

气压高度表辅助下 GPS 接收机 自备完善性监测可用性研究

陈家斌

(北京理工大学自动控制系, 北京, 100081)

袁 信

(南京航空航天大学自动控制系, 南京, 210016)

GPS R A M A V A L A B L I T Y W I T H A B A R O M E T R I C A L T M E T E R A I D I N G

Chen Jiabin

(Dept. of Automatic Control, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Yuan Xin

(Dept. of Automatic Control, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

摘 要 对我国范围内飞机非精密进场及终端航行时全球定位导航系统(GPS)接收机自备完善性监测(RAM)的可用性进行了研究,分析了气压高度表辅助和故障偏置大小对GPS RAM可用性的影响。结果表明:气压高度表与GPS组合是提高RAM可用性的有效措施;过大或过小的偏置误差将产生较小的漏警概率,而中等大小的故障偏置则产生较大的漏警概率。

关键词 气压高度表 故障 奇偶向量

中图分类号 V 249.3

Abstract A research is presented into the GPS RAM (receiver autonomous integrity monitoring) availability of the phases of nonprecision approach and terminal navigation over China. The influences of barometric altimeter aiding and bias errors on GPS RAM availability are analyzed. The simulation results show that the barometric altimeter-GPS integration system is an effective measure for improving the GPS RAM availability, and the large range or small range bias errors will cause small missed detection probabilities, while the middle range bias errors will cause large missed detection probabilities.

Key words barometric pressure-altimeters failure parity-vectors

为了提高RAM的可用性,FAA建议将飞机上配备的气压高度表和GPS组合,增加完善性监测时的冗余信息。这一组合方案具有原理简单、便于实现等优点。文献[1,2]对有气压高度表辅助的GPS RAM的可用性进行了分析,其对象主要为美国和欧洲的一些区域。当地域和故障偏置不同时,RAM可用性结果也是不同的,因此对国内地区气压高度表辅助下的GPS RAM可用性进行研究具有现实意义。

1 奇偶向量法在GPS故障检测中的应用

用于GPS故障检测的测量方程通常表示为

1995-01-03 收到,1995-09-10 收到修改稿

$$Z = GX + \epsilon + b \quad (1)$$

式中: $Z \in R^{M \times 1}$ 为观测量, $X \in R^{4 \times 1}$ 为状态向量, 且 $X = [x_u \ y_u \ z_u \ l]^T$, 其中 $(x_u \ y_u \ z_u)$ 为用户位置; l 为 GPS 接收机时钟误差等效的距离误差; $G \in R^{M \times 4}$ 为测量矩阵; $\epsilon \in R^{M \times 1}$ 为观测噪声, 它包含接收机噪声、SA 误差等; $b \in R^{M \times 1}$ 为故障偏置的大小。应用冗余信息进行故障检测时, 必须满足条件 $M \geq 5$ 。

定义奇偶向量 $P \in R^{(M-4) \times 1}$, 它独立于状态向量 X 而仅与噪声 ϵ 和可能存在的故障偏置 b 有关, 其表达式由下式给出

$$P = VZ = V(\epsilon + b) \quad (2)$$

式中: 矩阵 V 满足下列关系

$$VG = 0 \quad (3)$$

$$VV^T = I_{M-4} \quad (4)$$

式中: I_{M-4} 为 $M-4$ 阶单位矩阵; V 的算法可参阅文献[3]。

当观测噪声 ϵ 中各元素服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 时, P 也服从正态分布。基于以下二元假设:

$$H_0 \quad EP = 0; \text{ 无故障} \quad (5)$$

$$H_1 \quad EP = Vb; \text{ 有故障} \quad (6)$$

应用广义似然比故障检测方法, 可以得到故障检测判决函数 D 为

$$D = P^T P = Z^T V^T V Z \quad (7)$$

若故障检测门限为 T , 可以根据以下二元准则来进行故障判别

$$D < T; \text{ 无故障} \quad (8)$$

$$D \geq T; \text{ 有故障} \quad (9)$$

无故障时, D/σ^2 服从自由度为 $M-4$ 的 χ^2 分布, 因此检测门限 T 可由虚警率 P_{FA} 来确定

$$P_{FA} = [2^{m-4} \Gamma(\frac{m-4}{2})]^{-1} \int_{T/\sigma^2}^{\infty} e^{-y/2} y^{\frac{m-6}{2}} dy \quad (10)$$

当 P_{FA}, M, σ 均为已知时, 由上式可求出 T 。

假定每颗卫星发生故障的概率相等, 则漏警率 P_{MD} 为

$$P_{MD} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P[D < T/b = b_i] \quad (11)$$

式中: m 为可见星数量。

当 GPS 应用于民用航空系统时, 若 MOPS 规范中最小错误检测概率为 P_{min} , 则可根据以下准则来判别 GPS RAIM 的可用性

$$P_{MD} < P_{min}; \text{ RAIM 可用} \quad (12)$$

$$P_{MD} \geq P_{min}; \text{ RAIM 不可用} \quad (13)$$

2 GPS RAIM 可用性研究

无气压高度表辅助时, 观测方程维数 $M = m$, m 为可见星数目, 测量矩阵 G 为

$$G = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & 1 \\ \vdots & & & \\ e_{m1} & e_{m2} & e_{m3} & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $e_{ij} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, 3)$ 为用户到卫星 i 的距离相对地球坐标系的方向余弦。

有气压高度表辅助时, $M = m + 1, G$ 为

$$G = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & e_{m3} & 1 \\ 0 & 0 & \sigma/\sigma_b & 0 \end{bmatrix}$$

式中: σ_b, σ 分别为气压高度表和 GPS 接收机测量误差的标准偏差。

参阅文献[1], $\sigma = 33\text{m}$, 非精密进场和终端航行时 σ_b 分别为 50m 和 300m, MOPS 规范中 $P_{\min} = 0.001, P_{\text{FA}} = 0.002/h$ 。由式(10)可以得到观测方程维数 M 与检测门限 T 之间的关系如表 1 所列。

表 1 用 D 作试验统计时的检测门限值

观测方程维数 M	χ^2 自由度	检测门限值 T/m^2
5	1	17.310
6	2	20.940
7	3	23.900
8	4	26.560
9	5	29.020
10	6	31.350
11	7	33.580
12	8	35.730

表 2 我国区域经度、纬度近似划分

区域	经度/ $^{\circ}$	纬度/ $^{\circ}$
1	76- 80	33.5- 41.5
2	81.5- 92	42.5- 47.5
3	80- 98.5	28.5- 42.5
4	98.5- 120	22.5- 42.5
5	117.5- 130.1	42.5- 50

将我国近似划分为 5 个区域作为仿真的空间点, 各区域的经纬度范围见表 2。GPS 星座采用 24 星基本配置^[4], 卫星遮挡角为 7.5° , 采样间隔为 15ms, 对每一时空点进行 5 000 次试验, 并假设 GPS 星座可能发生的故障分类为: (1) 1 颗星 (SV 10) 故障; (2) 2 颗星 (SV 10, SV 22) 故障; (3) 3 颗星 (SV 5, SV 10, SV 22) 故障。下面对不同故障分类及不同故障偏置大小时, 气压高度表辅助对 GPS RAIM 可用性的影响进行研究。

2.1 近似最坏故障偏置条件下 RAIM 可用性

当卫星故障偏置值 b_i 与告警极限 A_L 之间具有以下关系^[5]

$$b_i = A_L (A_{1i}^2 + A_{2i}^2)^{-1/2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{14}$$

将产生近似最大的错误检测概率。其中: A_{1i}, A_{2i} 为矩阵 $A = (G^T G)^{-1} G^T$ 的元素; m 为可见星数目。

飞机非精密进场和终端航行时, 告警极限 A_L 分别为 555m 和 1 110m^[6], 根据第 2 节讨论的判别 RAIM 可用性的方法, 得到 RAIM 可用性结果如表 3、表 4 所列。

2.2 故障偏置大小对 GPS RAIM 可用性的影响

以某一时空点为研究对象, 其可见星号和几何误差参数如表 5 所列。取故障偏置值

$$B_i = kb_i \quad i = 1, 2, \dots, 6 \tag{15}$$

式中: k 为比例因子; b_i 值由式(14)给出。

将 B_i 依次加到各可见星上, 并考虑 SA 误差, 得到无气压高度表辅助时漏警率 P_{MD} 与 k 之间的关系如表 6 所列。

表 3 近似最坏故障偏置条件下非精密进场时 RAM 可用性/%

区域	无气压高度表辅助			有气压高度表辅助		
1	97.37	94.97	94.44	98.84	97.74	96.18
2	99.92	98.78	98.13	100	99.82	99.23
3	98.12	95.83	94.72	99.03	97.71	96.19
4	96.75	95.25	94.42	98.08	97.83	96.73
5	98.81	98.44	98.31	100	99.74	99.62
故障分类						

注: 表中, , 分别表示卫星 (SV 10), (SV 10, SV 22), (SV 5, SV 10, SV 22) 有故障

表 4 近似最坏故障偏置条件下终端航行时 RAM 可用性/%

区域	无气压高度表辅助		有气压高度表辅助	
1	98.96	96.14	99.13	97.73
2	99.03	98.61	99.65	98.96
3	97.82	96.31	98.89	97.73
4	96.92	95.17	97.24	95.83
5	97.14	95.56	97.47	96.31
故障分类				

注: 表中, 分别表示卫星 (SV 10), (SV 10, SV 22) 有故障

表 5 某时空点的可见星号及几何误差参数

可见星号 (SV)	GDOP	PDOP	HDOP	VDOP	TDOP
11, 12, 15, 18, 19, 21	2.28	1.96	1.53	1.24	1.16

表 6 P_{MD} 与 k 之间的关系

k	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
P_{MD}	0	0	0.0013	0.012	0.048	0.061	0.041	0.028	0.015	0.0037	0.0003	0

注: k 越大表示故障偏置值 B_i 越大, 反之亦然

3 结论

当 24 星配置的 GPS 卫星都在轨道上正常运行时, 文中对某些卫星信号被故障偏置污染后 GPS RAM 可用性进行了研究。由于有故障的卫星在我国上空每天可见的时间是有限的, 其余时间用户接收到的是无故障污染的卫星信号, 此时用户径向位置误差小于告警极限, 无须进行故障检测。当某些可见星中含有故障偏置值时, 随着地理区域的不同, 故障偏置对 RAM 可用性的影响也是不同的。表 2 中区域 3, 4 覆盖了我国大部分地区, 对它们的分析基本体现了我国 GPS RAM 可用性的分布状况。

由表3可知,非精密进场时,如果只有卫星SV 10有故障,无气压高表辅助时,区域3、4 GPS RAIM 可用性平均值为97.44%。当卫星(SV 10, SV 22)或(SV 5, SV 10, SV 22)有故障时,可用性平均值降至95.54%和94.57%;有气压高度表辅助时,可用性平均值分别上升至98.56%,97.77%和96.46%。由表4可知,终端航行时,当卫星SV 10或(SV 10, SV 22)有故障,无气压高度表辅助时RAIM 可用性(区域3、4)平均值分别为97.37%和95.74%;增加气压高度表辅助后,可用性平均值上升为98.07%和96.78%。由以上结果可以看出,故障卫星数目的增加将使RAIM 可用性下降,增加气压高度表辅助将使RAIM 可用性增大。因此用气压高度表与GPS组合来提高GPS RAIM 可用性是简单而有效的。

由表6可以看出,当故障偏置值足够大($k = 1.6$)或足够小($k = 0.7$)时, P_{MD} 小于MOPS规定的最小错误检测概率。当 $0.8 < k < 1.5$ 时, P_{MD} 超过了MOPS规定的最小错误检测概率,使GPS RAIM 可用性下降。可见故障偏置大小对GPS RAIM 可用性的影响是显著的。

有故障卫星的组合方式很多,文中的结果只表示了某些组合情况。不同故障卫星组合状态GPS RAIM 可用性结果也将会稍有差异。

参 考 文 献

- 1 Karen L V D. RAIM availability for supplemental GPS navigation. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 1992-1993, 39(4): 429-443
- 2 Lee Y C. RAIM availability for GPS augmented with barometric altimeter aiding and clock coasting. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 1993, 40(2): 179-198
- 3 袁信, 俞济祥, 陈哲. 导航系统. 北京: 航空工业出版社, 1993, 255-260
- 4 Green GB, Massatt P D, Rhodus N W. The GPS 21 primary satellite constellation. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 1989, 36(1): 9-24
- 5 Gerald Y C, John H K. GPS RAIM: Screening out bad geometries under worst-case bias conditions. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 1992-1993, 39(4): 407-427
- 6 Brown R G. A baseline GPS RAIM scheme and a note on the equivalence of three RAIM methods. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 1992, 39(3): 301-316