

一种改进的 GBAS 地面站 MRCC 故障监测算法

支春阳^{1,2,3} 邢兆栋^{1,2,3} 赵精博^{1,2,3} 郝硕⁴

(1. 卫星导航系统与装备技术国家重点实验室 石家庄 050081;

2. 中国电子科技集团公司第 54 研究所 石家庄 050081;

3. 河北省卫星导航技术与装备工程技术研究中心 石家庄 050081; 4. 中国民航大学 天津 300300)

摘要: 地基增强系统(Ground Based Augmentation System, GBAS)是支持飞行器精密进近着陆的有效手段,完好性监测算法的设计是保障飞行安全的关键点与系统设计的难点,多参考接收机一致性监测(MRCC)通过 B 值计算与故障监测流程可排除校正中产生很大误差的接收机信道,保证 GBAS 地面站发送差分修正量的可靠性。分析了 MRCC 算法的原理与方法,发现 MRCC 故障监测流程无法有效处理伪距与载波相位 B 值均超过阈值,且最大值不为同一通道的问题,针对该问题提出了一种 MRCC 故障监测流程改进算法,并且对已有和改进的 MRCC 故障监测流程算法进行了实验对比。结果表明,改进算法故障监测流程针对伪距和载波相位引起的不一致性分层处理,可有效解决当前存在问题。

关键词: 地基增强系统;完好性监测;多参考接收机一致性监测;卫星导航

中图分类号: TN965.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Improved MRCC fault monitoring algorithm for GBAS ground station

Zhi Chunyang^{1,2,3} Xing Zhaodong^{1,2,3} Zhao Jingbo^{1,2,3} Hao Shuo⁴

(1. State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, Shijiazhuang 050081, China;

2. The 54th Research Institute of CECT, Shijiazhuang 050081, China;

3. Satellite Navigation Technology and Equipment Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Shijiazhuang, 050081, China;

4. Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

Abstract: Ground based augmentation system (GBAS) can strongly support aircraft's precise approach landing, and integrity monitoring is not only the difficulty of the system realization but also the key point to safeguard the flight. In order to ensure the reliability of the differential correction from the GBAS ground station, the B value calculation and fault monitoring process in the multiple reference consistency check (MRCC) are used to eliminate the receiver channel which generates a lot of error in the correction. The principle and method of MRCC algorithm are analyzed in this paper, the problem of pseudo range and carrier phase B values are both more than threshold and the maximum value is not in the same channel are founded in the MRCC fault monitoring process. An improved algorithm of MRCC fault monitoring process is proposed for this problem, then the existing and improved MRCC fault detection algorithms are compared in the experiment. The results indicate that the improved algorithm can effectively solve the current problems in the hierarchical process of the inconsistency caused by the pseudo range and carrier phase.

Keywords: GBAS; integrity monitoring; MRCC; satellite navigation

0 引言

卫星导航已经广泛应用于交通运输行业^[1],航空精密进近与着陆的作为卫星导航应用与交通运输行业的热点和难点,完好性监测算法的可靠与否成为制约卫星导航应用

于航空精密进近与着陆的关键因素。不同于航路阶段的自主完好性监测算法^[1-2]以及星基增强的完好性处理算法^[3],地基增强系统(Ground Based Augmentation System, GBAS)需要采取一系列的完好性监测手段,在保证连续性、可用性的情况下,提高了导航系统的完好性指标,从而

保证系统满足精密进近与着陆的完好性要求^[4]。GBAS 地面参考接收机采用高精度时钟保证原始观测量的高精度,避免钟差影响观测量零值^[5],同时一系列完好性监测算法对观测量与差分修正量进行监测,保证播发数据的正确性,MRCC 监测 GBAS 地面系统产生的差分校正量的一致性,排除引起较大异常修正误差的接收机通道,并且具备隔离故障卫星的能力。LAAS 规范中,RTCA 通过参数 B 值,作为所播发差分修正量的正确性的检测率;谢刚等人利用斯坦福大学的完好性监测测试床详细论述了 MRCC 算法,包括 B 值的计算、阈值的设定以及故障监测流程^[6];王志鹏、张军等人提出行列判断法和 C 值辅助法把接收机故障和卫星故障分开考虑^[7]。当前 MRCC 故障监测流程算法对伪距和载波相位 B 值的处理没有考虑二者之间的相互关系,导致无法处理载波相位与伪距故障作用于不同通道情况下的情况,提出 MRCC 故障监测流程中针对伪距和载波相位引起的不一致性分层处理以解决该问题,为 MRCC 算法提供借鉴。

1 现有 MRCC 算法

MRCC 用于监测 GBAS 地面系统产生的差分校正量的一致性^[8]。差分校正量的计算如下式:

$$\rho_{s,m,n}(k) = \rho_{s,m,n}(k) - R_{m,n}(k) + \tau_{m,n}(k) \quad (1)$$

$$\varphi_{c,m,n}(k) = \varphi_{m,n}(k) - R_{m,n}(k) + \tau_{m,n}(k) - \varphi_{ci,m,n}(0) \quad (2)$$

其中:

ρ_s :平滑后的伪距校正量

φ_c :载波相位校正量

m :接收机编号

n :卫星编号

$R_{m,n}$:相应的接收机到卫星的真实距离(通过广播星历同接收机固定的已知位置计算得到)

$\tau_{m,n}$:卫星星钟校正量

$\varphi_{ci,m,n}(0)$:初始的载波相位值,且

$$\varphi_{ci,m,n}(0) = \varphi_{m,n}(0) - R_{m,n}(0) + \tau_{m,n}(0) \quad (3)$$

主要包括 B 值的计算和故障监测流程算法两部分。

1.1 B 值算法

假使在某一时刻,地面站的某一参考接收机对某颗卫星的观测量失效,对某颗卫星来说,该假设故障对差分校正量影响的最好估计,就是将所有参考接收机的差分校正量的平均与排除这一参考接收机的其它差分校正量的平均做差分。B 值监测实现的过程是基于 M 个基准接收机中的一个被假设为估计差分校正量误差的标准接收机,其余 M-1 个接收机把偏离标准接收机的估计值与地面告警阈值比较。B 值被发射到飞机上,在机载接收机中形成一个新的测量矢量。这个矢量加入到机载导航线性模型的估计空间中,产生由伪距校正误差引起的导航定位误差的估计。

如果一个接收机的确是出故障了,则该差值会比较大。

但是,按照这种逻辑,接收机钟差会是一个问题,因为对某颗卫星来说,不同接收机校正值中含有的接收机钟差是不同的,这些不同的接收机钟差与真正的接收机故障混在一起影响了该方法的准确性和有效性,因此在将他们做差前,必须消除各个校正值中的接收机钟差。

假设对地面站存在 M 个无故障接收机和 N 颗可视卫星,令 $\rho_{s,i,j}$ 表示卫星 i 到接收机 j 视距上的差分校正量。对于某一接收机到所有的卫星的观测量之中都含有同样的接收机钟差,因此,一个消除这种钟差的方法就是利用所有的差分校正量估计该接收机钟差,并在改正值中减去该估计得到不含接收机钟差的差分校正量 $\rho_{sa,i,j}$,如下式所示^[9]:

$$\rho_{sa,m,n}(k) = \rho_{s,m,n}(k) - \frac{1}{N_c(k)} \sum_{j \in S_c(k)} \rho_{s,m,j}(k) \quad (4)$$

使用这些没有接收机钟差的校正量,接收机 j 和卫星 i 的 B 值 ($B_{i,j}$) 如下式计算。

$$B_{\rho,m,n}(k) = \frac{1}{M_n(k)} \sum_{i \in S_i(k)} \rho_{sa,i,n}(k) - \frac{1}{M_n(k) - 1} \sum_{\substack{i \in S_i(k) \\ i \neq m}} \rho_{sa,i,n}(k) \quad (5)$$

载波相位的 B 值计算过程与上述过程类似^[10]:

$$\varphi_{sa,m,n}(t) = \varphi_{c,m,n}(t) - \frac{1}{N_c(t)} \sum_{j \in S_c(t)} \varphi_{c,m,j}(t) \quad (6)$$

$$B_{\varphi,m,n}(t) = \varphi_{sa,m,n}(t) - \frac{1}{M_n(t) - 1} \sum_{\substack{i \in S_i(t) \\ i \neq m}} [\varphi_{sa,i,n}(t) - \varphi_{sa,i,n}(0)] \quad (7)$$

B 值反映了故障对差分修正量造成的影响,假定接收机 M 失效时伪距误差的估计值,即失效的接收机如果不被排除导致的误差。正常的情况下,B 值在一个正常的范围内,故障发生时,B 值将超过阈值,MRCC 故障监测流程将做出相关处理,阈值的设定包括高斯膨胀法^[11-12]和 B 值阈值经典公式^[13]设定,在此不进行深入介绍。

1.2 MRCC 故障监测流程算法

MRCC 故障检测的流程图^[11]如图,具体步骤如下:

- 1) 判断是否有可用集合 S_c , 不存在,则退出 MRCC;
- 2) 存在 S_c 计算出伪距和载波的 B 值,与规定的阈值 h 进行比较,如果 B 值小于门限值,给出状态 0;
- 3) 判断 B 值是否同时大于门限和最大的 B 值所在通道,并根据具体情况分为 1、2、3 三个状态;
- 4) 返回 MRCC 检测的状态。

MRCC 最后步骤为隔离在校正中产生很大误差的接收机信道,这个过程也可以看作是 EXM-II 的预处理阶段,EXM-II 可直接排除全部超出阈值的通道,其处理逻辑^[11]如图 2 所示。

如果没有 B 值超过极限,则不用隔离任何信道,直接进入下一步骤。如果最大的 B_p 值和 B_ϕ 值不是在同一信道,即为状态 2 的情况比较复杂,需要送至 EXM-II 解决。对于剩下的其他情况,首先隔离误差信道,然后利用数据重新计算 B 值,如 MRCC 标记为 0,则说明该阶段的处理比

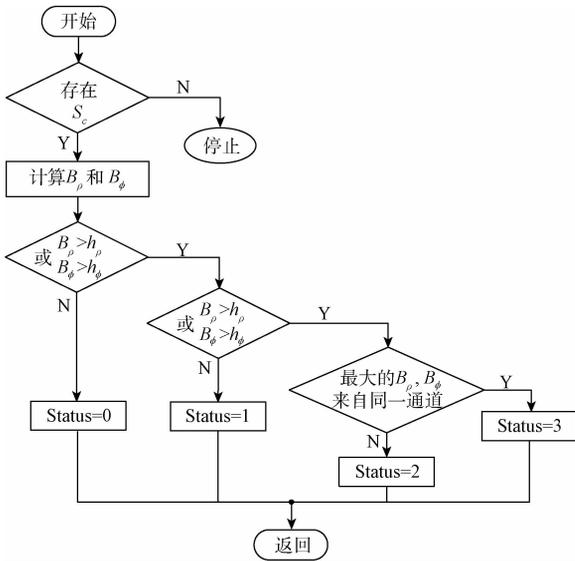


图1 MRCC故障监测流程

超过门限,且Y(接收机、卫星、或通道)存在载波平滑伪距差分修正量故障引起 B_ρ 超过门限,则导致最大的 B_ρ 、 B_ϕ 不来自同一通道,进入状态3,导致需要重新获得原始的B值数据将其交至EXM-II进行处理,而EXM-II的后续处理仍然无法有效排除故障通道,容易误判正常接收机或者卫星存在故障的情况。

针对MRCC故障监测流程存在的问题,同时考虑到 B_ρ 和 B_ϕ 存在的相对关系:由于 B_ρ 代表载波平滑伪距差分修正值的偏差,受到载波相位和伪距二者影响,而 B_ϕ 仅受到载波相位的影响。采用分层逻辑判断的思想,设计了改进的MRCC故障监测流程,流程分为层次1和层次2,如图3所示。

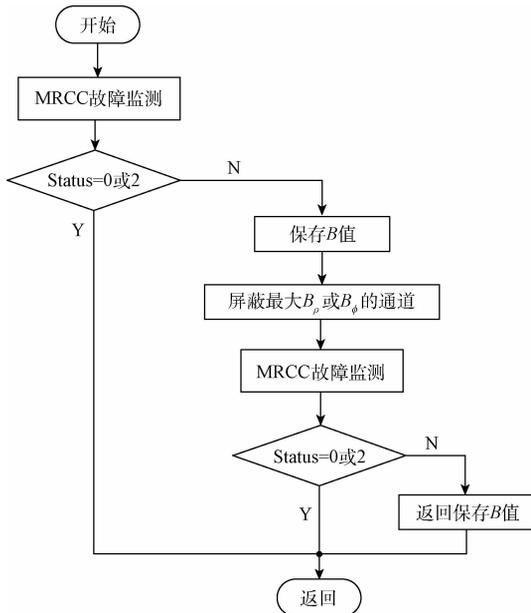


图2 EXM-II 预筛选流程

较成功,返回状态值和重新计算当前的B值,若状态为2,则情况更为复杂,需要送至EXM-II解决,若为其他状态,也许送至EXM-II解决,此时需要重新获得原始的B值数据将其交至EXM-II进行处理。

2 改进MRCC故障监测流程算法

MRCC故障监测算法可有效隔离B值故障通道,排除故障接收机、故障卫星,特别是针对单故障,具有很好的排除效果,但算法状态较多,逻辑复杂,且将 B_ρ 、 B_ϕ 同时处理,尤其是在面临多故障的情况下,例如,考虑如下情况:X(接收机、卫星、或通道)存在载波相位差分修正量故障引起 B_ρ 、 B_ϕ 超过门限,且Y(接收机、卫星、或通道)存在载波平滑伪距差分修正量故障引起 B_ρ 超过门限,则导致最大的 B_ρ 、 B_ϕ 不来自同一通道,进入状态3,导致需要重新获得原始的B值数据将其交至EXM-II进行处理,而EXM-II的后续处理仍然无法有效排除故障通道,容易误判正常接收机或者卫星存在故障的情况。

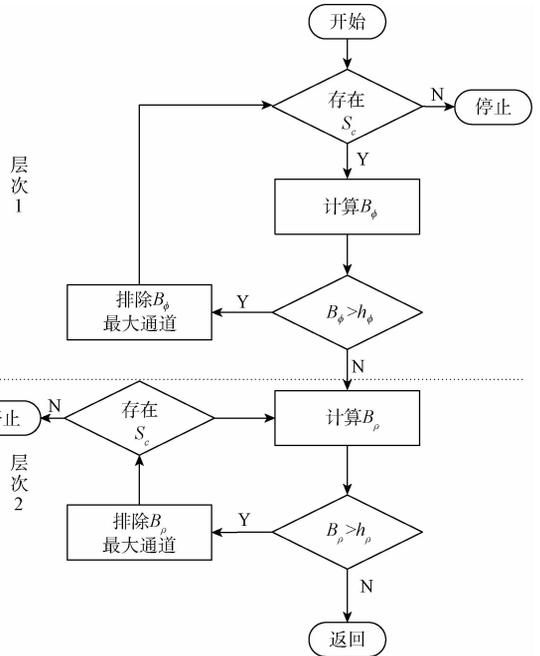


图3 改进的MRCC故障检测流程

改进的MRCC故障监测流程相比较原有算法简化了流程,去除了多种状态标记,完成了全部工作,无需将复杂的情况交由EXM-II处理(EXM-II针对MRCC故障仅仅选取公共集合,无法解决更多潜在问题)。同时,针对 B_ρ 值和 B_ϕ 值进行分层处理,考虑到 B_ρ 值只受载波相位的影响,而且 B_ρ 受 B_ϕ 的影响且在CAT-I中更具有价值,需要得到更高级别的保障。因此,层次1首先对 B_ϕ 单独进行故障监测流程处理,完全排除载波相位的影响后;在层次2中对 B_ρ 单独进行故障监测流程处理,完成MRCC全部工作。

3 实验测试

实验数据采集于中国电科54所位于正定国际机场的完好性监测试验平台,分无故障、单故障、双故障等情况,从MRCC原监测算法和改进后的算法进行分析测试,分析过程中为了保证结果一致性,所有样本分析时刻相同。 B_ρ 阈值采用经验公式法计算, B_ϕ 阈值由 B_ρ 阈值进行理论推

导,在 100 s 的载波平滑伪距时间、伪距噪声为载波相位噪声值的 100 倍的情况下, B_ϕ 阈值暂定为 B_ρ 阈值的 1/3。

空间 GPS 导航卫星分布情况及 B 值计算结果如表 1 所示,表 1 列出了 3 台完好性监测接收机收到的卫星。

表 1 卫星 MRCC 监测数据统计分析表

(m)

接收机	卫星号	ρ_{sa}	φ_{sa}	B_ρ	B_ϕ	B_ρ 阈值	B_ϕ 阈值
1	1	12.542	1.817	0.072	-0.046	0.814	0.271
1	3	10.890	0.460	0.014	0.051	1.209	0.403
1	7	15.135	0.894	-0.172	0.049	0.643	0.214
1	8	6.471	0.973	0.392	0.015	0.692	0.231
1	9	37.297	2.329	-0.314	0.007	0.863	0.288
1	11	0.527	1.894	-0.266	-0.021	0.581	0.193
1	16	12.493	3.606	0.730	0.057	2.402	0.800
1	17	79.818	0.919	0.527	-0.116	2.284	0.761
1	19	16.192	-0.114	-0.262	0.037	0.945	0.315
2	1	13.058	2.023	-0.060	-0.027	0.814	0.271
2	3	11.925	0.549	0.141	0.012	1.209	0.403
2	7	15.994	0.974	-0.133	0.005	0.643	0.214
2	8	7.679	1.089	-0.179	-0.009	0.692	0.231
2	9	38.349	2.453	-0.178	-0.014	0.863	0.288
2	11	1.577	2.075	-0.132	-0.014	0.581	0.193
2	16	12.129	3.685	0.158	0.013	2.402	0.800
2	17	79.365	1.554	-0.089	0.116	2.284	0.761
2	19	17.488	-0.005	-0.005	0.008	0.945	0.315
3	1	15.453	1.857	-0.011	0.073	0.814	0.271
3	3	13.627	0.029	-0.156	-0.063	1.209	0.403
3	7	19.171	0.486	0.306	-0.054	0.643	0.214
3	8	11.478	0.727	0.571	-0.006	0.692	0.231
3	9	41.989	2.127	0.492	0.006	0.863	0.288
3	11	4.937	1.809	0.399	0.036	0.581	0.193
3	16	12.331	3.151	-0.889	-0.070	2.402	0.800
3	17	80.967	0.953	-0.437	0.000	2.284	0.761
3	19	20.331	-0.482	0.267	-0.045	0.945	0.315

1) 无故障

无故障模式下, B 值不超过阈值, 两种监测流程处理效果相同。

2) 单故障

单故障引起一个 B 值超过阈值, 两种监测算法均排除出该通道, 监测效果相同; 极少数情况引起多个通道 B 值超过阈值, 测试过程中 B 值最大通道为故障发生通道, 两种监测算法均排除该通道, 监测效果基本相同。

3) 双故障

双故障情况复杂, 多数情况下, 二者排除效果相同; 存在双故障引起无故障通道 B 值超过门限值, 且 B_ϕ 、 B_ρ 不来自同一通道的情况, 在 2 号接收机 11 号卫星通道上载波异常存在 0.75 m 的 φ_{sa} 异常值, 载波平滑伪距使得 ρ_{sa} 对应存在 +0.743 m 的异常值; 3 号接收机 1 号卫星伪距异常使得 ρ_{sa} 存在 -4.00 m 的异常值。

(1) 原监测算法处理流程。

监测算法处理流程如表 2 所示, 只列出了 B 值超过门限的通道。

表 2 卫星 MRCC 原监测算法分析表

(m)

接收机	卫星号	ρ_{sa} + 异常	φ_{sa} + 异常	B_ρ	B_ϕ	B_ρ 阈值	B_ϕ 阈值
2	11	1.577+0.743	2.075+0.750	0.039	0.214	0.580	0.193
3	1	15.453-4.000	1.857	-1.223	0.084	0.814	0.271
3	8	11.478	0.727	0.693	0.004	0.692	0.230

B_p 和 B_o 原均超过阈值,且最大通道不一致,分别为3号接收机1号卫星、2号接收机11号卫星,3号接收机8号卫星。由于B值的相互影响超过了阈值,原监测流程判定为状态2,进行EXM-II进行处理,EXM-II对超过门限的通道全部排除,误排除了除通道3号接收机8号卫星。

(2)改进监测算法处理。

层次1的处理结果与表2一致,2号接收机11号通

道的 B_o 最大,且超过阈值,根据图3的层次1故障检测流程,排除2号接收机11号卫星,重新计算B值,进入层次2。

层次2的处理结果如表3所示,排除无 B_o 超过阈值, B_p 超过阈值,最大通道为3号接收机1号卫星,根据图3的层次2故障检测流程,排除3号接收机1号卫星,重新计算B值,B值全部正常。

表3 卫星MRCC改进监测算法表

(m)

接收机	卫星号	ρ_{sa} + 异常	φ_{sa} + 异常	B_p	B_o	B_p 阈值	B_o 阈值
3	1	15.453-4.000	1.857	-1.223	0.084	0.814	0.271
3	8	11.478	0.727	0.693	0.004	0.692	0.230

改进监测流程未排除无异常通道,原监测流程误排除3号接收机8号卫星,优于原监测流程。多故障情况下与双故障的监测流程对比分析类似,多故障情况下情况更复杂,B值相互影响作用造成的无异常通道B值超过阈值的

概率相对更高,误排除无异常通道的概率相对更高。

经过理论分析与实验测试,MRCC故障监测流程与改进监测流程的对比总结如表4所示,改进监测流程相对于原监测流程有助于提高排除异常准确率。

表4 MRCC故障监测流程与改进监测流程测试对比表

测试情况	原算法	改进算法	差别
无异常	不排除接收机	不排除接收机	无
单台接收机、卫星或通道伪距异常。	可正确排除	可正确排除	无
单台接收机载波相位、卫星或通道异常。	可正确排除	可正确排除	无
单台接收机伪距与载波相位异常。	可正确排除	可正确排除	无
单台接收机、卫星或通道X载波相位异常、单台接收机、卫星或通道Y伪距异常。	通常可正确排除,排除工作由EXM-II完成,有误排除其它无异常接收机、卫星或通道的试验结果。	可正确排除	改进算法优点明显
单台接收机、卫星或通道X载波相位异常、单台接收机、卫星或通道Y载波相位异常。	通常可正确排除,可能需要交给EXM-II处理,有误排除其它无异常接收机、卫星或通道的试验结果。	可正确排除,误排除正常接收机、卫星或通道的可能性存在,试验中未出现。	改进算法略优
其它双故障现象	通常可正确排除,部分排除工作由EXM-II处理,有误排除其它无异常接收机、卫星或通道的试验结果。	可正确排除故障通道,误排除正常接收机、卫星或通道的可能性存在,试验中未出现。	改进算法略优
多故障	EXM-II完成排除工作,误排除、错误较多。	MRCC完成排除工作,有误排除现象出现,频率较双故障高。	改进算法略优

4 结 论

本文论述了GBAS中MRCC算法中B值的计算原理与含义,介绍了MRCC故障监测流程,并且利用分层的思想提出了改进MRCC故障监测流程。对MRCC算法与改进算法进行了正常与异常测试,验证了B值算法与故障监

测流程算法的有效性,并且对比测试表明:改进的故障监测流程与原有算法在单故障监测方面无差异,在双故障与多故障监测方面,监测能力更强,监测结果更准确,误警概率更低。但是,当前测试过程中,由于样本数量的限制以及故障类型选址有限,后续工作中,应当加强在这方面的改进,进一步挖掘改进算法可能存在的非合理性。

(下转第143页)