GPS 自主式完整性检测技术研究

刘 准 陈 哲
(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100083)

摘 要：证明了 GPS(Global Positioning System) RAIM(Receiver Autonomous Integrity Monitoring)两种算法：奇偶空间法和残差最小二乘法在数学上是等价的.提出了一种新的 GPS RAIM 算法，并进行了仿真实验.研究结果表明，该算法具有可用性高、漏警率低，故障检测灵敏等优点，满足了高精度、高可靠性的制导要求.研究了可见星较少时，采用气压高度表辅助、接收 GLONASS(GLObal NAvigation Satellite System)信号等实现 RAIM 的方法，并进行了仿真验证.

关 键 词：卫星导航；故障检测；全球定位系统
中图分类号：V 249.3
文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2003)08-0673-04

Study on GPS receiver autonomous integrity monitoring

Liu Zhun Chen Zhe
(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: It proves that least square residual method is equal to parity space method in detection rule. A novel GPS(global positioning system) RAIM(receiver autonomous integrity monitoring) algorithm is presented. The results show that it provides high availability, low missed detection and sensitive to fault detection. It fulfils the need of the reliability of high precision guidance system. The approach using the barometer and receiving GLONASS(global navigation satellite system) signal to realize GPS RAIM when lacking satellite number-in-view is studied, and it has been demonstrated by simulation.

Key words: satellite navigation; fault detection; global positioning system

GPS(Global Positioning System)自主式完整性检测(RAIM, Receiver Autonomous Integrity Monitoring)目的是在导航过程中检测出发生故障的卫星，并保障导航定位精度.目前利用 GPS 信号进行检测的 RAIM 算法分为 3 种：范围比较法、奇偶空间法和残差最小二乘法[1].3 种算法都要求可见卫星数 5 颗以上才可进行 GPS 完整性检测；6 颗以上才可能辨识出故障卫星.由于范围比较法不精确，产生的误差比较大，因而没有后两种方法应用广泛[1].但是已有文献未对上述两种算法的故障检测准则进行过讨论.目前，国内外算法中阈值 T_D 是按照民用航空规范确定的，仅适用于民用航空领域，有较大的漏警率，不能满足高可靠性的要求，且进行 RAIM 时要求可见星数最少在 5 颗以上.对于目前 24 颗 GPS 卫星的配置，时常不能满足 RAIM 算法要求.为了满足高精度、高可靠性的要求，须对现有 RAIM 算法进行改进和更新.

本文首先证明了奇偶空间算法和残差最小二乘算法故障检验准则的等价性，进而提出了一种高可靠的新算法.并探讨了可见卫星数较少时，利用外部信息如气压高度表和 GLONASS(GLObal NAvigation Satellite System)辅助进行 RAIM 的方法.

1 两种算法的等价性证明

当 GPS 卫星出现故障时，首先反映在伪距测

收稿日期：2002-06-17
作者简介：刘 准(1973－)，男，河南淮阳人，博士后，liuzhun828@sohu.com.

量上.如果有 n 颗卫星,把所有测量合在一起,可得到如下矩阵方程:

$$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{G}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{Z}$($n\times1$ 矢量)为实测伪距与预测伪距之差;$\boldsymbol{X}$(4×1 向量)为接收机三维位置(x,y,z)和接收机钟差;$\boldsymbol{\varepsilon}$($n\times1$ 向量)为伪距测量噪声;$\boldsymbol{G}$($n\times4$ 矩阵)为卫星几何矩阵.

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & 1\\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ e_{n1} & e_{n2} & e_{n3} & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{e}_{ij}$($i=1,2,\cdots,n;j=1,2,3$)表示第 i 颗卫星到用户伪距方向的单位矢量.

1) 奇偶空间法的故障检测准则

定义奇偶矩阵 $\boldsymbol{V}$,它满足条件 $\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{G}=0$.将方程(1)左右两边左乘以 $\boldsymbol{V}$,则

$$\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{\varepsilon} \tag{3}$$

定义奇偶向量 $\boldsymbol{p}=\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{Z}$,则

$$\boldsymbol{p}=\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{\varepsilon} \tag{4}$$

当卫星发生故障时,量测方程(1)变为

$$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{G}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{b}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{b}_{\mathrm{f}}$($n\times1$ 向量)为卫星故障向量,对应故障卫星的分量不为零,其它分量为零.将方程(5)左右两边左乘以 $\boldsymbol{V}$,则

$$\boldsymbol{p}=\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{\varepsilon}+\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{b}_{\mathrm{f}} \tag{6}$$

由式(4)、(6)可知,$\boldsymbol{p}$ 在卫星无故障时假设 H_0 的统计特性和有故障假设 H_1 时的统计特性分别为

$$\mathrm{H}_0:E[\boldsymbol{p}]=0,E[\boldsymbol{p}\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}]=\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}$$

$$\mathrm{H}_1:E[\boldsymbol{p}]=\boldsymbol{\mu},E[(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{\mu})(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}}]=\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}$$

其中 $\boldsymbol{\mu}=\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{b}_{\mathrm{f}}$.两种假设的对数似然比为

$$\lambda(\boldsymbol{p})=\frac{p_{\mathrm{r}}(\boldsymbol{p}\mid\mathrm{H}_1)}{p_{\mathrm{r}}(\boldsymbol{p}\mid\mathrm{H}_0)}$$

定义故障检测函数

$$F_{\mathrm{D}}=\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{p} \tag{7}$$

在选择 $\boldsymbol{V}$ 时,如果满足 $\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{I}$,则上式简化为

$$F_{\mathrm{D}}=\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p} \tag{8}$$

若规定 T_{D} 为预先设定的阀值,则故障检验准则为:$F_{\mathrm{D}}\geqslant T_{\mathrm{D}}$.残差最小二乘检验法故障检测准则式(1)的最小二乘解

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{LS}}=(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G})^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Z} \tag{9}$$

则残差

$$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{G}\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{LS}}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{G}(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G})^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{Z}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{G}(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G})^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{\varepsilon} \tag{10}$$

定义

$$F_{\mathrm{SSE}}=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W} \tag{11}$$

残差最小二乘检验法将 F_{SSE} 作为故障检测函数,若规定 T_{D} 为预先设定的阈值,则故障判断准则为:$F_{\mathrm{SSE}}\geqslant T_{\mathrm{D}}$.

2) 关于 F_{D} 与 F_{SSE} 的等价性的证明

如果奇偶空间法在选择 $\boldsymbol{V}$ 时,满足 $\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{I}$,则和残差最小二乘法等价,证明如下.只需证明故障检测函数式(8)等于式(10)即可.

在式(10)两边左乘 $\boldsymbol{V}$,得

$$\boldsymbol{V}\boldsymbol{W}=\boldsymbol{V}\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{V}\boldsymbol{G}\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{LS}}$$

因为 $\boldsymbol{V}\boldsymbol{G}=0$,$\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{I}$,所以上式可变为

$$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p} \tag{12}$$

则

$$\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}=(\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p})=\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p} \tag{13}$$

将式(4)代入式(13)可得

$$\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}=(\boldsymbol{V}\boldsymbol{\varepsilon})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{\varepsilon})=\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{14}$$

而奇偶空间法的故障检测函数

$$F_{\mathrm{D}}=\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p}=(\boldsymbol{V}\boldsymbol{\varepsilon})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{\varepsilon})=\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W} \tag{15}$$

由式(15)可得 $F_{\mathrm{D}}=F_{\mathrm{SSE}}$. **证毕**

因此奇偶空间法和残差最小二乘法等价.采用 RAIM 算法时不论采用奇偶空间法还是残差最小二乘法,选用 F_{D} 或 F_{SSE} 作为准则是等价的.

2 一种新型 GPS RAIM 算法

文献[1]给出了 RAIM 的基本算法流程.该算法使用 Neyman-Pearson 准则(给定虚警率,使漏警率最小)来确定故障检测阈值,这种方法虽然可以使漏警率最小,但不能完全消除漏警.

为了满足载体高精度、高可靠性的定位性能要求,本文提出了一种新型 RAIM 检测算法.

2.1 一种新型的 GPS RAIM 算法

1) 提高 RAIM 算法可用性的途径

在进行 GPS 完整性检测之前,首先要进行可用性判别,即判断当前卫星几何分布是否适合做完整性检测.载体上都装备着气压高度表(用作惯导高度通道的阻尼和地形匹配),可增强可用性.

当无气压高度表辅助时,观测方程行数为 n,n 为可见星的数目,测量矩阵 $\boldsymbol{G}$ 如式(2).当有气压高度表辅助时,观测方程行数变为 $n+1$,$\boldsymbol{G}'$ 为

$$\boldsymbol{G}'=\begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & 1\\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ e_{n1} & e_{n2} & e_{n3} & 1\\ 0 & 0 & \dfrac{\sigma}{\sigma_{\mathrm{B}}} & 0 \end{bmatrix}$$

式中 $\boldsymbol{e}_{ij}$ 的定义同式(2),σ 为 GPS 定位标准差,σ 等于 33 m,σ_{B} 为气压高度表测量误差的标准差,

该误差随飞行高度变化而改变.考虑到载体巡航段飞行高度约为 150 m 左右,σ_B 设为 50 m.

2) 故障检测与辨识算法

GPS RAIM 算法有两个关键参数:用户预先设定的水平位置误差保护限和检测函数阈值.它们的选择直接关系到 RAIM 算法的可靠性和灵敏度.定义测试统计值为

$$Q=\sqrt{\frac{F_{SSE}}{n-4}}$$

无故障情况下,由于没有大的卫星伪距误差,测试统计值很小;而故障情况下,测试统计值变大.漏警区和虚警区的大小由阈值决定,且互相抵触(漏警区大则虚警区小,虚警区变大则漏警区变小).为了达到同时提高 RAIM 算法的可靠性和灵敏度,本文采用降低阈值来减少漏警率,但增加了虚警率.进而在故障辨识算法中增加虚警剔除模块,剔除由此引起的虚警.新型 RAIM 算法如下:

① 根据当前可见星数目计算 $\boldsymbol{G}$ 及其转置矩阵 $\boldsymbol{G}^T$;

② 根据可见星数目和预先设定的虚警率计算理论阈值 T_D.为了有效地降低漏警率,实际采用的阈值应小于理论阈值,实际阈值 $T_D'=T_D\times K$,$0<K<1$;

③ 根据气压高度表和卫星几何分布计算 S_{max}(S_{max}表示各个卫星到接收机倾角的最大值,计算方法见文献[1]),并计算近似径向误差保护限 A($A=S_{max}\times T_D'$);

④ 确定计算出的 A 值是否大于预先设定的 A 上限.如小于 A 上限,执行⑤,否则警告当前卫星几何分布不适合做 RAIM,退出.

⑤ 计算测试统计 $\sqrt{\frac{F_{SSE}}{n-4}}$,判断是否大于实际阈值 T_D'.如大于 T_D'则有故障,执行卫星故障辨识程序⑥;如小于 T_D'则无故障,输出定位信息.

⑥ 计算

$$v(i)=\frac{(\boldsymbol{W}^T)_i}{(\sqrt{\boldsymbol{I}-\boldsymbol{G}(\boldsymbol{G}^T\boldsymbol{G})^{-1}\boldsymbol{G}^T})_{i,j}} \tag{16}$$

$i=1\cdots n$,n 为可见星的个数.

⑦ 具有最大 $v(i)$的卫星最有可能出现故障.为了剔除由步骤②降低漏警率而带来的虚警,计算该卫星引起的水平位置误差,如果它大于水平保护限(可由载体要求的制导精度和 GPS 最大定位误差设定),则认为有故障并将其进行故障隔离;否则认为是虚警,无故障.

具有最大 S_{max}值的卫星出故障时最难检测,因此可用它作近似径向误差保护限的保守估计.上述算法中的第⑥步为卫星故障辨识程序,它的作用是计算出最有可能发生故障的卫星.算法的第⑦步为估计故障卫星引起的位置误差.

3) 故障卫星引起水平位置误差 $\hat{d}$ 的估计

定义矩阵 $\boldsymbol{S}$,有

$$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{I}-\boldsymbol{G}\boldsymbol{G}^T \tag{17}$$

方程(1)左右两边左乘以 $\boldsymbol{S}$

$$\boldsymbol{S}\times\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{S}\times(\boldsymbol{G}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{\varepsilon}) \tag{18}$$

定义 $\boldsymbol{f}=\boldsymbol{S}\times\boldsymbol{Z}$,则

$$\boldsymbol{f}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{G}(\boldsymbol{G}^T\boldsymbol{G})^{-1}\boldsymbol{G}^T)\times\boldsymbol{G}\boldsymbol{X}+(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{G}(\boldsymbol{G}^T\boldsymbol{G})^{-1}\boldsymbol{G}^T)\times\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{S}\times\boldsymbol{\varepsilon} \tag{19}$$

对于每个测量分量来说

$$f_i=\boldsymbol{S}_{i*}\times\varepsilon_i \tag{20}$$

其中 $\boldsymbol{S}_{i*}$ 表示 $\boldsymbol{S}$ 中第 i 行向量,因为正常情况下 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是均值 0 的白噪声,所以 0 为其最优估计.如果当第 i 颗卫星发生故障时,$\boldsymbol{\varepsilon}$ 中仅有一个分量不为 0,即 $\hat{\boldsymbol{e}}=[0\quad 0\quad \hat{e}_i\quad \cdots\quad 0]$,由(20)式可得 $\hat{e}_i=f_i/\boldsymbol{S}_{i,i}$,它引起的导航误差为

$$\hat{\boldsymbol{N}}=((\boldsymbol{G}^T\boldsymbol{G})^{-1}\boldsymbol{G}^T)\times\hat{\boldsymbol{e}} \tag{21}$$

式中 $\hat{\boldsymbol{N}}_1$ 为 4×1 的向量,则水平位置误差为

$$\hat{d}=\sqrt{(\hat{N}_1)^2+(\hat{N}_2)^2} \tag{22}$$

式中 $\hat{N}_1$,$\hat{N}_2$ 分别为 $\hat{\boldsymbol{N}}$ 的第 1 行、第 2 行的元素.

2.2　可见星较少时的 RAIM 算法

当可见星的个数为 4 时,$\boldsymbol{G}$ 的行数等于未知数的个数.量测不能提供必要余度信息,因此必须引入外部量测来构造故障检测所需的冗余信息.本文的解决途经有以下 2 种.

1) 当 n 为 4 时,直接使用气压高度表(或惯导输出 INS)的输出作为载体的高度值.由于气压高度表测量噪声随飞行高度的增加而加大,误差大约为飞行高度的 1%～5%.所以可以直接将其输出高度值代入方程(1).

2) 使用 GLONASS 卫星的测量信息.这要求接收机能同时接收 GPS 信号和 GLONASS 信号.这不仅可以提高导航定位精度,而且利用裕度的量测信息可以对 GPS 进行 RAIM.这需在 GLONASS 伪距量测方程中增加 GPS 与 GLONASS 的时钟偏差项,这样方程(1)中的导航状态 $\boldsymbol{X}$ 变为五维(3 个位置 x,y,z,接收机钟差和 GPS/GLONASS 时差).这样要判断出故障要至少 6 颗可见 GPS/GLONASS 卫星,若检测出故障卫星至少需 7 颗可见 GPS/GLONASS 卫星.GPS/GLONASS 组合时,式(1)中 $\boldsymbol{G}$ 如式(23)所示.

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & e_{n3} & 1 & 1 \\ c_{11}\times\dfrac{\sigma}{\sigma_g} & c_{12}\times\dfrac{\sigma}{\sigma_g} & c_{13}\times\dfrac{\sigma}{\sigma_g} & 0 & \dfrac{\sigma}{\sigma_g} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{M1}\times\dfrac{\sigma}{\sigma_g} & c_{M2}\times\dfrac{\sigma}{\sigma_g} & c_{M3}\times\dfrac{\sigma}{\sigma_g} & 0 & \dfrac{\sigma}{\sigma_g} \end{bmatrix} \tag{23}$$

e_{ij} 定义如式(2)，n 为可见 GPS 卫星数目. c_{nj} ($n=1,2,\cdots M; j=1,2,3$)为第 n 颗 GLONASS 卫星到用户伪距方向的单位矢量. M 为可见 GLONASS 卫星数目. σ 为 GPS 伪距测量标准偏差，$\sigma=33$ m. σ_g 为 GLONASS 伪距测量标准差，$\sigma_g=10$ m.

2.3 仿真实验

本仿真实验所使用的数据均由英国 GSS 公司生产的星座模拟器产生. 仿真中使用标准 GPS 星历设置，设定巡航导弹飞行轨迹为匀速运动，起点(纬度：39°，经度：116°)，飞行时间 200 s，飞行高度 300 m. 使用国产××型军用 GPS/GLONASS 接收机接收信息. 飞行时共有 6 颗 GPS 卫星和 6 颗 GLONASS 卫星可见.

仿真 1 提高 RAIM 算法可用性实验

仿真进行两次，一次有气压高度表增强，一次无气压高度表，结果如图 1. 从图 1 可看出：当采用气压高度表增强时，当前可见星的 S_{max} 值明显降低. 使当前 A 值降低，RAIM 算法的可用性提高.

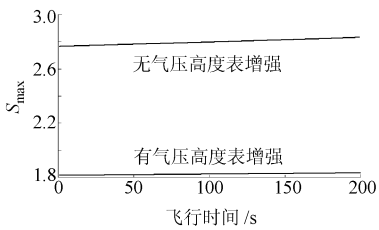

图 1 S_{max} 值

仿真 2 新算法与经典算法的比较实验

在卫星的故障类型中，逐渐增大的斜坡形故障最难检测. 为了验证新 RAIM 算法的灵敏性，在第 20 号卫星上叠加了较小每秒 3 m 的斜坡形伪距偏差故障，比例系数 $K=0.9$，设定水平保护限为 150 m. 并同文献[1]采用的标准 RAIM 算法进行了仿真比较，如图 2 所示. 新算法在第 119 s 时测试统计超过阈值，但水平定位误差并没有超过水平保护，在 122 s 时定位误差超过水平保护限，此可以判断 GPS 发生故障. 而采用文献[1]算法在 130 s 才能判断出 GPS 故障. 由此验证采用新算法可以较快地检测出故障.

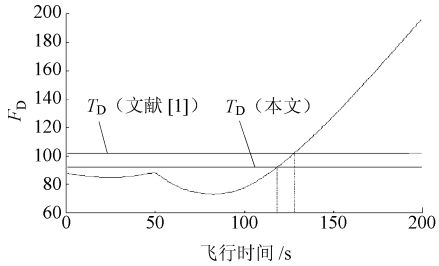

图 2 算法测试阈值的比较

仿真 3 可见星少时 RAIM 算法实验

为了验证本文提出的可见星较少时的 RAIM 算法的性能，飞行时选择有 4 颗 GPS 可见卫星，2 颗 GLONASS 可见卫星，有气压高度表辅助情况下 RAIM 仿真结果如图 3. 从图 3 可看出利用 GLONASS 或气压表信息可准确地检测出故障卫星.

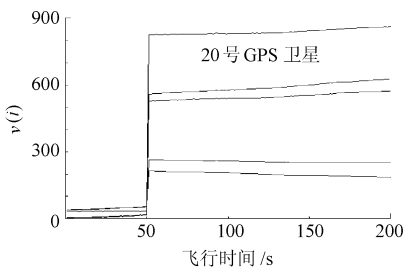

图 3 GPS/GLONASS 组合加气压表辅助时 $v(i)$ 值

3 结 论

本文证明了常用的 RAIM 算法：奇偶空间法和残差最小二乘法在检测准则上是等价的，并提出了一种新型的 GPS RAIM 算法，该算法采用增加虚警率降低漏警率的方法，最大限度地降低漏警率，并使用在故障辨识模块中剔除虚警的方法减少由此增加的虚警率；利用气压高度表来增强 RAIM 算法的可用性；并对可见星数目较少时的 RAIM 算法进行了研究. 研究结果表明，该算法具有可用性高，漏警率低，故障检测灵敏等优点.

参考文献（**References**）

[1] Brown R Grover. A baseline GPS RAIM scheme and a note on the equivalence of three RAIM method[J]. Journal of The Institute of Naviga tion, 1992, 38(3): 301～314

[2] 陈家斌，袁 信. 气压高度表辅助下 GPS 接收机自备完善性监测可用性研究[J]. 航空学报，1996，17(5)：561～565
Chen Jiabin, Yuan Xin. GPS RAIM availability with a barometric altimeter aiding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996, 17(5): 561～565(in Chinese)