

基于 FFT 的微弱 GPS 信号捕获算法

陈 学¹, 徐建华², 叶甜春¹, 李思超¹

(1 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 2 杭州中科微电子有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘 要: 提出了一种新的基于 FFT 的微弱 GPS 信号快速捕获算法, 通过块叠加运算和 FFT 结果的循环移位, 改进了传统的 FFT 捕获方式, 大大降低捕获的计算量, 缩短微弱信号长时间积分的捕获时间. 分析了算法的理论模型, 并利用真实信号在 Matlab 平台上对算法进行仿真实验. 仿真结果表明, 在积分时间不超过 150ms 的情况下, 该算法能成功捕获信号强度低于 -150dBm 的微弱 GPS 信号.

关键词: GPS; 捕获; 块叠加; FFT; 循环相关

中图分类号: TN96

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)03-0098-04

FFT-Based Acquisition for Weak GPS Signals

CHEN Xue¹, XU Jian-hua², YE Tian-chun¹, LI Si-chao¹

(1 Institute of Microelectronics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 Hangzhou Zhongke Microelectronics Co., Ltd, Hangzhou 310053, China)

Abstract: This paper presented a new FFT-based parallel acquisition algorithm, which modified the traditional FFT-based acquisition, cut down the computation and shortened the acquisition time needed for long time integration in weak GPS acquisition through block addition and circular shift of FFT, then detailed the theory model of algorithm and simulated the algorithms with real GPS signal on Matlab platform in the later part of this paper. The experiment results showed that signals below -150dBm could be acquired successfully with integration time less than 150ms.

Key words: GPS; acquisition; block addition; FFT; circular correlation

1 引言

NAVSTAR(卫星导航定时测距)全球定位系统是基于卫星的全球导航系统. GPS 接收机利用卫星信号到达时间来确定用户的位置、速度和时间信息. 其原理是测量信号从卫星发射到用户接收所经历的时间. 在进行位置测量之前, 接收机必须完成至少 4 颗卫星信号的捕获和跟踪, 捕获是其中重要的环节.

近年来随着导航技术的深入发展和广泛应用^[1-2], 用户对其要求也越来越高. 无论在高楼林立的城市峡谷, 还是树木遮挡的森林公路, 甚至室内等接收信号十分微弱的环境下, 实现迅速定位成为商用接收机的一个显著性能指标. 为了提高捕获灵敏度, 传统的串行相关捕获算法累加多个码周期时长的数据, 这将导致运算量和时间成本的急剧增加. 因

此, 开发一种新的弱信号快速捕获算法, 提高微弱信号下接收机的捕获能力成为改进接收机性能的首要工作.

2 GPS 信号捕获原理

GPS 接收机定位过程可以分为捕获、跟踪、电文解码和定位解算四个阶段. 对于采用扩频体制的 GPS 系统来说, 捕获就是使本地复现码和卫星发射码的相位差对准小于一个码片宽度, 同时使载波频率相互对准, 得到粗同步的码相位和载波多普勒频率. 捕获过程可以分为两步: 粗捕获和精捕获. 精捕获是利用粗捕获得到的初始码相位和多普勒频率进一步提高复现码相位和载波多普勒同接收信号的对准精度, 使码片对准误差在四分之一码片之内, 多普勒频率误差小于几十赫兹(跟踪环的拉入范围).

精捕获之后的GPS信号可以直接进入锁相环和伪码跟踪环路,实现本地复现信号对输入信号的精确同步,进而从跟踪结果中输出导航定位信息。

通过GPS天线接收的卫星信号,经过下变频和A/D采样后得到中频数字信号如下:

$$y_k = A d(t_k - \tau) c[(1 + \eta)(t_k - \tau)] \cdot \cos[\omega_{IF} t_k - (\omega_d t_k + \phi)] + v_k \quad (1)$$

式中, y_k 表示在 t_k 采样时刻的输入中频信号, A 表示信号幅度, d 表示 50Hz 的导航数据比特, c 表示 1.023MHz 的 C/A 码, τ 表示接收时刻的 C/A 延迟,即为待测码相位, ω_{IF} 表示数字中频, ω_d 表示载波多普勒频率, ϕ 表示初始载波相位, v_k 表示 t_k 时刻采样的窄带高斯噪声,方差为 σ^2 . η 代表由多普勒引起的码速率变化, $\eta = \omega_d / (2\pi \times 1.57542 \times 10^9)$.

GPS 信号捕获的实质是利用接收信号观测值 $y_0, y_1, \dots, y_{N-1}$ 估计码相位延迟 τ 和载波多普勒频率 ω_d . 传统串行捕获方法使用本地码发生器产生一个码相位上的伪随机码与数字中频信号相乘实现信号解扩,解扩后的信号再与载波数控振荡器(Carrier numerical controlled Oscillator)产生的两路正交载波信号分别相乘,之后两路信号分别通过积分清零滤波器(Integrate & dump filter)做相干积分,结果和预设门限比较以判定是否捕获到信号. 为了提高捕获灵敏度,一般会在 M 个码周期(即 M ms)上相干积分,然后再做 K 次非相干积分,如图 1 所示,因此传统捕获方法一次搜索二维平面上的一个码相位和多普勒频率需要 $M \cdot K$ ms.

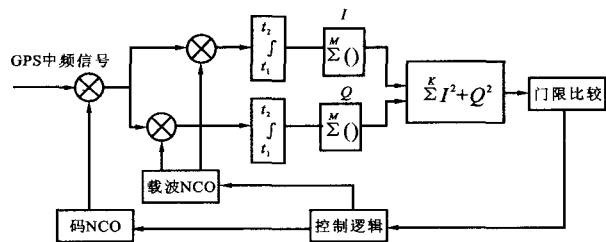


图1 传统串行捕获算法结构图

假定码相位延迟和载波多普勒频率的估计值分别为 $\hat{\tau}$ 和 $\hat{\omega}_d$, 则一个码周期上的相关运算过程如下^[3]:

$$I = \sum_{k=0}^{N-1} y_k c[(1 + \hat{\eta})(t_k - \hat{\tau})] \cos[(\omega_{IF} - \hat{\omega}_d) t_k] \quad (2a)$$

$$Q = - \sum_{k=0}^{N-1} y_k c[(1 + \hat{\eta})(t_k - \hat{\tau})] \sin[(\omega_{IF} - \hat{\omega}_d) t_k] \quad (2b)$$

将式(1)代入式(2a)和式(2b)可得

$$I = 0.5 A \cdot d \cdot N \cdot R(\hat{\tau}) \cdot \text{sinc}(\Delta\omega_d T_{\text{accu}}/2) \cdot \cos[\Delta\omega_d t + \phi] + v_I \quad (3a)$$

$$Q = -0.5 A \cdot d \cdot N \cdot R(\hat{\tau}) \cdot \text{sinc}(\Delta\omega_d T_{\text{accu}}/2) \cdot \sin[\Delta\omega_d t + \phi] + v_Q \quad (3b)$$

上两式中积分后的高频分量已被滤除, N 的取值满足使整个采样序列 $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{N-1}$ 刚好跨越一个 C/A 码周期(1ms), $R(\tau)$ 是伪随机码的自相关函数, 如图 2 所示, $\Delta\omega_d = \hat{\omega}_d - \omega_d$, $\text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x}$, T_{accu} 是相干累加时间, v_I 和 v_Q 是互不相关的零均值高斯白噪声, 方差为 $N\sigma^2/2$.

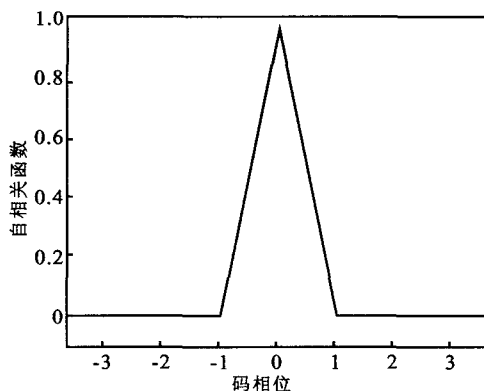


图2 伪随机码的自相关函数

捕获过程通过在码相位 $\hat{\tau} = \tau_0, \tau_0 + \Delta\tau, \tau_0 + 2\Delta\tau \dots \tau_0 + (N-1)\Delta\tau$ 和载波多普勒频率 $\hat{\omega}_d = \omega_{d\min}, \omega_{d\min} + \Delta\omega_d, \omega_{d\min} + 2\Delta\omega_d, \dots, \omega_{d\max}$ ($\Delta\omega_d$ 为多普勒频率搜索步长) 组成的二维空间中搜索使 $P(\hat{\tau}, \hat{\omega}_d) = I^2 + Q^2$ 最大来实现. 由于卫星运动速度和本地晶振频偏, 通常多普勒搜索区间在 ± 10 kHz. 考虑到伪随机码的自相关特性和多普勒频率误差的影响, 当频率搜索间隔 $\Delta\omega_d$ 选择 $1/2 T_d$ Hz, 码相位搜索间隔为半个码片时, 从式(3)得到的平均相干积分损失不超过 3dB. 因此, 搜索整个二维平面需要 $(1.023/0.5) \times (20000/50 + 1) = 83886$ 次.

3 基于块叠加的FFT快速捕获算法

3.1 快速捕获算法模型

传统的捕获算法, 在 1ms 的积分时间下, GPS 信号的平均捕获时间约为 42s. 为了捕获像室内环境下的微弱 GPS 信号, 必须通过增加积分时间来提高相关运算后的信噪比. 一般有相干和非相干积分两种方式提高捕获灵敏度, 相干积分比非相干积分有更高灵敏度增益. 在相干积分的情况下, 信号捕获时间

与相干积分次数的平方成正比. 对于传统的捕获算法, 要得到额外 3dB 的信噪比增益, 积分时间需要增加一倍, 同时多普勒搜索间隔减半, 这样平均捕获时间变成 148s. 为了捕获微弱 GPS 信号, 需要一种快速计算相干积分的方法. 文中提出基于块叠加的 FFT 快速捕获算法用于解决这一问题, 从而提高捕获的灵敏度.

假设当前搜索二元格子为 $(\tau_0 + i\Delta\tau, \hat{\omega}_d)$, 一个码周期的相关运算可以重新写做

$$w(i, \hat{\omega}_d) = w(\tau_0 + i\Delta\tau, \hat{\omega}_d) = \sum_{k=0}^{N-1} y_k c_{k-i} \exp[-j(\omega_{IF} - \hat{\omega}_d)t_k] \quad (4)$$

式中, $c_{k-i} = c[(1 + \hat{\eta})(t_k - \tau_0 - i\Delta\tau)]$, 表示从初始码相位 τ_0 对伪随机码序列 c 以 $\Delta\tau$ 为间隔循环移动 i 次 ($\Delta\tau$ 是码相位的搜索间隔).

因为码相位上的相关运算是一种圆周卷积运算, 根据圆周相关的性质^[4], 可以利用 FFT 运算加速码相位轴上的相关过程, 即利用 FFT 同时计算一个频率点 $\hat{\omega}_d$ 上所有码相位的相关值. 式(4)可以重写为

$$w(i, \hat{\omega}_d) = \text{IFFT}\{\text{FFT}(y_k \exp[-j(\omega_{IF} - \hat{\omega}_d)t_k]) \cdot * \text{FFT}(c_{k-i})^*\} \quad (5)$$

式中, $\cdot *$ 表示逐点相乘运算, $\text{FFT}(c_{k-i})^*$ 表示 FFT 运算后求共轭.

GPS 信号 C/A 码是 1ms 周期的伪随机序列, 并且序列的 FFT 运算是一种线性运算, 即两个序列的 FFT 变换之和等于序列和的 FFT 变换. 所以, 对去多普勒频率后的信号先以码周期为间隔做块叠加运算, 然后对叠加后的序列再做 FFT 运算, 这样可以节省 M 次相干积分所需的 FFT 运算次数并且保持 FFT 运算的点数不变. 如图 3 所示, 基于块叠加的快速捕获过程如下:

(1) 来自 A/D 的 GPS 中频信号乘以本地正交载波信号, 做去载波多普勒运算.

(2) 以一个码周期的采样点数 N ($N = f_s \times T_{C/A}$, f_s 是采样频率) 为周期, 对去载波后的信号做块叠加运算. 若积分时间为 M ms, 则形成每个采样

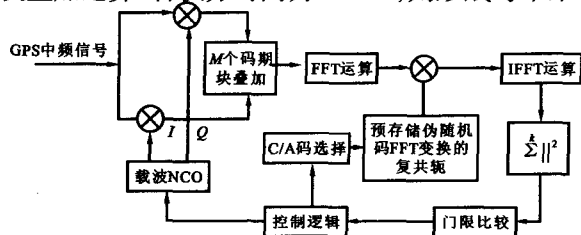


图3 基于块叠加的FFT快速捕获算法结构图

点累加 M 次的 N 点序列.

(3) 叠加后的 N 点序列 FFT 运算后与预存储 C/A 码序列 FFT 变换的复共轭做逐点相乘.

(4) 所得 N 点序列做 IFFT 运算, 结果取模的平方.

(5) 对随后的输入信号重复上述步骤(1)~(4), 结果做 K 次非相干累加.

所得结果为 M 次相干积分和 K 次非相干积分在所有码相位上的相关值, 即 $P(\hat{\tau}, \hat{\omega}_d) = \sum_{k=1}^K | \sum_{m=1}^M w(i, \hat{\omega}_d) |^2$. 如果相关值中的最大值超过预设门限, 则认为捕获成功, 否则调整本地载波频率进行下一轮搜索.

3.2 改进的FFT快速捕获算法

文中对 FFT 捕获的一个改进即为上述块叠加方式代替相干积分, 减少 FFT 运算的次数而保持运算点数不变. 对 FFT 捕获的另一个改进来自于多普勒频率轴上的并行搜索, 根据 FFT 的调制特性^[4], 若新搜索的多普勒频率 $\hat{\omega}'_d = \hat{\omega}_d - l * (2\pi * \frac{1}{T_{C/A}})$, 即频率相差 1kHz 的整数倍, 则 $\text{FFT}(y_k \exp[-j(\omega_{IF} - \hat{\omega}'_d)t_k])$ 相当于 $\hat{\omega}_d$ 频率下的 $\text{FFT}(y_k \exp[-j(\omega_{IF} - \hat{\omega}_d)t_k])$ 结果循环左移次.

因此, 多普勒频率轴上的搜索可以压缩成 1kHz 频率范围内的混频和 FFT 运算, 然后通过循环移位实现整个频率轴上的搜索. 具体实现算法通过将 1kHz 频率范围根据多普勒搜索间隔划分为 P 个频点, 依次对输入信号进行混频, 然后通过循环移位并行搜索 $\hat{\omega}'_d, \hat{\omega}'_d - 2\pi * 1000, \hat{\omega}'_d + 2\pi * 1000, \hat{\omega}'_d - 2\pi * 2000, \hat{\omega}'_d + 2\pi * 2000 \dots$ 频点上的所有码相位.

考虑到卫星信号上调制有 50Hz 数据比特, 相干积分时间不能超过 20ms (即 $L \leq 20$), 否则相邻数据位的符号跳变导致信号抵消, 捕获灵敏度降低. 因此, 文中做弱信号捕获时采取将连续的 20ms 信号分为 10ms 两段, 分别对两段进行相干块叠加, 然后对间隔的 10ms 信号做非相干积分, 则其中一段肯定不会发生数据比特翻转, 最后取相关值更大的数据段作为捕获结果.

4 算法实现及仿真结果

文中仿真数据采集自 sprirent 公司的 GPS 信号发生器, 其提供可选择的卫星信号和功率水平. 由

GPS 射频前端采集得到的信号参数如下:

- 中频:4.092MHz;
- 采样率:16.368MHz;
- 量化位数:2bit;
- 信号强度: - 144dBm (23 号卫星) 和 - 150dBm(19 号卫星).

两颗卫星信号功率相差 6dB,所以忽略强弱信号间的互相关干扰^[5].根据文中提出的改进的块叠加 FFT 捕获算法,分别对 23 号卫星和 19 号卫星进行信号捕获.由于实际中捕获之前并不知道信号的信噪比,利用噪声统计特性设定捕获判定门限在不同环境下并不通用.用后处理信噪比^[6]表示最大相关值和其他码相位上的相关均值的比值,若后处理信噪比超过捕获门限即认为成功捕获到卫星信号.文中设置 14dB 的后处理信噪比作为捕获门限,此时捕获的虚警概率小于 10^{-5} .

图 4 和图 5 分别是第 23 号和 19 号卫星捕获结果图,前者捕获采用相干积分时间 $L = 10\text{ms}$,非相干积分次数 $K = 5$,总积分时间为 50ms,后者相干积分时间 $L = 10\text{ms}$,非相干积分次数 $K = 15$,总积分时间为 150ms.根据捕获结果可以得到 23 号卫星的后处理信噪比为 24dB,最大相关值处的码相位和多普勒频率分别为 13 534(即 13 534/16 368 为 23 号卫星的初始码相位)和 - 1 530Hz,19 号卫星的处理信噪比约为 17dB,最大相关值处的码相位和多普勒频率分别为:8 116 和 650Hz.从三维捕获图中也可

以看到一明显相关峰值,代表 GPS 信号的码相位和载波多普勒频率.

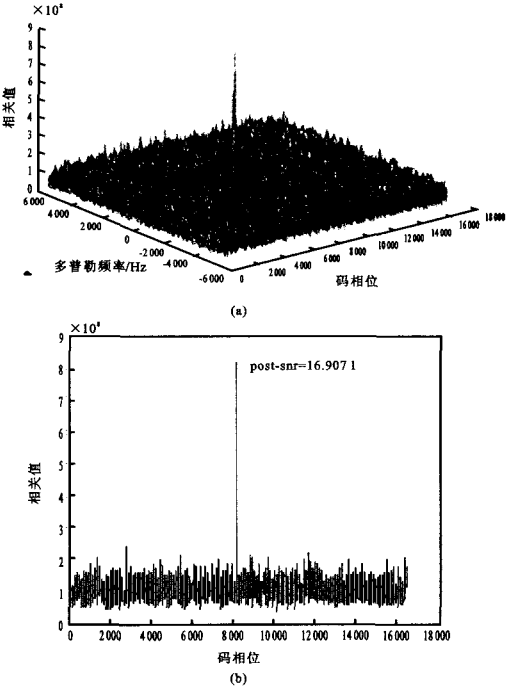


图 5 第 19 号卫星捕获结果及相关峰

表 1 中 N 表示一个码周期的采样总数.由实验证明,改进的 FFT 算法通过块叠加运算和 FFT 变换的循环移位减少了 FFT 运算的次数,从而有效降低了弱信号捕获长时间积分所需的运算量.

表 1 M 次相干积分和 K 次非相干积分时
捕获算法性能比较

捕获算法比较	捕获时间/ms	计算量
传统串行捕获算法	$N * M^2 * K * 40$	$O(N^2 * M^2 * K * 40)$
传统 FFT 捕获算法	$M^2 * K * 40$	$O(N * \log_2^N M^2 * K * 40)$
改进的 FFT 算法	$M^2 * K * 2$	$O(N * \log_2^N M * K * 2)$

5 结束语

文中提出了一种新的基于块叠加的 FFT 快速捕获算法,统的捕获算法相比较,该算法在相同捕获灵敏度的条件下,大大减小了捕获的计算量.真实 GPS 信号的仿真结果表明,在捕获积分时间不超过 150ms 的情况下,新的捕获算法可以较好捕获信号强度低于 - 150dBm 的 GPS 信号.

参考文献:

[1] 赵祥模,马静,陶涛.基于 GPS 的多车载终端系统中数据整合方法[J].微电子学与计算机,2008,25(8):195 - 198.
(下转第 105 页)

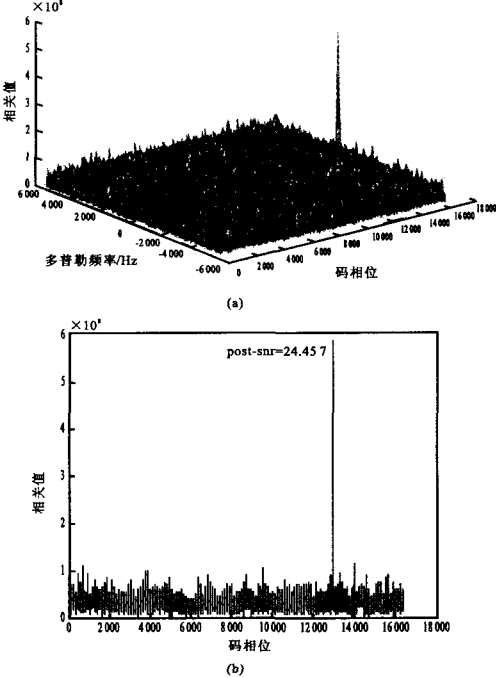


图 4 第 23 号卫星捕获及相关峰

q_n),AE)表示将子条件 $q_4,q_5,\cdots,q_n$ 发送给音频搜索引擎 AE 后的检索结果集.它们将返回给用户与检索条件相匹配的文本、图像和音频等媒体信息.

检索系统分别得到 $\text{Res}(q_2,\text{TE})$ 、 $\text{Res}((q_1,q_3),\text{PE})$ 和 $\text{Res}((q_4,q_5,\cdots,q_n),\text{AE})$,然后对其进行整合,获得结果集为 $\text{Res}(q_2,\text{TE}) \cup \text{Res}((q_1,q_3),\text{PE}) \cup \text{Res}((q_4,q_5,\cdots,q_n),\text{AE})$,最终的检索结果集 $\text{RES}(Q)$ 是所有检索结果集的并集.

5 仿真实验

假设查询子条件的数量为 3,从网页或报纸上随机选取 3 个语义关键词,如“北京,奥运,志愿者”,表 3 是对检索结果作一比较.

表 3 实验结果

组号	文本检索条件	图像检索条件	查全率/%	查准率/%
1	北京,奥运	志愿者	100	100
	北京,志愿者	奥运		
	奥运,志愿者	北京		
2	志愿者	北京,奥运	69	81
	奥运	北京,志愿者		
	北京	奥运,志愿者		
3	北京,奥运,志愿者		33	75

显而易见,用于文本检索的关键词数量越多,返回的相关信息就越多,检索效果就越好.假设以第 1 组信息为参考值,实验结果表明:文中所采取的查询策略和检索方法能够有效地改善查全率,查准率也能够保持在 75% 以上.

6 结束语

在分析各种媒体基于语义信息检索的基础上,给出跨媒体检索系统结构、跨媒体搜索引擎及其查

询分解策略和检索结果融合方法.使得基于低层特征相似性的单一媒体检索发展到基于语义相关性的跨媒体信息检索.该研究领域的发展不仅会创造巨大的和社会和经济效益,而且其应用前景也非常广泛,如多媒体数据库、数字图书馆、智能搜索引擎、综合医疗信息系统以及军事指挥系统等领域将得到广泛的应用.

参考文献:

[1] Zhuang Yueting, Yang Yi, Wu Fei. Mining semantic correlation of heterogeneous multimedia data for cross-media retrieval[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2008,10(2): 221-229.

[2] 曹加恒,李晶,蔡朝晖,等.新一代多媒体技术与应用[M].武汉:武汉大学出版社,2006: 379-410.

[3] 袁薇,高森.综合语义与颜色特征的图像检索技术[J].微电子学与计算机,2006,23(1):36-39.

[4] Ahmet Ekin, Murat Tekalp A, Rajiv Mehrotra. Integrated semantic-syntactic video modeling for search and browsing[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2004,6(6): 839-851.

[5] Umapathy K, Krishnan S, Jimaa S. Multigroup classification of audio signals using time-frequency parameters[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2005,7(2): 308-315.

作者简介:

蔡平女,(1960-),讲师.研究方向为多媒体检索、数据库技术等.

王志强男,(1963-),副教授.研究方向为多媒体与虚拟现实等.

傅向华男,(1976-),副教授.研究方向为信息检索等.

(上接第 101 页)

[2] 徐雅斌,李昕,张晓宇.基于 GPS 的车辆监控系统的设计[J].微电子学与计算机,2003,20(9):31-34.

[3] Elliott n Kaplan, Christopher J Hegarty. GPS 原理与应用[M].寇艳红,译.北京:电子工业出版社,2002(8):111-179.

[4] 程佩青.数字信号处理教程[M].2 版.北京:清华大学出版社,2001:87-132.

[5] Parkinson B W,James J. Global positioning system theory and applications: Volume I[M]. Washington: American

Institute of Aeronautics and Astronautics Inc,1996:395-396.

[6] Tsui J B. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2004: 72-79/258-263.

作者简介:

陈学男,(1983-),硕士研究生.研究方向为无线通信信号处理算法设计.