

奇偶矢量法用于 GPS 的故障检测与隔离*

廖向前** 黄顺吉

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

【摘要】 利用 GPS 进行导航定位,需要解决 GPS 完整性监视问题,文中利用奇偶矢量法用似然比的观点对其中的故障检测与隔离以及系统重构问题进行了详细的讨论,并采用该方法针对 GPS 卫星可能出现的突发性故障及软故障分别进行模拟实验,给出了模拟结果,该方法的正确性为 RAIM 的实现提供了理论依据。

关键词 对数似然比; 完整性; 故障检测与隔离; 系统重构; 奇偶矢量法

中图分类号 V 324. 24

NAVSTAR GPS 对广大民用用户提供的标准定位服务 (SPS) 在 95% 的概率范围内定位精度为 100 m, 在 99. 99% 的概率范围内定位精度为 300 m, 除定位精度外, GPS 的完整性也是一个尚待解决的重要问题, 虽然 GPS 卫星受地面站监控, 但仍然可能在数十分钟至数小时内由于卫星钟误差或操纵控制部分人工误操作出现卫星故障而导致导航误差超过给定门限。据估计, 现有 GPS 卫星丧失完整性的概率略为 $1. 12 \times 10^{-5}$, 对航空用户而言, 这是不能满足要求的。解决 GPS 完整性的方法一般说来有两种: 接收机内部方法和接收机外部方法, 接收机外部方法利用独立的 GPS 监控网和静止轨道卫星或地面发射台来广播完整性信息, 通知用户哪些卫星出现故障不可用。如美国 FAA 正致力发展的 GIC 通道, 美国海岸警备队发展的差分 GPS 网, 以及利用第三代国际海事卫星。

接收机内部方法仅依赖导航信号本身来实现, 亦即通常所指的接收机自主完整性监视 (RAIM), 其基本思想即是利用冗余测量数据的不一致性来得到一个故障检测统计量。RAIM 方法是一种非常有效的方法, 但接收机必须存在冗余观测量, 然而在接收机外部方法尚未完成之前, RAIM 是目前唯一可行的办法, 若同时利用 GPS, GLONASS, LORAN-C, Omega 等导航信号, 还有可能满足单一导航系统的性能要求。

对于单一的导航系统, GPS 完整性要求的关键在于必须对故障具备检测和隔离能力 (FDI), 以及系统重构能力 (FR), 文献 [1] 提到奇偶矢量法用于故障检测功能 (FD), 但却没有给出充分的理论依据, 且没有讨论如何实现故障隔离 (FI), 文献 [2] 讨论了战术飞机利用多种导航传感器来实现综合导航系统的 FDI 问题, 却不适合单一的 GPS 导航系统。本文将着重讨论如何利用奇偶矢量法来实现单一 GPS 接收机自主式完整性检控中的 FDI 和 FR 问题。

1 奇偶矢量法实现 FDI 及 FR

1. 1 GPS 卫星的故障检测

1996 年 6 月 25 日收稿, 1996 年 9 月 5 日修改定稿

* 电子部预研基金资助项目

** 男 24 岁 博士生

假设共具有 m 个可用 GPS 卫星观测值, n 个导航状态量, 测量值中仅含噪声干扰作用, 则

$$Z = HX + X \quad (1)$$

式中 $X \in R^n$ 是待测的导航状态 (位置和钟差); $Z \in R^m$ 是 m 个量测值 ($m \geq n$); H 是几何矩阵; X 是零均值高斯白噪声。

定义如下奇偶方程

$$p = VZ \quad (2)$$

式中 p 为奇偶矢量; V 是待定矩阵。由式 (1), 奇偶矢量

$$p = VHX + VX \quad (3)$$

若选择矩阵 V , 使满足

$$VH = 0 \quad (4)$$

则由式 (3), 得

$$p = VX \quad (5)$$

当卫星无故障时, 奇偶矢量仅是噪声的函数。而当卫星发生故障时, 量测方程即为

$$Z = HX + b_f + X \quad (6)$$

式中 b_f 是故障向量, 其对应于具有故障的卫星的元不为零, 其他元均为零。由式 (2) 得

$$p = VX + Vb_f \quad (7)$$

因此, 可利用在无卫星故障和有卫星故障时奇偶矢量 p 表现出的不同特性来检测故障。

首先对高斯随机向量 X 的统计特性归一化

$$E\{X\} = 0 \quad E\{XX^T\} = I \quad (8)$$

那么由式 (5) (7) 可知, 奇偶矢量 p 在无卫星故障假设 H_0 及有卫星故障假设 H_1 时的统计特性分别为

$$H_0: E\{p\} = 0 \quad E\{pp^T\} = VV^T \quad (9)$$

$$H_1: E\{p\} = _ \quad E\{(p - _)(p - _)^T\} = VV^T \quad (10)$$

其中

$$_ = Vb_f \quad (11)$$

两种假设下对数似然比为

$$\Lambda(p) = \ln \frac{p_r(p | H_1)}{p_r(p | H_0)} \quad (12)$$

式中 $p_r(\cdot | \cdot)$ 表示条件概率密度函数

由式 (9)~(11) 可得

$$\Lambda(p) = \frac{1}{2} [p^T (VV^T)^{-1} p - (p - _)^T (VV^T)^{-1} (p - _)] \quad (13)$$

式中 $_$ 是未知向量, 其极大似然估计为

$$\hat{_} = p \quad (14)$$

代入式 (13), 可得

$$\Lambda(p) = \frac{1}{2} [p^T (VV^T)^{-1} p] \quad (15)$$

定义故障检测判决函数 DF_D 为

$$DF_D = p^T (VV^T)^{-1} p \quad (16)$$

故障判定准则为

$$DF_D \underset{\text{无故障}}{\overset{\text{卫星故障}}{\geq}} T_D$$

或规一化为
$$DF_D / T_D \stackrel{\substack{\text{卫星故障} \\ \text{无故障}}}{\geq} 1 \tag{17}$$

DF_D / T_D 作为归一化故障检测量,其中 T_D 是预先设定的门限.由式(5)可知, p 为高斯随机向量,若 $p \in R^k$,则 $DF_D \sim \chi^2(k)$.由纽曼-皮尔逊准则,给定虚警率 P_{fa} ,则可由 $P_{fa} = Pr [DF_D > T_D | H_0]$ (P_r 表示概率)确定门限 T_D .

1.2 GPS故障卫星的隔离

检测到卫星故障后还要进行故障隔离,对于可用的 m 颗卫星,存在以下 m 个假设:

H_j : 第 j 颗卫星发生故障, $j= 1, 2, \dots, m$. 假定第 j 颗卫星发生故障,则式(6)中的故障向量为
$$b_f = e_j f_j \tag{18}$$

式中 e_j 是单位向量,它的第 j 个元为 1,其他元为零; f_j 为假设第 j 颗卫星对应的故障量大小(标量).由式(11)得

$$\hat{p} = Vb_f = V e_j f_j = f_j v_j \tag{19}$$

式中 v_j 是矩阵 V 的第 j 列.

在假设 H_j 的情况下,奇偶矢量 p 的统计特性为

$$E\{P\} = f_j v_j; E\{(P - f_j v_j)(P - f_j v_j)^T\} = VV^T \tag{20}$$

此时奇偶矢量 P 的似然函数为

$$p_r(p|H_j) = K \exp\{-\frac{1}{2}(p - f_j v_j)^T (VV^T)^{-1}(p - f_j v_j)\} \tag{21}$$

式中 K 为常数.由式(21)可求得 f_j 的极大似然估计为

$$\hat{f}_j = p^T (VV^T)^{-1} v_j \setminus [v_j^T (VV^T)^{-1} v_j] \tag{22}$$

将 \hat{f}_j 代入式(21)可得以下故障隔离判决函数

$$DF_{I_j} = [p^T (VV^T)^{-1} v_j]^2 \setminus [v_j^T (VV^T)^{-1} v_j] \tag{23}$$

式中 $DF_{I_k} = \max_j DF_{I_j}$ ($j= 1, 2, \dots, m$),则表明第 k 颗卫星极有可能发生故障

关于 V 矩阵的选择可以有多种方法,但须满足 $VH= 0$,文献[3]中 Potter 等提出先将 V 矩阵选择为具有正对角元上的三角矩阵,然后通过正交化运算确定 V 矩阵.其算法步骤如下:

- (1) $W = I - H(H^T H)^{-1} H^T$;
- (2) $v_{11}^2 = w_{11}$;
- (3) $v_{ii}^2 = w_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} v_{ki}^2, i = 2, 3, \dots, m - n$;
 $v_{ij} = w_{ij} / v_{ii}, j = 2, 3, \dots, m$;
 $v_{ij} = 0, i = 2, 3, \dots, m - n; j = 1, 2, \dots, i - 1$;
- (4) $v_{ij} = (w_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} v_{ki} v_{kj}) / v_{ii}, i = 2, 3, \dots, m - n; j = i + 1, 2, \dots, m$

由上述算法选定 V 矩阵满足 $VV^T = I$,则判决函数式(16)和式(23)可简化为

$$DF_D = p^T p \tag{24}$$

$$DF_{I_j} = (p^T v_j) / (v_j^T v_j) \tag{25}$$

1.3 GPS卫星重构

故障卫星被隔离出来后,必须进行系统重构,即可用不包含故障卫星的一组卫星对用户进行定位解算,设故障隔离后的观测值向量为 Z ,几何矩阵为 H ,观测噪声为 X .则

$$Z = H X + X$$

则可得最小二乘解

$$X = (H^T H)^{-1} H^T Z$$

误差协方差

$$P = (H^T H)^{-1}$$

2 模拟实现情况及结论

为了验证奇偶矢量法的正确性,我们针对 GPS 卫星可能出现的突发性故障和软故障两种情况进行了模拟实验。用户轨迹假设在一平直线上运动,卫星位置由星历表提供,并根据卫星星历选择一组几何配置较好的 6 颗星定位,用户状态为三维位置及钟差(即 $m=6, n=4$)。虚警率取 0.001,在 SA 存在情况下,测量噪声 $\epsilon = 33 \text{ m}$ 。

对突发性故障,假设在取样时刻 $t = 20 \sim 80 \text{ s}$ 时对某颗卫星施加故障偏置量等效为 $f = 100 \text{ m}$,利用上述算法,由式 (17) 可即刻检测到故障(见图 1),并进行隔离,选择其中正常的 5 颗星定位,故障隔离前后水平定位误差见图 2 和图 3。对卫星出现的软故障,假设在取样时刻 $t = 20 \text{ s}$ 开始对某卫星施加缓慢变化的故障量(如斜坡函数 5 m/s),利用上述算法在取样时刻 $t = 34 \text{ s}$ 时即检测到故障(见图 4),隔离后选择一组正常卫星定位,故障隔离前后水平定位误差见图 5 和图 6。

从两种情况的模拟结果看,用奇偶矢量法对 GPS 卫星可能出现的突发性故障及软故障均能有效地实现故障检测、隔离及系统重构能力,并且故障隔离后,水平定位误差处于正常精度范围内,从而证明奇偶矢量法是一种行之有效的办法。

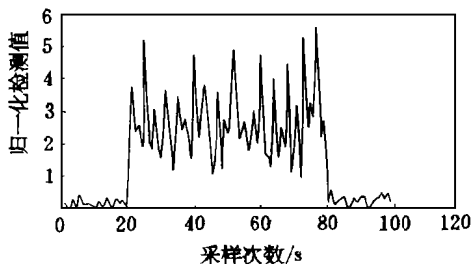


图 1 突发故障隔离曲线

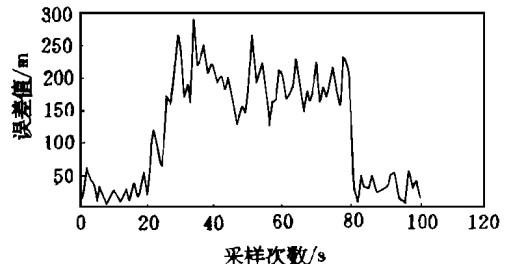


图 2 突发故障隔离前水平定位误差

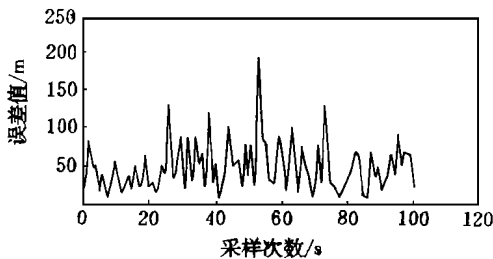


图 3 突发故障隔离后水平定位误差

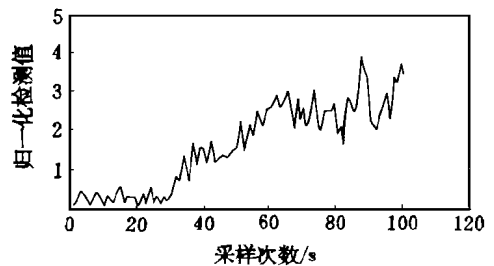


图 4 软故障隔离曲线

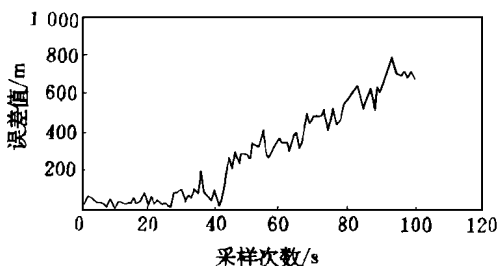


图 5 软故障隔离前水平定位误差

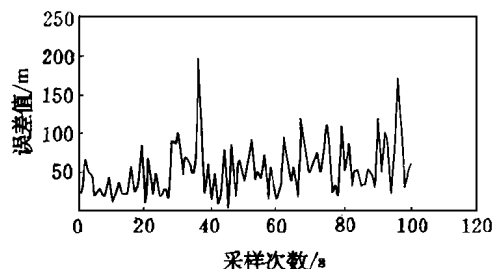


图 6 软故障隔离后水平定位误差

参 考 文 献

- 1 Farrell James L, Frank Van Graas. Receiver autonomous integrity monitoring (RAIM): techniques, performance & Potential. Proceedings of the 47th Annual Meeting of ION, 1991, 10-12: 421~ 428
- 2 Acharya Narayan A, Lason Douglas P. G. Intelligent FDI management in the adaptive tactical navigator. Proc of Position Location and Navigation Symposium, 1988: 120~ 125
- 3 Potter J E, Suman M C. Thresholdless redundancy Management with arrays of skewed instruments. AGARDOGRAPH-224, 1977: 15-1~ 15-25
- 4 袁 信, 俞济祥, 陈 哲. 导航系统. 北京: 航空工业出版社, 1993
- 5 言 中, 茅明. 卫星无线电导航, 北京: 国防工业出版社, 1989

GPS FDI with Parity Method

Liao Xiangqian Huang Shunji

(Dept. of Electronic Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract GPS integrity monitoring problem must be solved in GPS navigation. This paper discusses in detail the FDI and FR problems with parity vector method using the likelihood rate's point of view. At last, sudden failures and soft failures with GPS satellites are considered in simulations respectively, and the results show the reasonableness of the parity vector method. This method provides rationale basis for the implementation of RAIM.

Key words integrity; fault detection and isolation; fault recovery; parity method; logarithmic likelihood rate

编辑 徐安玉

.....

· 科研成果介绍 ·

32位嵌埋式实时操作系统 CRTOS/386P

主研人员: 熊光泽 罗 蕾 高汝宗 杨 春 喻 梅 李黎明

CRTOS/386P以 Intel 80386保护模式微处理器为目标机,是一种强实时、嵌埋式、松耦合多机操作系统软件包,支持 Intel BITBUS工业现场控制总线的网络通信,为嵌埋式应用软件提供实时运行和应用开发支持。

创造性地提出一种含优先级索引的多重链表结构和调度判优算法,成功地实现了系统响应时间确定这一关键的技术指标

采用了先进的硅组件式模块层次结构,用多级配置表实现了系统组件级、组件功能级和数据结构级软件剪裁机制。

目标板级的监控软件在国内首次对大于 1兆字节的多任务软件实现了核心态和应用态软件的跟踪调试和状态监视。

CRTOS/386P嵌埋式实时操作系统实现的总体技术指标是:

- 1) 运行环境: 军用嵌埋型保护模式 80386单机,多机系统;
- 2) 实时性: 响应时间可预测,任务切换时间和中断等待时间均为 < 300μs;
- 3) 可剪裁性: 系统软件组件级、组件功能级和功能数据结构级等三级剪裁机制;
- 4) 出错处理能力: 任务级、中断级和系统级三级;
- 5) 可管理的任务数: 可达 255个,信箱数可达 255个,异步信号数可达 255个,信号量数可达 255个;
- 6) 监控能力: 多任务系统监控调试器;
- 7) 网络管理: Bitbus;
- 8) 内核代码规模: 10~ 28 kB

32位嵌埋式实时操作系统 CRTOS/386P是一项自主开发、拥有版权的系统软件成果,它运行稳定可靠,技术文档齐备,在技术上属国内首创。

· 科 卜 ·