

文章编号: 2095-4980(2022)03-0228-07

宙斯盾雷达典型信号处理方法仿真分析

沈健君, 刘晓斌, 艾小锋, 赵 锋, 李永祯

(国防科技大学 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 宙斯盾雷达使用的典型信号脉内多载频具有抗截获和抗干扰的突出优势, 但其信号处理方法还不是非常明确。以脉内四载频信号为例, 对其信号特性及处理方式进行了研究, 基于检测概率最优原则提出了可能存在的处理方法, 给出了处理框架和流程, 特别是对存在瞄准式干扰的情况, 采用干扰检测算法剔除受干扰子脉冲, 通过信号级仿真比较了两种处理方法在不同场景下的检测性能优劣, 所得结论为脉内多载频信号的处理应用提供参考。

关键词: 宙斯盾雷达; 脉内多载频; 抗干扰; 瞄准式干扰; 检测性能

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021314

Simulation analysis of typical signal's processing methods of Aegis radar

SHEN Jianjun, LIU Xiaobin, AI Xiaofeng, ZHAO Feng, LI Yongzhen

(The State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, School of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: As the typical signal of Aegis radar, the intra-pulse multi-carrier frequency signal has awesome advantages of anti-interception and anti-jamming. However, its signal processing method is unclear. Taking the intra-pulse four-carrier frequency signal as an example, its signal characteristics and processing methods are studied. Based on the principle of optimal detection probability, the possible processing methods are proposed, and the processing framework and process are given. Especially for the case of aiming interference, the interference detection algorithm is employed to eliminate the interfered sub pulses. The detection performance of the two processing methods in different scenarios is compared through signal level simulation. The conclusion provides a reference for the processing and application of intra-pulse multi-carrier frequency signal.

Keywords: Aegis radar; intra-pulse multi-carrier frequency; anti-jamming; aiming jamming; detection performance

宙斯盾系统中雷达使用的典型信号—脉内多载频信号一般工作在 S 波段, 其作用距离可达 640 km, 既能对作用范围内的目标进行精准探测, 又具有良好的抗干扰性能及抗波形截获的能力。其工作使用的典型信号为脉内多载频信号, 即发射的脉冲内存在多个子脉冲, 每个子脉冲内部为相位编码, 子脉冲之间伴有随机的频率编码。相比传统的单载频相位编码信号, 脉内多载频相位编码信号具有更好的抗干扰性能, 其中以抗瞄准式干扰的能力较为突出^[1]。

对雷达进行干扰时, 噪声压制干扰具有普适性的优点, 即不需要详细了解雷达的信号特点和处理信号的环节^[2]。而干扰机的发射功率跟干扰信号的带宽成正比, 要提高干扰信号的功率利用率, 就需要瞄准雷达信号的频段^[3-4], 产生信号载频所在频点、与信号带宽相当的窄带干扰信号, 实现对雷达信号的压制, 即瞄准式干扰^[5-7]。作为一种精确的压制性干扰方式, 瞄准式干扰的干扰功率集中, 干扰频带较窄, 干扰效率较宽带噪声干扰更高^[8-9]。当使用瞄准式干扰对脉内多载频信号进行干扰时, 由于其脉冲内既有频率编码又有相位编码, 脉冲内容容易出现凹点, 尤其是不同频点子脉冲的连接处, 这容易对侦察设备造成混乱, 使其容易将子脉冲宽度误认为是整个脉宽, 进而使得干扰设备只针对其中一个子脉冲进行干扰, 所以单频点的瞄准式干扰将很难对其整个脉冲进行有效的压制, 多载频信号相比单载频的相位编码信号具有更好的抗瞄准式干扰的能力^[10]。

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62001481; 61890542)

当前，国内对脉内多载频信号的研究多集中在信号参数、编码方式等方面，根据相关资料，脉内多载频信号的编码方式为频率编码加相位编码，频率编码一般为 2 个或 4 个频点，其中以 4 个频点居多，所以通常称之为四载频信号，子脉冲内部采用的是 M 序列编码信号，相位编码的码元宽度为 0.1 μs，信号脉冲宽度为 51.1 μs，对应码元数为 511，脉冲占空比约为 1%。然而对于该信号不同条件下的具体处理方式及不同处理方式下的检测性能和抗干扰能力还缺少相应的研究。本文以“宙斯盾”雷达主要使用的脉内四载频信号为典型信号对脉内多载频信号的处理方式进行研究。结合对于该信号的已有研究及相关资料，首先分析其时频域特性及脉压特性，然后给出了存在瞄准式干扰情况下的两种可行的处理方式，并基于恒虚警检测(Constant False Alarm Rate, CFAR)技术分别对比分析了在这两种不同处理方式下，信号的 CFAR 处理结果、检测性能及其抗瞄准式干扰的能力^[1]，为电子信息仿真系统使用脉内多载频信号进行仿真研究、在室内场景模拟使用“宙斯盾”系统的探测信号提供了理论依据。

1 脉内多载频信号模型

已知“宙斯盾”雷达使用的脉内多载频信号为一个脉冲内部包含 2 个载频或 4 个载频，其中以 4 个载频居多，因为正好对应 4 个处理通道，本文以四载频为例进行研究。由于四载频信号的每个子脉冲内部均为相位编码信号，所以考虑第 $i(1 \leq i \leq 4)$ 个子脉冲的调制相位为 φ_m ，假设四载频信号第 i 个子脉冲的载频为 f_i ，则第 i 个子脉冲的信号可以写为：

$$S_i(t) = \frac{1}{\sqrt{T_p}} \sum_{m=1}^M x_{m_i} e^{j2\pi f_i t} \text{rect} \left[\frac{t - (i-1)T_p - (m_i-1)t_b}{t_b} \right] \quad (1)$$

式中： T_p 为子脉冲信号的时宽； M 为子脉冲码元数； $x_{m_i} = \exp(j\varphi_{m_i})$ ； t_b 为码元宽度。当采用二相编码时， φ_{m_i} 一般取 0 或 π ，此时有 x_{m_i} 为 1 或 -1。 $f_i = f_0 + \text{Label}_i \cdot \Delta f$ ， $\text{Label}_i(1 \leq i \leq 4)$ 为随机的频率编码，其取值为 0~3， Δf 为子脉冲之间的频率间隔，该频率间隔至少大于子脉冲的带宽，即

$$\Delta f \geq \frac{1}{t_b} = B \quad (2)$$

完整的四载频信号的时域表达式为：

$$S_{\text{four}}(t) = \frac{1}{\sqrt{T_p}} \sum_{i=1}^4 \sum_{m=1}^M x_{m_i} e^{j2\pi f_i t} \text{rect} \left[\frac{t - (i-1)T_p - (m_i-1)t_b}{t_b} \right] \quad (3)$$

由于相位编码信号的带宽取决于其码元的宽度，即单个子脉冲的带宽为 $1/t_b$ ，而子脉冲之间的累积方式为非相干的，所以通常认为其有效探测带宽就是 $1/t_b$ 。图 1 为其一般性的时频分析结果，可以看出，4 个子脉冲的频段互不相交，且频率点随机分布，频率间隔大于或等于 10 MHz。

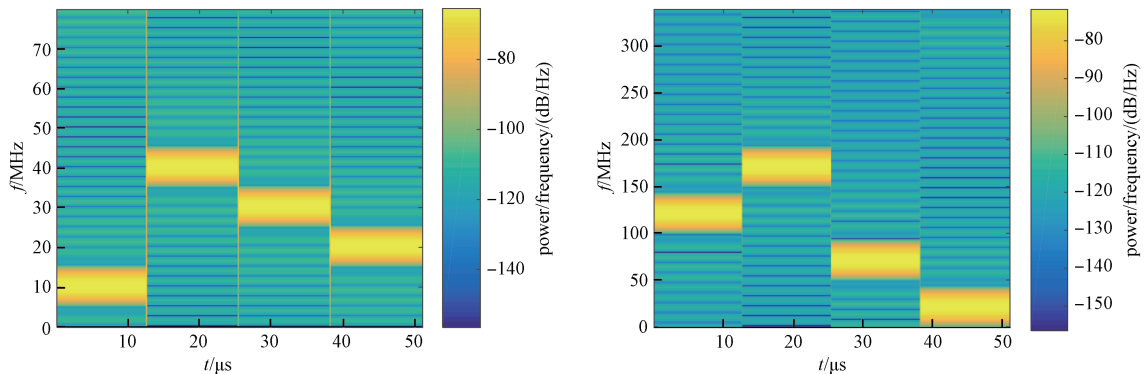


Fig.1 Time-frequency analysis of four-carrier frequency signal

图 1 四载频信号时频分析图

2 脉内多载频处理方法

2.1 非相参累积处理

现代雷达一般使用相关处理的方式对回波进行脉压，脉内多载频信号也是如此。以四载频信号为例，将中频信号中包含的子脉冲送入4个处理通道后，分别进行相位检波、匹配滤波处理，最后对其进行非相参累积、CFAR处理、门限检测等操作。具体处理过程如图2所示。

根据文献[10]，相位编码信号的匹配滤波处理通常使用相关运算，所以第*i*个子脉冲的匹配滤波处理的结果 $p_i(t)$ 可以表示为：

$$p_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_i(u)v_i^*(u+t)du \tag{4}$$

式中 $v_i(t)$ 为参考信号。

4个通道的匹配滤波结果经非相参累积后得到信号 $P_{\Sigma}(t)$ 为：

$$P_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^4 p_i(t) = \sum_{i=1}^4 \int_{-\infty}^{\infty} S_i(u)v_i^*(u+t)du \tag{5}$$

结合式(3)，将 $S_i(t)$ 代入式(5)可以得到累积后的匹配滤波结果：

$$P_{\Sigma}(t) = \frac{1}{T_p} \sum_{i=1}^4 \sum_{m_i=1}^M \sum_{p_i=1}^P x_{m_i} x_{p_i}^* \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left[\frac{u-(m_i-1)t_b}{t_b}\right] \text{rect}\left[\frac{u+t-(p_i-1)t_b}{t_b}\right] du = \begin{cases} \frac{1}{T_p} \sum_{i=1}^4 \sum_{m_i=1}^M \sum_{p_i=1}^P x_{m_i} x_{p_i}^* \cdot [t_b - |t-(p_i-m_i)t_b|], & |t-(p_i-m_i)t_b| < t_b \\ 0, & |t-(p_i-m_i)t_b| \geq t_b \end{cases} \tag{6}$$

非相参累积得到的结果 $P_{\Sigma}(t)$ 再经过恒虚警处理、门限检测等步骤后即可得出检测结果。

2.2 抗瞄准式干扰处理

由于脉内多载频信号脉冲容易出现凹点，所以当敌方使用瞄准式干扰时，很容易只针对其中一个子脉冲进行瞄准^[12]。若对被干扰的子脉冲进行检测发现并剔除，而对剩下的子脉冲进行累积，则能够进一步地提高其抗瞄准式干扰的能力^[13]。

该处理方法仅对单频点的瞄准式干扰有效，当干扰方的侦察设备正确地侦察出发射信号的脉冲宽度、频率点个数而使用宽带的压制干扰或多点频点的瞄准式干扰时，脉内多载频信号将会有多个子脉冲或所有子脉冲受到干扰，此时干扰检测并剔除受干扰子脉冲的方式将失效。然而，此时的干扰需要覆盖的带宽将是单点频瞄准式干扰的*N*倍以上(*N*为频点数)，其干扰的功率利用率将有所下降，对脉内多载频信号的压制效果也将下降。

与2.1节中类似，中频信号输入后，首先将4个子脉冲分别进行相位检波、匹配滤波处理，经包络检波后再分别进行恒虚警处理，根据4个通道的恒虚警处理(CFAR)结果对其进行受干扰分析，判断其是否受到瞄准式干扰，若有子脉冲受到瞄准式干扰，则剔除受到干扰的子脉冲，对剩下子脉冲的恒虚警处理的数据进行累积之后再行进行门限检测等操作^[14]。具体处理过程如图3所示。

该处理方式的关键在于经恒虚警处理后，如何判别是否受到瞄准式干扰以及哪个频点受到了干扰。以CA-CFAR(单元平均恒虚警)为例，将*M*个参考单元(被测单元的两边各*M/2*个)的输出平均，将参考单元内的噪声均值*Z*与门限系数 α 相乘便能得到门限值，如果

$$Y \geq \alpha Z \tag{7}$$

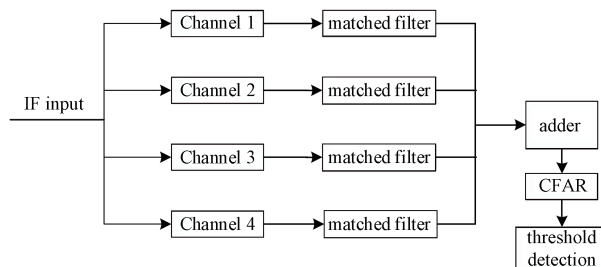


Fig.2 Direct non-coherent accumulation processing of four-carrier frequency signal

图2 四载频信号直接非相参累积处理

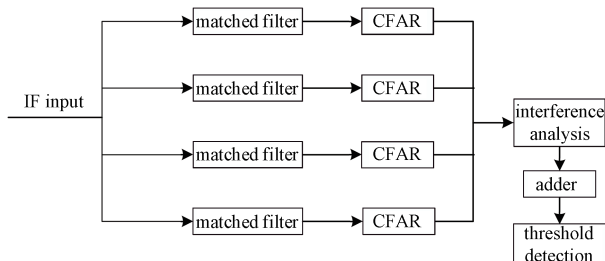


Fig.3 Anti-targeting interference processing of four-carrier frequency signal

图3 四载频信号抗瞄准式干扰处理

则判定在检测单元内检测到目标，其中， Y 输入待判定的信号^[15]。根据文献[16]，对于有 4 个载频的脉内多载频信号，虚假概率 P_{fa} 与门限系数 α 之间的关系为：

$$P_{fa} = \frac{1}{(1+\alpha)^{4M}} \sum_{k=0}^3 \frac{1}{k!} \frac{\Gamma(4M+k)}{\Gamma(4M)} \left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^k \quad (8)$$

此时定义一个受干扰的指标 β ， β 为所有得到的信号脉压峰值 Y_{max} 与噪声均值的最大值 Z_{max} 的比值，即

$$\beta = \frac{Y_{max}}{Z_{max}} \quad (9)$$

显然，当信号受到干扰时， β 的值减小，当信号受到瞄准式干扰时，被瞄准的频点所在的子脉冲的指标 β 将明显低于其余 3 个指标，此时只需给定一个关于指标 β 的判别门限系数 λ 便可筛选出受瞄准干扰的子脉冲。

具体使用均值比较的判别算法。当 4 个子脉冲分别进行恒虚警处理后，如图 4 所示，当多载频信号受到瞄准式干扰而其干扰的带宽又小于子脉冲的载频间隔 Δf 时，4 个通道的信号便只有图 4(b) 所示的子脉冲受到了压制性干扰，图 4(b) 中的恒虚警处理结果与图 (a)、(c)、(d) 中的处理结果存在明显差异。根据 4 个通道的恒虚警处理结果可以得到受干扰的指标 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 。假设 4 个指标中的最小值为 β_{min} ，此时定义其他 3 个指标的均值为参考的指标 β_{ref} ，其表达式为：

$$\beta_{ref} = \frac{(\sum_{i=1}^4 \beta_i - \beta_{min})}{3} \quad (10)$$

若 4 个指标中的最小值 β_{min} 小于判别门限系数 λ 与参考指标 β_{ref} 的乘积时，便判定其受到了瞄准式干扰；否则判定其未受到窄带瞄准式干扰。即判定其受到瞄准式干扰的标准为：

$$\beta_{min} < \lambda \beta_{ref} \quad (11)$$

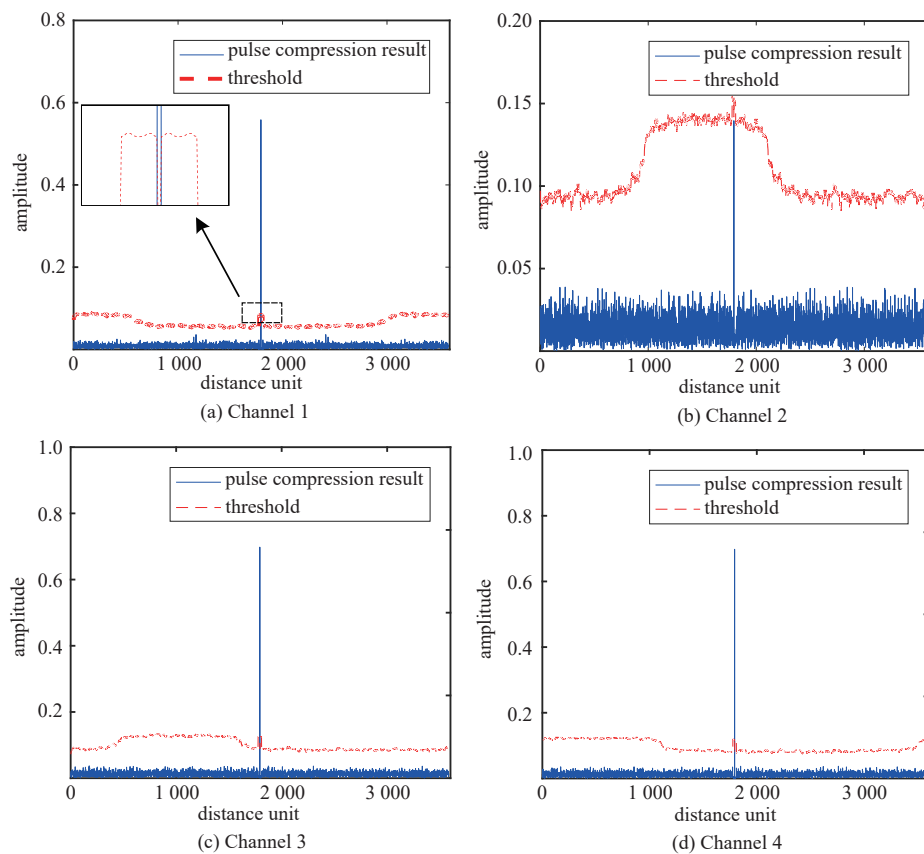


Fig.4 Results of four channels by CFAR processing separately

图 4 四个通道分别 CFAR 处理结果

3 仿真实验及结果分析

实验对存在瞄准式干扰时 2.1 节及 2.2 节中的两种处理方式分别进行了仿真验证, 仿真信号样式为脉内四载频信号, 使用信号的码元宽度为 $0.1 \mu\text{s}$, 即信号带宽 B 为 10 MHz, 子脉冲之间的频率点间隔 Δf 为 40 MHz, 不同处理方式下的脉压结果、恒虚警检测结果及其检测性能结果的对比分析如 3.1 节、3.2 节所示; 为验证 2.2 节中对筛选受干扰子脉冲的判定标准的准确性并得到差值门限 λ 的取值与判定正确率之间的关系, 实验使用蒙特卡洛方法, 分别对不同干信比条件下的回波信号及是否存在瞄准式干扰的判定结果进行了仿真, 其仿真结果如 3.3 节所示。

3.1 CFAR 检测结果

在有高斯噪声的背景下, 对脉内四载频信号进行瞄准式干扰仿真, 瞄准式干扰对准信号的某一个频率点, 干扰使用窄带噪声, 其带宽设置为信号带宽的 3 倍, 即 $B_j = 30 \text{ MHz}$, 取干信比 (Jamming-to-Signal power Ratio, JSR) 为 16 dB, 以确保能够完全覆盖子脉冲所在的频段, 形成压制干扰的效果。

对比 2.1 节中处理方式下的恒虚警检测结果与 2.2 节中经电子干扰分析后再求和的检测结果, 如图 5 所示:

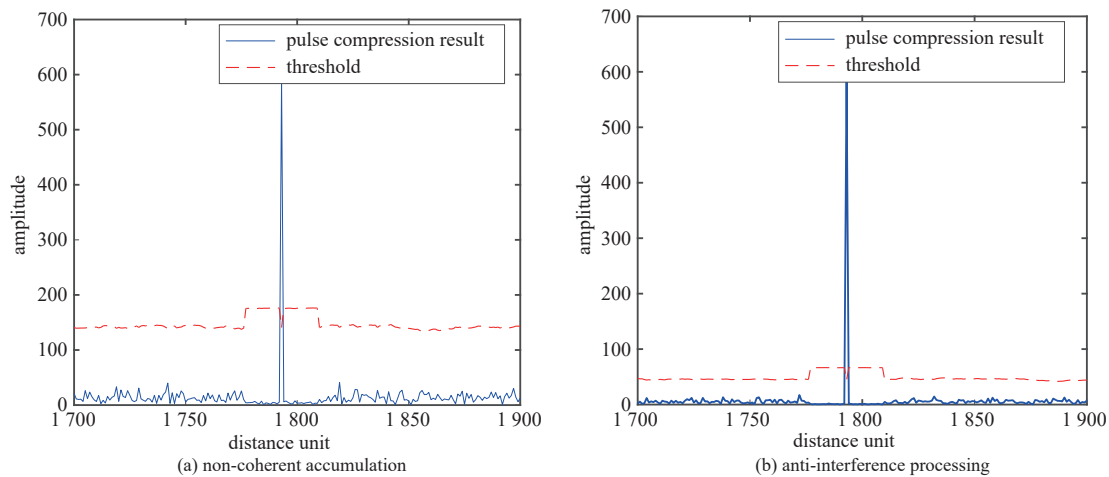


Fig.5 CFAR detection results under two processing methods

图5 两种处理方式下的CFAR检测结果

图 5(a) 为直接非相参累积处理后恒虚警检测的结果, 图 5(b) 为 4 个通道分别经恒虚警处理、电子干扰分析并剔除受干扰的子脉冲后, 再进行非相参累积得到的恒虚警检测结果。显然, 2.2 节中的处理方式具有更好的抗瞄准式干扰的能力, 能够更好地对目标进行有效探测。

3.2 检测概率

为了对比两种处理方式的检测性能, 使用蒙特卡洛方法进行仿真^[17]。仿真中, 存在瞄准式干扰, JSR 分别为 6 dB, 10 dB, 14 dB, 18 dB, 虚警率取为 10^{-14} , 在背景噪声功率不同的情况下分别进行仿真实验, 得到的检测曲线如图 6 所示。

图 6 中, 红色虚线为不同干信比条件下使用 2.1 节中直接非相干累积的处理方式得到的检测曲线, 蓝色实线为不同干信比条件下使用 2.2 节中剔除受干扰的子脉冲后再累积的处理方式得到的检测曲线。显然, 当干信比达到 14 dB 时, 第二种处理方式下的检测概率总是高于第一种处理方式, 当存在瞄准式干扰的情况下, 其检测性能明显优于直接非相干累积的处理方式, 即其抗瞄准式干扰的能力更强。而当干信比小于 14 dB 时, 由于干扰的能量较小, 对这个脉冲的压制效果较差, 此时剔除受干扰的子脉冲后, 将仅有 3 个子脉冲参与累积, 根据文献 [18], 相当于损失了大约 1.5 dB 的累积信噪比改善因子, 所以相同信噪比条件下其检测概率要低于第一种处理方式。所以当存在较强的瞄准式压制干扰时, 使用干扰检测并剔除受干扰子脉冲的方式是可以提高检测性能的。

3.3 干扰分析

为了验证 2.2 节中对于是否存在瞄准式干扰的判定方法的实用性, 同时得到判别门限系数与判别正确率之间的关系, 使用蒙特卡洛方法进行仿真。在大量的仿真中, 仅对部分仿真中的回波添加瞄准式干扰, 瞄准其中一个子脉冲。在对接收回波的信号处理模块, 对每一个回波进行瞄准式干扰判别并根据设定的是否添加干扰的标签得出判别正确与否, 最后根据统计得到判别正确的次数和蒙特卡洛仿真总次数即可得到不同判别门限系数下的正确率。

干信比分别设置为 0 dB,4 dB,8 dB,12 dB, 仿真得到的判别门限系数与判别正确率的关系曲线如图 7 所示。

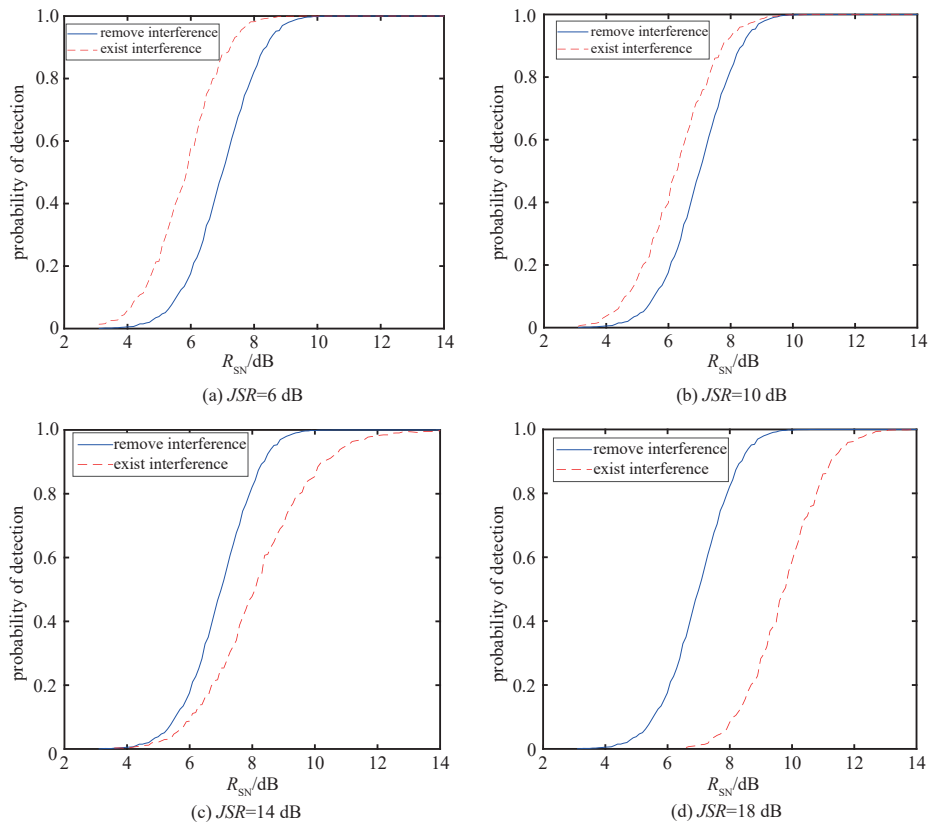


Fig.6 Detection curves under two processing methods

图6 两种处理方式下的检测曲线

从仿真结果可以看出, 不同干信比条件下判别门限系数 λ 与正确率之间的关系也不同, 但均能在判别系数为 0.65 左右取到最高正确率且正确率接近 1, 所以判别门限系数 λ 的取值在 0.65 左右即可。

4 结论

本文针对雷达脉内多载频信号的特性, 基于检测概率最大准则和抗干扰准则, 提出了两种可能的处理方式, 研究了不同的处理方式下其检测性能及抗干扰能力, 通过仿真实验对比, 发现当干扰较强时, 根据多个通道的恒虚警检测结果剔除受干扰的子脉冲后再进行累积检测的处理方式相比直接累积检测可以进一步提高抗瞄准式干扰的能力。论文对脉内多载频信号的处理方法及不同方法的优劣进行了深入分析, 研究结论为电子对抗中侦察、识别、干扰敌方宙斯盾雷达典型信号提供了技术支撑, 为电子信息仿真系统使用脉内多载频信号进行仿真、在室内场景模拟使用宙斯盾雷达的典型探测信号提供了理论依据。

参考文献:

[1] HUA R,QIU C. Research on jamming efficiency and measures against mono-pulse radar[C]// 2015 IEEE Advanced Information Technology,Electronic and Automation Control Conference(IAEAC). Chongqing,China:IEEE, 2015:883-886.

[2] 刘东青,孙陈刚,姜磊,等. 电子战干扰机干扰信号建模与仿真分析[J]. 雷达与对抗, 2020,40(3):6-10. (LIU Dongqing,SUN Chengang,JIANG Lei,et al. Modeling and simulation analysis of jamming signal of electronic warfare jammer[J]. Radar and Countermeasures, 2020,40(3):6-10.)

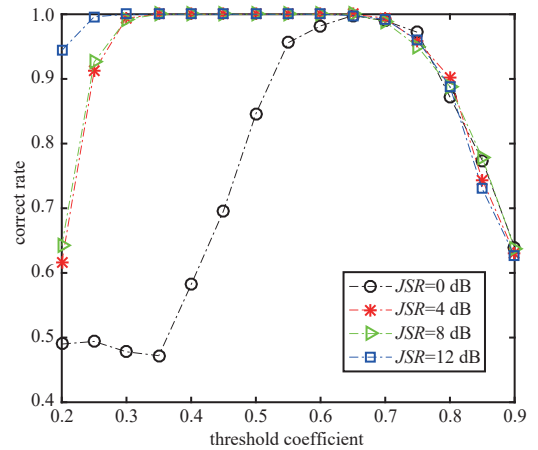


Fig.7 The relationship between interference discrimination coefficient λ and discrimination accuracy

图7 干扰判别门限系数与判别正确率的关系

- [3] 胡中泽,曹菲. 单脉冲制雷达导引头抗瞄准式干扰性能[J]. 四川兵工学报, 2012,33(12):18–20. (HU Zhongze,CAO Fei. The anti-sighting jamming performance of monopulse radar seeker[J]. Acta Sichuan Armory Engineering, 2012,33(12):18–20.)
- [4] IQBAL Y,JAWAD M. An effective coherent noise jamming method for deception of wideband LFM radars[C]// 17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology(IBCASP). Pakistan:[s.n.], 2020:622–626.
- [5] TU Y C,ZHAO H C,ZHOU X G. Performance analysis of anti-aiming noise AM jamming for pseudo-random code phase modulation and PAM combined fuze[C]// 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Shanghai,China:[s.n.], 2007:1171–1174.
- [6] GARNAEV A,TRAPPE W,HOU Y T, et al. Spectrum attacks aimed at minimizing spectrum opportunities[C]// 2017 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing(ICASSP). New Orleans,Louisiana,USA:IEEE, 2017:2092–2096.
- [7] MA X,YANG X,JIN X, et al. A digital coherent frequency hopping anti-jamming receiver based on IIR[C]// 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference(ITNEC). Chongqing, China: IEEE, 2020: 458–463.
- [8] CHEN J,NI G,HE C, et al. Coherent jamming method for wideband radar with time modulated technology[C]// 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. Montreal, Canada: IEEE, 2020:1885–1886.
- [9] YU J,NIE W,ZHOU M, et al. Scattered wave deception jamming against squint SAR using frequency diverse array[C]// 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference(APMC). Hong Kong,China:IEEE, 2020:979–981.
- [10] 郑秀明,夏一凡,王志锐,等. 风廓线雷达中自适应抗干扰技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(3):391–396. (ZHENG Xiuming, XIA Yifan, WANG Zhirui, et al. Adaptive anti-jamming technology in wind profiler radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(3):391–396.)
- [11] LEVANON N. Radar signals[M]. Hoboken,New Jersey,US:John Wiley and Sons Ltd, 2004.
- [12] SAPRONOV D I,KAMENSKIY I V. The application of the joint range and speed estimation method in short-range radars using ultra-wideband signals with a pseudo-random frequency coding[C]// 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Moscow,Russia:[s.n.], 2020:1–4.
- [13] SOLODKY G, LONGMAN O, VILLEVAL S, et al. CDMA-MIMO radar with the tansec waveform[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020(99):1–1.
- [14] 刘长远,马俊虎,甘露. 基于压缩感知的CFAR目标检测在机会雷达中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4): 630–636. (LIU Changyuan, MA Junhu, GAN Lu. Application of CFAR target detection based on compressed sensing in opportunistic radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):630–636.)
- [15] 胡航. CFAR处理中检测门限系数的研究[J]. 火控雷达技术, 2005(2):1–3. (HU Hang. Research on detection threshold coefficient in CFAR processing[J]. Fire Control Radar Technology, 2005(2):1–3.)
- [16] LIU Weijian, LIU Jun, HAO Chengpeng, et al. Multichannel adaptive signal detection: basic theory and literature review[J]. Science China:Information Sciences, 2022,65(2):5–44.
- [17] NOVILLO F, ROMERO-ARGUELLO J, GUERRERO E, et al. Performance evaluation of radar systems in noise jamming environments[C]// 2016 IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting(ETCM). Guayaquil,Ecuador:IEEE, 2016:1–6.
- [18] MAHAFZA B R. Radar systems analysis and design using MATLAB[M]. Huntsville,Alabama,USA:Taylor and Francis, 2015.

作者简介:

沈健君(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电子信息系统仿真评估技术. email:1545758332@qq.com.

艾小锋(1983-), 男, 副教授, 主要研究方向为目标电磁特性.

刘晓斌(1990-), 男, 讲师, 主要研究方向为雷达对抗系统建模与仿真.

赵锋(1978-), 男, 副教授, 主要研究方向为雷达对抗系统建模与仿真.

李永祯(1977-), 男, 研究员, 主要研究方向为极化雷达与电子.