

分组故障检测证据融合多星故障隔离算法

王会宾, 程咏梅[†], 樊伟, 李松, 苟斌

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710129)

摘要: 针对卫星导航星座数增加导致的多星故障率上升问题, 提出一种分组故障检测证据融合多星故障隔离算法. 该算法首先将可见星分组并作为证据, 利用故障检测量计算每个证据的故障置信指派和正常置信指派; 然后, 针对加权分配冲突法融合结果受证据融合次序影响的问题, 给出一种基于可靠程度的权值计算方法, 实现加权分配冲突法的多证据融合, 并得到当前卫星的单星故障置信指派和正常置信指派信息; 最后, 利用所有卫星的单星故障置信指派均值作为故障隔离阈值, 实现故障卫星隔离. 在GPS/BDS双星座导航模式下, 对算法的分组个数与故障隔离效果关系进行分析, 并将其与随机搜索法及置信指数法进行多星故障隔离效果对比, 理论分析与实验结果表明所提出算法具有更高的准确性.

关键词: 卫星导航系统; 故障隔离; 多证据融合; 加权分配冲突法

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A

Multi-satellite faults isolation algorithm based on group fault detection and evidences fusion

WANG Hui-bin, CHENG Yong-mei[†], FAN Wei, LI Song, GOU Bin

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In allusion to the increased possibility of multi-satellite faults resulting from the increase of navigation satellite constellation, a multi-satellite faults isolation algorithm based on group fault detection and evidences fusion is proposed. Firstly, all visible satellites are divided into groups and each group is taken as an evidence, and the fault and fault-free belief assignment of every evidence is calculated by fault detection. Then, a reliability based weight calculation method is proposed to realize the multi-evidence fusion in the weighted distribution method, so the situation that fusion result varies with fusion order can be deal with, and the fault and fault-free belief assignment of current satellites can be obtained. Finally, the fault satellites are isolated by taking the mean of all single satellite fault belief assignment as the fault isolation threshold. The relationship between faults isolation effect and group number of the proposed method is analyzed in GPS/BDS navigation mode. Furthermore, contrastive analysis is done among the faults isolation effect of the random search method, the quality value method and the proposed method, which verifies the effectiveness and superiority of the proposed algorithm.

Keywords: global navigation satellite system; fault isolation; multi-evidence fusion; weighted distribution method

0 引言

随着导航技术的不断发展, 我国的民用导航模式已由单星座导航逐渐转向双星座导航. 在使用双星座模式进行导航时, 可见星数量明显增加, 导航精度得到了提高, 并且卫星故障的检测与隔离能力得到了增强^[1]. 然而, 双星座的使用使得多星故障发生的概率也随之增加, 因此卫星故障检测与隔离的对象也由单星故障逐渐转向多星故障^[2-4].

文献[5]提出一种随机搜索故障隔离的方法, 利用故障检测率比隔离率高的特点, 首先搜索出一组

无故障可见卫星, 然后逐次结合其他卫星进行故障检测来判断增加的卫星是否故障, 具有一定的故障隔离率. 然而, 该方法的准确率很大程度依赖于随机搜索到无故障分组的准确性, 如果该过程中由于漏检而保留了故障星, 则故障隔离结果必然出现错误.

文献[6]将所有可见卫星自由组合为多个子集分别进行故障检测, 计算各子集的置信指数并分配给子集所有卫星, 以每颗卫星置信指数总和作为其置信程度进行故障隔离. 算法利用多个子集的故障检测结果使故障隔离在结构上更加鲁棒, 然而只利用故障子

收稿日期: 2017-11-20; 修回日期: 2018-02-20.

责任编辑: 赵春晖.

[†]通讯作者. E-mail: chengym@nwpu.edu.cn.

集进行卫星的置信程度计算而未考虑无故障子集的信息,使得无故障卫星参与故障子集次数越多其无故障可信程度越低,故障卫星参与无故障子集次数越多其故障可信程度越低,降低了故障隔离的准确性.若能同时利用故障子集和无故障子集的信息进行卫星故障可信程度的计算,则可以很好地解决这一问题.

采用基于残差 χ^2 校验的卫星故障检测算法时,卫星分组中故障检测量大小会随故障偏差变化,较大的故障检测量表示分组中卫星很大可能存在故障,较小的故障检测量表明分组中卫星故障的可能很小,因此可同时考虑故障分组和无故障分组的故障和无故障置信情况,作为判断卫星是否存在故障的依据.

本文提出一种分组故障检测证据融合多星故障隔离算法.该算法将所有可见星分组,每一分组作为一个证据,利用基于残差 χ^2 的故障检测量对每个分组进行故障置信指派和正常置信指派计算.针对加权分配冲突法融合结果受融合次序影响的问题,给出一种基于可靠程度的权值计算方法,实现加权分配冲突法的多证据扩展融合.完成单星故障置信指派和正常置信指派融合,用所有卫星的故障置信指派均值为故障隔离阈值,筛选隔离出故障卫星.通过不同可见星数、不同故障偏差、不同故障数下的仿真实验分析,验证了所提出方法的有效性.

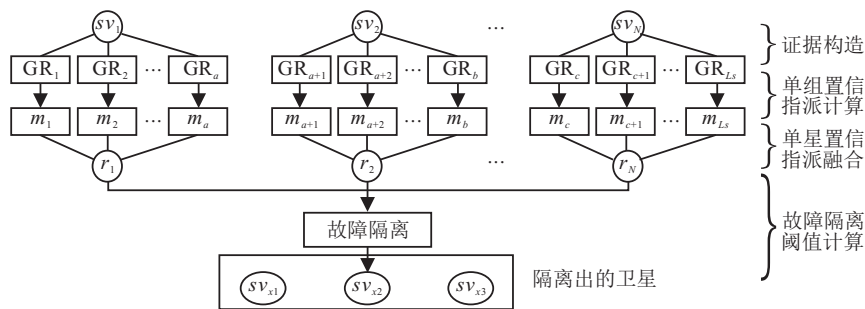


图1 基于证据推理的多星故障隔离算法流程

1.2 算法步骤

1.2.1 可见卫星分组

将 N 颗可见卫星分组时,为了保证每组都具有量测的冗余性以使故障检测算法有效,需要每组至少 $r(r = 4 + q)$ 个卫星量测,其中 q 为星座个数.例如GPS/BDS双星座具有3个用户位置修正参数和2个时钟偏差修正参数共5个状态值,故每组至少需6个卫星量测.以卫星 sv_1 为例,若其参与的每一个分组均具有 r 颗卫星量测,则其分组规则为从剩余 $N - 1$ 颗卫星中选出 $r - 1$ 颗与其组合,参与的分组个数为 $a = C_{N-1}^{r-1}$ 个,若所有卫星采用同样的分组规则,则所有卫星参与分组数的总和为 $Ls = NC_{N-1}^{r-1}$ 个.

1 证据融合多星故障隔离算法框架

1.1 辨识框架建立

本文的故障隔离算法以Dempster-Shafer证据推理理论为基础^[7-10].以单颗卫星为例,其辨识框架为: $\Theta = \{\text{该卫星有故障、该卫星正常}\}$.参与的每次分组即为一个独立的证据,每个证据均有两个独立的证据焦点: F ,认为该卫星存在故障; N ,认为该卫星正常.每个焦点的置信指派即可靠程度可通过其置信指派函数得到,则对某卫星参与的第 i 个分组证据,其故障和正常的置信指派可分别表示为 $m_i(F)$ 和 $m_i(N)$.将该卫星参与的所有分组证据采用加权分配冲突法进行融合,可得到该卫星的故障和正常置信指派.

对于所有可见星而言,故障卫星的故障置信指派总是会大于正常卫星的故障置信指派,如果故障卫星数远小于所有可见星数,则可用所有可见星的故障置信指派平均值作为参考筛选出故障卫星.故障隔离的整体流程如图1所示.图1中: sv_N 为第 N 颗卫星, GR_{Ls} 为第 Ls 个分组, m_{Ls} 为第 Ls 个分组的故障置信指派, r_N 为第 N 颗卫星的故障置信指派.下标 a 、 b 的数值分别等于第1、第2颗卫星参与的所有分组个数,下标 Ls 数值等于所有卫星各自参与分组数的总和, a 、 b 、 Ls 计算方法见下节.

注意到,由于每个分组具有 r 个卫星量测,该分组对于这 r 颗卫星而言是公用的分组,即 Ls 个分组中有大量是重复的.假设无重复分组的总分组个数为 L ,则其分组规则为从所有 N 颗卫星中选取 r 颗进行组合,总分组个数 L 的数值为

$$L = C_N^r = \frac{N!}{r!(N-r)!}. \quad (1)$$

以上分组个数过多,当有18颗可见星时分组数会达到18 564,为减少运算时间,本文采用等间隔 K 从 L 个总卫星分组中抽取用于计算的 L_1 个分组,即

$$L_1 = \text{floor}(L/K). \quad (2)$$

1.2.2 置信指派计算

确定如何分组后,要对每颗卫星参与各分组的故障置信指派和正常置信指派进行计算. 置信指派函数的选取需遵循以下原则:

- 1) 当该卫星故障时,其参与分组的故障置信指派大于正常置信指派;
- 2) 当该卫星正常时,其与正常卫星构成的分组的正常置信指派大于故障置信指派;
- 3) 单组的故障及正常置信指派代数和为1.

1.2.3 置信指派融合

对卫星参与的所有证据置信指派进行融合,即可得到该卫星整体的故障和正常置信指派. 证据的置信指派融合公式有多种,最常见的为Dempster组合规则,但该规则对高冲突性证据组合不适用^[11]. 对于同时参与正常分组和故障分组的卫星而言,其证据往往具有冲突性. 为对冲冲突指派进行合理分配,这里采用加权分配冲突法进行证据组合.

1.2.4 故障隔离

由前文可知单颗卫星的故障置信指派与正常置信指派之和为1,这里采用故障置信指派作为故障隔离的检测量,与采用正常置信指派时效果相同.

由于每一时刻卫星的伪距偏差大小具有随机性,使得分组故障置信指派计算时,分组的故障置信指派随之产生浮动,这会造成融合后卫星的故障置信指派整体趋势随伪距偏差产生变化,如图2所示. 图2中,实线为第1次实验,虚线为第2次实验,点线为第3次实验. 这对采用固定阈值进行故障隔离十分不利,自适应阈值计算如下:

$$T_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m(A_i) + M, \quad (3)$$

其中 M 为大于零的常数,通常可取 $0.1 \sim 0.2$.

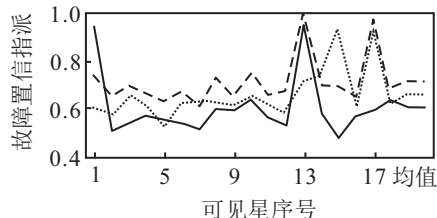


图2 18颗可见星下双星故障置信指派重复实验曲线

2 基于分组故障检测量的基本置信指派计算及融合

2.1 基于分组故障检测量的基本置信指派

2.1.1 基于残差 χ^2 的故障检测

卫星导航系统的伪距观测模型可表示为

$$y = Gx + b + \epsilon. \quad (4)$$

其中: x 为 $(q+3) \times 1$ 维状态矢量 (q 为星座个数), 代表实际与标称位置的3个偏差分量和 q 个用户时钟偏差; y 为测量矢量, 其元素是每颗卫星的测量伪距与线性化点预测伪距之间的差值; n 为可见星数目; G 为 $n \times 5$ 维观测矩阵; ϵ 为 n 维噪声矢量; b 为 n 维故障偏差矢量, 表示由卫星故障引起的伪距偏差, 如第 i 颗卫星发生故障则 $b = [0 \cdots b_i \cdots 0]^T$, 若无故障卫星则 b 为零矢量^[12].

采用最小二乘估计时伪距残差向量可表示为

$$\omega = y - \hat{y} = (I - G(G^T G)^{-1} G^T)(\epsilon + b) = S(\epsilon + b). \quad (5)$$

令 θ 为是否存在故障的检测量, 有

$$\theta = \omega^T \omega / \sigma_0^2 = (\epsilon + b)^T S(\epsilon + b) / \sigma_0^2, \quad (6)$$

其中 σ_0^2 为 n 维噪声矢量 ϵ 各分量的方差.

若伪距量测中不存在故障, 即 b 为零矢量, 则 θ 服从自由度为 $n-q-3$ 的 χ^2 分布; 若存在故障, 即 b 为非零矢量, 则 θ 服从自由度为 $n-q-3$ 的非中心化 χ^2 分布^[13]. 为此选取故障检测阈值 T , 使得当 $\theta > T$ 时, 认为分组中存在故障卫星的可能性更大; 当 $\theta < T$ 时, 认为分组中卫星正常的可能性更大; 当 $\theta = T$ 时, 二者具有相同的可能性. T 的取值可参考下式.

$$P_r(\theta < T) = \int_0^T f_{\chi^2(n-q-3)}(x) dx = 1 - P_{FA}. \quad (7)$$

其中: $f_{\chi^2(n-q-3)}(x)$ 是自由度为 $n-q-3$ 的标准 χ^2 概率密度函数, P_{FA} 为给定的误警概率^[14].

2.1.2 基本置信指派计算

对于每个分组, 可根据式(7)计算故障检测量阈值 T , 根据式(6)计算一个故障检测统计量 θ . 如果故障检测统计量 θ 超过阈值 T , 则认为参与该分组的卫星量测中更可能包含有故障卫星的量测. 存在故障的可信程度由其故障检测统计量超过阈值 T 的概率确定, 以故障的基本置信指派 $m(F)$ 表示. 如果故障检测统计量不超过阈值 T , 则认为参与该分组的卫星量测中更可能不包含有故障卫星的量测, 正常的可信程度由其故障检测统计量小于阈值 T 的概率确定, 以正常的基本置信指派 $m(N)$ 表示. 分组 i 的 $m_i(F)$ 和 $m_i(N)$ 可由下式计算, θ_k 大于 T 的分组 k 的 $m_k(F)$ 和 θ_l 小于 T 的分组 l 的 $m_l(N)$ 如图3所示:

$$m_i(F) = \frac{1}{2} \frac{\int_0^{T_a} f_{\chi^2(n-q-3)}(x) dx}{\int_0^T f_{\chi^2(n-q-3)}(x) dx} + \frac{1}{2} \frac{\int_T^{T_b} f_{\chi^2(n-q-3)}(x) dx}{\int_T^{+\infty} f_{\chi^2(n-q-3)}(x) dx};$$

$$m_i(N) =$$

$$\frac{1}{2} \frac{\int_{T_a}^T f_{\chi^2(n-q-3)}(x) dx}{\int_0^T f_{\chi^2(n-q-3)}(x) dx} + \frac{1}{2} \frac{\int_{T_b}^{+\infty} f_{\chi^2(n-q-3)}(x) dx}{\int_T^{+\infty} f_{\chi^2(n-q-3)}(x) dx}. \quad (8)$$

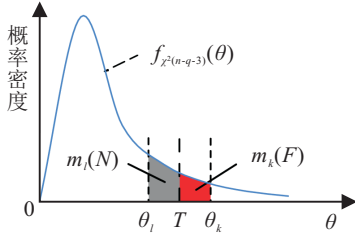


图3 故障置信指派 $m_k(F)$ 和正常置信指派 $m_l(N)$ 曲线

式(8)中, $T_a = \min(T, \theta)$, $T_b = \max(T, \theta)$. 例如对于GPS/BDS双星座系统, 如果分组中有两个星座的量测时, 则 q 等于2. 单个分组的 $m(F)$ 和 $m(N)$ 随 θ 变化的曲线如图4所示.

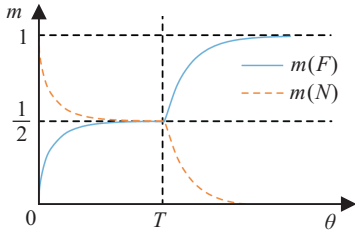


图4 $m(F)$ 和 $m(N)$ 随 θ 变化曲线

结合图3和图4可知, 当 $\theta = T$ 时, 分组故障与分组正常具有同样的可能性, $m(N) = m(F) = 0.5$. 当 θ 接近于0时, 其在阈值 T 左侧的距离最远, 此时 $m(F)$ 最小, 表示该分组故障的基本置信指派最小, 正常的可能性最大. 随着 θ 的增大, 分组故障的可能性逐渐增大. 当 θ 接近于无穷大时, 其在阈值 T 右侧的距离最远, 此时 $m(F)$ 最大, 表示该分组故障的可能最大. 可见该置信指派计算方法符合第1.2.2节置信指派函数的设计原则.

注意到, 由于一个分组中有多颗卫星而分组的故障检测量只有一个, 这里以整个分组的基本置信指派来代替每颗卫星在该分组中得到的基本置信指派.

2.2 多证据融合

证据推理中的加权分配冲突法定义如下^[15]: 对于辨识框架 Θ 上性质不同的两个证据 B 和 C , 其焦元分别为 B_i 和 C_j ($i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$), 其基本置信函数分别为 m_1 和 m_2 . 如果

$$\sum (m_1(B_i)m_2(C_j) | B_i \cap C_j \neq \emptyset) \neq 0, \quad (9)$$

其中 $B_i, C_j \subseteq \Theta$, 则 m_1 和 m_2 可用以下规则组合:

$$m(A) = \sum_{B_i \cap C_j = A} m_1(B_i)m_2(C_j) + \sum_{A \cap B_i = \emptyset, A \cap C_j = \emptyset} [\omega m_1(A)m_2(C_j) +$$

$$(1 - \omega)m_1(B_i)m_2(A)], \quad (10)$$

其中比例系数 ω 可以用两组证据可靠程度的比值进行定义. 这里分别定义 B 和 C 的可靠度为 $\alpha_1 = 1/p_1$ 和 $\alpha_2 = 1/p_2$ ($p_1, p_2 > 0$), p_1 和 p_2 越大表示对应证据越不可靠. 令 $\omega = \alpha_1/(\alpha_1 + \alpha_2)$, 组合规则可改写为

$$m(A) = \sum_{B_i \cap C_j = A} m_1(B_i)m_2(C_j) + \sum_{A \cap B_i = \emptyset, A \cap C_j = \emptyset} \left[\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} m_1(A)m_2(C_j) + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} m_1(B_i)m_2(A) \right] = \sum_{B_i \cap C_j = A} m_1(B_i)m_2(C_j) + \sum_{A \cap B_i = \emptyset, A \cap C_j = \emptyset} \left[\frac{p_2}{p_1 + p_2} m_1(A)m_2(C_j) + \frac{p_1}{p_1 + p_2} m_1(B_i)m_2(A) \right]. \quad (11)$$

新的证据 m 对应的可靠度为

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = \frac{p_1 + p_2}{p_1 p_2}. \quad (12)$$

该可靠度定义可以保证在多证据组合时组合顺序不影响组合结果, 同时可以用参数 α 来为组合结果的可靠程度提供参考.

3 仿真分析

为了评估本文算法在不同可见星数、不同故障数和不同故障大小情况下的故障隔离性能, 在GPS和BDS组成的双星座导航系统下, 以随机选取产生故障卫星的方式, 仿真分析检测和隔离1~3颗不同偏差的故障卫星. 每种情形均进行5000次Monte Carlo仿真. 故障隔离的效果以正确隔离率进行评价. 正确隔离率定义为正确隔离出故障卫星次数与隔离总次数的比值. 这里的正确隔离是指隔离卫星与真实故障卫星完全一致, 多隔离或者少隔离均视为不正确的隔离, 从而保证隔离后有较好的定位结果.

仿真中GPS和BDS的卫星量测数据均通过各自的星历产生. 其中GPS/BDS的量测伪距噪声标准差为33m, 可见卫星颗数分别设置为14、16、18、20、22颗5种情形, 参考国际民航组织对导航性能的要求, 设定误警率为 $10^{-5}/3600$, 漏检率为0.014. 根据误警率 P_{FA} 和漏检率 P_{MD} 可以确定可检测临界偏差 P_{bias} ^[14]. P_{bias} 是使漏检率满足最大容许漏检率时故障偏差的最小值(故障偏差越小越容易漏检), 有

$$P_{bias} = \sqrt{\lambda} \sigma_0. \quad (13)$$

其中: λ 为非中心化 χ^2 概率密度函数的非中心化参数, σ_0 为伪距量测误差标准差^[2]. 本文在仿真中

加入的故障偏差大小均为临界偏差 P_{bias} 的倍数 ($0.8P_{\text{bias}}, 1P_{\text{bias}}, 1.5P_{\text{bias}}, 2P_{\text{bias}}$ 四种故障偏差).

3.1 分组个数对故障隔离效果影响分析

当采用双星座导航时,可见卫星颗数通常会达到18颗以上,此时若采用 C_N^6 的分组则会由于分组数过多而大大影响故障隔离的效率,必须进行分组的筛选.采用等间隔的方式对分组进行筛选并对筛选出的分组个数对故障隔离效果造成的影响进行分析.

以 $1.0P_{\text{bias}}$ 的双星故障情况为例,对不同分组数对应的正确隔离率统计结果如表1所示.

表1 给定可见星及总分组数下的双星故障正确隔离率 %

总分组个数	可见星数目				
	14	16	18	20	22
10	10.09	4.30	1.20	0.20	0.10
30	54.55	52.65	30.37	23.48	12.59
60	66.13	80.02	87.51	70.33	61.24
100	70.23	88.41	94.11	90.81	83.02
300	73.73	92.51	98.20	98.20	99.10
600	73.63	94.71	98.50	98.50	99.30
1 000	72.93	93.81	98.70	98.70	99.80
3 000	75.82	94.71	98.00	98.00	99.70
6 000	—	95.30	98.60	98.60	99.90

由表1可见,当分组个数过少时故障正确隔离率会明显下降,若分组个数达到一定程度,则继续增加对正确隔离率的提高效果并不明显,考虑到计算效率,分组数并不是越多越好.随着可见星数目 N 的增加,保持较好隔离率所需要的分组数也会有所增加.因此,本文选取 N^2 个分组来尽量满足正确隔离率和运算时间的要求.

3.2 故障隔离效果分析

仿真中对随机选取的1~3颗卫星加入不同大小的故障偏差,利用基于残差 χ^2 的故障检测方法,使用本文提出的分组故障检测证据融合多星故障隔离算法(记为GF)与文献[5]中提出的随机搜索法(记为RS)和文献[6]中提出的置信指数法(记为QV)同时进行故障隔离,整体的故障隔离仿真效果见表2.由于文献[6]并未给出基于故障排除率等指标的仿真分析,这里参考本文的故障隔离阈值选取原则对文献[6]的置信指数方法故障隔离效果进行仿真复现.

由表2可见:给定故障大小和故障卫星颗数时,故障隔离正确率随着可见卫星颗数的增加而上升;给定故障大小和可见卫星颗数时,故障正确隔离率随着故障星颗数的增加而降低;给定故障卫星颗数和可见卫星颗数时,故障幅值越大,故障隔离正确率越高.即整体上故障隔离算法的隔离正确率与故障大小、可见星数目成正比,与故障星颗数成反比.

表2 随机搜索、置信指数与分组融合故障隔离算法的故障隔离正确率 %

故障大小	故障个数	算法	可见星数目				
			14	16	18	20	22
$0.8P_{\text{bias}}$	1	RS	70.19	73.85	79.50	81.16	81.90
		QV	89.24	89.06	93.66	93.52	81.40
		GF	92.44	94.88	95.90	96.04	93.04
	2	RS	49.05	56.81	62.35	68.15	72.53
		QV	3.32	32.79	69.31	84.72	81.82
		GF	51.29	76.60	86.88	92.38	94.66
	3	RS	30.59	39.82	49.25	53.59	59.03
		QV	0.00	0.00	0.24	6.94	24.88
		GF	0.96	8.98	34.35	60.83	75.08
$1.0P_{\text{bias}}$	1	RS	79.66	83.28	87.88	88.30	89.18
		QV	96.88	95.44	98.50	99.04	84.86
		GF	97.28	97.16	97.90	97.38	94.98
	2	RS	63.07	70.83	78.50	79.54	81.32
		QV	6.52	55.07	89.42	97.00	92.26
		GF	70.09	93.38	98.10	98.88	97.88
	3	RS	44.79	54.65	64.95	68.79	72.69
		QV	0.00	0.00	0.26	12.92	35.77
		GF	2.54	21.98	61.29	85.26	92.88
$1.5P_{\text{bias}}$	1	RS	88.42	90.12	92.88	93.08	92.64
		QV	99.94	99.92	99.92	99.90	86.66
		GF	99.28	99.32	98.74	98.60	94.62
	2	RS	77.18	82.36	87.94	87.12	88.92
		QV	11.28	87.78	99.22	99.98	95.70
		GF	92.42	99.50	99.92	99.88	98.54
	3	RS	62.67	70.25	81.62	82.16	82.98
		QV	0.00	0.00	0.18	25.41	49.69
		GF	7.42	51.63	94.26	99.30	99.28
$2.0P_{\text{bias}}$	1	RS	90.92	92.56	94.34	94.02	93.58
		QV	99.92	99.99	99.96	99.80	90.52
		GF	99.42	99.36	99.04	98.70	94.88
	2	RS	83.40	87.34	92.22	90.28	90.88
		QV	12.56	94.56	99.90	99.96	97.08
		GF	96.88	99.98	99.98	99.94	98.50
	3	RS	70.27	78.88	87.20	85.96	87.54
		QV	0.00	0.00	0.12	33.15	50.47
		GF	11.90	69.15	98.88	99.94	99.42

对比分析随机搜索法、置信指数法与分组融合法的仿真实验结果发现:对于临界偏差以上的单星故障,本文算法能保持94%以上的正确隔离率,对于临界偏差以上的双星故障,本文算法能保持70%以上的正确隔离率,整体优于随机搜索法和置信指数法.对于三星故障,本文算法则需要更多的卫星颗数来支持,如在14颗可见卫星时,算法的正确隔离率非常低,这是由于故障卫星量测过多的参与了分组使得更多正常卫星量测受到污染.然而,在卫星数大于18颗时,本文算法仍能保持高于其他两个算法的正确隔离率.总体而言,当故障卫星个数小于可见星个数的1/6时,本文算法可以保持85%以上的正确隔离率.

由上可见,本文算法在故障数未知的多卫星故障

隔离中具有一定的优势.

4 结论

本文对多卫星故障隔离方法进行研究,提出了分组故障检测证据融合多星故障隔离算法.该算法通过多分组故障检测证据融合的方式,并同时考虑故障分组和无故障分组的基本置信指派,避免了过于信赖某一组卫星信息或只考虑故障分组信息引起的故障隔离结果不准确的问题.在证据融合时,给出一种基于可靠程度的权值计算方法,实现了加权分配冲突法多证据融合结果的唯一性.采用多星故障置信指派均值作为隔离阈值,有效解决了不确定故障星个数情况下多星故障隔离问题.随后在GPS/BDS双星座导航模式下,利用仿真对比实验对所提出的故障隔离算法进行了分析.结果表明:所提出的故障隔离算法其分组个数保持在可见星数平方附近时,可以兼顾计算量和隔离效果的需求,在故障数未知的多星故障隔离时,本文算法整体上具有一定优势.

参考文献(References)

- [1] Bhatti U I, Ochieng W Y. Detecting multiple failures in GPS/INS integrated system: A novel architecture for integrity monitoring[J]. J of Global Positioning Systems, 2009, 8(1): 26-42.
- [2] 侯冰, 张晓林, 郭九源. 一种改进的全球卫星导航系统多星故障排除方法[J]. 遥测遥控, 2014, 35(5): 23-29.
(Hou B, Zhang X L, Guo J Y. An improved method of multi-satellite faults exclusion for GNSS[J]. J of Telemetry Tracking and Command, 2014, 35(5): 23-29.)
- [3] 张鑫, 崔晓伟, 冯振明. 基于伪距误差重建的多星故障检测方法[J]. 清华大学学报, 2014, 54(4): 425-431.
(Zhang X, Cui X W, Feng Z M. Multiple failure detection based on reconstruction of the pseudorange error[J]. J of Tsinghua University, 2014, 54(4): 425-431.)
- [4] 邓志鑫, 李隽, 刘孟江. 卫星导航RAIM多星故障检测与识别方法研究[J]. 导航定位学报, 2016, 4(1): 75-79.
(Deng Z X, Li J, Liu M J. Research on multi satellite failure detection and recognition method of satellite navigation RAIM[J]. J of Navigation and Positioning, 2016, 4(1): 75-79.)
- [5] 陈灿辉, 张晓林. 全球导航卫星系统多星故障排除新方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(12): 1479-1483.
(Chen C H, Zhang X L. Novel method of multiple-satellite faults exclusion for global navigation satellite system[J]. J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(12): 1479-1483.)
- [6] Patino-Studencka L, Rohmer G, Thielecke J. Approach for detection and identification of multiple faults in satellite navigation[C]. Position Location and Navigation Symposium. Indian Wells: IEEE, 2010: 221-226.
- [7] Wang P. The reliable combination rule of evidence in dempster-shafer theory[C]. Image and Signal Processing, 2008. Sanya: IEEE, 2008: 166-170.
- [8] 许丽佳, 陈阳舟, 崔平远. D-S理论在多传感器信息融合中的改进[C]. 全球智能控制与自动化大会会议. 杭州: IEEE, 2004: 3124-3128.
(Xu L J, Chen Y Z, Cui P Y. Improvement of D-S evidential theory in multisensor data fusion system[C]. Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou: IEEE, 2004: 3124-3128.)
- [9] Wang P, Yang G. Improvement method for the combining rule of dempster-shafer evidence theory based on reliability[J]. J of Systems Engineering and Electronics, 2005, 16(2): 471-474.
- [10] Su X, Dong Z. A modified combination rule to conflict evidence for dempster-shafer theory[C]. 2015 Int Conf on Computational Intelligence and Communication Networks. Jabalpur: IEEE, 2015: 993-996.
- [11] 王文庆, 杨远玲, 杨春杰. 一种基于证据理论的数据融合算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(9): 1427-1430.
(Wang W Q, Yang Y L, Yang C J. A data fusion algorithm based on evidence theory[J]. Control and Decision, 2013, 28(9): 1427-1430.)
- [12] 李查. 基于奇偶矢量的多星座RAIM算法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(11): 187-190.
(Li C. Research on multi-constellation RAIM based on parity vector[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(11): 187-190.)
- [13] 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 J P. Research of GPS integrity augmentation[D]. Zhengzhou: Institute of Surveying and Mapping, PLA Information Engineering University, 2001.)
- [14] Feng S, Ochieng W Y, Walsh D, et al. A measurement domain receiver autonomous integrity monitoring algorithm[J]. GPS Solutions, 2006, 10(2): 85-96.
- [15] 潘泉, 张山鹰, 程咏梅, 等. 证据推理的鲁棒性研究[J]. 自动化学报, 2001, 27(6): 798-805.
(Pan Q, Zhang S Y, Cheng Y M, et al. Some research on robustness of evidence theory[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(6): 798-805.)

作者简介

王会宾(1988—), 男, 博士生, 从事导航系统故障诊断的研究, E-mail: hbwang.nwpu@gmail.com;

程咏梅(1960—), 女, 教授, 博士生导师, 从事信息融合、目标跟踪、组合导航、图像处理及其应用等研究, E-mail: chengym@nwpu.edu.cn;

樊伟(1991—), 男, 硕士, 从事卫星导航系统及其性能监测的研究, E-mail: fanwei0602@163.com;

李松(1988—), 男, 博士生, 从事机动目标跟踪的研究, E-mail: songlinwpu@gmail.com;

苟斌(1990—), 男, 博士生, 从事多源导航的研究, E-mail: goubin@mail.nwpu.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)