2^2 = (s_2 - u)^T (s_2 - u) = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 \\ \Delta r_{21} = r_2 - r_1 = c \cdot \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

其中, c 为电磁波的传播速率。

当卫星处于近地轨道绕地球运行时, 由于卫星的移动速度非常快, 因此, 产生的多普勒频差也就较大, 则如果多普勒频差值为 Δf_d , 可得到测量方程为:

$$\begin{cases} \dot{r}_1^2 = \frac{(s_1 - u)^T}{r_1} \dot{s}_1 = \frac{(x_1 - x)\dot{x}_1 + (y_1 - y)\dot{y}_1 + (z_1 - z)\dot{z}_1}{r_1} \\ \dot{r}_2^2 = \frac{(s_2 - u)^T}{r_2} \dot{s}_2 = \frac{(x_2 - x)\dot{x}_2 + (y_2 - y)\dot{y}_2 + (z_2 - z)\dot{z}_2}{r_2} \\ \Delta f_{21} = f_2 - f_1 = c \cdot \Delta f_d = \frac{c}{f_c} \Delta f_d \end{cases} \quad (2)$$

其中 f_c 为信号载频。由 (1), (2) 可得 TDOA/FDOA 测量方程:

$$\begin{cases} \Delta t = \frac{\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2}}{c} \\ \Delta f_d = \frac{f_c}{c} \cdot \left(\sqrt{(x_2 - x)\dot{x}_2 + (y_2 - y)\dot{y}_2 + (z_2 - z)\dot{z}_2} - \sqrt{(x_1 - x)\dot{x}_1 + (y_1 - y)\dot{y}_1 + (z_1 - z)\dot{z}_1} \right) \end{cases} \quad (3)$$

为了求解方程, 通常通过代数方法简化上述方程组, 解出目标源的位置, 即首先利用较简单的正球面模型实现粗略定位求解, 再利用牛顿迭代法实现 WGS-84 地球椭球模型^[5,6]下的精确求解。或者采用非线性滤波技术以时差频差方程作为量测方程对目标辐射源

位置进行估计。解算出的定位点可以直接用于定位滤波。但是当目标高程未知时, 引入地球模型会增加很大的系统误差, 而且传统的定位算法必须利用同一时刻观测的时差频差。文中提出的 UKF 时差滤波算法运用到时差频差定位中对地面低速运动的目标进行定位跟踪。而基于 UKF 滤波算法的 TDOA 和 FDOA 双星联合定位算法可以直接利用不同时刻的时差频差, 即对新的估计值进行校正实现数据不足时目标的定位跟踪。

2 状态模型

假设目标速度大小为 v , 各个方向速度分量为 $(v_x \ v_y \ v_z)$, 则取状态变量 $(x \ y \ z \ v_x \ v_y \ v_z)^T$, T 为观测时间间隔, 加速度扰动 $(a_{xk} \ a_{yk} \ a_{zk})$, 有状态方程为:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ z(k+1) \\ v_x(k+1) \\ v_y(k+1) \\ v_z(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ z(k) \\ v_x(k) \\ v_y(k) \\ v_z(k) \end{bmatrix} + \omega_k \quad (4)$$

简记为: $x_{k+1} = \Phi_k x_k + \Gamma_k \omega_k$

式中: 系统噪声

$$\omega_k = \left[\frac{T^2}{2} a_{xk} \ \frac{T^2}{2} a_{yk} \ \frac{T^2}{2} a_{zk} \ T a_{xk} \ T a_{yk} \ T a_{zk} \right]$$

3 测量模型

3.1 TDOA (基于三星平台)

当采用单独时差定位算法时, 由 (1) 可得测量模型如下^[7-9]:

$$Z_{ij} = \sqrt{(x_k - s_i)^T (x_k - s_i)} - \sqrt{(x_k - s_j)^T (x_k - s_j)} + v_{ij,k} \quad (5)$$

其中 Z_{ij} 是卫星 i 与卫星 j 在 t_k 时刻测得的到达时间差。其中 s_i 为卫星 i 的位置向量, s_j 为卫星 j 的位置向量。 $v_{ij,k}$ 是均值为零、方差已知的高斯白噪声, $E[v_{ij,k}] = 0$, $E[v_{ij,k}^2] = \sigma_{R,ij,k}^2$ 。

3.2 TDOA/FDOA (双星平台)

当采用 TDOA/FDOA 进行观测时, 观测模型如下:

$$Y_{ij,k} = [r_{ij}(x_k) \ \dot{r}_{ij}(x_k)]^T + v_{ij,k} \quad (6)$$

其中 $Y_{ij,k}$ 为卫星 i 与卫星 j 在 t_k 时刻, 接收到目标信号的 TDOA/FDOA 测量向量。 $r_{ij}(x_k)$ 为两颗卫星接收到的到达时间差。 $\dot{r}_{ij}(x_k)$ 为多普勒频率差。

则由 (2)、(3) 可得 TDOA\FDOA 观测方程为:

$$\begin{bmatrix} r_{ij}(\mathbf{x}_k) \\ r_{ij}(\mathbf{x}_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_i)^T (\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_i)} - \sqrt{(\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_j)^T (\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_j)} \\ \frac{(\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_i)^T (\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_i)}{\sqrt{(\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_i)^T (\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_i)}} - \frac{(\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_j)^T (\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_j)}{\sqrt{(\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_j)^T (\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_j)}} \end{bmatrix} + \mathbf{q}_k \quad (7)$$

\mathbf{s}_i 和 \mathbf{s}_j 分别是卫星 i, j 观测到的目标速度向量。由以上定义可知, 动态目标系统为非线性, 因此采用 UKF 算法进行滤波跟踪。

4 UKF 滤波步骤

考虑到时差频差方程的非线性特性, 本算法采用 UKF 滤波算法^[10,11], 直接利用观测到的时差频差信息对目标位置和速度估计进行更新。

UKF 算法流程如下:

Step1: 初始化数据。

Step2: 通过非线性函数采样得到 $k+1$ 时刻的 sigma 采样点 χ_{k+1} , 再由 sigma 点求取均值 Z_k^- 和方差 P_k^- 。

Step3: 计算量测采样点 Z_{k+1} 点及其预测值、协方差矩阵 P 。

Step4: 计算状态向量和量测向量的协方差矩阵 S 。

Step5: 计算滤波的增益值 K 。

Step6: 计算状态向量的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}$ 和方差 P_{k+1} 。

Step7: 将得到的状态向量的估计值坐标转换为经纬高 (BLH)。

Step8: 将所得 BLH 坐标中的 H 设置为已知辐射源高程 h 。

Step9: 所得校正后的 BLH 转化为直角坐标, 重复 Step1。

在滤波时首先根据卫星轨道数据选取合适的星下点作为辐射源初始位置, 确定辐射源高程后, 作为已知参数进行滤波估计^[12]。

5 仿真分析与结果

两颗卫星的经纬度位置分别为 $S_1 = (159.64^\circ \text{W}, 36.22^\circ \text{N})$, $S_2 = (159.11^\circ \text{W}, 32.79^\circ \text{N})$, 星间距约 100km, 辐射源目标起始滤波时位于星下点, 地固坐标系中各方向速度分量 $(0, -200, 0)$, 时差测量误差 50ns, 频差测量精度 5Hz, 三星座连续侦收 400s, 每秒侦测一次数据。为了模拟多径现象, 将测量值正确检测概率设为 1 和 0.5, 与单独时差定位算法进行对比。在此条件下进行 UKF 滤波跟踪的 100 次 Monte-Carlo 仿真。对目标的位置估计误差如图 1 和图 2 所示。

实验一: 测量值正确检测概率为 0.5。

实验二: 测量值正确检测概率为 1。

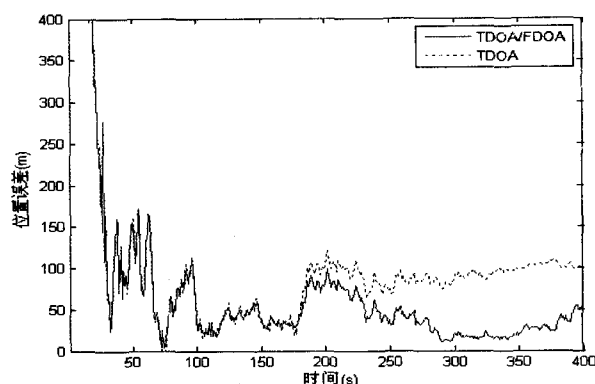


图1 实验一中各算法的估计误差

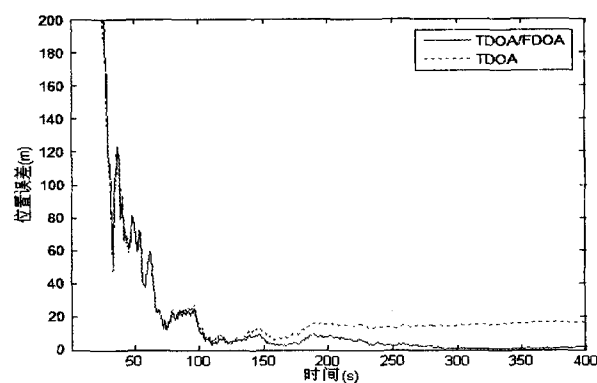


图2 实验二中各算法的估计误差

6 结束语

文中针对目标动态定位算法方面, 以双星时差频差定位系统为基础, 主要讨论运动目标的定位跟踪。将无味卡尔曼滤波运用到时差频差联合定位方法中, 直接估计地面低速运动的辐射源的位置和速度。实验证明, 相对于传统单独时差定位算法, 时差频差联合定位算法有效地提高了定位精度, 收敛速度更快, 滤波跟踪效果更好, 并且在测量值正确检测概率较低的情况下, 本算法仍然具有较高的稳定性。

参考文献:

- [1] Takabayashi Y, Matsuzaki T. Target Tracking Using TDOA/FDOA Measurements in the Distributed Sensor Network[C]//SICE Annual Conference. [s. l.]: [s. n.], 2008: 3441-3446.
- [2] Wu Shilong, Luo Jingqing. Joint FDOA and TDOA Location Algorithm and Performance Analysis of Dual-satellite Formations[C]//2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS). [s. l.]: [s. n.], 2010: 339-342.
- [3] Gillette M D, Silverman H F. A Linear Closed Form Algorithm for Source Localization From Time Differences of Arrival

(下转第 133 页)

ticweb. org/ontologies/family. owl#hasChild ? c) ->(?
b http://www. semanticweb. org/ontologies/family. owl#
hasChild ? c)]

查询语句:

```
String queryString = " PREFIX family: < http://  
www. semanticweb. org/ontologies/family. owl#>" + " se-  
lect ? AnnaChild " + " where { family: Anna family: has-  
Child ? AnnaChild }";
```

输出结果:

| AnnaChild |

=====

| family: John |

同理查询 Kate 的孩子, 输出结果:

| KateChild |

=====

| family: Lucy |

| family: Lily |

| family: James |

| family: Bob |

可见, 通过对 Jena 添加规则后, 原本体模型中蕴含的知识都可以经过推理得出。

5 结束语

文中在创建了家庭的本体模型后, 对模型进行了查询。而查询本身是数据驱动的, 即只能查询存在的数据, 并不具备推理能力。而描述逻辑提供的推理能力是有限的^[10,11], 文中使用 SWRL 对本体模型进行了语义规则的扩展, 结合 Protégé 中内置的推理机 Pellet 对其进行推理, 得出更复杂的关系知识。最后使用 Jena 推理机对模型进行推理。在 Jena 推理的过程中, 重点是编写规则, 有针对 OWL 属性的规则, 如 owl: inverseof 等, 也有自定义规则, 这些规则对新知识的获取

起到了关键作用。但 Jena 在推理的过程中在内存等方面的代价较大, 而在大规模本体中, 很难将大量属性之间的关系全部显式声明; 另外, Jena 要与 SWRL 协同工作需要借助 Pellet, 因此, 有必要引入外部推理机来弥补 Jena 在这些方面的不足^[12]。下一步的研究主要是在 Jena 的基础上借助外部推理机实现大规模本体推理的工作。

参考文献:

- [1] Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. The Semantic Web[J]. Scientific American, 2001, 284(5): 34-43.
- [2] SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML[EB/OL]. 2011-10-01. <http://www.w3.org/Submission/SWRL>.
- [3] 王海林. SWRL 推理规则在平面几何证明中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(9): 218-226.
- [4] 高志强, 潘越, 马力, 等. 语义 Web 原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 王继东, 张瑜, 李娜. 基于本体的语义检索技术研究及实现[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(10): 134-137.
- [6] 李永超, 罗钧曼. 语义 Web 中的本体推理研究[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(1): 101-107.
- [7] Jena-A Semantic Web Framework for Java[EB/OL]. 2011-09-25. <http://jena.sourceforge.net/index.html>.
- [8] 朱创录. 语义 Web 推理的研究与实现[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(1): 273-278.
- [9] Jena 2 Inference Support[EB/OL]. 2011-09-30. <http://jena.sourceforge.net/inference/index.html>.
- [10] 韩亚洪, 刘永革. 本体的查询与推理机制研究[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(9): 82-85.
- [11] 王金环, 李宝敏. 基于本体 DL 的语义推理研究[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(11): 94-100.
- [12] 宋晓峰, 唐发根. 基于本体的推理技术的相关研究[EB/OL]. 2011-09-09. <http://www.paper.edu.cn>.

(上接第 129 页)

- [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008(15): 124-125.
- [4] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 223-226.
- [5] 谢恺, 钟丹星, 邓新蒲, 等. 一种空间时差定位的新算法[J]. 信号处理, 2006, 22(2): 129-135.
- [6] 钟丹星, 邓新蒲, 周一宇. 一种基于 WGS-84 地球面模型卫星测时差定位算法[J]. 宇航学报, 2003, 24(6): 569-573.
- [7] 彭朝阳, 叶浩欢, 柳征, 等. 一种数据残缺时的三星时差定位目标跟踪算法[J]. 航天电子对抗, 2009(5): 7-8.
- [8] So H C, Hui S P. Constrained Location Algorithm Using TDOA Measurements[J]. IEICE Trans on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2003(12): 3291-3293.
- [9] 张健, 李鹏. 改进的无线传感器网络 TDOA 定位算法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(16): 117-118.
- [10] 谢恺, 周一宇, 薛模根, 等. 基于平方根 UKF 的自由段目标跟踪算法[J]. 国防科技大学学报, 2007(4): 112-113.
- [11] Xiong K, Zhang H Y, Chan C W. Performance evaluation of UKF based nonlinear filtering[J]. Automatica, 2006, 42(2): 261-270.
- [12] Zhao Huibo, Pan Quan. PF-UKF-RJMCMC Approaches for Radar Target-tracking[C]//International Conference on Information Technology and Computer Science. [s. l.]: [s. n.], 2009: 373-374.