

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.03.012

弹载数据链抗干扰性能分析

吕卫华^{1,2} 徐大专¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016; 2. 中国空空导弹研究院, 洛阳, 471009)

摘要: 针对电磁环境与人为干扰共存环境下的弹载数据链系统性能评估问题, 构建了信号和干扰经历不同传播衰落信道条件下的数据链接收信号模型, 分析了不同干扰样式特性及功率谱, 并据此推导了 QPSK 数据链系统的误符号性能表达式。针对不同干扰样式的仿真结果表明, 当干信比较小且干扰因素占主导时, 梳状谱干扰样式的干扰效果较好(优于其他干扰样式约 1~3 dB), 噪声调幅干扰次之, 噪声调频和宽带扫频两种干扰样式差别不大。

关键词: 弹载数据链; 抗干扰; 信道衰落; 干信比

中图分类号: E956 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2015)03-0392-05

Analysis on Anti-Jamming Performance of Missile-Borne Data-Link

Lü Weihua^{1,2}, Xu Dazhuan¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. China Airborne Missile Academy, Luoyang, 471009, China)

Abstract: To solve the problem of performance evaluation for missile-borne data-link system with artificial jammer, a receiving signal model is constructed with data-link signal and jamming signal undergoing different fading channels. Then, the characteristic and power spectrums of different jamming patterns are analyzed and the symbol error ratio of data-link system with QPSK modulation is also derived. The simulation results of different jamming patterns show that the comb spectrum jamming is optimal (about 1—3 dB better than other jamming patterns) and noise amplitude modulation jamming is followed, while noise frequency modulation and broadband sweep make little difference when jamming-signal-ratio is small as well as jamming is dominated.

Key words: missile-borne data-link; anti-jamming; channel fading; jamming to signal ratio

在未来高科技条件下的局部战争中, 夺取制空权成为决定战争胜负的关键。空空导弹是夺取制空权和进行空中对抗的主要武器, 对于夺取未来战争胜利具有举足轻重的作用。弹载数据链可实现导弹的精确制导和超视距控制, 完成目标瞄准及多弹协同等作战任务, 目前受到了各国的高度重视, 已成为未来导弹向智能化、信息化和网络化的一项关键技术^[1-3]。

弹载数据链利用移动无线信道进行数据传输,

而空中作战平台和导弹飞行速度快, 机动能力强, 加上恶劣的战场电磁环境及人为干扰, 数据链信号在传播过程中会产生各种衰落及失真, 导致接收端正确恢复数据的难度大大增加^[4]。文献[5]给出了一种航空背景下弹载数据链信道传播模型, 该模型包含直射路径、反射路径和散射路径, 并指出 Nakagami 分布与信道衰落的实测数据较为吻合, 但该文未考虑人为干扰的情况; 文献[6]详细分析了不同频点的音频干扰对 QPSK 系统误码率的影响,

基金项目: 国家自然科学基金(61471192)资助项目。

收稿日期: 2015-02-01; **修订日期:** 2015-04-03

通信作者: 吕卫华, 男, 博士研究生, 高级工程师, E-mail: Lv_weihua@163.com。

文献[7]则以美军联合战术信息分发系统为背景,研究了数据链通信系统在不同信道环境和人为干扰方式下的误符号率,并利用 Simulink 仿真软件对该系统的抗干扰性能进行了仿真,然而它们均假设加性高斯白噪声信道,与实际多径衰落信道传播差别较大,而且也没有对不同干扰样式的性能进行比较。研究弹载数据链在无线传播和人为干扰环境下的综合抗干扰性能具有非常重要的军事意义和应用前景^[8-9],本文建立了一个综合干扰环境和多径衰落的空空导弹接收信号模型,仿真分析了不同干扰样式的功率谱及特征参数,并详细推导了 QPSK 数据链系统的误符号性能表达式。

1 系统模型

图 1 给出了典型的干扰环境下弹载数据链系统模型,本文假设接收端能够准确估计并补偿相位误差,重点分析干扰设备对机-弹下行链路的性能影响,令载机发射信号和功率分别记为 $s(t)$, P_s , 干扰信号及功率分别记为 $J(t)$, P_J , 空空导弹接收信号可表示为

$$r(t) = h_s(t) \cdot s(t) + h_j \cdot J(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $h_s(t)$, $h_j(t)$ 分别表示空空导弹与载机、干扰设备之间的信道衰减因子; $n(t)$ 表示等效信道噪声,通常假设为均值为 0, 方差为 σ_n^2 的高斯噪声。

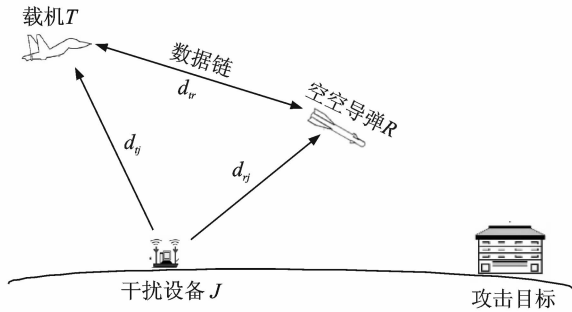


图 1 弹载数据链干扰系统模型

Fig. 1 Missile-borne data-link system model with artificial jammer

平均错误概率作为衡量无线通信系统性能最重要的指标,与接收端信噪比直接密切相关;当存在干扰信号时,干信比也将直接影响通信系统的性能。根据定义可知,接收端瞬时信噪比和干信比可分别表示为

$$r_{sn} = \frac{P_s \overline{h_s^2(t)}}{\sigma_n^2} \quad (2)$$

和

$$r_{js} = \frac{P_j \overline{h_j^2(t)}}{P_s \overline{h_s^2(t)}} \quad (3)$$

Nakagami 衰落模型包含了瑞利、莱斯等分布特例情况,近年来被广泛用于长距离、高频信道衰落建模。机-弹、干扰设备-导弹链路均存在较强的视距路径,实测数据也表明与 Nakagami 衰落模型更为吻合,对应幅度分布可表示为^[10-11]

$$f_{h_{s/j}}(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega} r^2} \quad r \geq 0 \quad (4)$$

式中: $\Gamma(m)$ 和 $\Omega = E[r^2]$ 分别表示 Gamma 函数和信道衰落功率; $m \geq 0$ 表示衰落参数用于描述信道衰落的恶劣程度。当 $m > 1$ 时,该分布退化为莱斯分布,二者参数满足如下关系

$$K = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}} \quad (5)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{\Omega}{2} (1 - \sqrt{1 - m^{-1}})$$

式中: K , σ_0^2 分别表示莱斯因子和方差。

2 常见干扰样式分析

2.1 瞄准式干扰

瞄准式干扰是一种压制敌方某个确定信道的干扰方式,其干扰信号频谱与通信信号频谱完全重合,载频与通信信号中心频率基本一致,且通常采用窄带噪声调频和噪声调幅两种干扰样式。

窄带噪声调频干扰可表示为

$$J(t) = J_0 \cos[\omega_0 t + K_{FM} \int_0^t u_n(\tau) d\tau] \quad (6)$$

式中: J_0 为干扰信号幅值;调制噪声 $u_n(\tau)$ 为均值 0, 方差 σ^2 的高斯噪声; ω_0 为载波角频率; K_{FM} 为调频灵敏度。根据调频指数定义可知

$$m_f = \frac{\Delta B}{B_u} = \frac{K_{FM} \cdot \max\{|u_n(t)|\}}{B_u} \quad (7)$$

式中: $\max\{\cdot\}$ 表示取最大值; B_u , ΔB 分别表示高斯噪声带宽和最大频偏。因此,窄带噪声调频干扰的信号带宽可表示为

$$B_j = 2(K_{FM} \cdot \max\{|u_n(t)|\}/2\pi + B_u) \quad (8)$$

噪声调幅干扰可表示为

$$J(t) = [\sqrt{J_0^2 - \sigma^2} + u_n(t)] \cos \omega_0 t \quad (9)$$

式中: J_0 为干扰信号载波幅值; ω_0 为载波角频率; $u_n(t)$ 表示均值 0, 方差 σ^2 的高斯调制噪声。该干扰信号的带宽可表示为

$$B_j = 2B_u \quad (10)$$

式中 B_u 表示调制噪声带宽。

图 2, 3 分别仿真给出了噪声调频和噪声调幅

干扰信号的复基带功率谱图,仿真参数如下:采样率 16 MHz,干扰信号(或载波)幅值为 1,干扰带宽为 2 MHz,噪声幅度最大值为 4。对噪声调频而言,假设调频指数为 1,调频灵敏度为 $2\pi/8$,由式(8)可得对应调制噪声带宽为 0.5 MHz;同样,由式(10)可知噪声调幅情况下的调制噪声带宽应为 1 MHz。

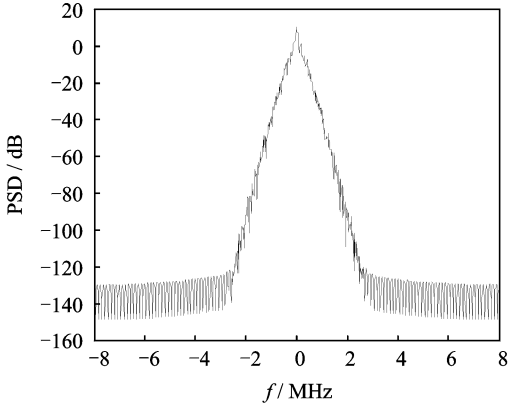


图2 噪声调频干扰信号复基带功率谱

Fig. 2 Complex baseband power spectrum of noise frequency modulation jamming

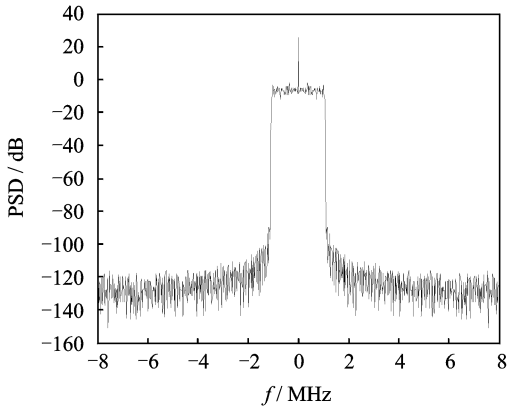


图3 噪声调幅干扰信号复基带功率谱

Fig. 3 Complex baseband power spectrum of noise amplitude modulation jamming

2.2 拦阻式干扰

拦阻式干扰不需要准确测定信号参数,也不用进行分析识别,只需大概了解敌方可能的工作频段即可,常用样式包括宽带噪声拦阻干扰、宽带扫频拦阻干扰、离散梳状谱拦阻干扰和噪声调频干扰等。其中,宽带扫频式拦阻干扰可表示为

$$J(t) = J_0 \cos[\omega_0 t + K_{FM} \int_0^t v(\tau) d\tau] \quad (11)$$

式中: J_0 为干扰信号幅值; ω_0 为载波角频率; K_{FM} 为调频灵敏度(也称调频互导); $v(t)$ 为锯齿波信号,可表示为

$$v(t) = J_0 [tu(t) - \sum_{n=1}^{\infty} u(t - nT_s)T_s] - J_0 T_s/2 \quad (12)$$

式中: $u(t)$ 表示台阶信号; T_s 为锯齿波周期。可以证明,扫频式干扰的信号带宽可表示为

$$B = K_{FM} J_0 T_s / 2\pi \quad (13)$$

离散梳状谱干扰是指对于超宽带信号,集中功率对频带内的几个频点进行强干扰^[12],其表达式为

$$J(t) = \frac{J_0}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \cos(\omega_0 t + \Delta\omega_n t + \varphi_n) \quad (14)$$

式中: J_0/\sqrt{N} 为干扰信号幅值; N 为干扰频点个数; φ_n 是 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机相位角; $\{\omega_0 + \Delta\omega_n\}, n=1, \dots, N$ 为梳状谱中干扰信号频点集合。干扰频点的选择会影响干扰信号正交支路的功率分配。本文针对 QPSK 干扰系统,故选择随机取值,以保证干扰正交支路的功率平衡。

图4,5分别仿真给出宽带扫频和离散梳状谱

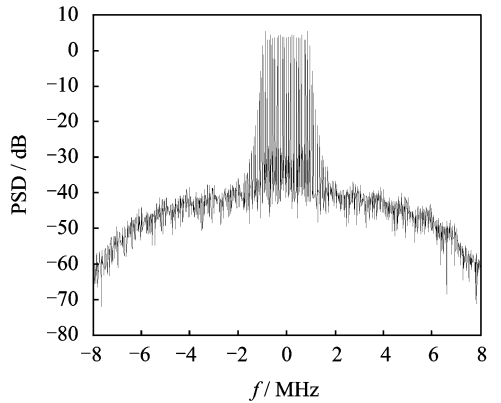


图4 宽带扫频干扰复基带功率谱

Fig. 4 Complex baseband power spectrum of broadband sweep jamming

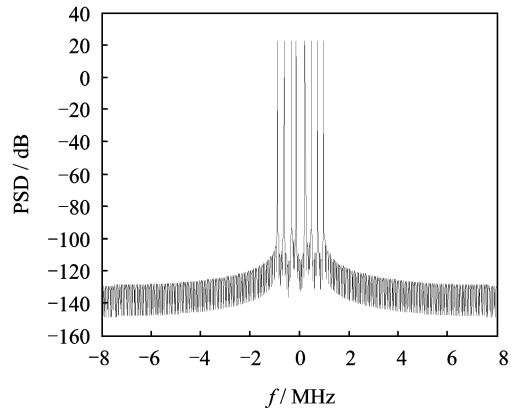


图5 梳状谱干扰复基带功率谱

Fig. 5 Complex baseband power spectrum of comb spectrum jamming

干扰的复基带功率谱图,仿真参数如下:采样率 16 MHz,干扰信号幅度 1,干扰带宽为 2 MHz。对宽带扫频干扰而言,假设调频互导 0.2,根据式(13)可知锯齿波周期等于 100 μ s;仿真中离散梳状谱干扰的干扰频点个数取为 8,分别对应 $f_0 - 0.5\Delta f, f_0 - 1.25\Delta f, f_0 - 2.5\Delta f, f_0 - 3.5\Delta f, f_0 + \Delta f, f_0 + 2\Delta f, f_0 + 3\Delta f, f_0 + 4\Delta f$,其中 Δf 为 0.25 MHz。由图 5 可以看出,由于梳状谱干扰的功率集中于若干频点,使得对应频点位置干扰功率大大增强。

3 抗干扰性能仿真分析

目前弹载数据链系统通常采用 QPSK 调制方式,接收端信号正交解调后分为 I, Q 两路。不失一般性,以下仅需考虑 I 支路情况,假设发射端 I 支路有用信号为 $s_1(t) = A_I \cos\omega_0 t$,则解调器输出判决信号为

$$y_I = h_s A_I + h_j J_I + n_I \quad (15)$$

式中: A_I 为 I 支路有用信号幅值; J_I 为干扰信号的 I 支路幅值; n_I 为服从均值为 0,方差为 σ_n^2 的高斯白噪声。某一瞬时接收判决信号 y_I 可看成服从均值为 $h_s A_I + h_j J_I$,方差为 σ_n^2 的高斯分布。此时,误判概率即 $y_I < 0$ 的概率为

$$\begin{aligned} P(0 | s_1) &= P(y_I < 0) = \int_{-\infty}^0 p(r | s_1) dr = \\ &= \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(\frac{(r - (h_s A_I + h_j J_I))^2}{2\sigma_n^2}\right) dr = \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{h_s A_I + h_j J_I}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{r_{sn}}/2 + \sqrt{r_{jn}}/2\right) = \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{r_{sn}}/2 (1 + \sqrt{r_{js}})\right) = \\ &= Q(\sqrt{r_{sn}} (1 + \sqrt{r_{js}})) \end{aligned} \quad (16)$$

同理,可得发送信号为 $s(t) = s_0(t) = -A_I \cos\omega_0 t$ 时的误判概率为

$$\begin{aligned} P(1 | s_0) &= P(y_I > 0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{r_{sn}}/2 (1 - \sqrt{r_{js}})\right) = \\ &= Q(\sqrt{r_{sn}} (1 - \sqrt{r_{js}})) \end{aligned} \quad (17)$$

因此, I 支路平均差错率可表示为

$$P_b = \frac{1}{2} \left\{ \int_{r_{sn}} \int_{r_{js}} [Q(\sqrt{r_{sn}} (1 + \sqrt{r_{js}})) + Q(\sqrt{r_{sn}} (1 - \sqrt{r_{js}}))] \cdot f(r_{sn}) \cdot f(r_{js}) dr_{js} dr_{sn} \right\} \quad (18)$$

式中: $f(r_{sn})$ 表示瞬时信噪比的概率分布; $f(r_{js})$ 表示瞬时干信比的概率分布。本文假设干扰信号的正交支路功率相等,因此 QPSK 系统 I 和 Q 支路的平均差错率也相等,利用式(19)即可获得 QPSK 系统的误符号率

$$P_e = 1 - (1 - P_b)^2 \quad (19)$$

对于 MPSK 数据链系统的误符号率分析非常复杂,还需要推导接收信号相位 θ 的统计分布 $f(\theta)$,利用式(20)获得系统误符号率

$$P_e = 1 - \int_{-\pi/M}^{\pi/M} f(\theta) d\theta \quad (20)$$

图 6,7 仿真给出了不同干扰样式对 QPSK 数据链系统的干扰影响。其中,图 6 对应发射信号和干扰信号传播链路一致情况($m_s = m_j = 1.5$),而图 7 假设两条传播链路信道衰落不同($m_s = 5, m_j = 1.5$),由于发射信号的信道衰落小于干扰信号链路,故系统性能明显优于图 6。仿真结果还表明:(1)干扰功率和带宽一致的情况下,当干信比较大时,系统性能非常差,不同干扰样式干扰效果差异不大;(2)当干信比较小,且干扰因素占主导时,梳状谱干扰样式的干扰效果较好,噪声调幅干扰次

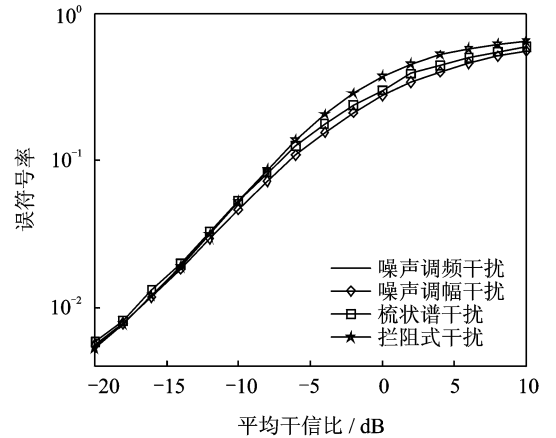


图 6 相同衰落信道下系统抗干扰性能
Fig. 6 Anti-jamming performance under same fading channel

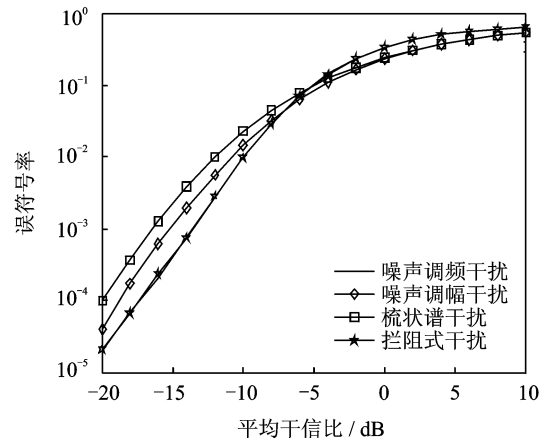


图 7 不同衰落信道下系统抗干扰性能
Fig. 7 Anti-jamming performance under different fading channels

之,噪声调频和拦阻式两种干扰样式差别不大;(3)当信号和噪声经历信道状况相同时($m_s = m_j = 1.5$),噪声调频、噪声调频、拦阻式和梳状谱4种干扰样式差别不大,当信号和噪声经历信道状况不同时($m_1 = 5, m_2 = 1.5$),且干信比较小的情况下,梳状谱干扰效果最好(优于其他干扰1~3 dB)。

4 结束语

本文通过对弹载数据链干扰系统模型的分析,推导了QPSK数据链系统在信道衰落及人为干扰共存情况下的误符号率表达式。针对不同干扰样式的仿真结果表明,当干信比较小,且干扰因素占主导时,梳状谱干扰样式的干扰效果较好(优于其他干扰样式约1~3 dB),噪声调幅干扰次之,噪声调频和宽带扫频两种干扰样式差别不大。

参考文献:

- [1] 王文政,周经伦,罗鹏程,等. 战术数据链仿真研究综述[J]. 系统仿真学报,2008,20(14):3623-3627.
Wang Wenzheng, Zhou Jinglun, Luo Pengcheng, et al. Survey of tactical data link simulation[J]. Journal of System Simulation, 2008,20(14):3623-3627.
- [2] 刘俊成,张京娟,谭丽芬. 新的导弹协同定位技术[J]. 北京航空航天大学学报,2012,38(9):1149-1153.
Liu Juncheng, Zhang Jingjuan, Tan Lifan. New technique for multi-missile cooperative localization [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012,38(9):1149-1153.
- [3] Hu Z, Wei R, Luo J, et al. Research on kill efficiency of double BVR air-to-air missile fusillade in a complex electromagnetic environment[C]//International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Hangzhou: IEEE Press, 2013:212-215.
- [4] Zheng Yi, Wang Yuwen, Meng Fanji. Modeling and simulation of path loss and fading for air-ground link of HAPs within a network simulator[C]//International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. Beijing: IEEE Computer Society Press, 2013:421-426.
- [5] 杜向辉,于晓辉,郑立会. 弹载数据链信道模型仿真研究[J]. 航空兵器,2013(6):27-29.
Du Xianghui, Yu Xiaohui, Zheng Lihui. The study of airborne missile data link channel model[J]. Aero Weaponry, 2013(6):27-29.
- [6] Taggart D, Kumar R, Wagner N. Tone interference effects on the performance of QPSK modulation in communication[C]//2010 IEEE Aerospace Conference. Bigsky, MT: IEEE Press, 2010:1-11.
- [7] 杨光,周经伦,罗鹏程,等. 数据链抗干扰性能分析[J]. 计算机科学,2009,36(6):108-111.
Yang Guang, Zhou Jinglun, Luo Pengcheng, et al. Performance analysis of anti-jamming in JTIDS[J]. Computer Science, 2009,36(6):108-111.
- [8] 姚玉山,查国云,黄宝安. 针对某型战术导弹数据链技术的对抗思路实践[J]. 四川兵工学报,2013,34(11):5-7.
Yao Yushan, Zha Guoyun, Huang Baoan. A practical study of the data link confrontation thinking aiming at a certain military tactics missile[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013,34(11):5-7.
- [9] 杨保平,陈永光,李钟敏,等. 战术数据链相位干扰技术[J]. 电波科学学报,2011,26(5):869-874.
Yang Baoping, Chen Yongguang, Li Zhongmin, et al. Technology of phase-oriented jamming of TDLs [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011,26(5):869-874.
- [10] Nakagami M. The m-distribution: A general formula of intensity distribution of rapid fading statistical methods of radio wave propagation[M]. Japan: W C Hoffman, 1960.
- [11] 朱秋明,吕卫华,黄嘉乐,等. 基于 Nakagami 衰落的分集合并系统性能分析[J]. 南京航空航天大学学报,2013,45(3):424-428.
Zhu Qiuming, Lü Weihua, Huang Jiale, et al. Performance analysis of diversity system over Nakagami fading channels[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013,45(3):424-428.
- [12] 张国利,毕大平,杨谢. 信道化接收机的梳状干扰效果分析[J]. 电子信息对抗技术,2013,28(4):47-50.
Zhang Guoli, Bi Daping, Yang Xie. Jamming effect analysis of the channelized receiver with comb spectrum signal[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2013,28(4):47-50.