

LAAS 地面站伪距纠正量误差完好性监测算法研究

王志鹏 张军 刘强

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘要: 该文推导了 LAAS 地面参考站系统中伪距纠正量误差公式, 分析现有的伪距纠正量误差完好性监测算法 B 值排除法, 得出结论: B 值之间具有相关性, 一个 B 值出错, 会影响到其它 B 值; B 值排除法没有把接收机故障和卫星故障分开考虑, 会产生较大的误检和漏检概率。该文提出两种伪距纠正量误差完好性监测算法: 行列判断法和 C 值辅助法。针对无故障和 5 种故障情况, 通过仿真实验对 3 种算法进行了分析, 结果表明两种新算法的误检、漏检、误排、漏排概率均小于原算法, 进而提高了系统的定位精度和连续性。把行列判断法和 C 值辅助法进行对比, 讨论各自优缺点, 提出选择算法的依据。

关键词: 卫星导航; 局域增强系统; 完好性监测; 伪距纠正量误差

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0196-05

The Study of Integrity Monitor Algorithm of the Pseudorange Correction Error on LAAS Ground Facility

Wang Zhi-peng Zhang Jun Liu Qiang

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The formulas of the pseudorange correction error are deduced. The existing integrity monitor method of the pseudorange correction error with excluding B value is analyzed, and some conclusions are obtained: the B values are correlative, if one B value is error, the other B values will be affected; the receiver error and the satellite error are not divided in the existing method, so the larger probability of fault detection and miss detection will occur. Two new methods are proposed to monitor the pseudorange correction error, which are named row and column estimation and assisting by C value. Analysis about the three methods is made by simulating six cases including no fault and five kinds faults, the results show that the two new method's probability of fault detection, miss detection, fault exclusion, miss exclusion are all smaller than the existing method's. Moreover, the position accuracy and continuity are improved. The two new methods are compared, and their advantage and disadvantage are discussed. Some suggestions are proposed on choosing methods.

Key words: Satellite navigation; Local Area Augmentation System(LAAS); Integrity monitor; Pseudorange correction error

1 引言

随着卫星导航技术的发展, 对其完好性进行监测变得越来越重要。作为地基增强的主导系统之一, LAAS(GPS 局域增强系统)的地面参考站系统在把伪距纠正量误差播发给用户之前, 必须对其进行监测, 以确保所播发数据的正确性^[1]。RTCA 的 LAAS 规范中, 定义了一个参数 B 值, 用其来判断所播发改正数据的可用性。文献[2]讨论了 B 值的含义, 并通过实验分析了 B 值的范围和阈值的选取; RTCA 中给出了一种依据 B 值排除法监测伪距纠正量误差的规则; 文献[3]提出利用双通道(载波和码伪距)的 B 值来监测伪距纠正量误差完好性的算法。但是, 这些方法都没有区分接收机故障和卫星

故障, 有一定的盲目性。本文在分开考虑接收机故障和卫星故障的前提下, 提出两种新的算法: 行列判断法和 C 值辅助法, 并且通过仿真实验, 与 RTCA 原来的算法进行了对比。结果表明, 这两种算法的误检、漏检、误排、漏排概率都优于原来的算法; 对这两种算法进行分析, 给出一些选择算法的建议。

2 伪距纠正量误差推导

LAAS 参考站接收机接收到 L_1 载波的伪距观测量 P_i^j 和相位观测量 ϕ_i^j 后, 由于载波相位的噪声比伪距小得多, 可以用一个平均滤波器利用连续的载波相位平滑伪距。此处用下面的滤波器^[4]:

$$\tilde{P}(k)_i^j = \frac{D-1}{D} [\tilde{P}(k-1)_i^j + \phi(k)_i^j - \phi(k-1)_i^j] + \frac{1}{D} P(k)_i^j \quad (1)$$

其中 k 代表时间历元; i 为参考站接收机序号; j 为接收机可

2007-09-04 收到, 2008-05-27 改回
国家自然科学基金委员会与中国民用航空总局联合资助项目
(60672181), 国家杰出青年科学基金(60625102), 和国家 863 计划项目
(2006AA12Z312, 2006AA12A101)资助课题

见卫星序号; $D = S/T$, S 为平滑滤波周期, 一般取 100s, T 为采样间隔, 一般为 0.5~2.0s; $\tilde{P}(k)_i^j$ 指平滑后的伪距观测量。设伪距与真实距离之间的差值为 $P\rho_i^j = \tilde{P}_i^j - \rho_i^j$, 接收机可见星数为 N , 则接收机钟差的平均估计值 \bar{b}_i 为

$$\bar{b}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P\rho_i^j \quad (2)$$

那么伪距观测量的改正数为

$$dP_i^j = P\rho_i^j - \bar{b}_i \quad (3)$$

分析式(3)可见, 伪距观测量的改正数由两部分组成, 一部分是星历误差、星钟误差、电离层误差、对流层误差等系统误差, 另一部分是多径效应和接收机噪声等引起的偶然误差, 所以式(3)亦可表达为

$$dP_i^j = \Delta\rho_i^j + \varepsilon_i^j \quad (4)$$

其中 $\Delta\rho_i^j$ 为系统误差, ε_i^j 为偶然误差。

3 伪距纠正量误差完好性监测算法

3.1 B 值排除法分析

LAAS 参考站在把 dP_i^j 播发给用户之前, 必须确保所有的差分数都是准确无误的。为此, RTCA 中的 LAAS 标准^[5]中定义一个参数 B 值, 同时规定只要任一 B 值超限, 就排除相应的观测量 dP_i^j 。设参考站接收机个数为 M , 针对参考站 m , B 值的表达式为

$$B_m^j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M dP_i^j - \frac{1}{M-1} \sum_{i=1, i \neq m}^M dP_i^j \quad (5)$$

可见, 对于同一个卫星 j , 它所对应的 i 个接收机的 B 值是线性相关的。

文献[6]中所给出的 B 值的门限值 B_0 的表达式为

$$B_0_m^j = 5.6 \times \sqrt{\frac{\left(\frac{0.16 + 1.07 \times e^{-\theta_m^j / 15.5}}{M} \right)^2 + 0.08^2}{M-1}} \quad (6)$$

其中 θ_m^j 为第 m 个接收机与第 j 颗卫星之间的仰角, 单位为弧度。由于这些接收机相距很近, 所以可以把系统误差近视为相同, 即式(6)中的 $\Delta\rho_i^j \approx \Delta\rho^j$ 。那么, 针对任一卫星 j , 将 M 个接收机的伪距误差取平均值, 得

$$dP^j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M dP_i^j = \Delta\rho^j + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \varepsilon_i^j \quad (7)$$

平均之后, 系统误差不变, 偶然误差减小, 即 dP^j 主要包含与用户有相同误差影响的部分。假设偶然误差 ε_i^j 为高斯分布: $\varepsilon_i^j \sim N(0, \sigma_g^2(\theta_i^j))$, $\sigma_g(\theta_i^j)$ 的表达式为

$$\sigma_g(\theta_i^j) = \sqrt{\frac{\left(a_0 + a_1 e^{-\theta_i^j / \theta_0} \right)^2}{M} + a_2^2 + \left(\frac{a_3}{\sin(\theta_i^j)} \right)^2} \quad (8)$$

其中 $a_0, a_1, a_2, a_3, \theta_0$ 由接收机的性能等级决定。那么, B_i^j 也可看作高斯分布^[5]: $B_i^j \sim N\left(0, \frac{1}{M(M-1)} \sigma_g^2(\theta_i^j)\right)$ 。由

此可以求得 B_i^j 的协方差 $\text{Cov}(B) = E[B_i^j B_i^k]$ 为

$$E[B_i^j B_i^j] = \left(\frac{N+1}{N} \right) \frac{1}{M(M-1)} \sigma_g(\theta_i^j) \sigma_g(\theta_i^j)$$

$$E[B_i^j B_i^k] = \frac{1}{MN(M-1)^2} \sigma_g(\theta_i^j) \sigma_g(\theta_i^k)$$

$$E[B_i^j B_i^l] = -\frac{1}{MN(M-1)} \sigma_g(\theta_i^j) \sigma_g(\theta_i^l)$$

$$E[B_i^j B_i^m] = -\frac{N-1}{MN(M-1)^2} \sigma_g(\theta_i^j) \sigma_g(\theta_i^m)$$

可见, 各个 B 值之间不是相互独立的, 一个 B 值超出门限值时, 会影响其它 B 值的大小。按照 RTCA 的 B 值排除算法, 把接收机故障和卫星故障混合考虑, 难免构成误检或漏检。下文提出两种算法, 可以克服这个缺点。

3.2 行列判断法

分析 dP_i^j , 设 $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$, 把 dP_i^j 写为一个矩阵如下:

$$dP = \begin{bmatrix} dP_1^1 & \dots & dP_1^j & \dots & dP_1^N \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ dP_i^1 & \dots & dP_i^j & \dots & dP_i^N \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ dP_M^1 & \dots & dP_M^j & \dots & dP_M^N \end{bmatrix}$$

观察该矩阵, 可以发现: 如果接收机 i 有故障, 那么它将影响整个第 i 行; 如果卫星 j 有故障, 那么它将影响整个第 j 列。基于此, 提出行列判断法: 只要有 B 值大于门限, 就认为有故障: 可能是接收机的故障, 也可能是卫星的故障。

如果是接收机的故障, 计算 $dP(i) = \sum_{j=1}^N (dP_i^j - d\bar{P}_i)^2$, 其中

$d\bar{P}_i$ 为矩阵 dP 第 i 行的平均值。如果是卫星故障, 计算

$dP(j) = \sum_{i=1}^M (dP_i^j - d\bar{P}^j)^2$, 其中 $d\bar{P}^j$ 为矩阵 dP 第 j 列的

平均值。假设接收机存在故障的先验概率^[1]为 10^{-5} , 以 120s 的相关时间计算, GPS 标准星座一年可能出 3 次故障^[7], 所以每颗星的故障概率约为 4.8×10^{-7} 。由此可以算得接收机和卫星共有 3 个以上故障的概率至少为 10^{-15} , 可能性很小, 在本文中考虑 6 种出现概率相对大的情况: 无故障、一个接收机故障、两个接收机故障、一个卫星故障、两个卫星故障、一个接收机和一个卫星故障。具体步骤如下所示。

步骤 1 由初始 dP_i^j 计算 B_i^j , 并判断是否有任何 $B_i^j > B_0_i^j$, 如果没有, 则播发 dP_i^j ; 否则继续步骤 2。

步骤 2 计算 $dP(i)$ 和 $dP(j)$, 各自排序, 行:

$dP(m1) > dP(m2) > \dots$; 列: $dP(n1) > dP(n2) > \dots$ 。

步骤 3 去掉第 $m1$ 行, 重新计算 B_i^j 和 $B_0_i^j$, 并判断是否有任何 $B_i^j > B_0_i^j$, 如果没有, 则播发 dP_i^j ; 否则继续步骤 4。

步骤 4 去掉第 $n1$ 列, 重新计算 B_i^j 和 $B_0_i^j$, 并判断是否有任何 $B_i^j > B_0_i^j$, 如果没有, 则播发 dP_i^j ; 否则继续步骤 5。

步骤 5 添上第 $m1$ 行, 重新计算 B_i^j 和 $B_0_i^j$, 并判断是否有任何 $B_i^j > B_0_i^j$, 如果没有, 则播发 dP_i^j ; 否则继续步骤 6。

步骤 6 添上第 $n1$ 列, 去掉第 $m1, m2$ 行, 重新计算 B_i^j 和 $B0_i^j$, 并判断是否有任何 $B_i^j > B0_i^j$, 如果没有, 则播发 dP_i^j ; 否则继续步骤 7。

步骤 7 添上第 $m1, m2$ 行, 去掉第 $n1, n2$ 列, 并播发 dP_i^j 。

3.3 C 值辅助法

B 值的含义是包含某接收机的伪距纠正量误差平均值与不包含此站的伪距纠正量误差平均值之差。在此, 提出一个新的参数 C 值, 定义为包含某卫星的伪距误差改正数平均值与不包含此卫星的伪距误差改正数平均值之差。针对卫星 n , C 值的表达式如下:

$$C_n^j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dP_i^j - \frac{1}{N-1} \sum_{i=1, i \neq n}^N dP_i^j \quad (9)$$

与 B 值不同, C 值中是一个站的 N 颗可见星的 dP_i^j 平均, dP_i^j 中的 $\Delta\rho_i^j$ 不可认为是相同的。此处采用 RTCA SC-159 中的处理方法, 设 dP_i^j 服从均值为 0, 方差为 12.5m 的高斯分布^[7]。一个系统连续性丢失有两种原因, 一为真正的系统故障, 如卫星故障或地面站故障; 一为完好性监测系统对故障的错误判断。简单考虑, 认为二者是等概率的。对于 N 个可见卫星, 任一卫星故障对应的 PL_{H1} (有一个卫星故障的保护级) 都有可能导致连续性丢失, 假设所有的 PL_{H1} 相互独立, 因此错误判断的概率 P_{e1} 可按系统的总体连续性需求 P_c 除以 N 确定, 即

$$P_{e1} = P_c / 2N \quad (10)$$

而每个卫星又对应 M 个参考站, 所以每个伪距观测量的错误判断概率为

$$P_{e2} = P_{e1} / M \quad (11)$$

根据文献[6]中对 B 值门限值的计算方法, 可得 C 值的门限值 $C0_i^j$ 为

$$C0_i^j = \Phi^{-1}(P_{e2}) \sqrt{\frac{12.5}{N(N-1)}} \quad (12)$$

其中 $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数。在有了 C 值之后, 提出图 1 所示的算法: C 值辅助法。

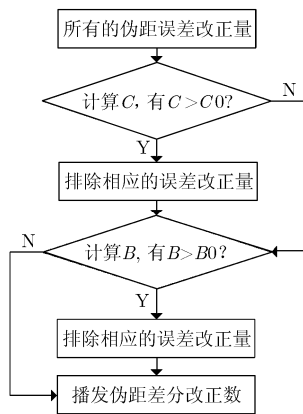


图 1 C 值辅助法的流程图

4 仿真实验

仿真条件: 参考站接收机个数 $M=4$, 分别放在边长为 100m 的正方形 4 个顶点上; 用户位于离参考站 30km 到 48km 处, 高度为 30m, 参考站和用户接收机天线的最小仰角均设为 5° 。采用 24h 的 GPS 数据进行静态单点定位。仿真用的参考站接收机和用户接收机均为 A 类^[5]。

用户首先进行加权的 hatch 滤波, 在接收到参考站发来的 4 个伪距误差改正数后, 对其做算术平均, 然后进行伪距差分定位。

表 1 是一个统计结果, 列出了利用 3 种算法检测和排除故障的概率。其中, 误检指无故障时检测判断存在故障; 漏检指有故障但没有被检测到; 误排指故障被检测到, 排除后故障仍然存在但没有检测到; 漏排指故障被检测到, 但在告警时间内未被排除, 检测超限一直存在^[1]。

从表 1 可见, 行列判断法和 C 值辅助法的误检、漏检、误排、漏排概率都低于 B 值排除法。这是因为这两种算法考虑了 B 值之间的相互联系, 分别考虑接收机故障和卫星故障, 有针对性地进行监测。从一个接收机故障和两个接收机故障的情况可以看出, 对于接收机的故障, 行列判断法和 C 值辅助法的监测能力差别不大; 但是, 从一个卫星和两个卫星故障的情况看, 当卫星发生故障时, C 值辅助法要比行列判断法监测效果好。图 2、图 3 所示的这种情况为某一时刻, 给 13 号星的伪距加入 30m 的误差时的 B 值, C 值图, 此时, B 值正常, 而 C 值超出门限值, 即这种故障用行列判断法检测不出来, 而用 C 值辅助法可以检测出来。

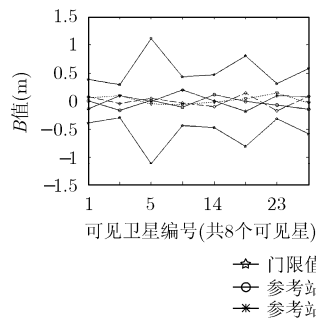


图 2 13 号星发生故障时的 B 值曲线

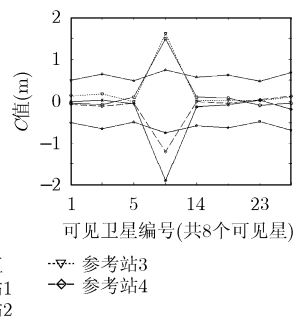


图 3 13 号星发生故障时的 C 值曲线

表 2 为当发生故障时, 用上面的两种算法分别检测和排除故障后的定位解算结果。

从表 2 可见, 行列判断法和 C 值辅助法都比 B 值排除法的定位精度高; 同时, 保护级(包括 VPL(垂直保护级)和 HPL(水平保护级))也比原算法小, 即超过告警门限的概率减小, 因而提高了系统的连续性。卫星故障要比接收机故障的影响小一些, 这是因为一个卫星故障后, 影响 4 个伪距差分改正量; 而一个接收机故障后, 会影响其对应的所有可见卫星的伪距差分改正量。当同时有两个接收机故障时, 定位结果就恶化, 其平均总的误差达到了 2.01m。

表 1 6 种情况的实验结果数据

故障类型	算法类型	概率			
		误检	漏检	误排	漏排
无	B 值排除法	7.2×10^{-10}	0	6.9×10^{-11}	0
	行列判断法	2.9×10^{-10}	0	3.4×10^{-11}	0
	C 值辅助法	3.2×10^{-10}	0	4.9×10^{-11}	0
一个接收机	B 值排除法	4.6×10^{-5}	5.6×10^{-5}	7.3×10^{-5}	8.1×10^{-8}
	行列判断法	2.8×10^{-7}	8.6×10^{-7}	6.5×10^{-7}	1.4×10^{-9}
	C 值辅助法	7.1×10^{-7}	3.6×10^{-7}	3.9×10^{-7}	2.4×10^{-8}
一个卫星	B 值排除法	4.8×10^{-5}	8.7×10^{-5}	3.5×10^{-6}	9.8×10^{-9}
	行列判断法	2.3×10^{-5}	3.6×10^{-6}	9.4×10^{-7}	4.5×10^{-9}
	C 值辅助法	1.7×10^{-6}	1.8×10^{-7}	4.3×10^{-7}	8.3×10^{-9}
两个接收机	B 值排除法	5.6×10^{-5}	5.4×10^{-6}	7.9×10^{-5}	9.4×10^{-8}
	行列判断法	8.3×10^{-6}	1.2×10^{-7}	2.4×10^{-7}	2.5×10^{-9}
	C 值辅助法	6.5×10^{-6}	3.5×10^{-7}	3.6×10^{-7}	3.7×10^{-9}
两个卫星	B 值排除法	9.7×10^{-5}	7.9×10^{-5}	8.7×10^{-5}	8.9×10^{-8}
	行列判断法	5.2×10^{-5}	2.3×10^{-6}	4.1×10^{-6}	3.1×10^{-9}
	C 值辅助法	6.9×10^{-6}	2.5×10^{-7}	5.9×10^{-7}	4.6×10^{-9}
一个接收机和一个卫星	B 值排除法	2.9×10^{-5}	9.6×10^{-5}	8.4×10^{-6}	4.6×10^{-8}
	行列判断法	3.5×10^{-6}	9.3×10^{-6}	3.8×10^{-7}	5.8×10^{-9}
	C 值辅助法	3.7×10^{-6}	1.2×10^{-5}	6.1×10^{-7}	1.3×10^{-9}

表 2 6 种故障情况的实验结果数据

故障类型	算法类型	用户平均定位误差(m)(1 σ)			用户平均保护级(m)(1 σ)	
		水平	垂直	总的	VPL	HPL
无	B 值排除法	0.73	0.46	0.86	2.69	3.54
	行列判断法	0.73	0.46	0.86	2.69	3.54
	C 值辅助法	0.73	0.46	0.86	2.69	3.54
一个接收机	B 值排除法	1.19	0.74	1.40	3.02	3.92
	行列判断法	1.10	0.80	1.36	3.00	3.91
	C 值辅助法	1.11	0.80	1.37	3.01	3.90
一个卫星	B 值排除法	0.88	0.67	1.11	2.81	3.79
	行列判断法	0.85	0.56	1.02	2.72	3.63
	C 值辅助法	0.83	0.55	1.00	2.72	3.63
两个接收机	B 值排除法	1.58	1.25	2.01	4.32	5.75
	行列判断法	1.35	1.14	1.77	3.95	4.63
	C 值辅助法	1.36	1.16	1.79	4.02	5.36
两个卫星	B 值排除法	1.08	0.74	1.31	3.02	3.81
	行列判断法	0.98	0.70	1.20	2.90	3.77
	C 值辅助法	0.90	0.73	1.16	2.86	3.70
一个接收机和一个卫星	B 值排除法	1.26	1.21	1.75	3.33	4.21
	行列判断法	1.01	0.97	1.40	3.26	4.13
	C 值辅助法	1.03	0.96	1.41	3.26	4.13

5 结论

完好性监测是 LAAS 系统的核心, 参考站必须尽量保证它给用户发送的伪距纠正量误差的正确性。本文在分析原监测算法的基础上提出两种新的算法。经过上面的分析与仿真讨论, 可以看出行列判断法和 C 值辅助法都优于 B 值排除法。对于接收机故障, 行列判断法稍优于 C 值辅助法; 对于卫星故障, 后者的监测能力更好一些。而且, C 值辅助法要比行列判断法简单一些。所以, 如果参考站的接收机性能足够好, 建议使用 C 值辅助法。这两种算法是基于 GPS 的 LAAS 系统提出的, 但是, 它同样适用于 GLONASS、Galileo、北斗等单模或多模的导航增强系统。

参考文献

- [1] 陈金平. GPS完善性增强研究. [博士学位论文], 解放军信息工程大学测绘学院, 2001.
Chen Jin-ping. Research of GPS integrity augmentation. [Ph.D.dissertation], Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 2001.
 - [2] 杨文辉, 周保军. LAAS地面系统中多基准一致性检测算法的分析. 电子学报, 2006, 34(3): 469-471.
Yang Wen-hui and Zhou Bao-jun. Analysis of multiple reference consistency check on LAAS ground facility. *Acta Electronic Sinica*, 2006, 34(3): 469-471.
 - [3] Gang Xie, *et al.*. Integrity design and updated test results for the Stanford LAAS integrity monitor tested [A]. ION 57 th Annual Meeting/CIGTF 20th Biennial Guidance Test Symposium[C]. Albuquerque, NM: The Institute of Navigation, America, 2001-06-11: 681-693.
 - [4] Specification: Category I Local Area Augmentation System Non-Federal Ground Facility. U.S. Federal Aviation Administration, Washington, D.C., FAA/AND710-2937, May31, 2001.
 - [5] RTCA Inc., Minimum Aviation System Performance Standards for The Local Area Augmentation System(LAAS) , RTCA /DO-245, 28 September 1998: 51-55. E-16, 17/32-46
 - [6] Specification: Performance Type One Local Area Augmentation System Ground Facility. U.S.Federal Aviation Administration, Washington, D.C., FAA-E-2937, Sept. 21, 1999. Internet:http://gps.faa.gov/Library/Documents/laas_faa2937.pdf
 - [7] Van Dyke K L. DOT/Volpe Center. The world after SA: benefits to GPS integrity Position Location and Navigation Symposium, USA, IEEE 2000: 387-394.
- 王志鹏: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为卫星通信导航、GPS增强系统等.
- 张 军: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 长江学者, 北京航空航天大学电子信息工程学院院长.
- 刘 强: 男, 1971年生, 高级工程师, 博士后, 研究方向为航空导航、飞行校验等.