

一种基于协同定位技术的集体检测算法

袁 凡 黄海生 李 鑫

(西安邮电大学电子工程学院 陕西 西安 710121)

摘 要 针对城市峡谷环境中普通接收机无法实现定位的问题,提出一种基于协同定位技术集体检测卫星的算法。用 MATLAB R2016a 模拟 GPS L1 频段的卫星信号,建立数学模型验证该算法的可行性,并分析其计算复杂度和定位精度。实验结果表明,算法复杂度降低了至少 90%,将城市峡谷环境中的定位精度提升至 4 m 以内,有效地弥补了接收机定位场景的缺陷。

关键词 城市峡谷环境 协同定位 集体检测

中图分类号 TP3 TN961

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.09.040

A COLLECTIVE DETECTION ALGORITHM BASED ON COLLABORATIVE POSITIONING

Yuan Fan Huang Haisheng Li Xin

(School of Electronic and Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, Shaanxi, China)

Abstract Aiming at the problem that ordinary receivers cannot achieve the positioning in an urban canyon environment, this paper proposes an algorithm for collective detection of satellites based on collaborative positioning technology. MATLAB R2016a was used to simulate the satellite signal of the GPS L1 frequency band, and a mathematical model was established to verify the feasibility of the algorithm. The computational complexity and positioning accuracy were analyzed. The results show that the complexity of the algorithm is reduced by at least 90%, and the positioning accuracy in the urban canyon environment is improved to within 4 m. It effectively makes up for the shortcomings of the receiver positioning scene.

Keywords Urban canyon Collaborative positioning Collective detective

0 引 言

“城市峡谷”是一种类似于自然峡谷的都市环境,以街道切割周围稠密的高层建筑物。随着 GPS 技术的普及和电子产品的更新换代,越来越多的手持设备中集成了 GPS 模块,用户在城市峡谷中的定位需求与日俱增。城市中高层建筑物的形状、厚度等使信号强度衰减约 10 ~ 25 dB^[1]。普通接收机是针对 -130 dBm 标称信号开发的,城市峡谷环境中信号的恶化程度超出了普通接收机的处理范围^[2],信号难以被正确处理并应用于定位过程。

国内外研究人员针对该问题提出了多种解决方案,主要有以下三方面:

(1) 信号处理的方案。消除强信号的干扰^[3-5],捕获和跟踪弱信号时,弱信号的自相关结果与强信号和弱信号的互相关结果非常相近,可能导致误捕获。采用加长积分时间的方法捕获弱信号^[6-9]。相干-差分相干积分方法,将相干积分结果进行差分处理,延长积分时间^[10-13]。用全比特法避免数据相位变化引起积分损耗。

(2) 地图匹配方案。待定位用户事先存储城市 3D 建筑模型,结合星历数据对城市峡谷街区内每个位置的卫星可见性进行估计,并和实际接收情况进行捆绑匹配,判断该位置是否可能是用户的位置^[14]。地图匹配方案典型的应用还包括图像匹配法、3D 射线模型预测法、指纹定位技术等。定位精度随着卫星数目的增多而提高。此方法的主要缺陷是需要建立城市的

3D模型并存储,增大了工作量和建设成本。

(3) 协同定位方案^[15-17]。协同定位首次提出是应用于多机器人定位研究,通过多个未知节点之间相互传递信息、互相测向、测距等功能辅助待定位节点完成定位。节点可以是基站、伪卫星、无人机、移动手机等,都是直接或者间接利用测距的方法得到待定位用户的位置。

本文提出一种基于协同定位方案集体检测卫星信号的算法。辅助接收机传输给待定位用户的辅助信息包括卫星位置、伪距和辅助接收机位置。卫星位置用于计算在东北天坐标系(East_North_Up, ENU)中卫星的方位角和高度角;伪距和辅助接收机位置作为算法中的初始伪距和初始位置。以一定步长对辅助接收机周围3 km区域进行遍历,利用辅助接收机和待定位接收机收到卫星信号空间相关性,对每一过程点的伪距进行估计。根据伪距与码相位的关系,得到每一过程点处伪距对应的码相位并作为本地C/A码的码相位,与接收到卫星信号做相关运算。所有卫星相关结果之和作为本算法的集体检测量,最大集体检测量对应的空间区域为待定位用户所在位置。本方法有以下突出的创新点:(1)传统的捕获方法是在码相位/多普勒域进行二维搜索,而本文提出的算法是在空间区域中进行;(2)只利用捕获结果,不需要对卫星信号跟踪和解算,减小了定位算法的计算复杂度;(3)将所有卫星的相关结果之和作为集体检测量,用强信号增强了弱信号。

1 集体检测原理

图1为城市峡谷中接收场景图,待定位接收机(Mobile Station, MS)位于城市峡谷环境中,建筑物的遮挡使卫星信号衰减。辅助接收机(Reference Station, RS)处于开阔区域接收状况良好,RS通过通信链路把辅助信息发送给MS。

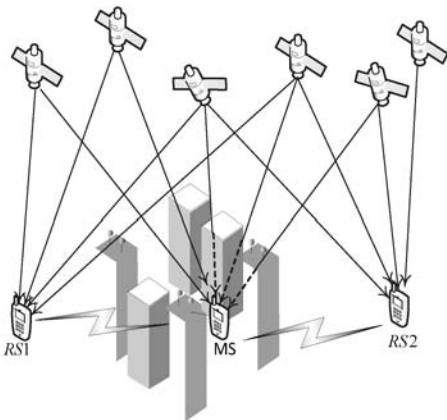


图1 城市峡谷中接收场景图

图2为一颗卫星接收场景示意图,其中 φ_s 、 h_g 分别为卫星在ENU坐标系中的方向角和高度角;以RS为坐标原点,MS'为用一定步长将有效区域进行划分后得到的一系列过程点,位置改变量为 $(\Delta N, \Delta E, \Delta U)$, ΔB 是接收机的时钟差。

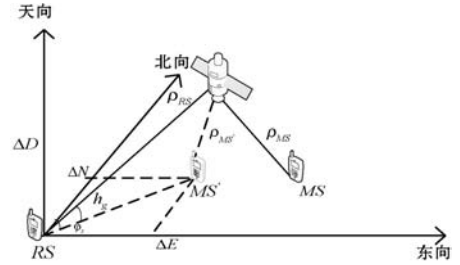


图2 一颗卫星接收场景示意图

产生的伪距改变量 $\Delta\rho$ 为:

$$\Delta\rho(\Delta N, \Delta E, \Delta U, \Delta B) = -\cos(\varphi_s)\cos(h_g)\Delta N - \sin(\varphi_s)\cos(h_g)\Delta E + \sin(h_g)\Delta U + c \cdot \Delta B \quad (1)$$

过程点MS'处估计的伪距为:

$$\rho'_{MS} = \rho_{RS} + \Delta\rho \quad (2)$$

式中: ρ_{RS} 为RS处的伪距。根据码相位与伪距的关系^[18],逆推出码相位为:

$$\hat{\tau}_k = \left[\left([t_u]_{T_{code}} + 1 \right) - \frac{[\rho'_{MS,k}]_{c \cdot T_{code}}}{c \cdot T_{code}} \right]_{T_{code}} \cdot N_{code} \quad (3)$$

式中: t_u 表示接收机接收信号时间; T_{code} 表示C/A码的周期为1 ms; c 为光速; N_{code} 为每周期码片数1 023; $\rho'_{MS,k}$ 表示在估计位置处第 k 颗卫星的伪距。

在传统的捕获过程中,用本地复制信号与接收机收到信号做相关。相关结果如下:

$$S(\hat{\tau}_k) = |s \cdot \hat{v}(\hat{\tau}_k)|^2 = |a_k v_k(\tau_k) \cdot \hat{v}(\hat{\tau}_k) + \tilde{n} \cdot \hat{v}(\hat{\tau}_k)|^2 \quad (4)$$

式中: $\hat{v}(\hat{\tau}_k)$ 是本地复制信号; $\hat{\tau}_k$ 为式(3)估计的码相位并且作为本地C/A码的码相位。接收机收到的信号为:

$$S = \sum_{k=1}^N a_k v_k(\tau_k) + \tilde{n} \quad (5)$$

式中: $v_k(\tau_k)$ 表示第 k 颗卫星的信号; a_k 是信号幅度; \tilde{n} 表示噪声; N 为MS可视卫星数目; τ_k 表示接收到卫星信号的码相位。单颗卫星的相关结果为:

$$D_{ind}(\hat{\tau}_k) = |S(\hat{\tau}_k)|^2 \quad (6)$$

式中: $S(\hat{\tau}_k)$ 为第 k 颗卫星的相关结果。当图2中有多个卫星时,所有单颗卫星相关结果之和为集体检测量:

$$D_{CD}(\Delta N, \Delta E, \Delta U, \Delta B) = \sum_k D_{ind}(\hat{\tau}_k) \quad (7)$$

集体检测量取最大值时的本地C/A码相位即为

接收到卫星信号的码相位,此时式(1)中 $\rho'_{MS,k}$ 对应的空间位置即为 MS 的位置。

按照预先确定的步长遍历搜索区域中每一个过程点 MS',并估计该点对应的集体检测量。RS、MS 所有共视卫星的集体检测量是以空间区域中某一位置坐标为自变量的函数,用强信号增强了弱信号,得到一个更加明显的相关峰值。当集体检测量取得最大值时,相应的空间位置即为 MS 位置。由于 RS 和 MS 位于同一水平面上,所以可以忽略 MS 垂直方向的坐标估计。

2 集体检测算法流程

图 3 为集体检测算法的流程。

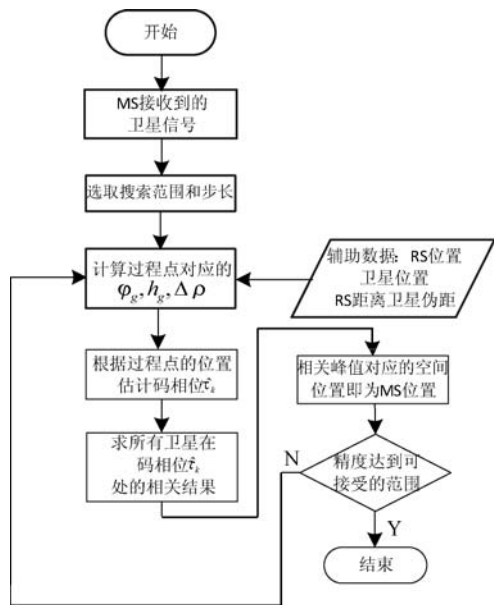


图 3 集体检测算法流程图

选取搜索范围和步长,计算该范围中每点处的 $\Delta\rho$,根据码相位与伪距的关系,逆推出伪距与本地信号码相位之间的关系。相关结果取得最大值时的码相对应搜索区域中的位置即为 MS 的估计位置。若位置精度未达到可接受的范围,则缩小搜索区域和步长重复上述步骤。直到位置精度达到可接受的范围,完成 MS 的位置估计。

3 实验结果分析

城市环境中的 MS 有不同的接收场景,MS 和 RS 的共视卫星数目大于两个,并且 MS 接收到有一个强信号的场景,都可以用该算法确定出 MS 的位置信息。利用手机软件 Android GPS Test 观察头顶卫星的可见性和信号稳定性,根据观察结果确定对 1 号、9 号卫星进行模拟。本文算法中,卫星位置是 RS 求解出来的

已知量,仿真中直接给出卫星以 RS 为原点的 ENU 坐标系中的位置。在 MATLAB R2016a 中模拟 GPS L1 频段的卫星信号,并建立如图 4 所示的数学模型验证算法的可行性。卫星 1 的位置为 $[500, 73, 20\ 000]$ km,卫星 9 的位置为 $[-1\ 000, 473, 20\ 000]$ km。在 MATLAB R2016a 中模拟 MS 收到的卫星 1 和卫星 9 的 1 ms 数据,等效噪声带宽为 1 kHz,对应的噪声基地为 -144 dBm。

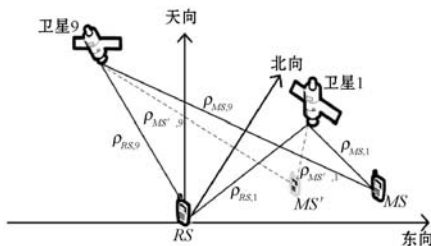


图 4 仿真数学模型

根据城市峡谷环境对卫星信号的衰减程度,确定 1 号卫星信号强度为 -130 dBm,对应的信噪比为 14 dB;9 号卫星信号强度为 -150 dBm,对应的信噪比为 -6 dB。对于实际接收到的卫星信号,城市建筑物的结构不得不考虑多径信号的影响,处理时需要消除多径干扰。在实际场景中还需考虑 MS 的时钟偏差,可以利用时间驯服的思想得到,辅助接收机 RS 的时间是精准同步的。RS 间隔固定时长发送时间给 MS,把 MS 时间驯服到与 GPS 时间同步。

3.1 定位复杂度分析

不同精度的搜索范围和步长如表 1 所示。

表 1 不同精度搜索范围设置

搜索	粗精度	中精度	细精度
搜索范围/m	3 000	1 000	100
搜索步长/m	100	10	2
计算单元	961	10 201	2 601

在 3 000 m 范围内,以 100 m 为搜索步长。当确定出 MS 可能存在的范围时,缩小搜索区域并以 10 m 为步长做中精度的搜索,将 MS 可能存在的位置确定到更小的范围。再对该范围以 2 m 为步长做细精度的搜索得到 MS 的估计位置。相比于直接使用最小步长搜索,减小了计算量。不同方法计算量的对比如表 2 所示。

表 2 不同方法计算量对比

搜索方案	计算单元	复杂度优化
本文方法	13 763	91.79%
传统捕获方法	167 772	*

本文算法相比传统捕获算法复杂度降低了 91.79%。

3.2 精度分析

1 号卫星在空间区域的相关结果如图 5 所示。9 号卫星在空间区域的相关结果如图 6 所示。卫星 1、卫星 9 的集体检测结果如图 7 所示,可以看出图中有一个明显的尖峰,峰值对应的空间区域即为待定位接收机所在区域。

1 762 m 范围内,N 方向的位置在 1 216 ~1 220 m 范围内。对 100 组 1 ms 卫星数据进行实验得到 E、N 方向的定位误差如表 3 所示。

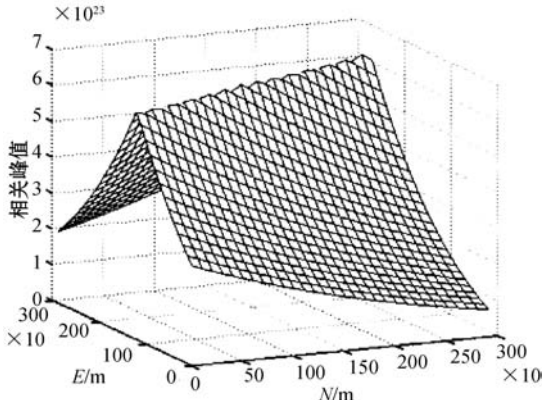


图 5 卫星 1 相关结果

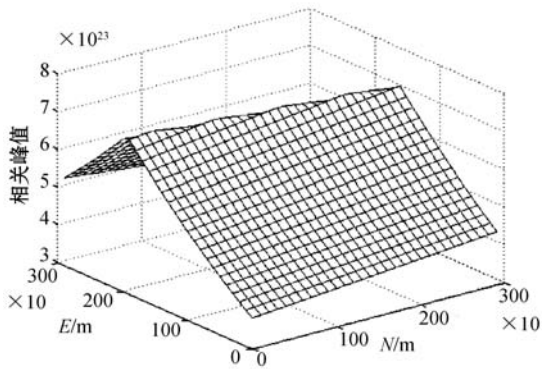


图 6 卫星 9 的相关结果

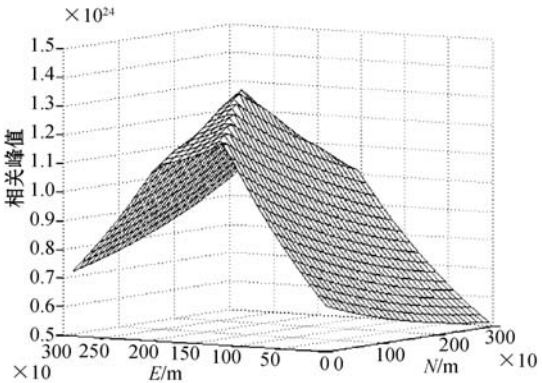
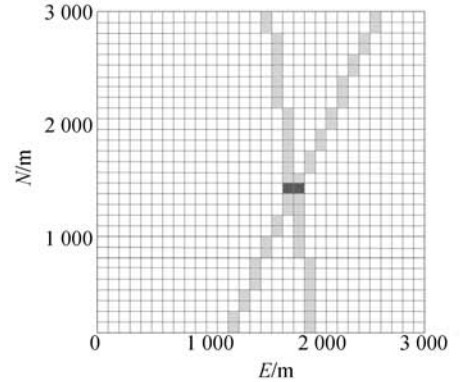
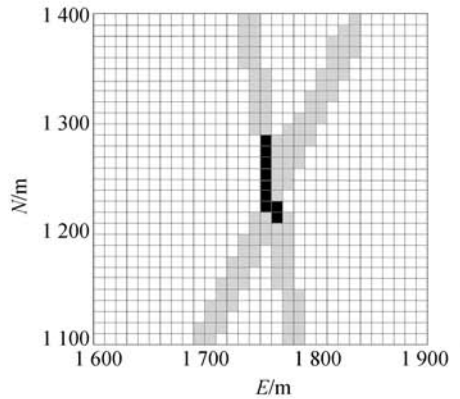


图 7 集体检测结果

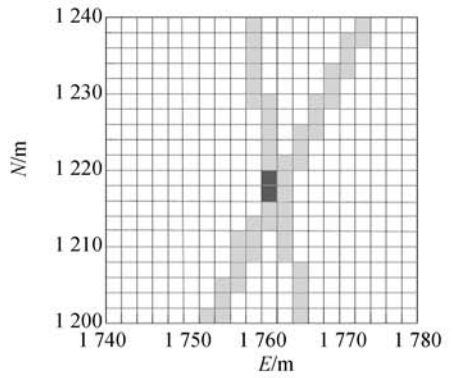
按照表 1 中不同精度做集体检测,结果如图 8 所示。图 8 有两部分明显的阴影区域是因为实验过程中使用了两颗卫星,两条阴影区域交叉的部分为估计出 MS 可能存在的位置。MS 真实位置为 [1 760,1 220],定位结果如图 8(c) 所示,E 方向的位置在 1 760 ~



(a) 粗精度



(b) 中精度



(c) 细精度

图 8 不同精度的定位结果

表 3 算法定位误差 m

方向	50%	95%
N	2	4
E	1.3	2

误差的来源主要有以下两方面:

(1) 伪距改变量 $\Delta\rho$ 的计算引入 17.18 ~0.70 m 的误差。

(2) 搜索过程中以一定长度为步长,两颗卫星的交叉部分为一个区域而不是一个准确的点。

4 结 语

针对城市峡谷环境中卫星信号衰减了10~25 dB,普通接收机无法实现定位的问题,提出一种基于协同定位技术的集体检测的算法,把卫星信号的相关结果对应到空间区域中。只需要通过相关结果确定出卫星位置,避免了跟踪和解算的过程。算法将计算复杂性降低了至少90%,定位误差从几十米甚至几百米^[19]缩减到了4 m以内,有效地实现了用户在城市峡谷环境中的定位。

参 考 文 献

- [1] 李基武. 弱信号环境下 GNSS 信号的捕获与跟踪算法研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2017.
- [2] 丁继成. 弱信号条件下 GPS 接收机关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- [3] 段华华,巴晓辉,陈杰. 互相关干扰下微弱 GPS 信号检测方法[J]. 数据采集与处理,2015,30(3):677-682.
- [4] Liu J F, Liu J Y, Zhang T T, et al. Application of cross-correlation algorithm in radio weak signal detection [C]//2009 Seventh Annual Communication Networks and Services Research Conference. IEEE,2009.
- [5] 汪志坤. 基于互相关干扰消除的 GPS 弱信号捕获算法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2016.
- [6] 邢永强,黄海生,曹新亮. 北斗 B1 MEO/IGSO 卫星信号的差分捕获算法[J]. 电子技术应用,2018,44(6):90-93.
- [7] 赵焕焕,黄海生,张伟,等. 北斗接收机的互相关抑制算法研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2015,35(6):39-43.
- [8] 崔绍龙,姚相振,方金云. 一种 GPS 微弱信号的优化捕获算法仿真分析[J]. 系统仿真学报,2014,26(1):112-118.
- [9] Yang L, Tian J. Analysis and compare of weak GPS signal acquisition algorithms [C]//IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing (CCWMC 2009),2009.
- [10] Meng W X, Ma R F, Han S. Optimum path based differential coherent integration algorithm for GPS C/A code acquisition under weak signal environment [C] //2010 First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications,2010.
- [11] Wu L J, Lu W J, Yu D S. Research of weak signal acquisition algorithms for high sensitivity GPS receivers [C]//2009 Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics & Electronics (PrimeAsia),2009.
- [12] Tian S J, Pi Y M. Research of weak GPS signal acquisition algorithm [C]//2008 International Conference on Communications, Circuits and Systems,2008.
- [13] Elders-Boll H, Dettmar U. Efficient differentially coherent code/Doppler acquisition of weak GPS signals [C]//Eighth IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications-Programme and Book of Abstracts (IEEE Cat. No. 04TH8738),2004.
- [14] 夏景平,胡辉,颜瑜军,等. 基于高分值加权的改进阴影匹配定位算法研究[J]. 全球定位系统,2017,42(6):1-8.
- [15] 张昌庆,黄劲松. 利用蓝牙信号强度的端端协同定位[J]. 导航定位学报,2019,7(2):18-24.
- [16] 蒋悦,马永涛,宫霄霖,等. 基于非度量多维标度的室内多标签协同定位算法[J]. 传感技术学报,2018,31(10):1553-1558.
- [17] 屈耀红,张峰,谷任能,等. 基于距离测量的多无人机协同目标定位方法[J]. 西北工业大学学报,2019,37(2):266-272.
- [18] 谢钢. GPS 原理与接收机设计 [M]. 电子工业出版社,2009.
- [19] 殷鹏,何玉庆,韩建达,等. 基于多分辨率粒子滤波的全局协同定位方法[J]. 中国科学:技术科学,2019,49(1):87-96.

(上接第245页)

- [13] Liang J, Wang F, Dang C, et al. A group incremental approach to feature selection applying rough set technique [J]. IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, 2014, 26(2):294-308.
- [14] 赵小龙,杨燕. 基于邻域粒化条件熵的增量式属性约简算法[J]. 控制与决策,2019,34(10):1-13.
- [15] Jing Y, Li T, Fujita H, et al. An incremental attribute reduction method for dynamic data mining [J]. Information Sciences, 2018, 465:202-218.
- [16] Xie X, Qin X. A novel incremental attribute reduction approach for dynamic incomplete decision systems [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2018, 93:443-462.
- [17] Teng S, Lu M, Yang A, et al. Efficient attribute reduction from the viewpoint of discernibility [J]. Information Sciences, 2016, 326(1):297-314.
- [18] Luo C, Li T, Zhang Y, et al. Matrix approach to decision-theoretic rough sets for evolving data [J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 99:123-134.
- [19] 闫鑫,景运革. 矩阵增量属性约简算法[J]. 小型微型计算机系统,2018,39(6):1245-1249.
- [20] Tan A, Li J, Lin Y, et al. Matrix-based set approximations and reductions in covering decision information systems [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2015, 59:68-80.