

# 气象卫星云图统计特性的研究

张小星

刘榴娣

(西安工业学院)

(北京理工大学)

## 提 要

本文研究了气象卫星云图的灰度分布、信息熵、冗余度、二维傅里叶谱、一维及二维自相关函数以及卫星云图在差分域中的一些统计特征。结果表明,卫星云图的一维自相关函数不满足负指数单调下降的规律,不能用一阶平稳马尔科夫过程描述;云图的灰度分布具有一定的空间相关性,其空间频谱主要集中在空间频率较低的区域;差分图象的相关性明显减弱,但仍具有一定的冗余度,因此可以通过选择适当的方法对差分图象进行压缩编码而不丢失图象的信息。

## 一、前言

气象卫星云图的应用十分广泛,但对气象卫星云图特性研究的文献并不多见。徐建平曾对同一轨道不同时刻、不同轨道和不同探测通道的气象卫星云图作了频谱分析<sup>[1]</sup>。本文则着重研究卫星云图的一些重要统计特性及其空间频谱分布,目的之一是实现云图的无误差压缩编码方法的选择提供依据<sup>[2]</sup>。

## 二、云图的灰度分布及信息熵

卫星云图可以看成是二维随机场或二维随机过程,它可以由其概率密度函数来描述。通常需由大量图象样本集求出,一般来说这是很困难的。常用的作法是取一幅或数幅图象作为随机场的样本,从而求出图象的灰度分布。

设图象灰度级 $k$ 出现的频数(指一幅 $M \times N$ 的数字图象中,具有某一灰度值的象素总数)为 $G(k)$  ( $0 \leq k \leq 2^b - 1$ ,  $b$ 为灰度量化的

比特数), 则

$$p(k) = G(k)/MN \quad (1)$$

为灰度级 $k$ 出现的频数。图象的频率分布可以从整幅图象的灰度直方图得到反映。

图象的信息熵,是图象信息量的一种客观度量。如果各信号(图象象素)之间是相互独立的,则一幅图象上每个象素所携带的平均信息量可以用一阶熵 $H_p$ 来表示<sup>[2]</sup>,即

$$H_p = - \sum_{k=0}^{2^b-1} p(k) \log_2 p(k) \quad (2)$$

熵的大小是图象象素集合的随机性程度的度量。

图象的冗余度 $r$ 则由图象的平均量化比特数 $b$ 与图象平均信息(即熵值)之差表示,即

$$r = b - H_p \quad (3)$$

熵值及冗余度都是图象数据压缩编码等的重要参数。表1是用本文作者编制的程序计算出的若干幅卫星云图(其中YT01—YT02为NOAA云图, YT03—YT07为GMS-3云图)的统计结果。在表中, image栏为

表1 原始图象数据的统计特征值

image	$H_p$	$\mu_p$	$\gamma$	HF	HFG
YT01	4.44	9.21	3.56	33818	3
YT02	4.27	7.85	3.73	42899	2
YT03	4.43	14.51	3.57	49440	31
YT04	4.54	12.11	3.46	35187	31
YT05	4.77	10.97	3.23	18825	1
YT06	3.24	18.77	4.76	125451	31
YT07	3.72	5.70	4.28	51196	2

图象名,  $H_p$ 为熵值,  $\mu_p$ 为均值,  $r$ 为冗余度, HF及HFG分别为最高频数及最高频数所对应的灰度值。可见, 图象的信息熵值约小于灰度量化的比特数 $b$  (此处  $b=5$ )\*, 所以, 有可能对图象进行数据压缩而不丢失图象的信息。

### 三、云图的频谱分析

图象的空间频谱, 是图象在频率空间上的映射, 有效地描述了图象的空间结构。它可以通过对一个定义在二维空间上的图象进行二维傅里叶变换得到。

设图象用连续函数 $f(x, y)$ 表示, 则该图象的傅里叶变换为<sup>[3]</sup>

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i2\pi(xu + yv)} dx dy \quad (4)$$

其中,  $x, y$ 是图象的空间坐标,  $u, v$ 是空间频数。  $F(u, v)$ 一般是复函数, 它可以表示为

$$F(u, v) = R(u, v) + iI(u, v) \quad (5)$$

它还可以表示为指数形式

$$F(u, v) = |F(u, v)| e^{i\phi(u, v)} \quad (6)$$

其中

$$|F(u, v)| = [R^2(u, v) + I^2(u, v)]^{1/2} \quad (7)$$

为图象 $f(x, y)$ 傅里叶变换的幅值, 即通常所说的傅里叶谱。

$$\phi(u, v) = \text{tg}^{-1} I(u, v) / R(u, v) \quad (8)$$

为傅里叶变换的位相。

谱的平方

$$p(u, v) = |F(u, v)|^2 = R^2(u, v) + I^2(u, v) \quad (9)$$

为图象 $f(x, y)$ 的能量谱或功率谱。它是象素空间分布的统计特性在空间频率域上的度量。图1是作者利用快速傅里叶变换(FFT)编制的计算程序输出的一幅卫星云图的离散傅里叶谱 (256 × 256)。

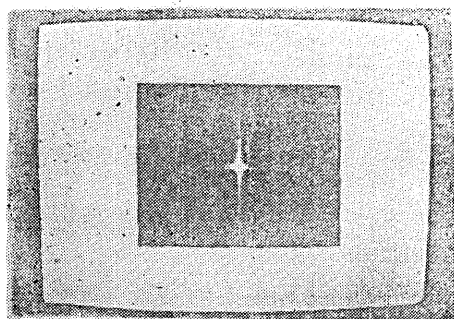


图1 一幅卫星云图的二维傅里叶谱

由图可以看出, 在空间频率域中, 卫星云图的频谱相对集中在空间频率比较低的区域, 而一般高频分量的幅值很小。这说明, 卫星云图的结构特点之一, 就是其能量集中在频率域的有限区域上, 即卫星云图的灰度值在空间上多为均匀过渡变化的, 渐变的情况多于突变的情况。

### 四、云图的自相关函数

卫星云图的另一个重要的统计特性, 就是它的自相关函数。可分为一维自相关函数和二维自相关函数。

#### 1. 云图的一维自相关函数

与空间位置有关的象素灰度值的统计特性, 通常可以利用相关矩阵或协方差矩阵来描述, 因此, 一维自相关函数 $R_f(\tau)$ 可以直接从图象灰度函数 $f(x, y)$ 算出。设在 $M \times N$ 阶抽样图象中, 将其各行按字典编排方式排序, 即逐行衔接, 前一行的尾与次一行的首

\*从多数实用云图看, 取32灰度级即 $b=5$ 就足够了;若取 $b=8$ , 统计规律不会改变, 只是程序计算量大为增加而已。

相连,排成具有 $MN$ 个元素的向量 $Z$ ,则相关矩阵定义为<sup>[2]</sup>

$$R_f = E\{ZZ^T\} \quad (10)$$

式中, $Z^T$ 为 $Z$ 的转置, $R_f$ 为 $M^2 \times N^2$ 的矩阵, $E\{\cdot\}$ 为数学期望算子,即 $R_f$ 的计算是对大量的图象样本集 $\{Z\}$ 求统计平均。这里把一幅图象当作随机场的一个样本。

如果假设图象随机场具有齐次(平稳)的且各态历经性质,它只是空间坐标差的函数,并且各随机变量的期望值为常数,这时,可由单幅图象上的空间平均,来代替总体总期望值,从而有<sup>[2]</sup>

$$R_f(\tau) = \frac{\sum_{i=0}^{MN-\tau} (Z_i - \mu_f)(Z_{i+\tau} - \mu_f)}{\sum_{i=0}^{MN-\tau} (Z_i - \mu_f)^2} \quad (11)$$

其中 $R_f(\tau)$ 表示相距 $\tau$ 个像素的自相关值, $Z_i$ 为 $Z$ 中第 $i$ 个元素的灰度值, $Z_{i+\tau}$ 为第 $(i+\tau)$ 个元素的灰度值, $\mu_f$ 为图象灰度的平均值,即

$$\mu_f = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{MN-1} Z_i \quad (12)$$

图2为笔者编制的一维自相关函数计算

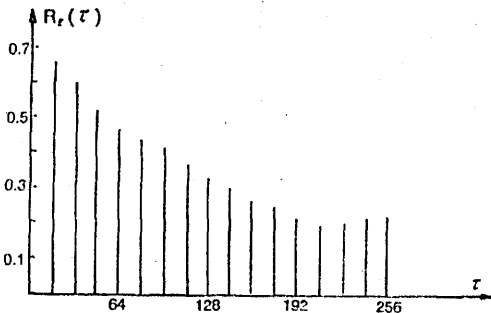


图2 一幅卫星云图的一维自相关函数

程序算出的一幅卫星云图的一维自相关函数曲线。由图可以看出,当 $\tau$ 较小时,曲线下降较快,而当 $\tau$ 较大时,曲线变化逐渐减慢,且曲线有一定的起伏。这与普通遥感图象自相关函数呈负指数形式变化的理论假设不符,即卫星云图灰度分布的随机性不是平稳随机过程,所以不能用一阶平稳马尔科夫过程描

述。

## 2. 云图的二维自相关函数

图象的二维自相关函数定义为

$$R(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) f(x + \xi, y + \eta) d\xi d\eta \quad (13)$$

它表征图象象素之间的二维平均相关性。

对于一幅 $512 \times 512$ 的离散图象,上式的计算量是非常大的,因此,通常采用傅里叶变换来计算二维自相关函数。图象的二维自相关函数与其二维功率谱 $p(u, v)$ 互成傅里叶变换对,即

$$R(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} p(u, v) e^{i2\pi(xu + yv)} du dv \quad (14)$$

在实际计算过程中,可先利用快速傅里叶变换,求出函数的傅里叶谱 $F(u, v)$ ,再由(9)式算出图象的功率谱,最后由(14)式求出二维自相关函数。图3是我们根据上述原理,利用快速傅氏变换计算出的一幅卫星云图的二维离散自相关函数图( $256 \times 256$ )。由图可以看出,二维自相关函数在两个相互垂直的方向上值较大,其它方向的值较小。

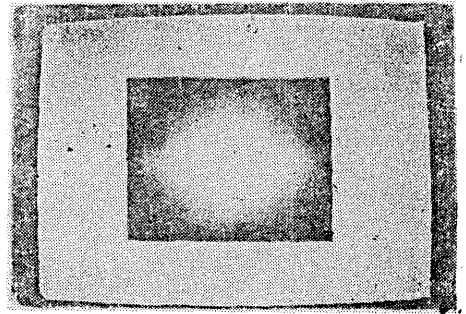


图3 一幅卫星云图的二维自相关函数

这说明云图在两个相互垂直的方向上相互性较强,其它方向相对较弱。从图中还可以看出,卫星云图的二维自相关函数不是旋转对称的,这个结论与通常的“自然”景象具有空间自相关函数是旋转对称的这一特性<sup>[4]</sup>是不同的。

## 五、云图在差分域中的统计特征

通过以上对卫星云图统计特性的讨论可以知道：一幅卫星云图的灰度分布并不是完全随机的，多数相邻象素具有近似的灰度。这表明，卫星云图数据具有一定的空间相关性，因而应该用高阶熵来表示图象的信息量。

图象的二阶熵，即用灰度值的一阶差分概率分布计算图象的熵值。假设图象灰度的一阶差分 $\Delta k$ 出现的频数为 $G(\Delta k)$ ，则

$$p(\Delta k) = G(\Delta k) / MN$$

$$-(2^b - 1) \leq \Delta k \leq 2^b - 1 \quad (15)$$

为灰度值一阶差分 $\Delta k$ 出现的频率，二阶熵为[5]

$$H_d(\Delta k) = - \sum_{\Delta k = -(2^b - 1)}^{2^b - 1} p(\Delta k) \log_2 p(\Delta k)$$

$$(16)$$

此时的冗余度为

$$r_d = b - H_d \quad (17)$$

卫星云图差分后，频率分布究竟如何？我们对此进行了研究和计算。结果表明，对卫星云图而言，多数相邻象素之间的差值为零（或接近零）的概率较大。图4是一幅典型的卫星云图差分前的灰度直方图，图5是一阶差分后的灰度直方图。可见，云图的灰度分布，差分前具有多峰性，而差分后具有单峰性，而且灰度分布更加集中。表2是若

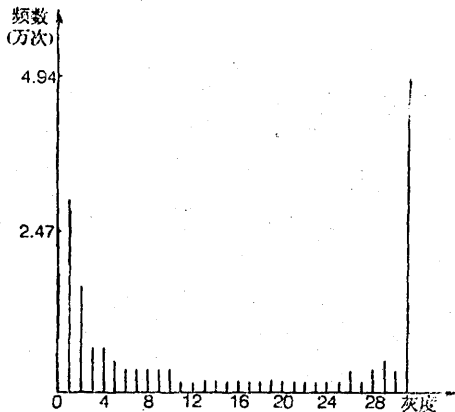


图4 原图象直方图

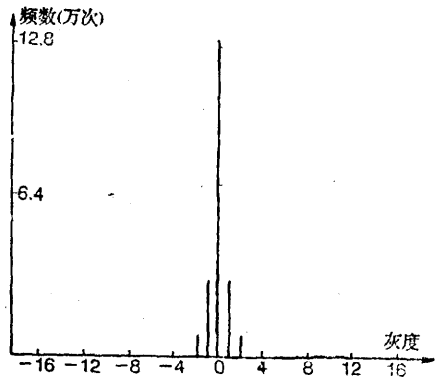


图5 差分图象直方图

干幅卫星云图一阶差分图象的统计结果，表中的符号意义均与表1相同。计算表明，差分后云图的一维自相关函数的最大值不超过0.1，与差分前相比，相关性大为降低。

表2 差分图象数据的统计特征值

image	$H_d$	$r_d$	$\gamma_d$	HF'	HFG'
YT01	2.83	0.00	5.17	92630	0
YT02	2.73	0.02	5.27	98754	0
YT03	2.48	0.00	5.52	128245	0
YT04	2.12	0.01	5.88	133442	0
YT05	2.36	0.01	5.64	102184	0
YT06	1.92	0.00	6.08	175084	0
YT07	2.29	0.04	5.71	125284	0

## 六、结论

通过以上对实际气象卫星云图的分析与计算，可以得出如下几条结论：

- (1) 气象卫星云图具有较大的冗余度；
- (2) 云图的频谱大部分集中在空间频率较低的区域，图象的高频分量很少；
- (3) 由于云图的一维自相关函数不满足负指数单调下降的规律，所以不能用一阶平稳马尔科夫过程描述；
- (4) 云图的原图象灰度分布具有多峰性，采用差分变换后，图象的灰度分布比较集中，且具有单峰性，图象的空间相关性明显减弱，此时云图仍具有一定的冗余度。

综上所述，气象卫星云图是可以经过选取适当的方法进行数据压缩的。

## 参 考 文 献

- (1) 徐建平、刘智平, 气象卫星云图瞬时带宽实验研究, 通信学报, Vol.9, No.6, 1988。  
(2) 杨凯等编著, 遥感图象处理原理和方法, 测绘

出版社, 1988。

- (3) J.G.莫伊克著, 徐建平等译, 遥感图象的数字处理, 气象出版社, 1987。  
(4) W.K.普拉特著, 高荣坤等译, 数字图象处理学, 科学出版社, 1984。

# A study on the statistical properties of the meteorological satellite cloud image

Zhang Xiaoxing

Liu Liudi

(Xian Institute of Technology)

(Beijing Institute of Technology)

## Abstract

Some statistical properties of the meteorological satellite cloud image (MSCI) such as image gray distribution, information entropy, redundancy, two-dimensional Fourier spectrum, one-and two-dimensional autocorrelation functions of the original MSCI and the gray distribution, the information entropy etc, in differential domain have been studied in this paper. It shows that the gray distribution of MSCI is not completely random but is somewhat spatially correlative, whose spatial spectrum energy is mainly distributed in the low frequency area and the spatial correlation is rather looser in the differential domain but the redundancy still exists, thus producing a compression encoding method for MSCI, which could keep the information from losing.