

文章编号: 1001- 2486(2007) 03- 0050- 06

卫星/MIMU 嵌入式导航接收机抗干扰性能分析*

唐康华, 黄新生, 胡小平

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了提高武器在恶劣敌对环境中的生存能力, 高抗干扰的嵌入式导航技术越来越受到研究者的关注。在分析卫星/MIMU 嵌入式组合导航接收机系统原理的基础上, 详细分析了采用 MIMU 信息辅助卫星接收机跟踪环路, 提高多普勒频率估算精度, 达到提高系统动态性能和抗干扰性能的要求。然后进一步分析了卫星/MIMU 嵌入式组合导航接收机系统抗干扰能力, 并以 GPS 接收机为例, 对 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机抗干扰性能进行了仿真。仿真结果表明, 卫星/MIMU 嵌入式组合导航接收机比一般的卫星接收机跟踪抗干扰性能至少有 11dB 的提高。

关键词: 卫星/MIMU; 嵌入式组合导航接收机; 抗干扰能力

中图分类号: TN850. 4; V241. 62⁺ 4 文献标识码: A

Anti-jamming Performance Analysis of Embedded GNSS/MIMU Integrated Navigation Receiver

TANG Kang-hua, HUANG Xin-sheng, HU Xiao-ping

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to make weapons much more effective in hostile environments, new developments in embedded GNSS/INS integration architectures which offer the possibility of substantial improvements in jamming immunity have aroused great attention from the researchers. This paper introduced the principle and construct of embedded GNSS/MIMU integrated navigation receiver, and presented the method of using MIMU to aid GNSS receiver tracking loop. This technique improved the accuracy of the estimated Doppler frequency, which resulted in higher dynamic and anti-jamming performance. Finally, the paper analyzed anti-jamming performance of embedded GNSS/MIMU integrated navigation receiver. According to the sample of GPS/MIMU, the simulation was done. The simulation results show that anti-jamming performance of embedded GNSS/MIMU integrated navigation receiver has 11dB improvement in comparison with the traditional GNSS receiver.

Key words: GNSS/MIMU; embedded integrated navigation receiver; anti-jamming performance

GPS 卫星信号的发射频率、调制特性和导航电文众所周知。GPS 卫星信号经过频谱扩展调制在 L 频段上的、深埋在噪声电平之下的微弱信号, 具有较强的抗干扰能力。但是接收机信号处理的解扩是在码相关发生之后才获得的, 从天线、下变频到码捕获, 信号依赖于空间 GPS 传送的射频 RF 信号, 由于其功率低, 故易受 RF 干扰, 其中包括故意和无意干扰、接收机带内和带外干扰, 这些干扰可能导致 GPS 接收机导航精度降低甚至不能正常工作。为了提高 GPS 接收机抗干扰能力, 研究人员采取了一系列抗干扰技术措施, 如采用自适应调零天线技术、抗干扰滤波技术、GPS/INS 组合导航技术等。为了明显地提高武器动态性能和抗干扰能力, 提高武器在恶劣的敌对环境中的生存能力, 高抗干扰嵌入式深组合技术越来越受到研究者的关注。自 20 世纪 90 年代初开始, Draper 实验室将 MEMS 惯性技术用于军事领域, 其研究工作进展主要体现在 DAPRPA 所资助的 MEMS-INS、INS/GPS 方面的几个计划上^[1]。美国 Draper 实验室于 2000 年描述了 GPS/IMU 深组合系统在低信噪比动态码跟踪中的应用, 使用仿真的 GPS 射频信号和仿真惯性测量数据, 证明了深组合比一般紧耦合系统的抗干扰性能提高了 15dB, 并于 2001 年申

* 收稿日期: 2007- 01- 03

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2006AA12Z319); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20069998009)

作者简介: 唐康华 (1976-), 男, 博士生。

请了专利^[2-3]。2005年7月18日, L-3 Communications, Interstate Electronics Corporation (IEC) 发布新一代用于精确制导武器、导弹、无人轰炸机的 FaSTAPTM 抗干扰技术和 GPS/INS 嵌入式深组合系统。深组合的 GPS 导航系统相对于使用标准的码跟踪环和载波跟踪环的常规 GPS 接收机来说, 在干扰环境下, 跟踪性能提高 15~20dB。

在卫星/MIMU 嵌入式组合导航接收机中, 多普勒测量值和码相位可以通过卫星/MIMU 组合系统测量, 然后引入到卫星接收机跟踪环路, 从而使卫星接收机的环路带宽降低, 提高接收机系统测量精度和抗干扰能力。本文研究是从卫星/MIMU 嵌入式导航接收机原理出发, 重点研究卫星/MIMU 嵌入式导航接收机抗干扰性能, 并以 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机为实例, 开展了抗干扰性能的仿真分析研究。

1 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机系统原理

将微惯性测量单元、卫星导航接收机模块和高性能任务处理器等构成 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机, 通过单一的高性能微处理器, 对接收机的环路进行闭合, 实现载波环和码环的跟踪、导航解算和综合滤波等处理。它的最主要的特性是用 MIMU 信息来辅助跟踪环路, 使得跟踪环路的带宽降低, 系统原理框图如图 1 所示。在图 1 中, GPS/MIMU 嵌入式导航接收机系统主要包含码跟踪环、载波跟踪环和综合导航信息处理环节, 其中综合导航信息处理主要完成码环测量值、载波环测量值和 MIMU 信息的融合, 得到最优导航解, 同时计算载波环和码环的辅助信息。它的硬件部分包含 GPS 接收模块、MIMU 模块和微处理器部分, 其中 GPS 接收模块仅包含射频和基带部分, 能对基带寄存器进行控制访问; 微处理器主要完成 GPS 信号的捕获、跟踪、辅助跟踪及综合导航信息处理等功能。

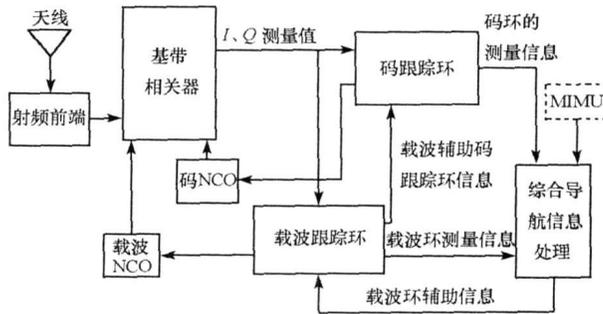


图 1 卫星/MIMU 嵌入式导航接收机系统原理图

Fig. 1 Embedded GPS/MIMU integrated navigation receiver

在一般的 GPS 接收机中, 基于各自环路的鉴别器函数, 每一个码环和载波跟踪环产生一个修正量, 使得接收到的信号和本地产生的信号进行对准。由于这些修正量经过一个低通滤波器除去高频噪声, 因此, 必须优化低通滤波器的带宽以适应载体不同动态条件下的性能。通常在低动态情况下, 带宽为 12~18Hz, 对于高动态情况, 带宽大于 20Hz。与载波环路相比, 动态性对码跟踪环的影响可忽略不计, 所以重点讨论载波跟踪环路。GPS 接收机跟踪环的跟踪误差主要包含两部分: 热噪声误差和由载体动态性引起的瞬时误差。对于 GPS 接收机带宽的设计来说, 总是涉及到这两个相反方面的折衷考虑: 一方面, 由于热噪声或干扰的原因要求窄的跟踪带宽; 另一方面, 由于载体动态性能的考虑要求宽的跟踪环带宽^[4]。GPS/MIMU 嵌入式导航系统能很好地解决该问题, 它不需要增加环路的带宽而能跟踪高动态信号。在 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机中, 载体动态性引起的多普勒频移变化可以通过 GPS/MIMU 嵌入式导航进行估算, 再引入跟踪环路, 所以 GPS 接收机的带宽可以设计得很窄, 通常可以设计到 3Hz 以下^[5], 从而达到抗干扰的目的。

2 GPS/MIMU 嵌入式组合导航系统抗干扰性能分析

2.1 GPS/MIMU 嵌入式组合导航的多普勒频率误差估计

载波信号的多普勒频率可以简单地表示成卫星与接收机之间在视线方向 (LOS) 上的投影的相对速

度,可表示如下:

$$f_{dpp} = \frac{1}{\lambda} (\mathbf{V}_{RX} - \mathbf{V}_S) \cdot \mathbf{I}_S \quad (1)$$

其中, λ 是载波的 $L1$ 频点的波长; \mathbf{V}_{RX} 是接收机天线的速度; \mathbf{V}_S 是卫星的速度; \mathbf{I}_S 是卫星到接收机单位视线矢量。方程可以在地固参考坐标系下计算,如地心地固坐标系或当地地理坐标系。

通常由载体平台引起的多普勒频移可以通过惯性传感器估算,多普勒频率估算的精度主要依赖于惯性传感器的质量。假定外部多普勒估计的误差主要来源于惯性器件的误差,对方程(1)求偏导得:

$$\sigma_{dpp}^2 = \frac{\mathbf{I}_S \cdot \mathbf{E}(\delta \mathbf{V}_{RX} (\delta \mathbf{V}_{RX})^T) \cdot \mathbf{I}_S}{\lambda^2} \quad (2)$$

根据惯性导航原理中的误差状态方程(具体方程见文献[6]),采用 Kalman 滤波器很容易估计出速度误差,从而估计出多普勒频移。

表 1 MIMU 的性能指标
Tab. 1 MIMU Specifications

陀 螺		加速度计	
输入范围	$\pm 200^\circ/\text{s}$	输入范围	$\pm 2, \pm 5, \pm 10\text{g}$ (可选)
偏值启动稳定性(固定温度)	$\leq 10^\circ/\text{h}, 1^\circ$	偏值启动稳定性(固定温度)	$0.5\text{mg}, 1^\circ$
偏值运行稳定性(任意温度)	$5^\circ \sim 200^\circ/\text{h}, 1^\circ$	偏值运行稳定性(任意温度)	$1\text{mg}, 1^\circ$
噪音(15min)	$4 \sim 15^\circ/\text{h}, 1^\circ$	噪音(15min)	$0.1\text{mg}, 1^\circ$
白噪声(角度随机游走)	$0.3/\text{rt-h}(0.005^\circ/\text{s}/\text{rt-Hz})$	白噪声(角度随机游走)	$0.4\text{mg}/\text{rt-Hz}$
标度因数误差	$\leq 5000\text{ppm}(0.5\%)$	标度因数误差	$\leq 5000\text{ppm}(0.5\%)$
未对准	$\leq 5\text{mrad}$	未对准	$\leq 5\text{mrad}$
带宽	50Hz	带宽	50Hz

所采用的 MIMU 的性能如表 1 所示。在静态条件下采集 800s 时间的数据,利用卡尔曼滤波器的滤波结果对 MIMU 进行位置、速度、姿态和加速度计零偏修正(反馈校正),可得图 2(a)和(b)的位置误差、速度误差估计结果。

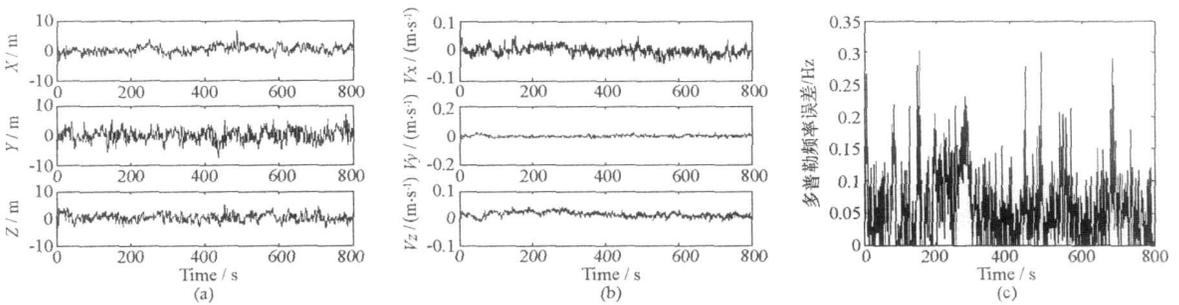


图 2 GPS/MIMU 嵌入式组合导航位置误差(a)、速度估计误差(b)和多普勒误差(c)

Fig. 2 GPS/MIMU estimated position error (a), velocity error (b) and Doppler frequency error (c)

根据速度误差可以得到图 2(c) 的多普勒估计误差。图 2(c) 是当载体正对着 GPS 卫星飞行时的多普勒估计误差,也就是最大的多普勒估计误差。在 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机中,载体动态性引起的多普勒频移变化可以通过 GPS/MIMU 嵌入式组合导航进行估计,从图 2(c) 可知, GPS/MIMU 嵌入式组合导航估计多普勒频率误差在 1Hz 以下。

2.2 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机测量误差与跟踪门限值的关系

由于载波跟踪环是非线性的,设计中仍可采用基于跟踪环测量误差的预报公式,对主要误差源进行分析。GPS 接收机 PLL 中主要的相位测量误差源为相位抖动引入的误差和动态引入的误差。载波锁相

环跟踪阈值的经验取值标准为测量误差均方根的 3 倍, 不超过 45° ^[7-8]:

$$3\sigma_{PLL} = 3\sigma + \theta_e \leq 45^{\circ} \quad (3)$$

其中, σ_{PLL} 为测量误差的均方根, σ 为接收机动态以外的所有其他源引入的误差(包括热噪声引入的误差、振荡器相位噪声引入的误差)的均方根, θ_e 为载波跟踪环中接收机动态引入的误差, 在 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机中, 载体动态性引起跟踪误差可以通过 GPS/MIMU 嵌入式组合导航进行补偿, 因此 θ_e 项仅包含由组合导航估计多普勒频率误差所引起的误差。

在 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机中, 对于锁相环, 总的 PLL 相位误差均方根可表示为^[7-8]:

$$\sigma_{PLL} = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{B_n}{c/n_0} \left(1 + \frac{1}{2Tc/n_0} \right) + \frac{\alpha^n \mathcal{G}^{(n-1)}}{3 B_n^n} \lambda} \quad (4)$$

其中, B_n 为载波跟踪环路滤波器噪声带宽, \mathcal{G} 为载体多普勒频率估计误差, T 为预检积分时间, c/n_0 为载波噪声功率密度比, $C/N_0 = 10\lg(c/n_0)$ 单位为 dB/Hz, n 表示环路的阶数, λ 为载波的波长。 $\alpha = B_n/\omega_n$ (ω_n 为环路的自然角频率), 对于一阶环 $\alpha = 0.25$, 二阶环 $\alpha = 3\sqrt{2}/8$, 三阶环 $\alpha = 5/6$ 。对于 GPS L1 波段来说, 从方程(3)可以计算载波的跟踪门限值为 8mm, 即对于 GPS L1 波段当跟踪误差超过 8mm 时, 就认为环路失锁。

从方程(4)可以计算在不同的带宽条件下 C/N_0 的阈值, 如图 3 所示。根据图 3, MIMU 辅助的 GPS 接收机(典型的带宽为 2Hz)可以使 C/N_0 阈值降到 17.78dB/Hz, 即当信号的噪声功率密度比 C/N_0 低于 17.78dB/Hz 时, 就认为环路失锁。

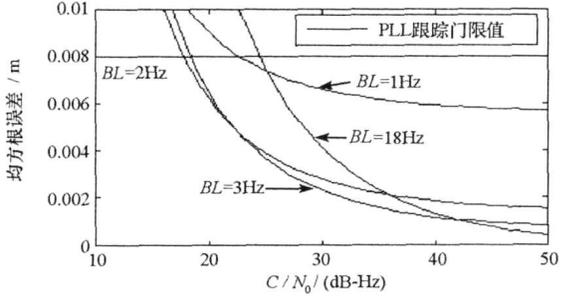


图 3 不同的噪声带宽对 PLL 跟踪环的影响

Fig. 3 The effects of different noise bandwidth on performance of PLL tracking

2.3 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机抗干扰性能分析

由于 GPS 接收机中信号到达天线的功率是一定的, 无外界干扰时(多径干扰、人为或非人为的带内、带外干扰)的通道噪声、电路损耗以及扩频增益(或预检积分时间)均是已知的, GPS 信号解扩后的信噪比可预期出现在一定范围内^[7,9]:

$$S/N = 10\lg(s/n) = C/N_0 + 10\lg(T), \quad C/N_0 = P_s - N_0 - N_F - N_C - N_D \quad (5)$$

其中 S/N 为信噪比(dB), P_s 为 GPS 定义的载波功率, 最小为 -160 dBW。对于 Block II 卫星, 由于卫星功率设计时考虑到功率随时间衰减, 目前实际的功率值比最小值要高 6dB 左右, N_0 为热噪声功率密度 (-204 dBW/Hz), N_F 为接收机噪声系数, N_C 为电路实现损耗(由设计决定), 二者分别假定为 2.5dB 和 1dB, T 为已知的预检积分时间, 最小为 1ms。 N_D 为搜索单元步进量引入损耗, 假定码搜索单元 Δ 为 0.25 码片, 多普勒搜索单元 F 为 500Hz, 最大相关误差引入损耗的信噪比为^[7,9]:

$$N_D = 20\lg(1 - \Delta) + 20\lg \left[\text{sinc} \left(\frac{\pi FT}{2} \right) \right] \approx 3.5\text{dB} \quad (6)$$

根据式(5)和(6)则可推得载波功率噪声密度比应在 37~46dB/Hz, 即信噪比 s/n 在 5 以上。当干扰产生时, 解扩后的信噪比则有可能低于这一范围。根据噪声理论有:

$$[c/n_0]_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{c/n_0} + \frac{j/s}{P f_c}} \quad (7)$$

c/n_0 为无干扰时信号载波功率噪声密度比, 可根据定义的 GPS 信号功率、热噪声功率密度、接收机噪声系数等得到。 j/s 为干扰与信号功率比, f_c 为码速率, P 为调整系数(窄带干扰为 1, 宽带干扰为 2), $[c/n_0]_{eq}$ 为干扰出现时等价的载波功率噪声密度比, 它可由接收机实际测得的信噪比推知。

相关器输出的载波功率噪声密度比可以衡量外界干扰对接收机的影响, 这是因为当干扰存在使得

等价的载波功率噪声密度比降低,这可从式(7)看出。将式(7)以 dB/Hz 表示,有^[9]:

$$[C/N_0]_{eq} = -10\lg\left[10^{-(C/N_0)/10} + \frac{10^{(J/S)/10}}{B_c}\right] \text{ dB/Hz} \quad (8)$$

其中, $C/N_0 = 10\lg(c/n_0)$, $J/S = 10\lg(j/s)$ 。

由等式(8)可得 J/S 的表达式,即

$$J/S = 10\lg\left\{B_c\left[\frac{1}{10^{(C/N_0)_{eq}/10}} - \frac{1}{10^{(C/N_0)/10}}\right]\right\} \text{ dB} \quad (9)$$

干扰的出现使得信号处理器输入的信噪比降低,直接影响码环/载波环的工作性能。为确定给定的 GPS 接收机最大抗 RF 干扰能力,必须确定接收机码环和载波环的跟踪阈值。因此,根据码环和载波跟踪环的工作特性来确定跟踪阈值,从而反过来推算接收机前端对干扰的容忍限度。

尽管 GPS 接收机(L1 C/A 码)的 J/S 性能从比值上看很强,但当考虑实际干扰信号电平时,该性能就显得很弱了。当接收机性能已知时可以确定天线输入处多大的干扰信号功率可导致接收机不能正常工作。从 J/S 定义出发,接收机的干扰和信号功率为^[7]:

$$J/S = J_r - P_s \quad (10)$$

其中, J_r 为接收机的干扰信号功率 dBW, $J_r = J/S + P_s$ 。由于 $J_r = 10\lg j_r$, 则 $j_r = 10^{(J/S + P_s)/10}$ W。

通常,我们关心干扰源功率,这要求对干扰源功率及通信链路进行估算:

$$J_t + G_t = J_{r0} - G_j + N_p + L_f \quad (\text{dBW}) \quad (11)$$

其中, J_t 为干扰源至天线的反射功率, $J_t = 10\lg j_t$, j_t 以 W 为单位; G_t 为干扰源发射天线增益; J_{r0} 为接收机天线输出的功率, $J_{r0} = 10\lg j_{r0}$, j_{r0} 以 W 为单位; N_p 为空间传播损耗, $N_p = 20\lg(4\pi d/\lambda) = 36.4 + 20\lg d$; d 为接收机与干扰源距离(m), λ 为干扰源波长; G_j 为 GPS 接收机对干扰的增益; L_f 为接收机前端滤波引入的干扰功率损失。

假定,干扰源天线增益为 0dB, GPS 天线对干扰源的增益也为 0dB,干扰源产生的为 GPS 带内谐波(假定频率与 GPS 的 L1 波段载波相同),故 GPS 接收机前端滤波损耗为 0dB(相对于信号),其结果是:接收到的干扰功率为干扰入射波功率 J_r ($J_{r0} = J_r + G_j$),唯一保存的衰减因子为 1575.42MHz 处有空间传播的损耗,上式简化为:

$$J_t = J_r + 36.4 + 20\lg d \quad (12)$$

根据计算所得的 J/S 和方程(10),得:

$$j_t = 10^{\frac{(J_r + 36.4 + 20\lg d)}{10}} \text{ W} \quad (13)$$

3 仿真分析

在图 3 中,普通 GPS 接收机的载波跟踪环带宽为 18Hz,对应的跟踪阈值为 24.5dB/Hz,由方程(9)可以计算出接收机前端的抗干扰能力。当干扰源为窄带干扰时,载波跟踪环抗干扰能力为 $J/S = 31.3$ dB;当干扰源为宽带干扰时, $J/S = 34.3$ dB。而在 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机中,典型的 GPS 接收机载波跟踪环带宽为 2Hz,对应的跟踪阈值为 14.4dB/Hz。当干扰源为窄带干扰时, $J/S = 42.3$ dB;当干扰源为宽带干扰时, $J/S = 45.3$ dB。

根据公式(13),当干扰源的功率分别为 0.1W、1W、10W、100W、1kW、10kW 时,分别对普通的 GPS 接收机和 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机的抗干扰性能进行仿真计算,仿真结果如图 4 所示。

从图 4(a)可以看出,一个 0.1W 的干扰源,在距离 GPS 接收机 10km 远,就能使 GPS 接收机失锁。图 4(b)给出了不同功率的干扰源对 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机跟踪的影响。根据计算可得表 2。

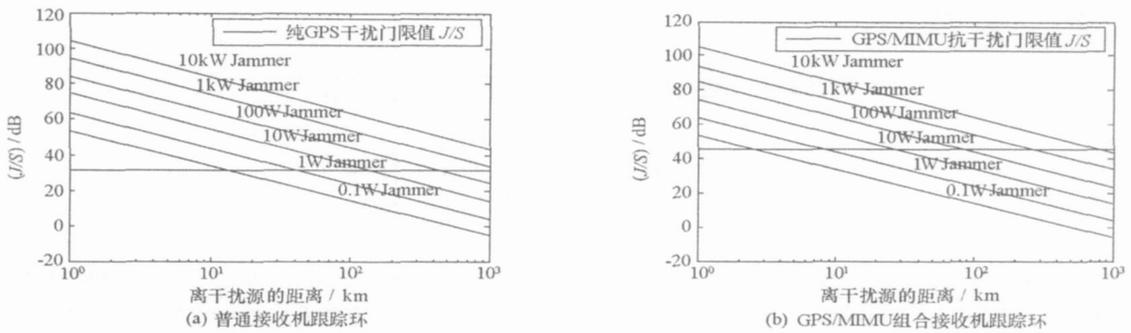


图 4 抗干扰性能的分析结果

Fig. 4 The resulting of anti-jamming performance

表 2 普通的接收机和 GPS/MIMU 组合系统接收机抗干扰能力比较

Tab. 2 The comparison of anti-jamming performance between common GPS receiver and GPS/MIMU integrated navigation receiver

干扰类型	普通的接收机 C/A 抗干扰能力 J/S (dB)	MIMU/GPS 嵌入式导航抗干扰能力 J/S (dB)
带宽	18Hz	2Hz
宽带干扰	34.3	45.3
窄带干扰	31.3	42.3

通过图 4 和表 2 可以看出, GPS/MIMU 嵌入式组合导航系统地跟踪门限值比普通的接收机增加 11dB, 即 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机能获得至少 11dB 的抗干扰能力, 证明了 GPS/MIMU 嵌入式导航接收机比一般的 GPS 接收机跟踪性能至少有 11dB 的提高。

4 结论

采用 GNSS/MIMU 嵌入式导航接收机系统不仅可以很好地解决热噪声所要求的带宽和动态性能所要求的带宽这一矛盾体, 而且由于带宽的降低, 增强了系统的抗干扰能力。仿真结果表明, GNSS/MIMU 嵌入式导航接收机系统比一般的 GNSS 接收机环路跟踪性能至少有 11dB 的提高, 这对我国研制具有自主知识产权的高抗干扰、高动态一体化的 GNSS/MIMU 嵌入式导航接收机具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 李荣彬, 刘建业, 曾庆化, 等. 基于 MEMS 技术的微型惯性导航系统的发展现状[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(6): 88-94.
- [2] Gustafson D, Dowdle J, Flueckiger K. A High Anti-jam GPS-based Navigator[C]// Salt Lake City: ION NTM 2000, 2000: 438-446.
- [3] Gustafson D, Dowdle J. Deeply Integrated Code Tracking: Comparative Performance Analysis[C]// Portland OR: ION GPS/GNSS, 2003: 2553-2561.
- [4] Lewis D E. Ultra-tightly Coupled GPS/INS Tracking Performance[C]// Colorado: AIAA's 3rd Annual Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO), 2003.
- [5] Kreye C, Eissfeller B, Winkel J ?. Improvements of GNSS Receiver Performance Using Deeply Coupled INS Measurements[C]// Salt Lake City: ION GPS 2000, 2000: 844-854.
- [6] 董绪荣, 张守信, 华仲春. GPS/INS 组合导航定位及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [7] Jwo D J. Optimization and Sensitivity Analysis of GPS Receiver Tracking Loops in Dynamic Environments[J]. IEE Proc. Sonar Navigation, 2001, 148(4): 241-250.
- [8] 孙礼. GPS 接收机系统的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998.
- [9] Tsui J B. Fundamentals Global Positioning System Receivers: A Software Approach[M]. 2th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005.