0254-6124/2013/33(5)-540–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Pan Dianfei, Cheng Naiping, Hao Jianhua. Analysis and test of anti-jamming performance for DS/FH TT&C system. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(5): 540-547

DS/FH 测控系统抗干扰性能分析与测试

潘点飞 程乃平 郝建华

(装备学院 北京 101416)

摘 要 为全面、有效衡量用于应急测控的直扩/跳扩 (DS/FH) 系统的综合抗干扰性能, 采用最低性能指标约束法, 对系统抗干扰性能进行综合分析. 以音调干扰、脉冲干扰以及高动态环境为例, 探讨了不同干扰条件对系统最低性能指标的影响. 为解决最低性能指标约束下系统抗干扰性能测试步骤繁多、效率低、代价高的不足, 采用蚁群算法, 将指标测试次序建模为最佳路径选择问题. 通过实例仿真验证了测试模型的正确性与有效性. 该方法对 DS/FH 测试方案的选择具有指导意义.

关键词 直扩/跳扩 (DS/FH), 最低性能指标约束, 蚁群算法, 干扰, 测试

中图分类号 TN 911

Analysis and Test of Anti-Jamming Performance for DS/FH TT&C System

PAN Dianfei CHENG Naiping HAO Jianhua

(*Academy of Equipment, Beijing* 101416)

Abstract Based on the Minimum Performance Constraint (MPC), a synthetic analysis method was presented for the DS/FH TT&C system under jamming conditions. This method can evaluate the anti-jamming performance more effectively and comprehensively. Taking three classical interference environments as example, *i.e.* tone jamming, pulse interference and highly dynamic condition, the effects of different jammings on MPC with varying parameters are investigated. To overcome the deficiencies such as too many steps, poor efficiency and high cost in the anti-jamming capability test, the testing order of the attributes is modeled as an optimal route problem using Ant Colony Optimization (ACO) algorithm. Simulation results show that the proposed analytical model is correct and effective. The conclusions are evaluated to be significant and referable for the choice of DS/FH TT&C system jamming test schemes.

Key words Direct Sequence/Frequency Hopping (DS/FH), Minimum Performance Constraint (MPC), Ant Colony Optimization (ACO) algorithm, Jamming, Test

---

2012-11-15 收到原稿, 2013-04-01 收到修定稿

E-mail: pandianfei_1984@163.com

0 引言

测控系统是航天技术的重要组成部分之一, 经过几十年的发展已淘汰最初的分离测控体制, 由统一载波测控体制向统一扩频测控体制过渡 [1−2]. 虽然统一扩频测控体制克服了统一载波测控体制中难以实现多目标同时测控、设备复杂、抗干扰能力差等缺点, 但是, 随着干扰技术的发展, 测控系统面临着越来越严重的挑战, 特别是当测控设备处于纷繁复杂的电磁环境中时, 面对各种强干扰, 现行测控体制难以满足应急条件下的抗干扰性能要求. 由于 DS/FH 测控体制兼有 DS 扩频系统的隐蔽性和 FH 系统对干扰的躲避性, 因此, 将 DS/FH 混合扩频测控体制应用到特殊环境下的应急测控来提高抗干扰能力成为一种趋势.

目前, 对于系统抗干扰性能的分析往往只是独立地关注某一个或者几个性能指标 [3−6], 而保证测控系统能够正常工作的基本条件是需要同时满足系统的最低性能指标, 例如捕获概率、捕获时间、误码率以及测距测速精度等. 作为一个复杂系统, 其各项技术指标是相互关联甚至相互矛盾的, 设备研制过程中的电路设计与参数配置需要折中考虑, 将某项指标分离出来进行单独测试来考核系统能力的传统方法不够科学. 例如, 对误码率指标的测试只有在系统捕获概率满足要求的前提下才有意义, 即使设备的误码率非常低, 但如果捕获的虚警或漏警概率很高, 这样的误码率指标也没有意义. 因此, 本文在对 DS/FH 测控系统抗干扰性能进行分析时采用了最低性能约束的分析方法. 针对如何选择合理测试方案才能使系统的抗干扰性能测试代价最低问题, 运用蚁群算法原理, 将测试方案建模为最优路径选择问题, 为 DS/FH 测控系统抗干扰性能的检测次序提供科学依据.

1 干扰与动态下 DS/FH 测控系统性能分析

最低性能指标约束是一种极限能力与综合能力相结合的测试方法, 即在系统的最低性能指标 (捕获概率、捕获时间、测距测速精度与遥测/遥控误码率等) 全部满足要求的前提下, 考察系统的抗干扰极限指标. 为便于定量说明 DS/FH 测控系统的抗干扰性能, 借鉴通信接收机系统的抗干扰性能评估方法 [7], 结合跳扩频应急测控系统抗干扰指标测试需求的实际, 引入抗干扰灵敏度、干扰抑制度和抗干扰裕量三个极限指标.

抗干扰灵敏度 S—对于一定的干扰环境 (干扰信号的个数、类型、强度固定), 在保证接收机满足各项性能指标 (误码率、检测概率、捕获时间、测速精度等) 的前提下调整接收机输入端的信号强度, 在最低性能设计指标约束下接收机输入端信噪比的最小值.

干扰抑制度 A_J—对于一定的信号环境 (接收机输入端信噪比或信号强度固定), 在保证接收机满足各项性能指标的前提下调整接收机输入端的干扰强度, 在最低性能指标约束下接收机输入端干噪比的最小值.

抗干扰裕量 A_{JM}—在干扰环境下, 接收机实际输入端信噪比与该干扰条件下抗干扰灵敏度之比, 如果用 dB 表示则为二者之差.

干扰信号是一个宽泛的概念, 通常是对有用信号有害的各种信号的统称. 测控系统中的干扰是由多种干扰混合而成的, 不同的干扰对通信带来的影响并不相同, 同一干扰信号的频率特性、时间特性也可能不同, 依据干扰的频谱宽度与扩频信号的频谱宽度相对大小, DS/FH 测控系统中的干扰可分为窄带干扰和宽带干扰. 这里认为窄带干扰的带宽小于信号带宽的 1/10, 包括音频干扰、带限噪声 (白噪声通过一个窄带数字滤波器) 以及其他可能的窄带数字干扰, 例如窄带 BPSK, LFM 等; 宽带干扰则是指那些所占带宽与扩频信号可以比拟的干扰信号, 包括脉冲干扰、线性调频干扰、宽带高斯白噪声以及其他扩频信号. 下面分别对几种典型干扰以及高动态环境下的系统性能进行分析.

1.1 音调干扰

音调干扰通常分为单音干扰和多音干扰, 单音干扰又称点频干扰, 通常为连续波干扰, 多音干扰可建模为多个单音干扰信号之和. 音调干扰可用下式表示:

$$J(k)=\sum_{i=1}^{m}A_i\exp[j(2\pi f_i k+\theta_i)]. \tag{1}$$

其中, A_i 为各单音干扰幅度; f_i 为各单音干扰相对于扩频信号载波的频偏; θ_i 为各单音干扰相位, 在 $[0,2\pi)$ 内均匀分布, 相互独立. 当 $i=1$ 时为单音干扰, $i>1$ 时为多音干扰.

在对测控系统抗干扰指标进行测试时需要综合考察以下几个指标: 误码率、检测概率、捕获时间、测距精度等. 随着系统环境的变化, 当其中一个指标不能满足要求时, 则认为此时的环境干扰强度就是系统所能承受的极限能力. 为了便于后续仿真分析, 这里选取其中最具代表性的三个指标作为最低性能约束条件, 即检测概率、平均捕获时间和误码率.

DS/FH 测控系统工作在强干扰、高动态环境下时, 为实现测距测速, 需要在高动态环境下精确提取收发信号的相对时延和多普勒信息. 因此, 保证混合测控系统可靠工作的前提是实现跳频图案、直扩伪码相位和载波多普勒的快速准确三维同步. 检测概率 P_{d} 为跳频图案伪码相位、直扩伪码相位都对齐且相关值均大于判决门限的概率, 虚警概率 P_{fe} 为其中存在伪码相位未对齐但相关值大于门限的概率; 捕获时间 T_{d} 由直扩捕获时间和跳频捕获时间两部分组成, 根据文献 [8] 的结论, DS/FH 测控信号的平均捕获时间可由式 (2) 表示; 误码率 P_{e} 指系统接收的错误码元总数在传送的总码元数中所占比例.

$$\bar{T} \approx \frac{(2-P_{\mathrm{d}})(KP_{\mathrm{fa}}+1)MQ\tau_{\mathrm{D}}}{2P_{\mathrm{d}}} + \frac{(N-1)T'_{\mathrm{h}}}{2}. \quad (2)$$

式中, N, M, Q 分别为跳频点数、多普勒及码相位的搜索单元, K 为虚警惩罚因子, τ_{D} 为驻留时间. 本地跳频间隙 T'_{h} 内可完成 g 次直扩状态转移, 表示为

$$T'_{\mathrm{h}} = \tau_{\mathrm{D}} d[H_0^g(z)]/dz|_{z=1} = g(KP_{\mathrm{fa}}+1)\tau_{\mathrm{D}}. \quad (3)$$

根据 DS/FH 测控的基本原理和抗干扰要求, 建立系统抗干扰分析仿真模型. 仿真中的基本参数设置如下. 伪码速率 $10\,\mathrm{Mchip\cdot s^{-1}}$, 跳速 $10\,000\,\mathrm{s^{-1}}$, 跳频间隔为 $40\,\mathrm{kHz}$, 工作频段 2.0~2.08 GHz, 信息速率取 $100\,\mathrm{kb\cdot s^{-1}}$. 参照以上基本参数设置, 为便于分析, 将干扰抑制度作为极限条件, 即

$$A_{\mathrm{J}} = \min\{A_{\mathrm{J},P_{\mathrm{d}}}, A_{\mathrm{J},T_{\mathrm{d}}}, A_{\mathrm{J},P_{\mathrm{e}}}\},$$

约束条件:

$$\{P_{\mathrm{d}} \geqslant 90\%,\ T_{\mathrm{d}} \leqslant 5\,\mathrm{s},\ P_{\mathrm{e}} \leqslant 10^{-2}\}. \quad (4)$$

式中, $A_{\mathrm{J},P_{\mathrm{d}}}$, $A_{\mathrm{J},T_{\mathrm{d}}}$, $A_{\mathrm{J},P_{\mathrm{e}}}$ 分别为检测概率、捕获时间和误码率约束下的系统干扰抑制度. 在上述约束条件下, 分析音调干扰频率和数量对 DS/FH 测控系统综合性能的影响.

由仿真结果 (见图 1) 可以看出, 当干扰音频位于跳频频率范围的最低和最高频率点时, 系统的干扰抑制度变化不大, 对同一测控系统来说抗干扰裕量也将基本不变; 在中心频率附近的单音干扰会对系统的干扰抑制度造成较大影响, 这是因为仿真时跳频点数取得较少, 当跳频频率在中心频率处分布的概率密度最大时, 干扰信号所能干扰到的信道数最多.

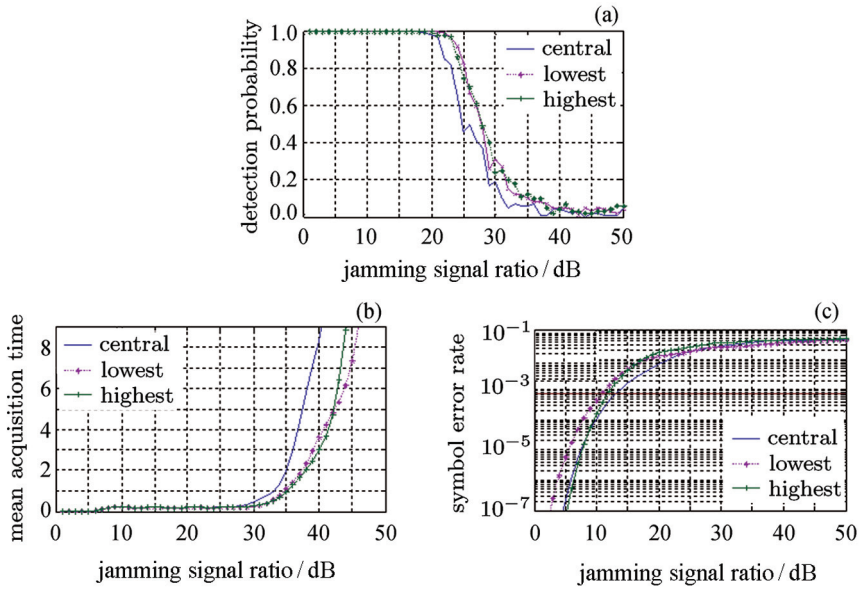


图 1 不同频率的单音干扰对系统综合性能的影响

Fig. 1 Effects of tone jamming on system comprehensive performance at different tone frequencies

图 2 给出了干扰音调数 N 分别为 1, 3 和 10 时捕获概率、捕获时间及捕获误码率与干信比 (Jamming Signal Ratio, JSR) 的关系. 对于相同 JSR, 随着干扰音调数目的增加, 虽然受其影响的信道数增加了, 但每个干扰音频的功率相对变小, 干扰效果将会有所下降.

1.2 脉冲干扰

脉冲干扰又叫部分时间干扰, 是指将干扰在一个脉冲周期的某一段时间里集中发射的干扰样式. 脉冲干扰为瞬间干扰, 具有功率大、持续时间短、频谱宽等特点. 统计数据证明短脉冲具有很宽的频谱成分, 因此, 当其出现时, 很像宽带噪声 [9]. 脉冲干扰可以表示为

$$j(t)=\begin{cases}1, & nT\leqslant t\leqslant(\gamma+n)T \quad (n=1,2,3,\cdots,);\\ 0, & \text{others.}\end{cases} \tag{5}$$

其中, T 为脉冲周期; γ 为脉冲的占空比, 是脉冲干扰机开通的时间占总时间的比率. 这里主要考察脉冲周期和占空比对系统抗干扰最低性能指标约束的影响. 将脉冲干扰调制载波, 使其功率谱的主瓣位于 2.0~2.08 GHz 的 DS/FH 测控系统工作频段里, 其数学模型如下:

$$J(t)=j(t)\exp(j2\pi f_0 t). \tag{6}$$

其中, $j(t)$ 为式 (5) 形式的脉冲信号, f_0 为载波频率, 取 DS/FH 测控系统的中心频率. 根据脉冲干扰的特点, 占空比和脉冲周期决定了载波频率展宽的宽度. 以 1 ms 仿真时间为例, 分别研究相同脉冲周期、不同占空比和相同占空比、不同脉冲周期下, 脉冲干扰对系统最低性能指标的干扰效果.

取脉冲周期 $T=10^{-3}$, 占空比分别为 $\gamma=10^{-4}$, $\gamma=10^{-3}$, $\gamma=10^{-1}$ 时得到的仿真结果如图 3 所示. 可见, 只要保证进入信号频段内的干扰强度为预定值, 占空比的变化对最低性能指标的影响并不大.

取脉冲信号占空比为 $\gamma=10^{-3}$, 周期分别为 $T=10^{-1}$, $T=10^{-3}$, $T=10^{-4}$ 时得到的仿真结果如图 4 所示. 当 $\gamma=10^{-3}$ 时, $T=10^{-1}$ 和 $T=10^{-3}$ 时, 在仿真时间内只有一个脉冲干扰信号, 脉冲周期的减小使其对系统性能的影响有所减弱; 当 $\gamma=10^{-3}$, $T=10^{-4}$ 时, 在 1 ms 的仿真时间内有 10 个脉冲干扰, 相当于对应急测控频带内的梳状干扰, 干扰效果更加明显一些.

1.3 动态环境对系统最低性能指标的影响

对于空间目标, 由于目标的高速运动使链路间存在较大相对速度及加速度等. 高动态条件下, 空间目标和测控设备之间的多普勒频移以及多普勒频率变化率将给测控信号的同步带来困难. DS/FH 测控体制的同步方案需要实现跳频图案、直扩伪码相位和多普勒频偏的三维同步, 多普勒频率一维发生变化, 将直接影响系统的捕获概率和捕获时间, 多普勒通

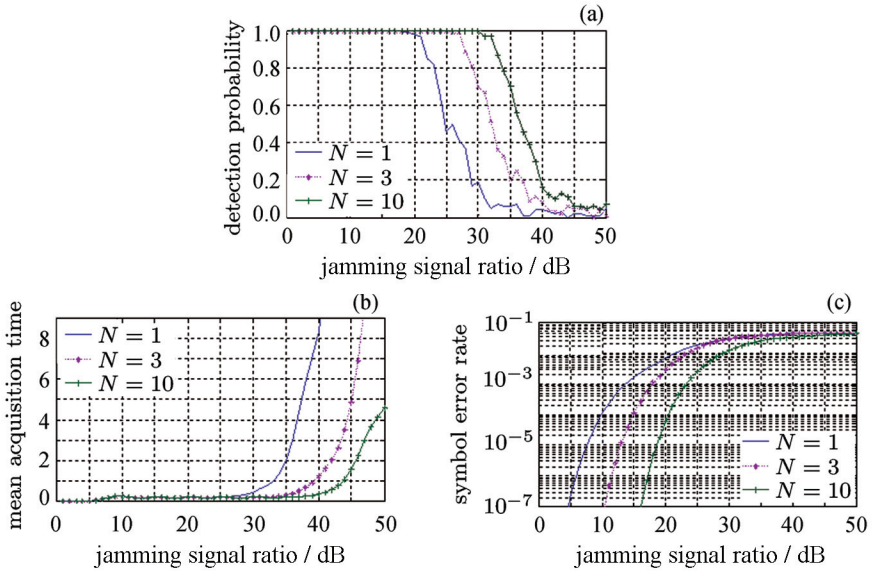


图 2 不同音调数对系统综合性能的影响

Fig. 2 Effects of tone jamming on system comprehensive performance with different tone numbers

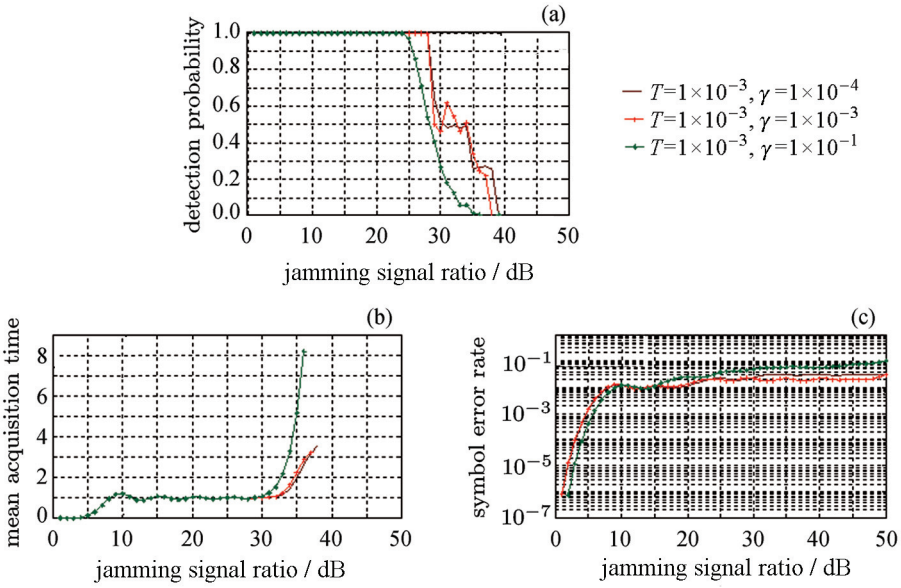


图 3 相同周期不同占空比下脉冲干扰对系统综合性能的影响

Fig. 3 Effects of pulse interference on system comprehensive performance with the same T but different γ

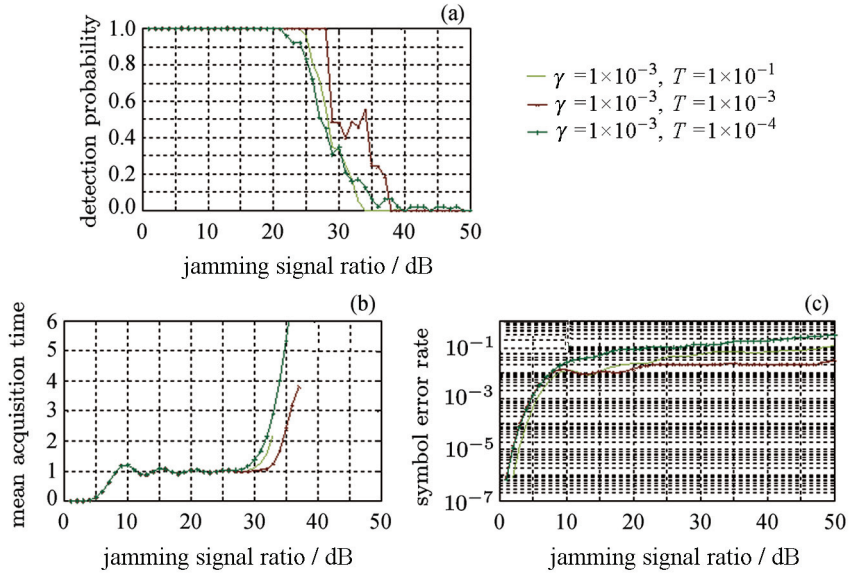


图 4 相同占空比不同周期下脉冲干扰对系统综合性能的影响

Fig. 4 Effects of pulse interference on system comprehensive performance with the same γ but different T

过对伪码相关峰的改变来影响捕获概率和捕获时间. 对于传统的滑动相关法, 在不考虑噪声情况下, 相关器的输出为

$$G=\int_0^{MT_c} d(t)c(t)c(t-\tau)\mathrm{e}^{j(2\pi f_d+\varphi)}\mathrm{d}t. \qquad (7)$$

其中, M 为相关累加长度, 一般取一个伪码周期 T_c 为码片宽度; $d(t)$ 为信源, $c(t)$ 为扩频信号, f_d 为多普勒频偏. 假设伪码完全对齐, 初始相位为零, 则相关器的输出为

$$G=\int_0^{MT_c} \mathrm{e}^{j2\pi f_d}\mathrm{d}t=\frac{1}{M}\left|\frac{\sin(\pi f_\mathrm{d}MT_c)}{\sin(\pi f_\mathrm{d}T_c)}\right|. \qquad (8)$$

在多普勒频偏为 0 Hz, 0.5 kHz, 1.5 kHz 时, 单音

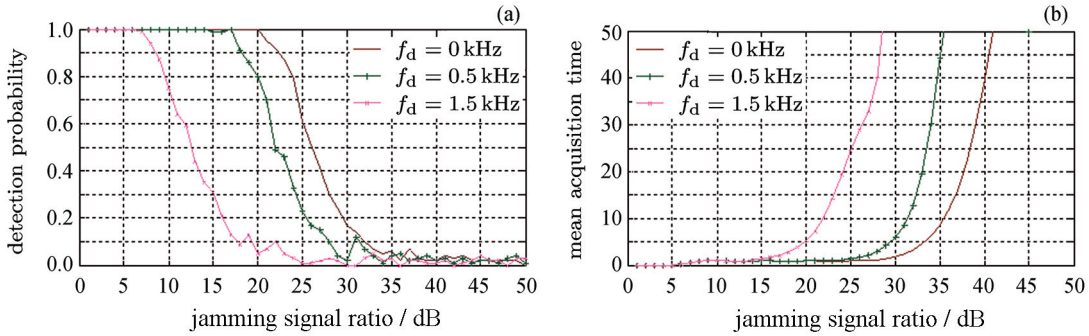


图 5 多普勒频偏对系统捕获性能的影响. (a) 检测概率, (b) 捕获时间

Fig. 5 Effects of f_d on acquisition performance. (a) P_d versus JSR with different f_d, (b) T_d versus JSR with different f_d

干扰对系统捕获性能的影响如图 5 所示. 多普勒频偏的增大使得伪码相关值恶化, 导致检测概率和捕获时间的减小, 这与式 (8) 的理论分析相吻合.

2 基于蚁群算法的 DS/FH 测控系统抗干扰性能测试

由以上对 DS/FH 测控系统抗干扰性能的分析可以看出, 不同干扰形式和相同干扰下不同参数对系统最低性能指标的影响不尽相同. 因此, 在对系统进行测试时, 每改变一次干扰信号参数, 则需要对多项性能指标进行一次测试, 得出相应的极限指标. 不同干扰环境下的约束指标测试组合成数目繁多的抗干扰能力测试, 每种测试又需要在不同 JSR 下进行, 总的测试代价将相当庞大. 因此, 寻找一种科学的测试方案, 使得在较低的测试代价下得出每种干扰形式下的系统抗干扰性能显得尤为重要.

将 DS/FH 测控系统抗干扰性能测试方案抽象为寻找最优路径的问题, 即通过尽可能少的测试步骤找出最低性能约束下的系统抗干扰性能. 蚁群算法是一个寻找最短路径的模型, 其基本思想是: 蚂蚁在寻找食物过程中会在所经路径上分泌一种特殊物质信息素, 信息素的强度与路径长度及时间有关, 蚂蚁感知信息素的强度并根据信息素选择最佳路径 [10]. 因此, 这里以蚁群算法基本原理为依据, 将最优测试方案的选择建模为最佳路径的选择问题.

2.1 模型建立

在 DS/FH 测控系统的抗干扰性能测试中, 需要测试的最低性能指标是多个单项指标的集合, $L = \{l_1, l_2, \cdots, l_n\}$ 为 n 个待测单项指标, 相当于 n 条路径; 指标约束集所对应的极限抗干扰能力最小值即为整个系统在最低性能约束下的抗干扰极限能力. 因此, 如何在众多指标集中找出决定整个测试系统性能的那项指标, 可用寻找最佳路径的数学模型来描述.

在测试中, 随着 JSR 的不断增加, 找出最低性能指标约束集中最先超出约束值的指标, 其对应的 JSR 即为系统的干扰抑制度. 测试路径的网络结构如图 6 所示.

设 t 时刻第 i 条路径上的信息素浓度为 $s(t,i)$, 根据蚁群算法原理, t 时刻第 j 个测试人员选择路径 l_i 的概率为

$$p^j(t,i) = \frac{s(t,i)^\alpha \eta(i)^\beta}{\sum_{i=1}^{n}[s(t,i)^\alpha \eta(i)^\beta]}\omega_x. \tag{9}$$

式中, $\eta(i)$ 为启发式因子, 可取第 i 条路径检测的容易度, 即该路径上节点数目 d_i 的倒数; α, β 为常系数, 用来调整信息素浓度和启发式因子在路径选择中所起作用的重要程度; ω_x 为优先级参数 $(0 < \omega_x < 1)$, 当路径上的信息量过大时, ω_x 取较小值, 避免算法陷入局部最优.

测试开始时, 各条路径的信息素浓度相等, 设为 $s_i(0) = c$ (这里 c 为很小的常数), 此时, 路径的选择是随机的. 随着测试时间的推进, 检测越容易的路径信息素浓度积累越高, 被选中的概率也就越大. 第 i 条路径信息素浓度更新为

$$s_i(t+i) = \rho s_i(t) + \Delta s_i. \tag{10}$$

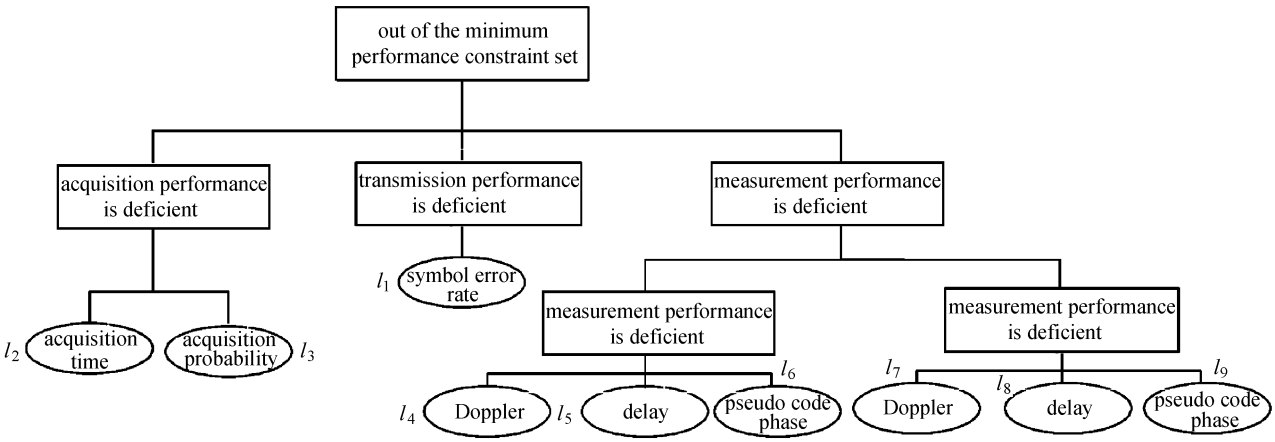


图 6 DS/FH 测控系统测试路径结构

Fig. 6 Frame diagram of test route for DS/FH TT&C system

式中, ρ 为信息素挥发因子; $\Delta s_i = kQ(i)$ 为所有经历路径 i 的测试在该路径上的信息素增量, 这里, $Q(i) = Q\mu_i$, 与路径的重要度有关, Q 为常数, μ_i 为第 i 条路径的重要度, k 为 t 时间内经过路径 l_i 的所有测试数目.

一定规模的蚁群经过一段时间的运动, 最终总能够找到一条最优的路径回巢. 因此, 通过测试人员长时间的测试经验积累, 在各条路径上留下的信息素浓度 (经验值) 大小决定了系统性能测试时的最佳路径. 信息素浓度越大的路径检测时优先级越高, 从而可实现 DS/FH 测控系统抗干扰性能测试时最低性能指标约束集的测试次序选择.

2.2 测试实例仿真

针对 DS/FH 测控系统抗干扰性能最优测试次序选择问题, 以图 6 中网络结构为例, 采用蚁群算法进行仿真分析. 共有 9 条测试路径, 其检测的容易度由该路径上的节点数确定, 而重要度可由专家经验给出, 其取值列于表 1.

假设测试人员共有 $m = 50$ 人, 循环次数 $t = 25$, 其他参数的选取为 $\alpha = 0.4$, $\beta = 1.5$, $\rho = 0.7$, 运用蚁群算法进行仿真计算, 得到不同时刻各路径信息素浓度的变化关系如图 7 所示, 最终根据各路径的信息素浓度大小选择最优测试次序为

$$l_3 \to l_2 \to l_5 \to l_4 \to l_6 \to l_1 \to l_8 \to l_7 \to l_9.$$

该结果与测控系统抗干扰测试次序的经验积累次序基本吻合, 表明了运用蚁群算法解决最佳测试方案问题的有效性.

3 结论

对特殊环境需求下 DS/FH 测控系统的性能与测试方法进行了研究. 为客观、全面考察应急测控系统在不同环境下的性能, 从系统的整体性能指标出发, 建立了保证系统正常工作的最低性能指标约束集, 即只有在该最低性能指标集的约束下讨论系统的抗干扰性能才有意义. 以几种典型的干扰信号为例, 在系统最低性能指标约束下, 分析了不同参数下各种干扰对 DS/FH 测控系统指标的影响, 考虑到不同参数下各种干扰对系统约束集中各项指标影响的不同,

表 1 各测试路径的容易度和重要度

Table 1 Easiness and importance of different test routes

测试路径	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	l_9
容易度	1.00	0.50	0.50	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
重要度	0.25	0.75	0.85	0.36	0.87	0.51	0.30	0.32	0.20

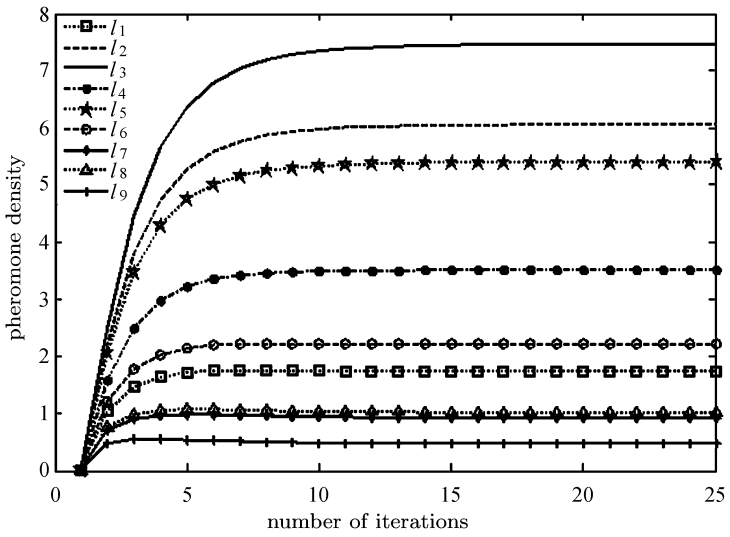


图 7 各路径信息素浓度随测试循环次数的变化

Fig. 7 Heuristic information versus the numbers of cycle with different routes

对各种情况进行遍历测试代价大、效率低, 因此, 为寻找最佳测试方案, 运用蚁群算法原理, 提出了 DS/FH 测控系统最低性能指标测试次序的理论模型. 通过仿真验证了测试模型的正确性和有效性, 对 DS/FH 测控系统的集约、有效、快速测试具有指导意义.

参考文献

[1] Gao Yang, Yan Yi, Cui Yongshun, *et al*. Analysis and study of ranging code performance based on deep space Pseudo-Noise (PN) ranging system [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(1):123-129. In Chinese (高阳, 闫毅, 崔永顺, 等. 深空伪码测距中复合码性能的分析与研究 [J]. 空间科学学报, 2012, **32**(1):123-129)

[2] Yang Tianshe, Dong Xiaoshe, Xi Zheng, *et al*. Space-based TT&C method of low orbit satellite [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(3):245-249. In Chinese (杨天社, 董小社, 席政, 等. 低轨航天器天基测控方法研究 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(3):245-249)

[3] Awais Yousaf, Asim Loan. Effect of jamming technique on the performance of direct sequence Spread Spectrum Modem [C]//Proceeding of 2011 International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2011). Phoenix Park, Korea: IEEE, 2011

[4] He Xin, Zhang Xiaolin. Anti-jamming performance of multi-tone DSSS in the presence of tone and partial band interference [J]. *J. Commun.*, 2010, **31**(8):75-83. In Chinese (和欣, 张晓林. 音频及部分频带干扰下多音调制直接序列扩频的抗干扰性能 [J]. 通信学报, 2010, **31**(8):75-83)

[5] Meng Shengyun, Yang Wenge, Wang Jinbao, *et al*. Acquisition performance of a synchronization scheme of DS/FH spread spectrum TT&C signals [J]. *J. Astron.*, 2010, **31**(8):2036-2042. In Chinese (孟生云, 杨文革, 王金宝, 等. DS/FH 扩频测控信号同步方案的捕获性能 [J]. 宇航学报, 2010, **31**(8):2036-2042)

[6] Chen Yading, Sun Zhangwen, Li Shaoqian, *et al*. Anti-jamming performance of CCPR in FFH/BFSK systems [C]// Proceeding of 2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS 2009). San Jose, California: IEEE, 2009

[7] Li Shuzhou, Sang Huaisheng. Study of the anti-jamming performance evaluation methods for satellite navigation receiver [J]. *Radio Eng. China*, 2006, **36**(9):37-41. In Chinese (李树洲, 桑怀胜. 卫星导航接收机抗干扰性能评估方法研究 [J]. 无线电工程, 2006, **36**(9):37-41)

[8] Zhang Bo, Shao Dingrong, Li Shujian. Study on fast synchronization of hybrid DS/FH system [J]. *J. Beijing Univ. Aeron. Astron.*, 2005, **31**(11):1226-1231. In Chinese (张波, 邵定蓉, 李署坚. DS/FH 混合系统快速同步的研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, **31**(11):1226-1231)

[9] Ebel W J, Tranter W H. The performance of Reed-Solomon codes on a bursty-noise channel [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1995, **43**(2):298-306

[10] Colomi A, Dorgo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies [C]//Proceeding of First Europe Conference on Artificial Life. Paris, France: Elsevier, 1991