

针对短波 3G-ALE 信号的改进脉冲干扰性能研究

吴培培^{1,2}, 张 旻¹, 史英春¹

(1. 国防科技大学电子对抗学院, 合肥, 230037; 2. 32031 部队, 河南开封, 475000)

摘要 针对美军新一代短波 3G-ALE 信号为提高其协议信息传输可靠性而在通信链路层进行的多重数据编码, 提出一种改进脉冲干扰方法。首先利用公开的伪随机扰码, 建立对周期脉冲信号进行伪随机预加扰的干扰模型; 之后推导信号接收处理公式, 在此基础上分析脉冲占空比、脉冲周期等干扰参数, 以及扰码失步、干扰频偏等因素对于干扰性能的影响; 最后仿真干扰实验并得到相关结论。实验结果验证改进脉冲干扰对于 3G-ALE 信号协议信息可靠传输的干扰有效性, 在设置脉冲占空比 75%、脉冲周期使得脉冲持续时间等于整数倍符号长度 T_B 时的干扰效果最佳; $2T_B$ 以内的扰码失步、80 Hz 以内的干扰频偏导致的干扰效果下降, 则可以通过提高干信比较好地予以克服。

关键词 短波 3G-ALE; 协议信息; 数据编码; 伪随机扰码; 脉冲干扰; 预加扰

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.017

中图分类号 TN975 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0103-08

Research on the Performance of Modified Pulse Jamming Against HF 3G-ALE Signal

WU Peipei^{1,2}, ZHANG Min¹, SHI Yingchun¹

(1. Electronic Countermeasure Institute, National University of Defense Technology, Hefei, 230037, China; 2. Unit 32031, Kaifeng 475000, Henan, China)

Abstract: In view of the new generation HF 3G-ALE signal applied in US Army to multiple data encoding on communication link layer to improve the transmission reliability of its protocol information, a modified pulse jamming method is proposed against such multiple data encoding. Firstly, a jamming model affected on the periodic pulse signal which can be in advance scrambled by public pseudo random scrambling sequence is built up. Then, on the basis of formula derivation for signal receiving and processing, the impacts on jamming performance are analyzed from some jamming parameters such as pulse duty ratio and pulse period, along with other parameters such as scrambling sequence's missynchronization and jamming frequency offset. Finally, this jamming method is carried on simulation experiment, resulting in some relevant conclusions. The experiment results prove the effectiveness of the modified pulse jamming against the reliable transmission of 3G-ALE signal protocol information. The jamming effect is the best when the pulse duty ratio is set 75% and the pulse period is set to make pulse duration equal to integer multiple symbol time length T_B . The decline of jamming effect resulting from scrambling sequence's missynchronization

收稿日期: 2018-07-02

基金项目: 安徽省自然科学基金(1908085QF291)

作者简介: 吴培培(1995—), 男, 安徽铜陵人, 硕士, 助理工程师, 主要从事通信干扰研究。E-mail: 321455652@qq.com

引用格式: 吴培培, 张旻, 史英春. 针对短波 3G-ALE 信号的改进脉冲干扰性能研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 103-110. WU Peipei, ZHANG Min, SHI Yingchun. Research on the Performance of Modified Pulse Jamming Against HF 3G-ALE Signal[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 103-110.

within $2T_B$ or jamming frequency offset within 80 Hz, can be improved fairly by increasing the jamming-to-signal power ratio.

Key words: HF 3G-ALE; protocol information; data encoding; pseudo random scrambling sequence; pulse jamming; advanced scrambled

以第三代自动链路建立(3G-ALE, Third Generation Automatic Link Establishment)技术为基础的第三代短波自适应通信,被广泛应用于美军与北约军事通信中^[1]。其采用固定格式的3G-ALE信号实现链路建立、业务管理与数据交互等通信过程,并在通信链路层进行了卷积编码、交织编码、Walsh正交扩频与伪随机加扰等多重数据编码,有效提高了其协议信息传输可靠性^[2-4]。现有的常规非合作通信干扰手段,其针对3G-ALE信号的干扰效能有限,因此迫切需要研究针对性的有效干扰技术。

常规通信干扰,例如音频干扰、噪声干扰、调频干扰等,其优势在于干扰实施简单^[5],但是由于干扰信号与3G-ALE信号的相关性较差,干扰功率在通信接收端经解扰码、解扩频等处理后被分散降低,干扰效果大大减弱^[6-7]。转发式干扰能够提高干扰信号与通信信号的相关性,一定程度上克服了干扰效果的减弱^[8-9],但是当截获通信信号信噪比较差时,噪声成为转发式干扰信号中的主要成分,使得其与通信信号的相关性弱化,干扰效果降低。因此在文献[10~11]中,提出根据扩频序列重构一个类似于通信信号的干扰信号,可以大大提高其相关性,有效克服解扩频的干扰抑制作用,干扰效果显著提高。文献[12]则在此基础上进行伪随机加扰,能够克服解扰码对于干扰效果的抑制,干扰效果得到进一步提高,但是对于干扰信号扰码失步与频偏较为敏感。此外,文献[13~16]指出脉冲干扰由于具有更高的峰值干扰功率,也是一种针对扩频通信的有效干扰,并且对于存在纠错编码的正交扩频信号具有较好的干扰效果^[17-18],但是由于扰码的存在,其对3G-ALE信号的干扰有效性有待进一步研究。

本文针对短波3G-ALE信号在通信链路层进行的多重数据编码,提出一种破坏协议信息可靠传输的改进脉冲干扰方法,并针对干扰性能展开研究。

1 基本理论

1.1 链路层数据编码

在美军标MIL-STD-188-141B中,针对短波3G-ALE信号的链路层数据编码做了详细规定,提

供了相关编码器结构、编码方式与使用的固定序列^[19]。以用于自动链路建立ALE协议的突发波形BW0为例,链路层数据编码流程见图1。

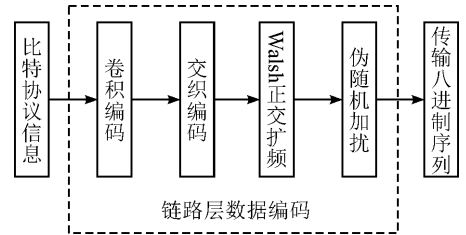


图1 链路层数据编码流程

ALE协议信息是26 bits长度的比特流数据。纠错编码采用(2,1,7)的卷积编码与 4×13 的块交织编码;Walsh正交扩频采用0/4的Walsh扩频序列与(64,4)的扩频映射方式;伪随机加扰采用256符号长度的八进制伪随机扰码序列与模8和运算的加扰方式。最终形成832符号长度的八进制序列,用于8PSK调制发送与信道传输。

提供给3G-ALE信号突发波形BW0的八进制伪随机扰码序列为:

```
0 2 4 3 3 6 4 5 7 6 7 0 5 5 4 3 5 4 3 7 0 7 6 2 6
2 4 6 7 2 4 7 5 5 7 0 7 3 3 3 7 3 3 1 4 2 3 7 0 2 7 7
3 5 1 0 1 4 0 5 0 0 0 0 6 5 0 1 2 7 6 5 5 2 7 3 3 3 2
1 2 5 6 1 3 4 2 1 0 1 2 3 6 4 7 5 2 2 6 2 7 6 5 2 4 6
5 4 7 2 5 1 0 0 7 7 3 5 4 2 1 4 2 7 0 3 4 5 0 0 7 7 3
5 4 2 1 4 2 7 0 3 4 0 1 0 5 2 6 0 3 5 1 0 5 1 5 2 5 6
3 2 3 7 1 2 2 0 7 1 3 6 4 2 6 2 7 4 3 7 6 7 2 3 1 7 4
1 5 1 5 4 7 1 1 2 3 6 7 7 6 6 1 2 2 4 1 7 7 5 5 4 7 7
5 0 7 3 7 5 7 7 5 0 6 6 6 1 3 4 4 4 0 3 3 2 1 4 5 4 5
3 1 1 1 2 5 1 7 1 5 7 2 0 0 6
```

1.2 3G-ALE信号模型

短波3G-ALE信号收发原理见图2。

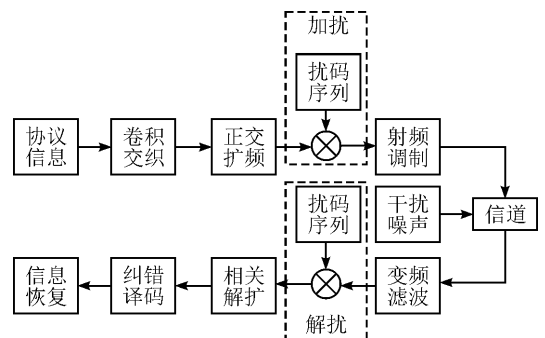


图2 3G-ALE信号收发原理

通信发送端的 3G-ALE 信号可以表示为:

$$s(t) = w(t)b(t)\exp(j\omega_c t) \quad (1)$$

式中: ω_c 为发送信号射频载波角频率; $b(t)$ 为受到伪随机扰码调制的基带扰码信号:

$$b(t) = \exp[j\varphi(t)] \quad (2)$$

式中: $\varphi(t)$ 为伪随机扰码映射的相位。

$w(t)$ 表示基带正交扩频信号:

$$w(t) = \exp[j \frac{2\pi}{8} \sum_{m=0} W_i(t - mNT_B)] \quad (3)$$

式中: $W_i(t - mNT_B)$ 为在 Walsh 正交扩频时, 第 m 组 4 bits 信息 $Q_i(m)$ 映射得到的第 m 个 64 符号长度 Walsh 扩频序列, $i \in (1, 2, \dots, 16)$ 表示某一种扩频映射关系; $N = 64$ 为 Walsh 扩频序列的符号长度; T_B 为单位符号长度。

通信接收端通过解扰码以及相关解扩, 能够有效分散降低干扰噪声等无用信号功率, 并通过纠错译码实现协议信息的恢复。以上处理使得通信接收端能够获得一定的接收处理增益, 有效提高了协议信息传输可靠性, 见图 3。

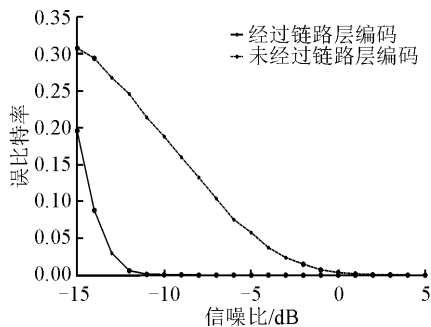


图3 协议信息传输性能曲线

2 干扰设计

在自动链路建立过程中, 通信发送端持续发送 BW0 波形的 3G-ALE 信号, 这就为通信干扰方检测信号的存在并实施干扰提供了可能。

2.1 干扰信号模型

本文提出一种改进脉冲干扰。首先产生周期脉冲信号, 之后根据公开的伪随机扰码调制产生基带扰码信号, 并与周期脉冲信号相乘以实现对其的伪随机预加扰, 最后通过射频调制与功率放大形成干扰信号。干扰信号产生流程见图 4。

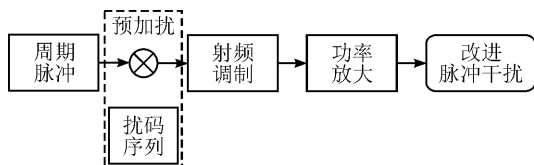


图4 干扰信号产生流程

基于伪随机预加扰的思想, 结合脉冲信号表达式^[15], 提出的改进脉冲干扰信号可以表示为:

$$j(t) = A_j [b(t - \tau) \sum_{n=0} p(t - nT)] \exp(j\omega_j t) \quad (4)$$

式中: A_j 为干扰信号线性放大增益; τ 为干扰信号与 3G-ALE 信号的扰码失步; $p(t)$ 为具有一定占空比 α 的单脉冲信号, T 为其重复周期, n 表示第 n 个单脉冲; ω_j 为干扰信号射频载波角频率。

通过伪随机预加扰, 改进的脉冲干扰信号能够克服通信接收端解扰码的干扰抑制作用, 解扰码后的脉冲干扰成分也能够有效干扰存在卷积编码、交织编码的正交扩频信号, 因此理论上对于 3G-ALE 信号协议信息可靠传输具有较好的干扰效果。下面推导通信接收端的信号接收处理公式, 在此基础上分析干扰性能。

2.2 信号接收处理

3G-ALE 信号经过信道传输, 受到加性高斯白噪声与人为改进脉冲干扰的影响, 通信接收端接收信号可以表示为:

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

式中: $n(t)$ 表示信道零均值加性高斯白噪声。根据图 2 所示的 3G-ALE 信号收发原理, 通信接收端首先对接收信号 $r(t)$ 去载波处理, 得到基带接收信号:

$$r_1(t) = r(t)\exp(-j\omega_c t) = w(t)b(t) + A_j \exp(j\Delta\omega t) b(t - \tau) \sum_{n=0} p(t - nT) + n(t)\exp(-j\omega_c t) \quad (6)$$

式中: $\Delta\omega = \omega_j - \omega_c$ 为干扰信号载频频偏。通信接收端使用基带扰码信号 $b(t)$, 在时钟同步的条件下对基带接收信号 $r_1(t)$ 进行解扰:

$$r_2(t) = r_1(t)b^*(t) = w(t)b(t)b^*(t) + A_j \{ \exp(j\Delta\omega t) b(t - \tau) b^*(t) \} \sum_{n=0} p(t - nT) + n(t)b^*(t)\exp(-j\omega_c t) \quad (7)$$

之后, 通信接收端使用 16 种 Walsh 扩频序列调制产生的基带本地信号, 从信号同步位置开始, 每 64 符号长度对解扰后的基带接收信号 $r_2(t)$ 进行 16 次相关运算, 通过对相关运算值的判决完成一次相关解扩。第 m 次相关解扩的第 i 个相关运算值可以表示为:

$$R_{m,i} = r_2(t)\Omega(t - mNT_B)\exp[j \frac{2\pi}{8} W_i(t)] \quad (8)$$

式中: $\Omega(t)$ 为宽度 NT_B 的矩形窗函数。通过对第 m 次相关解扩得到的 16 个相关运算值进行大数判决, 即可得到该 64 符号长度的接收信号所对应的 4 bits 信息:

$$Q_i(m) | \hat{i} = \arg \max_{i \in (1, 2, \dots, 16)} R_{m,i} \quad (9)$$

在完成相关解扩后,通过解交织与 Viterbi 卷积译码等纠错译码处理,最后将解扩得到的比特信息还原得到 26 bits 协议信息。

2.3 干扰性能分析

对于式(7)中第 1 项,有:

$$w(t)b(t)b^*(t) = w(t)\exp[j\varphi(t)] \cdot \exp[-j\varphi(t)] = w(t) \quad (10)$$

因此该项表示的基带接收信号,其解扰结果即为基带正交扩频信号 $w(t)$,作为有用信号项在后续被正确解调处理。

对于式(7)中第 3 项,零均值加性高斯白噪声的功率经过解扰码、解扩频等处理后被分散降低,因此对于协议信息接收解调造成的影响小。

式(7)中第 2 项为改进脉冲干扰信号项,下面具体分析其对于协议信息接收解调造成的影响。重写该项为:

$$j_2(t) = A_j \{ \exp(j\Delta\omega t) \cdot b(t-\tau)b^*(t) \} \cdot \sum_{n=0} p(t-nT) \quad (11)$$

2.3.1 脉冲占空比与周期的影响

假设不存在扰码失步与干扰频偏,即 $\tau=0, \Delta\omega=0$,则将式(11)改写为:

$$j_2(t) = A_j \sum_{n=0} p(t-nT) \quad (12)$$

由式(12)可以看出,在扰码同步且频率对准的理想条件下,改进脉冲干扰的脉冲干扰成分能够通过通信接收端的前端滤波与解扰码处理,直接作用于基带正交扩频信号的相关解扩。

对式(12)作 FFT 变换:

$$J_2(\omega) = \frac{2\pi A_j \alpha}{T} \sum_{n=0} \text{Sa}(\frac{n\pi\alpha}{T}) \delta(\omega - \frac{2n\pi}{T}) \quad (13)$$

由式(13)可以看出,脉冲干扰成分的频谱是由离散在 $\frac{2n\pi}{T}$ 频点处、幅度 $\frac{2\pi A_j \alpha}{T} \text{Sa}(\frac{n\pi\alpha}{T})$ 的冲激所组成的,涉及到 A_j, α, T 这 3 个参数,因此干扰效果主要决定于脉冲占空比 α 与脉冲周期 T ^[13,15]: 提高脉冲占空比能够提高脉冲频谱冲激幅度,进而提高干扰效果,但一般只将其设置为 75% 左右,这样既能产生有效干扰,同时尽可能缩短脉冲持续时间以降低通信干扰方被发现的概率;脉冲持续时间通常等于整数倍符号长度,能够造成连续错误以降低纠错译码性能,因此当脉冲占空比确定时,需要对脉冲周期进行适当调整。

2.3.2 扰码失步的影响

假设仅存在扰码失步 τ ,则将式(11)改写为:

$$j_2(t) = A_j b(t-\tau)b^*(t) \sum_{n=0} p(t-nT) \quad (14)$$

其中:

$$b(t-\tau)b^*(t) = \exp[j\varphi(t-\tau)]\exp[-j\varphi(t)] \neq 1 \quad (15)$$

事实上,改进脉冲干扰之所以能够克服通信接收端解扰码的干扰抑制作用,是建立在干扰信号与 3G-ALE 信号扰码同步的基础上。但是当扰码失步时,干扰信号首先即难以通过解扰码处理,干扰功率经过基带扰码信号的解扰后被分散降低,解扰后的干扰成分已非脉冲干扰成分,难以有效影响基带正交扩频信号的相关解扩,导致干扰效果下降^[12]。甚至当出现较大扰码失步时,作用于基带正交扩频信号上的干扰成分仅相当于白噪声,干扰效果将会显著下降。

2.3.3 干扰频偏的影响

假设仅存在干扰频偏 $\Delta\omega$,则将式(11)改写为:

$$j_2(t) = A_j \exp(j\Delta\omega t) \sum_{n=0} p(t-nT) \quad (16)$$

根据信号 FFT 变换性质:

$$x(t)\exp(j\Delta\omega t) \Leftrightarrow X(\omega - \Delta\omega) \quad (17)$$

式中: $X(\omega)$ 是 $x(t)$ 的 FFT 变换。因此当存在干扰频偏 $\Delta\omega$ 时,式(16)中的脉冲干扰成分被从基带搬移至 $\Delta\omega$ 角频率处,导致其高频部分在下变频时由于落在低通滤波器带外而被滤除,干扰信号功率有所损失,与不存在干扰频偏相比,改进脉冲干扰效果下降。

3 干扰仿真实验

以通信接收端的 3G-ALE 信号协议信息解调误比特率作为干扰性能指标,仿真提出的改进脉冲干扰实验。实验参数设置见表 1。

表 1 仿真实验参数设置

实验参数	参数设置
调制样式	8PSK
协议信息/bits	26
码元速率/Baud	2 400
副载频/Hz	1 800
系统采样率/Hz	9 600
信道信噪比/dB	0
Monte Carlo 实验次数	200

定义干信比:

$$\text{JSR} = 10 \lg(\frac{P_j}{P_s}) \quad (\text{dB}) \quad (18)$$

表示通信接收信号中,改进脉冲干扰信号功率 P_j 与 3G-ALE 信号功率 P_s 的比值。

3.1 干扰性能实验

根据 2.3 节理论分析结果,依次仿真脉冲占空比、脉冲周期等干扰参数,以及干扰信号扰码是否同步、频率是否对准等干扰因素,对于改进脉冲干扰性

能的影响,并对实验结果做出具体分析。

在产生改进脉冲干扰信号时,脉冲占空比与脉冲周期是可控参数,因此首先仿真研究有效发挥干扰性能目标下的干扰参数设置问题。

3.1.1 脉冲占空比的影响实验

首先假设干扰信号扰码同步并且频率对准,将脉冲周期设置为 16 符号长度。仿真不同脉冲占空比条件下的改进脉冲干扰效果,见图 5。

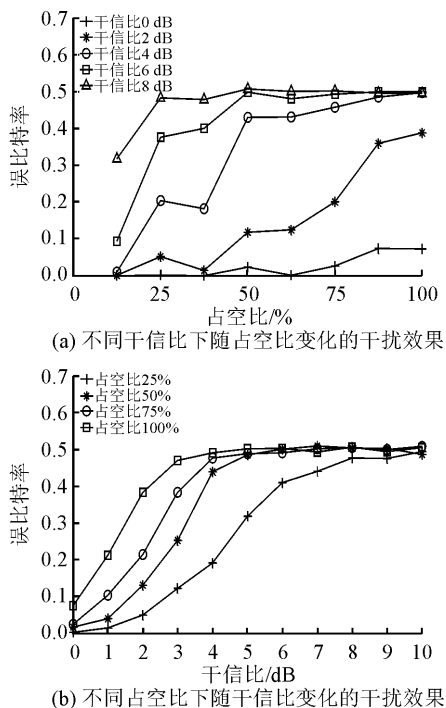


图 5 不同脉冲占空比条件下的改进脉冲干扰效果

分析图 5 结果可以得到以下结论:

1) 干信比一定时,干扰效果随着脉冲占空比的提高而提高,这与式(12)的分析结果一致,即占空比的提高能够提高脉冲频谱幅度,进而提高干扰效果,并且在高干信比时达到稳定状态,干信比越高,越容易达到稳定干扰效果;

2) 脉冲占空比一定时,干扰效果随着干信比的提高而提高,并且当干信比提高到一定程度,占空比的影响弱化,较低占空比参数也能取得较好干扰效果。

3.1.2 脉冲周期的影响实验

同样假设干扰信号扰码同步并且频率对准,将脉冲占空比设置为 75%。仿真不同脉冲周期条件下的改进脉冲干扰效果,见图 6。

分析图 6 结果可以得到以下结论:

1) 当脉冲周期设置为 4、8、12、16 符号长度,即在 75% 脉冲占空比条件下使得脉冲持续时间等于整数倍符号长度时,干扰效果较好,并且随着干信比的提高而达到稳定状态;

2) 当设置脉冲周期使得脉冲持续时间等于非整数倍符号长度时,干扰效果较差,只有当干信比提高到一定程度,干扰才能起到效果,而这种干信比的提高将大大增加干扰功率的负担。

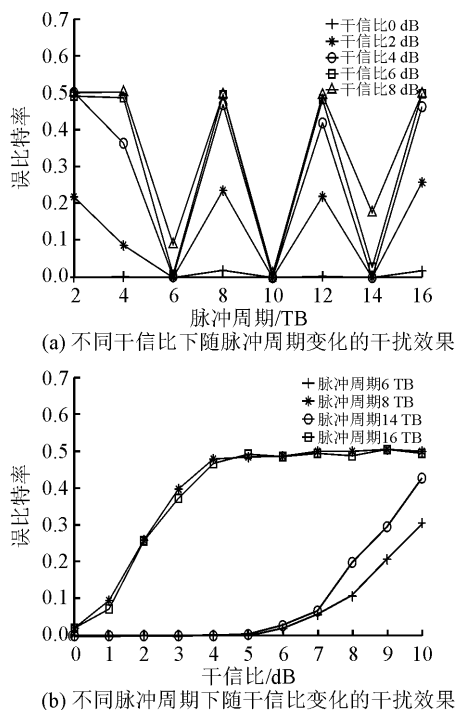


图 6 不同脉冲周期条件下的改进脉冲干扰效果

通过以上 2 组实验,为干扰参数的合理设置提供了参考,但是在产生改进脉冲干扰信号时,还存在由于对 3G-ALE 截获信号参数估计不准确而导致的扰码失步与干扰频偏,并且相对而言这样的干扰因素不可控,因此接下来仿真研究其对于干扰性能的影响。

3.1.3 扰码失步的影响实验

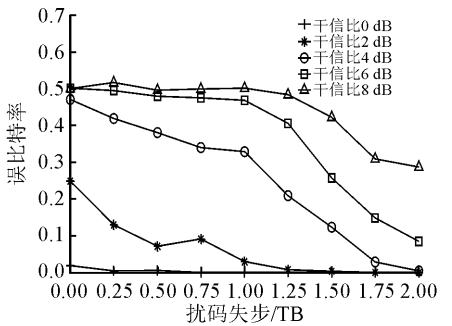
假设干扰信号频率对准但是扰码失步,在合理设置干扰参数的基础上,设置脉冲占空比为 75%、脉冲周期为 16 符号长度。仿真不同扰码失步条件下的改进脉冲干扰效果,见图 7。

分析图 7 结果可以得到以下结论:

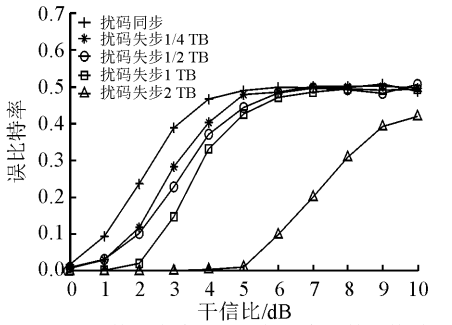
1) 在扰码同步条件下,改进脉冲干扰能够发挥最大干扰效果,并且随着干信比的提高而达到稳定状态;

2) 当存在扰码失步时,干扰效果随着扰码失步的增大而下降,这与式(14)的分析结果一致,即扰码失步的增大,将使得改进脉冲干扰信号难以克服解扰码的干扰抑制作用,导致干扰效果下降,并且在低干信比时会急剧恶化,甚至不能起到干扰效果;

3) 提高干信比能够一定程度上克服 2 符号长度以内的扰码失步的影响,但是扰码失步越大,相应地对于干信比的要求越高。



(a) 不同干信比下随扰码失步变化的干扰效果

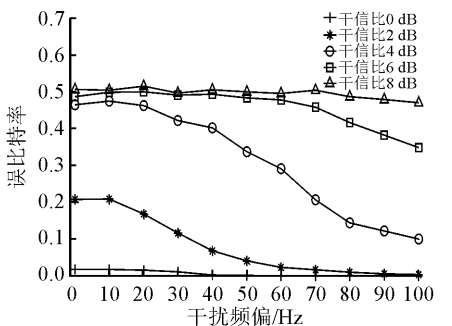


(b) 不同扰码失步下随干信比变化的干扰效果

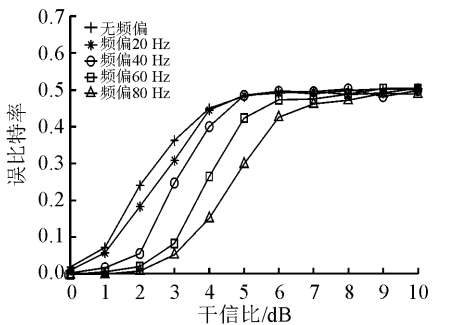
图7 不同扰码失步条件下的改进脉冲干扰效果

3.1.4 干扰频偏的影响实验

假设干扰信号扰码同步但是存在频偏,在合理设置干扰参数的基础上,设置脉冲占空比为75%、脉冲周期为16符号长度。仿真不同干扰频偏条件下的改进脉冲干扰效果,见图8。



(a) 不同干信比下随干扰频偏变化的干扰效果



(b) 不同干扰频偏下随干信比变化的干扰效果

图8 不同干扰频偏条件下的改进脉冲干扰效果

分析图8结果可以得到以下结论:

1)在频率对准条件下,改进脉冲干扰能够发挥最大干扰效果,并且随着干信比的提高而达到稳定状态;

2)当存在干扰频偏时,干扰效果随着干扰频偏的增大而下降,这与式(16)的分析结果一致,即干扰频偏的增大,将使得改进脉冲干扰信号高频成分更多地被低通滤除,导致干扰效果下降,并且干信比越低,干扰效果下降得越剧烈;

3)相比扰码失步,干扰频偏的影响更容易通过干信比的提高予以克服,干信比提高到10 dB以上时,即使存在较大的80 Hz的干扰频偏也能够取得较好干扰效果。

以上4组改进脉冲干扰性能的仿真实验表明:在设置干扰信号脉冲占空比为75%的基础上,调整脉冲周期使得脉冲持续时间等于整数倍符号长度,能够取得最佳干扰效果;而干扰参数的设置不合理以及扰码失步、干扰频偏的增大会降低干扰效果;干扰信号功率的提高,能够在一定程度上克服干扰效果的下降。

3.2 干扰对比实验

3.2.1 理想条件下干扰对比

首先在理想条件下,即将干扰参数分别设置为脉冲占空比75%、脉冲周期16符号长度,并且不存在扰码失步与干扰频偏,比较改进脉冲干扰与音频干扰、噪声干扰、调频干扰等常规通信干扰以及信号重构干扰、转发式干扰,8PSK调制干扰等相干通信干扰的干扰效果,见图9。

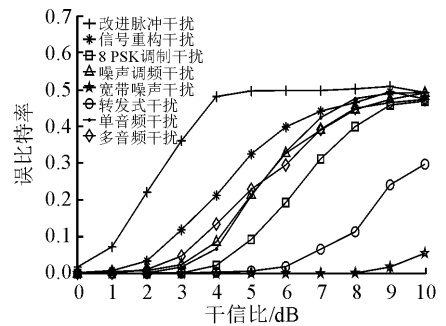


图9 不同干扰样式干扰效果对比(理想条件)

其中,信号重构干扰、8PSK调制干扰也均是在相同的不存在扰码失步与干扰频偏的理想条件下,噪声调频干扰的参数调频灵敏度 $15 \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{V})$,宽带噪声干扰的带宽 3 kHz ^[20],转发式干扰的转发信号时长16符号长度、转发延时16符号长度、干扰频率对准,单音频干扰对准中心频率,多音频干扰则在中心频率附近 $-90 \sim 90 \text{ Hz}$ 范围内存在有5个随机干扰频点。

3.2.2 非理想条件下干扰对比

其次在干扰参数可控,但是由于3G-ALE截获信号参数估计误差导致干扰信号扰码、频率非理想条件下,即分别设置脉冲占空比75%、脉冲周期16

符号长度,而同时在确保能够发挥干扰效果的基础上,设置适当的信号参数估计误差,即存在1符号长度的扰码失步、20 Hz的干扰频偏,比较改进脉冲干扰与上述常规通信干扰以及相同条件下相干通信干扰的干扰效果,见图10。

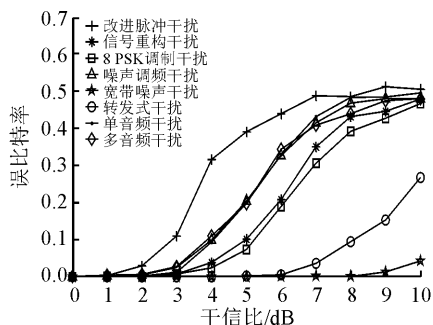


图10 不同干扰样式干扰效果对比(非理想条件下)

其中,信号重构干扰、8PSK调制干扰、转发式干扰也均存在相同程度的失步与频偏,其余干扰的参数设置与3.2.1节实验一致。

以上2组不同干扰样式的干扰对比实验表明:改进脉冲干扰具有明显的干扰优势。在相同理想与非理想条件下的干扰效果均优于常规通信干扰,这是因为通过伪随机预加扰,使得干扰信号能够较好克服通信接收端解扰码的干扰抑制作用。

非理想条件下干扰效果下降,但是仍优于相同条件下的相干通信干扰,这是因为尽管干扰功率被部分分散降低,但是其中的脉冲干扰成分能够产生连续错误,降低通信接收端纠错译码性能,使得仍具有部分干扰效果;信号重构干扰等相干通信干扰在非理想条件下还存在对相关解扩干扰的不足,因此干扰效果已不及改进脉冲干扰。

而在实际应用中,利用信号同步算法通常能够将扰码同步误差、载频估计误差限制在较小范围内^[21],因此提出的改进脉冲干扰是可行的。

4 结语

针对链路层数据编码有效提高短波3G-ALE信号协议信息传输可靠性的问题,提出一种破坏协议信息可靠传输的改进脉冲干扰,并对干扰性能展开深入研究。首先建立了周期脉冲信号伪随机预加扰的干扰模型,之后在推导信号接收处理公式的基础上理论分析了脉冲占空比、脉冲周期、扰码失步、干扰频偏等因素对于干扰性能的影响,最后通过仿真实验验证了分析结果并得到相关结论。本文为实际短波3G-ALE信号的干扰提供了参考借鉴,具有一定的工程应用价值。

参考文献(References):

- [1] BILAL A, SUN G M. Automatic Link Establishment for HF Radios[C] // The 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science. Beijing, China; [s. n.], 2017: 640-643.
- [2] LIU L K, XING K CH, SUN Y M, et al. Blind Estimation of Scrambling Code's Period in Scrambled M-Ary Orthogonal Spread Spectrum System[C] // 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai, China; [s. n.], 2012: 1-4.
- [3] ZHANG Z H Y, TIAN F C H, ZENG F X, et al. Complementary M-Ary Orthogonal Spreading OFDM Architecture for HF Communication Link[J]. IET Communications, 2017, 11(2): 292-301.
- [4] 吴培培, 张旻, 史英春. 短波3G-ALE信号链路层数据编码分析[J]. 通信技术, 2018, 51(6): 1248-1253. WU P P, ZHANG M, SHI Y CH. Analysis on Link Layer Data Coding of HF 3G-ALE Signal[J]. Communications Technology, 2018, 51(6): 1248-1253. (in Chinese)
- [5] XIE D G, LI J, WANG CH, et al. Analysis and Simulation of Typical Mode of Jamming on Data Link Communication System[C] // 5th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Chengdu, China; [s. n.], 2013: 530-533.
- [6] WANG H, GUO J B, WANG Z J. Evaluation of Security for DSSS Under Repeater Jamming[C] // IEEE International Conference on Communications. Glasgow, UK; [s. n.], 2007: 5525-5530.
- [7] XIE H, HU J, YIN W Y. Anti-Jamming Performance Simulation and Analysis of Tactical Data Link Communication System[C] // International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Gothenburg, Sweden; [s. n.], 2014: 1096-1101.
- [8] PAN X Y, WANG W, FENG D J, et al. Repeater Jamming Against LFM Radars Based on Spectrum-Divided[C] // IET International Radar Conference. Xi'an, China; [s. n.], 2013: 1-7.
- [9] 卫麟. 针对OFDM通信系统电子对抗干扰方式的研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. WEI L. Research on Electronic Countermeasure Against OFDM Communication System[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [10] KORJIK V, BIKKENIN R. Performance Analysis of The Enhanced PN Spread Spectrum System in The Presence of Jamming by Modulated Retransmitted Signal[C] // IEEE 5th International Symposium on

- Spread Spectrum Techniques and Applications. Sun City, South Africa;IEEE, 1998: 809-811.
- [11] SHI Q Z H, WU S H, HUANG J J, et al. A Novel Jamming Method Against LFM Radar Using Pseudo-Random Code Phase Modulation[C] // IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Xiamen, China; IEEE, 2017: 1-5.
- [12] 姚俊楠, 曹晶秋, 刘鑫. 多进制正交扩频系统的灵巧干扰[J]. 电子对抗, 2009(3): 1-5.
YAO J N, CAO J Q, LIU X. Smart Jamming in N-ary Orthogonal Spread Spectrum Modulation System[J]. Electronic Warfare, 2009(3): 1-5. (in Chinese)
- [13] 宋石磊, 于振海, 赵国庆. 直扩通信干扰技术分析与比较[J]. 中国电子科学研究院学报, 2006, 1(5): 415-417.
SONG S L, YU ZH H, ZHAO G Q. The Analysis and Comparison of Interference Methods of Direct Sequence Spread Spectrum System[J]. Journal of CAE-IT, 2006, 1(5): 415-417. (in Chinese)
- [14] AMURU S, BUEHRER R M. Optimal Jamming Against Digital Modulation[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2015, 10(10): 2212-2224.
- [15] 苏煜. 对 MUOS 卫星通信系统的压制式干扰仿真与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
SU Y. Simulation and Analysis of Blanket Jamming to MUOS Satellite Communication System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] ZHANG Y H, HUANG W H, LI P, et al. Interference Mechanism of High Repetitive Frequency UWS-EMP to Communication Receiver[C] // IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Beijing, China;IEEE, 2017: 1-5.
- [17] LEKKAKOS D, ROBERTSON R C. Performance Analysis of a Link-16/JTIDS Compatible Waveform Transmitted over a Channel with Pulse-Noise Interference[C] // IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. Victoria, BC, Canada;IEEE, 2009: 29-34.
- [18] 丁亚非, 李文生. 脉冲干扰直接序列扩频系统性能分析[J]. 计算机仿真, 2010, 27(5): 9-12.
DING Y F, LI W SH. Analysis of Pulse Jamming Capabilities for Direct Sequence Spread Spectrum Communication[J]. Computer Simulation, 2010, 27(5): 9-12. (in Chinese)
- [19] MIL-STD-188-141B; Interoperability and Performance Standards for Medium and High Frequency Radio Systems[S]. U. S. Department of Defense, 1999.
- [20] QIN Z Q, WANG J L, CHEN J, et al. Link Quality Analysis Based Channel Selection in High Frequency Asynchronous Automatic Link Establishment: A Matrix Completion Approach[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(2): 1957-1968.
- [21] 张越. 8PSK 信号同步捕获性能分析[J]. 电信技术研究, 2014(5): 34-38.
ZHANG Y. Performance Analysis of Synchronous Acquisition for 8PSK Signals[J]. Research on Telecommunication Technology, 2014(5): 34-38. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)