

doi: 10.7690/bgzdh.2013.04.013

一种提高 GNSS 接收机干扰抑制能力的方法

李传军, 王新龙

(北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

摘要: 针对 GNSS 接收机依靠外部卫星射频信号进行导航, 易受到有意或无意的射频干扰影响的问题, 对卫星接收机特别是弹载卫星接收机的抗干扰性能及其抗干扰技术进行研究。分别从信噪比和跟踪门限 2 个方面对卫星接收机的抗干扰性能进行详尽分析, 通过对有无干扰信号时对接收机接收信号的信噪比的对比, 以及对不同跟踪门限下接收机抗干扰能力的分析, 提出了采用 INS 辅助跟踪环路技术来提高接收机抗干扰能力的方法。结果表明: 该方法在不改变接收机硬件结构、不增加成本的条件下, 可有效提高弹载接收机的抗干扰能力。

关键词: GNSS 接收机; 抗干扰性; 信噪比; 跟踪门限

中图分类号: TJ861 **文献标志码:** A

An Method for Improving Anti-Jamming Ability of GNSS Receiver

Li Chuanjun, Wang Xinlong

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: GNSS receivers rely on outer satellite radio-frequency signals, so they are vulnerable to intentional or unintentional signal interference. Research anti-jamming ability and technology of satellite receiver, among others the ammunition-loading satellite receiver. Analyze anti-jamming ability of satellite receiver from signal to noise ratio and tracking threshold. Through comparing analysis of receiver signal to noise ratio when there is anti-jamming signal or there is no anti-jamming signal, and receiver anti-jamming ability analysis under different tracking threshold. The results show that the method can effectively improve receiver anti-jamming ability without changing receiver hardware structure and increasing cost.

Key words: GNSS receiver; ability of anti-jamming; signal to noise ratio; tracking threshold

0 引言

卫星导航系统易受到射频干扰的影响, 射频干扰有无意的干扰和恶意的人为干扰, 按照干扰带宽相对于 GNSS 信号宽度的大小可分为窄带干扰和宽带干扰。不论哪种干扰都可以在一定程度上影响卫星接收机的正常工作。干扰对制导武器弹载卫星接收机的影响直接关系到制导武器的命中精度, 使制导武器的作战效能大打折扣。研究卫星接收机特别是弹载卫星接收机的抗干扰性能及其抗干扰技术具有十分重要的意义^[1-3]。笔者提出一种适用于制导武器弹载卫星接收机的有效抗干扰的方法。

1 干扰对卫星接收机的影响

1.1 无干扰时接收机接收信号的信噪比分析

接收到的 GNSS 信号的质量通常采用信噪比来表征。为了分析干扰对接收机的影响, 首先需要确定接收机在未受到干扰情况下的信噪比。由于一般情况下卫星信号的发射功率一定, 考虑到空间损耗、接收机的通道噪声系数以及扩频增益一定, 则在无外界干扰情况下接收到的卫星信号的信噪比可预期

在一定范围内。

为了确定信噪比, 需要知道输入信号和噪声基底的功率。计算噪声基底强度时, 需要知道噪声带宽, 以 1 Hz 为参考带宽计算噪声基底的功率, 从而计算出信号的信噪比称之为等效载波噪声功率密度比(载噪比 C/N)。基带上未受干扰的 C/N ^[1,4]为

$$C/N_0 = S_r + G_a - 10 \log(kT) - N_f - L \quad (1)$$

其中: S_r 表示接收到卫星信号的功率; G_a 表示接收机天线指向卫星的天线增益, dBic; $10 \log(kT)$ 表示 1 Hz 为参考带宽计算的噪声功率 (174 dBm/Hz); k 表示波尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J}/(^{\circ}\text{K})$); T 表示热噪声基准温度 (290 K); N_f 表示包括接收机天线和电缆损耗的接收机噪声系数, dB; L 表示 A/D 等接收机内部损耗。

以 GPS 为例, 标称的地面接收的卫星信号最小功率大致在 $[-128 \text{ } -130] \text{ dBm}$ 范围内^[5], 假定接收的卫星信号功率为 $S_r = -130 \text{ dBm}$, 接收天线的增益为 $G_a = 0 \text{ dBic}$, 热噪声功率为 290 K, 接收机噪声系数为 $N_f = 3 \text{ dB}$, 内部其他损耗 $L = 1 \text{ dB}$, 则未受到干扰

收稿日期: 2012-10-09; 修回日期: 2012-11-11

作者简介: 李传军(1977—), 男, 湖北人, 在读博士, 从事高动态卫星导航、INS/GNSS 组合导航技术研究。

的载噪比为

$$C/N_0 = -130 + 0 - (-174) - 3 - 1 = 40 \quad (2)$$

这样，接收机接收信号的载波噪声功率密度比最小值大致在 [38 40] dB-Hz 范围内，而实际上目前 GPS 卫星功率要比最小值高约 6 dB，部分接收天线的最大增益能高达 5 dB，故实际接收的卫星信号的载噪比可高达 51 dB-Hz。

1.2 有干扰时接收机接收信号的信噪比分析

当存在干扰时，对于相同的卫星信号功率，基带测量的等效载噪比会降低。受到干扰时的等效载噪比与未受到干扰时的载噪比关系^[1]为

$$[c/n_0]_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{c/n_0} + \frac{j/s}{QR_c}} \quad (3)$$

其中受到干扰时的等效载噪比的单位为 dB； c/n_0 (与 C/N_0 单位不同) 为未受到干扰时的载噪比，dB； j/s 表示干扰信号功率比，dB； R_c 表示伪码的扩频速率，以每秒的码片数表示，例如对于 GPS C/A 码， $R_c = 1.023 \text{ MHz}$ ，对于 GPS P(Y) 码 $R_c = 10.23 \text{ MHz}$ ； Q 表示抗干扰品质因数，与扩频码和干扰类型有关，对于 GPS 的 C/A 码和 P(Y) 码，当干扰为窄带干扰时 $Q=1$ ，当干扰为匹配谱干扰时 $Q=1.5$ ，当干扰为带限白噪声时 $Q=2.22$ 。

若式 (3) 以 dB-Hz 为单位，则表示为

$$[C/N_0]_{eq} = -10 \lg \left[10^{\frac{C/N_0}{10}} + \frac{J/S}{QR_c} \right] \quad (4)$$

其中：受到干扰时的等效载噪比的单位为 dB-Hz； C/N_0 为未受到干扰时的载噪比，dB-Hz； J/S 表示干扰信号功率比，单位为 dB。

式 (4) 表明人为的干扰影响把接收机的 C/N_0 降低到 $[C/N_0]_{eq}$ ，随着 $[C/N_0]_{eq}$ 的降低，卫星信号的捕获，跟踪和数据解调将会恶化，当 $[C/N_0]_{eq}$ 降低到低于环路跟踪的门限 $[C/N_0]_{th_T}$ 时接收机失锁。对于失锁的卫星，如果 $[C/N_0]_{eq}$ 小于卫星的捕获门限 $[C/N_0]_{th_Acq}$ ，则该卫星可能无法再捕获到。

2 提高弹载接收机干扰抑制能力分析

根据上节分析，如果知道接收机的跟踪门限 $[C/N_0]_{th_T}$ ，可用式 (4) 推导出该接收机对干扰的容

忍度，即接收机采用固定接收场形天线 (fixed reception pattern antenna, FRPA) 时的抗干扰能力 (用干信比表示)。由式 (4) 可得接收机的干信比^[1]为

$$[J/S]_t = 10 \lg \left[QR_c \left(10^{\frac{[C/N_0]_{eq}}{10}} - 10^{\frac{C/N_0}{10}} \right) \right] \quad (5)$$

以 GPS C/A 码和 P(Y) 码为例，假定接收机接收到的卫星信号的载噪比为 40 dB-Hz，干扰源的类型为带限白噪声，则 $Q=2.22$ 。对于独立式高动态接收机，假定 PLL 载波跟踪环路的跟踪门限 $[C/N_0]_{th_T} = 28 \text{ dB-Hz}$ 。

GPS C/A 码的最大干扰抑制的干信比为

$$[J/S]_t = 10 \lg \left[2.22 \times 1.023 \times 10^6 \times (10^{-2.8} - 10^{-4.0}) \right] = 35.3 \text{ dB} \quad (6)$$

GPS P(Y) 码的最大干扰抑制的干信比为

$$[J/S]_t = 10 \lg \left[2.22 \times 10.23 \times 10^6 \times (10^{-2.8} - 10^{-4.0}) \right] = 45.3 \text{ dB} \quad (7)$$

由式 (6)、式 (7) 可知，P(Y) 码的干扰抑制能力比 C/A 码的干扰抑制能力扩大了 10 dB。

基于以上条件，在不同的跟踪门限下 GPS C/A 码和 P(Y) 码的 J/S 性能关系如图 1 所示。由图 1 可知，跟踪门限的阈值越小，即跟踪能力越强，则接收机的干扰抑制能力越强。

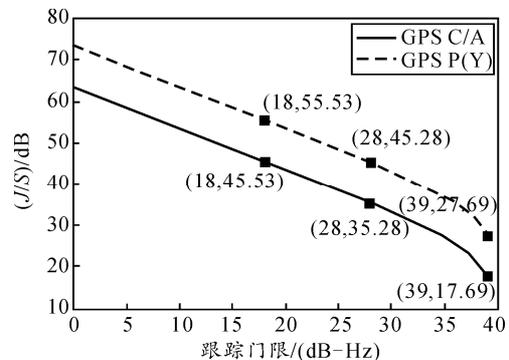


图 1 不同跟踪门限下的干扰抑制能力

由于接收机天线处接收到的卫星信号比较弱，尽管 J/S 性能在用分贝表示时数值较大，但转换为干扰信号的功率时，实际抑制干扰的功率较小。由 J/S 计算干扰功率^[6] (此处不考虑接收机射频损耗和接收天线对干扰的增益等) 为

$$(J_r)_{dB} = (J/S)_{dB} + (S_r)_{dB} \quad (8)$$

则天线输入端以瓦特为单位的干扰功率计算为

$$(j_r)_w = 10^{\left(\frac{(J/S)_{dB} + (S_r)_{dB}}{10} \right)} \quad (9)$$

假定接收到卫星信功率 $(S_r)_{dB} = -130 \text{ dBm} = -160 \text{ dBW}$, 则对于 PLL 载波跟踪环路的跟踪门限 $[C/N_0]_{th_T} = 28 \text{ dB-Hz}$, GPS C/A 码的 $(J/S)_{dB} = 35.3 \text{ dB}$ 情况下, 接收机抑制干扰功率最大为

$$(j_r)_w = 10^{\left(\frac{35.3+(-160)}{10}\right)} = 3.39 \times 10^{-13} \text{ W} \quad (10)$$

这说明对于 FRPA 天线, 只需要 0.339 pW 的入射射频干扰功率就会使跟踪门限为 28 dB-Hz 的 GPS C/A 码接收机失锁。一般接收机的天线远离干扰源的发射天线, 由于干扰信号在空气中传播有空间传播损耗, 所以干扰源的发射功率^[6]可表示为

$$(J_t)_{dB} = -(G_t)_{dB} + (L_p)_{dB} - (G_j)_{dB} + (L_r)_{dB} + (J_r)_{dB} \quad (11)$$

其中: G_t 表示干扰源发射天线增益; L_p 表示空间传播损耗; J_r 表示入射干扰信号功率; G_j 接收天线对干扰信号的增益; L_r 表示接收机射频前端滤波引起的干扰损耗。

空间传播损耗的计算方法为

$$(L_p)_{dB} = 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda_j} \right) \quad (12)$$

其中: d 表示接收机天线到干扰源天线的距离; λ_j 表示干扰信号的波长。由式 (8) 和式 (11) 可知:

$$(L_p)_{dB} = (J_t)_{dB} + (G_t)_{dB} + (G_j)_{dB} - (L_r)_{dB} - (J/S)_{dB} - (S_r)_{dB} \quad (13)$$

对于固定功率的干扰源, 接收机天线到干扰源天线的距离与 J/S 关系为

$$d = \frac{\lambda_j 10^{\frac{(J_t)_{dB} + (G_t)_{dB} + (G_j)_{dB} - (L_r)_{dB} - (J/S)_{dB} - (S_r)_{dB}}{20}}}{4\pi} \quad (14)$$

由式 (14) 和式 (5) 可知, 对于固定功率的干扰源, 可容忍接收机天线到干扰源天线的距离与接收机的跟踪门限关系为

$$d = \frac{\lambda_j 10^{\frac{(J_t)_{dB} + (G_t)_{dB} + (G_j)_{dB} - (L_r)_{dB} - 10 \lg \left[Q R_c \left(10^{\frac{[C/N_0]_{eq}}{10}} - 10^{\frac{C/N_0}{10}} \right) \right] - (S_r)_{dB}}{20}}}{4\pi} \quad (15)$$

以 GPS C/A 码和 P(Y)码为例, 假定接收机接收到的卫星信号的载噪比为 40 dB-Hz , 干扰源的类型为带限白噪声, 则 $Q=2.22$; 假定 PLL 载波跟踪环路的跟踪门限 $[C/N_0]_{th_T} = 28 \text{ dB-Hz}$; 假定敌方干扰源发射天线增益 $G_t = 0 \text{ dB}$ 和接收天线对干扰信号

的增益 $G_j = 0 \text{ dB}$, 接收机射频前端滤波引起的干扰损耗 $L_r = 0 \text{ dB}$, 则对于干扰类型为带限白噪声, 固定功率 $j_t = 10 \text{ W} = 10 \text{ dBW}$ 干扰源, 接收机可容忍到干扰源天线的距离计算如下, GPS C/A 码接收机可工作区距离干扰源的距离须大于如式 (16) 所示值。

$$d = \frac{\lambda_j 10^{\frac{10+0+0-0-10 \times \lg \left[2.22 \times 1.023 \times 10^6 \times \left(10^{\frac{28}{10}} - 10^{\frac{40}{10}} \right) \right] - (-160)}{20}}}{4\pi} = 98.0 \text{ km} \quad (16)$$

GPS P(Y)码接收机可工作区距离干扰源的距离须大于如式 (17) 所示值。

$$d = \frac{\lambda_j 10^{\frac{10+0+0-0-10 \times \lg \left[2.22 \times 10.23 \times 10^6 \times \left(10^{\frac{28}{10}} - 10^{\frac{40}{10}} \right) \right] - (-160)}{20}}}{4\pi} = 30.9 \text{ km} \quad (17)$$

由式 (16) 可知, 10 W 的干扰源能造成近 100 km 的普通 GPS C/A 码高动态接收机不能正常工作, 由式 (17) 可知 GPS P(Y)码接收机比 C/A 码接收机对噪声抑制能力更强。基于以上假设, 对于不同的干扰源功率和不同的环路门限, GPS C/A 码接收机可容忍到干扰源天线的距离与不同的环路跟踪门限的关系如图 2 所示。GPS P(Y)码接收机可容忍到干扰源天线的距离与不同环路跟踪门限的关系如图 3。

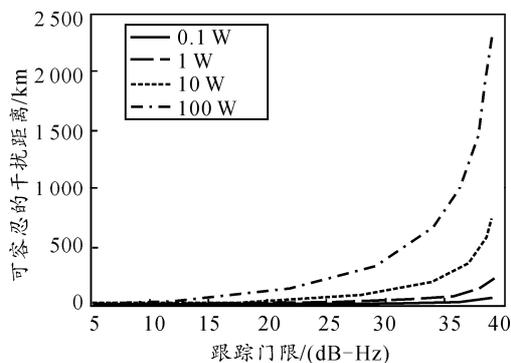


图 2 GPS C/A 码接收机不同跟踪门限下的可容忍抗干扰距离

由图 2 和图 3 可知, GPS P(Y)码比 GPS C/A 码的接收机对干扰的抑制能力更强; 跟踪门限的阈值越小, 即跟踪能力越强, 则接收机的可容忍的干扰距离越小。所以, 笔者可以通过采用外部辅助手段, 如 INS 辅助跟踪环路技术来提高接收机的跟踪能力, 以达到提高接收机的干扰抑制能力的目的。

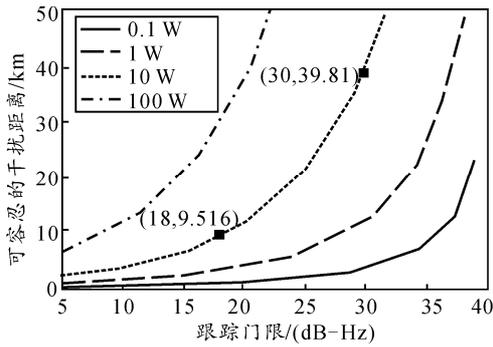


图 3 GPS P(Y)码接收机不同跟踪门限下的可容忍抗干扰距离

3 INS 辅助跟踪环路提高干扰抑制能力

辅助跟踪环路 (inertial navigation system, INS) 是通过 INS 估计本地接收机的多普勒信息, 采用外部辅助多普勒频率和跟踪环路滤波估计的残余多普勒频率, 来控制跟踪环路中本地信号的载波和码发生器的频率, 从而实现跟踪环路的闭合^[7]。该方法潜在的优势在于采用传统接收机跟踪技术, 通过降低噪声带宽可实现高动态信号衰减环境下的卫星信号跟踪, 提高了接收机的抗干扰能力。图 4 给出了高动态环境下传统独立三阶锁相环 PLL3、INS 辅助三阶锁相环 IPLLL3 和 INS 辅助二阶锁相环 IPLLL2 的有效跟踪 C/N_0 和最优带宽 B_n 的跟踪性能对比, 图 5 给出了高动态环境下二阶锁频环 FLL2 和 INS 辅助二阶锁频环 IFLL2 的跟踪性能对比。

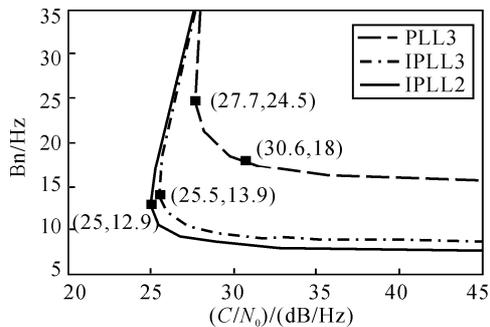


图 4 PLL 和 IPLLL 跟踪能力对比

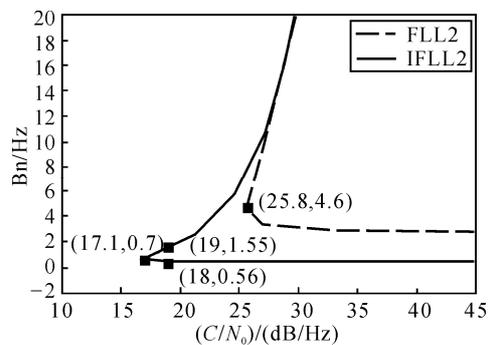


图 5 FLL 和 IFLL2 跟踪能力对比

由图 4 和图 5 可知, 独立三阶 PLL 可跟踪高动态弱信号至 27.7 dB-Hz, INS 辅助二阶 PLL 可跟踪高动态弱信号至 25 dB-Hz, 独立二阶 FLL 可跟踪高动态弱信号至 25.8 dB-Hz, INS 辅助二阶 FLL 可跟踪高动态弱信号至 17.1 B-Hz, 对应的最优环路噪声带宽为 0.7 Hz, 由图 5 可知, IFLL 的极限弱信号区域对应的有效带宽区域较小, 考虑到实际环路跟踪时最优带宽计算的误差, 实际系统可跟踪的最弱信号大于理论分析的最弱信号。

常规高动态接收机一般采用噪声带宽 18 Hz, 对应的极限弱信号载噪比为 30.6 dB-Hz, 而采用 IFLL2 可跟踪到 17.1 dB-Hz。由图 3 可知, 对于 10 W 的干扰机 GPS P(Y)码接收机干扰容限距离由约 40 km 提高到约 10 km, 所以 INS 辅助跟踪环路技术可提高跟踪性能, 从而有效提高干扰抑制能力。

4 结束语

射频干扰对卫星接收机的影响最直接的体现是定位误差增大, 使接收机接收信号的载噪比 C/N_0 降低至接收机的跟踪门限 $[C/N_0]_{th_T}$ 。当 C/N_0 小于 $[C/N_0]_{th_T}$ 时, 接收机载波跟踪环路将无法锁定卫星信号, 导致接收机不能定位; 因此, 采用外部 INS 辅助跟踪环路技术可有效提高环路弱信号跟踪能力, 从而提高接收机的干扰抑制能力, 最终可提高依靠卫星导航制导的武器制导精度, 是一种适用于制导武器弹载卫星接收机的有效抗干扰的方法。

参考文献:

- [1] 寇艳红, 译. GPS 原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社出版社, 2010: 191-202.
- [2] 张琳. 卫星导航系统接收机抗干扰关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007: 15-16.
- [3] J. R. Burns. New Approach for Suppression of FM Jamming in GPS Receivers [D]. America: IEEE Transaction Aerospace and Electronic system, 2006: 1464-1474.
- [4] Tsui J B. Fundamentals of Global Positioning System Receivers[M]. Second Edition. New York: A John Wiley & SONS, Inc., Publication, 2005: 272-291.
- [5] IRN-200C-005R1, ICD-GPS-200C, 14 Jan 2003.
- [6] 田日才. 扩频通信[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 210-214.
- [7] Toshiaki Tsujii1, Takeshi Fujiwara, et al. Development of INS-aided GPS Tracking Loop and Preliminary Flight Test[C]. Japan: ICROS-SICE International Joint Conference 2009 August 18-21, 2009, Fukuoka International Congress Center, 2009: 3585-3590.