

在海域红外杂波背景中小目标探测 的空间匹配滤波技术

张孝霖 郭文轩 舒郁文 郝文晖 严俊

(华北光电技术研究所, 北京, 100015)

摘要 利用空间匹配滤波技术, 针对海域复杂的红外杂波背景进行了小目标探测. 由计算机模拟获得了滤波器设计参数, 结果表明滤波后信杂比增益有显著提高, 虚警率随之下降, 滤波算法硬件易于实现, 证明这是一种抑制红外背景杂波的有效技术.

关键词 空间匹配滤波, 海域红外背景杂波, 小目标探测.

引言

远距离下目标的探测捕获是红外搜索跟踪 (IRST) 中的关键问题之一^[1,2,3]. 远距离下目标可探测信号明显下降^[4], 特别在非平稳的强背景干扰下, 必须发展背景杂波抑制, 即滤波技术. 对小目标, 特别是小于瞬时视场张角的目标, 首要的是改善信杂比, 只有充分抑制杂波, 显著降低虚警率, 才能通过后置处理进行目标的探测与跟踪.

本世纪 70 年代末以来发展了一种称为最小平均平方即 LMS 的空间滤波技术. 并从一维发展到二维^[5~8], 它对于平稳背景是一种有用的技术, 然而对非平稳背景, LMS 滤波使信杂比增益恶化. 80 年代以来, 发展了一系列新的红外背景杂波的抑制技术, 如自适应空间匹配滤波技术^[9~12].

由于海域是一类十分重要的背景, 特别在有风浪的条件下, 背景杂波构成了严重干扰. 因此本文着重针对同时含有天空、海天界面与海域的背景, 且在光机扫描红外成像系统获得的图像数据下进行计算机模拟, 以获得滤波器设计参数, 分析滤波后的信杂比增益与虚警率变化.

1 空间匹配滤波算法

在没有任何简化假设下, 对非平稳背景中的任意小目标; 没有最佳的线性探测技术. 然而对淹没在近似正态分布杂波中的已知其响应分布的小目标, 寻求其最佳信杂比, 可使匹配滤波器的设计变得容易, 且可得到可靠而几乎最佳的探测技术^[13]. 在数字化系统中处

理的是离散量, 设目标响应信号向量为 S , 局域杂波向量为 C , 滤波器权向量为 W , 信杂比定义为

$$SCR = \frac{(W^T S)^2}{E[(W^T C)(W^T C)^T]} = \frac{(W^T S)^2}{W^T R W}, \quad (1)$$

$$R = C C^T, \quad (2)$$

其中 $E[\]$ 表示数学期望值, R 为杂波的协方差矩阵. 对向量 W 微分, 令式 (1) 微分后的结果等于零, 得

$$W = \left(\frac{W^T R W}{W^T S} \right) \frac{S}{R}, \quad (3)$$

式 (3) 中括号内的值为一标量, 可归一化为 1. 如果保留括号内的结果, 得权向量, 即滤波器的一般结果为

$$W = \lambda R^{-1} S, \quad (4)$$

式中 λ 为任意标量因子, R^{-1} 是 R 的逆矩阵. 于是滤波器输出为

$$Y = W^T X. \quad (5)$$

对凝视系统, 考虑到点扩散函数, 目标的强度分布可设为^[11]

$$\begin{pmatrix} .2 & .4 & .2 \\ .4 & 1 & .4 \\ .2 & .4 & .2 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式 (1)~(5) 中的向量均进行线性化, 于是上述强度分布的目标线性化后的向量为

$$S^T = (.2, .4, .2, .4, 1, .4, .2, .4, .2). \quad (7)$$

目标强度分布有赖于红外系统的调制传递函数, 特别是光学系统的调制传递函数, 由之决定了像平面上目标像的扩展分布. 事实上这种分布还有赖于在瞬时视场内目标的远近、形状与方位. 式 (7) 仅仅是一种对称假定下分布的逼近.

对光机扫描系统, 除应考虑点扩散函数外, 还要计及成像的卷积过程^[14]. 因而常用一单周期余弦形的一维分布作最佳拟合^[5,6]. 在过峰值采样假设下, 根据原始图像的分辨率与数字化中的采样率, 目标分布可占 3 个、5 个或 7 个像素. 本文取目标响应分布占 5 个像素, 且在一维 9 个像素滤波窗口尺寸下, 目标向量为

$$S^T = (0, 0, 0.1, 0.35, 1, 0.35, 0.1, 0, 0), \quad (8)$$

背景向量为

$$X^T = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9), \quad (9)$$

杂波局域协方差为

$$R_L = (X - \bar{X})(X - \bar{X})^T \quad (10)$$

滤波器设计的重要步骤是针对要滤波的背景求出对应全帧或部份帧的协方差矩阵 R ，即当滤波窗口逐点滑动中获得的局域协方差的平均值

$$R(K) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (\mathbf{X}(i) - \bar{\mathbf{X}})(\mathbf{X}(i) - \bar{\mathbf{X}})^T, \quad (11)$$

其中 $\mathbf{X}(i)$ 是第 i 个空间位置的图像数据向量， K 是局域协方差矩阵总数。

2 计算机模拟及其结果

本文利用光机扫描红外成像系统获得的在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波长范围内的 $512 \times 512 \times 8 \text{ bit}$ 数字化图像数据，其目标分布由向量化的式 (8) 表示；滤波是数字化的，滤波器窗口取 X 方向，即行扫描方向的一维 1×9 的窗口尺寸，重点选择含有天空、海天界面与海域的背景，且在有较强海浪与阴天条件下的数据，以研究较恶劣气象下的背景杂波特征及其滤波效果。所感兴趣的典型背景区域为 $20 \sim 480$ 行和 $12 \sim 479$ 列。

图 1 显示了背景杂波在 X 向的典型强度分布， Y 向表示其灰度等级，针对本文研究的目的没有进行强度定标。第 305 与 306 行是中仰角天空的分布，第 350 与 351 是近海天界面低仰角天空，第 381 与 382 是纯海域。背景杂波中包含了红外系统本身的噪声，但明显可见背景杂波显著强于系统本身的噪声（特别是海域背景），且呈明显的随机特性。

按式 (4) 与式 (11)，在 $20 \sim 480$ 行和 $12 \sim 479$ 列全域内计算得的权向量为

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} 0.025 \\ -0.097 \\ 0.117 \\ -0.161 \\ 0.238 \\ -0.160 \\ 0.115 \\ -0.096 \\ 0.024 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

在同帧天空背景，对应于 $256 \sim 296$ 行和 $12 \sim 479$ 列内所得权向量为

$$\mathbf{W}_1 = \begin{pmatrix} 0.030 \\ -0.112 \\ 0.139 \\ -0.190 \\ 0.278 \\ -0.190 \\ 0.139 \\ -0.114 \\ 0.030 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

同帧海域即 375~415 行和 12~479 列内权向量为

$$W_2 = \begin{pmatrix} 0.029 \\ -0.077 \\ 0.099 \\ -0.141 \\ 0.196 \\ -0.142 \\ 0.099 \\ -0.078 \\ 0.023 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

由式 (12)~(14) 可见, 在海域与空域中计算出的权向量 W_2 与 W_1 是有明显差异的, 从这两类背景统计出不同的标准差 σ 也可以预计到这点, 因为 σ 的统计值可用于对背景进行分类. 由此可见, 如果根据对背景进行计算机模拟训练的先验知识, 实时对背景进行统计分类, 从而选择不同的滤波器, 就可得到更佳的自适应滤波效果. 由所得结果还可看到全域内计算出的 W 几乎等于空域与海域内的权向量 W_1 与 W_2 的平均值.

由于大多数实际应用中, 不可避免地在一帧内同时出现空域、海域及其界面, 为简化硬件设计, 我们利用全域求出的权向量对全域进行滤波, 并计算滤波后对滤波前的信杂比、增益与虚警率变化以考察其效果.

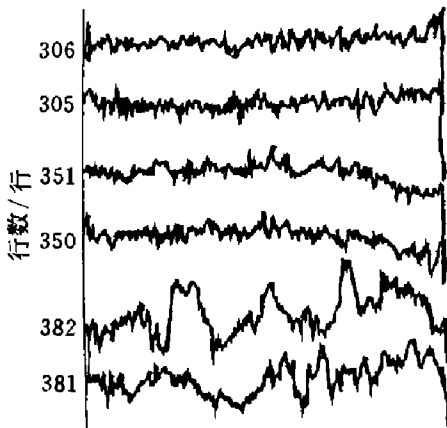


图 1 滤波前典型杂波特征曲线
Fig. 1 The typical clutter characteristic curves before filtering

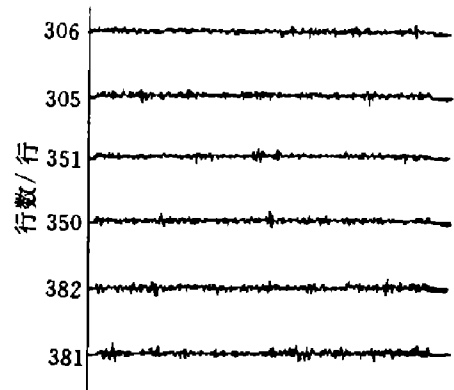


图 2 滤波后典型杂波特征曲线
Fig. 2 The typical clutter characteristic curves after filtering

图 2 显示了与图 1 典型背景对应曲线经滤波后的波形, 显见杂波得到了有效抑制. 滤波效果常由信杂比增益来衡量, 文献 [11] 对信杂比增益定义为

$$SCR_{\text{Gain}} = 10 \log \frac{(S^2/\sigma^2)_{\text{out}}}{(S^2/\sigma^2)_{\text{in}}}, \quad (15)$$

由于标准差 σ 与平均绝对差 MAD 在统计上有如下关系^[10]

$$E[MAD] = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma, \quad (16)$$

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|, \quad (17)$$

式中 N 为窗口所占像素数, \bar{x} 为窗口内 x 的均值. 为简化计算, 本文定义的信杂比增益为

$$SCR_{\text{Gain}} = 10 \log \frac{(S^2/MAD^2)_{\text{out}}}{(S^2/MAD^2)_{\text{in}}}, \quad (18)$$

在指定全域, 即 20~480 行和 12~479 列内滤波前后统计计算得

$$SCR_{\text{Gain}} = 4.66.$$

这与文献 [11,12] 所得结果的范围是一致的. 当然, 按背景分类进行滤波可提高信杂比增益.

滤波效果还应从滤波前后目标分割中探测概率或虚警率的变化得出进一步的结论. 常用方法之一是固定虚警率下的探测概率作为判断标准, 也可用相反的标准. 本文采用恰能分割出所加目标峰值点下分割出的像素数作为标准, 由分割出的像素数与被滤波图像总像素数计算此条件下的虚警率, 以下结果说明这是有效而可靠的.

经典局域统计下自适应分割算法为

$$Th. = Av. + \alpha \cdot \sigma, \quad (19)$$

式中 $Th.$ 表示阈值, $Av.$ 是局域背景窗口内的均值, σ 是局域背景窗口内的标准差, 局域由分割窗口决定, 当然, 不能让目标进入背景统计. 本文选择的局域分割窗口稍长于滤波窗口. 按式 (16) 所示关系, 这里采用已有的阈值简化算法^[10,11,15]

$$Th.(1) = Av. + \alpha \cdot MAD, \quad (20)$$

式中 α 被选择到恰好分割出所加目标峰值下的值以进行虚警率统计.

加入目标的分布由式 (8) 决定, 目标峰值由下式决定

$$P_{\text{target}} = Av. + \beta \cdot MAD, \quad (21)$$

式中 $Av.$ 与 MAD 都是被加入点附近的局域的统计值, 局域宽度相同于分割窗口宽度. 系数 β 用来调整加入目标的强度, 即原始信杂比.

局域统计下的分割方法本身就是一种滤波技术. 本文还用另一种分割算法 $Th.(2)$ 与式 (20) 表示的算法 $Th.(1)$ 进行比较, 其结果见表 1 与表 2. 关于分割算法的影响将另文讨论.

表 1 是在海天界面附近低仰角天空任选一行加入单个目标下滤波与分割的结果. 表 2 是将 3 个目标分别加入同帧的中仰角、低仰角天空与海域下进行滤波与分割的结果. 加入目标的强度系数 β 都相同, 所有结果都是在上述全域内得到的.

表 1 在恰能分割出目标峰值点下分割出的像素数 N_s 和虚警率 P_f Table 1 The segmented pixel number N_s and the false alarm probability P_f on the condition of just segmenting the target peak point

算法	滤波前		滤波后	
	N_s	$P_f(\%)$	N_s	$P_f(\%)$
<i>Th.</i> (1)	3.036	1.40	2.746	1.27
<i>Th.</i> (2)	1.537	0.712	289	0.133

表 2 在恰能分割出 3 个目标峰值点下分割出的像素数 N_s 和虚警率 P_f Table 2 The segmented pixel number N_s and the false alarm probability P_f on the condition of just segmenting the three target peak points

算法	滤波前		滤波后	
	N_s	$P_f(\%)$	N_s	$P_f(\%)$
<i>Th.</i> (1)	16.892	7.83	2.748	1.27
<i>Th.</i> (2)	7.171	3.32	292	0.134

3 讨论

由于式 (3) 或 (4) 所表示的空间匹配滤波同时考虑到目标的响应分布 S 与背景杂波特性, 自然较 LMS 有较好的滤波特性, 这是一种有效的并正在发展的滤波技术.

本文一开始就说明了, 这是不进行任何背景简化假定下的算法, 因而对于简单的, 即比较均匀的背景, 可用此算法来抑制红外系统本身的噪声.

已有计算机模拟说明^[12], 当背景不相关时, 目标响应分布尺寸增大可使滤波器响应增大, 从而改善信杂比增益; 反之当背景是相关时, 小尺寸的目标分布能增大响应. 但是, 如上所述, 目标响应分布尺寸的大小是不可控制的, 由多种因素决定, 因而进一步研究使算法与硬件不太复杂而又能保持必要的信杂比增益是重要的.

表 1、特别是表 2 的结果说明, 当目标以海域为背景时, 滤波前后的差别十分明显. 改进分割算法, 如用算法 *Th.*(2), 滤波前后的差别更加突出. 在目标背景为海域下, 滤波前后分割出的像素数分别为 7、171 与 292. 与表 1 相比, 滤波后只增加了 3 个点, 其中还包括分别加在中、低仰角天空的两个目标的峰值点, 即实际上只多了一个点. 虚警率降低了一个数量级. 说明这种滤波与分割算法对海域杂波的抑制是十分有效的.

4 结语

本文所述空间匹配滤波技术用于含海域的背景, 能有效地抑制复杂的红外背景杂波. 即使在不分类下所获得的滤波参数也有良好的背景适应能力; 当然对背景分类进行滤波器的设计将有更好的效果. 因此对背景进行有效地分类并进一步深入对这类滤波技术的研究是有意义的. 这种滤波技术易于硬件实现, 因而是有效的应用技术.

目标分割算法同样是重要的, 研究并恰当地选择分割算法能进一步增强滤波效果.

参考文献

- 1 Panel Discussion, *SPIE*, 1989,1096:140
- 2 Panel Discussion, *SPIE*, 1990,1305:244
- 3 Peckham L N, Davis JS, Allen R C. *SPIE*, 1987,750:92
- 4 Zhang X L. *Int'l. J. IR MMW*, 1992,13(4):559
- 5 Longmire M S, Milton A F, Takken E H. *SPIE*, 1981,292:193
- 6 Takken E H, Fridman D, Milton A F, et al. *Applied Optics*, 1979,18(24):4210
- 7 Handhond M M, Thomas D W. *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 1988,35(5):485
- 8 Zeidler J R. *Proc. IEEE*, 1990,78:1781
- 9 Wang C D. *Optical Engineering*, 1982,21(6):1033
- 10 Aridgides A, Gook G, Mansur S, et al. *SPIE*, 1988,933:32
- 11 Vom Lehn J C, Langan D A, Chan D S K. *SPIE*, 1989,1096:86
- 12 Chan D S K, Langan D A, Staver D A. *SPIE*, 1990,1305:53
- 13 Pratt W K. *Digital Image Processing*. New York: John Wiley and Sons, 1978.560
- 14 Zhang X L, Shu Y W. *Int'l. J. IR MMW*, 1986,7(5):749
- 15 Hansen H G, Elyashar C. *SPIE*, 1989,1096:44

MATCHED SPATIAL FILTERING TECHNIQUE FOR SMALL TARGET DETECTION IN IR CLUTTER BACKGROUND CONTAINING SEA AREA

Zhang Xiaolin Guo Wenxuan Shu Yuwen Hau Wenhui Yan Jun

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract By using matched spatial filtering technique, small targets are detected against the complicated IR clutter background containing sea area. By means of computer simulation, the filter design parameters are obtained. After filtering, the signal-to-clutter ratio gain is boosted markedly and the false alarm probability is decreased accordingly; the filter's hardware can be realized easily. This proves to be an effective technique to reject IR background clutter.

Key words matched spatial filtering, sea area IR background clutter, small target detection.