

文章编号:1001-9014(2005)06-0477-04

基于三值振幅-位相滤波器的红外景象匹配算法

秦琴, 柴震海, 傅艳红, 施海燕, 王汝笠

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:针对传统的二元纯位相匹配滤波器进行光电混合景象匹配时存在信息丢失量大、识别困难的问题,提出了三值振幅-位相匹配滤波器算法.对红外景象匹配过程进行了计算机仿真实验,并与BPOF和ACMF匹配算法的相关结果进行对比.实验表明,三值振幅-位相匹配滤波器算法提高了相关面的信噪比、相关峰锐度,增强了系统的抗噪声能力,进而有效地提高了景象匹配概率.

关键词:景象匹配;匹配滤波器;红外图像

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

INFRARED SCENE MATCHING BASED ON TERNARY AMPLITUDE-PHASE FILTER

QIN Qin, CHAI Zhen-Hai, FU Yan-Hong, SHI Hai-Yan, WANG Ru-Li

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences,
Shanghai 200083, China)

Abstract: Because the traditional binary phase-only matched filter (BPOF) has a great loss of information and difficulty in recognition in hybrid optoelectronic scene matching system, ternary amplitude-phase filter (TAPF) was proposed here to try to solve these problems. The computer simulation of infrared scene matching was carried out and the performances of TAPF, BPOF and ACMF were compared. Experiment results show that TAPF can improve SNR and PCE of the correlation pin. So it can greatly enhance the anti-noise performance of the system, and then improve the probability of scene matching effectively.

Key words: scene matching; match filter; infrared image

引言

光电混合景象匹配技术有机的结合了光学处理和数字处理过程,用光学处理完成计算量极大的成像变换和相关任务,再用数字处理灵活精确的完成控制分析和判断任务.现有的实时光调制器件多为离散化调制器件,无法记录和再现连续的频谱函数.因此,将连续的模板频谱函数量化后生成的数据文件制作成计算机全息空间匹配滤波器.制作匹配滤波器的过程比较简单,关键是如何选择有效的匹配滤波器算法.

传统的二元纯位相匹配滤波器^[2] (Binary phase-only matched filter,缩写为BPOF)通过对位相函数的二值化可以在光电混合景象匹配系统中得到较高的光学效率和尖锐的相关峰输出.但由于位相函数对于尺度、旋转等变化非常敏感,使得系统容差

能力大大降低.而实际的红外景象匹配过程,是飞机拍到的红外航片同卫星图片制作成的模板之间的匹配.由不同传感器所造成的成像差异以及飞行高度、飞行角度等所带来的误差无法完全避免,而红外图像又由于普遍存在的目标与背景对比度差、边缘模糊等缺点,一直是景象匹配中的难点.上述的诸多限制导致了BPOF算法应用于红外景象匹配系统时匹配概率的下降,无法满足景象匹配要求.

由于二元纯位相滤波器存在难以克服的缺点,一些学者试图把振幅信息调制进位相信息后再做二值化处理,即振幅补偿匹配滤波算法(ACMF)^[3,4],匹配效果有所提高,但仍无法满足高精度的匹配标准.图像的位相与振幅是图像在频域内的重要特征信息,丢失任何一项都会给后面的匹配识别带来不利.如何有效的结合位相信息与振幅信息是目前研究的重点和难点.本文首次将模板的振幅信息与位

收稿日期:2004-09-27,修回日期:2005-05-23

作者简介:秦琴(1978-),女,辽宁沈阳人,博士研究生,主要研究方向为图象处理、模式识别.

Received date: 2004-09-27, revised date: 2005-05-23

相信息分别二值化后,结合二值振幅信息与二值相位信息进行编码,实现三值化振幅-位相滤波(Ternary amplitude-phase matched filter,缩写为TAPF)算法,对匹配算法研究进行了有益的尝试.实验结果表明,该算法不仅具有BPOF算法光学效率高,光能损耗小等优点,而且可以提高相关面的信噪比、抗噪声能力,使得系统容差性大大提高,进而有效的提高了系统的景象匹配概率.

1 二元纯位相匹配滤波器(BPOF)

若输入模板的傅里叶变换为 $F(u, v) = |F(u, v)| \exp\{i\varphi(u, v)\}$, 则滤波器传递函数为 $H(u, v) = F^*(u, v) = |F(u, v)| \exp\{-i\varphi(u, v)\}$, 取其相位信息为纯位相滤波器函数 $H_{POF}(u, v) = \exp\{-i\varphi(u, v)\}$. 对只有位相信息的纯位相滤波器进行二值化, 即为二元纯位相滤波器函数 $H_{BPOF}(u, v)$. 传统的纯位相匹配滤波器的二值化如图1所示, 过原点、与复平面虚轴Im夹角为 β 的直线将复平面分割成两部分. 将幅角处于 β 左侧半面置为 -1 , 幅角处于 β 右侧半面置为 $+1$, 得到二值纯位相匹配滤波器表达式^[1]

$$H_{BPOF} = \begin{cases} 1, & \varphi(u, v) \in [\beta - \pi, \beta] \\ -1, & \varphi(u, v) \in [\beta, \beta + \pi] \end{cases} \quad (1)$$

β 值可任选, 选 $\beta = 0, \pi/4, \pi/2$ 分别对应于 cosine-BPOF、Hartley-BPOF 和 sine-BPOF. 本次实验我们取 $\beta = 0$.

2 振幅补偿匹配滤波器(ACMF)

振幅补偿匹配滤波器(Amplitude-compensated matched filter, 缩写为ACMF)定义为

$$H_{ACMF} = \frac{\exp[-i\varphi(p, q)]}{1 + k|F(p, q)|} \quad (2)$$

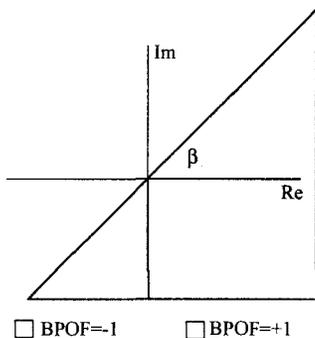


图1 二值纯位相匹配滤波器
Fig.1 Binary phase-only matched filter

其中, k 为常量, 将 H_{ACMF} 再进行二值化, 即得到二值振幅补偿匹配滤波器. H_{ACMF} 将振幅信息补偿给纯位相信息, 有利于提高系统的容差性和匹配效果.

3 三值振幅-位相滤波器(TAPF)

TAPF 算法可以看作是二值位相调制模式与二值振幅调制模式的结合, 滤波器传递函数 $H(u, v) = F^*(u, v) = |F(u, v)| \exp\{-i\varphi(u, v)\}$ 的位相部分按照公式(1)进行二值化, 振幅部分 $|F(u, v)|$ 按照公式(3)二值化, 得到二元纯振幅滤波器 H_{BAOF}

$$H_{BAOF} = \begin{cases} 0, & |F(u, v)| < Th \\ 1, & |F(u, v)| \geq Th \end{cases} \quad (3)$$

振幅分割阈值 Th 的选取尤为重要, 太大或太小都会影响匹配结果, 本次实验我们取 $Th = \overline{|F(u, v)|}$ ($\overline{|F(u, v)|}$ 为振幅均值).

将 H_{BPOF} 与 H_{BAOF} 结合起来即得到三值振幅-位相滤波器, 如图2所示, 其表达式为

$$H_{TAPF} = H_{BPOF} \cdot H_{BAOF} = \begin{cases} 0, & |F(u, v)| < Th \\ 1, & |F(u, v)| \geq Th \text{ and } \varphi(u, v) \in [\beta - \pi, \beta] \\ -1, & |F(u, v)| \geq Th \text{ and } \varphi(u, v) \in [\beta, \beta + \pi] \end{cases} \quad (4)$$

4 三种算法性能比较

我们对自制的光电混合景象匹配系统进行了计算机仿真, 并比较分析了这三种算法的性能. 评价匹配识别的效果可以从两个方面进行, 一是看相关峰的峰值情况, 二是看匹配概率是否达到要求. 相关峰峰值可以从不同评价参数来判别, 本文选择 SNR、PCE 和 PSR (主侧峰之比) 这三个参数来评价相关效果, 分别表示为

$$SNR = \frac{|V_{\max}|^2}{\sigma^2} \quad (5)$$

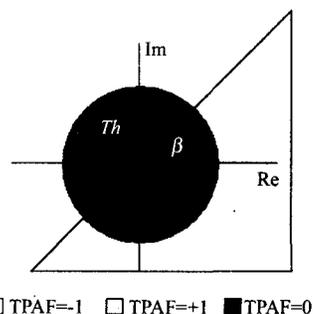


图2 三值振幅-位相匹配滤波器
Fig.2 Ternary amplitude-phase matched filter

$$PCE = \frac{V_{\max} - E\{V\}}{\sqrt{E\{V^2\} - (E\{V\})^2}}, \quad (6)$$

$$PSR = \frac{V_{\max}}{V_{\text{sub}}}. \quad (7)$$

式中 V 为相关面; V_{\max} 为相关面上的最高峰幅值; V_{sub} 为相关面上的次高峰幅值; σ^2 为相关面上噪声方差.

PCE 针对相关峰值的锐度进行测量, SNR 用来评价算法的抗干扰能力, PSR 则反映了匹配算法对相似景物的辨别能力 ($PSR \geq 1$), 值越接近 1 说明算法分辨能力越低, 导致失配的概率也越大.

本文匹配仿真实验的实时图采用大小为 256×256 的中波红外航片, 从原图中截取 80×80 的有典型特征的地物目标 (河流交叉处) 作为模板, 在原图上施加不同背景噪声 (附加噪声为零均值, 方差范围从 $0.01 \sim 0.1$ 的高斯噪声)、不同几何形变参数 (模拟不同飞行高度引起的图像几何形变, 主要表现在图像尺寸缩放, 即分辨率上, 形变参数取 $0.8 \sim 1.2$), 用以仿真飞行器不同成像干扰条件下得到的实时图, 匹配仿真结果如图 3 所示, 相关峰评价参数对比结果见图 4 和图 5.

图 4 表明, 在不施加噪声时 ($\text{Noise level} = 0$),

BPOF、ACMF 相关面的各项参数均优于 TAPF 算法. 但随着噪声的增加, 各相关参数值均下降很快. 其中, BPOF 算法在 $\text{Noise level} > 0.04$ 时出现误判 (因此这一区间的参数曲线无法划出), ACMF 算法在 $\text{Noise level} > 0.05$ 时出现误判 (这一区间的参数曲线无法划出), TAPF 算法则在 $\text{Noise level} > 0.1$ 时才出现误判, 对噪声的适应性明显优于前两种算法.

图 5 表明, 在不施加几何形变时 ($\text{Resolution factor} = 1$), BPOF、ACMF 相关面的各项参数均优于 TAPF 算法. 但随着形变程度的增加, 各相关参数值均下降很快. 其中, BPOF、ACMF 算法在 $\text{Resolution factor} < 0.92$ 和 $\text{Resolution factor} > 1.06$ 时出现误判, TAPF 算法则在 $\text{Resolution factor} < 0.84$ 和 $\text{Resolution factor} > 1.13$ 时才出现误判, 对几何形变的适应性明显优于前两种算法.

为验证这一结论, 本文对 60 幅红外图片进行上述仿真实验, 得到如下统计结果, 如表 1 (\bar{D} 表示在噪声方差取值范围 $0 \sim 0.04$ 或者形变参数取值范围 $1 \sim 1.04$ 内相应参数的平均下降率, σ_{\max} 表示不出现误匹配所允许的最大噪声方差平均值, \bar{R} 表示不出现误匹配所允许的平均几何形变参数取值范围).

另外, 本文对 182 幅大小为 256×256 航拍红外

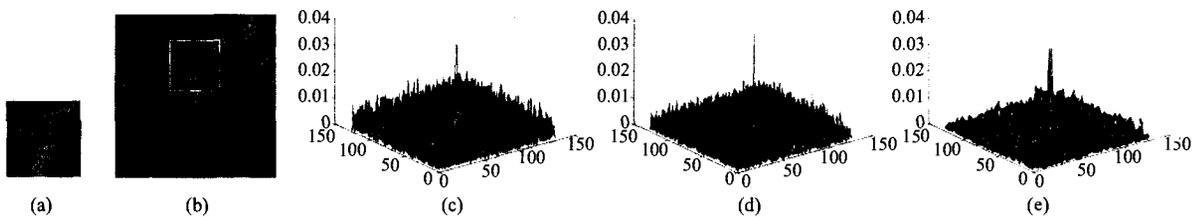


图 3 三种算法相关结果显示 (噪声方差 0.01, 形变参数 0.98)

(a) 模板 (b) 红外输入图像 (c) BPOF 相关结果 (d) ACMF 相关结果 (e) TAPF 相关结果

Fig. 3 Fig. 3 The correlation results of the three methods (Noise level = 0.01, Resolution factor = 0.98)

(a) matching template image (b) infrared input-image the correlation result according to (c) BPOF (d) ACMF (e) TAPF

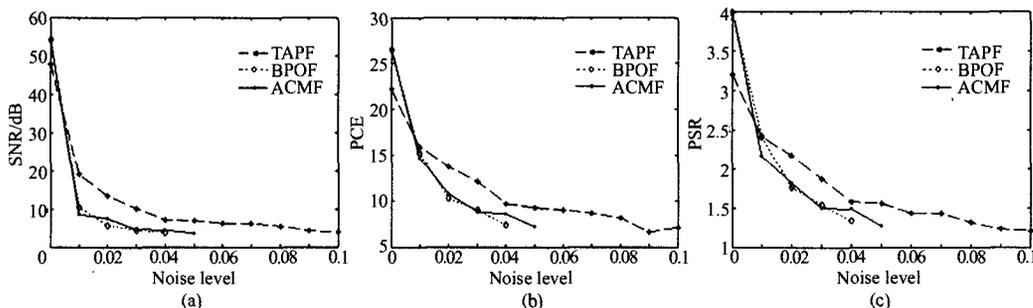


图 4 不同噪声条件下 BPOF、ACMF 和 TAPF 算法的相关峰评价参数对比结果

(a) SNR (b) PCE (c) PSR

Fig. 4 The performance of BPOF, ACMF and TAPF correlations at different level of noise

(a) SNR (b) PCE (c) PSR

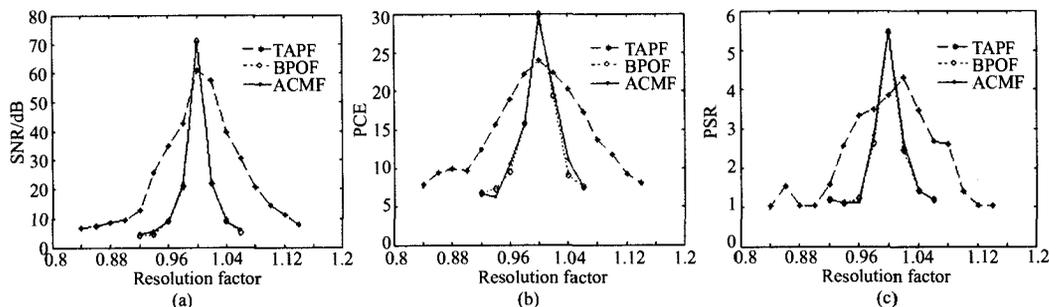


图5 不同分辨率下 BPOF、ACMF 和 TAPF 算法的相关峰评价参数对比结果

(a) SNR (b) PCE (c) PSR

Fig. 5 The performance of BPOF, ACMF and TAPF correlations at different resolution factors

(a) SNR (b) PCE (c) PSR

表1 三种方法匹配性能评价参数比较

Table 1 Comparison of the performances of BPOF, ACMF and TAPF correlations

匹配方法	噪声方差取值范围 0 ~ 0.04			σ_{\max}	形变参数取值范围 1 ~ 1.04			\bar{R}
	$\overline{D_{SNR}}$	$\overline{D_{PCE}}$	$\overline{D_{PSR}}$		$\overline{D_{SNR}}$	$\overline{D_{PCE}}$	$\overline{D_{PSR}}$	
BPOF 算法	96.68%	69.89%	75.77%	0.043	77.54%	58.13%	65.17%	0.918 ~ 1.057
ACMF 算法	95.41%	68.2%	71.63%	0.045	74.86%	57.28%	65.15%	0.92 ~ 1.059
TAPF 算法	79.55%	50.27%	46.35%	0.12	18.68%	22.59%	19.76%	0.831 ~ 1.135

表2 三种算法匹配结果比较

Table 2 The results of BPOF, ACMF and TAPF correlations

匹配算法	匹配总数	成功匹配数量	匹配概率
BPOF 算法	182	119	65.3%
ACMF 算法	182	123	67.6%
TAPF 算法	182	179	98.4%

图片作为实时输入图像,采用 5 m 分辨率的 80×80 的可见光卫星图片作为模板图像,进行了仿真匹配实验.并对匹配结果进行统计,统计结果如表 2 所列.

从表 1 统计的相关结果可以看出,在噪声方差范围和几何形变范围一定的情况下,TAPF 算法各项相关参数的下降率明显低于其他两种算法,容许的最大噪声方差和几何形变参数范围也都大于其他两种算法,即对噪声和几何形变的适应性均优于 BPOF 和 ACMF 算法.从表 2 统计的相关结果可以看出,与 BPOF 和 ACMF 算法相比,TAPF 算法将匹配概率提高了约 30%,达到 98.4%,能够满足景象匹配的要求.

4 结语

传统的二元纯相位匹配滤波器(BPOF)由于对噪声、尺度、旋转等变化非常敏感使得实际匹配效果无法令人满意,其中很大一部分原因是由于完全丢失振幅信息造成的,而振幅补偿匹配滤波器(AC-

MF)对 BPOF 算法的改善则非常有限.本文提出的三值化振幅-位相滤波器(TAPF),在 BPOF 的基础上更为有效的保留了振幅信息,振幅信息对实际匹配中噪声、尺度、旋转等变化的容差性非常好,因而使得各项相关峰参数均得到改善,大大提高了匹配概率,从而得到了较满意的匹配结果.

另外我们在实验中发现,TAPF 算法中振幅分割阈值 Th 的选取对匹配结果有很大的影响,如何根据不同情况选择最优阈值,使之更好满足景象匹配的要求,有待于我们在以后的工作中做更进一步的研究.

REFERENCES

- [1] WANG Guo-Tian, WANG Ru-Li, FU Yan-Hong, et al. Research of binarization methods used for optical correlation pattern recognition [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王国田,王汝笠,傅艳红,等.用于光学相关模式识别的二值化方法研究.红外与毫米波学报),2002, 21(6): 455—459.
- [2] David Flannery, John S Loomis, Mary E Milkovich. Design elements of binary phase-only correlation filters [J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27(20): 4231—4235.
- [3] Abdul Ahad S Awwal, Mohammad A Karim, Syeda R Jahan. Improved correlation discrimination using an amplitude-modulated phase-only filter [J]. *Appl. Opt.*, 1990, 29(2): 233—236.
- [4] Mu Guo-Guang, Shao Xin-Xin, Wang Zhao-Qi. Computer-generated amplitude-compensated matched filter [J]. *Opt. Eng.*, 1998, 37(1): 99—102.