

文章编号: 2095-4980(2022)12-1318-08

无人机群通信对抗中的认知干扰波形设计

刘玉超, 郭兰图, 李雨倩*

(中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107)

摘要: 针对无人机群通信对抗中敌方通信信号生成干扰波形的自适应问题, 提出了一种基于频谱调制频谱编码(SMSE)模型进行认知干扰波形设计的方法。通过对 SMSE 框架中 6 种不同的波形设计参数进行部署, 将具有特定频谱结构的波形在频域生成相应功能的认知干扰波形, 来应对通信对抗中不同参数下的通信信号。仿真实验表明, 该理论模型能够产生单音干扰、多音干扰、宽带干扰、瞄准式窄带干扰等多种压制式干扰波形, 并能够对 BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM 等调制信号实现调制欺骗式干扰。通过与理论曲线对比, 实验结果验证了 SMSE 模型产生认知干扰波形的理论可行性, 这意味着 SMSE 模型可以实现对通信信号的压制性干扰和欺骗式干扰的一体化应用。

关键词: 无人机群; 通信对抗; 认知干扰; 波形设计; 频谱调制频谱编码

中图分类号: TN911.23

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022028

Waveform design of cognitive jamming waveform in intelligent communication confrontation of unmanned aerial vehicle swarm

LIU Yuchao, GUO Lantu, LI Yuqian*

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao Shandong 266107, China)

Abstract: In order to solve the adaptive problem of generating jamming waveforms in response to enemy communication signals in Unmanned Aerial Vehicle(UAV) swarm communication confrontation, a cognitive jamming waveform design method is proposed based on Spectrally Modulated Spectrally Encoded(SMSE) model. By deploying six kinds of different waveform design parameters in the SMSE framework, the waveforms with a specific spectrum structure are synthesized in the frequency domain to generate cognitive jamming waveforms with corresponding functions to deal with communication signals under different parameters in communication countermeasures. Simulation experiments show that the theoretical model can generate the suppressive jamming waveforms: single-tone jamming, multi-tone jamming, wideband interference, and narrowband interference. It can also achieve modulation deceptive jamming for the modulation methods of BPSK, QPSK, 8PSK, and 16QAM signals. Compared with the theoretical curve, the experimental results verify the theoretical feasibility of SMSE model to generate cognitive interference waveform. SMSE model can realize the integration of suppressive jamming and spoofing jamming.

Keywords: UAV swarm; communication countermeasures; cognitive jamming; waveform design; Spectrally Modulated Spectrally Encoded(SMSE)

在未来无人机作战中, 无人机集群对抗是一种十分重要的模式, 在对抗和作战的过程中, 无人机需要具备一定的组织能力, 能够对周围环境态势进行感知分析, 从而生成相应攻击、退避以及援助等作战行动。随着人工智能与信息技术的快速发展, 受益于自然界中蜂群、鱼群等的启发, 无人机群在信息中继、应急救援、电子战等领域的研究越来越丰富, 无人机群在现代和未来战场中可以替代人完成危险的任务, 为社会稳定发展提供一种安全保障。集群通信技术^[1-2]作为战场中的联络手段, 占据着举足轻重的作用。在现代和未来发展的电子战

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(A172105G04)

*通信作者: 李雨倩 email:liyujian1025@foxmail.com

中, 无人机群战场环境变得愈加复杂, 通信对抗系统迎来了新的巨大挑战。新一代具有认知能力的自适应通信设备充分利用其对环境感知的能力, 可以根据环境实时对工作模式、发射参数、处理过程等进行调整, 大大提高了通信系统各方面的性能^[3-4]。为了自适应地干扰对方的通信信号, 进行认知干扰波形的设计具有重大研究意义。传统的干扰波形设计往往使用几种固定的发射波形, 但是在瞬息万变的电磁战场环境中, 尤其是当通信双方具备了复杂环境认知与自适应能力, 传统的通信对抗方式难以适应快速变化的地理环境和电磁空间, 干扰效果严重下降。这对干扰波形的设计提出了新的要求。智能化、自适应地认知干扰波形设计是面对新型电子战发展的必然趋势^[5-7]。

认知干扰波形设计能够在复杂环境中自适应感知周围态势, 通过对电磁空间的判断做出最佳干扰决策, 自动产生最佳干扰波形并评估当前干扰效果。认知干扰设计可以对通信、雷达等系统产生有效的干扰, 使敌方电子设备和系统丧失或降低效能, 为己方创造有利的战场环境和生存条件。从 2008 年开始, 美国已经着手于认知干扰波形的设计研究并立项支撑, 如: 美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)研究的自适应电子战行为学习、极端射频频谱通信、自适应雷达对抗; 美国空军开发的认知干扰机和电子战高级组件; 美国海军开发的下一代电子战技术、认知通信电子战等^[8-9]。之后国内也对电子战中的通信认知干扰波形展开了一系列的研究。杨小牛院士对认知电子战理论、技术、装备进行了综合分析, 认为软件无线电(Software Defined Radio, SDR)技术日益成熟与电子战领域对自适应、自动化、智能化要求越来越高是认知电子战兴起的主要原因^[10]; 倪从云等阐述了认知电子战系统中通信对抗波形认知侦察模块、对抗措施合成模块、智能干扰模块及动态知识库模块的基本功能, 以及认知电子战发展过程中需要突破的 4 个关键技术^[11]; 贾鑫等从常规电子战作战手段所亟须解决的问题着手, 论述了发展认知电子战的必要性和重要意义, 研究了认知电子战系统构建的总体思路以及所具备的优势特点, 分析了发展认知电子战包括通信认知干扰在内所需解决的关键技术及其相对应的解决思路^[12]。

对于认知电子战中的认知干扰波形设计方面, 2015 年张建华从机载天线干扰方向图的角度研究了机载天线对目标的干扰效果^[13]; 2019 年, 杨鸿杰对基于强化学习的智能通信干扰决策算法进行了研究, 提出了敌方通信参数不变、敌方会根据受干扰情况切换信道、以及敌方会根据受干扰情况改变通信参数等智能通信干扰算法的 3 种应用场景, 针对每种应用场景, 提出了合适的智能干扰决策算法, 并针对特定问题对算法进行了相应的改进, 对其学习过程进行了优化^[14]; 2021 年, 陈涛等针对干扰算法无法适应信号环境变化的问题, 提出将 Q-Learning 算法与“逼真”算法相结合应用到干扰设计中, 使干扰能够达到影响信号长度变化的效果, 相对于传统算法, 强化学习算法可以达到更好的干扰效果^[15]; 2021 年, 赵凡等提出一种基于生成对抗网络(Generative Adversarial Networks, GAN)的通信干扰波形生成技术, 运用 GAN 直接提取目标信号的潜在特征, 并生成与目标信号特征相似的干扰波形^[16]。以上研究是基于认知干扰系统中的干扰波形设计参数决策理论, 从算法优化的角度获取干扰参数, 但没有考虑理论模型和干扰波形产生架构的设计, 无法指导干扰波形的产生, 且无法将压制式干扰和欺骗式干扰波形统一在一个波形生成框架。

因此对于波形产生自身架构需要进一步开展研究。本文从不同干扰样式的波形参量出发, 基于频谱调制、频谱编码(SMSE)理论模型^[17-19], 将压制性干扰和欺骗式干扰的波形一体化, 并将 2 种类型干扰统一在一个波形生成模型中, 根据对方的通信参数, 产生可调动态加载的认知干扰波形, 提高认知干扰波形的灵活性, 推进无人机群在通信对抗领域的应用。

1 系统模型

无人机群是由无人机协同合作集群行动组成的一个有机的整体, 由于灵活性和自组织性, 在电子战战场中发挥越来越重要的作用。无人机群电子战中的通信认知干扰波形设计技术, 可以指导作战指挥中心制定有效的通信作战指令, 提高无人机集群作战效率。作为认知电子战中实施通信干扰的主要对象, 通信认知干扰系统是应用认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术, 主动感知和分析目标通信信号, 利用侦察模块获得通信信号参数, 基于分析和决策引擎对通信波形信号进行干扰参数决策, 实现对目标通信方的最优干扰^[20]。在实际应用中, 相比于传统的常规干扰, 认知干扰凭借其灵活多变的干扰方式和强大的适应能力更具有针对性和高效性, 认知干扰系统性能的优劣已经成为打赢电子战的决定性因素。

通信干扰波形的类型大体可分为两类: 压制性干扰和欺骗式干扰^[21]。压制性干扰类型有: 单音干扰、多音干扰、窄带干扰和宽带干扰等类型。欺骗式干扰主要是基于不同调制方式的干扰。其中, 单音干扰带宽较窄, 因此发射信号的功率较小, 需要预先知道通信信号的频率, 才能更加精准地干扰并产生较强的功率谱密度; 多

音干扰，通常情况下，可以将其看作一系列单频信号的叠加，在频域表现出一系列的尖峰；窄带干扰是指带宽与发射信号带宽的比值较小或其绝对带宽较小的干扰；宽带干扰是指带宽与发射信号带宽的比值较大或其绝对带宽较大的干扰。这些阻塞式干扰信号生成快，但对干扰机的功率有较高的要求。而欺骗式干扰通过对通信信号采样进行调制后，转发一个与目标相同调制方式的信号，达到欺骗效果。无论是压制性干扰还是欺骗式干扰，共性是都由几个波形特征参量生成。基于这些特征参量，为认知干扰波形模型的产生提供了理论依据。认知干扰波形的参量如图2所示。

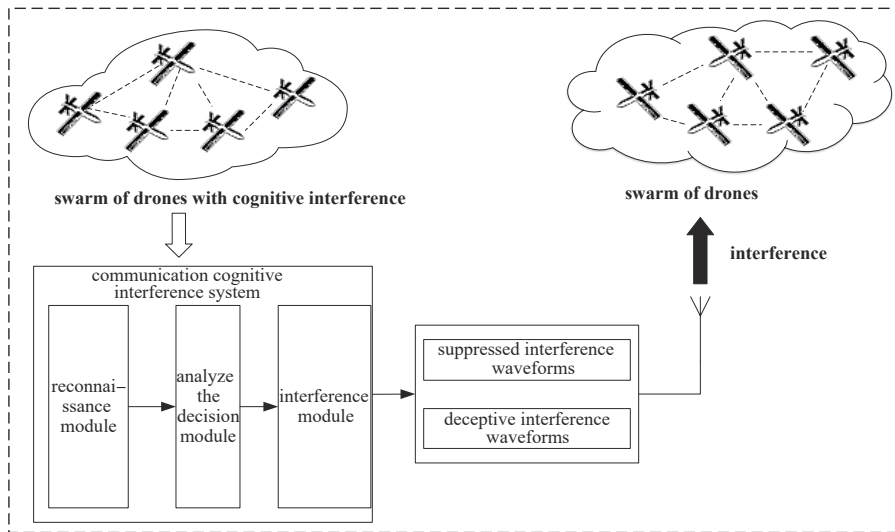


Fig. 1 Cognitive interference scenarios for UAV group communication

图1 无人机群通信认知干扰场景图

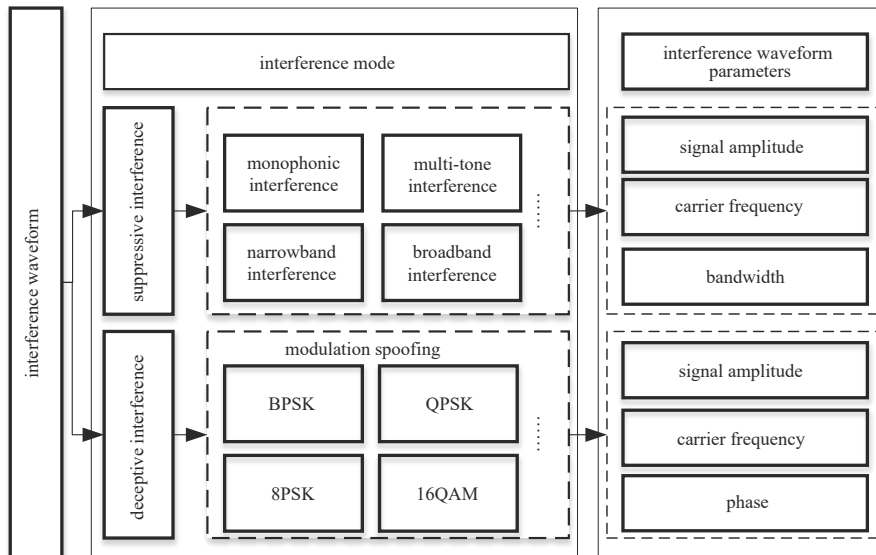


Fig.2 Cognitive interference waveform and waveform parameters

图2 认知干扰波形与波形参量

为了实现对任意干扰波形的生成，本文提出一种基于SMSE理论的干扰波形发生器。SMSE模型是一种基于CR的多载波通信的波形设计模型，为了适应认知无线电对电磁环境变化及特定频段应用情况的快速变化，它通过选取和实例化6个波形设计关键参数(即数据调制变量、编码变量、窗函数、正交变量、子载波分配变量、子载波使用变量)来动态地改变发射波形的传输特性。在本设计的干扰波形发生器中，利用了SMSE框架来实现所需的频域设计波形，由决策信息中提取生成SMSE信号所需的6个关键波形设计变量。根据决策信息调整参数配置即可生成相应功能的干扰波形。

基于以上分析，本文提出基于SMSE模型的认知干扰系统，如图3所示。认知干扰系统主要包含2部分：认

知引擎、干扰波形发生器。干扰系统中的引擎包含分析模块、学习模块、优化模块和策略引擎。这 4 个模块实现了认知干扰系统中的认知性，首先将分析模块获取的通信信息参数传给学习模块，若信息完善度不够高，则通过优化模块以改变干扰参数形式，并通过不断的主动式感知得到最优化参数，然后将参数导入策略引擎以得到攻击决策信息，再将决策信息传入干扰波形发生器，进而指导干扰波形的产生。

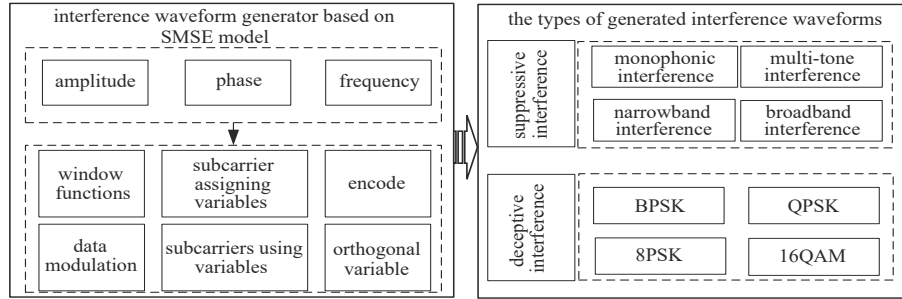


Fig.3 Cognitive jamming system based on SMSE model
图3 基于SMSE模型的认知干扰系统

2 基于 SMSE 理论框架的波形设计

SMSE 模型能够为无人机上搭载的 SDR 平台提供统一的多载波波形数学框架。SMSE 理论框架根据感知到对方无人机群通信的参数信息(调制方式、载波等)，通过调整自身架构中的数学参量(改变编码、调制等方式，使用不同的窗函数，分配不同的子载波)，使得无人机群中的干扰机能够根据对方通信方式的变化，产生应对对方通信变化的干扰波形，满足未来无人机群通信对抗的自适应和多样性。

SMSE 模型产生的统一波形的频域表达式如式(1)所示：

$$S_{SMSE} = A \odot \Theta \odot F \quad (1)$$

式中： \odot 为哈达玛乘，表示 2 个相同大小矩阵中对应位置的元素对应相乘； A 为幅度； Θ 为相位； F 为频率。 A, Θ, F 为关于波形设计变量的函数。

数据调制(data modulation, d):

$$d = [d_1, d_2, \dots, d_{N_f}], d_i \in \mathbf{C} \quad (2)$$

编码(code, c):

$$c = [c_1, c_2, \dots, c_{N_f}], c_i \in \mathbf{C} \quad (3)$$

这 2 个变量的长度相同，其中 \mathbf{C} 代表复数域，数据调制变量是对输入数据进行星座映射处理后的数据。编码变量是对经星座映射后的发送数据或原始输入数据进行编码处理后的数据。这 2 个参数主要是生成进行欺骗式的干扰波形。

窗函数则是通过改变频谱抽头系数对波形的频谱进行整形：

$$w = [w_1, w_2, \dots, w_{N_f}], w_i \in \mathbf{C} \quad (4)$$

而正交变量是这 6 个变量中唯一只有相位的变量：

$$o = [o_1, o_2, \dots, o_{N_f}], o_i \in \mathbf{C}, |o_i| = 1 \quad (5)$$

通过放置一个线性相位使得符号流之间相互正交。

子载波分配变量(assign, a)和子载波使用变量(used, u)分别表示无人机群中的干扰机对子载波进行选择和使用。通过 N_f 点的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)，干扰机最初就可以利用 N_f 个子载波生成干扰波形。然而系统可能只是分配其中的一部分的子载波以生成相关载波的干扰波形，这个分配过程就由子载波分配变量来完成：

$$a = [a_1, a_2, \dots, a_{N_f}], a_i \in \{0, 1\} \quad (6)$$

式中：0 表示此子载波没有被分配给无人机发射干扰波形；1 表示此子载波被分配给该干扰机。利用 u 可以对能

使用的子载波进行标记:

$$u=[u_1, u_2, \dots, u_{N_f}], u_i \in \{0, 1\} \quad (7)$$

式中: 0 代表此子载波不可被无人机使用; 1 代表此子载波可以使用。

基于以上的 6 个波形设计变量, 第 k 个 SMSE 传输符号(S_k)的频域表达式为:

$$S_k = A_k \odot \Theta_k \odot F_k \quad (8)$$

式中矩阵 A_k 和矩阵 Θ_k 的大小为 $N_U \times N_F$, 其中, 矩阵的行代表干扰波形数, 即系统总共有 N_U 个干扰机, 矩阵的列代表子载波, 即系统总共有 N_F 个子载波。上式中矩阵 F 的大小也是 $N_U \times N_F$, 它用来表示对不同干扰机使用的子载波的分配情况。举例来说, $S_k(a, b)$ 就是表示干扰机 a 在子载波 b 上传输的信息。当只有一个干扰机时, 式(8)中的 A_k, Θ_k, F_k 的表达式是:

$$A_{1m} \in A = [A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1N_f}]_{1 \times N_f} \quad (9)$$

$$\Theta_{1m} \in \Theta = [\Theta_{11}, \Theta_{12}, \dots, \Theta_{1N_f}]_{1 \times N_f} \quad (10)$$

$$F_{1m} \in F = [a_1 u_1, a_2 u_2, \dots, a_{N_f} u_{N_f}]_{1 \times N_f} \quad (11)$$

式中: A_{1m}, Θ_{1m} 均为包含 N_f 个元素的列向量, 分别代表幅度和相位; F_{1m} 相当于无人机干扰模块上控制子载波使用频率情况的开关。

给出一个完整的表达式:

$$S_k[m] = a_m u_m c_m d_{m,k} w_m e^{j(\theta_{c_m} + \theta_{d_{m,k}} + \theta_{w_m} + \theta_{o_{m,k}})} \quad (12)$$

式中: $a_m u_m \in \{0, 1\}$; $\theta_{o_{m,k}} = [a_m u_m \sum_{i=0}^{m-1} a_i u_i] (\Delta \theta_{o_k})$; $\Delta \theta_{o_k} = (2\pi/P_u) \times k$ 。

通过在使用的子载波间放置一个线性相位使得子载波间相互正交, 这个变量根据分配变量 a 的分配情况来做出改变。式(12)表示 6 个设计波形变量描述出来的在第 m 个子载波上传输的第 k 个 SMSE 符号。

当系统中有多多个干扰机存在时, 即对于任意一个干扰机 v , 在第 m 个子载波上传输的第 k 个 SMSE 符号的频域表达式为:

$$S_k^{(v)}[m] = A_{m,k}^{(v)} \Theta_{m,k}^{(v)} F_m^{(v)} \quad (13)$$

式中的上角标(v)表示第 v 个干扰机。

SMSE 是一个含有 6 个参数的统一的数学框架。通过改变表达式的参数, 能够产生一系列的认知干扰波形。无人机上的 CR 平台通过频谱感知、智能决策来改变 SMSE 框架的参数。由于波形的传输是在时域进行的, 故要对 SMSE 频域表达式进行逆傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT), 得到下面的表达式:

$$S_k^{(v)}[n]_{1 \times 1} = \frac{2}{N_F} A_{m,k}^{(v)} F_m^{(v)} \cos(2\pi f_m t_n + \theta_{c_m}^{(v)} + \theta_{d_{m,k}}^{(v)} + \theta_{w_m}^{(v)} + \theta_{o_{m,k}}^{(v)}) \quad (14)$$

任意单个无人机在第 m 个子载波上传输的第 k 个 SMSE 波形的频域表达式已经由式(12)给出, 下面考虑多个无人机集群的情况, 即把 N_u 个无人机在第 m 个子载波上传输的第 k 个 SMSE 符号的表达式左右两边, 分别并行放进一个矩阵里, 这样, 就把单个无人机的 SMSE 表达式扩展成无人机集群的 SMSE 频域表达式。如式(15)所示。

$$\begin{bmatrix} S_k^{(1)}[m] \\ S_k^{(2)}[m] \\ \vdots \\ S_k^{(N_u)}[m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{m,k}^{(1)} \Theta_{m,k}^{(1)} F_m^{(1)}] \\ [A_{m,k}^{(2)} \Theta_{m,k}^{(2)} F_m^{(2)}] \\ \vdots \\ [A_{m,k}^{(N_u)} \Theta_{m,k}^{(N_u)} F_m^{(N_u)}] \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(13)从单个无人机扩展到多个无人机, 则式(15)可以扩展成下面的表达式:

$$S_k[n]_{1 \times 1} = \frac{2}{N_F} \sum_{v=0}^{N_u} \sum_{m=0}^{N_f-1} A_{m,k}^{(v)} F_m^{(v)} \cos(2\pi f_m t_n + \theta_{c_m}^{(v)} + \theta_{d_{m,k}}^{(v)} + \theta_{w_m}^{(v)} + \theta_{o_{m,k}}^{(v)}) \quad (16)$$

这是 SMSE 波形经过 IFFT 后的时域上的表达式，由以上公式可以看出，可以通过改变 6 个波形设计变量 (d, c, w, o, a, u) 来获得所需干扰波形，具有多样性特点。通过将具有特定频谱结构的波形在频域进行合成，最终生成相对应功能的认知干扰波形。

在后续仿真试验中，不同信噪比下、有无干扰下的误比特率是码元的信息量在传输系统中被丢失的概率，可表示为：

$$\text{误比特率} = \frac{\text{单位时间内系统传错的信息量(比特数)}}{\text{单位时间内系统传输的总信息量(总比特数)}} \quad (17)$$

3 仿真实验

本节对 SMSE 框架产生的认知干扰波形的性能进行验证。设定单音干扰波形和多音干扰波形的基带采样速率为 80 M，对于宽带干扰设定基带采样速率为 100 M，基带映射方式采用 BPSK。为了验证 SMSE 模型产生的认知干扰的干扰性能，在一共有 256 个子载波的 OFDM 系统传输 1×10^6 个比特位的 0,1 序列。通信信道模型为加性高斯白噪声信道，设定信噪比的范围为 0~10 dB。SMSE 模型具有灵活性，可以使用任意的子载波进行干扰波形的生成，假定已经获知对方通信的载波信息，通过加载 SMSE 模型产生针对性的干扰样式的波形。

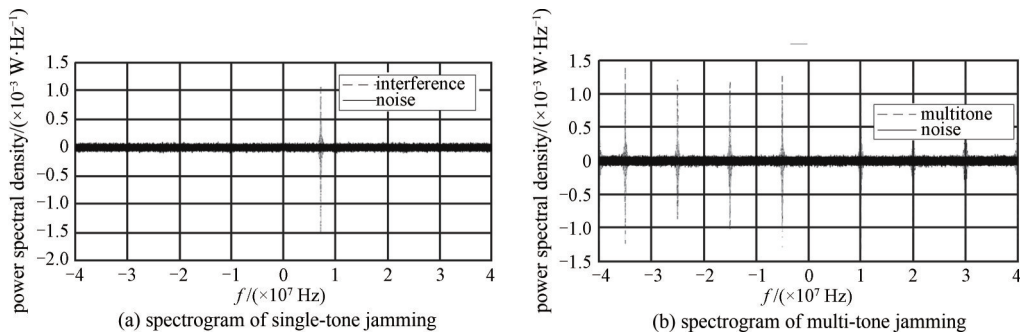


Fig. 4 Spectrogram of single-tone jamming and multi-tone jamming
图4 单音干扰和多音干扰的频谱图

验证 SMSE 模型产生的干扰波形的干扰性能。SMSE 模型产生的单音干扰波形和多音干扰波形的频谱如图 4 所示。图 4(a) 中红色线条是单音干扰的频谱图，SMSE 模型通过调整子载波的位置，可以自适应产生单音干扰波形。图 4(b) 中，SMSE 理论模型可以根据已知通信频载波频率的情况下，产生针对性的多音干扰。通过图 4 可以看出，SMSE 模型具有子载波参数的自适应性，可以在通信对抗领域指导认知干扰波形的生成。

为了验证 SMSE 模型产生干扰波形的理论的正确性，对通信的干扰仿真实验结果和理论曲线进行对比。接收端经过与发射端相反的逆变换，与发送端数据进行比较，得到不同信噪比下、有无干扰下的误比特率曲线。从图 5 中能够看出使用 BPSK 调制方式，单音干扰和多音干扰的误比特率曲线和理论曲线一致，证明了 SMSE 模型用于产生单音干扰波形和多音干扰波形理论的正确性；同时发现随着信噪比的增加，误比特率降低，信号传输效果更好。

图 6 为使用 SMSE 模型产生的不同宽带干扰的频谱图，图 6(a)~图 6(c) 依次为基于 SMSE 模型产生的全频带干扰波形、带外干扰波形和瞄准窄带干扰波形。图 6(c) 基于 SMSE 模型产生的瞄准窄带干扰波形在已知具体用频带宽的前提下，能够和图 6(a) 的全频带干扰波形达到相同的干扰效果，减小对干扰能量的消耗。

图 7 为不同宽带干扰下，误比特率的仿真实验结果对比曲线。从图中可以看出，SMSE 模型产生的全频带干扰和瞄准窄带干扰的误比特率曲线一致，SMSE 模型产生的带外干扰和无干扰情况下的误比特率曲线一致。结果表明，SMSE 模型可以有效产生不同干扰波形，并且具有正确的干扰结果。

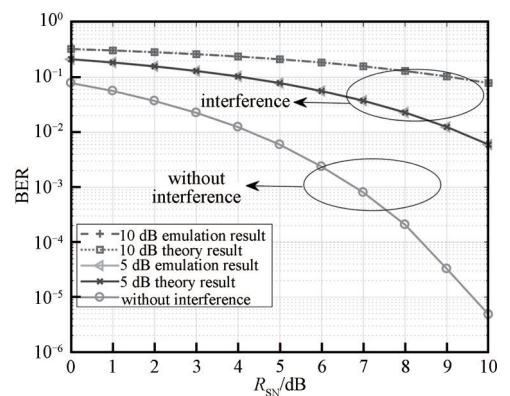


Fig.5 Simulation and theoretical comparison curves of single-tone interference/multi-tone interference
图5 单音干扰/多音干扰仿真与理论对比曲线

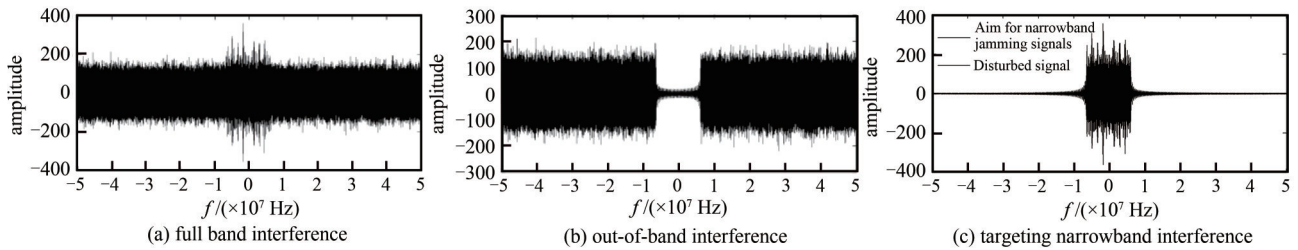


Fig.6 Spectrogram of broadband jamming
图 6 不同宽带干扰的频谱图

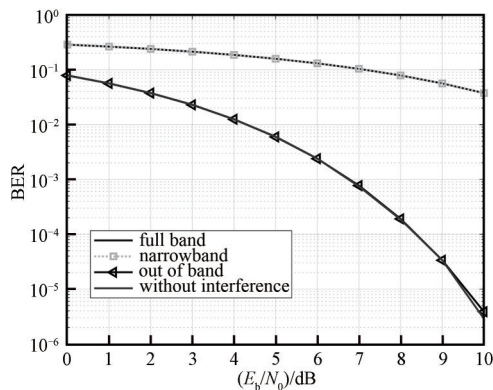


Fig.7 Contrast curves of simulated and theoretical values of modulated deceptive interference
图 7 不同宽带干扰的误比特率对比曲线

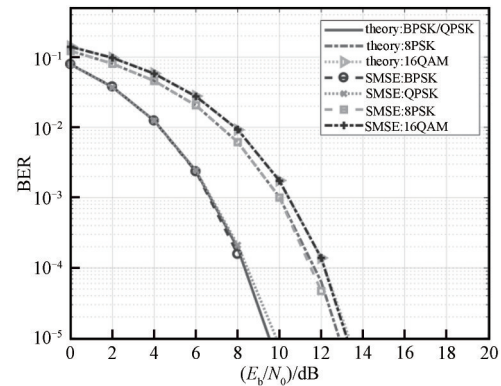


Fig.8 Contrast curves of simulated and theoretical values of modulated deceptive interference
图 8 调制欺骗式干扰与理论值对比曲线

通过比较不同信噪比下 SMSE 模型产生的不同调制欺骗式干扰波形与调制方式理论值的误比特率, 验证基于 SMSE 的认知干扰模型产生调制欺骗式干扰的正确性。从图 8 能够看出, SMSE 模型针对 BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM 这 4 种调制方式产生的调制欺骗式干扰, 在不同信噪比下的误比特率与对应方式的理论值基本一致。基于 SMSE 干扰波形产生的模型, 在面对不同形式的目标通信信号时, 能够准确、有效地产生干扰波形。

4 结论

对于压制式干扰中的单音干扰、多音干扰、窄带干扰和宽带干扰, 基于 SMSE 的干扰波形发生器可以针对性地产生指定频率、指定带宽、指定形状的波形以抑制目标通信信号, 实现压制干扰的目的。对于欺骗式干扰, SMSE 模型针对 BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM 这 4 种调制方式产生的调制欺骗式干扰在不同信噪比下的误比特率与对应方式的理论值十分吻合。本文提出的基于 SMSE 的干扰波形发生器在面对不同形式的目标通信信号时, 具有自适应性, 可以灵活地产生干扰波形, 为在认知电子战中应对复杂多变的电磁环境并对目标通信进行干扰提供了新的思路和方法, 推进了无人机群在通信对抗领域的应用。

参考文献:

- [1] DOU Z, SI G, LIN Y, et al. A power allocation algorithm based on cooperative Q-learning for multi-agent D2D communication networks[J]. *Physical Communication*, 2021, 47(1):101370. doi:10.1016/j.phycom.2021.101370.
- [2] 李业振, 梁仙灵, 金荣洪, 等. 集群通信与无线局域网多天线共口径设计[J]. *电波科学学报*, 2016, 31(2):211-218. (LI Yezhen, LIANG Xianling, JIN Ronghong, et al. Design of trunked communication and WLAN multiple antenna used share-aperture technology[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(2):211-218.) doi:10.13443/j.cjors.2015061002.
- [3] 王沙飞, 鲍雁飞, 李岩. 认知电子战体系结构与技术[J]. *中国科学:信息科学*, 2018, 48(12):1603-1613. (WANG Shafei, BAO Yanfei, LI Yan. The architecture and technology of cognitive electronic warfare[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2018, 48(12):1603-1613.) doi:10.1360/N112018-00153.
- [4] LIN Yun, WANG Meiyu, ZHOU Xianglong, et al. Dynamic spectrum interaction of UAV flight formation communication with priority: a deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 6(3):892-903. doi:10.1109/TCCN.2020.2973376.
- [5] 刘松涛, 雷震烁, 温镇铭, 等. 认知电子战研究进展[J]. *探测与控制学报*, 2020, 42(5):1-15. (LIU Songtao, LEI Zhenshuo, WEN

- Zhenming, et al. A development review on cognitive electronic warfare[J]. *Journal of Detection & Control*, 2020,42(5):1-15.)
- [6] WANG Meiyu, LIN Yun, TIAN Qiao, et al. Transfer learning promotes 6G wireless communications: recent advances and future challenges[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2021,70(2):790-807. doi:10.1109/TR.2021.3062045.
- [7] 甄君, 梁超, 夏俊清. 信息对抗侦察系统开放架构计算环境[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015,13(4):590-595. (ZHEN Jun, LIANG Chao, XIA Junqing. An open architecture computing environment for information countermeasure reconnaissance system[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015,13(4):590-595.)
- [8] 武忠国. 认知电子战干扰波形设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018. (WU Zhongguo. Jamming waveform design for cognitive electronic warfare[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2018.)
- [9] 张冠杰. 认知通信电子战关键技术分析[J]. *舰船电子对抗*, 2019,42(1):40-43,107. (ZHANG Guanjie. Analysis of key technologies of cognitive communication electronic warfare[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2019,42(1):40-43,107.) doi:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2019.01.008.
- [10] 张春磊, 杨小牛. 认知电子战与认知电子战系统研究[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2014,9(6):551-555. (ZHANG Chunlei, YANG Xiaoniu. Research on the cognitive electronic warfare and cognitive electronic warfare system[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2014,9(6):551-555.)
- [11] 倪丛云, 黄华. 认知电子战系统组成及其关键技术研究[J]. *舰船电子对抗*, 2013,36(3):32-35. (NI Congyun, HUANG Hua. Research on composition and key technology of cognitive electronic warfare system[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2013,36(3):32-35.) doi:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2013.03.004.
- [12] 贾鑫, 朱卫纲, 曲卫, 等. 认知电子战概念及关键技术[J]. *装备学院学报*, 2015,26(4):96-100. (JIA Xin, ZHU Weigang, QU Wei, et al. Concept of cognitive electronic warfare and its key technology[J]. *Journal of Equipment Academy*, 2015,26(4):96-100.)
- [13] 张建华, 李振亚. 机载天线方向图回归研究[J]. *电波科学学报*, 2015,30(4):777-782. (ZHANG Jianhua, LI Zhenya. Regression analysis of airborne antenna pattern[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015,30(4):777-782.)
- [14] 杨鸿杰. 基于强化学习的智能通信干扰决策技术研究[D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2019. (YANG Hongjie. Research on intelligent communication jamming decision-making technology based on reinforcement learning[D]. Beijing: Electronic Science Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, 2019.)
- [15] 陈涛, 张颖, 黄湘松. 基于强化学习的自适应干扰波形设计[J]. *空天防御*, 2021,4(2):59. (CHEN Tao, ZHANG Ying, HANG Xiangsong. Adaptive interference waveform design based on reinforcement learning[J]. *Air & Space Defense*, 2021,4(2):59.)
- [16] 赵凡, 金虎. 基于GAN的通信干扰波形生成技术[J]. *系统工程与电子技术*, 2021,43(4):1080-1088. (ZHAO Fan, JIN Hu. Communication jamming waveform generation technology based on GAN[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021,43(4):1080-1088.)
- [17] CHAKRAVARTHY V, LI X, WU Z, et al. Novel overlay/underlay cognitive radio waveforms using SD-SMSE framework to enhance spectrum efficiency-part I: theoretical framework and analysis in AWGN channel[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009,57(12):3794-3804.
- [18] CHAKRAVARTHY V, LI X, ZHOU R, et al. Novel overlay/underlay cognitive radio waveforms using SD-SMSE framework to enhance spectrum efficiency-part II: analysis in fading channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010,58(6):1868-1876.
- [19] DOU Zheng, SI Guangzhen, LIN Yun, et al. An adaptive resource allocation model with anti-jamming in IoT network[J]. *IEEE Access*, 2019(7):93250-93258.
- [20] NIJSURE Y, CHEN Y, BOUSSAKTA S, et al. Novel system architecture and waveform design for cognitive radar radio networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012,61(8):3630-3642.
- [21] 逢天洋, 李永贵, 牛英滔, 等. 通信电子干扰的分类与发展[J]. *通信技术*, 2018,51(10):7-14. (PANG Tianyang, LI Yonggui, NIU Yingtao, et al. Classification and development of communication electronic jamming[J]. *Communications Technology*, 2018,51(10):7-14.)

作者简介:

刘玉超(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁频谱管理和复杂电磁环境建模领域技术。
email:lyc8541832@163.com.

李雨倩(1995-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为信号处理、电磁频谱管理等。

郭兰图(1982-), 男, 在读博士研究生, 研究员, 主要研究方向为频谱管理、复杂电磁环境建模等。