

文章编号: 2095-4980(2018)03-0431-05

基于信息论的脉冲压缩雷达 DRFM 干扰检测技术

曹兰英, 罗美方, 吴 健

(中国航空工业集团公司 雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063)

摘 要: 信息熵是一种测量信号信息内容的重要手段, 能够反映信号的信息量。针对脉冲压缩雷达数字射频存储(DRFM)干扰的检测问题, 利用目标回波和干扰回波的分布差异, 提出了基于信息论的脉冲压缩雷达 DRFM 干扰检测方法。以回波信息熵为检测统计量, 设计二元干扰检测器, 实现对脉冲压缩雷达 DRFM 干扰的检测。仿真实验验证了该方法的可行性和有效性, 在 $R_{SN} > 0$ dB 时对相位编码和线性调频等脉压波形的切片重构干扰的检测概率 $> 90\%$ 。

关键词: 脉冲压缩雷达; 信息熵; 二元干扰检测器; 数字射频存储干扰检测; 切片重构干扰
中图分类号: TN974 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201803.0431

Detection of DRFM jamming for pulse compression radar based on information theory

CAO Lanying, LUO Meifang, WU Jian

(AVIC Leihua Electronic Technology Research Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: Information entropy is an important technology to measure information of the signal. Considering the Digital Radio Frequency Memory(DRFM) jamming detection for pulse compression radar, a method of DRFM jamming detection based on information theory is proposed, by exploiting diversity of distribution between target signals and jamming. Using the information entropy of the echo as the detection statistic, the binary jamming detector is designed to detect the DRFM jamming. Simulation results validate the feasibility and effectiveness of the proposed method. While the R_{SN} is above 0 dB, the DRFM jamming detection probability is up to 0.9 for pulse compression waveforms, such as phased code and Linear Frequency Modulation(LFM).

Keywords: pulse compression radar; information entropy; the binary jamming detection; detection of Digital Radio Frequency Memory(DRFM) jamming; Chopping and Interleaving(C&I) jamming

随着电子战的迫切需求, 现代新型干扰机广泛采用瞬时测频(Instantaneous Frequency Measure, IFM)、数字射频存储(DRFM)等技术, 对整个电子对抗领域产生了极其深远的影响。DRFM 能捕获和存储不同的雷达信号和经过特殊调制的信号波形, 可以有很长的存储时间, 能够精确复制原始信号, 可方便地产生各种欺骗性干扰信号和遮盖性干扰信号, 成为干扰脉冲压缩雷达的重要手段。从理论上讲, DRFM 干扰的信号参数与雷达回波信号在多个参数域重叠, 参数的取值范围、变化趋势等都在雷达接收机允许范围内, 现有雷达接收机很难区分干扰信号和雷达回波信号, 严重影响对目标的有效探测。随着技术的成熟和性能的提高, DRFM 的应用范围不断扩大, 在未来的军事电子系统中起到越来越大的作用^[1]。所以, 如何正确检测 DRFM 干扰, 提高传统雷达的抗储频式干扰能力, 保证雷达在复杂电子干扰环境下对目标的有效探测, 是雷达抗干扰设计亟待解决的问题。

自从 DRFM 技术应用于雷达对抗, 针对 DRFM 转发式干扰的鉴别问题一直是国内外相关研究机构和大学的研究热点。国外方面^[2-3], 2008 年 Maria Greco 针对波门拖引干扰信号检测的问题提出了基于干扰信号误差角(Jamming Signal Error Angle, JSEA)的两步检测算法。2010 年意大利的 Francesco Bandiera 针对目标信号和电子干扰信号的检测问题, 借助子空间理论提出了一种新的子空间检测算法, 该方法同样是一种两步检测方法, 且检测性能表现优异。国内方面^[4-10], 2004 年针对距离欺骗干扰的检测问题, 空军雷达学院的李建勋提出运用模式识别技术定义目标和干扰的特征因子来进行干扰识别的方法。2005 年针对雷达距离-速度同步拖引的检测问题, 西

收稿日期: 2017-01-07; 修回日期: 2017-02-22

安电子科技大学的赵雪飞等人提出了基于频谱分析的干扰识别方法,在脉冲多普勒(Pulse Doppler, PD)雷达上通过自动增益控制(Adaptive Gain Control, AGC)突变和回波频谱的谱峰分裂来判断是否存在距离-速度同步干扰。2010年电子科技大学的孙闽红和唐斌等人针对 Maria 文章中存在的问题,提出了一种改进的干扰检测算法。2011年电子科技大学的顾海燕针对距离-速度联合拖引干扰的检测问题,提出了一种基于统计特征和脉内细微特征的融合分段自相关最大值方差、Wigner-Viller 分布幅值方差、小波变换矩阵方差 3 种特征的特征因子检测方法。2012年在针对噪声干扰和欺骗式干扰的检测问题上,国防科技大学的 YAN Xingwei 提出了基于近似熵的检测方法,通过求时序信号近似熵来检测有无干扰,该方法针对噪声干扰和欺骗式干扰的检测效果显著。2014年卢云龙等提出了利用调频率匹配的 DRFM 欺骗干扰检测方法,利用分数阶傅里叶变换检测雷达回波中线性调频(LFM)信号分量并估计其调频率,通过与参数库进行匹配分析,实现干扰信号的检测。

国内外的 DRFM 干扰检测方法多数是针对距离、距离速度同步拖引等波门拖引干扰的,通过寻求干扰信号与目标信号在某个域的差异来实现对干扰的检测或识别,而且算法相对复杂,具有较强的针对性。随着电子技术的不断进步,雷达有源干扰特点发生了较大变化,在欺骗式干扰的基础上出现了一些新型的干扰方式,比如频谱弥散(Smeared Spectrum, SMSP)干扰和切片重构(C&I)干扰等密集假目标欺骗干扰,对雷达抗干扰提出了新的要求和挑战。正确检测干扰是采取干扰抑制等抗干扰措施的重要前提。本文结合信息论理论,寻求目标回波和干扰回波信息熵的差异,提出基于信息论的脉冲压缩雷达 DRFM 干扰检测方法,并通过计算机仿真实验验证和分析该方法对 DRFM 干扰的检测能力。

1 基于信息论的 DRFM 干扰检测技术

1.1 信息熵理论

20 世纪 40 年代末首次提出的信息熵(Shannon 熵)^[11],表示信息系统中描述信息的能力,是信息量的评估标准,主要采用数值的形式表示一个随机变量取值的不确定性程度,描述了所含信息量的多少。

从数据集的角度来看,也可以用熵函数刻画数据集合的不规则程度或者不确定程度,而所谓的不规则程度或者不确定程度就是指数据集合中数据特征之间的相似度,即依赖关系:

$$H(X) = -\sum p(x) \ln p(x) \quad (1)$$

式中 $p(x)$ 为随机变量 x 的概率密度函数。

从定义可以看出,信息熵 $H(X)$ 与随机变量 x 具体取值无关,只与其概率分布有关。信息熵具有以下性质:

- 1) 如果随机变量 X 的不确定程度较高,即变量分布比较均匀,其信息熵就较大,该变量蕴含的信息量也越大。
- 2) 当随机变量分布不均匀,在某个取值上概率分布较大,而其他取值上分布较小,则相应这个变量不确定程度较低,其信息熵就较小,该变量蕴含的信息量也越小。
- 3) 极端情况,如果这个随机变量只有 1 个取值,则其信息熵为 0,该变量蕴含的信息量也为 0。

综上所述,由于基于信息论的测量是针对随机变量的,分布函数不同,对应的熵值也不同。目标回波和干扰回波的分布函数是不同的,则各自的信息熵也是不同的,故可将信息熵作为检测统计量,进行 DRFM 干扰检测。

1.2 二元干扰检测器

通常检测信号有无的问题可以用一个二元假设检验^[12-13], H_1 假设表示接收到的信号中存在目标回波信号, H_0 假设表示接收到的信号中没有目标回波信号;本文对经典二元假设检验进行调整,定义二元干扰检测如下:当检测有干扰时, H_1 假设表示接收到的信号中存在干扰, H_0 假设表示接收到的信号中没有干扰。

采用二元假设检测理论对干扰进行检测,干扰回波信号 $r(t) = s(t) + j(t) + n(t)$,无干扰时目标回波信号 $r(t) = s(t) + n(t)$,对回波信号进行采样,由此形成干扰检测模型表示如下:

$$\begin{cases} H_0: \mathbf{r} = \mathbf{s} + \mathbf{n} \\ H_1: \mathbf{r} = \mathbf{s} + \mathbf{n} + \mathbf{j} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{n} 为噪声向量; \mathbf{s} 为雷达信号向量; \mathbf{j} 为干扰信号向量。

1.3 基于信息论的 DRFM 干扰检测

基于二元干扰检测算法有能量检测算法、基于协方差矩阵检测算法、基于特征值分解检测算法等,本文针对式(2)的干扰检测模型,基于信息论理论,直接由观测向量统计信息熵,并与门限作比较,来进行检测判决。

设离散回波信号采样为 $r = [r(0), r(1), \dots, r(N-1)]$, 则第 m 采样时刻的回波概率密度函数 $P(m)$:

$$P(m) = \frac{|r(m)|}{\left| \sum_{n=0}^{N-1} r(n) \right|} \quad (3)$$

从而回波信号的信息熵 $E(r)$:

$$E(r) = - \sum_{m=0}^{N-1} P(m) \ln P(m) \quad (4)$$

由信息熵定义可知, 相比无干扰情况, 存在 DRFM 干扰时回波采样分布相对更加不均匀, 幅度起伏相对较大, 其信息熵就较小。因此, 信息熵可较好地表征目标回波和有干扰的回波, 对于某个距离单元的回波, 信息熵具有以下特点: a) 如果是目标回波, 其信息熵 $E(r)$ 值较大; b) 如果是有干扰的回波, 其信息熵 $E(r)$ 的值较小。

于是, 基于信息论的 DRFM 干扰检测器可表示为:

$$\begin{cases} H_0: E(r) > \eta \\ H_1: E(r) \leq \eta \end{cases} \quad (5)$$

式中 η 为检测门限, $\eta = E(s) - \varepsilon$, $\varepsilon < 0.01$ 。

具体步骤如下:

1) 对每个发射信号采样 $s = [s(0), s(1), \dots, s(M-1)]$ 按式(6)求取概率密度函数 $P_s(m)$, 得到每个采样时刻的概率密度函数后, 按式(7)求取发射信号信息熵 $E(s)$, 并将其下调 ε , 作为检测门限 η ;

$$P_s(m) = \frac{|s(m)|}{\left| \sum_{n=0}^{M-1} s(n) \right|} \quad (6)$$

$$E(s) = - \sum_{m=0}^{M-1} P_s(m) \ln P_s(m) \quad (7)$$

2) 接收到回波信号采样, 对每个距离采样按式(3)求取概率密度函数, 得到每个距离采样的概率密度函数 $P(m)$ ($m = 0, 1, \dots, N-1$)后, 按式(4)求取回波信号信息熵, 并与检测门限 η 比较, 若大于 η 则无干扰, 若小于 η 则存在干扰。

2 仿真实验

通过计算机仿真实验验证信息熵, 以检测统计量的可行性和基于信息论的 DRFM 干扰检测方法的有效性。其中, 实验的波形类型包括相位编码和 LFM 这 2 种脉冲压缩波形, 干扰类型为 C&I 干扰。

2.1 目标回波信号与 C&I 干扰回波信号信息熵统计

1) 相位编码波形

图 1(a)为相位编码波形在 C&I 储频干扰下, 信息熵随干噪比(Ratio of Jamming and Noise, JNR)的变化情况。ES(Entropy of Signal)定义为目标回波信息熵统计结果。不同 JNR 和 SNR 下, 不同相位编码波形参数对应的两者信息熵差的均值见图 1(b)。从图 1(a)可看到, 相位编码波形下, 目标回波信息熵大于干扰回波信息熵, 与理论分析一致; 干扰回波信息熵不受 JNR 影响。并且, 目标回波信息熵与干扰回波信息熵存在较大的差异。从图 1(b)可看到, 相位编码波形下, 在 SNR 低于 10 dB 时, 随着 SNR 的增大, 目标回波信息熵与干扰回波信息熵差逐渐增大, 当 SNR 超过 10 dB 时, 信息熵的差逐渐减小, 但不是无限下降, 而是趋于平稳, 收敛于 0.06。另外, 熵的差与相位编码波形的带宽有关, 带宽越大, 熵的差相对越大。

2) 线性调频波形

图 2(a)为 LFM 波形在 C&I 储频干扰下, 信息熵随 JNR 的变化情况。不同 JNR 和 SNR 下, 不同 LFM 波形参数对应的两者信息熵差的均值见图 2(b)。从图 2(a)可看到, LFM 波形下, 目标回波信息熵大于干扰回波信息熵, 与理论分析一致; 干扰回波信息熵不受 JNR 影响。并且, 目标回波信息熵与干扰回波信息熵存在较大的差异。从图 2(b)可看到, LFM 波形下, 随着 SNR 的增大, 目标回波信息熵与干扰回波信息熵差逐渐增大并趋于平稳; LFM 波形的脉宽、带宽对信息熵的差基本没有影响。因此, 可以将信息熵作为检测量, 将发射波形的信息熵下调作为检测门限 η 。

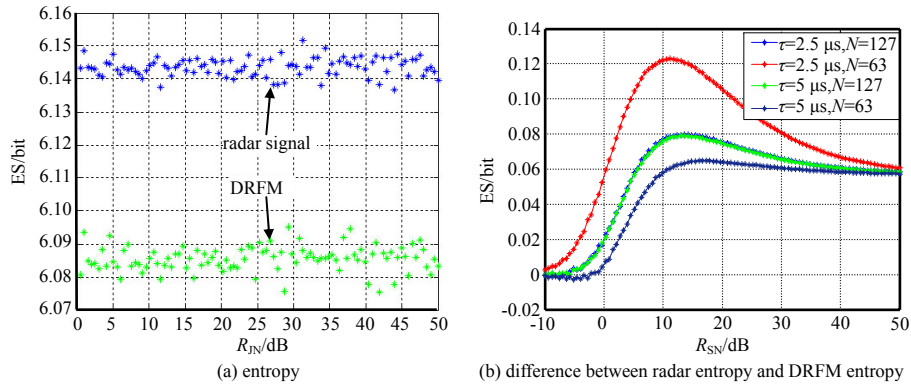


Fig.1 Information entropy of phase code with C&I jamming

图 1 在 C&I 干扰下，相位编码波形信息熵统计

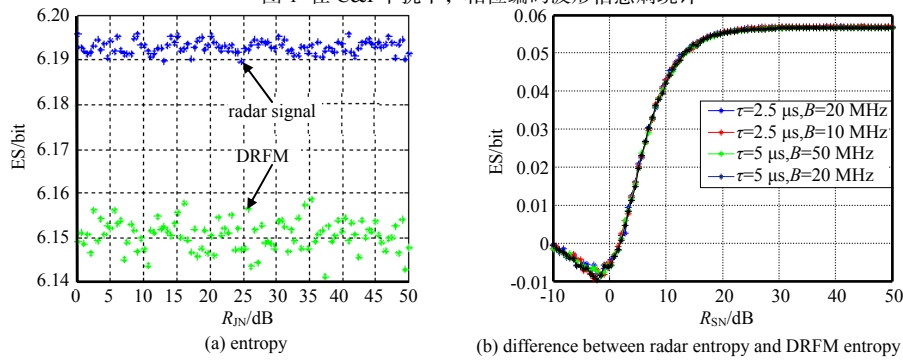


Fig.2 Information entropy of LFM with C&I jamming

图 2 在 C&I 干扰下，LFM 波形信息熵统计

2.2 基于信息论的 C&I 干扰检测性能分析

干扰检测概率定义为：某 JNR 下检测到干扰的概率(1 000 次蒙特卡洛的均值)。如表 1 所示，在高信噪比条件($R_{SN}=0$ dB)下，基于信息论的 C&I 干扰检测概率高于 90%；在低信噪比条件($R_{SN}=-10$ dB)下，对相位编码波形下的 C&I 干扰检测概率超过 80%，LFM 波形的 C&I 干扰检测概率超过 75%。

表 1 $R_{SN}=0$ dB 和 $R_{SN}=-10$ dB，不同检测门限下的 C&I 干扰检测概率
Table1 Detection probability with different thresholds under $R_{SN}=0$ dB, $R_{SN}=-10$ dB

	$R_{SN}=-10$ dB		$R_{SN}=0$ dB	
	phase code	LFM	phase code	LFM
ES-0.010	>0.80	>0.75	>0.96	>0.9
ES-0.005	>0.82	>0.76	>0.97	>0.91
ES-0.001	>0.85	>0.78	>0.98	>0.93

3 结论

随着雷达干扰技术不断发展，基于 DRFM 技术的新型干扰出现并且应用日趋成熟，使得干扰与雷达信号相干并能获得雷达增益，对抗方仅需以较小的功率便能达到理想的干扰效果。本文利用目标回波和干扰回波在信息熵上的差异性能，提出基于信息论的 DRFM 干扰检测技术，以回波信号序列的信息熵为检测统计量，采用二元检测方法，实现对 C&I 干扰的检测，并通过理论分析和计算机仿真实验验证了信息熵作为检测统计量的可行性，同时分析了针对相位编码和 LFM 等脉压波形的 DRFM 干扰检测性能。实验结果表明，该方法可有效检测针对相位编码和 LFM 等脉压波形的 DRFM 干扰，在 SNR>0 dB 时干扰检测概率>90%。本文基于信息论的 DRFM 干扰检测方法对其他 DRFM 干扰的检测性能有待进一步验证，将在未来的工作中开展。

参考文献：

[1] 袁汉钦,隋鉴. 基于数字干扰合成的伪码调相引信干扰[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):64-67. (YUAN Hanqin,SUI Jian. Jamming based on Digital Jamming Synthesis against pseudo random code phase modulation fuze[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):64-67.)

- [2] GRECO M,GINI F,FARINA A. Radar detection and classification of jamming signals belonging to a cone class[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2008,56(5):1984–1993.
- [3] FRANCESCO Bandiera,FARINA A. Detection algorithms to discriminate between radar targets and ECM signals[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2010,58(12):5894–5993.
- [4] 李建勋,秦江敏,马晓岩. 基于神经网络的雷达抗应答式欺骗干扰方法[J]. 空军雷达学院学报, 2003,17(4):19–21. (LI Jianxun,QIN Jiangmin,MA Xiaoyan. A method of radar anti-deception-jamming based on neural network[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2003,17(4):19–21.)
- [5] 赵雪飞,赵川,刘铮. PD 雷达抗距离-速度同步拖引干扰的频谱识别法[J]. 雷达与对抗, 2005,3(3):21–24. (ZHAO Xuefei,ZHAO Chuan,LIU Zheng. Frequency domain technique of PD radar to counter synchronous jamming on range and velocity[J]. Radar & Ecm, 2005,3(3):21–24.)
- [6] 孙闽红,唐斌. 雷达 DRFM 欺骗干扰的检测[J]. 信号处理, 2010,26(5):672–676. (SUN Minhong,TANG Bin. Detection of radar DRFM deception jamming[J]. Signal Processing, 2010,26(5):672–676.)
- [7] YAN Xingwei,LU Dawei,ZHANG Jun,et al. Radar jamming detection based on approximate entropy and moving-cut approximate entropy[C]// IET International Conference on Information Science and Control Engineering(ICISCE 2012). Shenzhen, Guangdong,China:[s.n.], 2012:1–6.
- [8] 卢云龙,李明,闫琰. 利用调频率匹配的 DRFM 欺骗干扰检测方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2014,41(5):67–73. (LU Yunlong,LI Ming,YAN Yan. Method for detecting DRFM deception jamming based on LFM rate matching[J]. Journal of Xidian University, 2014,41(5):67–73.)
- [9] 卢云龙,李明,陈洪猛,等. 基于奇异谱分析的抗数字射频存储距离波门拖引干扰[J]. 电子与信息学报, 2016,38(3):600–606. (LU Yunlong,LI Ming,CHEN Hongmeng,et al. Countering DRFM range gate pull-off jamming based on singular spectrum analysis[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2016,38(3):600–606.)
- [10] 卢云龙,李明,陈洪猛,等. 基于熵特征的 DRFM 有源欺骗干扰 CFAR 检测[J]. 系统工程与电子技术, 2016,38(4):732–738. (LU Yunlong,LI Ming,CHEN Hongmeng,et al. CFAR detection of DRFM deception jamming based on entropy feature[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016,38(4):732–738.)
- [11] 朱雪龙. 应用信息论基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2001. (ZHU Xuelong. Fundamentals of applied information theory[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2001.)
- [12] 何友,关键,彭应宁. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2011. (HE You,GUAN Jian,PENG Yingning. Radar automatic detection and constant false alarm processing[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2011.)
- [13] SCHONHOFF T A,GIORDANO A A. Detection and estimation—theory and application[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2012.

作者简介:



曹兰英(1970–),女,江苏省东台市人,博士,研究员,主要从事电子战、雷达抗干扰、雷达数据处理、雷达信号处理等领域研究,先后获得3项国防科技进步奖,发表学术论文31篇.email:clying2005@163.com.

罗美方(1984–),女,江苏省盐城市人,硕士,工程师,研究方向为低截获技术.

吴健(1991–),男,江西省宜春市人,硕士,工程师,研究方向为电子战技术.