

文章编号: 2095-4980(2014)05-0682-06

一种全球定位系统弱信号捕获策略

梁涛涛, 杨 春, 吴军伟, 王 明

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 信号捕获是目前广泛应用的数字全球定位系统(GPS)接收机的重要部分, 弱信号条件下的信号捕获过程是目前 GPS 接收机算法研究的重点。本文分析和比较了 2 种经典捕获检测策略(TONG 捕获策略及 NM 捕获策略)的性能, 并针对弱信号条件下 GPS 信号捕获的特点, 提出了一种适用于弱信号条件下的捕获检测策略——双门限搜索检测策略。理论分析和仿真说明该策略在弱信号条件下具有较好的性能。

关键词: 全球定位系统; 信号捕获; 弱信号; 捕获策略

中图分类号: TN967.1; P228.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201405.0682

An acquisition strategy of Global Positioning System weak signal

LIANG Tao-tao, YANG Chun, WU Jun-wei, WANG Ming

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Acquisition is a very important part of digital GPS receiver. The acquisition of weak GPS signal is a key point of the research of GPS algorithm. Two classic acquisition strategies, TONG strategy and NM strategy, are analyzed and compared. Considering the specialty of weak signal condition, a new acquisition strategy named Double Threshold(DT) strategy is proposed. The analysis and simulation indicate that it performs well under weak signal condition.

Key words: Global Positioning System; signal acquisition; weak signal; acquisition strategy

在全球定位系统(GPS)越来越广泛应用于军事和民用领域的背景下^[1], 适用于弱信号环境的 GPS 接收机已经成为目前接收机研究的重点^[2-3]。信号捕获是 GPS 软件接收机的一项关键技术, 常常成为限制接收机性能, 如灵敏度和定位时间的瓶颈^[4]。目前对于捕获技术的研究主要集中在 2 个方面: 高动态条件下的信号捕获和弱信号条件下的信号捕获, 本文关注弱信号捕获。从捕获算法的一般结构上来说, 影响捕获算法性能的因素主要包括 2 个方面: a) 相关算法, 包括数据累积的时间长度和具体的处理算法; b) 捕获策略。文献[4-7]对 GPS 接收机的捕获检测策略进行了研究, 归纳了较为系统的数学模型, 对捕获时间和检测性能等进行了详细的理论分析, 并针对应用进行了一定的分析。黄鹏达等研究了一种 GPS 信号的恒虚警自适应检测^[8], 通过估计噪声能量实时调整捕获策略, 该算法可有效捕获较低信噪比下的 GPS 信号。本文在这些研究的基础上, 结合弱信号条件下捕获算法的特点, 在 2 种经典捕获策略的基础上, 提出了一种新的捕获检测策略。

1 GPS 信号捕获过程介绍及问题描述

1.1 基于 FFT/IFFT 的 GPS 信号捕获

GPS 信号的捕获是一个使本地复现信号和接收信号在伪码相位和载波频率上同时实现粗同步的过程。伪码的粗同步一般要求伪码相位相差半个码片以内, 而载波粗同步的误差范围根据动态等条件进行不同的设置, 一般在数十到数百赫兹的水平。信号捕获实际上是一个关于伪码相位和载波频率的二维搜索过程, 一个伪码搜索区间和载波频率搜索区间的组合称为一个搜索单元, 最初的 GPS 接收机使用滑动相关的方法, 每次相关运算只能搜索一个单元, 这样的搜索方法效率很低。为了提高捕获性能, 实现快速捕获, 现在的 GPS 接收机不会使用传统的滑动相关, 目前常用的快速捕获算法有 2 种: 基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)/快速傅里

叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)的捕获算法和基于部分匹配滤波(Partial Matched Filter, PMF)-FFT的信号捕获算法, 本文对 FFT/IFFT 的算法进行分析。

基于 FFT/IFFT 的方法是一种快速捕获算法, 利用 GPS 信号中 C/A 码的周期性以及时域相关和频域相乘的等效性, 实现时域并行捕获, 算法框架见图 1。

基于 FFT/IFFT 的捕获算法本质上是一种相关计算, 最终得到的相干积分检测量可表示如下:

$$P = kR(\tau) |\text{sinc}(f_e T_{\text{coh}})| \quad (1)$$

式中: k 为检测量系数; $R(\tau)$ 表示归一化的 C/A 码自相关函数; $\text{sinc}(f_e T_{\text{coh}})$ 表征频率误差 f_e 和相干积分时间 T_{coh} 的共同作用对于检测量的影响。非相干积分和差分相干积分的方法产生额外的增益, 但是不会影响式(1)中所示变化关系的本质。由式(1)可知检测量是伪码相位偏差和载波频偏的函数, 只有当码相位和载波频偏的值在一定范围内时, 检测量的值才会显得比较大, 因此可以反过来将检测变量的值和一个门限值进行比较, 判断伪码相位和载波频率是否对准。

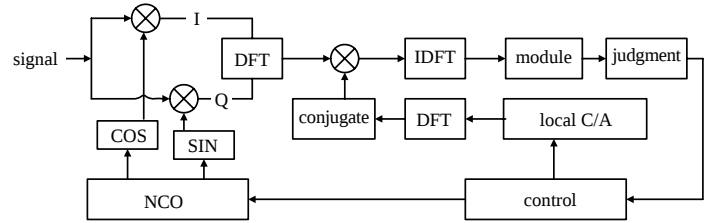


Fig.1 Acquisition algorithm based on FFT/IFFT
图 1 基于 FFT/IFFT 的捕获算法

1.2 捕获检测策略的问题描述

改变相关算法, 一般会对捕获时间性能造成比较大的影响, 以相干积分为例, 将相干积分时间增加 1 倍, 可以得到 3 dB 的处理增益, 但是捕获搜索时间将增加原来的 4 倍, 非相干积分和差分相干积分时间的增加也会导致捕获时间同等比例的增加, 而且提供的增益会减少, 因而加长积分时间在有些情况下不合适。在信号累积时间存在限制的前提下, 对捕获策略进行改进, 是改善捕获性能的一个有效途径。

在弱信号条件下, GPS 信号捕获具有如下特点: 为了保证捕获算法的适用范围, 要求捕获时间尽量短, 这一方面要求单个频率区间的数据累积时间不能太长, 另一方面也要求捕获策略的设计必须保证逗留次数不会太多; 其次是弱信号条件下的捕获性能和强信号条件的捕获性能相比, 对于固定的虚警概率, 检测概率较低, 设计的捕获策略需要在这 2 个方面进行权衡, 以使得捕获程序具有更好的实用性。

1.3 捕获检测的基本数学模型

信号检测策略中, 对于单次检测, 主要关注 2 个问题: 检测概率和虚警概率。检测概率 p_d 和虚警概率 p_{fa} 表达如下:

$$p_d = \int_{V_t}^{\infty} p_s dz \quad (2)$$

$$p_{fa} = \int_{V_t}^{\infty} p_n dz \quad (3)$$

式中: p_s 表示信号存在时的检测量概率密度函数; p_n 表示信号不存在时的检测量概率密度函数。有信号存在时检测量服从莱斯分布, 信号不存在时服从瑞利分布, 分别如式(4)和式(5):

$$p_s(z) = \frac{z}{\sigma_n^2} e^{-\left(\frac{z^2 + A^2}{2\sigma_n^2}\right)} I_0\left(\frac{zA}{\sigma_n^2}\right), \quad z \geq 0 \quad (4)$$

$$p_n(z) = \frac{z}{\sigma_n^2} e^{-\left(\frac{z^2}{2\sigma_n^2}\right)}, \quad z \geq 0 \quad (5)$$

式中: σ_n^2 表示噪声功率; A 为信号幅度的均方根值; $I_0\left(\frac{zA}{\sigma_n^2}\right)$ 是零阶修正的贝塞尔函数。将式(5)代入式(3)可以得到单次检测的虚警概率表达式如下:

$$p_{fa} = e^{-\left(\frac{V_t^2}{2\sigma_n^2}\right)} \quad (6)$$

整理式(6), 得到判决门限与虚警概率之间的表达式如下:

$$V_t = -\sqrt{-2 \ln p_{fa}} \sigma_n \quad (7)$$

结合式(7)对式(2)进行分析, 将式(2)进行化简, 得到式(8):

$$p_d = Q_1\left(\sqrt{kT_c C/N_0}, \sqrt{-2\ln p_{fa}}\right) \quad (8)$$

式中: $Q_m(a,b)$ 为广义的 Marcum 函数; kT_c 表示积分时间, 单位为毫秒(ms); C/N_0 为接收信号的载噪比。根据式(8)得知, 检测概率是积分时间、接收信号载噪比以及虚警概率的函数。如果积分时间为 2 ms, 且要求虚警概率为 0.001, 计算表明, 载噪比为 39 dB/Hz 的信号, 其检测概率为 0.656, 而载噪比为 38 dB/Hz 的信号, 其检测概率只有 0.490, 检测概率均较低, 在实际的接收机中是不可行的。

2 两种传统的捕获检测策略

研究和实践都表明, 如果仅仅使用单次检测作为捕获判断的依据, 则检测概率与虚警概率都难以达到实际使用的要求^[5], 因此实际的 GPS 捕获检测策略都需要进行多次驻留来提高捕获性能, 本节分析 2 种经典的捕获检测策略, TONG 捕获检测策略和 N 之 M 的捕获检测策略, 指出它们在弱信号条件下存在的问题。

2.1 TONG 捕获检测策略

TONG 搜索检测策略是一种变搜索时间的检测策略, 见图 2。TONG 搜索捕获检测策略的过程可简单描述如下: 根据要求设置 K 的初值 B_1 和最大值 A_1 , 对于每一个搜索区间, 设置计数变量 K 的值为初值 B_1 , 对于单次判决, 如果检测变量 P 大于门限 V , 则计数变量 K 的值加 1, 否则 K 值减 1, 对 K 值进行判断, 如果 K 值超过设定的最大值 A_1 , 则判定为在该区间捕获成功, 如果 K 值减到 0, 则判定为在该区间捕获失败, 转入下一个区间进行搜索或者换星, 如果 K 值在 0 和 A_1 之间, 在该区间继续检测。

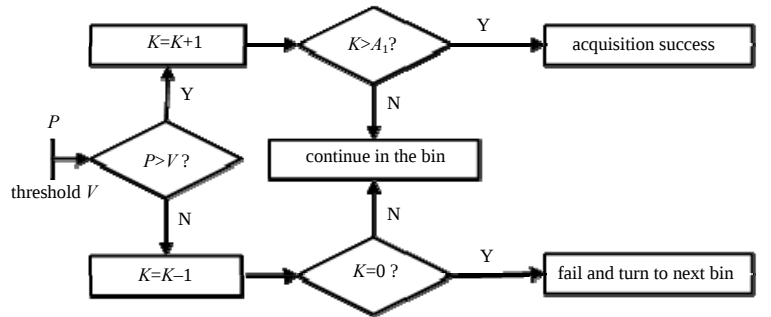


Fig.2 TONG acquisition strategy
图 2 TONG 捕获策略

姚铮等对 TONG 捕获检测策略的性能进行了分析^[5], 修正了原来推导中的错误, 给出了理论推导过程, 得到的总虚警概率, 总检测概率和无信号频率区间的平均逗留次数的表达式如式(9)~式(11):

$$P_{FA} = \frac{\left[\frac{1-p_{fa}}{p_{fa}}\right]^{B_1} - 1}{\left[\frac{1-p_{fa}}{p_{fa}}\right]^{A_1} - 1} \quad (9)$$

$$P_D = \frac{\left[\frac{1-p_d}{p_d}\right]^{B_1} - 1}{\left[\frac{1-p_d}{p_d}\right]^{A_1} - 1} \quad (10)$$

$$N_B = \frac{B_1}{1-2p_{fa}} - \frac{A_1 P_{FA}}{1-2p_{fa}} \quad (11)$$

式(9)~式(11)反映了 TONG 捕获检测策略的性能, 在单次检测的门限确定, 亦即虚警概率和检测概率确定的情况下, 通过设置 A_1 的值和 B_1 的值可以改变捕获性能。本文仿真过程中, 条件设置如下: 载噪比为 39.02 dB/Hz, 设置门限使得虚警概率 0.000 5, 检测概率为 0.589。首先验证 TONG 搜索检测策略在信号存在的搜索区间的性能。使用 TONG 搜索检测器进行弱信号的搜索检测时, 还需要注意, 在信号存在的区间, 会出现逗留次数过多的情况, 特别是单次检测概率接近 0.5 时, 某次判决是成功还是失败概率上差别不大, 很容易出现在有信号区间长时间逗留的情况, 给捕获带来不便。

2.2 N 中取 M 的捕获检测策略

N 中取 M 的捕获策略(简称 NM 策略)是一种固定搜索次数的检测策略, 策略可简单描述如下, 对一个频率区间进行 N 次搜索, 对于单次判决, 如果检测量超过门限, 则计数值 K 的值加 1, N 次搜索结束后, 对 K 的值进

行判断,如果 K 值 $\geq M$ 则认为在该频率区间捕获成功,否则捕获失败,该策略的总检测概率和虚警概率的表达式如式(12)和(13)。

$$P_D = \sum_{n=M}^N C_N^n p_d^n (1-p_d)^{N-n} \quad (12)$$

$$P_{FA} = 1 - \sum_{n=0}^{M-1} C_N^n p_{fa}^n (1-p_{fa})^{N-n} \quad (13)$$

相对于 TONG 搜索检测策略, NM 搜索检测策略是一种搜索次数固定的检测策略,虽然在整体检测性能上表现不如 TONG 搜索检测策略,但其优点在于结构简单。比较 TONG 搜索检测策略和 NM 搜索检测策略,可以发现 2 种搜索检测策略有较大的性能差异。对于弱信号捕获过程来说, TONG 搜索检测策略相对于 NM 检测搜索策略可以得到更好的检测性能,但是由于弱信号条件下单次检测概率较低,在信号存在的区间,非常容易造成捕获过程在该区间多次逗留的情况。对于信号捕获过程来说,适用的搜索检测策略应该具有 2 个方面的特质:较少的逗留次数和较好的检测性能。后文设计的双门限(DT)搜索检测策略正是基于这一思想,针对 TONG 搜索检测策略和 NM 搜索检测策略存在的不足进行针对性设计。

3 改进的捕获策略

3.1 双门限捕获策略

针对 TONG 搜索检测策略和 N 中取 M 的搜索检测策略存在的缺陷,提出了一种 DT 捕获策略。单个区间的捕获策略见图 3。对于单个区间,在搜索开始时,设置 2 个计数变量 K_1 和 K_2 的初值设置为 0,如果单次判决成功,则计数变量 K_1 的值加 1,如果失败则 K_2 的值加 1,单次判决结束以后,将 K_1 和 K_2 分别与各自的门限值 A_2 和 B_2 进行比较,2 个计数变量中的任何 1 个到达自身的门限,则该区间的搜索结束,如果是 K_1 先达到门限 A_2 ,则认为捕获成功,如果是 K_2 先到达门限 B_2 ,则认为捕获失败。则 DT 策略的虚警概率和检测概率表达式分别如下:

$$P_{FA} = p_{fa}^{A_2} \sum_{n=0}^{B_2-1} [C_{A_2+n-1}^n (1-p_{fa})^n] \quad (14)$$

$$P_D = p_d^{A_2} \sum_{n=0}^{B_2-1} [C_{A_2+n-1}^n (1-p_d)^n] \quad (15)$$

无信号区间平均逗留次数可以表达如式(16):

$$\bar{N} = N_1 + N_2 \quad (16)$$

式中: N_1 表示最终 K_1 达到门限 A_2 的情况; N_2 表示 K_2 达到门限 B_2 的情况, N_1 和 N_2 的表达式如下:

$$N_1 = p_{fa}^{A_2} \sum_{n=0}^{B_2-1} [(A_2 + n) C_{A_2+n-1}^n (1-p_{fa})^n] \quad (17)$$

$$N_2 = (1-p_{fa})^{B_2} \sum_{n=0}^{A_2-1} [(B_2 + n) C_{B_2+n-1}^n p_{fa}^n] \quad (18)$$

3.2 性能分析

仍旧以载噪比为 39.02 dB/Hz, 单次检测虚警概率 0.000 5, 检测概率为 0.589 的情况进行仿真,对 DT 策略和 NM 策略进行 5 种参数条件下的仿真,参数组合按照 1~5 进行编号,DT 策略的参数组合为: $(A_2, B_2)=(2,2)$, $(A_2, B_2)=(2,3)$, $(A_2, B_2)=(3,3)$, $(A_2, B_2)=(3,4)$ 和 $(A_2, B_2)=(3,5)$ 。NM 策略的参数组合为: $(N, M)=(3,2)$, $(N, M)=(4,2)$, $(N, M)=(5,3)$, $(N, M)=(6,3)$ 和 $(N, M)=(7,3)$ 。TONG 策略进行 4 种参数条件下的仿真,参数组合按照 1~5 进行标号,参数组合 1 次为: $(A_1, B_1)=(4,2)$, $(A_1, B_1)=(5,2)$, $(A_1, B_1)=(6,3)$, $(A_1, B_1)=(6,4)$ 和 $(A_1, B_1)=(7,3)$ 。

图 4 和图 5 为 DT 策略和 NM 策略的仿真结果,仿真在信号存在的区间进行,在信号存在的区间,主要参数包括检测概率和逗留次数。图 4 为 DT 策略和 NM 策略在信号存在区间的检测概率对比。一方面,图 4 表明按照对应的参数组合,DT 策略、NM 策略在理论上具有相同的检测概率,结合式(11)~式(14)进行分析,可以看出在 $A=M$ 和 $B=N-M+1$ 时,DT 策略和 NM 策略具有相同的检测概率和虚警概率性能,此处仿真了有信号区间的检测

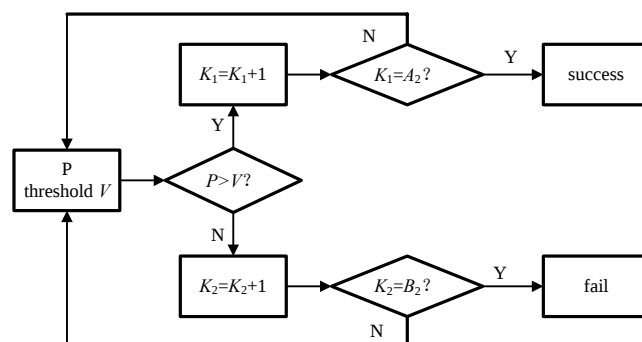


Fig.3 Double thresholds acquisition strategy
图3 双门限捕获策略

概率,在误差范围内 DT 策略的检测概率和 NM 策略的检测概率是相等的,可以推论在无信号区间,两者的虚警概率也是相等的;另一方面,图 5 中,在对应的参数组合情况下,DT 策略的逗留次数总是比 NM 策略少,理论上来说,这是由于 DT 策略在 NM 策略的基础上舍弃了无效搜索的次数。

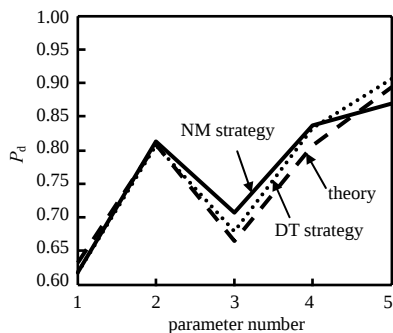


Fig.4 Comparison of NM and DT acquisition strategies in signal bin

图 4 DT 策略和 NM 策略有信号区间检测概率对比

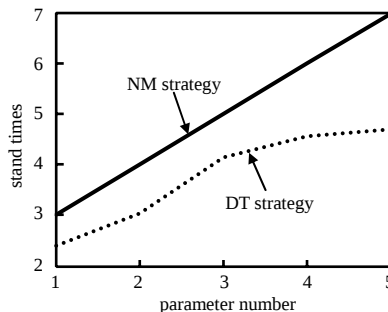


Fig.5 Comparison of stand times of DT and NM in signal bin

图 5 DT 策略和 NM 策略有信号区间逗留次数

TONG 策略和 DT 策略的性能对比见表 1, 根据表 1 的结果可看出, DT 策略的整体检测性能和 TONG 策略相比较仍有一些差距,但是差距已经不大。

表 1 TONG 策略和 DT 策略的性能对比

Table1 Performance of TONG strategy and DT strategy

TONG				DT			
parameter	P_D	P_{FA}	stand	parameter	P_D	P_{FA}	stand
$(A_1, B_1)=(4,2)$	0.672 5	2.503(-7)	2	$(A_2, B_2)=(2,2)$	0.632 1	7.497(-7)	2
$(A_1, B_1)=(5,3)$	0.791 1	2.502(-7)	3	$(A_2, B_2)=(2,3)$	0.807 9	1.499(-6)	3
$(A_1, B_1)=(6,3)$	0.746 4	1.252(-10)	3	$(A_2, B_2)=(3,3)$	0.663 3	1.249(-9)	3
$(A_1, B_1)=(6,4)$	0.862 5	2.502(-7)	4	$(A_2, B_2)=(3,4)$	0.805 0	2.497(-9)	4
$(A_1, B_1)=(7,3)$	0.718 1	6.263(-14)	3	$(A_2, B_2)=(3,5)$	0.893 0	4.368(-9)	5

但是考虑弱信号捕获过程中,在信号存在的区间, TONG 策略会出现多次逗留的情况,如图 6 所示为参数 $(A_1, B_1)=(5,2)$ 时进行的 120 次仿真,仿真中出现了多达 35 次的逗留,性能非常差。DT 策略虽然和 TONG 策略一样是一种变搜索次数的捕获策略,但是其搜索次数不会超过 A_2+B_2-1 ,因而 DT 策略在信号存在区间的逗留特性相对于 TONG 策略有较为明显的改善。

4 结论

本文通过对 2 种经典的检测策略,即 TONG 检测策略和 NM 检测策略进行理论分析,得出在弱信号捕获的情况下, TONG 检测策略在信号存在的检测区间会出现次数过多的逗留,而 NM 检测策略存在整体检测性能不佳的缺点。根据这些缺点提出了一种双门限(DT)检测策略,通过理论和仿真分析,证明 DT 检测策略在性能上完全优于 NM 检测策略,而 DT 检测策略虽然也是一种变搜索次数的检测策略,但是搜索次数有上限,虽然其检测性能和 TONG 检测策略相比略差,但不会像 TONG 检测策略那样在信号区间产生过多次数的逗留。总体来说, DT 策略是一种比较适用的检测策略。

参考文献:

- [1] Revnivikh S G. Development trends in global satellite navigation[J]. Gyroscopy and Navigation. 2012,3(4):215-222.
- [2] YANG Chun, Nguyen Thao, Blasch E, et al. Post-correlation semi-coherent integration for high-dynamic and weak GPS signal acquisition[C]// 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. 2008:1341-1349.
- [3] 蔡秀雄,刘瑞芹,张凤元. GPS 微弱信号捕获算法[J]. 火力与指挥系统, 2009,34(8):105-107. (CAI Xiu-xiong, LIU Rui-qing, ZHANG Feng-yuan. Algorithm for weak GPS signal acquisition[J]. Fire Control & Command Control, 2009,34(8):105-107.)

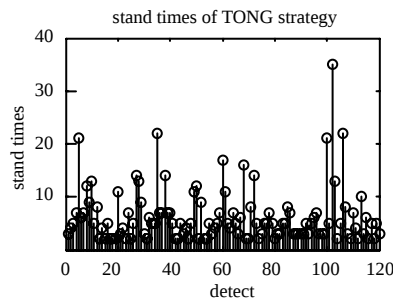


Fig.6 Stand times of TONG acquisition strategy

图 6 TONG 搜索策略在信号存在区间的逗留次数

- [4] 钱镔,崔晓伟,陆明泉,等. PN 码快速捕获中的捕获策略和性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2008,30(10):1991-1994. (QIAN Yi,CUI Xiao-wei,LU Ming-quan,et al. Acquisition strategy and performance analyzing for fast PN code acquisition[J]. System Engineering and Electronics, 2008,30(10):1991-1994.)
- [5] 姚铮,崔晓伟,陆明泉,等. 应用于 GPS 接收机的序贯检测器性能分析[J]. 清华大学学报, 2007,47(7):1166-1169. (YAO Zheng,CUI Xiao-wei,LU Ming-quan,et al. Performance analyzing of detector used in GPS receiver[J]. Journal of Tsinghua University, 2007,47(7):1166-1169.)
- [6] 黄静,姚铮,陆明泉. 一种改进的 GPS 信号捕获策略的性能分析[J]. 宇航学报, 2011,32(1):157-161. (HUANG Jing,YAO Zheng,LU Ming-quan. Performance analyzing of an improved GPS signal acquisition strategy[J]. Journal of Astronautics, 2011,32(1):157-161.)
- [7] CAO X L,MU R Z,YAN Y P. A novel threshold setting method for FFT-based GPS acquisition[J]. IEEE Computer Society, 2009: 497-501.
- [8] 黄鹏达,皮亦鸣. 恒虚警 GPS 信号自适应捕获研究[J]. 电子学报, 2011,39(7):1716-1720. (HUANG Peng-da,PI Yi-ming. Research of constant false alarm GPS signal adaptive structure acquisition[J]. Acta Electronica Sinica, 2011,39(7):1716-1720.)

作者简介:



梁涛涛(1988-), 男, 贵州省遵义市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 GPS 信号捕获.email:oldphoto522121@163.com.

杨 春(1972-), 男, 四川省绵竹市人, 研究员, 主要研究方向为测控通信技术研究.

吴军伟(1987-), 女, 重庆市人, 研究实习员, 主要研究方向为卫星信号导航.

王 明(1984-), 男, 河南省洛阳市人, 助理研究员, 主要研究方向为扩频信号处理.

(上接第 681 页)

- [13] Nickel U L. Overview of generalized monopulse estimation[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006,21(6):27-56.
- [14] 刘宏伟,张守宏. 平面阵线性约束自适应单脉冲测角算法[J]. 电子与信息学报, 2001,23(3):275-279. (LIU Hong-wei, ZHANG Shou-hong. Linearly constrained adaptive monopulse estimation algorithm for planar array[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2001,23(3):275-279.)
- [15] Nickel U L. Monopulse estimation with adaptive arrays[J]. IEE Proceedings-F, 1993,140(5):303-308.

作者简介:



苏志刚(1972-), 男, 哈尔滨市人, 教授, 主要研究方向为阵列信号处理及其在雷达、通信和导航中的应用.email:ssrsu@vip.sina.com.

卢献宇(1988-), 女, 广西壮族自治区玉林市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理.

郝敬堂(1989-), 男, 河南省鹤壁市人, 硕士, 主要研究方向为航空监视技术、空管自动化系统等.