

基于层次分析法的雷达仙波信号 检测与抑制方法



李春林, 徐 好*, 吴琳拥

(四川九洲防控科技有限责任公司 四川绵阳 621000)

【摘要】雷达仙波通常是由于一些特殊的气候条件引起,会在雷达终端上表现为多批次慢速运动“目标”航迹,影响雷达性能和干扰操作员的判断,该文基于对包含仙波的雷达原始信号进行采集和分析,提取仙波与真实目标的特征差异,总结仙波的幅值特性、多普勒特性以及空间分布和运动规律,提出了一种基于层次分析法的多准则决策杂波抑制方法。实测数据验证结果表明该方法能够准确分辨并对仙波具有良好的抑制效果。

关 键 词 层次分析; 特性提取; 杂波抑制; 雷达仙波; 信号处理

中图分类号 TN957; TN958 **文献标志码** A **doi:**10.12178/1001-0548.2020007

Radar “Angel-Echo” Signal Detection and Suppression Method Based on Analytic Hierarchy Process

LI Chun-lin, XU Hao*, and WU Lin-yong

(Sichuan Jiuzhou Falcon Technologies Co., LTD Mianyang Sichuan 621000)

Abstract Radar angel echo is usually caused by some special weather conditions, which will lead to multiple slow-moving “target” tracks on radar terminal, affecting radar performance and disturbing operator’s judgment. In this paper, based on acquisition and analysis of original radar signal containing angel echo, the characteristic differences between angel echo and real target are extracted, and by summarizing amplitude characteristics, Doppler characteristics, spatial distribution and motion law of angel echo, a multi-criteria decision-making clutter suppression method based on analytic hierarchy process (AHP) is proposed. The processing results of real experimental data show that radar angel echo can be accurately distinguished and well suppressed by adopting the method.

Key words analytic hierarchy process; characteristic extraction; clutter suppression; radar ‘angel-echo’; signal processing

雷达探测目标过程中,目标并不是独立存在的,其周围交织了各种各样的杂波信号,如地物杂波、海杂波、仙波等。其中地物杂波和海杂波相对并无固定规律而具有随机性,会大大降低目标的信噪比,进而降低雷达的检测性能,工程应用中一般采用动目标显示(moving target indication, MTI)、相参积累(moving target detection, MTD)以及恒虚警检测(constant false alarm rate, CFAR)等方法实现有效抑制。而仙波一般是在海边的雷达或者雨后好天气的第二、第三天,出现的慢速运动“目标”。初步的研究表明,仙波是由于雨后天晴,大量水蒸气蒸发,在风的作用下这些水蒸气散射的回波与慢速

运动的目标回波非常相似,通过正常的脉冲压缩、相参积累以及恒虚警检测等手段,依然无法去除仙波的“目标”,导致雷达的性能受到影响。然而通过对含有仙波的雷达回波原始信号进行脉冲压缩、MTI、MTD、CFAR等信号检测处理后,提取并分析检测结果中的仙波“目标”,统计仙波多普勒频率、距离宽度、空间分布等多个特性,针对多特性的决策问题,可以利用层次分析方法进行综合决策问题的评估^[1-6]。层次分析方法就是多准则判断问题进行目标层、准则层以及决策层的分解,通过经验判断和定量的计算评估各个准则对决策层贡献权重的大小。选取有代表性的多个特性作为综合判断准

收稿日期: 2020-01-08; 修回日期: 2020-08-06

基金项目: 四川省科技计划(2018GZ0501); 四川省重大科技专项(2018GZDZX0023)

作者简介: 李春林(1984-),高级工程师,主要从事雷达系统和雷达信号处理方面的研究。

通信作者: 徐好, E-mail: haoandyu1986@126.com

则, 对目标检测的所有目标点迹进行特性的量化、加权以及门限筛选, 进而有效去除仙波的虚假点迹, 进一步降低虚警率提升雷达检测性能。

1 仙波的特性分析

目标的回波功率常用其散射截面积 σ_t 描述, 同理, 杂波散射截面积 σ_c 也可以表示杂波功率。杂波散射截面积的计算中, 散射系数 σ^0 是一个至关重要的概念, σ^0 就是单位面积或体积的平均截面, 是无量纲的标量^[6]。 σ_c 与 σ^0 的关系可以由式子 $\sigma_c = \sigma^0 A_c$ 表达, 其中 A_c 为杂波区面积, σ^0 受众多因素的影响, 例如雷达系统参数, 包括波长、极化方式、俯仰角等。

随着大量水蒸气蒸发, 在风的作用下这些水蒸气散射的回波与慢速运动的目标回波非常相似, 在雷达终端上正常显示为多条慢速运动的虚假航迹, 这就是仙波。仙波不同于其他杂波的随机性, 仙波产生的反射较小, 能够在近距离被检测到。因此可以通过仙波数据提取, 分析仙波特性^[7-10]。

1.1 空间分布特性

发射机产生电磁信号, 由天线辐射到空中, 发射信号一部分被目标拦截并向许多方向再辐射。其中向后辐射到雷达的信号被天线采集, 在接收机中该信号被处理以检测判断是否有目标信号存在。通过雷达信号到目标并从目标返回雷达的时间, 得到目标的距离, 根据收到回波信号幅度最大时波束方向来确定目标角度位置。因此对某型雷达采集的含有仙波的回波信号进行脉冲压缩、MTI、MTD、恒虚警检测(CFAR)处理后, 得到多帧目标检测的局部方位距离空间分布结果如图1所示。从图中可以看出, 仙波同一时间在近距离多处被检测, 会随着时间在某固定方位按照统一方向进行大范围的推移, 交织于真实目标中, 严重干扰了真实目标。

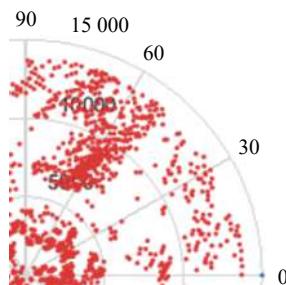


图1 仙波检测点迹局部分布

1.2 多普勒频率及幅值特性

目标的运动特性反映在多普勒频率上, 运动目标都具有一定的多普勒频率, 静止的地物杂波具有

零多普勒频率, 利用MTI滤波器可有效抑制地物静止杂波, 但是大量的仙波由于受到风的作用具有一定多普勒频率而被检测出来, 因此, 需要进一步对仙波的频谱特性进行分析。对于目标的运动, 由于多普勒效应, 回波信号的频率漂移与目标相对于雷达的速度成正比, 根据 $f_d = 2v/\lambda$, 其中 f_d 为多普勒频移, v 为多普勒速度, λ 为雷达波长, 可以计算出目标的速度信息。对多帧数据进行仙波的提取, 并且统计仙波所属的多普勒速度基本不存在模糊, 仙波正向和反向运动分别对称分布于左右低速通道, 如图2所示。另外, 仙波“目标”的幅值普遍较低并且浮动较小, 统计其幅值分布情况, 在相同距离上仙波幅值相对其他目标较低, 幅值归一化结果如图3所示。

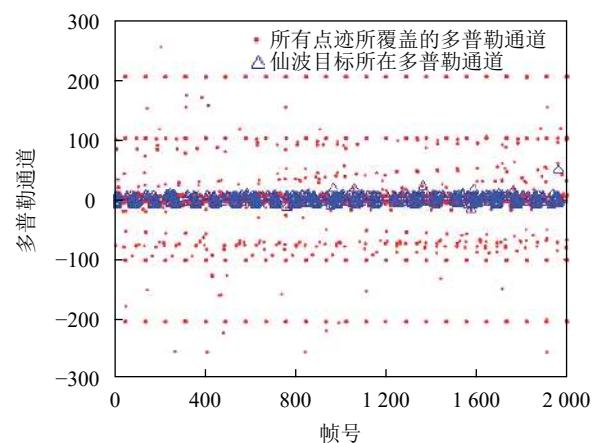


图2 仙波检测点迹多普勒特性

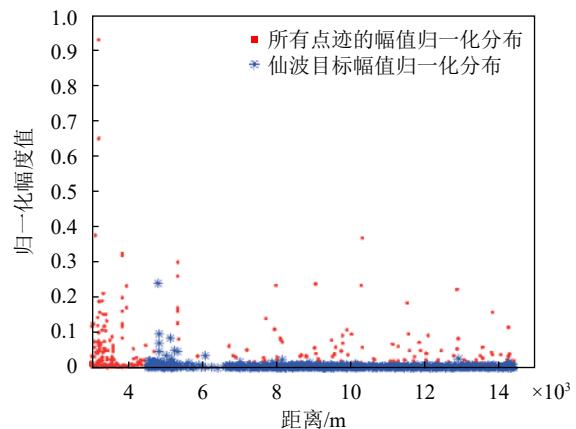


图3 仙波检测点迹幅值归一化分布

1.3 距离覆盖宽度

对于低分辨的雷达, 目标的结构信息可能会在距离维度上有所体现^[7], 例如大飞机会同时在不同的3~5距离门出现相关的检测点迹。仙波散射的回波与慢速运动的目标回波非常相似, 在雷达终端

上正常的显示为多条慢速运动的虚假航迹, 从 MTD 以后的结果距离-多普勒图上可以观察到在同一个时刻往往会在多个距离门上出现相关的仙波“目标”, 如图 4 所示。仙波“目标”会同时出现在不同的距离维上, 存在一定的距离覆盖特性。

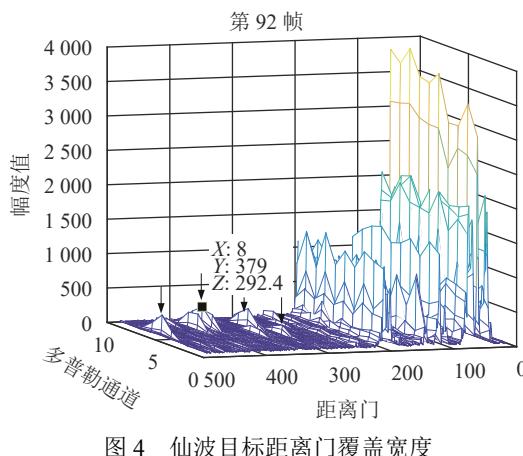


图 4 仙波目标距离门覆盖宽度

2 仙波的抑制方法

2.1 层次分析法

层次分析法 (AHP)^[11-12] 是美国运筹学 T.L.Saaty 教授于 20 世纪 70 年代提出的一种实用的多方案或多目标的决策方法, 是一种定性与定量相结合的决策分析方法。常常被应用于多目标、多准则、多要素、多层次的非结构化的复杂决策问题, 是获得权系数的常用手段, 具有十分广泛的使用性。AHP 分析该问题的步骤如下:

1) 建立层次结构模型

将决策目标、决策的对象和因素分别划分为高、中、低层, 层次结构图如图 5 所示。

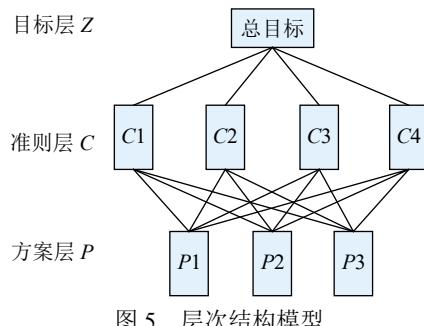


图 5 层次结构模型

2) 构造判断矩阵

对所有的因素按照相同的尺度进行两两比较。例如设准则层包含准则: 空间分布 (C_1)、幅值 (C_2)、多普勒速度 (C_3)。进而建立如下矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ C_2 & 2 & 1 & 3/2 \\ C_3 & 2 & 2/3 & 1 \end{bmatrix}$$

3) 层次单排序

通过特征根的大小判断同一层次相对上一层的重要性排序。

① 归一化处理: $W_i = \bar{W}_i / \sum_{j=1}^m \bar{W}_j$, 其中, $\bar{W}_i = \bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_m$, \bar{W}_i 为第 i 列归一化后的值进行按行求和;

② 计算最大特征根 $\frac{1}{m} \lambda_{\max} = \sum_{i=1}^m \frac{(AW)_i}{W_i}$, 其中 $(AW)_i$ 表示 AW 的第 i 个元素;

4) 矩阵的一致性检验

所谓的一致性检验就是判断思维逻辑性的一致性, 不满足一致性判断则表示该逻辑存在矛盾。可以由 λ_{\max} 是否等于 n 来检验判断矩阵 A 是否为一致矩阵。计算一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, 参考平均随机一致性指标 RI , 最后计算一致性比例: $CR = \frac{CI}{RI}$, 若 $CR < 0.1$, 则表示该矩阵的一致性可接受, 并获得加权向量 W 。

2.2 仙波抑制方法

对仙波的空间分布、多普勒频率及幅值、距离覆盖范围进行特征统筹规划和分析, 对 CFAR 检测目标的各属性进行评估, 并利用层次分析法确定各因素权重, 加权获得最终的量化结果, 剔除满足一定阈值的目标点迹, 进而达到杂波抑制的效果。基本的处理步骤如下:

1) 对雷达回波信号进行脉冲压缩、相参积累、恒虚警检测等处理, 得到所有的检测目标点迹包含目标的多普勒速度、距离以及幅值等信息;

2) 针对仙波的空间分布特性, 对某一帧内的检测点迹数量进行量化, 点数越多, 出现仙波的可能性越大。

$$num = 1 - e^{(an)}, a = -0.55, n = 1, 2, \dots$$

3) 判断当前帧目标中是否存在满足多普勒通道限制, 对多普勒通道进行量化处理, 正反方向对称, 仙波出现在低通道的可能性较大, 量化模型为:

$$D_{Pr} = e^{(a_1 v)}, a_1 = -0.015, v \leq 256$$

4) 对目标的幅值量级进行判断, 对幅值 f 归一化在 $[0, 1]$ 之间, 量化模型定义为:

$$F = e^{(a_2 f)}, a_2 = -0.8, \text{ 且 } f < 500$$

5) 利用层次分析方法计算得到的各个准则的权重 $W=[w_1, w_2, w_3]$, $w_1+w_2+w_3=1$, 对各个点迹的准则评价结果进行加权:

$$Q = WR', R = [\text{num}, \text{Dp}_1, F]$$

若 $Q < \text{阈值} \phi$ (根据实际情况设定, $\phi \in [0, 1]$, 一般设置为 0.5), 标记为疑似仙波目标。对疑似仙波目标点迹进行距离覆盖宽度的判断, 如果满足同时存在大于 2 个以上的点迹各分布在不同距离门上, 则点迹消除处理, 清除完以后再进行检测结果上报。

3 实例验证分析

利用某型雷达采集的雷达回波数据进行脉冲压缩、MTI 和 MTD 积累处理^[13-14]后, 首先以单帧数据为例, 利用恒虚警检测算法对目标点迹进行初步的检测。仙波虚警检测点迹占单帧点迹的 75%, 通过以筛选仙波信息为目的, 设定以空间分布 $C1$ 、多普勒频率 $C2$ 、幅值 $C3$ 作为准则, 判断矩阵定义为 A , 利用层次分析法计算各个准则的权重值, 并对加权平均值进行阈值判断, 通过最终的距离覆盖宽度进行最终确认和剔除, 该方法能准确去除仙波“目标”点迹, 筛选剔除后的结果如表 1 所示, 结果表明该方法能够准确去除仙波的检测点迹降低虚警。为了进一步验证该算法的有效性和合理性, 对多帧数据进行相同的筛选处理, 其中对筛选出的仙波点迹数量占有对应帧的比例进行统计, 据统计仙波虚警平均比例大于 75%, 统计结果如图 6 所示, 对仙波的筛选结果的距离方位分布如图 7 所示。结果表明, 利用 2000 帧原始信号通过统一的信号检测过程后, 检测所有目标点迹如图 7a 所示, 从包含仙波目标的 348 帧中筛选出的点迹如图 7b 所示, 剔除掉所有仙波点迹后的检测结果如图 7c 所示, 可以看出该方法能够保证正确目标点迹的同时有效合理准确地抑制仙波干扰, 降低了虚警率, 提升了雷达的检测性能。

表 1 单帧恒虚警检测点迹及筛选后的点迹

检测点迹	序号	距离门	多普勒通道	幅值
单帧信号检测点迹	1	240	103	2677.099
	2	321	506	298.58
	3	379	507	292.39
	4	474	505	302.80
仙波抑制后的检测点迹	1	240	103	2677.099

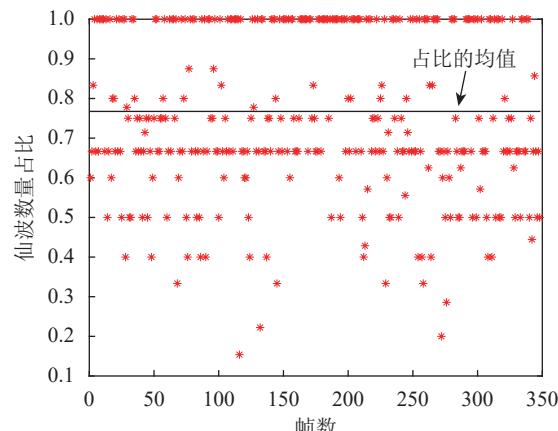


图 6 筛选仙波的比例统计

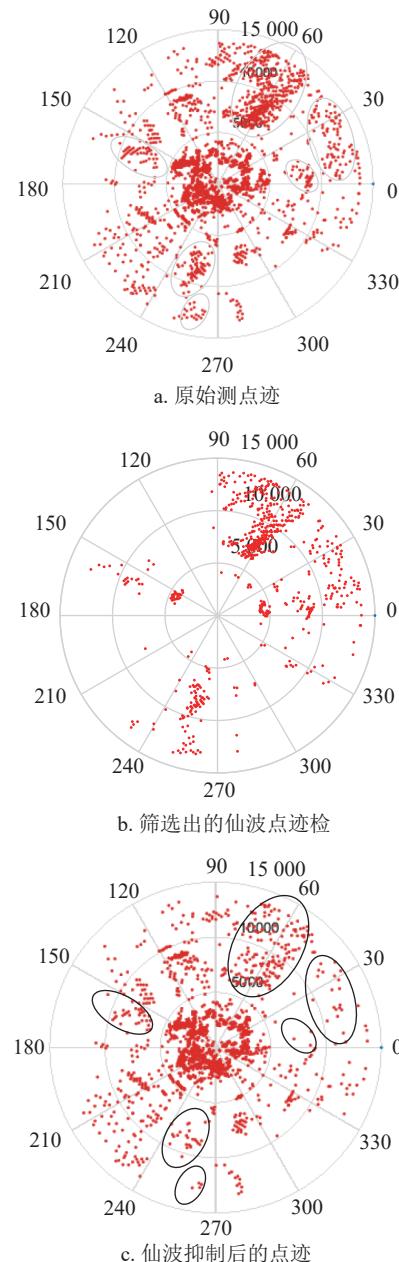


图 7 多帧信号仙波抑制效果

4 结束语

本文通过对某型雷达的含有仙波的原始回波信号进行脉冲压缩、MTI、MTD以及恒虚警检测, 得到初步的检测结果。然后对仙波的整体特性进行统计分析, 以筛选仙波为目标, 选取其空间分布、多普勒频率、幅值3个特性作为准则, 利用层次分析法计算合理的评价权重, 并用阈值判断筛选出疑似仙波点迹, 利用距离覆盖范围特性进一步确认, 进而达到剔除仙波的效果。实验结果表明该方法有一定有效性和合理性, 能够降低虚警, 提升雷达的检测性能。

参 考 文 献

- [1] PARTHA R, MAITRA A K, ARIJIT B. A new threshold function for de-noising partial discharge signal based on wavelet transform[C]/International Conference on Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition Colmbatore: IEEE, 2013: 185-189.
- [2] 彭卫华. 雷达信号的非相参积累检测和恒虚警处理[J]. 舰船电子对抗, 2007, 30(6): 50-52.
PENG Wei-hua. Noncoherent accumulation detection and constant false alarm processing for radar signal[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2007, 30(6): 50-52.
- [3] 吴琳拥, 毛谨, 白渭雄. 基于奇异值分解的雷达微小目标检测方法[J]. 电子科技大学学报, 2019, 48(3): 326-329.
WU Lin-yong, MAO Jin, BAI Wei-xiong. Radar small target detection based on singular value decomposition method[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2019, 48(3): 326-329.
- [4] STOICA P, BABU P, LI J. New method of sparse parameter estimation inseparable models and its use for spectr analysis of irregularly sampled data[J]. *IEEE Transactions on Aero-space and Electronic Systems*, 2010, 12(5): 522-529.
- [5] 刘伊丽, 张临杰, 张晰, 等. 双参数CFAR舰船检测算法两种实现方法之分析与比较[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(10): 136-142.
LIU Yi-li, ZHANG Lin-jie, ZHANG Xi, et al. Comparison between two implementations of two-parameters CFAR ship detection method[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(10): 136-142.
- [6] 刘玉. 某雷达杂波抑制应用技术研究与实测数据分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
LIU Yu. Research on application of clutter suppression technology and real data analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [7] 张飚, 张仕元, 窦泽华. 警戒雷达仙波特性分析[J]. 现代雷达, 2008, 30(6): 65-67.
ZHANG Biao, ZHANG Shi-yuan, DOU Ze-hua. Angels character analysis based on surveillance radar[J]. *Modern Radar*, 2008, 30(6): 65-67.
- [8] 方青, 陈磊. 一种雷达仙波航迹抑制方法[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(5): 483-486.
FANG Qing, CHEN Lei. A suppression method for radar angel track[J]. *Radar Science and Technology*, 2016, 14(5): 483-486.
- [9] YARDIBI T, LI J, STOICA P, et al. Source localization and sensing: A nonparametric iterative adaptive approach based on weighted least squares[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(1): 425-430.
- [10] 张晔, 孙汉奇, 陈伯孝, 等. 雷达仙波的抑制方法研究[J]. 现代雷达, 2019, 41(1): 42-45.
ZHANG Ye, SUN Han-qi, CHEN Bo-xiao, et al. A study on the suppression method for radar angel clutter[J]. *Modern Radar*, 2019, 41(1): 42-45.
- [11] 向凡夫, 郝冬青, 吴鹏. 针对低慢小目标的雷达信号处理算法[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(4): 41-43.
XIANG Fan-fu, HAO Dong-qing, WU Peng. Radar signal processing algorithm for low altitude slow speed and small target[J]. *Command Control & Simulation*, 2019, 41(4): 41-43.
- [12] 王强, 周怀军. 基于AHP算法的相控阵雷达系统效能评估[J]. 船舶电子对抗, 2009, 32(3): 82-85.
WANG Qiang, ZHOU Huai-jun. Efficiency evaluation based on ahp algorithm for phased array radar system[J]. *Shipboard Electronic Counter Measure*, 2009, 32(3): 82-85.
- [13] WEINBERG G V, KYPRIANOU R. Optimized binary integration with order statistic CFAR in Pareto distributed clutter[J]. *Digital Signal Processing*, 2015, 42(7): 50-60.
- [14] HUANG P, LIAO G, YANG Z, et al. Long-time coherent integration for weak maneuvering target detection and high-order motion parameter estimation based on keystone transform[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2016, 64(15): 4013-4026.

编 辑 税 红