

## 基于协方差交叉算法的多源遥感图像融合方法

崇元<sup>a</sup>, 徐晓刚<sup>a</sup>, 徐贯雷<sup>b</sup>, 邵承勇<sup>a</sup>

(海军大连舰艇学院, a. 装备自动化系; b. 军事海洋系, 辽宁 大连 116018)

**摘要:** 协方差交叉算法是分布式信息融合中不需要计算局部估计误差之间的相关性、通过优化一定的目标函数得到的一种保守的分布式融合估计方法。这种方法为图像融合增强提供了一种新思路。介绍了一维协方差交叉算法, 把此方法扩展到二维信号和图像融合上, 提出了一种基于协方差交叉算法的图像融合方法, 最后对融合后的图像与已有的融合方法进行比较。结果表明, 融合效果优于小波方法、经验模式分解方法和非负矩阵分解方法。

**关键词:** 遥感图像; 图像融合; 图像增强; 协方差交叉算法

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2013)06-0004-03

## Multi-Source Remote Sensing Image Fusion Method Based on Covariance Intersection Algorithm

CHONG Yuan<sup>a</sup>, XU Xiaogang<sup>a</sup>, XU Guanlei<sup>b</sup>, SHAO Chengyong<sup>a</sup>

(Dalian Naval Vessel Academy, a. Department of Equipment Automation;

b. Department of Military Oceanography, Dalian 116018, China)

**Abstract:** Covariance intersection algorithm is a conservative distributed fusion estimation method obtained by optimizing certain objective function, without needing to compute the correlation among local estimation errors, which provides a new idea for image fusion enhancement. Firstly, the 1D covariance intersection algorithm was introduced; then this method was extended to 2D signal and image fusion for the first time, and an image fusion method based on covariance intersection was put forward. Finally, the fused image was compared with the existing fusion methods, and the results showed that fusion effect of it was superior to that of wavelet method, empirical mode decomposition method, and non-negative matrix factorization method.

**Key words:** remote sensing image; image fusion; image enhancement; covariance intersection algorithm

### 0 引言

多源遥感图像融合是指两个或两个以上的传感器在同一时间(或不同时间), 或同一传感器在不同时间获取的关于某个地区场景的图像, 或者图像序列信息加以综合, 生成一个新的关于这一场景的解释, 从而获得更丰富、更精确、更可靠的有用信息<sup>[1]</sup>。与单源遥感影像数据相比, 多源遥感影像数据所提供的信息具有冗余性、互补性和合作性。

协方差交叉算法(Covariance Intersection)首先出

现在分布式多源信息融合中, 在分布式信息估计融合中, 计算局部估计误差之间的相关性是相当繁杂的工作, 在某些情况下, 计算局部估计误差之间的相关性甚至是不可行的<sup>[2]</sup>。Simon Julier 等人针对这种问题提出了协方差交叉算法<sup>[3]</sup>, 该算法不需要计算局部估计误差之间的相关性, 通过优化一定的目标函数可以得到一种保守的分布式融合估计<sup>[4]</sup>。

本文提出了一种基于二维协方差交叉算法的多源遥感图像融合增强方法, 这种方法对两幅图像的信息进行了最大保留, 抑制了边缘的光晕现象, 改善了图像细节质量。

### 1 协方差交叉算法

#### 1.1 问题描述

**定义1** 协方差交叉(Covariance Intersection)算法, 就是考虑如何由两个相关估计量  $a, b$  进行数据拟合, 以

收稿日期: 2012-06-07

修回日期: 2012-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(60975016, 61002052); 浙江大学CAD&CG 国家重点实验室开放课题(A1214); 海军大连舰艇学院科研发展基金

作者简介: 崇元(1988-), 女, 辽宁大连人, 硕士生, 研究方向为图像融合, 图像增强。

得到最优融合估计量  $c$  及其协方差阵的估计阵  $P_{cc}$ 。

设  $a, b$  的数学期望和协方差阵分别为  $\bar{a}, \bar{b}$  和  $\bar{P}_{aa}, \bar{P}_{bb}$ , 其真实值未知, 但已知  $\tilde{b} = b - \bar{b} | a, P_{aa}$  和  $\{b, P_{bb}\}$  对  $\{\bar{a}, \bar{P}_{aa}\}$  和  $\{\bar{b}, \bar{P}_{bb}\}$  的估计具有一致性, 一致性定义参见文献[5]。再设  $\tilde{a} = a - \bar{a}$  和  $\tilde{b} = b - \bar{b}$ , 则  $a$  和  $b$  的协方差阵和互协方差阵分别为  $\bar{P}_{aa} = E[\tilde{a} \tilde{a}^T]$ ,  $\bar{P}_{bb} = E[\tilde{b} \tilde{b}^T]$  和  $\bar{P}_{ab} = E[\tilde{a} \tilde{b}^T]$ , 根据一致性定义, 有

$$P_{aa} - \bar{P}_{aa}, P_{bb} - \bar{P}_{bb} \geq 0 \quad (1)$$

式(1)保证了在估计量空间的所有方向上,  $P_{aa}, P_{bb}$  都不会低估  $\bar{P}_{aa}, \bar{P}_{bb}$  的值,  $a, b$  的互协方差阵  $\bar{P}_{ab}$  及其估计  $P_{ab}$  未知。有了上述问题描述基础, 那问题就转为: 设相关估计量  $a$  和  $b$  的相关程度未知, 如何融合来自估计量  $a$  和  $b$  的信息, 以产生新的估计量  $\{c, P_{cc}\}$ , 使其在满足  $P_{cc}$  的某种范数最小的基础上是最优的。

### 1.2 不相关估计量最优融合

估计融合的一般方法是计算两个估计的线性组合

$$c = W_a a + W_b b \quad (2)$$

式中,  $W_a$  和  $W_b$  为线性加权阵。则协方差计算式为

$$P_{cc} = W_a P_{aa} W_a^T + W_b P_{bb} W_b^T + W_a P_{ab} W_b^T + W_b P_{ba} W_a^T \quad (3)$$

估计的最优性由  $W_a$  和  $W_b$  决定,  $W_a$  和  $W_b$  可依据  $P_{cc}$  的某一范数最小的准则, 通过最优化方法搜索得到, 该范数可以是  $P_{cc}$  的迹、特征值, 也可以是  $P_{cc}$  的行列式。本文将此范数选取为  $P_{cc}$  的迹, 若  $P_{ab} = 0$ , 即  $a$  和  $b$  不相关, 则  $W_a$  和  $W_b$  分别为<sup>[6]</sup>

$$W_a = P_{bb} (P_{aa} + P_{bb})^{-1} \quad (4)$$

$$W_b = P_{aa} (P_{aa} + P_{bb})^{-1} \quad (5)$$

则最优融合估计量更新方程为

$$c = a + P_{aa} (P_{aa} + P_{bb})^{-1} (b - a) \quad (6)$$

**定义2** 协方差椭圆, 对于任意一个协方差矩阵  $P$ , 其协方差椭圆为满足条件  $x^T P^{-1} x = c$  的所有点构成的轨迹, 其中  $c$  为一常数。

设  $P_{ab} = 0$ , 并且  $a$  和  $b$  的协方差椭圆方程分别为  $x^T P_{aa}^{-1} x = k$  和  $x^T P_{bb}^{-1} x = k$ , 则根据解析几何的知识, 通过以上两个轨迹的交界, 且位于以上两个轨迹之间的轨迹方程为

$$w(x^T P_{aa}^{-1} x - k) + (1-w)(x^T P_{bb}^{-1} x - k) = 0 \quad (7)$$

式中,  $w \in [0, 1]$ , 整理上式得

$$x^T [w P_{aa}^{-1} + (1-w) P_{bb}^{-1}] x = k \quad (8)$$

取  $P_{cc}^{-1} = w P_{aa}^{-1} + (1-w) P_{bb}^{-1}$  就是  $P_{cc}$  的等值轨迹, 即融合算法的协方差更新式。则由  $P_{cc}$  确定的  $c$  的方差椭圆必然包含在分别由  $P_{aa}$  和  $P_{bb}$  确定的  $a$  和  $b$  的方差椭圆的相交区域中, 相关证明参考文献[2]。

## 2 二维协方差交叉算法的图像融合

以上介绍的是一维信号的协方差交叉算法, 本文将该算法扩展到二维信号中并应用到图像融合上。对于式(2),  $c$  表示融合后的图像,  $a$  和  $b$  表示不同传感器获得的源图像, 通过选取适当的线性加权值, 得到最优的融合后图像。

由式(4)和式(5)可知, 计算  $W_a$  和  $W_b$  之前, 要先计算  $P_{aa}$  和  $P_{bb}$ , 对于图像来说即图像  $a$  和图像  $b$  的方差矩阵。对于一维信号, 假设状态估计  $M$  的均值为  $m$ , 则该状态的方差为  $P_{mm} = (M - m)^2$ 。在进行二维信号图像处理时, 逐一对每个像素点进行处理, 则一维信号中的状态估计对应于图像中的一个像素点  $p(i, j)$ , 该像素点的均值为  $E[p(i, j)]$ , 该均值本文使用  $7 \times 7$  窗邻域像素点加以平均, 这里窗邻域选取得越大, 融合效果越好。那么对于两幅图像融合, 则对应像素点的协方差为

$$\begin{cases} P_{aa}(i, j) = (P_a(i, j) - E(P_a(i, j)))^2 \\ P_{bb}(i, j) = (P_b(i, j) - E(P_b(i, j)))^2 \end{cases} \quad (9)$$

待融合图像对应像素点的线性加权值为

$$\begin{cases} K_a(i, j) = P_{bb}(i, j) \times (P_{aa}(i, j) + P_{bb}(i, j))^{-1} \\ K_b(i, j) = P_{aa}(i, j) \times (P_{aa}(i, j) + P_{bb}(i, j))^{-1} \end{cases} \quad (10)$$

那么最后融合图像的像素点值计算式为

$$P_c(i, j) = K_a(i, j) \times P_a(i, j) + K_b(i, j) \times P_b(i, j) \quad (11)$$

## 3 实验结果分析

为了验证上述二维协方差交叉算法的性能, 本文采用两组图像进行融合实验及分析。图1和图3给出了实验测试图像和融合结果, 本文中小波分解函数为 `wavedec2`, 重构函数为 `waverec2`, 采用 Daubechies 的 “db2” 小波, 分解层数为5层。经验模式分解采用最佳分解层数5层进行实验。图1为全色图像与多光谱图像融合结果比对; 图2为各种融合方法的细节对比; 图3为航空 SAR 图像与可见光图像融合结果比对。



a 全色遥感图像

b 多光谱遥感图像

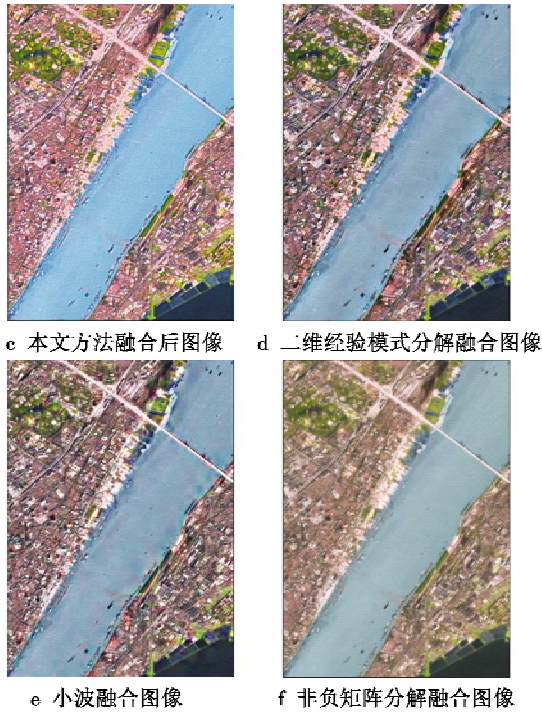


图1 全色遥感图像与多光谱遥感图像融合效果图  
Fig.1 The fusion of panchromatic remote sensing image and multi-spectral remote sensing image

从图1可以明显看出,一方面,各方法融合结果图像相对于原光谱图像,都包含了丰富的高频信息,图像变得清晰;另一方面,从图2a和图2c可以看出,二维经验模式分解方法和小波方法融合后图像的光谱扭曲严重,这是由于不同的传感器光学特性不同,使得融合图像的饱和度分量发生变化引起的,而协方差交叉方法融合后的图像只存在很小的光谱扭曲,人眼很难观察到。

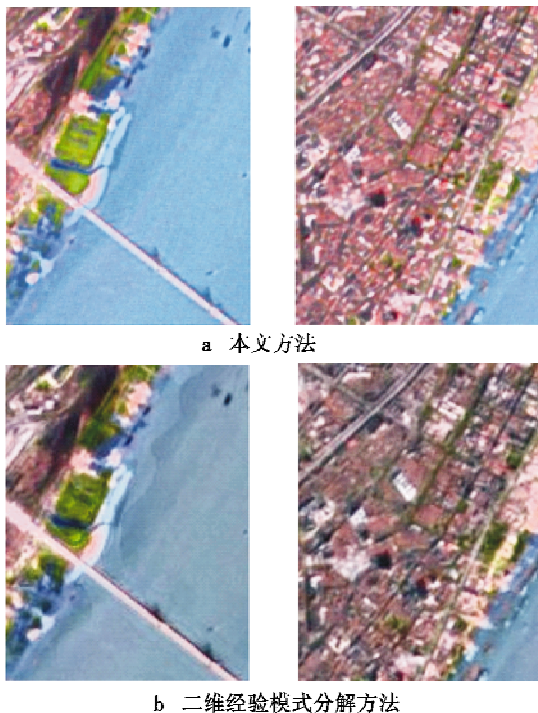


图2 不同方法融合后图像细节比较

Fig.2 Details of image fusion of different methods

从图2a可以看出,本文融合结果在细节信息获取能力上要强于其他几种算法。

另外,为了更清楚地说明本算法的优势,对融合结果进行客观评价,空间质量使用清晰度即平均梯度与标准差来衡量,光谱质量用相关系数和光谱扭曲度来衡量。从表1中可以清晰地看出,协方差交叉方法在空间质量和光谱质量上都有很好的表现,这是由于该算法在融合时考虑到周围像素的相关性,更最大限度地包含了多光谱图像的信息。虽然非负矩阵分解方法在光谱质量评价上要优于其他几种方法,但在空间质量上却远不如其他方法,所以综合考虑的话,协方差交叉方法在多光谱图像融合时要优于其他方法。

表1 全色图像和多光谱图像客观质量评价

Table 1 The objective quality evaluation of panchromatic images and multi-spectral image

融合方法	评价指标						
	光谱扭曲程度			相关系数	偏差指数	清晰度	标准差
R	G	B					
协方差交叉方法	0.1797	0.1417	0.1063	0.7007	2.7422	0.5824	0.5661
BEMD方法	0.1870	0.1534	0.1178	0.6076	16.4673	0.4975	0.5093
小波方法	0.1835	0.1537	0.1074	0.6102	2.8591	0.4892	0.4937
NMF方法	0.1897	0.1752	0.0889	0.6857	0.2990	0.3100	0.3188

此外,本文还对一组航空 SAR 图像和可见光图像进行了融合实验,并且与 PCA 方法和 NSCT 方法进行

(下转第 11 页)

效降低,但是25~75 s,95~100 s期间,目标1和2并没有低于门限值,这是因为此时距离对威胁等级起主要作用,干扰并不能降低由目标机动带来的威胁。

#### 4 结论

本文对先进战机射频集成系统以及单机对多目标作战时的干扰资源管控策略进行了研究,基于相控阵天线的雷达电子战一体化设计可以降低机载电子设备的体积和重量、降低天线 RCS,主控计算机能够对雷达电子战资源精确控制;威胁等级门限和协方差门限可以根据作战环境和任务特点进行设置,通过控制威胁等级门限和协方差门限,可以控制相控阵资源是“雷达占优”、“干扰占优”还是“空闲占优”,从而使相控阵资源对雷达资源、干扰资源或者空闲资源得到合理分配。但是干扰不能阻止目标机动引起的威胁等级升高,这就需要将电子干扰与战术机动和火力打击综合起来考虑,这也是下一步需要深入研究的方向。

#### 参考文献

- [1] 张昀. 国外海军先进射频集成系统分析[J]. 电讯技术,2009,49(6):77-80.
- [2] 杨红兵,周建红,汪飞,等. 飞机射频隐身表征参量及其影响因素分析[J]. 航空学报,2010,31(10):2040-2045.

- [3] 张勇. 雷达与干扰一体化系统及其共享信号[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2011:40-48.
- [4] 张明友. 雷达-通信-电子战一体化系统概论[M]. 北京:国防工业出版社,2008:15-23.
- [5] 沈阳,陈永光,李修和. 基于0-1规划的雷达干扰资源优化分配研究[J]. 兵工学报,2007,28(5):528-532.
- [6] ZHANG Gexiang, JIN Weidong, HU Laizhao. Radar emitter signal recognition based on complexity features [J]. Journal of Southwest University, 2004, 12(2):116-122.
- [7] 何静波,彭复员,胡生亮. 基于作战任务的雷达干扰决策模型[J]. 现代雷达,2007,29(1):20-22.
- [8] 刘以安,倪天权,张秀辉,等. 模拟退火算法在雷达干扰资源优化分配中的应用[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(8):1914-1917.
- [9] 高晓光,胡明,郑景嵩. 突防任务中的单机对多目标干扰决策[J]. 系统工程与电子技术,2010,29(12):1239-1243.
- [10] 卢建斌,胡卫东,郁文贤. 基于协方差控制的相控阵雷达资源管理算法[J]. 电子学报,2007(3):403-408.
- [11] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社,2009:13-18.
- [12] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008:362-365.

(上接第6页)

了比较,如图3所示。

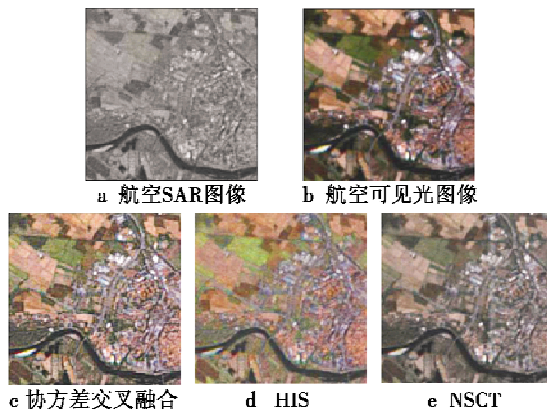


图3 航空 SAR 图像与可见光图像不同算法融合结果图

Fig.3 Image fusion of aviation SAR and visible light images using different algorithms

由图3可知,PCA和NSCT方法提取到的空间细节信息较少,而且丢失了较多的光谱信息,出现了一定程度的失真。本文方法中道路和河道都清晰可见,图像光谱保持较好,同时,清晰度最高,融合效果较好。

#### 4 结论

本文提出了一种基于二维协方差交叉算法的图像

融合增强方法,可以最大可能地保留和提升图像的边缘,图像亮度有所增强,而边缘没有出现光晕现象。实验中,采用两组遥感图像进行融合仿真实验,从主观与客观两方面比较本文方法融合后的图像和其他几种方法融合后的图像,实验结果表明,文本方法要优于其他几种融合方法。

#### 参考文献

- [1] 孙洪泉,窦闻,易文斌. 遥感图像融合的研究现状、困境及发展趋势探讨[J]. 遥感信息,2011(1):104-109.
- [2] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜,等. 多源信息融合[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2010.
- [3] JULIER S J, UHLMANN J K. A non-divergent estimation algorithm in the presence of unknown correlations [J]. Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, NM, 1997, 4:2369-2373.
- [4] JULIER S J, UHLMANN J K. Generalized and split covariance intersection and addition[R]. Technical Disclosure Report, Naval Research Laboratory, 1998.
- [5] 程云鹏. 矩阵论[M]. 西安:西北工业大学,1999.
- [6] 王彦本,杨武军. 协方差交叉在分布式传感器网络定位中的应用[J]. 西安邮电学院学报,2008,13(1):95-98.