

非理想干扰对消条件下扰中侦系统性能分析与功率优化

葛松虎, 张云硕, 郭宇, 邢金岭*, 李毅, 孟进

(海军工程大学 电磁能技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘要:为了定量描述干扰对消性能对扰中侦系统的影响,提出了非理想干扰对消条件下干扰-侦察中断概率的概念,推导了干扰-侦察中断概率性能闭式表达式,并进一步给出了理想干扰对消情况下的渐进中断概率表达式。基于所推导性能闭式表达式,求得了使干扰-侦察中断概率最小化的最优干扰功率。利用蒙特卡罗仿真验证了推导结果的准确性和最优功率的正确性。结果表明,干扰-侦察中断概率随着干扰对消比增大而减小,但随着干扰功率和发射功率的增大先减小后增大;最优干扰功率随着发射功率的增大而逐步增大,但最优干扰-侦察中断概率性能随着发射功率的增大而趋于常数。

关键词:干扰对消;扰中侦;中断概率;性能分析;功率优化

中图分类号:TN92 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2024)05-001-07



Performance analysis and power optimization for simultaneous jamming and intercepting system with imperfect interference cancellation

GE Songhu, ZHANG Yunshuo, GUO Yu, XING Jinling*, LI Yi, MENG Jin

(National Key Laboratory of Electromagnetic Energy, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to describe the effects of interference cancellation performance on the simultaneous jamming and intercepting system quantitatively, the concept of jamming-intercepting outage probability with imperfect interference cancellation was proposed, the closed-form expression for jamming-intercepting outage probability was derived and the asymptotical expression was further obtained for ideal interference cancellation. Based on the derived performance closed-form expression, the optimal jamming power that minimizes the jamming-intercepting outage probability was identified. Accuracy of the analytical results and the correctness of optimal jamming power were justified through Monte-Carlo simulations. The results demonstrate that the jamming-intercepting outage probability decreases as the interference cancellation rate increases, decreases first and then increases as the jamming power and the transmit power increases, and the optimal jamming power increases as the transmit power increases, while the optimal jamming-intercepting outage probability converges to constant as the transmit power increases.

Keywords: interference cancellation; simultaneous jamming and intercepting; outage probability; performance analysis; power optimization

激烈的电磁对抗是军事通信一个重要特点,良好的干扰能力和侦察能力成为获得战场环境下制电磁权的关键。在通信对抗中,干扰机发射的干扰信号必须在频率上瞄准通信信号,在对敌方通信进行通信压制的同时也会对己方的侦察设备形成强的自干扰,造成侦察接收中断^[1]。传统干扰机均采用干扰-侦察时分复用的半双工模式进行。在该模式下,当干扰后采取改频、降速等抗干扰手段时,干扰机无法及时发现并调整干扰策略,

造成干扰效能下降。因此,研究能够在相同频率下同时进行干扰和侦察的扰中侦系统具有重要意义。

近些年,干扰对消技术获得了长足发展,使得扰中侦系统的实现成为可能。干扰对消基本原理是从干扰源处耦合一部分参考信号,通过幅度、相位和时延调整后实现干扰信号的重构,然后与接收通道的混合信号进行叠加实现干扰消除^[1]。在民用通信领域,基于干扰对消的同时同频全双

收稿日期:2022-10-22

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFF1500100);国家自然科学基金资助项目(62301688,62241111,52025072,52177012)

第一作者:葛松虎(1987—),男,河南扶沟人,副研究员,博士,硕士生导师, E-mail: gesonghu@126.com

*通信作者:邢金岭(1988—),男,河南郸城人,副研究员,博士,硕士生导师, E-mail: nudt_xjl@foxmail.com

引用格式:葛松虎,张云硕,郭宇,等.非理想干扰对消条件下扰中侦系统性能分析与功率优化[J].国防科技大学学报,2024,46(5):1-7.

Citation: GE S H, ZHANG Y S, GUO Y, et al. Performance analysis and power optimization for simultaneous jamming and intercepting system with imperfect interference cancellation[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(5): 1-7.

工技术能成倍提高频谱效率、增加频谱使用灵活性^[2-3]。在军用通信领域,干扰对消技术可以解决共平台的多部电台之间电磁兼容问题^[4-5]。针对电子战系统,2017年,文献[6]提出了在电子战系统利用干扰对消技术实现扰中侦的思路,认为对消技术将成为改变电子战形态的关键技术。文献[7]搭建实验平台验证了扰中侦实现的可行性。文献[8]针对扰中侦系统提出了一种基于博弈论的干扰功率和通信功率优化策略,提高了干扰效能。文献[9]分析了同相/正交(in-phase/quadrature, I/Q)不平衡条件下扰中侦系统保密容量性能。文献[10]采用侦察中断概率表征扰中侦系统性能,并推导了性能表达式。文献[11]则分析了针对无人机平台的扰中侦系统侦察中断概率性能。扰中侦系统在不同环境、不同条件下的性能及影响因素分析成为其部署使用的一个关键问题。

作为实现扰中侦的基础,高干扰抑制性能的干扰对消方法也获得了众多关注^[12]。干扰对消方法一般分为模拟对消和数字对消:模拟对消是在射频域利用矢量调制器等模拟器件实现参考信号幅相调控,在信号进入射频链路前完成对消^[13];数字对消是在数字域采用多项式模型等数字信号处理方法实现干扰重构和对消^[14]。现有对消系统通过空间隔离、模拟对消和数字对消多级级联的架构可获得近 120 dB 的干扰抑制性能^[12]。然而,受模拟硬件非理想特性^[15]和数字模型精度^[16]影响,模拟对消和数字对消均无法达到理想的干扰效果,干扰残差成为扰中侦系统性能瓶颈^[17]。针对这一问题,除直接提高干扰对消能力外,另一个重要的研究思路是分析非理想干扰对消下系统性能,优化系统参数,充分发挥对消系统效能。文献[18]分析了干扰残差下全双工中继系统的保密容量性能。文献[19]分析了干扰残差影响下两跳全双工中继系统的信道容量。文献[20]分析了非理想对消条件下全双工通信网络的吞吐量性能。然而,针对扰中侦系统在干扰残差下的性能分析和优化仍比较缺乏。

为此,从扰中侦系统的干扰和侦察中断概率出发,本文对非理想干扰对消条件下系统性能开展了理论分析,并进行了干扰功率的优化设计。论文结果对于扰中侦系统设计和部署应用具有重要的理论指导意义。

1 系统模型与问题描述

1.1 扰中侦系统模型

考虑典型的通信对抗场景,如图 1 所示,场景包括对抗的红蓝双方。红方包括一个发射机和一个接收机,发射机向接收机传输信息。蓝方包括一个干扰机和一个侦收机,在对红方通信信号进行实时侦察接收的同时,必要时采用干扰机对通信链路进行干扰阻断。为了提高作战效能,采用干扰对消系统来消除干扰机对侦收机的干扰,实现对通信链路的同时侦察和干扰。

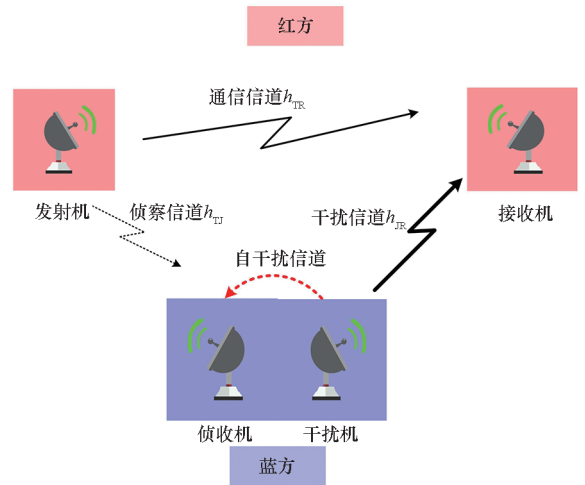


图 1 扰中侦系统模型

Fig. 1 Simultaneous jamming and intercepting system model

在干扰条件下,红方接收机收到的信号为

$$y_R = \sqrt{P_T d_{TR}^{-\alpha}} h_{TR} x_T + \sqrt{P_J d_{JR}^{-\alpha}} h_{JR} x_J + n_R \quad (1)$$

式中: $\sqrt{P_T d_{TR}^{-\alpha}} h_{TR} x_T$ 为接收机收到发射机发射的通信信号, $\sqrt{P_J d_{JR}^{-\alpha}} h_{JR} x_J$ 为接收机收到的干扰机发射的干扰信号, n_R 为接收机加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN); P_T 和 P_J 分别为发射机和干扰机的发射功率(分别简称为发射功率和干扰功率), d_{TR} 和 d_{JR} 分别为发射机和干扰机到接收机的距离, h_{TR} 和 h_{JR} 为发射机-接收机之间和干扰机-接收机之间信道的增益, x_T 和 x_J 分别为发射机和干扰机发射的信号, α 表示信道损耗因子。因此,红方接收机信干噪比(signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)为

$$\gamma_R = \frac{P_T d_{TR}^{-\alpha} |h_{TR}|^2}{\delta_{n,R}^2 + P_J d_{JR}^{-\alpha} |h_{JR}|^2} \quad (2)$$

式中, $\delta_{n,R}^2$ 为噪声信号 n_R 的功率。假设干扰机采用和通信信号带宽相同的干扰信号^[10],红方通信信道容量为

$$R_R = B \log_2(1 + \gamma_R) \quad (3)$$

式中, B 为通信信号和干扰信号带宽。干扰功率会导致通信信道容量降低, 从而导致通信中断。

同时, 蓝方侦收机收到的信号为

$$y_J = \sqrt{P_T d_{TJ}^{-\alpha}} h_{TJ} x_T + \sqrt{\beta P_J} x_J + n_J \quad (4)$$

式中, d_{TJ} 为发射机到侦收机的距离, h_{TJ} 为发射机 - 侦收机之间的信道增益, β 为干扰对消系统对消能力, n_J 为侦收机噪声信号。在系统中, $0 \leq \beta \leq 1$, 当 $\beta = 1$ 时代表没有干扰对消能力, 干扰机所有发射信号耦合到侦收机; 当 $\beta = 0$ 时表示理想干扰对消。干扰对消系统对消性能常用干扰对消比 (interference cancellation ratio, ICR) 表征, β 与干扰对消比性能 γ (单位为 dB) 之间关系为

$$\beta = 10^{-\frac{\gamma}{10}} \quad (5)$$

根据以上信号模型, 蓝方侦收机收到通信信号的信干噪比为

$$\gamma_J = \frac{P_T d_{TJ}^{-\alpha} |h_{TJ}|^2}{\delta_{n,J}^2 + \beta P_J} \quad (6)$$

式中, $\delta_{n,J}^2$ 为噪声信号 n_J 的功率。此时蓝方通信信道容量为

$$R_J = B \log_2(1 + \gamma_J) \quad (7)$$

可以看出, 干扰功率也会导致通信信道容量降低, 然而当干扰对消系统对消能力足够强时, 在干扰情况下仍能保证侦收机的信干噪比, 从而实现“扰中侦”。

立足非干扰对消条件分析蓝方扰中通系统的性能, 定义干扰 - 侦察中断概率为实施一次干扰情况下不能中断红方通信或不能成功侦收红方通信的概率, 其可以表征侦中通系统的性能。假设接收机和侦收机具有相同的接收解调能力, 且保证正确解调的信道容量门限为 R_{th} 。根据定义, 干扰 - 侦察中断概率可以表示为

$$P = 1 - \underbrace{Pr(R_R < R_{th})}_{P_1} \cdot \underbrace{Pr(R_J > R_{th})}_{P_2} \quad (8)$$

式中, P_1 表示成功干扰的概率, P_2 表示成功侦收的概率, $Pr(\cdot)$ 表示求概率操作。

从干扰 - 侦察中断概率定义可以看出其与 h_{TR} 、 h_{JR} 和 h_{TJ} 三个信道信息有关。站在蓝方角度, 无法掌握红方通信信道信息, 按照“料敌从宽, 预己从严”的原则, 假设红方通信信道不存在衰落效应, 即 $|h_{TR}|^2 = 1$, 而自身的干扰信道和侦察信道存在瑞利衰落特性且具有单位方差 $E[|h_{TJ}|^2] = 1$ 和 $E[|h_{JR}|^2] = 1$ 。因此, $|h_{TJ}|^2$ 和 $|h_{JR}|^2$ 的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 为

$$F(x) = 1 - \exp(-x) \quad (9)$$

基于以上假设条件分析蓝方干扰 - 侦察中断概率表达式。

1.2 优化问题描述

在有限的干扰对消能力下, 蓝方干扰机的发射功率需要良好的设计才能达到最优的干扰 - 侦察效果。当干扰信号过小时, 干扰无法有效阻断红方通信, 造成整个系统干扰 - 侦察失效; 但如果盲目增大干扰信号功率, 会造成较大的自干扰残留, 从而影响侦察效果, 同样无法达到良好的干扰 - 侦察效能。为了使干扰 - 侦察中断概率最小化, 最优功率优化问题可以描述为

$$\min P \quad \text{s. t.} \quad 0 < P_J \leq P_{\max} \quad (10)$$

式中, P_{\max} 为干扰机最大发射功率。下节给出该问题的最优解。

2 系统干扰 - 侦察中断概率性能分析

2.1 干扰 - 侦察中断概率模型分析

为了保证在无干扰条件下红方正常通信, 需要保证无干扰情况下红方通信信道容量大于正常接受解调门限, 即

$$R_R(P_J = 0) \geq R_{th} \quad (11)$$

可得

$$\frac{P_T d_{TR}^{-\alpha}}{\delta_{n,R}^2} \geq (2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1) \quad (12)$$

在干扰情况下, 红方接收机通信中断的概率可以表示为

$$\begin{aligned} P_1 &= Pr(R_R < R_{th}) \\ &= Pr[B \log_2(1 + \gamma_R) < R_{th}] \\ &= Pr(\gamma_R < 2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1) \\ &= Pr\left[|h_{JR}|^2 > \frac{P_T d_{TR}^{-\alpha} |h_{TR}|^2}{P_J d_{JR}^{-\alpha} (2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)} - \frac{\delta_{n,R}^2}{P_J d_{JR}^{-\alpha}}\right] \end{aligned} \quad (13)$$

将式(13)代入式(9)可得

$$\begin{aligned} P_1 &= 1 - F\left[\frac{P_T d_{TR}^{-\alpha}}{P_J d_{JR}^{-\alpha} (2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)} - \frac{\delta_{n,R}^2}{P_J d_{JR}^{-\alpha}}\right] \\ &= \exp\left[-\frac{P_T d_{TR}^{-\alpha}}{P_J d_{JR}^{-\alpha} (2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)} + \frac{\delta_{n,R}^2}{P_J d_{JR}^{-\alpha}}\right] \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可以看出, 成功干扰概率与干扰功率和解调门限成正比, 与发射功率成反比。

在干扰情况下, 蓝方接收机正确侦收的概率可以表示为

$$\begin{aligned} P_2 &= Pr(R_J > R_{th}) \\ &= Pr[B \log_2(1 + \gamma_J) > R_{th}] \\ &= Pr(\gamma_J > 2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1) \end{aligned}$$

$$= Pr\left[|h_{TJ}|^2 > \frac{(\delta_{n,J}^2 + \beta P_J)(2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)}{P_T d_{TJ}^{-\alpha}} \right] \quad (15)$$

将式(15)代入式(9)可得

$$P_2 = 1 - F\left[\frac{(\delta_{n,J}^2 + \beta P_J)(2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)}{P_T d_{TJ}^{-\alpha}} \right] \\ = \exp\left[-\frac{(\delta_{n,J}^2 + \beta P_J)(2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)}{P_T d_{TJ}^{-\alpha}} \right] \quad (16)$$

因此,干扰-侦察中断概率为

$$P = 1 - P_1 \cdot P_2$$

$$= 1 - \exp\left\{ \left[-\frac{P_T d_{TR}^{-\alpha}}{P_J d_{JR}^{-\alpha}(2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)} + \frac{\delta_{n,R}^2}{P_J d_{JR}^{-\alpha}} \right] - \frac{(\delta_{n,J}^2 + \beta P_J)(2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)}{P_T d_{TJ}^{-\alpha}} \right\} \quad (17)$$

式(17)给出了系统干扰-侦察中断概率的闭式表达式。为了简化该表达式,进一步给出理想情况下性能渐进表达式。首先,假设对消系统能够获得理想的干扰对消性能,即 $\beta = 0$ 。其次,在接收机噪声功率远小于收到的干扰信号功率、侦收机噪声功率远小于收到的有用信号功率,即 $\delta_{n,R}^2 \ll P_J d_{JR}^{-\alpha}$ 和 $\delta_{n,J}^2 \ll P_T d_{TJ}^{-\alpha}$ 时,系统渐进干扰-侦察中断概率可简化为

$$P_{ideal} = 1 - \exp\left[-\frac{P_T d_{TR}^{-\alpha}}{P_J d_{JR}^{-\alpha}(2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)} \right] \quad (18)$$

由式(18)可以看出,渐进干扰-侦察中断概率与通信干扰功率之比成正比,与通信干扰距离之比成反比,与解调门限成反比。

2.2 干扰机最优发射功率优化设计

为了求解使干扰-侦察中断概率最小的最优干扰机发射功率,将式(16)表示为关于干扰功率 P_J 的函数,得到

$$P(P_J) = 1 - \exp\left(-a \frac{1}{P_J} - bP_J - c \right) \quad (19)$$

其中,

$$a = \frac{P_T d_{TR}^{-\alpha}}{d_{JR}^{-\alpha}(2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)} - \frac{\delta_{n,R}^2}{d_{JR}^{-\alpha}} \quad (20)$$

$$b = \frac{\beta(2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)}{P_T d_{TJ}^{-\alpha}} \quad (21)$$

$$c = \frac{\delta_{n,J}^2(2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)}{P_T d_{TJ}^{-\alpha}} \quad (22)$$

由不等式(12)可知 $a > 0$,由于函数 $g(x) = 1 - \exp(x)$ 为单调递减函数,因此优化问题(10)可以简化为

$$\max_{P_J} f(P_J) \quad \text{s. t.} \quad 0 < P_J \leq P_{\max} \quad (23)$$

其中,

$$f(P_J) = -a \frac{1}{P_J} - bP_J - c \quad (24)$$

以下定理给出了优化问题(23)的最优解。

定理 1 优化问题(23)的最优解 P_J^* 的表达式为

$$P_J^* = \begin{cases} \sqrt{\frac{a}{b}}, & 0 < a < bP_{\max}^2 \\ P_{\max}, & a \geq bP_{\max}^2 \end{cases} \quad (25)$$

对应的最优干扰-侦察中断概率为

$$P^* = \begin{cases} 1 - \exp(-2\sqrt{ab} - c), & 0 < a < bP_{\max}^2 \\ 1 - \exp\left(-a \frac{1}{P_{\max}} - bP_{\max} - c\right), & a \geq bP_{\max}^2 \end{cases} \quad (26)$$

证明:对于 $f(P_J)$ 关于 P_J 求导可得

$$\frac{\partial P}{\partial P_J} = -b + a \frac{1}{(P_J)^2} \quad (27)$$

由 $\frac{\partial P}{\partial P_J} = 0$ 可得

$$P_J^\dagger = \sqrt{\frac{a}{b}} \quad (28)$$

1) 当 $P_J^\dagger < P_{\max}$,即 $0 < a < bP_{\max}^2$ 时,有:

① 当 $P_J < P_J^\dagger$ 时, $\frac{\partial P}{\partial P_J} > 0$, $f(P_J)$ 在 $(0, P_J^\dagger)$ 范围内单调递增;

② 当 $P_J > P_J^\dagger$ 时, $\frac{\partial P}{\partial P_J} < 0$, $f(P_J)$ 在 (P_J^\dagger, P_{\max}) 范围内单调递减。因此,此时使得干扰-侦察中断概率最小的干扰机发射功率为

$$P_J^* = \sqrt{\frac{a}{b}} \quad (29)$$

2) 当 $P_J^\dagger \geq P_{\max}$,即 $a \geq bP_{\max}^2$ 时,有: $\frac{\partial P}{\partial P_J} \geq 0$ 恒成立, $f(P_J)$ 在 $(0, P_{\max}]$ 范围内单调递增。因此,此时最优干扰功率为

此时最优干扰功率为

$$P_J^* = P_{\max} \quad (30)$$

将式(29)和式(30)代入式(24)可得式(26),即两种情况下对应的最小干扰-侦察中断概率表达式。□

根据定理 1,可以得到结论:

1) 当干扰功率 $P_J < P_J^\dagger$ 时,增大干扰功率对于接收机通信干扰效果的影响是干扰-侦察中断概率的主导因素;

2) 当干扰功率 $P_J > P_J^\dagger$ 时,增大干扰功率对于侦收机侦察接收效果的影响是干扰-侦察中断概率的主导因素;

3) 当 $P_J^\dagger \geq P_{\max}$ 时,干扰机能够在其最大干扰

功率下获得最优的干扰-侦察中断概率性能。

为了研究系统参数对最优干扰功率的影响,将式(20)中 a 和式(21)中 b 代入式(28)可得

$$P_J^* = \sqrt{\left[\frac{P_T d_{TR}^{-\alpha}}{d_{JR}^{-\alpha} (2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)} - \frac{\delta_{n,R}^2}{d_{JR}^{-\alpha}} \right] \frac{P_T d_{TJ}^{-\alpha}}{\beta (2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1)}} \quad (31)$$

结合式(31)和式(5)可知,在干扰机位置固定且最大发射功率足够大时,最优干扰功率 P_J^* 与发射功率 P_T 和干扰对消比 γ 成正比,与解调门限 R_{th} 成反比。

为了使扰中侦系统能够在最大干扰功率下获得最优的干扰-侦察中断概率性能,需要满足条件 $a \geq bP_{\max}^2$,联合式(5)和式(25)可求得干扰对消比性能要求为

$$\gamma \geq -10 \lg \left[\frac{P_T d_{TJ}^{-\alpha}}{d_{JR}^{-\alpha} (2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1) P_{\max}^2} \left(\frac{P_T d_{TR}^{-\alpha}}{2^{\frac{R_{th}}{B}} - 1} - \delta_{n,R}^2 \right) \right] \quad (32)$$

由式(32)可以看出:干扰对消系统对消比需求和干扰机最大功率成正比,这是因为干扰功率越大,需要的对消能力越强;对消比需求与发射功率成反比,这是因为较大的发射功率使得蓝方侦收机能够在更大的干扰残差下进行侦收,降低了对消能力的要求。

3 仿真结果

3.1 干扰-侦察中断概率性能仿真

为了验证所推导干扰-侦察中断概率性能表达式和最优功率表达式的正确性,仿真了不同参数下理论分析结果和仿真结果的一致性。在分析仿真中,默认的参数设置如表1所示。

表1 仿真参数

Tab.1 Parameters in the simulation

| 序号 | 参数 | 取值 |
|----|------------------|-----------------|
| 1 | P_T | 10 W |
| 2 | P_J | 1 000 W |
| 3 | d_{TR} | 10 km |
| 4 | d_{TJ} | 20 km |
| 5 | d_{JR} | 20 km |
| 6 | α | 2 |
| 7 | $\delta_{n,J}^2$ | -90 dBm |
| 8 | $\delta_{n,R}^2$ | -90 dBm |
| 9 | γ | 130 dB |
| 10 | B | 1 MHz |
| 11 | R_{th} | 3 Mbit/s |
| 12 | 蒙特卡罗次数 | 1×10^5 |

图2给出了不同解调门限下干扰-侦察中断概率性能与干扰对消比性能的关系。考虑现有对消技术干扰抑制能力及后续对消技术演进,干扰对消比设置为90~160 dB^[12]。解调门限 R_{th} 分别设置为1 Mbit/s, 2 Mbit/s和3 Mbit/s^[21]。可以看出,理论值和仿真值在不同对消比下均具有很好的拟合性能,说明了分析结果对于不同干扰对消比的适应性。同时,随着干扰对消能力增大,干扰-侦察中断概率逐步降低,然后逐步稳定于渐进性能。这是因为高干扰对消比使得干扰机耦合到侦收机的干扰残差更小,从而带来了更高的成功侦收率。然而,随着干扰对消能力的进一步增大,干扰对于通信的中断概率成为干扰-侦察中断概率性能的制约因素。此时增大对消比不能有效降低干扰-侦察中断概率。因此,在实际应用中,干扰对消能力需要配合干扰功率同步优化设计。

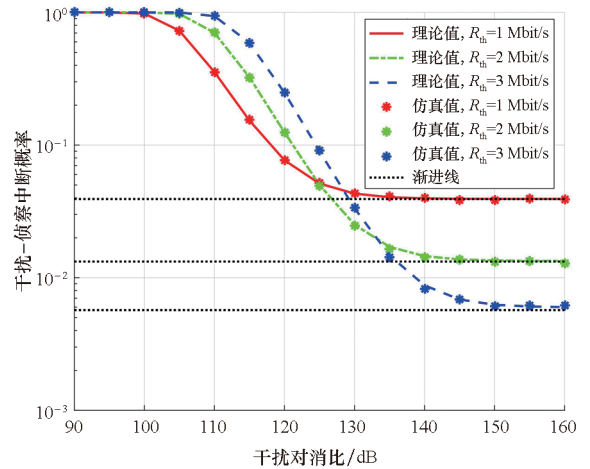


图2 不同解调门限下干扰-侦察中断概率性能与干扰对消比性能的关系

Fig.2 Jamming-intercepting outage probability versus ICR under different decode thresholds

图3给出了不同干扰对消能力下干扰-侦察中断概率性能与干扰功率的关系。可以看出,在不同干扰功率条件下理论分析值和仿真值均具有良好拟合精度,验证了分析结果对于不同干扰功率的适应性。随着干扰功率的增大,干扰-侦察中断概率先减小后增大。这是因为:当干扰功率较低时,增大干扰功率能够显著提升干扰机中断通信的概率;当干扰功率超过一定门限后,侦收机接收到的干扰残差显著增大,造成侦收成功概率急剧下降。同时,定理1给出的最优干扰功率闭式表达式能够很好匹配理论分析和仿真曲线,验证了最优解的正确性。

图4给出了不同干扰对消能力下干扰-侦察

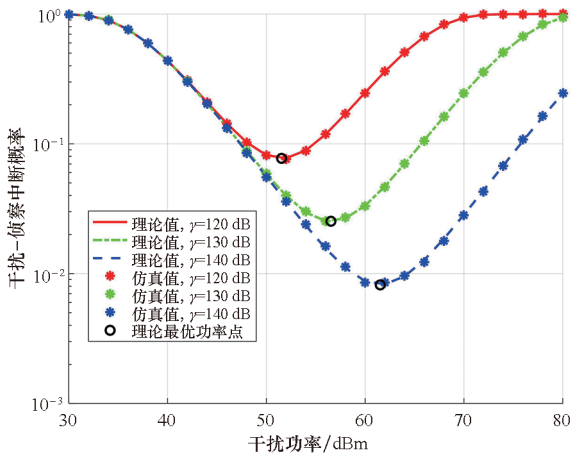


图 3 不同干扰对消能力下干扰 - 侦察中断概率性能与干扰功率的关系

Fig. 3 Jamming-intercepting outage probability versus jamming power under different ICRs

中断概率性能与发射功率的关系。可以看出,在不同发射功率条件下理论分析值和仿真值均具有良好拟合精度,验证了分析结果对于不同发射功率的适应性。随着发射功率的增大,干扰 - 侦察中断概率同样先降低后增大。这是因为:发射功率较低时,发射功率增大会极大提高侦察机的侦察成功概率;当发射功率超过一定门限后,干扰机对于通信信号的干扰成功率会明显降低。因此,站在红方对抗蓝中侦系统的角度,可以选择在保证有效通信基础上降低发射功率,减小被侦察的概率;或者采用极大发射功率,降低被干扰概率。

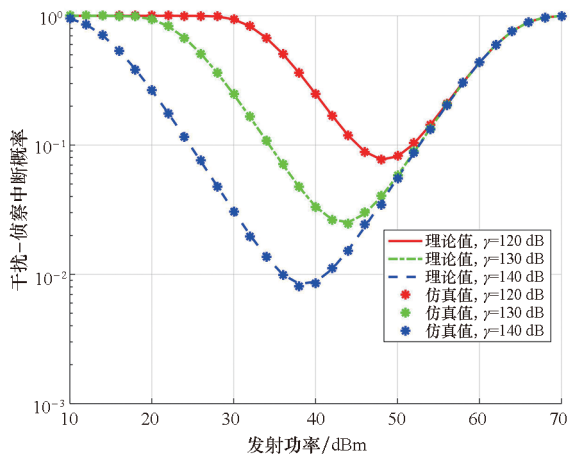


图 4 不同干扰对消能力下干扰 - 侦察中断概率性能与发射功率的关系

Fig. 4 Jamming-intercepting outage probability versus transmit power under different ICRs

3.2 最优干扰性能分析

下面利用所推导的最优功率表达式研究最优干扰功率和最优干扰 - 侦察中断概率性能。分析

中,假设最大干扰功率足够大,能够优化设计满足需求。

图 5 给出了不同干扰对消能力下最优干扰功率与发射功率的关系。随着发射功率增大,最优干扰功率逐步增大;干扰对消能力越强,对应的最优干扰功率越大。这是因为更强的对消能力可以在提升干扰效能的同时仍保持较小的侦收干扰残差。因此,对于蓝方而言,红方发射功率越大,在良好的干扰对消性能支撑下,可以实现更大的干扰功率。

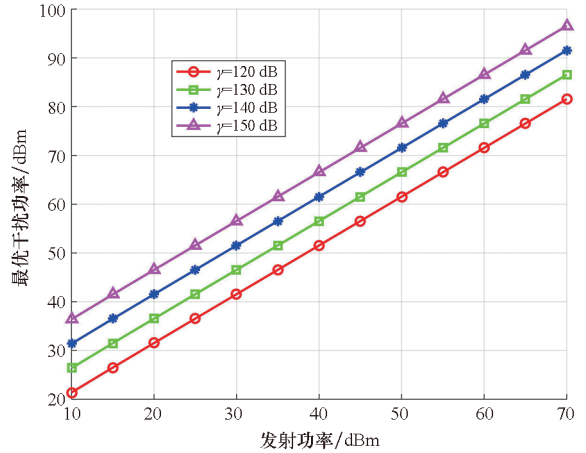


图 5 不同干扰对消能力下最优干扰功率与发射功率的关系

Fig. 5 The optimal jamming power versus transmit power under different ICRs

图 6 给出了不同干扰对消能力下最优干扰 - 侦察中断概率性能与发射功率的关系。随着发射功率增大,最优干扰 - 侦察中断概率先逐步降低,然后逐步趋于稳定,且干扰对消能力越强,稳定后中断概率越低。在发射功率较小时,侦察成功率是限制最优干扰 - 侦察中断概率性能的主要因

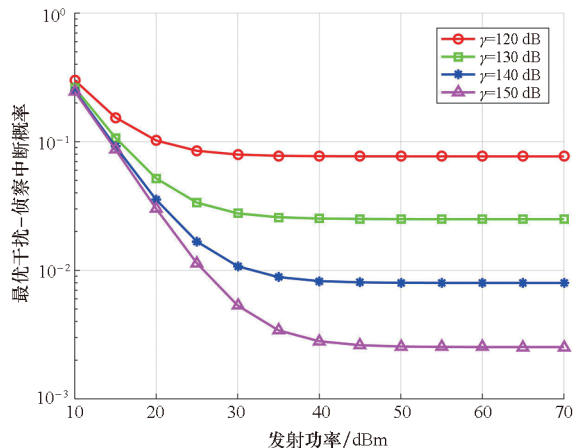


图 6 不同干扰对消能力下最优干扰 - 侦察中断概率性能与发射功率的关系

Fig. 6 The optimal jamming-intercepting outage probability versus transmit power under different ICRs

素。当发射功率足够大时,发射功率的提升使得最优干扰功率同步提升,造成侦察机干扰残差变大,反过来又限制了侦察性能。因此,扰中通系统仅通过增大干扰功率不能有效提升干扰-侦察性能,需要对消系统对消比性能支撑才能实现良好的扰中侦效果。

4 结论

论文研究了非理想干扰对消条件下扰中侦系统的干扰-侦察中断概率性能及干扰功率优化问题。首先推导了系统干扰-侦察中断概率性能闭式表达式及其渐进性能表达式。为了使得干扰-侦察中断概率最小化,对干扰功率进行了优化设计。最后通过仿真验证了性能分析和优化设计的有效性,并分析了系统参数对干扰-侦察中断概率性能和最优干扰功率的影响规律。所得到的结论可以有效指导扰中通系统干扰对消系统参数和干扰功率设计。

参考文献 (References)

- [1] BHARADIA D, MCMLIN E, KATTI S. Full duplex radios[C]// ACM SIGCOMM 2013 Conference, 2013: 375-386.
- [2] SADJINA S, MOTZ C, PAIREDER T, et al. A survey of self-interference in LTE-advanced and 5G new radio wireless transceivers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(3): 1118-1131.
- [3] ALLSEBROOK K, RIBBLE C. VHF cosite interference challenges and solutions for the United States Marine Corps' expeditionary fighting vehicle program [C]//Proceedings of the IEEE Military Communications Conference, 2004: 548-554.
- [4] ZHANG J H, HE F M, LI Y, et al. Multichannel adaptive interference cancellation for full-duplex high power AM radios[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(4): 1010-1020.
- [5] HONG S, BRAND J, CHOI J I, et al. Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 114-121.
- [6] RIIHONEN T, KORPI D, RANTULA O, et al. Inband full-duplex radio transceivers: a paradigm shift in tactical communications and electronic warfare? [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(10): 30-36.
- [7] RIIHONEN T, KORPI D, TURUNEN M, et al. Tactical communication link under joint jamming and interception by same-frequency simultaneous transmit and receive radio[C]// Proceedings of the 2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM), 2018: 1-5.
- [8] QI N, WANG W, ZHOU F H, et al. Two birds with one stone: simultaneous jamming and eavesdropping with the Bayesian-Stackelberg game [J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(12): 8013-8027.
- [9] SAMARA L, HAMILA R, AL-DHAHIR N. Secrecy performance of full-duplex jamming and reception under I/Q imbalance[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(9): 9560-9565.
- [10] SAMARA L, GOUSSEM A, ABDELLATIF A A, et al. On the performance of tactical communication interception using military full duplex radios[C]//Proceedings of the IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2019: 1-6.
- [11] ABUGHALWA M, SAMARA L, HASNA M O, et al. Full-duplex jamming and interception analysis of UAV-based intrusion links [J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(5): 1105-1109.
- [12] KOLODZIEJ K E. In-band full-duplex wireless systems overview [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications(ICC), 2021: 1-6.
- [13] HUANG X J, GUO Y J. Radio frequency self-interference cancellation with analog least mean-square loop [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(9): 3336-3350.
- [14] GE S H, MENG J, XING J L, et al. A digital-domain controlled nonlinear RF interference cancellation scheme for co-site wideband radios [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(5): 1647-1654.
- [15] 王俊, 赵宏志, 马万治, 等. 同时同频全双工宽带射频自干扰抵消性能分析[J]. 通信学报, 2016, 37(9): 121-130.
WANG J, ZHAO H Z, MA W Z, et al. Performance analysis of broadband self-interference cancellation at RF domain in co-frequency co-time full duplex systems [J]. Journal on Communications, 2016, 37(9): 121-130. (in Chinese)
- [16] 崔中普, 葛松虎, 李亚星, 等. 基于二维正交化 WLCLMS 的自干扰对消方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(9): 2726-2735.
CUI Z P, GE S H, LI Y X, et al. Two-dimensional orthogonalization WLCLMS scheme for self-interference cancellation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(9): 2726-2735. (in Chinese)
- [17] ABUSABAH A T, IRIIO L, OLIVEIRA R, et al. Approximate distributions of the residual self-interference power in multi-tap full-duplex systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(4): 755-759.
- [18] PARK J, YUN S, KIM I M, et al. Secure communications with a full-duplex relay network under residual self-interference [J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(3): 496-500.
- [19] ZLATANOV N, SIPPEL E, JAMALI V, et al. Capacity of the Gaussian two-hop full-duplex relay channel with residual self-interference[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(3): 1005-1021.
- [20] TONG Z, HAENGGI M. Throughput analysis for full-duplex wireless networks with imperfect self-interference cancellation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(11): 4490-4500.
- [21] CHEN X Y, SUN W, XING C W, et al. Multi-antenna covert communication via full-duplex jamming against a warden with uncertain locations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(8): 5467-5480.