用于识别两颗故障卫星的 RAIM 算法

张 强 张晓林 常啸鸣

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 提出了一种可以识别两颗故障卫星的接收机自主完好性监测算法. 将最优奇偶矢量法应用于两颗故障卫星识别, 指出由于故障偏差可能会抵消而使得正确识别率较低. 对最优奇偶矢量法进行了改进, 利用对单颗卫星故障敏感的最优奇偶矢量对所有可能的两颗故障卫星组合分别构造两个新的奇偶矢量, 用于两颗故障卫星的检测和识别. 计算机仿真结果显示, 改进后的算法与直接利用最优奇偶矢量法相比, 可以显著提高两颗故障卫星正确识别率, 识别率可超过 90%. 同时, 改进算法的奇偶矢量构造方法简单, 计算量将减少 90%以上, 更有利于工程实现.

关 键 词: 卫星导航; 接收机自主完好性监测; 算法; 最优奇偶矢量; 故障识别

中图分类号: V 474.2; TN 967.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)07-0773-05

RAIM algorithm for identifying simultaneous two-faulty satellites

Zhang Qiang Zhang Xiaolin Chang Xiaoming

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A new receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) algorithm was proposed for identifying simultaneous two-faulty satellites. The optimal parity vector method was studied, and the results showed that the fault of one satellite may counteract the fault of the other satellite, which reduced correct identifying ratio greatly. Therefore a new approach was developed based the optimal parity vector method. For every possible two-faulty satellites combination, two new parity vectors were constructed for detecting and identifying simultaneous two-faulty satellites, using the parity vectors which were sensitive to designated satellite failure. Computer simulation results show that the correct identifying ratio of using new method is higher than that of using the optimal parity vector method, under the condition of simultaneous two-faulty satellites. With the new algorithm, the correct identifying ratio will be higher than 90%. Moreover, the new method simplifies the processing of constructing parity vector, and reduces more than 90% of the computational burden. So the new method is better for engineering implementation.

Key words: global positioning system; RAIM; algorithm; optimal parity vector; fault identification

接收机自主完好性监测 (RAIM, Receiver Autonomous Integrity Monitoring)是一种卫星导航完好性监测方法, 该方法利用冗余测距信号来检测能引起较大定位偏差的卫星错误. 目前发表的关于 RAIM 的论文大多在研究单星故障问题, 然而, 在一些对完好性要求特别苛刻的领域, 如民用航空领域, 这种单故障假设并不能满足要求; 同时随着可用于定位的卫星星座的增多, 多颗卫星同时发生错误的概率, 尤其是两颗卫星同时发生错误的概率将不能再被忽略[1].

RAIM 算法包括两大类: 一类是基于卡尔曼滤波的 RAIM 算法, 一类是仅利用当前伪距观测量的“快照 (Snapshot)”算法. 卡尔曼滤波算法是通过利用历史观测量来提高效果, 对先验误差特

收稿日期: 2007-06-12

基金项目: 国防科工委民用航天基金专项资助项目

作者简介: 张 强(1982-), 男, 山西山阴人, 博士生, zhangqiang@ee.buaa.edu.cn.

性依赖性强,而实际误差特性很难准确预测,且基于卡尔曼滤波的 RAIM 算法反映速度较慢,这使得这种方法没有被普遍采用. “快照(Snapshot)”算法由于具有不需要外部支持设备,反映速度快,容易实现等优点,目前得到了广泛的使用,这类算法主要有奇偶空间法(Parity)、最小二乘残差和法(SSE, Sum of Squares of Error)、最大间隔法等. 文献[2]对奇偶空间法进行了性能仿真,文献[3]证明了奇偶空间法和最小二乘残差和法在检测准则上的等价性. 这些算法多用于单故障的检测和识别.

文献[4]和文献[5]提出了一种针对特定传感器故障进行诊断的最优奇偶矢量法,文献[6]将这种思想应用到卫星故障识别上,但仅考虑了单星故障的情况. 本文首先将最优奇偶矢量法应用到两颗故障卫星识别,然后分析其识别率低的原因,最后在此基础上提出改进的适用于两颗故障卫星识别的 RAIM 算法.

1 奇偶空间法简介

根据卫星定位原理可以得到如下卫星测量方程:

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{b} + \boldsymbol{e} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{y}$ 是实测伪距与估计值之差,$\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{R}^n$ (n 是用于定位的卫星个数);$\boldsymbol{H}$ 是由各卫星至用户接收机的方向余弦向量构成的线性化矩阵,$\boldsymbol{H}\in\boldsymbol{R}^{n\times m}$,(当仅利用单卫星星座定位时,$m=4$,当利用双卫星星座定位时,$m=5$,依此类推);$\boldsymbol{x}$ 是对先前位置和钟差的修正向量,$\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{R}^m$;$\boldsymbol{b}$ 为卫星故障向量,当没有故障时,$\boldsymbol{b}$ 为 $\boldsymbol{0}$,否则 $\boldsymbol{b}$ 不为 $\boldsymbol{0}$,$\boldsymbol{e}$ 是伪距测量噪声向量,$\boldsymbol{e}\in\boldsymbol{R}^n$,$e_i$ 是均值为 0的高斯白噪声,$e_i\sim N(0,\sigma^2)$,σ^2 为伪距测量方差.

定义奇偶方程:

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{Q}_p\boldsymbol{y} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{Q}_p$ 为奇偶空间矩阵,$\boldsymbol{Q}_p\in\boldsymbol{R}^{(n-m)\times n}$,$\boldsymbol{Q}_p\boldsymbol{H}=\boldsymbol{0}$,$\boldsymbol{Q}_p\boldsymbol{Q}_p^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{E}$;$\boldsymbol{p}$ 为奇偶矢量残差向量,$\boldsymbol{Q}_p$ 矩阵可以由矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的 $\boldsymbol{QR}$ 分解方法得到[7].

将式(1)代入式(2)可得

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{Q}_p(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{b} + \boldsymbol{e}) = \boldsymbol{Q}_p(\boldsymbol{b} + \boldsymbol{e}) \tag{3}$$

由式(3)可以看出,奇偶矢量残差向量仅与测量噪声和卫星故障有关,奇偶空间法正是根据奇偶矢量残差向量在有故障和无故障情况下表现的不一致性进行故障的检测和识别[7].

2 最优奇偶矢量法

假设 $\boldsymbol{q}_0$ 是对某一特定卫星故障敏感的最优奇偶矢量,则 $\boldsymbol{q}_0$ 满足如下关系式:

$$p_0 = \boldsymbol{q}_0(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{b} + \boldsymbol{e}) = \boldsymbol{q}_0(\boldsymbol{b} + \boldsymbol{e}) \tag{4}$$

在有无故障时,p_0 分别服从如下的分布[4-5]:

1) 无故障时,$\boldsymbol{b}=\boldsymbol{0}$,可得

$$p_0 = \boldsymbol{q}_0\boldsymbol{e} \qquad p_0\sim N(0,\ \|\boldsymbol{q}_0\|^2\sigma^2)$$

对 $\boldsymbol{q}_0$ 进行归一化($\hat{\boldsymbol{q}}_0=\boldsymbol{q}_0/\|\boldsymbol{q}_0\|$)处理,上式可以表述为

$$\hat{p_0} = \hat{\boldsymbol{q}}_0\boldsymbol{e} \qquad \hat{p_0}\sim N(0,\ \sigma^2) \tag{5}$$

2) 有故障时,$\boldsymbol{b}\neq\boldsymbol{0}$,可得

$$p_0 = \boldsymbol{q}_0(\boldsymbol{b} + \boldsymbol{e}) \qquad p_0\sim N(\boldsymbol{q}_0\boldsymbol{b},\ \|\boldsymbol{q}_0\|^2\sigma^2)$$

对 $\boldsymbol{q}_0$ 归一化后,上式可以表述为

$$\hat{p_0} = \hat{\boldsymbol{q}}_0(\boldsymbol{b} + \boldsymbol{e}) \qquad \hat{p_0}\sim N(\hat{\boldsymbol{q}}_0\boldsymbol{b},\ \sigma^2) \tag{6}$$

对于给定的误警率 α,故障识别准则如下:

① $|\hat{p_0}|>T_{1-\alpha/2}$,当前特定卫星有故障;

② $|\hat{p_0}|<T_{1-\alpha/2}$,当前特定卫星无故障.

其中,$T_{1-\alpha/2}$是正态分布 $N(0,\ \sigma^2)$的 $1-\alpha/2$分位点.

设 $\boldsymbol{q}'$是待求的对某一特定卫星故障敏感的奇偶矢量,$\boldsymbol{q}'$可以由 $\boldsymbol{Q}_P$ 矩阵的 $n-m$ 个行向量线性表出[6]:

$$\boldsymbol{q}' = \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_p \tag{7}$$

其中 $\boldsymbol{c}$为 $\boldsymbol{Q}_p$ 中各行向量的加权系数构成的列向量,$\boldsymbol{c}\in\boldsymbol{R}^{n-m}$. 求得列向量 $\boldsymbol{c}$就可以由式(7)得到相应的最优奇偶矢量.

构造对第 i颗卫星故障敏感的性能指标式:

$$J_i = \frac{(\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_p\boldsymbol{E}_i)^2}{\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Q}_p(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{E}_i\boldsymbol{E}_i^{\mathrm{T}})\boldsymbol{Q}_p^{\mathrm{T}})\boldsymbol{c}} \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{E}$ 表示 n阶单位矩阵;$\boldsymbol{E}_i$ 表示 $\boldsymbol{E}$ 的第 i个列向量.

由文献[4, 6]可知,当 $\boldsymbol{c}=k(\boldsymbol{Q}_p(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{E}_i\boldsymbol{E}_i^{\mathrm{T}})\boldsymbol{Q}_p^{\mathrm{T}})^{-1}(\boldsymbol{Q}_p\boldsymbol{E}_i)$时,上式达到最大值,其中 k 表示任意的非零比例系数.

3 双星故障识别算法

本节首先将最优奇偶矢量法应用于两颗故障卫星识别,然后针对其不足之处提出改进算法.

3.1 利用最优奇偶矢量法进行双星故障识别

根据最优奇偶矢量法构造对第 i颗和第 j颗卫星故障敏感的性能指标式:

$$J_{i,j} = \frac{\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{c}}{\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{c}} \tag{9}$$

式中,$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{Q}_p(\boldsymbol{E}_i\boldsymbol{E}_i^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{E}_j\boldsymbol{E}_j^{\mathrm{T}})\boldsymbol{Q}_p^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{Q}_p(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{E}_i\boldsymbol{E}_i^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{E}_j\boldsymbol{E}_j^{\mathrm{T}})\boldsymbol{Q}_p^{\mathrm{T}}$.

利用文献[8]中给出的定理,将式(9)的解写作 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{c}=\lambda\boldsymbol{B}\boldsymbol{c}$,这是一个矩阵广义特征值问题,$\boldsymbol{c}$是

与广义特征值 λ对应的特征向量. 式 (9)的最大值就是最大的广义特征值, 进而根据该特征值求得 $\boldsymbol{c}$, 得到对第 i颗和第 j颗卫星故障敏感的最优奇偶矢量. 得到最优奇偶矢量后, 利用第 2节的故障识别准则即可给出故障判决结果.

3.2　不足分析

直接利用最优奇偶矢量法进行双星故障识别时只有 40% ~ 60%的正确识别率, 通过分析可以得到最优奇偶矢量法进行双星故障识别时的 2个不足点:

1) 通过式 (4)计算奇偶矢量残差时存在故障偏差抵消.

假设卫星 i和卫星 j发生故障, 即卫星故障向量 $\boldsymbol{b}$中 b_i和 b_j不为 0, 利用最优奇偶矢量法得到的对卫星 i和卫星 j故障敏感的奇偶矢量为 $\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}$:

$$\hat{p}_{ij} = \hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(i)b_i + \hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(j)b_j + \sum_{k=1}^{n}\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(k)e_k \tag{10}$$

式中体现故障偏差的项为 $\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(i)b_i + \hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(j)b_j$, 而此项存在相互抵消的可能性.

当 $\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(i)\cdot\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(j) > 0$时, 对异号故障即 $b_i\cdot b_j < 0$的故障存在偏差抵消;

当 $\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(i)\cdot\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(j) < 0$时, 对同号故障即 $b_i\cdot b_j > 0$的故障存在偏差抵消.

故障偏差抵消导致奇偶矢量残差不能很好地体现故障信息, 如果 $\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(i)b_i + \hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(j)b_j$很接近 0, $\hat{p}_{ij}$将近似服从 $N(0, \sigma^2)$, 此时有无故障的奇偶矢量残差将服从相近的正态分布, 很难利用奇偶矢量残差来进行故障的检测和识别.

2) 卫星故障判决准则不合理.

识别两颗故障卫星时, 在噪声、卫星分布的影响下, 特别是由于存在故障偏差抵消, 直接采用最优奇偶矢量法的故障识别准则会有 30%以上的误识别率.

文献[6]将最优奇偶矢量法应用到单卫星故障识别上, 并给出利用 $|\hat{p}_i|^2$最大值作为故障识别函数, 利用此识别函数在单故障识别时可以得到很高的故障识别率. 如果直接将这种识别准则应用到双故障识别上, 用 $|\hat{p}_{ij}|^2$的最大值进行判断, 通过计算机仿真可以发现仍然存在较高的误识别率, 效果不如应用到单故障识别好.

3.3　改进的最优奇偶矢量故障识别法

为消除直接利用最优奇偶矢量法的不足, 本节基于最优奇偶矢量法提出新的用于两颗故障卫星识别的算法:

1) 假设有 n颗可见卫星, 利用第 2节介绍的方法, 可以得到 n个对每颗卫星故障分别敏感的最优奇偶矢量 $\hat{\boldsymbol{q}}_i$ ($i = 1, 2, \cdots, n$);

2) 构造对卫星 i和卫星 j故障敏感的奇偶矢量:

$$\boldsymbol{a}_{ij} = \hat{\boldsymbol{q}}_i + \hat{\boldsymbol{q}}_j \tag{11}$$

$$\boldsymbol{m}_{ij} = \hat{\boldsymbol{q}}_i - \hat{\boldsymbol{q}}_j \tag{12}$$

分别将这两个矢量归一化得到 $\hat{\boldsymbol{a}}_{ij}$和 $\hat{\boldsymbol{m}}_{ij}$;

3) 根据给定的误警率 α确定故障检测门限 $T_{1-\alpha/2}$; 由所有 $\hat{\boldsymbol{a}}_{ij}$和 $\hat{\boldsymbol{m}}_{ij}$可以得到 $n(n-1)$个奇偶矢量残差 $\hat{c}_{i,j}$, 比较确定出绝对值最大的奇偶矢量残差 $\hat{c}^*$, 设定识别门限 $T_l = k|\hat{c}^*|$, k为调节系数, $0 < k < 1$;

4) 奇偶矢量残差绝对值超过故障检测门限 $T_{1-\alpha/2}$, 并超过识别门限 T_l的两颗卫星组合都可能是故障卫星组合, 需要对这些组合分别做排除解算, 最终确定故障组合.

为消除故障偏差抵消, 应构造两个奇偶矢量分别考虑故障偏差同号与异号的情况, 理论上应构造如下的性能指标式:

$$W_{ij} = \frac{\boldsymbol{c}_a^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{c}_a}{\boldsymbol{c}_a^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{c}_a} \quad (\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(i)\cdot\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(j) > 0) \tag{13}$$

$$V_{ij} = \frac{\boldsymbol{c}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{c}_m}{\boldsymbol{c}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{c}_m} \quad (\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(i)\cdot\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(j) < 0) \tag{14}$$

式 (13)和式 (14)分别表示满足条件 $\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(i)\cdot\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(j) > 0$和 $\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(i)\cdot\hat{\boldsymbol{q}}_{ij}(j) < 0$的最优奇偶矢量性能指标, 分别求得使式 (13)和式 (14)达到最大值的加权系数 $\boldsymbol{c}_a$和 $\boldsymbol{c}_m$即可构造对同号偏差最为敏感的最优奇偶矢量和对异号偏差最为敏感的最优奇偶矢量. 由于利用式 (13)和式 (14)的条件极值来求取奇偶矢量相当复杂, 不适用于工程应用, 改进算法采用了 $\hat{\boldsymbol{a}}_{ij}$和 $\hat{\boldsymbol{m}}_{ij}$.

$\hat{\boldsymbol{a}}_{ij}$和 $\hat{\boldsymbol{m}}_{ij}$虽然不是最优的, 但由于对单星故障敏感的归一化的 $\hat{\boldsymbol{q}}_i$拥有较大的第 i分量和较小的第 j分量, 而 $\hat{\boldsymbol{q}}_j$拥有较大的第 j分量和较小的第 i分量, 这使得 $\hat{\boldsymbol{a}}_{ij}$和 $\hat{\boldsymbol{m}}_{ij}$的第 i分量和第 j分量均较大, 而且 $\hat{\boldsymbol{a}}_{ij}$和 $\hat{\boldsymbol{m}}_{ij}$分别对同号故障偏差和异号故障偏差敏感, 这将非常有益于两颗故障卫星的识别而且简化了奇偶矢量的构造方法.

此外, 本算法在故障识别时, 综合了最优奇偶矢量法的超出门限准则和文献[6]的残差最大准则, 并采用了调节系数, 使得故障识别的结果可能不只一个组合, 辅以验证解算步骤可以有效识别出故障卫星, 这将有效提高两颗故障卫星的正确识别率. 调节系数 k的选取决定着排除解算的计算量也影响着故障识别率, 通过计算机蒙特卡洛

仿真可以看出, 对于单 GPS(Global Position System)系统, k取 0.9就可获得 90% 以上的正确识别率.

4 仿真结果

针对 GPS卫星定位系统, 利用计算机对改进算法进行仿真, 并与直接利用最优奇偶矢量法进行比较. 在可见 12颗星时, 给定 $\sigma = 4$m, 误警率 $\alpha = 0.001$, 调节系数 $k = 0.9$, 对不同的两颗卫星组合分别加入不同幅值的故障偏差进行 3600次蒙特卡洛仿真, 可以得到如图 1和图 2的仿真结果.

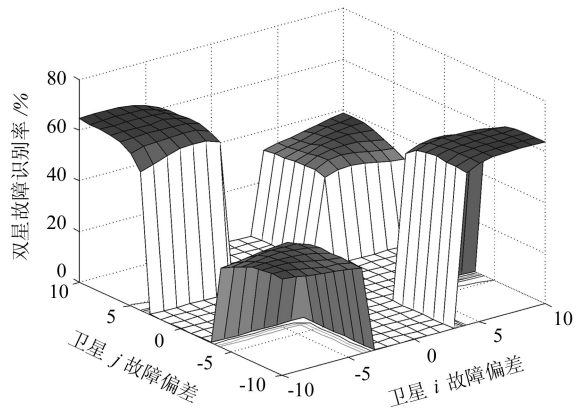


图 1 两颗故障卫星条件下
最优奇偶矢量法的故障识别率

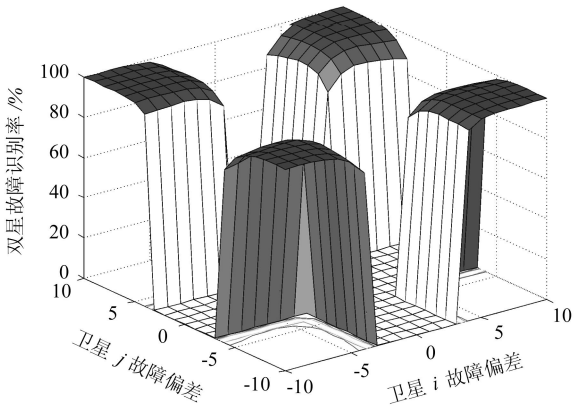


图 2 两颗故障卫星条件下改进算法的故障识别率

图 1和图 2中, x, y 坐标轴分别表示两颗故障卫星上故障幅值与 σ 的比值. 仿真中对所有两颗星组合分别加 $-10\sigma \sim -4\sigma$, $4\sigma \sim 10\sigma$ 的故障偏差, 由仿真结果可以明显看出最优奇偶矢量法在用于两颗故障卫星识别时, 当两颗星的故障同为正偏差或同为负偏差时, 识别率很低, 只有 30%多, 当两颗星的故障为异号偏差时, 识别率也不超过 80%, 而采用改进算法后, 不论两颗星的故障偏差同号或是异号, 故障识别率都大于 90%, 当故障偏差较大时, 故障识别率将高于 99%.

5 计算复杂度比较

最优奇偶矢量法在构造对两颗故障卫星敏感的最优奇偶矢量时, 涉及到求矩阵广义特征值的问题, 求取过程复杂烦琐, 而改进算法只需求取对单星故障敏感的最优奇偶矢量, 构造方法简单, 在可见 12颗卫星的情况下, 构造奇偶矢量的计算复杂度和计算量的比较结果如表 1所示.

表 1 计算复杂度和计算量的比较结果

方法	是否需要求广义特征值	基本矢量个数	浮点乘除法次数
原始方法	需要	66	约 3014
改进方法	不需要	12	约 1400

表 1中基本矢量个数是指需要构造的独立奇偶矢量个数. 对于原始最优奇偶矢量方法而言, 对每种组合构造的奇偶矢量间没有简单的数学关系, 共需要构造 66个; 而改进方法对每种组合构造的奇偶矢量是基于单故障的最优奇偶矢量的和、差矢量, 所以只需要求取 12个对单故障敏感的最优奇偶矢量. 表中的浮点乘除法次数是指构造每个基本矢量所需要的大概计算量.

表 1中原始方法求矩阵广义特征向量时采用雅可比法[9], 计算量是在迭代 5次的条件下统计的. 由表 1可见改进算法大大简化了构造奇偶矢量的复杂程度, 降低了 90% 以上的计算量, 更有益于工程实现.

6 结 论

理论分析和计算机仿真结果都表明, 直接利用最优奇偶矢量法进行两颗故障卫星识别时存在偏差抵消问题, 故障识别率不高; 本文提出的双星故障识别算法是基于最优奇偶矢量法进行改进的, 改进算法采用对单故障敏感的最优奇偶矢量的和、差矢量作为检测奇偶矢量, 避免了偏差抵消, 进而获得 90%以上的故障识别率. 同时, 改进算法用于故障识别奇偶矢量的构造方法与最优奇偶矢量法相比, 避免了求矩阵广义特征向量的复杂运算, 计算量减小 90%以上, 更有益于工程实现.

参考文献 (References)

[1] Young D, Lee C. Performance of receiver autonomous integrity monitoring(RAIM) in the presence of simultaneous multiple satellite faults[C]//60th Annual Meeting of the Institute of Navigation. Dayton, OH, United States: Institute of Navigation

2004: 687- 697

[2] Ahmed IAbidat, Li Cong, Tan Zhanzhong. The study of RAIM performance by simulation[J]. CADDM, 2006, 16(2): 58- 64

[3] 刘准, 陈哲. GPS自主完整性检测技术研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(8): 673- 676
Liu Zhun, Chen Zhe. Study on GPS receiver autonomous integrity monitoring[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(8): 673- 676(in Chinese)

[4] Jin Hong, Zhang Hongyue. Failure detection using optimal parity vector sensitive to special sensor failure[C]//Proceedings of the 1996 IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. Washington, DC, USA: IEEE, 1996: 55- 61

[5] Jin Hong, Zhang Hongyue. Optimal parity vector sensitive to designated sensor fault[J]. Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(4): 1122- 1228

[6] 杨静, 张洪钺. 卫星故障诊断的最优奇偶向量法[J]. 航空学报, 2002, 23(2): 183- 186
Yang Jing, Zhang Hongyue. Satellite fault diagnosis based on optimal parity vector method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 183- 186(in Chinese)

[7] 陈金平. GPS完善性增强研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学测绘学院, 2001
Chen Jinpin. Research of GPS integrity augmentation[D]. Zhengzhou: Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 2001(in Chinese)

[8] 张洪钺. 不确定系统鲁棒解析余度的最优设计[J]. 控制与决策, 1994, 9(2): 141- 145
Zhang Hongyue. Optimal design of robust analytical redundancy for uncertain systems[J]. Control and Decision, 1994, 9(2): 141- 145(in Chinese)

[9] 周长发. C#数值计算算法编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 123- 124
Zhou Changfa. C# numerical value computation and algorithm programming[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 123- 124(in Chinese)

(责任编辑: 娄　嘉)

(上接第 750页)

参考文献 (References)

[1] Penny G P, Weese J, Little J A, et al. A comparison of similarity measures for use in 2D/3D medical image registration[J]. IEEE Trans Image Processing, 1998, 17: 586- 595

[2] Tomazevic D, Likar B, Slivnik T, et al. 3-D/2-D registration of CT and MR to X-ray images[J]. IEEE Trans Med Imag, 2003, 22(11): 1407- 1416

[3] Rougee A, Picard C, Ponchut C, et al. Geometrical calibration of X-ray imaging chains for three-dimensional reconstruction[J]. Computerized Medical Imaging & Graphics, 1993, 17(4/5): 295- 300

[4] Livyatan H, Yaniv Z, Joskowicz L. Robust automatic C-arm calibration for fluoroscopy-based navigation: A practical approach[C]//Proc Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention Conf. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002

[5] Foley K T, Simon D A, Rampersaud R Y. Virtual fluoroscopy[J]. Operative Techniques in Orthopaedics, 2000, 10(1): 77- 81

[6] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43- 55
Qiu Maolin, Ma Songde, Li Yi. Overview of camera calibration for computer vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(1): 43- 55(in Chinese)

[7] Fiore P D. Efficient linear solution of exterior orientation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(2): 140- 148

[8] Ganapathy S. Decomposition of transformation matrices for robot vision[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1984: 130- 139

[9] Lilla Z. 2D-3D rigid-body registration of X-ray fluoroscopy and CT images[D]. Massachusetts: MIT AI Lab, Department of Computer Science and Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2001

[10] Batista J, Araujo H. Iterative multistep explicit camera calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(5): 897- 917

[11] 张利军. 术中 C臂三维成像及其在骨科手术这的导航方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学机械工程与自动化学院, 2004
Zhang Lijun. C-arm based intra-operative 3D imaging and its navigation techniques in computer assisted orthopedic surgery[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004(in Chinese)

[12] Arun K S, Huang T S, Blostein S D. Least square fitting of two 3-D point sets[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(5): 698- 700

(责任编辑: 文丽芳)