

局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法*

范广腾, 黄仰博, 李柏渝, 孙广富

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:接收机在进行窄带干扰抑制后,其输出信号的相关峰会发生分裂。使用传统的基于信号到达时间的抗转发欺骗干扰算法,会使得捕获锁定的相关值为真实信号的旁瓣。针对该问题提出一种基于局部相关值最大的时延检测方法,在真实信号相关峰分裂所产生的旁瓣与欺骗信号不重合前提下,通过对主瓣三个码片范围内最大值的搜索,保证捕获不会锁定在旁瓣,再选择局部最大值中的最早码相位点从而避免锁定到转发欺骗干扰。与传统的基于信号到达时间的抗转发欺骗干扰算法相比,在无窄带干扰情况下,所提算法性能相当;在存在窄带干扰情况下,其性能明显优于传统算法。通过数值仿真验证了方法的有效性。

关键词:转发欺骗干扰;窄带干扰;相关峰分裂;局部最大

中图分类号:TN914.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)01-069-05

Delay-waiting detection method based on local maximum to suppress repeater spoofing interferences

FAN Guangteng, HUANG Yangbo, LI Baiyu, SUN Guangfu

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A large divide will be formed in the output signal of correlator after rejecting narrow-band interface. The traditional anti-interference method based on the time of arrival will be locked on the side-lobes of real signals. To solve this problem, a new delay-waiting detection method based on local maximum value was presented. Under the prerequisite that the side-lobes do not superpose the spoofing signals, the method first searched the local maximum in three chips of main lobes to prevent the capture module from locking side-lobes. Then the earliest code-phase point from those local maximum was chosen to remove repeater spoofing jamming. Compare with the traditional anti-interference method based on the time of arrival, performance of the proposed method is similar in the absence of narrow-band interface, but it is significantly better in the narrow-band interface condition. The numerical simulation results validate the effectiveness of the method.

Key words: repeater jamming; narrow-band interface; divide of correlation; local maximum

随着电子技术的发展,欺骗干扰逐渐成为卫星导航系统的重要威胁^[1-2]。其中转发式欺骗干扰因为无须知道对方使用导航信号的伪码序列以及电文结构,从而可以对包括军用信号在内的所有卫星导航接收机实施有效的欺骗干扰^[3],因此已成为研究的热点。

对于转发式欺骗干扰,由于经历了欺骗干扰源转发,因此从卫星到达接收机天线的信号相对于直达信号存在明显延迟。因此,可以通过信号到达时间来区分直达卫星信号和转发式欺骗干扰信号,即超前的信号为直达卫星信号,滞后的信号为转发式欺骗干扰信号^[4]。文献[5-6]分析了转发欺骗下采用匹配滤波结构对无周期信号的捕获性能,并进一步提出了抗转发欺骗快速傅里叶

转换(Fast Fourier Transform, FFT)捕获方法。

但在实际导航对抗环境中,干扰样式并不是单一的,存在转发式欺骗干扰的同时还会存在窄带干扰等压制式干扰。无论是频率还是时域的窄带干扰抑制方法,其输出端都有可能产生过检测门限的较大相关旁瓣。由于此时分裂产生的旁瓣其时延早于真实信号的主瓣,因此在真实信号旁瓣过检测门限情况下,使用传统的信号到达时间检测方法^[5]会使得接收机锁定到真实信号的旁瓣。本文在分析了传统基于信号到达时间的检测方法在相关峰分裂情况下的缺点的基础上,再分析了窄带干扰抑制对输出信号相关峰的影响,并利用相关峰分裂的局部特性,对传统的基于信号到达时间的检测方法进行了改进。

* 收稿日期:2015-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61201336,41301490)

作者简介:范广腾(1988—),男,安徽宣城人,博士研究生,E-mail:fanguangteng@163.com;

孙广富(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:sunguangfu_nnc@163.com

1 传统的基于信号到达时间的检测方法

为方便分析,假定针对同一颗卫星的转发欺骗信号只有一个(同一颗卫星存在多个转发欺骗的情况可以采取类似方法处理),则在存在转发欺骗情况下,接收机 I 和 Q 两路相关值输出为:

$$I(k) = \frac{\sqrt{2P}}{2} R(\Delta\tau_1) \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta\omega_{d1}Lt_s}{2}\right) \cos(\theta_{k1}) + m \frac{\sqrt{2P}}{2} R(\Delta\tau_2) \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta\omega_{d2}Lt_s}{2}\right) \cos(\theta_{k2}) + n_I(nt_s) \quad (1)$$

$$Q(k) = \frac{\sqrt{2P}}{2} R(\Delta\tau_1) \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta\omega_{d1}Lt_s}{2}\right) \sin(\theta_{k1}) + m \frac{\sqrt{2P}}{2} R(\Delta\tau_2) \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta\omega_{d2}Lt_s}{2}\right) \sin(\theta_{k2}) + n_Q(nt_s) \quad (2)$$

其中, P 表示真实信号功率, R 为相关函数, L 为相干积分次数, t_s 为采样间隔, m 表示转发信号对真实信号幅度的放大倍数, $\Delta\tau_1$ 为接收机产生的本地码与真实信号的码相位误差, $\Delta\omega_{d1} = \omega_l - \omega_s$ 为接收机对真实信号多普勒估计的误差, θ_{k1} 为接收机对真实信号的相位估计误差, $\Delta\tau_2$ 为接收机产生的本地码与转发信号的码相位误差, $\Delta\omega_{d2} = \omega_l - \omega_s$ 为接收机对转发信号多普勒估计的误差, θ_{k2} 为接收机对转发信号的相位估计误差, $n_I(nt_s)$ 和 $n_Q(nt_s)$ 为高斯噪声引起的系统输出。忽略噪声的影响,进入检测器检测量 z 可近似表示为:

$$z(k) = \left| \frac{\sqrt{2P}}{2} \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta\omega_{d1}Lt_s}{2}\right) R(\Delta\tau_1) + m \frac{\sqrt{2P}}{2} \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta\omega_{d2}Lt_s}{2}\right) R(\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2) \right| \quad (3)$$

由式(3)可知,在存在转发欺骗干扰情况下,在码相位和多普勒频率构成的二维平面上将出现两个较大的峰值,分别对应于转发欺骗干扰信号与真实信号。由于转发欺骗信号到达时间晚于真实信号,因此对于无周期扩频信号,可以根据过门限的码相位信息来区分真实信号与转发欺骗信号,码相位滞后的即为转发欺骗信号。

2 窄带干扰抑制后对输出信号相关峰的影响

常用的窄带抑制方法有频率抗干扰和时域抗干扰两种^[7],两者虽然在实现结构中不同,但是在数学上具有等价性。其中频率抑制窄带干扰结构框图如图 1 所示^[8]。

在频域上加权相乘等价于在时域中卷积,即



图 1 简单的频率抗窄带干扰示意图

Fig. 1 Simple frequency domain interference suppression processing

信号相当于在时域中经过一个带通滤波器。设滤波器长度为 $2K+1$, 滤波器系数 $h(l)$, $l = -K, \dots, -1, 0, 1, \dots, K$, 其中 $h(0) = 1$ 。接收信号^[9]: $r(k) = Adp(k) + n(k) + j(k)$, $k = \dots, -1, 0, 1, \dots$ (4)

式中, A 表示 GPS 基带信号的幅度, d 表示电文, $p(k)$ 表示伪随机码, $n(k)$ 表示噪声, $j(k)$ 表示窄带干扰。则接收机相关输出为:

$$U(m) = \sum_{k=1}^L p(k-m) \sum_{l=-K}^K h(l)r(k-l) \quad (5)$$

式中, m 表示本地参考 PN 码与接收信号 PN 码存在 m 个码元间隔的延迟。

当 $L \gg 1$, 且 $R_{pp}(\tau) \ll 1$ ($|\tau| > 0$) 时, $U(m)$ 的均值和方差分别近似为:

$$\mu(m) \approx \begin{cases} LA dh(m), & -K \leq m \leq K \\ 0, & |m| > K \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma^2(m) \approx LA^2 \sum_{l=-K}^K h^2(l) + L\sigma_n^2 \sum_{l=-K}^K h^2(l) + L \sum_{l_1=-K}^K \sum_{l_2=-K}^K h(l_1)h(l_2)R_{jj}(l_1-l_2)$$

其中, $R_{pp}(\tau)$ 为输入信号的自相关函数, $R_{jj}(\tau)$ 为残留干扰信号的自相关函数。

由式(6)可以看出,经过窄带干扰抑制后的信号,其相关峰会产生分裂。旁瓣和主瓣的距离以及功率比与窄带干扰的带宽和干扰在信号带宽的频率位置有关。定义有效旁瓣为超过捕获门限的旁瓣,在捕获门限以下的旁瓣不会影响捕获结果,可以等效为噪声。

图 2、图 3 给出了不同干扰带宽和干扰频偏的情况下,旁瓣与主瓣的距离和功率比。根据图 2 和图 3 可以得出如下结论:

1) 当干扰信号偏离信号中心频率 1% 以上,窄带干扰抑制后不会产生有效旁瓣。当干扰信号与信号中心频率对齐时,窄带抑制后产生的旁瓣幅度最高。

2) 干扰带宽越大,干扰抑制后产生的旁瓣幅度越高。

3) 窄带干扰抑制后产生的旁瓣与其主瓣的距离小于 2 个码片。

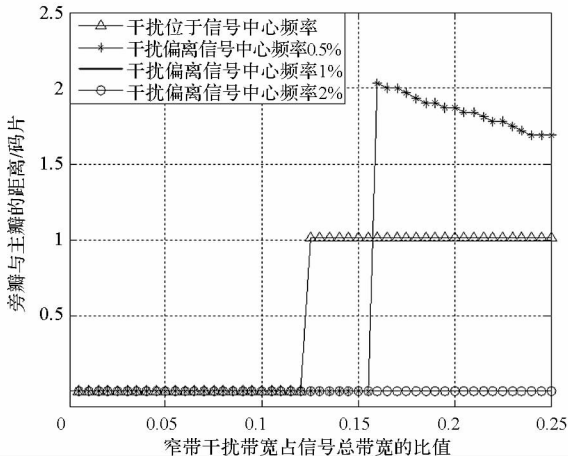


图 2 不同窄带干扰带宽和干扰中心频率情况下,旁瓣与主瓣的距离

Fig. 2 Distance between main lobe and side lobe in different bandwidth and frequency of jammer

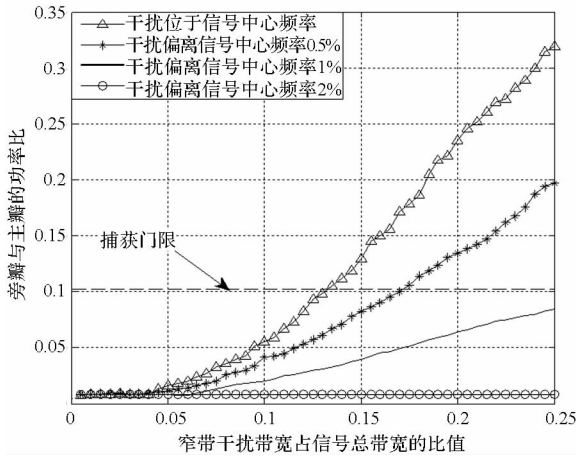


图 3 不同窄带干扰带宽和干扰中心频率情况下,旁瓣与主瓣的功率比

Fig. 3 Power ratio of side lobe and main lobe in different bandwidth and frequency of jammer

3 局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法

3.1 算法原理

由第 2 节的分析,存在窄带干扰情况下,经过干扰抑制后的信号其与本地码相关产生的相关峰旁瓣与主瓣距离最大为 2 个码片,即窄带干扰抑制引起的相关峰分裂具有局部特性。而对于转发式欺骗,由于转发欺骗源距离目标位置一般较远,且转发欺骗一般都针对码率为 10.23 MHz 的无周期 P 码,3 个码片的延时对于 P 码仅为 87.9 m,在实际中 GPS 干扰机的空间延时距离都会大于 3 个码片,故转发欺骗产生的相关峰与信号旁瓣不会重合。

基于上述分析提出基于局部最大延迟检测抗

转发欺骗干扰算法。假设接收信号为:

$$r(k) = Adp(k) + Bdp(k-l) + j(k) + n(k) \quad (7)$$

式中, $Adp(k)$ 为真实信号, $Bdp(k-l)$ 为延迟 l 的转发式欺骗干扰。由式(6)可得经过窄带干扰抑制后的信号相关输出 $U(m)$ 的均值和方差近似为:

$$\mu(m) \approx \begin{cases} LAdh(m), & -K \leq m \leq K \\ LBdh(m-l), & -K+l \leq m \leq K+l \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$\sigma^2(m) \approx LA^2 \sum_{l=-K}^K h^2(l) + LB^2 \sum_{l=-K}^K h^2(l) + L\sigma_n^2 \sum_{l=-K}^K h^2(l) + L \sum_{l_1=-K}^K \sum_{l_2=-K}^K h(l_1)h(l_2)R_{jj}(l_1-l_2) \quad (8)$$

由式(8)可以看出,无论是真实信号还是欺骗信号其相关峰都分裂为 $2K+1$ 个。

局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法采用的是频域并行加时域串行的相关捕获方法,具体的捕获结构如图 4 所示(图中 w 为信号中心频率)。

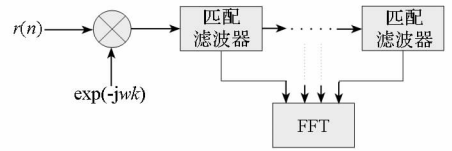


图 4 捕获结构图

Fig. 4 Block diagram of code acquisition

串行搜索码相位的顺序采用的是由早到晚,在每个码相位并行输出的各个频率分量相关值中找到频率维的最大值并与门限比较,因此该算法本身就具有了抗转发欺骗的能力。在此基础上该算法在检测到过门限的相关峰后并没有停止搜索,而是再继续向后搜索 3 个码片,若其后的 3 个码片中都没有比其大则认为捕获到了真实信号的主瓣。具体的流程如图 5 所示。

3.2 算法性能

对于无窄带干扰或窄带干扰抑制后没有产生有效旁瓣的情况,此时局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法等效于传统的基于信号到达时间的欺骗干扰检测算法。下面只分析窄带干扰抑制后相关峰出现过捕获门限的旁瓣后,该算法相对于传统算法的性能提升效果。

在相关峰出现过捕获门限的旁瓣情况下,误捕概率定义为捕获到转发欺骗干扰的概率 P_{fa} 与捕获到真实信号相关峰旁瓣的概率 P_{fb} 之和。由算法原理可知局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰

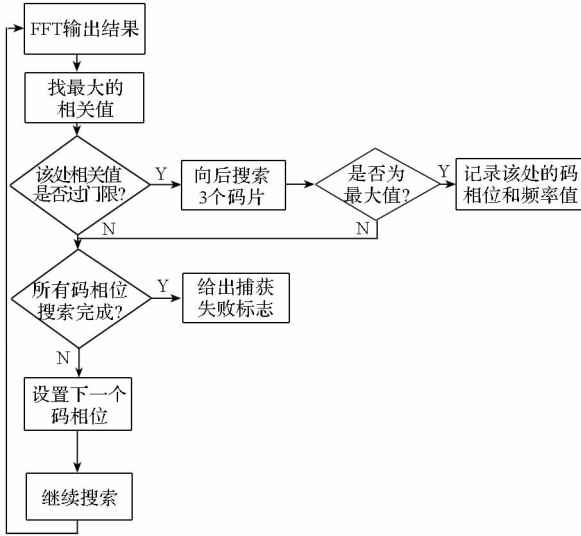


图 5 局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法流程图

Fig.5 Flow chart of suppressing repeater spoofing

interferences based on the local maximum value of signal delay 算法捕获到转发欺骗信号的概率 P_{fa} 与传统方法相同,因此着重分析捕获到真实信号相关峰旁瓣的概率 P_{fb} 。

经过窄带干扰抑制后,相关峰输出的均值和方差为式(8)所示,主瓣和旁瓣包络值为独立的随机变量,设主瓣包络值随机变量为 X ,旁瓣包络值随机变量为 Y ,则其联合概率密度 $p(X, Y)$ 分布为:

$$p(X, Y) = p(X)p(Y) = \begin{cases} \frac{XY}{\sigma_n^4} e^{-\left(\frac{X^2+Y^2}{2\sigma_n^2} + \frac{C}{N}\right)} I_0\left(\frac{X}{\sigma_n} \sqrt{2 \frac{C}{N} \times \frac{h}{h+1}}\right) \times \\ I_0\left(\frac{Y}{\sigma_n} \sqrt{2 \frac{C}{N} \times \frac{1}{h+1}}\right), X \geq 0 \text{ 且 } Y \geq 0 \\ 0, X < 0 \text{ 或 } Y < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: σ_n^2 表示均方根噪声功率; C/N 为真实信号对应的信噪比; h 表示主瓣与旁瓣的功率比; $I_0(x)$ 表示零阶修正的贝塞尔函数。

设 $Y > X \geq V_T$ 对应的积分区间为 D_{YXV_T} , $Y > V_T \geq X$ 对应的积分区间为 D_{YV_TX} , $X > Y \geq V_T$ 对应的积分区间为 D_{XV_TY} , 则误捕到旁瓣的概率 P_{fb} 为:

$$P'_{fb} = \iint_{D_{YXV_T} + D_{YV_TX} + D_{XV_TY}} \frac{XY}{\sigma_n^4} e^{-\left(\frac{X^2+Y^2}{2\sigma_n^2} + \frac{C}{N}\right)} \times I_0\left(\frac{X}{\sigma_n} \sqrt{2 \frac{C}{N} \times \frac{h}{h+1}}\right) \times I_0\left(\frac{Y}{\sigma_n} \sqrt{2 \frac{C}{N} \times \frac{1}{h+1}}\right) dXdY \quad (10)$$

而采用传统的基于信号到达时间的欺骗干扰

检测方法,其误捕到旁瓣的概率 P'_{fb} 为:

$$P'_{fb} = \iint_{D_{YXV_T} + D_{YV_TX} + D_{XV_TY}} \frac{XY}{\sigma_n^4} e^{-\left(\frac{X^2+Y^2}{2\sigma_n^2} + \frac{C}{N}\right)} \times I_0\left(\frac{X}{\sigma_n} \sqrt{2 \frac{C}{N} \times \frac{h}{h+1}}\right) \times I_0\left(\frac{Y}{\sigma_n} \sqrt{2 \frac{C}{N} \times \frac{1}{h+1}}\right) dXdY \quad (11)$$

分别比较式(10)和式(11)可以得出,存在窄带干扰的情况下,采用局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法其误捕概率低于传统的基于信号到达时间的检测算法。

4 仿真结果分析

采用蒙特卡洛仿真方法比较在有无窄带干扰情况下,传统的基于信号到达时间的检测算法和局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法的性能。仿真的条件设置如下:输入信号为含有转发欺骗干扰和加性高斯白噪声的卫星导航信号,伪码速率为 1.023 MHz,转发欺骗干扰的延迟为 200 m,转发增益为 3 dBc,相干积分时间为 1 ms,信号采样率为 4 MHz,载噪比为 46 dBHz,设虚警概率为 1%,蒙特卡洛仿真次数为 10 000 次。仿真结果如图 6、图 7 所示。

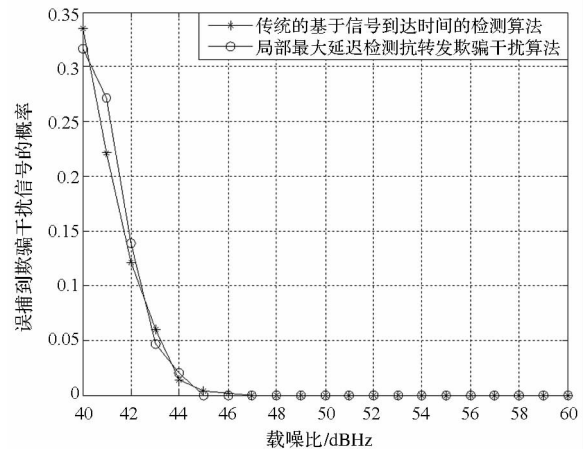


图 6 无窄带干扰情况下两种方法误捕到欺骗干扰信号的概率

Fig.6 Probabilities for locking on the spoofing signal of different method without narrow-band interface

由图 6 可以看出在没有窄带干扰时,使用传统的基于信号到达时间的检测算法和局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法,在不同载噪比情况下,误捕到欺骗信号的概率基本相同。

由图 7 可以看出在有窄带干扰时,使用局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法在旁瓣与主瓣功率比小于 0.6 的情况下,捕获到旁瓣的概率基

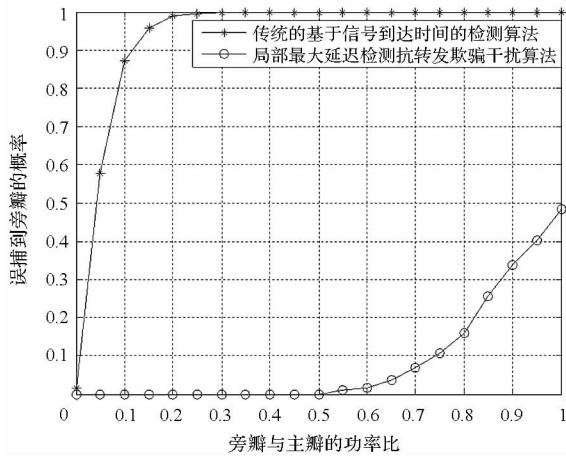


图 7 有窄带干扰情况下两种方法误捕到旁瓣的概率

Fig. 7 Probabilities for locking on the side lobe of different method in narrow-band interface

本为零,而用传统的方法,当旁瓣与主瓣功率比大于 0.3 时,捕获到旁瓣的概率就已经接近于 0.9,即在相关峰分裂情况下,局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法误捕到旁瓣的概率远远低于传统的基于信号到达时间的检测算法。基于上面两种场景的仿真结果可得到两种算法的性能比较如表 1 所示。

表 1 不同场景下两种算法的性能比较

Tab. 1 Performance comparison in different scenes

场景	算法性能比较
无窄带干扰	两者性能相当
有窄带干扰	局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法优于传统的基于信号到达时间的检测算法

综上所述可以得出局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法性能明显优于传统的基于信号到达时间的检测算法的结论。

5 结论

分别分析了转发欺骗和窄带干扰对导航信号输出相关峰的影响,利用窄带干扰抑制后输出信号相关峰分裂的局部特性,给出了局部最大延迟检测抗转发欺骗干扰算法。理论分析和性能仿真表明在无窄带干扰情况下此算法和传统的基于信号到达时间的检测算法性能相当,而在有窄带干扰导致相关峰分裂的情况下,此算法性能优于传统的算法。所提算法可以为复杂电磁环境下,抗

复合干扰的接收机设计提供参考。

参考文献 (References)

- [1] Humphreys T E, Ledvina B M, Psiaki M L, et al. Assessing the spoofing threat: development of a portable GPS civilian spoofer [C] //Proceeding of ION GNSS, Savannah, Georgia, 2008:16-19.
- [2] Bardout Y. Authentication of GNSS position: an assessment of spoofing detection methods [C] //Proceeding of ION GNSS, Portland OR, 2011:19-23.
- [3] 黄龙, 龚航, 朱祥维, 等. 针对 GNSS 授时接收机的转发式欺骗干扰技术研究 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(4):93-96.
HUANG Long, GONG Hang, ZHU Xiangwei, et al. Research of re-radiating spoofing technique to GNSS timing receiver [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(4): 93-96. (in Chinese)
- [4] 黄龙, 唐小妹, 王飞雪. 卫星导航接收机抗欺骗干扰方法研究 [J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2011, 36(11): 1344-1347.
HUANG Long, TANG Xiaomei, WANG Feixue. Anti-spoofing techniques for GNSS receiver [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(11): 1344-1347. (in Chinese)
- [5] 龚文飞, 孙昕, 吴嗣亮. 转发干扰下匹配滤波器 P 码捕获性能分析 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(11): 1340-1344.
GONE Wenfei, SUN Xin, WU Siliang. The performance analysis of P code acquisition based on match filter in the scene of repeater jamming [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(11): 1340-1344. (in Chinese)
- [6] 龚文飞, 孙昕. 抗转发干扰 FFT 快速捕获方法研究 [J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(8): 956-961.
GONE Wenfei, SUN Xin. Research on the FFT fast acquisition method to suppress repeater spoofing interferences [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(8): 956-961. (in Chinese)
- [7] 蔺晓龙, 何文涛, 徐建华, 等. 卫星导航接收机中窄带干扰抑制算法 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(1):72-75.
LIN Xiaolong, HE Wentao, XU Jianhua, et al. Narrow-band interference mitigation algorithm in GNSS receiver [J]. Computer Simulation, 2014, 31(1): 72-75. (in Chinese)
- [8] Capozza P T, Holland B J, Hopkinson T M, et al. Single-chip narrow-band frequency-domain excisor for a global positioning system (GPS) receiver [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2000, 35(3):401-411.
- [9] 李峥嵘, 桑怀胜, 王飞雪, 等. 扩频系统中自适应窄带干扰抑制滤波器对 PN 码捕获性能的影响 [J]. 电子学报, 2004, 30(12):1768-1771.
LI Zhengrong, SANG Huaisheng, WANG Feixue, et al. PN code acquisition performance effects of adaptive narrow-band interference suppression filters in spread-spectrum systems [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1768-1771. (in Chinese)