

GPS 中频信号源及精频捕获仿真

康嵩山, 黄 勇, 张望全, 罗 丽

(西华大学 电气信息学院, 四川 成都 610039)

摘 要: GPS 天线接收的真实的信号不理想, 为方便算法研究, 要使用理想的仿真信号。为了使跟踪环路正常工作, GPS 信号需要进行精频捕获。文中使用 Simulink 搭建 GPS 中频信号源, 该信号源可以直接设置参数产生不同的中频信号。详细分析了两种精频捕获算法: 相位关系算法和 FFT 补零算法, 并对精频捕获算法做仿真实现, 对比两种算法的仿真结果, 分析了算法的优劣。由搭建的 Simulink 模型可以产生理想的信号, Matlab 算法的仿真结果表明, 使用相位关系的精频捕获算法适合实际的应用。

关键词: GPS; 信号生成; 精频捕获; 相位关系

中图分类号: TN96

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)06-0043-04

GPS Signal Source of Intermediate Frequency and Fine Frequency Acquisition Simulation

KANG Song-shan, HUANG Yong, ZHANG Wang-quan, LUO Li

(School of Electrical & Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The signal received by GPS antenna isn't satisfactory. For the convenience of algorithm design, an ideal signal should be used. Fine frequency acquiring is implemented for the working of the track loop. Use simulink to build a module of GPS intermediate signal generation. The signal source can be directly set parameters to generate kinds of signal. Expatriate two methods, phase relationship algorithm and FFT zero-padded algorithm, to acquire the fine frequency. Using the signal generated by the module, the fine frequency simulation is carried out. Two methods of the fine frequency acquisition is implemented and compared. The strengths and weaknesses of the algorithm is analyzed. The simulink module can generate ideal signal. The simulation results show that phase relationship algorithm is suitable for practical application.

Key words: GPS; signal generation; fine frequency acquisition; phase relation

0 引言

GPS 接收机的工作顺序是信号捕获、信号跟踪继而导航解算^[1], 信号捕获是接收机进行信号跟踪及导航解算的前提。为了加快信号搜索速度, 初始捕获阶段只做粗频捕获^[2], 捕获频率的分辨率一般在一百赫兹以上, 而要使接收机跟踪环能正常工作, 捕获所得频率应该在几十赫兹之内^[3], 因此在初始捕获后需进行精频捕获。

文中首先在 Simulink 环境下搭建模块产生中频信号, 分析了 GPS 初始捕获的算法以及精频捕获的两种

算法: FFT 补零算法、相位关系算法。捕获算法的硬件实现主要考虑实时性以及所需的硬件资源, 通过对搭建 Simulink 模块产生的信号进行精频捕获仿真, 实现并对比了精频捕获的两种算法, 分析算法的优劣, 为硬件的设计提供参考。

1 GPS 中频信号源

1.1 GPS 中频信号

实际的 GPS 中频信号, 一般是信号由天线接收卫星的射频信号后进行下变频、滤波、放大等一系列操作, 再进行 ADC 所得^[1,4], 而在 GPS 信号仿真方面, 一般情况下是用 PRN 码调制中频载波, 从而产生中频模拟信号, 然后直接进行 ADC 所得, 中间省略了下变频等操作^[5,6]。在文中的中频信号源设计中, 信号源同样采用直接生成中频模拟信号然后进行 ADC 的方法来搭建。

收稿日期: 2009-10-22; 修回日期: 2010-01-25

基金项目: 西华大学基金项目(Z0720905)

作者简介: 康嵩山(1984-), 男, 河南濮阳人, 硕士, 研究方向为 GPS 基带信号处理; 黄 勇, 博士后, 硕士生导师, 副教授, 研究方向为现代信号处理及在通信技术中的应用、软件无线电技术、通信系统 A-SIC 设计。

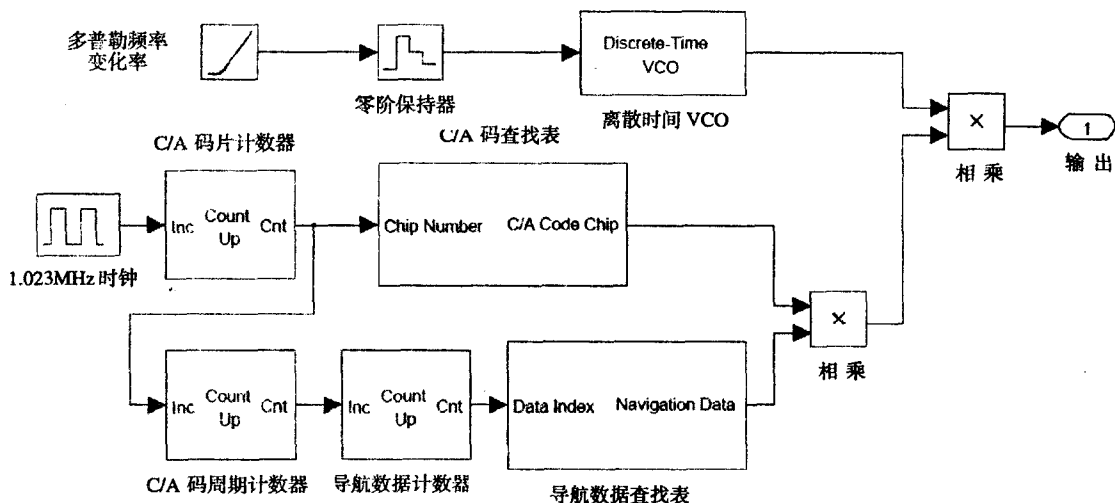


图 1 GPS 中频信号源的 Simulink 模块

1.2 GPS 中频信号源的 Simulink 模块

在信号源设计时,考虑到信号源操作的效率和重用性,所做的设计很容易改变仿真参数,将数据送到 Matlab 的工作空间内,同时具有可扩展性,为以后的研究作了铺垫。GPS 信号是由 PRN 码、导航数据对载波信号进行调制所得,而在 Simulink 中 PRN 码及导航数据的生成,一般是通过使用查找表的方法,查找表中的数据是由 $(-1,1)$ 组成的^[1,5]。

图 1 是 GPS 中频信号源的 Simulink 模块框图, simulink 模块名不支持中文,图中的中文只是用于说明,在实际中用的是英文。

该模块主要由载波生成、C/A 码生成、导航数据生成以及 ADC 四部分组成,最后由“To Workspace”输出到 Matlab 的工作空间,其中 PRN 码及导航数据的生成是由图中“1.023MHz 时钟”来驱动的。为方便后续工作,可以对该模块进行封装,封装后可以直接设置各种参数。

文中设计的 Simulink 模块可以选择卫星信号,直接设置中频频率、采样频率、C/A 码码偏移、多普勒频移及多普勒变化率。在搭建该模块的基础上,使用多个模块可以产生多个卫星信号。该模块可以进行扩展,添加各种干扰。由于文中后面的仿真主要是为了验证和对比两种精频捕获方法,所以并没有添加各种干扰信号。

由该模块产生的单卫星的中频信号可以表示为^[7]:

$$x[n] = A c[n - \tau'] d[n - \tau'] \cos[2\pi(f_0 + f_d)(n - \tau') + \phi_0]$$

式中 A 表示信号幅度, n 表示第 n 个采样时刻, τ' 表示由于信号传输产生的延迟时间, f_0 表示标称的载波频率, f_d 表示多普勒频移频率, ϕ_0 表示初始相位。

2 信号的精频捕获

GPS 信号捕获阶段是为了找出中频信号中可见卫星,以及可见卫星信号与本地信号码偏 τ' 及频偏 f_d , 并将它们送入信号的跟踪环路,从而进行信号跟踪。为加快搜索卫星的信号速度, GPS 信号捕获先进行粗频捕获来快速捕获信号。典型的粗频捕获的算法主要可以分为三类:串行搜索捕获算法、时域并行搜索捕获算法以及多普勒频域 FFT 搜索捕获算法^[4,7,8]。相关模糊函数是信号捕获的基础^[1,7], 其时域形式为:

$$Y(\tau, f_d) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] c[n - \tau] \exp\{-j2\pi(f_0 + f_d)n\}$$

式中 τ 表示本地估计的码偏, f_d 表示本地估计的多普勒频率。理想情况下,当 τ 和 f_d 与中频信号延迟 τ' 和载波频率 f_0 相匹配时,相关模糊函数会产生一个尖锐的最大峰值,根据相关模糊函数值即可进行信号捕获。

根据粗频捕获各算法运算所需时间^[5], 在文中仿真中选用时域并行搜索捕获算法进行粗频捕获。此算法是由输入信号 $x[n]$ 先与 $\exp\{-j2\pi(f_0 + f_d)n\}$ 相乘,获得与多普勒频率为 f_d 对应的序列:

$$y[n] = x[n] \exp\{-j2\pi(f_0 + f_d)n\}$$

由此可得相关模糊函数为:

$$Y(\tau, f_d) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y[n] c[n - \tau]$$

由圆周互相关函数的算法,相关模糊函数可通过计算

$$Y(\tau, f_d) = \frac{1}{N} \text{IDFT}\{\text{DFT}[y[n]] \text{DFT}[c[n]]^*\}$$

求得^[7]。当相关模糊函数值大于设定门限时,说明卫星可见并可求出码偏 τ' 及频偏 f_d 。

图 2 为多普勒频域 FFT 搜索捕获算法的实现框

图[1,3]。

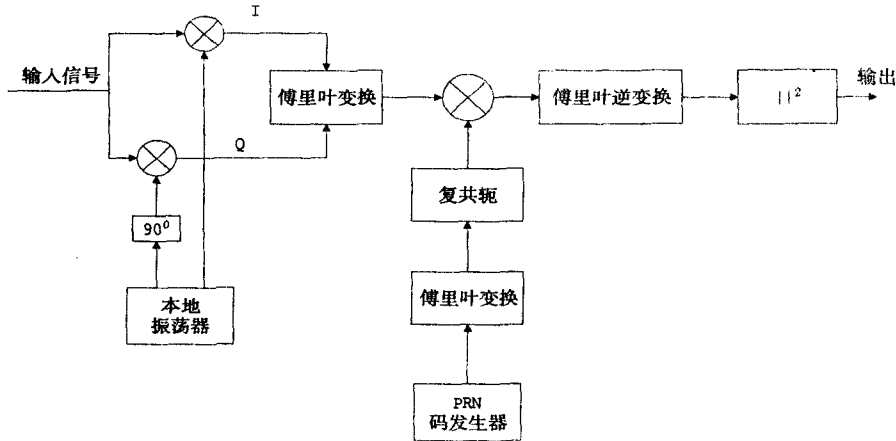


图2 多普勒频域FFT搜索捕获算法

GPS信号跟踪环的带宽一般为几赫兹^[3],所需频率分辨率应当在几十赫兹之内,而不论用什么搜索捕获算法,所得频率分辨率都比所需频率分辨率要高。因此,在粗频捕获的基础上,为使信号跟踪环路正常工作需要进行精频捕获。

根据粗频捕获所得的码偏设定本地产生的PRN码,将输入信号去除PRN码调制,使其变成连续信号。然后对该连续信号进行运算,基本算法主要有两种:FFT补零算法、相位关系算法,即可求出精细频率。

FFT补零算法是以FFT算法为基础,FFT算法所得的频率分辨率与所用数据长度有关,其频率分辨率是数据长度的倒数。在数据长度一定的情况下,可以通过补零的方法提高频率分辨率,这样会增加运算点数,从而导致运算时间增长。根据DFT算法^[9]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi nk/N}$$

对剥离码之后的连续信号进行计算,求出最大频率分量,此频率即为所需的精细频率。

相位关系算法是根据不同时刻的最大频率分量的初始相位差来计算载波频率^[2,3]。由多普勒频域FFT搜索捕获算法得到码偏,通过设定本地码的起始点就可从输入信号中剥离PRN码,而输入信号就变成一个连续信号。取较长的一段输入信号,先剥离PRN码,然后由DFT求出该段数据每1ms内的最大频率(即粗频捕获的频率)分量的初始相位。如果 m 时刻1ms数据的最大频率分量为 $X_m[k]$,则其初始相位为:

$$\theta_m(k) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[X_m[k]]}{\text{Re}[X_m[k]]} \right\}$$

由于输入信号的频率在短时间内

变化不大,假设 m 时刻后不久的 n 时刻, $X_n[k]$ 也是1ms数据的最大频率分量,其初始相位为 $\theta_n(k)$ 。由 $\theta_m(k)$ 和 $\theta_n(k)$ 可得到粗细频率为:

$$f = \frac{\theta_n(k) - \theta_m(k)}{2\pi(n - m)}$$

由该算法所得频率可能会具有模糊性,为了保持频率不模糊,相位差应该小于 2π 。

3 仿真结果与分析

3.1 信号数据生成

采用图1中的simulink模块产生数据,数据长度可以由simulink运行时间设定,卫星号、采样频率、中频频率、码偏及频偏等可以直接在封装后的模块参数中设置。在文中仿真中,共产生两个卫星信号(1号星和8号星),中频频率为9.548MHz,采样频率为38.192MHz,码偏移设定分别为超前998个码片(1号星)和超前20个码片(8号星),多普勒频移分别为320Hz(1号星)和1320Hz(8号星)仿真运行时间为50ms,共生成1909600个采样点的数据。

3.2 精频捕获

首先,从生成的中频信号中取2个连续1ms的数据,搜索带宽设定为14kHz,频率间隔设定为500Hz,进行时域并行搜索捕获算法操作。采用2个1ms数据取计算结果中最大值较大那个,可以消除数据调制的影响^[6,10]。对1号星捕获得到图3所示的捕获结果,对2号星捕获所得结果如图4所示。

当捕获所得的结果超过设置的门限值时,卫星信号存在。文中的门限是捕获结果的最大峰值与该峰值相邻一个码片外的最大峰值比值,门限值设定为5。

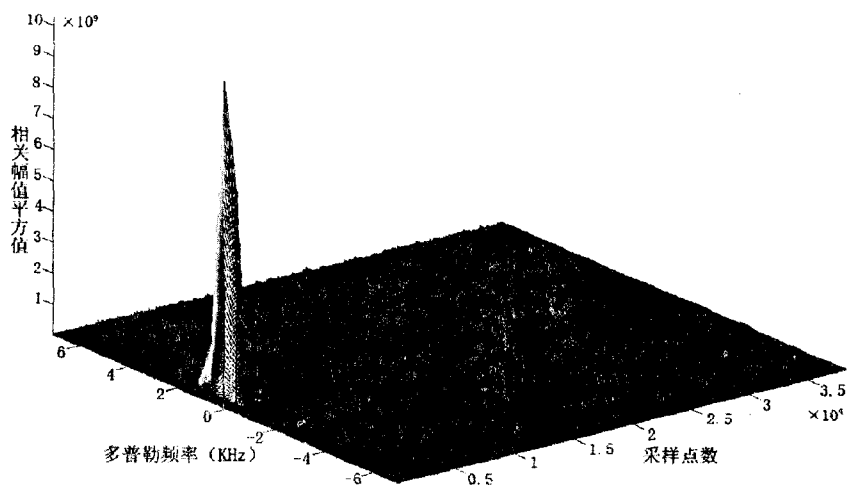


图3 1号星捕获结果

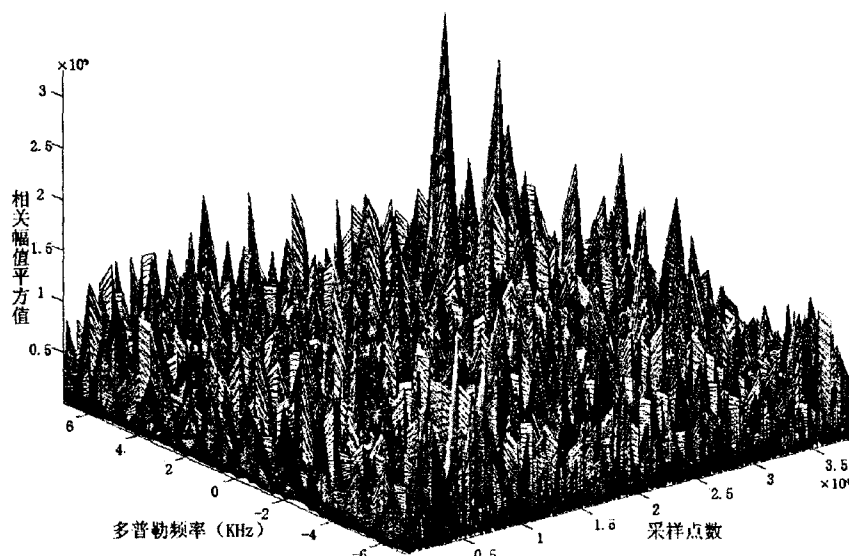


图 4 2 号星捕获结果。

由于生成信号中只含有 1 号星和 8 号星的信号,对输入信号数据进行粗频捕获,1 号星的粗频捕获的频率为 9.5485MHz,采样点偏差为 935,该偏差为本地 PRN 码相比信号中的 PRN 码延迟的采样点数,相当于延迟 25 个码片,而 C/A 码是 1ms(1023 个码片)重复的,码偏则超前 998。8 号星的粗频捕获的频率为 9.5495MHz,采样点偏差为 36961,码偏为超前 20。该处所得码偏不用于精频捕获,精频捕获采用的是采样点偏差。

根据所得捕获频率及采样点偏差,取 5ms 数据运用 2.2 中的精频捕获算法进行精频捕获。在 FFT 补零算法中,进行 7 倍于信号采样点数补零,然后进行 FFT 运算,找出最大频率分量。而在相位关系算法中,

算出两个相邻 1ms 数据中的最大频率分量的初始相位差,然后进行求均值并算出精频频率。表 1 为两种精频捕获算法的捕获结果。

表 1 中是两种精频捕获算法的运算的各种参数,所列频率为近似值,偏差在 0.01 赫兹之内。由表 1 可以看出,两种算法都可以提高捕获频率的频率分辨率。FFT 补零算法所得频率偏差为几十赫兹,而相位关系算法所得频率偏差在几赫兹之内。FFT 补零算法需要计算补零后的序列全部的 DFT,从而找出载波频率,相位关系算法只需计算 5 个频率分量的 DFT 即可

求出载波频率,从而相位关系算法在硬件实现中所需的资源很少,同时表中的时间也说明了 FFT 补零算法要比相位关系算法更缺乏实时性,因此,在捕获算法的硬件实现上要选择相位关系算法。

4 结束语

软件接机是 GPS 接收机的发展趋势,可以用 FPGA 技术来实现软件接收机的算法,从而加快产品推向市场的速度。文中实现了 GPS 中频信号生成以及精频捕获算法的仿真。在文中,使用 simulink 搭建的信号产生模块可以很好理解信号产生的原理,设计和实现精频捕获算法仿真为进行硬件中的算法设计提供的思路和参考,相位关系算法比较适合实际应用。

表 1 两种精频捕获算法的捕获结果

精频捕获算法	设定频率(Hz)		捕获频率(Hz)		偏差(Hz)		时间(s)
FFT 补零算法	9548320 (1 号星)	9549320 (8 号星)	9548254.95 (1 号星)	9549238.37 (8 号星)	-65.05 (1 号星)	-81.63 (8 号星)	1.22172
相位关系算法			9548325.20 (1 号星)	9549317.69 (8 号星)	5.20 (1 号星)	-2.31 (8 号星)	0.07758

www.geomatics.ucalgary.ca.

参考文献:

- [1] Kaplan E D, Hegarty E. GPS 原理与应用[M]. 第 2 版. 寇艳红,译. 北京:电子工业出版社,2007.
- [2] Akopian D, Valio H, Turunen S. Fine Frequency Resolving Acquisition Methods for GPS Receivers[C]//ION GPS 2002. [s.l.]:[s.n.],2002.
- [3] BAO-YEN TSUI J. GPS 软件接收机基础[M]. 第 2 版. 陈军,潘高峰,等译. 北京:电子工业出版社,2007.
- [4] Lei Dong. IF GPS Signal Simulator Development and Verification[EB/OL]. 2003. THE UNIVERSITY OF CALGARY,
- [5] Borre K, Akos D M, Bertelsen N, et al. 软件定义的 GPS 和伽利略接收机[M]. 杨东凯,译. 北京:国防工业出版社,2009.
- [6] 沈超,裴正定. 基于 Matlab/Simulink 的 GPS 系统仿真[J]. 系统仿真学报,2006,18(7):1857-1860.
- [7] Borio D. A Statistical Theory for GNSS Signal Acquisition [D]. Torino:Politecnico di Torino,2008.
- [8] 汪伟,郭际明. GNSS 软件接收机的结构和信号捕获跟踪算法[EB/OL]. 2006. 中国科技论文在线, www.paper.

(下转第 50 页)

次类推。

表 1 实验结果对比

根据输入输出 关系划分的组 合关系集	输入参数 的个数	每个参数 的取值数目	改进前算法 产生测试用 例集大小	改进算法产 生的测试用 例集大小
$\{(a,b),(b)\}$	3	2	4	4
$\{(a,b),(c,d)\}$	4	2	6	4
$\{(a,b,c),(d)\}$	4	2	6	4
$\{(a,b),(c,d)\}$	4	3	9	9
$\{(a,b,c),(d)\}$	4	3	9	9

上面的实验结果已经表明了,改进后的算法,有效地降低了测试用例集的大小,下面,用理论证明改进算法能够降低测试用例集的大小。

3.2 理论证明

证明:假设一个待测系统 SUT 的输入参数集合为 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 根据定义 2 和定义 3 得出的组合关系集中最大的集合大小为 $M(1 \leq M \leq n)$ 。

根据 IPO 策略,假设加入第 i 个参数时,前 $i-1$ 个参数的测试用例集合 S_i 上进行水平增长和垂直增长,则有 $|S_i| \geq |S_{i-1}|$, 则有在改进前 IPO 策略中,当输入参数数目为 N 时,产生的测试用例集为 S_1 , 当输入参数数目为 M 时,产生的测试用例集为 S_2 , 当有 $N > M$ 时,则有 $|S_1| \geq |S_2|$ 。

在改进后的待测系统 SUT 中,由题设知道产生测试用例集合大小和输入参数个数为 M 时产生的测试用例集合 S_M 相同。

由于 $M \leq n$, 根据上面结论则有 $|S_M| \leq |S_n|$ 。

由此,可以知道改进后的算法通过实验和理论证明有效地降低了测试中测试用例集的大小。

4 结束语

文中主要研究在软件测试中测试用例集的生成,主要是根据待测系统的输入输出关系,并将其应用于 IPO 策略中用于测试用例集的生成。通过实验以及理论证明文中在不降低测试用例集的检错能力情况下,改进后的算法,能够有效地降低测试用例集的大小。

由于文中改进的算法产生的测试用例集中,有很多参数的取值是“-”代替的,即表示该位置的取值为

该参数取值范围内的任意值,这就没有充分利用该参数取值的价值,就这一点还有很多方面值得研究和挖掘的,例如从该参数每个参数值的重要度即权重来研究,或从边界值来研究。另一个研究方向是因为很多情况产生的测试用例集合中的一个测试用例中有多个参数的取值用“-”代替,对于这些参数,可以从其他而非输入输出关系来研究原来不在同一组合关系的参数之间的关系^[11],或用两两组合覆盖扩张到部分三元组合或者多元组合覆盖,这些方面将是下一步的研究和改进的方向。总之,改进后的算法有一定的优势,也还有很多扩展空间,这方面的研究还有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 牛为华,孟建良,张素文.成对测试中测试生成策略研究[J].计算机仿真,2003,20(7):111-115.
- [2] Lei Yu, Tai Kuo-Chung. In-parameter-order: A Test Generation Strategy for Pairwise Testing[R]. USA: Dept. of Computer Science, North Carolina State University, 2001.
- [3] Whittaker J A, Thomason M G. A Markov Chain Model for Statistical Software Testing[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1994, 2(10): 812-824.
- [4] 王子元,徐宝文,聂长海.组合测试用例生成技术[J].计算机科学与探索,2008,2(6):571-588.
- [5] 潘祖烈,孙乐昌,蔡 铭,等.基于遗传算法的黑箱测试用例自动生成模型[J].计算机工程,2008,34(9):205-210.
- [6] Rothermel G, Untch R H, Chu Chengyun, et al. Prioritizing Test Cases for Regression Testing[J]. ACM Transactions on Software Engineering Methodology, 2001, 27(10): 929-948.
- [7] 英 伟,高仲仪.基于遗传算法的软件结构测试数据生成技术研究[J].北京航空航天大学学报,1997,23(1):36-40.
- [8] 向 渝,张 骏,汪文勇.成对测试中的一种用例生成算法[J].电子科技大学学报,2005,34(6):821-824.
- [9] 徐宝文,聂长海,史 亮,等.一种基于组合测试的软件故障调试方法[J].计算机学报,2006,29(1):132-138.
- [10] 朱 劼,高建华.优先级参数配对组合测试集生成策略[J].计算机工程,2008,34(13):34-39.
- [11] 张海藩.软件工程导论[M].北京:清华大学出版社,2003.

(上接第 46 页)

com. cn.

- [9] 程佩青.数字信号处理[M].第2版.北京:清华大学出版社,2001.
- [10] Zhu Xuefen, Chen Xiyuan, Li Zigang. Architecture design of

GPS software receiver and implementation of its acquisition algorithm with fine frequency estimation[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2008, 24(1): 38-41.