

局部熵算法在机载 PD 雷达杂波跟踪中的应用

张弓,朱兆达,周亦南

(南京航空航天大学信息科学与技术学院,江苏南京 210016)

摘要: 本文介绍一种用于机载 PD 雷达的杂波跟踪技术,结合机载 PD 雷达杂波分布特征和局部熵算法的特点,将局部熵算法用于杂波跟踪,提出一种最大局部熵相似性判决准则对经过局部熵滤波后的仿真数据进行分割处理;将局部熵滤波与 K 邻域滤波结合,构成混合型滤波器,经仿真实验,得到了满意的杂波边缘提取结果。

关键词: PD 雷达; 杂波跟踪; 图像处理; 局部熵; K 邻域滤波; 专家系统

中图分类号: TN957. 51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 09-1295-04

Application of Local Entropy Algorithm on Clutter Tracking

ZHANG Gong, ZHU Zhao-da, ZHOU Yi-nan

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: This paper introduces a clutter tracking technique used for airborne PD radar. Combining the clutter feature of airborne PD radar and characteristic of local entropy algorithm, we apply this algorithm to the clutter tracking. We propose the judging criteria of similarity to maximum local entropy that is used to segment the simulated data after local entropy filter. The hybrid filter, which is composed of K-neighbor filter and local entropy filter, has been used to get clutter edge detection. This scheme has been verified to be successful in several typical experiments.

Key words: PD radar; clutter tracking; image processing; local entropy; K-neighbor filter; expert system.

1 引言

与地面和舰载雷达相比,机载 PD 雷达具有探测距离远、不受地形遮挡等优点,但另一方面,也存在着特殊的问题。特别是在机载下视下射工作状态,地海面杂波对目标检测和识别的影响十分突出,不仅面临极强的地杂波(或海杂波)干扰问题,而且杂波分布范围广,杂波强度变化可达 80dB,加之载机运动,杂波谱被大大展宽。现有的各种恒虚警算法有各自的适用条件,在实际的雷达系统中仅采用单一的恒虚警算法,必定降低系统的检测性能^[1]。文献[2]介绍一种杂波跟踪技术,利用雷达回波数据得到在距离和速度二维检测空间上反映杂波平均功率的二维灰度图,通过分析杂波分布二维灰度图,将模糊聚类中常用的 C 均值法(FCM)用于杂波跟踪,并根据 PD 雷达杂波的主要特征确定主瓣杂波、高度线杂波的位置以及副瓣杂波的范围和边缘,为不同检测单元选择不同的恒虚警检测(CFAR)策略提供依据。

除文献[2]中的跟踪杂波属性的方法之外,杂波边缘提取也是杂波跟踪方法之一。正确提取边缘既能大大减少图像处理的信息量,又能描述杂波的形态特性,为进一步分析提供了基础。对图像进行阈值分割是提取边缘的常用方法之一。这种方法能提取出连续的边缘,而且不需要任何先验知识,但是阈

值的选取是关键。熵的概念很早就被引入到图像处理中来,例如用熵确定阈值以将图像分割。著名学者 Pun、Pal 等人基于图像信号的随机性,应用 Shannon 信息熵的概念或其改进熵概念,利用最大熵的原则成功地进行了图像分割^[3~5]。近年来还出现了以多维熵、模糊熵、交叉熵、局部熵等熵的概念的最大熵法来确定阈值,它们的共同点是利用熵函数确定最佳阈值。而对于杂波二维分布图的杂波跟踪处理,其主要目的是要对主瓣杂波、高度线杂波的位置和副瓣杂波的边缘跟踪,这与光学图像处理目的有所不同,可以对杂波二维分布图进行变换,为此我们考虑利用局部熵对图像变换处理、边缘提取。

2 局部熵滤波

2.1 局部熵定义

对于一幅灰度图像,设 $f(x, y)$ 为图像中点 (x, y) 处的灰度,显然 $f(x, y) > 0$,对于一幅 $M \times N$ 大小的图像,定义 H_f 为该图像的熵,即

$$H_f = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_{ij} \lg p_{ij} \quad (1)$$

式中

$$p_{ij} = f(i, j) / \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j) \quad (2)$$

为灰度分布. 如果 $M \times N$ 是图像的局部窗口, 则称 H_f 为图像的局部熵^[3,6].

由式(1)、(2)定义的熵涉及到对数计算, 计算量比较大, 由定义式(2)可知, 一般情况下, $p_{ij} \ll 1$, 为此利用泰勒展开可得其近似公式为^[6]:

$$H_f \approx - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_{ij} (p_{ij} - 1) = 1 - \sum_{(i,j) \in [M,N]} p_{ij}^2 \quad (3)$$

2.2 局部熵滤波

杂波二维分布图中, 待分割的对象数量有限, 边缘简洁. 而干扰目标与起伏的噪声一起被看作干扰, 杂波跟踪的目的只需要对主瓣杂波、高度线杂波的位置和副瓣杂波的边缘跟踪, 对特征杂波的其他细节无要求. 从这点来说, 对杂波跟踪处理的要求低于一般图像处理的要求, 但在处理时间, 即实时性上要求较高.

鉴于以上分析, 对杂波二维分布图的滤波处理的基本要求是: 只需保留特征杂波的边缘信息. 为此, 我们针对杂波跟踪设计了局部熵滤波: $1 - H_f$.

局部熵反映了图像灰度的离散程度, 在局部熵大的地方, 图像灰度相对较均匀, 局部熵小的地方, 图像灰度离散性较大, 所以根据图像局部熵可以把灰度相对均匀的多目标分割出来. 因为局部熵是由窗口内多像素点共同的贡献, 对于单点噪声不敏感, 所以, 局部熵本身具有一定的滤波效果. 但对于较大范围的噪声和干扰目标, 局部熵的滤波效果并不尽人意, 需要改进.

(1) 滑动窗口的设计

由局部熵定义可知滑动窗口大小的选取将直接影响局部熵滤波的效果, 决定对于单点噪声是否敏感, 决定对边缘的定位精确度, 也决定运算效率. 滑动窗口大小的选取必须结合雷达系统指标综合考虑.

(2) 杂波二维分布图边界的考虑

对于一般的图像作滑窗处理时, 其边界是有损失的, 而对于杂波二维分布图, 由于是雷达回波在距离向和速度向周期叠加的结果, 在二维边界是连续的.

2.3 仿真

在典型的中 PRF 状态下, 系统仿真参数: PRF = 20kHz, 脉宽 $5\mu\text{s}$, 距离门宽度 $0.5\mu\text{s}$, 128 点 FFT. 波长 $\lambda = 3.1 \times 10^{-2}\text{m}$, 带宽 $B = 60\text{MHz}$, 天线方向图: 近似 Taylor 分布, 近旁瓣电平 36dB, 波束宽度 $A = 2.6^\circ$, 飞行速度 $V_0 = 300\text{m/s}$, 飞行高度 $H = 5000\text{m}$, 俯冲角 10° , 主波束下视 30° , 方位倾斜角 10° . 据此, 理论上可以精确计算出各特征杂波的位置. 我们对局部熵滤波算法进行了仿真. 杂波二维 (速度门数 \times 距离门数) 分布图大小为 128×100 , 杂波数据服从各种分布, 如对数正态分布、chi 分布、瑞利分布、Weibull 分布、K 分布等. 选取局部熵滑窗为 4×4 , 在位置 (40, 70), (80, 20) 处增加了信噪比为 20dB 干扰目标. 图 1 为杂波数据服从对数正态分布、一次局部熵、一次局部熵滤波、二次局部熵滤波结果.

为了对局部熵滤波的效果进行定量分析, 我们将杂波二维分布图、一次局部熵滤波、二次局部熵滤波结果分别转换为 0~255 的灰度图像, 利用峰值信噪比 (PSNR) 定义式求其各自

与杂波二维分布图比较的峰值信噪比 (PSNR), 如表 1 所示.

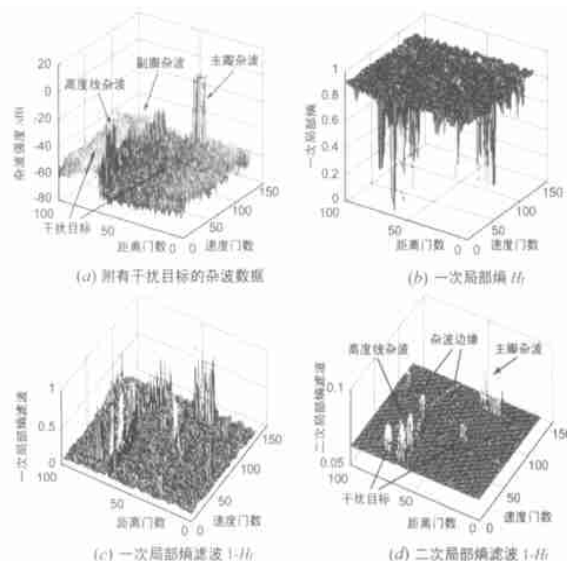


图 1 附有干扰目标的对数正态分布杂波数据的局部熵滤波处理

表 1 局部熵滤波峰值信噪比 (PSNR) (dB)

局部熵滑窗尺寸	局部熵一次滤波 PSNR (dB)	局部熵二次滤波 PSNR (dB)
2 \times 2	24.5993	14.0405
4 \times 4	25.1411	19.7980

在上述结果中, 单从峰值信噪比来看, 局部熵滤波可以获得较大的峰值信噪比, 但由局部熵的定义, 它不具有很好的滤波性能, 一些稍大的干扰和起伏仍留在输出结果中, 需要进一步的改进.

3 杂波边缘提取 (局部熵法)

针对局部熵滤波对付稍大的干扰和起伏的不足, 我们考虑将局部熵滤波与 K 邻域滤波结合, 构成混合型滤波器, 以满足杂波边缘的提取.

3.1 混合型滤波器构成

在雷达接受的杂波二维分布中, 除了主瓣杂波、高度线杂波的位置和副瓣杂波等特征杂波外, 还呈现出一种具有复杂统计分布规律的随机性, 同时随机出现的待检测目标对杂波跟踪也是一种干扰. 而 K 邻域滤波器特别适用于处理加性噪声和乘性噪声^[10]. 为此, 我们设计将 K 邻域滤波器与局部熵滤波串联起来, 构成级联组合形式, 如图 2 所示.

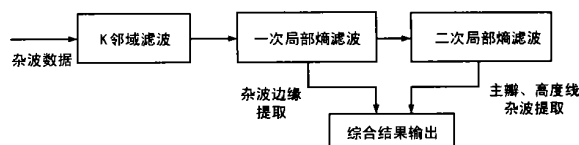


图 2 边缘提取混合型滤波器

3.2 滑窗的大小设计

在混合型滤波器的各级中, 滑窗的设计直接影响着输出结果.

K 邻域滤波器的作用主要是剔除待检测目标、较大的随机起伏对杂波跟踪的干扰。在频域特性上是一种低通滤波器,它在滤除干扰、噪声的同时,也模糊了图像的边缘,这是图像处理中普遍存在的一对矛盾。作为一种非线性滤波,可以通过选择合适的滑窗大小和 K(K 邻域滤波器滑窗内剔除的极大、极小点数)满足系统的要求。

(1) 根据系统对待检测目标的要求,确定 K 值,在此,可根据杂波跟踪的要求,将 K 邻域滤波器设计成非平衡方式(滑窗内剔除的极大、极小点数不同);

(2) 滑窗的大小 $N \times N$ 直接影响跟踪杂波边缘的精度。在满足 $M \times N > K$ 的条件下,结合系统对跟踪精度的要求,确定 $M \times N$ 。

局部熵滤波器的作用主要是对经 K 邻域滤波器处理后的杂波数据进行边缘提取,由于局部熵是反映图像灰度的离散程度,局部熵小的地方,图像灰度离散性较大,因而局部熵滤波并不能直接反映灰度的大小,一次局部熵滤波只能同时提取出杂波边缘,不能区别主瓣杂波、高度线杂波边缘与副瓣杂波边缘。为此,我们考虑采用二次局部熵滤波提取主瓣杂波、高度线杂波。将两次滤波结果综合输出。

为了保证系统对跟踪精度的要求,同时考虑到局部熵的特点,局部熵滑窗的尺寸不宜选大,通过多次仿真,一般选择为:2×2,3×3,4×4。

3.3 仿真

系统仿真参数同上例,我们对混合局部熵滤波算法进行了仿真:杂波二维分布图大小为 128×100,杂波数据服从对数正态分布。在位置 (40,70), (80,20) 处增加了占据空间、信噪比为 40dB 干扰目标。

K 邻域滤波器设计成非平衡方式,滑窗为 3×3,选取 K=4(3 大 1 小);

选取两次局部熵滑窗为 2×2,图 3 为杂波数据服从对数正态分布、K 邻域滤波器输出、一次局部熵滤波、二次局部熵滤波结果。

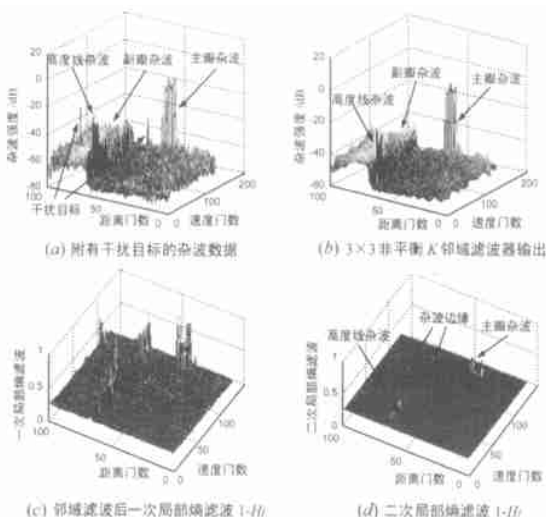


图 3 附有干扰目标的对数正态分布杂波的混合滤波处理

3.4 基于局部熵的边缘提取

对于复杂的多目标图像,尽管不同目标的灰度可能差别很大,但是,同一目标内灰度离散性较小,其局部熵值相对较大,所以,最大局部熵值的地方一般在较为平坦的区域内,在文献^[6]中,作者提出了一种基于局部熵的区域增长方法,可将最大熵值对应的像素作为区域增长的种子进行目标分割。在一个目标分割结束后,进行下一个目标的分割,直到所有目标分割结束。区域增长过程中,目标分割结束条件由确定的判决准则决定,当判决准则不满足时,迭代终止。区域增长终止判决准则可以根据需要选用不同的形式。

杂波二维分布图的杂波跟踪处理,其主要目的是要对主瓣杂波、高度线杂波的位置和副瓣杂波的边缘跟踪,在图 3(c)中,我们发现:所有杂波边缘的一次局部熵值远小于均匀区的一次局部熵值,受基于局部熵的区域增长方法的启发,本文提出一种最大局部熵相似性判决准则对经过进行局部熵滤波后的数据进行分割处理,得到了满意的结果。最大局部熵的相似性为

$$s = w(s_0 - s)^2 \quad (4)$$

式中 w 为权值。对于最大图像局部熵相似性判决准则, s_0 为整个区域内最大局部熵值, s 为待判断位置局部熵。式(4)中,当 s 大于一定门限时,待分割元素属于边缘区域,否则,不属于边缘区域。基于图像局部熵为判决准则的边缘提取过程为:

(1) 由式(3)计算图像局部熵值;

(2) 确定图像最大局部熵值;

(3) 由式(4)逐点计算待判断像素点的图像局部熵与最大局部熵相似性 s ,当 s 大于给定门限时,待判断像素属边缘区域,否则,不属于边缘区域;

(4) 对所有像素点都判断后,边缘提取结束,得到一边缘二值图。

在图 3(d)中,我们发现:主瓣杂波、高度线杂波的位置的二次局部熵值远小于其余区的二次局部熵值,对二次局部熵滤波结果采用上述相同的方法,求取主瓣杂波、高度线杂波的位置。得到一幅主瓣杂波、高度线杂波的位置二值图。

综合两部分的结果,得到边缘、主瓣杂波、高度线杂波的位置与背景的二值图。

我们对上述例子中的杂波数据,采用局部熵混合滤波和局部熵相似性判决准则,进行边缘提取,选取两次局部熵滑窗为 2×2,得到杂波边缘提取结果如图 4 所示。并且对不同的杂波数据作了多次仿真,杂波跟踪结果与理论计算的特征杂波

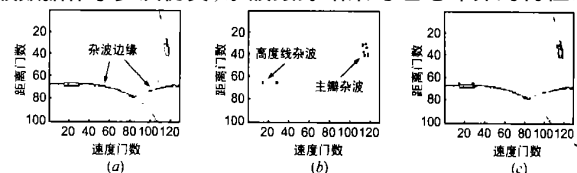


图 4 局部熵混合滤波边缘提取结果多值图

(a) 一次局部熵滤波边缘提取; (b) 二次局部熵滤波边缘提取; (c) 组合结果。

位置一致,证实了该方法的有效性.

4 小结

在该杂波跟踪算法中,滑窗(K邻域滤波、局部熵滤波)的结构和尺寸是影响杂波跟踪精度的重要因素之一,也是决定算法运算量的关键.实际应用中应结合系统指标对杂波跟踪精度和运算时间的要求,合理设计滑窗.在 Pentium III 866MHz / 256M 计算机上,我们采用 MATLAB 6.1 对杂波数据仿真,K邻域滤波器滑窗设计成非平衡方式,局部熵滑窗为,多次运行时间平均为 8.4582 秒.对于实际系统来说,根据系统的 PRF 和 FFT 点数,要求杂波跟踪实时处理时间约为毫秒(ms)量级.由局部熵的定义式(4)可知,局部熵滤波的实现主要是由大量的滑窗内数据求和运算构成,为了避免大量的重复求和运算,可以采用并行折叠求和算法和向上平移与向左平移算法^[6~9],通过 FPGA 或其他的硬件电路实现.此外文献^[10]也给出了用 FPGA 实现 K 邻域滤波的方法,这对我们进一步开展杂波跟踪和其相关的恒虚警检测的实现研究提供了帮助.

杂波跟踪技术与其他检测技术结合,为雷达系统提供杂波特征数据、地型数据、气象数据,将人工智能技术应用于雷达信号处理,构成恒虚警专家系统^[11],可大大提高雷达的检测性能.本文提出最大局部熵相似性判决准则;提出将局部熵构成混合滤波器用于杂波边缘的提取;并给出了仿真结果;对今后采用并行 DSP 和 FPGA 技术的研究提出了设想,为开展具有人工智能技术的恒虚警系统作了初步的探讨.

参考文献:

- [1] Michael C Wicks, William J Baldygo, Jr, Brown, Russell D. Expert system constant false alarm rate (CFAR) processor [P]. United States. PN:5499030, May 1996.
- [2] ZHANG Gong, ZHU Zhaoda. Application of fuzzy C-mean cluster algorithm on clutter tracking [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2002, 15 (1): 44 - 48.
- [3] Pal N R, Pal S K. Object-background segmentation using new definitions of entropy computers and digital techniques [J]. IEE Proceedings

E, 1989, 136(4): 284 - 295.

- [4] Hojjatoleslami S A, Kittler J. Region growing: A new approach Image Processing [J]. IEEE Transactions, 1998, 7(7): 1079 - 1084.
- [5] Pal N R, Pal S K. A review on image segmentation techniques [J]. Pattern Recogn, 1993, 26(9): 1277 - 1299.
- [6] 王广君, 田金文, 柳键, 吴国平. 基于局部最大熵的多目标图像分割方法 [J]. 华中理工大学学报, 2000, 128(12): 4 - 5.
- [7] Z Fang, L M Ni. On the communication complexity of generalized 2-D convolution on array processors [J]. Computers, IEEE Trans, 1989, 38 (2): 184 - 193.
- [8] L J Siegel et al. Parallel processing approaches to image correlation [J]. Computers, IEEE Trans, 1982, 31(3): 208 - 218.
- [9] 李俊山, 沈绪榜. 局部熵差图象匹配并行算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2000, 21(12): 1234 - 1236.
- [10] Gevorkian D, Egiagian K, Astola J. Modified K-nearest neighbour filters for simple implementation [A]. The 2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. US: IEEE, 2000, 4. 565 - 568.

作者简介:



张 弓 男, 1964 年 2 月生于安徽省蚌埠市, 2002 年毕业于南京航空航天大学通信与信息专业, 博士, 现为南京航空航天大学信息科学与技术学院副教授, 主要从事信号处理、雷达成像、通信电路方面的教学和科研工作.

朱兆达 男, 1939 年 3 月生于山东省青岛市, 1960 年毕业于南京航空学院, 现为南京航空航天大学信息科学与技术学院教授、博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员, 研究方向为: 雷达信号检测与处理.

周亦南 女, 1977 年 7 月生于江苏省南京市, 现为南京航空航天大学信息科学与技术学院硕士研究生, 研究方向为: 雷达信号检测与处理.