

红外起伏背景的广义平稳特性研究*

李吉成 杨卫平 沈振康 李秋华

(国防科技大学电子工程学院 ATR 实验室 湖南·长沙·410073)

摘要 研究了计算大气云层背景图像集的样本均值、自协方差及 2σ 误差区间的方法,并在此基础上,针对实际的红外图像进行了大量的实验测试,实验结果表明,大气云层起伏背景图像是近似广义平稳的。

关键词 背景起伏,广义平稳,自协方差。

STUDY ON WIDE-SENSE STATIONARY PROPERTIES OF INFRARED CLUTTER BACKGROUND*

LI Ji-Cheng YANG Wei-Ping SHEN Zhen-Kang LI Qiu-Hua

(National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract In the paper, the mean and auto-covariance are first computed and estimated by means of average across the IR cloudy-background clutter image sets. On this basis, the 2σ error ranges of them are also computed. Then, experiments on the real IR images are run. The experiment results show that the statistics based on IR cloudy-background clutter images is wide-sense stationary.

Key words background Clutter, Wide-sense Stationary, Auto-covariance.

引言

随着红外焦平面的工程应用和计算机信息处理及超大规模集成电路技术的飞速发展,红外成像及红外信息处理技术已广泛应用于遥感和军事技术等领域。根据红外探测器工作的环境不同,红外图像的背景可分为地物背景、天空背景(或称大气背景)、海天背景和太空背景。不同种类的背景,其统计特性是不同的^[1,2],本文只对大气云层起伏背景图像的广义平稳特性进行研究,其方法同样也适用于其它起伏背景的平稳性分析。

1 图像集的来源

来自大气层内的红外图像往往含有由云层造成的大量杂波(Clutter),这种杂波在红外信息处理中也称为背景起伏(Background Clutter),其统计特性(平稳性和统计分布特性等)一般与红外探测器的工作波段、空间分辨率及其工作条件(如工作温度、工作偏置电压)有关^[3]。本文立足于理论计算和大量仿真实验来分析云层起伏背景的平稳特性。其中,进行

实验的图像数据来源于两组实际的红外图像集,它们是在非雨天条件下由长波红外传感器分别于1995年和1998年的不同时期获取的大气云层背景图像。该红外传感器采用线扫描方式,视场角为 $3^\circ \times 5^\circ$,帧频为40Hz,获取的图像尺寸均为 180×180 ,8位灰度级,且图像集中的每一帧图像均是互不重迭的。

为了便于表述,这两组图像集分别记为 IR_1 和 IR_2 。其中, IR_1 由80帧图像组成,图像中云层比较稀,背景起伏属中等; IR_2 由100帧图像组成,图像中云层密集,存在强的背景起伏。图1、2分别给出了这两组图像集中的一帧样本图像。

2 背景起伏的广义平稳特性分析

定义数字图像集:

$$X = \{x_i(m) | m = (x, y)\}, \quad (1)$$

式(1)中 $x_i(m)$ 表示图像集中的第 $i(i=1, 2, \dots, I)$ 帧图像, I 为图像集中总的图像帧数;向量 $m = (x, y)$ 表示像元的位置,其中 x, y 分别表示图像的横坐

* 国防科技重点实验室基金(编号:99JS93. 2. 1)资助项目
稿件收到日期 2000-12-20, 修改稿收到日期 2001-02-19

* The project supported by the Key Laboratory Foundation of Science and Technology of National Defense
Received 2000-12-20, revised 2001-02-19



图1 图像集 IR_1 中的图像样本
Fig 1 A sample image of the set of IR



图2 图像集 IR_2 中的图像样本
Fig 2 A sample image of the set of IR_2

标和纵坐标,即 $x=0,1,\dots,180-1$ 和 $y=0,1,\dots,180-1$.

为了简化理论分析,对红外图像作如下合理的假设:

(1) 图像集中的任一帧图像都可以表示为二维离散随机场中的一个有限区域;该二维随机场记为 $x(m)$, $-\infty < |m| < \infty$;

(2) 由于图像集中任两帧图像都是非重迭的,因此,可假设不同图像的所有像元之间是相互独立和同分布的;即满足如下关系:

$$E[x_i(m)x_j(n)] = 0, \quad i \neq j \quad (2)$$

显然,采用严格的理论来推导红外起伏背景的广义平稳性是非常困难的,为此,我们将通过计算图像集内图像(二维随机过程)的数学期望和自协方差来检验图像背景的平稳特性.由于二维随机过程 $x(m)$ 与位置变量 m 有关,所以随机变量 $x(m)$ 的期望和自协方差可表示为

$$\mu(m) = E[x(m)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(m)P_x(m)dm, \quad (3)$$

$$C(m;k) = E\{[x(m) - \mu(m)][x_1(m+k) - \mu(m+k)]\}; \quad (4)$$

式(4)中向量 $k=(x,y)$ 表示自协方差的滞后值(lag).

由统计理论可知,当图像集中样本容量 I 很大时(这里, I 即为集合内图像的帧数,通常当 $I \geq 50$ 时可以看作大样本),随机变量的期望和自协方差的最优估计分别是图像集内所有样本的平均值和样本自协方差 $\bar{C}(m;k)$, 它们分别表示为

$$\bar{\mu}(m) = \frac{1}{I} \sum x_i(m), \quad (5)$$

$$\bar{C}(m;k) = \frac{1}{I} \sum [x_i(m) - \bar{\mu}(m)][x_i(m+k) - \bar{\mu}(m+k)], \quad (6)$$

由式(5)可知,当 I 足够大时, $\bar{\mu}(m)$ 可以表示成足够多的相互独立、同分布的随机变量 $x_i(m)$ 之和,且每个随机变量对 $\bar{\mu}(m)$ 的影响很小,因此,根据中心极限定理^[4,5],随机变量 $\bar{\mu}(m)$ 必为高斯分布,且其数学期望为 $\mu(m)$, 方差为

$$\sigma_{\bar{\mu}}^2(m) = E\{[\bar{\mu}(m) - \mu(m)]^2\} \\ \approx \frac{1}{I(I-1)} \sum_{i=1}^I [x_i(m) - \bar{\mu}(m)]^2. \quad (7)$$

同理,可以证明自协方差也是高斯分布的,其数学期望为 $C(m;k)$, 方差为

$$\sigma_{\bar{C}}^2(m;k) = E\{[\bar{C}(m) - C(m)]^2\} \\ \approx \frac{1}{I(I-1)} \sum_{i=1}^I \{[x_i(m) - \bar{\mu}(m)][x_i(m+k) - \bar{\mu}(m+k)] - \bar{C}(m+k)\}^2. \quad (8)$$

3 测试结果及结论

基于上述理论,我们采用实验方法来验证起伏背景的广义平稳性.实验时,首先根据式(5)、(6)分别计算图像所有像元位置的数学期望和自协方差估计值,并观察两个随机变量的取值是否随像元位置的不同而发生激烈变化.然后,按照式(7)和式(8)分别计算它们的误差区间,即

$$\bar{\mu}(m) \pm 2\sigma_{\bar{\mu}}(m), \\ \bar{C}(m;k) \pm 2\sigma_{\bar{C}}(m;k).$$

按照上述分析步骤,我们进行了大量实验测试,图3~6分别给出了基于图像集 IR_1 和 IR_2 的实验结果.其中,图3、图4分别绘出了两个图像集沿中间行和中间列上各像元的取样均值 $\bar{\mu}(m)$ (图中实线表示取样均值,虚线为 2σ 误差区间,点画线表示在广义平稳条件下求得的位置不变量 μ).图5、图6给出了滞后量 $k=(2,2)$ 时两个图像集沿中间行和中间列上各像元的自协方差估计值 $\bar{C}(m;k)$, (图中实线表示取样估计值,虚线为 2σ 误差区间,点画线

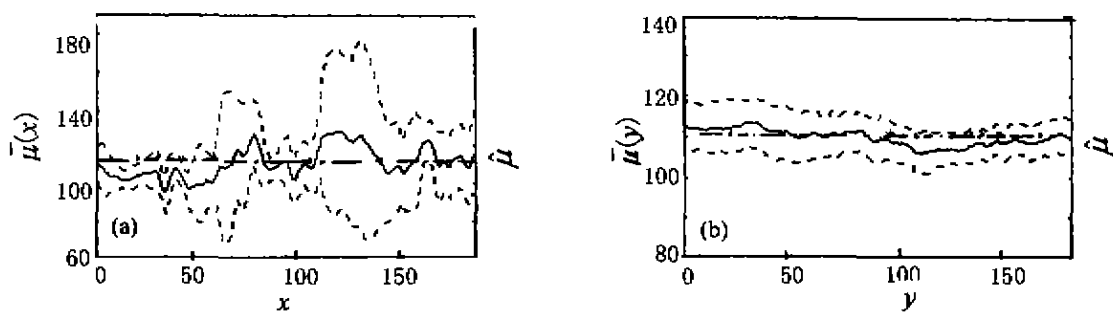


图 3 图像集 IR_1 的取样均值 $\bar{\mu}(m)$ 与像元位置 $m=(x,y)$ 的关系曲线
 (a) 行方向的关系曲线(第 90 行), (b) 列方向的关系曲线(第 90 列)

Fig. 3 The relationship between the mean value $\bar{\mu}(m)$ of sampling and the position of pixel $m=(x,y)$ in the set of IR image from IR_1

(a) at the direction of row (the 90th row), (b) at the direction of column (the 90th column)

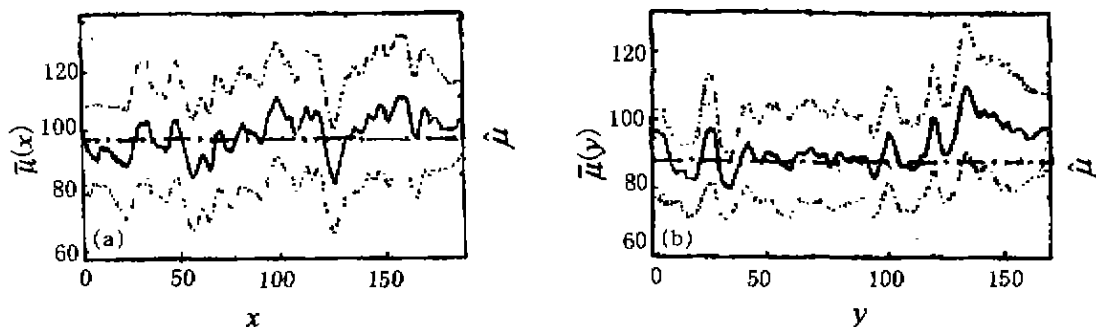


图 4 图像集 IR_2 的取样均值 $\bar{\mu}(m)$ 与像元位置 $m=(x,y)$ 的关系曲线
 (a) 行方向的关系曲线(第 90 行), (b) 列方向的关系曲线(第 90 列)

Fig. 4 The relationship between the mean value $\bar{\mu}(m)$ of sampling and the position of pixel $m=(x,y)$ in the set of IR image from IR_2

(a) at the direction of row (the 90th row), (b) at the direction of column (the 90th column)

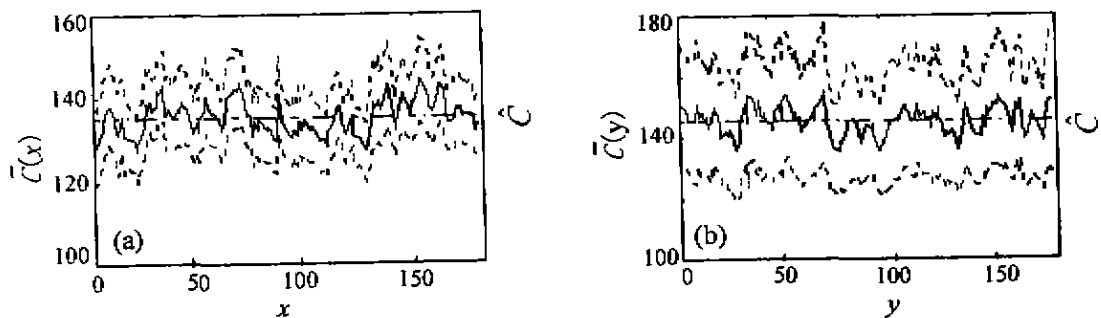


图 5 图像集 IR_1 的自协方差估计值 $\bar{C}(m;k)$ 与像元位置 $m=(x,y)$ 的关系曲线
 (a) 行方向的关系曲线(第 90 行), (b) 列方向的关系曲线(第 90 列)

Fig. 5 The relationship between the estimated value $\bar{C}(m;k)$ of auto-covariance and the position of pixel $m=(x,y)$ in the set of IR image from IR_1

(a) at the direction of row (the 90th row), (b) at the direction of column (the 90th column)

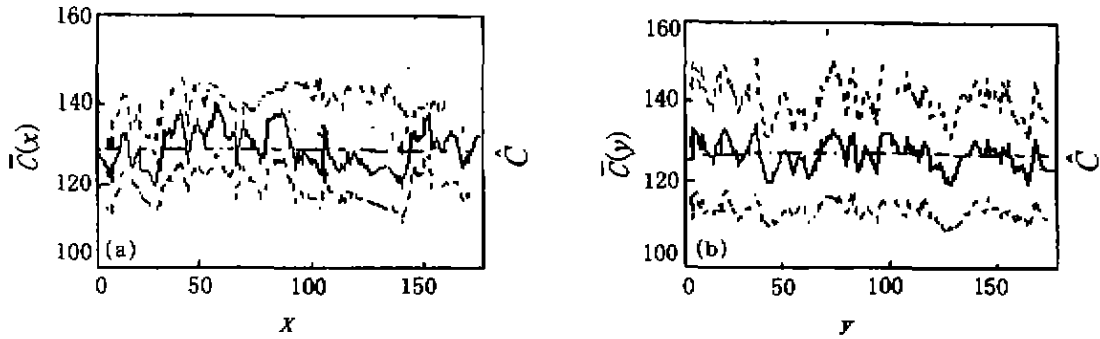


图6 图像集 IR_1 的自协方差估计值 $\hat{C}(m;k)$ 与像元位置 $m=(x,y)$ 的关系曲线
(a) 行方向的关系曲线(第90行), (b) 列方向的关系曲线(第90列)

Fig. 6 The relationship between the estimated value $\hat{C}(m;k)$ of auto-covariance and the position of pixel $m=(x,y)$ in the set of IR image from IR_2
(a) at the direction of row (the 90th row), (b) at the direction of column (the 90th column)

表示在广义平稳条件下求得的位置不变量 \hat{C} 。

由实验结果可见,在图像集 IR_1 和 IR_2 中所有像素值的均值和自协方差的估计值分别在某一恒定值附近变动,由于该恒定值与像元位置无关,故称为位置不变量(分别记为 $\hat{\mu}$ 和 \hat{C})。进一步研究发现,在绝大多数像元位置处, $\hat{\mu}$ 和 \hat{C} 的值均位于 2σ 误差区间内,只有在少量像元位置处, $\hat{\mu}$ 和 \hat{C} 的值超出 2σ 误差范围,这是因为 $\bar{\mu}(m)$ 和 $\bar{C}(m;k)$ 是从计算序列 $x(m)$ ($m \rightarrow \infty$) 的取样平均出发得来的,而在我们的实验中, $\bar{\mu}(m)$ 和 $\bar{C}(m;k)$ 是利用图像集中有限的样本来计算的取样平均,存在比较大的估计误差。由文献[4]可知,对于广义平稳随机过程,当样本容量大于30时,位置不变量超出估计值误差区间的次数应小于或等于5%,如果远大于5%,那么该随机过程就是非平稳的。

为了测试位置不变量超出估计值 2σ 误差区间的次数,我们进行了测试实验,其方法是:为了忽略样本之间的相关性,选取图像内在水平和垂直方向上间隔为20个像元的像元点作为测试样本,并分别计算它们的均值和自协方差估计值及相应的方差,最后统计位置不变量 $\hat{\mu}$ 和 \hat{C} 超出 2σ 误差区间的次数,实验表明,实验结果与理论值非常吻合。例如:对于均值和滞后位置为(2,2)的自协方差,其理论值均为 $5.0\% \pm 1.8\%$,基于图像集 IR_1 的测量值则分别为 4.2% 和 6.5% ,而基于图像集 IR_2 的测量值分别为 4.5% 和 7.0% ,由此可以得出如下结论:大气云层起伏背

景图像是近似广义平稳的。

3 结语

本文采用理论计算和实验相结合的手段对长波红外云层背景图像的广义平稳性进行了研究,并通过大量的实验验证:实际的红外云层背景图像是近似广义平稳的,我们还将分别研究大气云层背景图像的相关性、相关长度的计算方法和统计分布特性,这些研究将对红外云层图像的起伏抑制和弱目标检测都具有非常重要的意义。

REFERENCES

- [1] Itakura Y, Tsutsumi S, Pfaltz J L, et al. Statistical properties of the background noise for the atmosphere windows in the intermediate infrared region. *Infrared Physics* 1974,14(1):17-32
- [2] Cantella M J. *Handbook of Electro-Optical System*. Academic Press, 1988:50-89
- [3] GUANG Hua. Detecting and tracking of low signal-to-noiseratio small targets in infrared images; Doctorial degree thesis, National University of Defense Technology (光华. 红外图象中低信噪比小目标的检测与跟踪方法研究. 博士学位论文,国防科技大学).1995:2-15
- [4] Papoulis A. *Probability, Random Variables, and Stochastic Process*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1984:113-126
- [5] CHEN Bing-He. *Random Signal Processing*. Beijing: National Defense Industry Press (陈炳和. 随机信号处理. 北京:国防工业出版社). 1996
- [6] Lopresti P V, Suti J L. A fast algorithm for estimation of autocorrelation functions. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process*, 1984,22:449-454