

文章编号: 2095-4980(2019)06-0964-07

一种基于 GPS 载波跟踪环的窄带干扰性能优化

王晓君, 康 娇, 王彦朋

(河北科技大学 信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050000)

摘 要: 针对全球定位系统(GPS)卫星信号具有随机性及干扰工程实现成本的问题, 讨论了窄带干扰性能优化问题。关于如何抵消卫星信号随机性问题, 仿真分析了单频信号不同干扰位置分布与窄带线性调频(LFM)信号带宽设置对GPS接收机的干扰效果; 关于如何降低干扰工程实现成本问题, 采用了多个干扰代替单个干扰的方法进行实验分析。仿真结果表明, 当采用最佳干扰位置或GPS信号带宽内均匀、随机分布等方法可一定程度消除卫星信号随机性带来的干扰不确定性; 采用多信号代替单信号可相应地降低干扰所需总成本。

关键词: 卫星导航; 接收机; 压制干扰; 窄带干扰; 载波相位误差; 抗干扰品质因数

中图分类号: TN972⁺.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.0964

Performance optimization of narrowband interference based on GPS carrier tracking loop

WANG Xiaojun, KANG Jiao, WANG Yanpeng

(College of Information Science & Engineering, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang Hebei 050000, China)

Abstract: The performance optimization of narrowband interference is discussed in view of two problems: the randomness of Global Positioning System(GPS) satellite signal and the cost of interference engineering. Firstly, on how to offset the randomness of satellite signals, the interference effects of different interference positions of single-frequency signals and narrow band Linear Frequency Modulation(LFM) signal bandwidth settings on GPS receivers are simulated and analyzed. Secondly, on how to reduce the cost of interference engineering, the method of replacing single interference with multiple interference is used for experimental analysis. The simulation results show that the interference uncertainty caused by the randomness of satellite signals can be eliminated to a certain extent by using the optimal interference position or the uniform and random distribution in the GPS signal bandwidth, and the total cost of interference can be reduced by replacing single signal with multiple signals.

Keywords: satellite navigation; receiver; suppress interference; narrowband interference; carrier phase error; anti-interference quality

卫星导航技术在军用和民用领域已具有广泛应用。由于卫星离地面十分遥远, 接收机接收到的卫星信号十分微弱, 极易遭到破坏和干扰^[1]。对此, 在现代战争中, 针对全球定位系统(GPS)的干扰与抗干扰导航对抗已成为能否取得战争优胜权的关键^[2-3]。目前, 比较常见的干扰为来自对方的压制干扰^[4], 其中窄带干扰是卫星导航系统面临的日益复杂电磁环境中常见的一种, 分析窄带干扰对导航接收机的影响并进行优化, 有利于干扰技术的实现与发展, 也为抗干扰技术提供理论依据^[5-6]。由于各卫星的伪码不尽相同, 所生成的卫星信号也具有一定随机性, 因此窄带干扰对其影响也不同。实际情况中, 窄带干扰在不同干扰位置的干扰能力或强或弱, 从而出现最佳干扰位置的概念。而 GPS 导航信号的随机性亦会导致窄带干扰的最佳干扰位置存在一定随机性。文献[5,7-8]研究了窄带干扰对接收机载波环路的影响, 但是只反映了窄带干扰对导航信号的随机性。针对以上问题, 本文首先仿真得出在最佳干扰位置只需较小功率的信号即可实现干扰, 但是在某些干扰效果较差的位置需要大功率的干扰信号才能使载波环失锁; 其次, 进行以多干扰位置的单频干扰叠加或一定带宽的窄带干扰来弱化卫星信号的随机特性的仿真分析; 此外, 在此基础上通过多信号代替单信号的方法论证降低工程实现成本的可能性。

1 GPS 跟踪环路及其数学模型

1.1 载波环原理介绍

信号跟踪是指接收机在经过捕获后,在闭环反馈跟踪系统中与接收信号同步的二维信号复制过程。信号跟踪环路实际上是由载波跟踪环路(简称载波环)和码跟踪环路(简称码环)组成,图1为一种典型的载波跟踪环路。

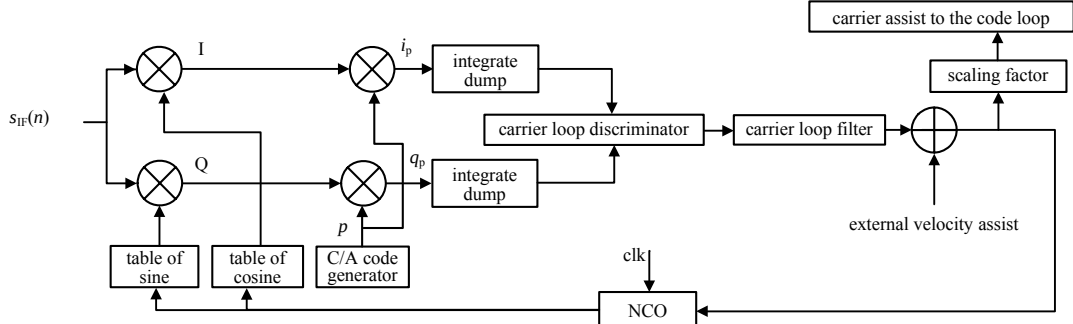


Fig.1 Carrier loop of digital GPS receiver
图1 数字式 GPS 接收机载波环

跟踪环路中载波环的目的是将捕获到的载波频率粗略值进行逐步精细,同时根据环路调整所复制的载波信号得到多普勒频移、积分多普勒和载波相位统计值,此外载波环鉴别器还能够解调出卫星信号上的导航电文数据。从图1可看出,在GPS接收机锁相环中,同相/正交(In-phase/Quadrature, I/Q)解调用来完成对接收信号 $s_{IF}(n)$ 的载波剥离、鉴相和解调数据等任务。数控振荡器是压控振荡器的数字化形式,其主要作用是根据接收信号复制相应的载波并得到正、余弦表。对接收信号依次进行载波剥离和伪码剥离之后,载波环再用积分清除器分别对I支路和Q支路上的相关结果 i_p 和 q_p 进行相干积分,以此消除信号中的高频信号和噪声^[9]。

1.2 系统仿真建模

1) 首先将信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)转换为信号/噪声功率密度比(载噪比, C/N_0)来描述信号质量,它是导航接收机中重要的输出参数^[10]。接收机输入端所接收到的干扰信号功率表示为 P_J ,一般用干信比(Jamming to Signal Ratio, JSR)描述干扰信号的大小,也称作压制系数 K_S 。而未受到干扰后的 C/N_0 会因为受到干扰而降低到一个较低的等效载噪比,各参数之间关系见式(1)和式(2)^[11-12]:

$$JSR = K_S = P_J / P_S \quad (1)$$

$$(C/N_0)_{eq} = \frac{P_S}{kT_0 + P_J / Qf_c} = \frac{1}{\frac{1}{C/N_0} + \frac{K_S}{Qf_c}} \quad (2)$$

式中: P_S 为接收到的信号功率; kT_0 为热噪声功率密度(k 为玻兹曼常数, T_0 为热噪声基准温度); Qf_c 为扩频处理增益(Q 为扩频处理因子(无量纲), f_c 为GPS的码速率)。

利用 Matlab 产生卫星信号与干扰信号,将总信号输入到跟踪环路中;改变干扰信号功率或干扰位置,通过统计得到载波环相干积分后信号的信噪比,再根据相关相干积分增益推导出输入信号的等效载噪比 $(C/N_0)_{eq}$,进而计算 Q 的实测值:

$$(C/N_0)_{eq} = \frac{E^2\{I(n)\}}{2\text{VAR}\{Q(n)\}} \times \frac{1}{T_{coh}} \quad (3)$$

$$Q = \frac{JSR}{\frac{1}{(C/N_0)_{eq}} - \frac{1}{C/N_0}} \times \frac{1}{f_{code}} \quad (4)$$

式中: E 为求期望; VAR 为求方差; $I(n)$ 为跟踪过程中载波环 I 支路信号; $Q(n)$ 为 Q 支路信号, n 为跟踪稳定后所统计的信号长度; T_{coh} 为相干积分时间; f_{code} 为伪码速率。

2) 环路接收信号 $r(t)$ 模型为:

$$r(t) = s(t) + n(t) + j(t) \quad (5)$$

式中: $s(t)$ 为连续的 GPS 信号,包括载波、伪码与导航电文^[13]; $n(t)$ 为接收机环路内噪声,构建为双边功率谱密度为 $N_0/2$ 的带限零均值高斯白噪声^[8]; $j(t)$ 建模为单频信号或窄带线性调频(LFM)信号^[14]。

3) 整个跟踪建模为信号产生、混频、相关、积分清除、鉴相等过程, 仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真模型参数

Table1 Simulation model parameters						
modulation mode	pseudo-random code	Doppler shift/Hz	pseudo code rate/M	IF rate/M	noise bandwidth/Hz	coherent integral time/ms
BPSK	GPS C/A PRN1	50	1.023	46.42	50	1

2 失锁判定条件

作为直扩体系, 接收机所能接受的干扰功率取决于跟踪状态下所能承受的干扰电平, 也称作环路跟踪门限。本文以载波环的跟踪门限作为环路失锁临界值, 以载波相位误差值作为判定环路是否失锁的条件。

2.1 环路跟踪门限

环路跟踪门限的确定方法: 其相位测量误差的 3 倍均方差 ($3\sigma_{\text{PLL}}$) 不能大于鉴相牵入范围的 1/4, 而常用载波环鉴相器的牵入范围大部分在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 之间^[12]:

$$3\sigma_{\text{PLL}} = 3\sigma_i + \theta_e \leq 45^\circ (180^\circ/4) \quad (6)$$

造成载波相位测量误差的主要影响是相位抖动 σ_i 及动态应力误差 θ_e 。而相位抖动误差基本上由热噪声 σ_{rPLL} 、机械颤动所引起的振荡频率抖动 σ_v 以及 Allan 均方差 σ_A 构成^[9]:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\text{rPLL}}^2 + \sigma_v^2 + \sigma_A^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{rPLL}} = \frac{180^\circ}{\pi} \sqrt{\frac{B_L}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2T_{\text{coh}} C/N_0} \right)} \quad (8)$$

式中 B_L 为噪声带宽^[15]。

在跟踪环路中, 将 θ_e 设置为 0° , σ_v 设置为 2° , σ_A 设置为 0.0056° 。因此载波环的跟踪门限可由式(6)~(8)计算确定为 14.87° , 即失锁临界值。

2.2 载波相位测量值

虽然式(8)已准确表达出载波环热噪声误差理论计算方法, 但实际跟踪过程具有随机性与抖动性。因此本文通过建模跟踪环路, 仿真分析实际跟踪过程中存在误差, 以此作为载波相位误差测量值进行后续仿真分析。具体实现方法如下: a) 生成信号同时保存信号的载波相位信息 ϕ_i ; b) 跟踪过程中, 通过载波数控振荡器本地复现载波及载波相位信息 ϕ_i , 并通过鉴相结果不断调整; c) 选取跟踪稳定后本地复现载波相位信息, 通过对比原始与所复制载波相位信息, 按式(9)求得两者之间相位误差, 得到跟踪过程所存在的相位误差。

$$e = \sqrt{\frac{[\phi_0(i:N) - \phi_i(i:N)]^2}{N-i+1}} \quad (9)$$

式中: i 为跟踪稳定后载波相位位数; N 为数据总长度。

3 单频干扰仿真分析

3.1 单频信号的最佳干扰位置仿真分析

定义频率偏移系数来表示干扰信号频率对应的卫星信号位置:

$$d = \frac{\Delta f}{0.5B} \quad (10)$$

式中: $B=2\text{ MHz}$ 为 GPS 信号带宽; Δf 为干扰频率从 GPS 信号中频点偏移距离, Δf 为负代表左偏, Δf 为正代表右偏。

对于单频干扰, 频率是其信号设置以及实现干扰的重要参数^[16]。将 GPS 信号与干扰信号的 K_s 设为固定值, 并在 GPS 信号带宽范围内改变窄带干扰信号的频率, 通过带内不同干扰位置下对接收机载波跟踪环路的影响得到载波相位误差的变化过程。实验中将 K_s 设定为 23 dB, 选取伪随机噪声(Pseudorandom Noise, PRN)编号为 1 和 2 的卫星信号, 即 PRN1 与 PRN2, 并在 $(46.42 \pm 1)\text{ MHz}$ 范围内按 100 kHz 的步长改变窄带干扰信号的频率进行多次跟踪环路仿真分析, 结果见图 2。

随着单频干扰频率的变化, 干扰效果也会变化, 而统计得到的载波相位测量误差可显示当前干扰对跟踪环路造成的影响并判定环路是否失锁。通过对比图 2 中单频信号对 PRN1 和 PRN2 的干扰效果可得出, 不同卫星的最

佳干扰位置有所不同。这是因为在实际情况中, C/A 码的功率谱线与 $\text{sinc}^2(x)$ 包络有偏移, 会有一些“强”或“弱”谱线超出包络, 使得某些位置的干扰能力强或弱, 即所谓的 GPS 卫星信号随机性。图 2 还通过展现抗干扰品质因数 Q 在实际跟踪过程中由 GPS 卫星信号随机性导致的变化情况, 证实了单频干扰具有最佳干扰位置这一结论 (Q 越大, 干扰能力越弱, 反之越强)。

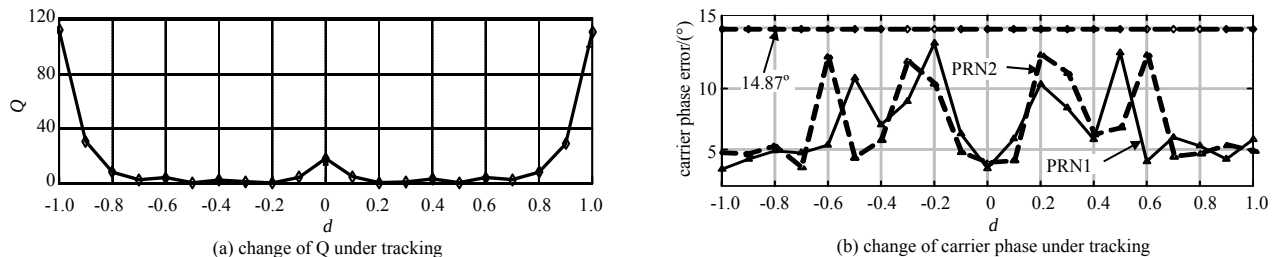


Fig.2 Effect of single frequency interference in GPS signal bandwidth

图2 GPS 信号带宽内单频干扰效果

3.2 单频信号的多个位置干扰仿真分析

针对某卫星信号存在各自的最佳干扰位置这种情况, 理论分析存在多个干扰时, 干扰位置落在最佳干扰位置时应比落在其他位置干扰效果要好。将以 PRN1 为例, 通过仿真进行验证, 将各干扰位置分布情况分为以下几种: 全部落在最佳干扰位置; 部分落在最佳干扰位置, 部分落在其他位置; 全部落在其他位置; 均匀分布干扰位置; 随机产生干扰位置。仿真结果见图 3。

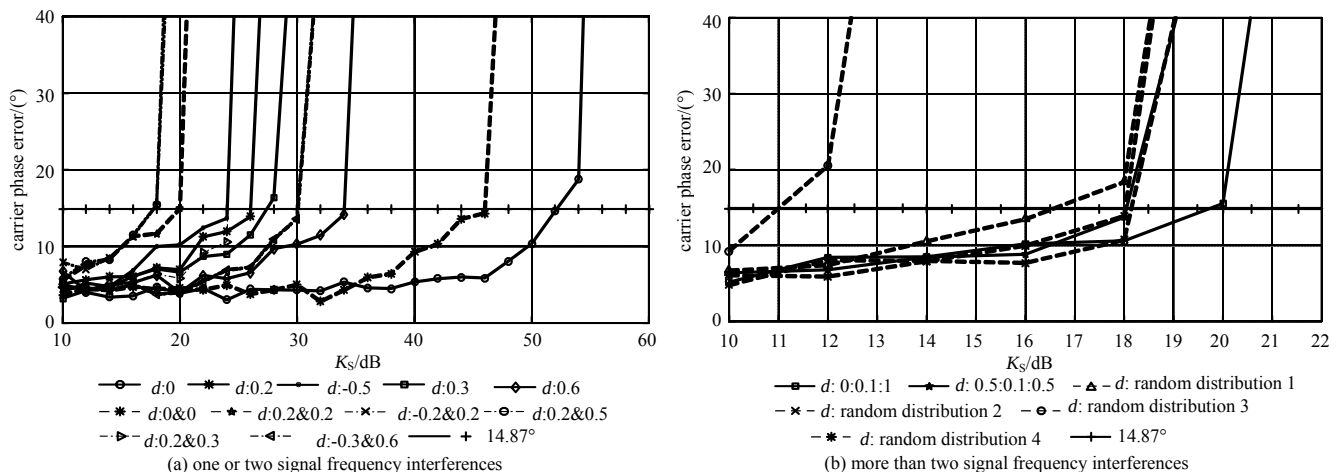


Fig.3 Carrier phase error under signal frequency interference at different positions

图3 不同位置的单频干扰下载波相位误差

对图 3 中不同干扰位置下的干扰效果分析见表 2(*代表此位置为最佳干扰位置)。对表 2 中结果进行分析, 得到如下仿真结论:

1) 同一位置的 2 个小功率信号代替一个大功率信号不能改变导致环路失锁的总功率(如干扰位置为 0.2 与干扰位置为 0.2&0.2 时, 导致失锁所需的总干信比均为 26 dB);

2) 当干扰位置落在不同的 2 个最佳干扰位置时(包括对应于导航信号中频点左右对称的两位置和频移不同的两位置), 相比于单个单频信号导致环路失锁所需的功率降低了 3~5 dB;

3) 当部分小功率信号的频点落在最佳干扰位置, 部分落在其他干扰位置时, 导致环路失锁所需的总功率比全部落在最佳干扰位置(无论是 1 个干扰还是 2 个干扰)所需的总功率要大, 但是比全部落在其他干扰位置所需的总功率要小。

表 2 单频干扰仿真总结

d	number of jamming	JSR/dB	total JSR/dB
0	1	52.0	52.0
0.2*	1	26.0	26.0
0.6	1	34.0	34.0
[0.2* 0.2*]	2	20.0	26.0
[0.2* 0.5*]	2	18.0	21.0
[0.2* 0.3]	2	24.0	27.0
[0.3 0.6]	2	30.0	33.0
uniform distribution(-0.5:0.1:0.5)	11	18.0	28.4
random position 1	10	16.5	26.5
random position 2	10	18.0	28.0

4) 当干扰位置在卫星信号带宽内均匀或随机分布时, 所需干扰总功率比全部落在其他位置情况下所需总功率要小, 且当最佳干扰位置较多时, 能够达到干扰位置全部落在最佳干扰位置时的干扰效果。

通过以上仿真结果验证与理论分析, 在对导航系统进行单频干扰时, 由于卫星信号具有随机性, 且各卫星信号拥有各自的最佳干扰位置, 除非事先对所有卫星信号进行干扰仿真, 否则难以确定单频信号的最佳频点设置。因此, 可通过以下方法抵消 GPS 卫星信号随机性, 并在一定程度上降低工程实现成本:

1) 最佳干扰位置已知: 在工程实现时, 单频干扰频率选择最佳干扰位置, 并根据实际情况增加干扰个数, 即用多个小功率单频信号来降低所需总功率;

2) 最佳干扰位置未知: 可在卫星信号带宽内频点均匀或随机分布, 来消除存在的随机性, 并在一定程度上降低所需总功率。

4 窄带干扰仿真分析

针对以上单频干扰存在的问题, 进行窄带干扰仿真分析。GPS 信号带宽为 2 MHz, 且具有随机性, 但是 C/A 码的功率谱线整体包络还是接近 $\text{sinc}^2(x)$ 包络。所以理论上采用具有一定带宽的窄带信号进行干扰, 能一定程度上抵消卫星信号的随机性。本节中窄带信号模型为 LFM 信号, K_s 设置为 20 dB, 带宽为 0.2 MHz, 并且在 GPS 信号带宽内改变 LFM 信号的中心频点进行多次仿真, 结果见图 4。

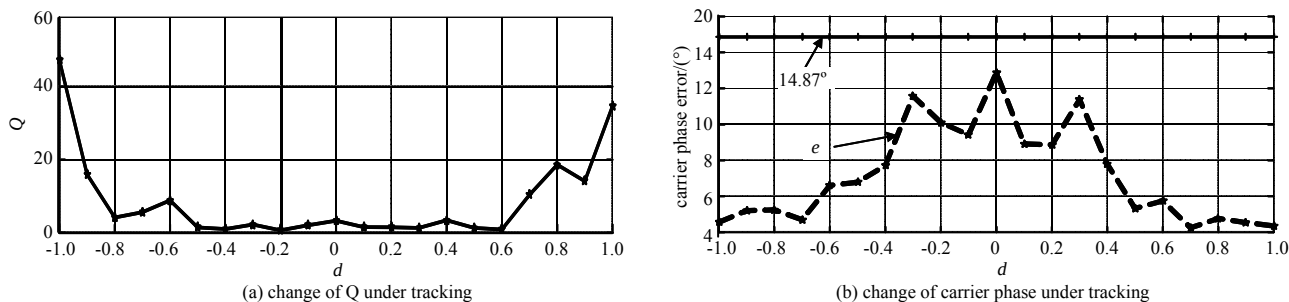


Fig.4 Effect of narrowband interference in GPS signal bandwidth

图 4 GPS 信号带宽内窄带干扰效果

从图 4 可以看到, 虽然不同位置带来的干扰效果仍存在些许差异, 但是窄带干扰无所谓最佳干扰位置, 而是拥有最佳干扰区域。对比图 2, 窄带干扰能在一定程度上抵消 GPS 卫星信号的随机性。在此情况下, 最佳干扰区域为 GPS 卫星信号中频附近 ($d: [-0.5, 0.5]$), 而在带宽两侧, 干扰能力降低, 干扰效果变差。接下来将详细仿真分析具体窄带信号的带宽及位置对干扰效果的影响。

4.1 不同带宽下窄带干扰仿真分析

将窄带干扰与 GPS 卫星信号的压制系数 K_s 设置为 20 dB, 干扰信号的频偏 d 为 0 (即窄带信号的中频和 GPS 信号的中频对齐), 带宽变化范围为 0.1~1.1 MHz, 在此条件下改变窄带信号带宽进行仿真, 结果见图 5。观察图 5 仿真结果, 窄带信号带宽过窄 (<0.3 MHz) 或过宽 (>1 MHz) 都达不到较好的干扰效果, 而带宽在 0.3~1 MHz 之间, 干扰效果较好。因此在实际窄带干扰工程实现时, 可在此区域选择窄带干扰的带宽。

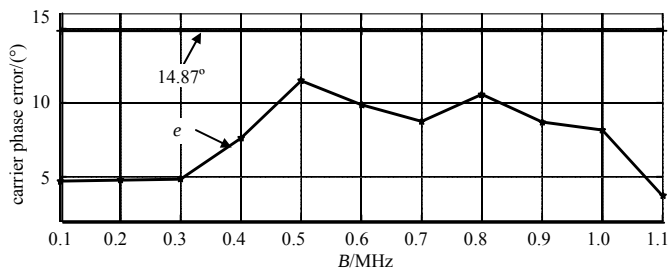


Fig.5 Carrier phase error under narrowband interference with different bandwidths

图 5 不同带宽的窄带干扰下载波相位误差

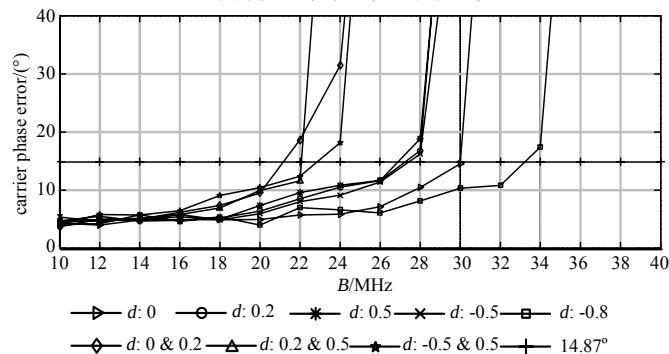


Fig.6 Carrier phase error under narrowband interference with different positions

图 6 不同中频位置窄带干扰下载波相位误差

4.2 不同中频位置下窄带干扰仿真分析

分析了窄带信号带宽给干扰带来的影响后, 将分析窄带信号的位置对干扰效果的影响。将 LMF 信号带宽定

为 0.2 MHz, 在 2 MHz 的带宽内改变干扰位置进行仿真, 结果见图 6, 并对其进行分析见表 3。分析表 3 中干扰数据, 虽然不同干扰位置会带来不同的干扰效果, 但是差异较小, 在实际仿真中可在最佳干扰区域内随机选择窄带信号的中频位置; 另一方面, 与单频干扰仿真分析结论相同, 通过用不同位置的小功率代替大功率单个频率信号, 能在一定程度上降低所需总功率, 进而在工程实现中, 降低实现成本。

5 结论

本文以 GPS 接收机的载波相位误差与抗干扰品质因数为基础, 分析了不同单频信号及 LFM 窄带信号带来的干扰效果, 并根据 GPS 卫星信号的随机性进行多个位置单频信号及不同带宽窄带信号的干扰仿真试验, 形象直观地给出了 GPS 接收机不同位置或不同带宽干扰时的干扰效果。通过仿真实验及分析, 得到结论如下: a) 可通过多个位置单频干扰或具有一定带宽窄带干扰的施加, 在一定程度上抵消 GPS 卫星信号的随机性; b) 通过采用多个干扰信号代替单个干扰信号的方法, 降低干扰工程实现成本。

模拟仿真过程以理论为依据, 而模拟仿真结果在一定程度上验证了理论正确性, 并为干扰的工程实现提供指导。虽然仿真过程具有一定的局限性, 但是仿真方法是正确的, 在今后的研究工作中, 可进一步进行仿真讨论, 使模拟结果更贴近实际。

参考文献:

- [1] SEONGKYUN J, CHEN S S. GNSS interference signal generation scenario for GNSS interference verification platform[C]// 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Busan, Korea: [s.n.], 2015: 13–16.
- [2] 刘江楠. 导航信号体制抗压制式干扰研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017. (LIU Jiangnan. Research on anti-compression interference of navigation signal system[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2017.)
- [3] 李春杨. GPS 接收机抗干扰关键技术研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2016. (LI Chunyang. Research on anti-jamming technologies for the GPS receiver[D]. Shijiazhuang, China: Hebei Normal University, 2016.)
- [4] SEONGKYUN J, TEAHEE K, JAEHOON K. Spoofing detection test of GPS signal interference mitigation equipment[C]// 2014 International Conference on ICT Convergence. Busan, Korea: [s.n.], 2014: 651–652.
- [5] 郭淑霞, 胡占涛, 高颖. 窄带干扰对导航信号等效载噪比影响分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(7): 10–14. (GUO Shuxia, HU Zhantao, GAO Ying. Impact and analysis of narrowband interference to navigation signal effective carrier-to-noise ratio[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(7): 10–14.)
- [6] 白海涛, 杨文, 高慧敏. 面向作战需求的战场电磁环境复杂度评估[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(3): 481–485. (BAI Haitao, YANG Wen, GAO Huimin. Complexity evaluation of battlefield electromagnetic environment for combat[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(3): 481–485.)
- [7] 汤俊杰, 薛磊, 林航, 等. 压制干扰对 GPS 接收机码跟踪环的性能影响分析[J]. 信息技术, 2011, 35(3): 68–71. (TANG Junjie, XUE Lei, LIN Hang, et al. Analysis of the performance of the code tracking loop of GPS receiver under blanket jamming[J]. Information Technology, 2011, 35(3): 68–71.)
- [8] 郭淑霞, 胡占涛. 窄带干扰下北斗卫星导航信号性能分析[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(2): 507–510. (GUO Shuxia, HU Zhantao. Study on evaluating impact of narrowband interference on Beidou navigation system's signals[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(2): 507–510.)
- [9] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009. (XIE Gang. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009.)
- [10] 李建, 聂俊伟, 陈华明, 等. 等效载噪比评估全球导航卫星系统接收机误码率的适应性分析[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(4): 92–98. (LI Jian, NIE Junwei, CHEN Huaming, et al. Limits analysis of effective carrier to noise ratio in evaluating bit error ratio of global navigation satellite system receiver[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(4): 92–98.)
- [11] 朱海, 史文森, 蔡鹏, 等. 压制式干扰环境中 GPS 信号的载噪比估计算法[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(3): 209–212. (ZHU Hai, SHI Wensen, CAI Peng, et al. The noise ratio estimation algorithm for GPS signals in the pressure-based jamming environment[J]. Journal of Missile and Guidance, 2014, 34(3): 209–212.)

表3 窄带干扰仿真图总结

d	number of jamming	JSR/dB	total JSR/dB
0	1	30	30
0.2	1	28	28
-0.8	1	33	33
0&0.2	2	21	24
0.2&0.5	2	22	25

- [12] 赵新曙,王前. 压制式干扰对 GNSS 接收机的影响及应对策略[J]. 全球定位系统, 2014,39(6):47-51. (ZHAO Xinshu, WANG Qian. The effect and solving strategy on GNSS receiver by suppressing interference[J]. GNSS World of China, 2014,39(6):47-51.)
- [13] 金明路. GPS 软件接收机基带处理及抗干扰研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2015. (JIN Minglu. Research on baseband signal processing and anti-jamming for software GPS receiver[D]. Harbin,China:Harbin Engineering University, 2015.)
- [14] 罗华. 单音及窄带干扰下 DSSS 系统处理增益精确分析[J]. 电讯技术, 2014,54(6):713-718. (LUO Hua. Accurate analysis of processing gain in direct sequence spread spectrum communication systems under single-tone and narrowband interference[J]. Telecommunication Engineering, 2014,54(6):713-718.)
- [15] 王党卫,刘宁,李斌. 压制干扰对导航接收机系统中自适应跟踪环路的影响[C]// 第四届中国卫星导航学术年会. 武汉: [s.n.], 2013. (WANG Dangwei,LIU Ning,LI Bin. The performance of self-adaptive tracking loop under oppressive interference[C]// Electronic Proceedings of the 4th China Satellite Navigation Academic Conference. Wuhan,China: 2013.)
- [16] 胡波,胡修林,余晓园. 不同频率位置的窄带干扰对 DSSS 通信性能的影响分析[J]. 信号处理, 2005,21(5):548-550. (HU Bo,HU Xiulin,YU Xiaoyuan. Performance analysis of DSSS system with narrowband interference at different frequencies[J]. Signal Processing, 2005,21(5):548-550.)

作者简介:



王晓君(1973-), 男, 河北省赤城县人, 博士, 教授, 主要研究方向为卫星导航接收机及其关键技术研究.email:miracle@hebust.edu.cn.

康 娇(1990-), 女, 石家庄市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星应用技术、卫星干扰技术.

王彦朋(1969-), 男, 石家庄市人, 教授, 主要研究方向为通信工程、电子信息技术.

(上接第 953 页)

- [5] LIU S,HU J,ZHANG Y,et al. 1 THz micromachined waveguide band-pass filter[J]. Journal of Infrared,Millimeter,and Terahertz Waves, 2015,37(5):435-447.
- [6] 王刚. 高维优化问题的多目标遗传算法研究及其应用[D]. 武汉:武汉理工大学, 2012. (WANG Gang. Research on multi-objective genetic algorithm for high dimensional optimization problems and its application[D]. Wuhan,China: Wuhan University of Technology, 2012.)
- [7] 修建鹏. 微波滤波器的计算机辅助诊断和调试方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007. (XIU Jianpeng. Research on computer aided diagnosis and debugging method of microwave filter[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2007.)
- [8] 邓贤进,李家胤,张健. 微波腔体滤波器的快速设计及仿真[J]. 微波学报, 2006(4):53-56. (DENG Xianjin,LI Jiayin,ZHANG Jian. Fast design and simulation for microwave cavity filter[J]. Journal of Microwaves, 2006(4):53-56.)
- [9] 甘本拔,吴万春. 现代微波滤波器的结构与[M]. 北京:科学出版社, 2017. (GAN Benbo,WU Wanchun. Structure and design of modern microwave filters[M]. Beijing:Science Press, 2017.)
- [10] 徐龙祥. 微波带通波导滤波器传输特性的研究与应用[J]. 制导与引信, 1998(4):7-12. (XU Longxiang. Research and application of transmission characteristics of microwave bandpass waveguide filter[J]. Guidance and Fuze, 1998(4):7-12.)

作者简介:



杜 浩(1993-), 男, 山西省阳泉市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统、固态太赫兹技术等.email:619442875@qq.com.

张 勇(1975-), 男, 四川省南充市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统、固态太赫兹技术等.