

基于变换域 Hough 变换的遥感图像相干干扰分析

郭 强, 陈桂林, 童卫旗

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 相干干扰的存在严重地影响了对遥感图像中目标的特征提取和识别的精度, 降低了各种遥感定量分析方法的有效性。通过对相干干扰的幅度和相位特性的定量分析, 本文提出了相干干扰的小视场模型和大视场模型, 并给出了基于变换域的 Hough 变换算法。实践表明, 与传统的邻域平均、中值滤波、经典频域滤波等消除干扰算法相比, 该算法不仅高质量地消除了遥感图像中的相干干扰, 同时还能有效地保留原图像中的细微影纹和边缘信息, 并获得较好的峰值信噪比。该方法已在航天遥感图像的实时采集及处理系统中获得成功应用。

关键词: 变换域分析; Hough 变换; 遥感图像; 相干干扰; 随机幅度; 随机相位

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A

1 引言

由于在遥感图像的成像过程中各子系统的相互影响以及传输信道的非理想性, 将不可避免地在信号通道中偶合进一些相干干扰。这种干扰严重地影响了对遥感图像中目标的特征提取和识别的精度, 降低了各种遥感定量分析方法的有效性。

现有的遥感图像相干干扰消除方法大致可以划分为两类: 一类是频率域方法, 主要通过对图像进行付氏变换以后, 采用交互式方式确定相干干扰的频率范围, 然后选择适当的频域带阻滤波器进行滤波处理, 经付氏反变换后获得去干扰图像^[1]。由于在具体的应用环境下, 该相干干扰具有一个随机的初始相位, 因而利用主观的交互式方式很难准确地确定干扰频率, 以致往往造成大量图像信息的损失, 且无法实现实时处理。另一类方法是空间域方法, 主要采用各种图像平滑模板对图像进行卷积处理, 以达到消除或压制干扰的目的, 如邻域平均、中值滤波等都属于这一类方法。这类方法在消除或压制相干干扰的同时, 往往使图像变模糊, 损失了图像中大量的微细影纹和边缘特征信息^[1-2]。

如何有效地检测、压制或消除遥感图像中的相干干扰, 并且尽可能地减少图像信息的损失是实际应用中亟待解决的关键技术问题。通过对相

干干扰的幅度和相位特性的定量分析, 本文给出了随机相干干扰的小视场及大视场两种模型, 并提出了基于变换域的 Hough 变换算法。实践表明, 与传统的邻域平均、中值滤波、经典频域滤波等消除干扰算法相比, 该算法不仅高质量地消除了遥感图像中的相干干扰, 同时还能有效地保留原图像中的细微影纹和边缘信息, 并获得较好的峰值信噪比。该方法已在航天遥感图像的实时采集及处理系统中获得成功应用。

2 相干干扰的二维频域分析

2.1 相干干扰模型

从信号理论上来说, 相干干扰其本质是一种幅度较大的正弦信号, 因而通常也被称为单频干扰。为了讨论问题的方便, 这里以采用单元探测器的扫描成像系统为例来加以说明。

由于扫描起始角有一定的波动范围, 因而每行的采样开始时刻不固定, 所以这里要讨论的相干干扰是具有一个变化的初始相位的 Q , 它是行数 n 的函数, 记为 $Q(n)$, 它满足一定的概率分布率。

在实际应用中, 由于成像系统的非线性特性以及传输信道的非理想特性, 因而当系统满足如下两个条件(小视场模型, 一般情况下均满足):

· 幅度值 A 相对采样频率 f_s , 属于慢变信号

· 系统处于小视场 ($\theta < 20^\circ$) 扫描情况时,不失一般性,可将 A 看作行数 x 的随机变量,记为 $A(x)$ 。其离散表达式可记为 $A(n)$, 其中 n 为数字图像的行数。

假设相干干扰的频率为 f_0 , 采样频率为 f_s , 则经采样、量化以后相干干扰 $\eta(t)$ 的二维离散表达式为:

$$\eta(n, m) = A(n) \cos[2\pi(f_0/f_s)m + \varphi(n)] \quad (1)$$

其中 $n \in [0, N], m \in [0, M], N, M$ 分别为采集图像的行数和列数。

前面已经谈到, 这里的相干干扰是通过成像系统中分系统工作、信道传输而偶合进来的, 由于此时信号并不处于调制或解调等非线性处理环节, 所以, 该干扰可以认为是一种加性干扰。考虑这种加性相干干扰以后, 原始图像信号的二维离散表达式 $s(n, m)$ 可以写成:

$$s(n, m) = s_0(n, m) + \eta(n, m) = s_0(n, m) + A(n) \cos[2\pi f_r m + \varphi(n)] \quad (2)$$

其中 $s_0(n, m)$ 为不包含相干干扰的原始码流信号, $f_r = f_0/f_s$ 。

为了定性地分析随机相位、随机幅度以及二者共同作用时对系统的影响, 下面将分如下三种情况来讨论:

- A、仅含有随机相位的加性相干干扰
- B、仅含有随机幅度的加性相干干扰
- C、同时具有随机相位、随机幅度的相干干扰

2.2 相干干扰的二维频域分析

考虑到首要的任务是要确定相干干扰的频率, 因此, 很自然, 在频率变换域中进行信号分析是一种可取的方法。下面将首先引入二维傅立叶变换的概念。

① 数字图像 $s(n, m)$ 的二维离散傅立叶变换

数字图像 $s(n, m)$ 是以一个 N 行 M 列的矩阵 $[s(n, m)]_{N \times M}$ 的形式出现在计算机中的。图像矩阵的二维离散傅立叶变换可按级数形式定义为:

$$S(p, q) = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} s(n, m) \exp \left[-j2\pi \left(\frac{pn}{N} + \frac{qm}{M} \right) \right] \quad (3)$$

其中, $p = 0, 1, \dots, N-1; q = 0, 1, \dots, M-1$ 。离散傅立叶反变换式可定义为:

$$s(n, m) = \frac{1}{NM} \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{M-1} S(p, q) \exp \left[j2\pi \left(\frac{pn}{N} + \frac{qm}{M} \right) \right] \quad (4)$$

式(3)、式(4)中 (p, q) 称为空间频率。由式(4)可知, 数字图像 $s(n, m)$ 是由 $N \times M$ 个余弦(正弦)基图像线性组合而成, 加权因子为 $S(p, q)$, $S(p, q)$ 称为空间频谱。

② 加性相干干扰的频域特性

为了讨论问题的方便, 这里以连续时间的加性相干干扰为例进行分析, 其二维表达式为:

$$\eta(x, y) = A(x) \cos[2\pi f_0 y + \varphi(x)] \quad (5)$$

其中 x, y 分别为 n, m 的连续时间表达形式。

A、仅含有随机相位的加性相干干扰

由于此时相干干扰中仅含有随机相位, 则根据式(5)可得相干干扰的表达式为:

$$\eta(x, y) = A \cos[2\pi f_0 y + \varphi(x)] \quad (6)$$

其中, A 为一常数, 则它的二维连续傅立叶变换为:

$$\begin{aligned} N(u, v) &= \int \int \eta(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \\ &= \int \int A \cos[2\pi f_0 y + \varphi(x)] e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \\ &= \int A e^{-j2\pi ux} dx \int \cos[2\pi f_0 y + \varphi(x)] e^{-j2\pi vy} dy = \\ &= \int A e^{-j2\pi ux} dx \left[\cos \varphi(x) \int \cos(2\pi f_0 y) e^{-j2\pi vy} dy - \right. \\ &\quad \left. \sin \varphi(x) \int \sin(2\pi f_0 y) e^{-j2\pi vy} dy \right] = \\ &= A [E_1 \cos \varphi(x) - E_2 \sin \varphi(x)] \cdot [\delta(v + f_0) + \\ &\quad \delta(v - f_0)] e^{-j2\pi ux} dx = \\ &= E_3 [\delta(v + f_0) + \delta(v - f_0)] \cdot \\ &\quad \int \cos[\varphi(x) + \theta] e^{-j2\pi ux} dx = \\ &= \Gamma(u) [\delta(v + f_0) + \delta(v - f_0)] \quad (7) \end{aligned}$$

其中, E_1, E_2, E_3, θ 是四个常数, $\delta(\cdot)$ 是单位冲激函数, 由于 $\varphi(x)$ 是一个随机变量, 因而 $\Gamma(u)$ 也是一个随 u 变化的随机量。

B、仅含有随机幅度的加性相干干扰

由于此时相干干扰中仅含有随机相位, 则根据式(5)可得相干干扰的表达式为:

$$\eta(x, y) = A(x) \cos[2\pi f_0 y + \varphi] \quad (8)$$

其中, φ 为一常数, 则它的二维连续傅立叶变换为:

$$\begin{aligned} N(u, v) &= \int \int \eta(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \\ &= \int A(x) \cos[2\pi f_0 y + \varphi] e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + A(x) e^{-j2\pi ux} \cos[2\pi f_0 y + \mathcal{Q}] e^{-j2\pi y} dy = \\
 & + A(x) e^{-j2\pi ux} \left[\cos\mathcal{Q} \cos(2\pi f_0 y) e^{-j2\pi y} - \right. \\
 & \quad \left. \sin\mathcal{Q} \sin(2\pi f_0 y) e^{-j2\pi y} \right] = \\
 & + A(x) [E_4 \delta(v + f_0) + E_5 \delta(v - f_0)] \cdot e^{-j2\pi ux} dx = \\
 & \quad \Gamma_1(u) \delta(v + f_0) + \Gamma_2(u) \delta(v - f_0) \quad (9)
 \end{aligned}$$

其中, E_4, E_5 为常数, 由于 $A(x)$ 是一个随机变量, 同理, $\Gamma_1(u), \Gamma_2(u)$ 也是随 u 变化的随机量。

C、同时具有随机相位、随机幅度的相干干扰
同时考虑随机相位、随机幅度的相干干扰, 则 $\eta(x, y)$ 的表达式由式(5)确定, 则对应的二维连续傅立叶变换为:

$$\begin{aligned}
 N(u, v) &= \int \int \eta(x, y) e^{-j2\pi(ux + vy)} dx dy = \\
 & + A(x) \cos[2\pi f_0 y + \mathcal{Q}(x)] e^{-j2\pi(ux + vy)} dx dy = \\
 & + A(x) e^{-j2\pi ux} \cos[2\pi f_0 y + \mathcal{Q}(x)] e^{-j2\pi y} dy = \\
 & + A(x) e^{-j2\pi ux} \left[\cos\mathcal{Q}(x) \cos(2\pi f_0 y) e^{-j2\pi y} - \right. \\
 & \quad \left. \sin\mathcal{Q}(x) \sin(2\pi f_0 y) e^{-j2\pi y} \right] = \\
 & + A(x) \{ [\cos\mathcal{Q}(x) - \sin\mathcal{Q}(x)] \delta(v + f_0) + \\
 & \quad [\cos\mathcal{Q}(x) + \sin\mathcal{Q}(x)] \delta(v - f_0) \} \cdot e^{-j2\pi ux} dx = \\
 & \quad \Gamma_3(u) \delta(v + f_0) + \Gamma_4(u) \delta(v - f_0) \quad (10)
 \end{aligned}$$

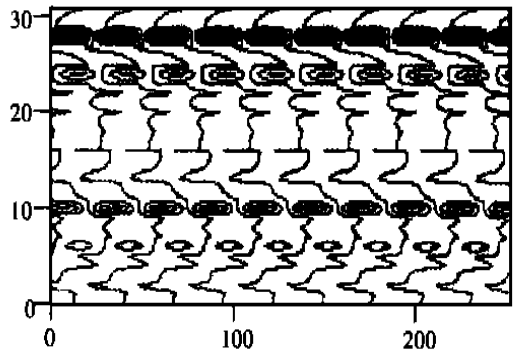
其中, 由于 $A(x), \mathcal{Q}(x)$ 都是随机变量, 因而 $\Gamma_3(u), \Gamma_4(u)$ 是 u 的随机变量。

由式(7)、式(9)以及式(10)可以看出, 对于 A、B、C 三种情况, 相应的相干干扰频谱均集中在 (u, v) 平面中 $v = \pm f_0$ 的两条直线上, 所不同的是, 三种情况的能量分布统计特性略有差异, B、C 两种情况的能量分布关于 $v = 0$ 不对称。

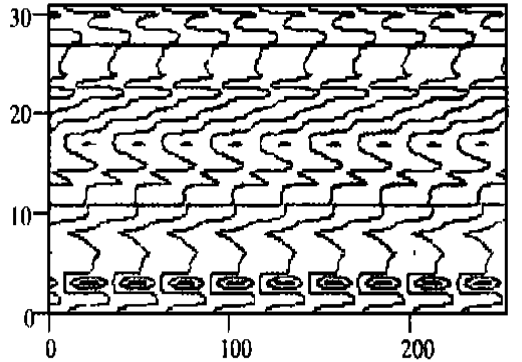
下面将具体考虑两种情况:

- (1) $\mathcal{Q}(n)$ 服从 $N(\pi, 1)$ 分布、 $A(n)$ 服从 $N(0, 1)$
- (2) $\mathcal{Q}(n)$ 服从 $U(0, 2\pi)$ 分布、 $A(n)$ 服从 $N(0, 1)$

图 1(a)、图 1(b), 图 2(a)、图 2(b) 和图 3(a)、图 3(b) 分别给出了(1)、(2)两种情况下相干干扰的时域分布、频域三维分布以及频域二维投影分布图, 从图中可以看出, 不论 $\mathcal{Q}(n), A(n)$ 分布如何, $\eta(n, m)$ 的能量总是对称分布在 $v = M/2$ 平面的两侧, 这与上面的理论推导结果一致。

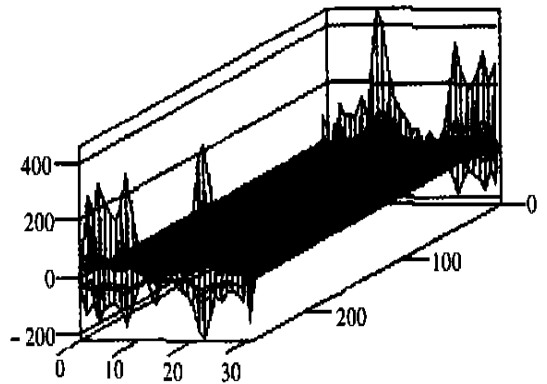


(a) Phase ~ $U(0, 2\pi)$ & Amplitude ~ $N(0, 1)$

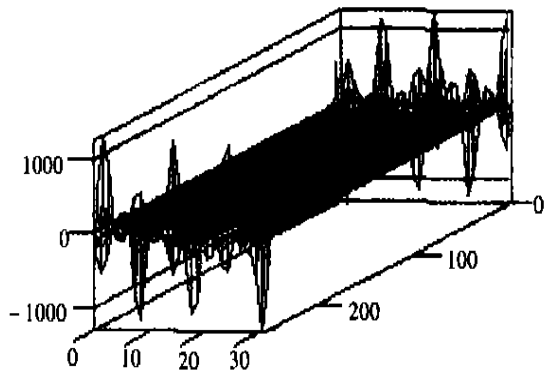


(b) Phase ~ $N(\pi, 1)$ & Amplitude ~ $N(0, 1)$

Fig. 1 Adding correlation jam time distribution

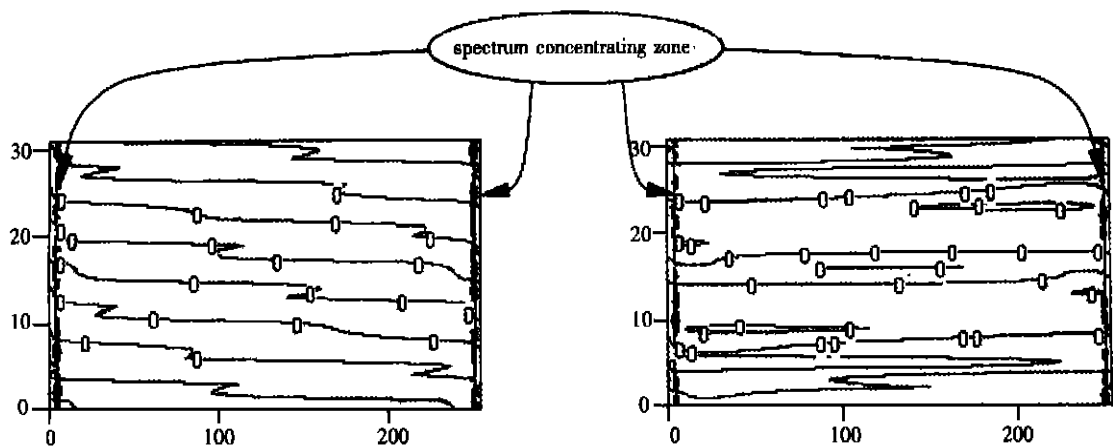


(a) Phase ~ $U(0, 2\pi)$ & Amplitude ~ $N(0, 1)$



(b) Phase ~ $N(\pi, 1)$ & Amplitude ~ $N(0, 1)$

Fig. 2 Adding correlation jam frequency space 3D distribution



(a)Phase ~ $U(0, 2\pi)$ & Amplitude ~ $N(0, 1)$

(b)Phase ~ $N(\pi, 1)$ & Amplitude ~ $N(0, 1)$

Fig. 3 Adding correlation jam frequency space 2D projective distribution

需要指出的是, 由于空间频率 q 与时间频率 f 存在一一对应的关系, 所以为了能快速地在二维频率域中找到 f_0 对应的 q_0 , 这里引入图像空间域分析中的 Hough 变换, 在 (p, q) 平面内检测 $q = \pm q_0$ 的两直线。

3 Hough 变换^[3]

Hough 变换是一种快速形状匹配技术。它是对图像进行某种形式的坐标变换, 使得经过变换以后原图上给定形状曲线上的所有点都集中到变换空间的某些位置上, 形成峰点。这样, 就把对原图中给定形状曲线的检测问题转化为找变换空间中峰点的问题。经典的 Hough 变换适用于曲线形状可以用参数来描述, 而曲线位置未知的情况下检测曲线。

3.1 Hough 变换的原理

下面以检测任意方向的直线为例来说明 Hough 变换的工作过程。在原始图像空间 (x, y) , 直线的极坐标参数方程为:

$$x \cos \theta + y \sin \theta = r \tag{11}$$

当 $x = x_i, y = y_i$ 时, 代入式(11), 可得:

$$x_i \cos \theta + y_i \sin \theta = r \tag{12}$$

则 (x, y) 空间中的一点 (x_i, y_i) 对应于 (r, θ) 空间中一条正弦曲线, 如图 4 所示。而变换空间中, 这条正弦曲线上的任一点对应于 (x, y) 空间中一条直线。这条直线必通过 (x_i, y_i) 这个点, 而 (x, y) 空间中共线的点经过变换后所对应的正弦曲线都相交于一点。交点的 (r, θ) 值与 (x, y) 空间中直线位置的关系如图 5 所示。

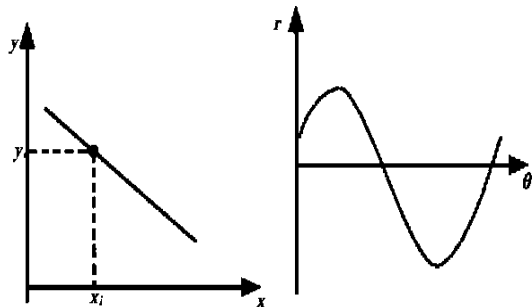


Fig. 4 Pixel Hough transform (polar coordinates)

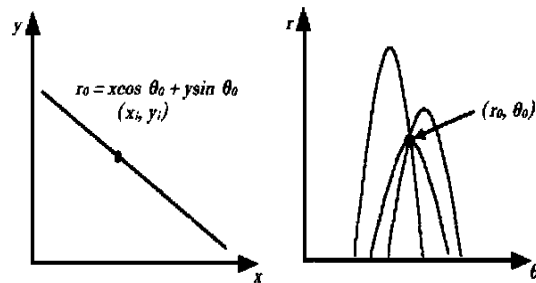


Fig. 5 In line pixels Hough transform

就检测直线问题本身而言, 采用极坐标 (r, θ) 作为变换空间与采用点斜式的 (k, b) 作为变换空间相比, 前者避免了垂直线的无限大斜率问题。而这里所要检测的正是这种斜率无限大的垂直线, 因此, 在检测相干干扰进行 Hough 变换时, 变换空间采用极坐标的 (r, θ) 空间。

需要说明的一点是, Hough 变换不仅可以用来检测直线, 而且也可方便地用来检测圆、椭圆、抛物线等形状的线条, 篇幅所限, 这里不再详述。

3.2 Hough 变换的一般步骤

Hough 变换的一般步骤如下:

(1) 在合适的范围内量化变换空间 (u, v)

(2) 构造一个累加数组 $A(u, v)$, 它的每个元素的下标对应于变换空间中各点的位置, 其元素值表示通过该点的曲线的条数。初始状态时将 $A(u, v)$ 的各元素置为 0。

(3) 根据预先设定的阈值对数字图像进行二值化, 并将背景点的像素值置为“0”, 待检测曲线的像素点的像素值置为“1”。

(4) 对图像空间中每个值为“1”的点在变换空间中找到与其对应的曲线, 并将该对应曲线所在位置上的所有点处的累加数组元素值加 1。

(5) 找累加数组中的峰值点。峰值点的位置对应于图像空间中待检测曲线的位置, 峰值的高低反映了这条曲线上像素点的多少。

需要说明的是, 从图 3 中可以看出, $q = \pm q_0$ 两条直线是不连续的, 因此在进行峰值点判别时, 峰值阈值点应小于变换行数 N , 一般取 $0.3N \sim 0.6N$ 。

4 对遥感图像中随机相位的检测和消除

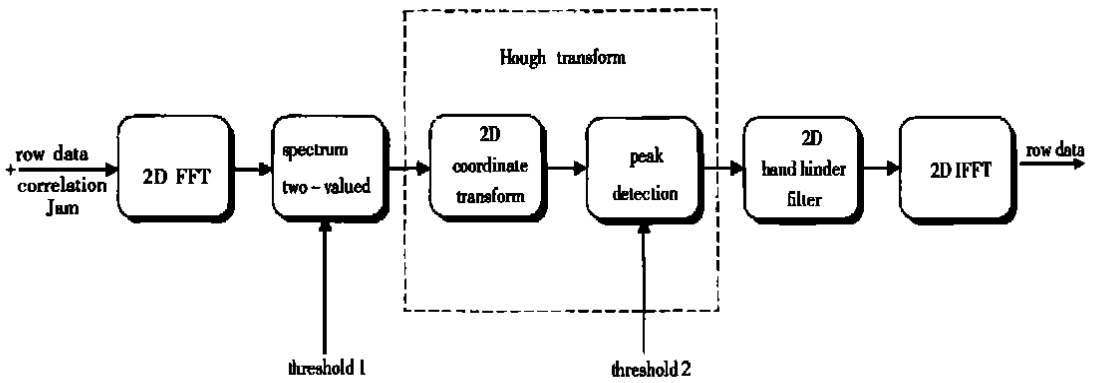
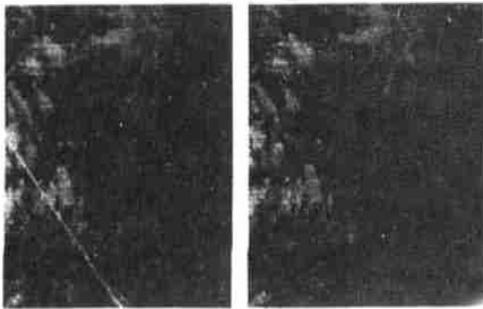
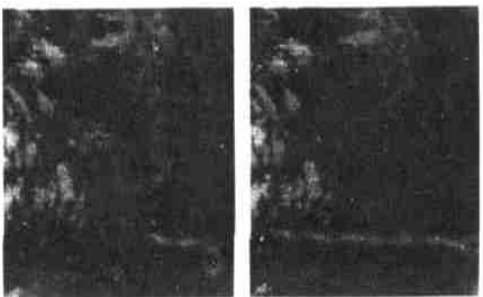


Fig. 6 Wiping off added correlation jam flow chart



(a) Row nephogram with correlation jam (b) Frequency space Hough transformed nephogram PSNR = 36.64



(c) Median filtered nephogram (d) Neighbour averaged nephogram PSNR = 32.87

Fig. 7 Three ways comparison

图 6 给出了检测和消除加性相干干扰的步骤, 图 7 给出了分别用频域 Hough 变换、中值滤波、邻域平均滤波等方法处理含有相干干扰遥感云图的结果及其对应的峰值信噪比。

5 对系统相干干扰模型适用范围 的讨论

在前面建立随机幅度模型时, 采用了小视场模型。但是, 当系统特性不能满足时, 则将建立相干干扰的大视场模型, 它满足如下两个条件:

- 随机幅度变化不能近似看成慢变信号,
- 系统处于大视场 ($\theta > 20^\circ$) 工作

此时幅度已经是随行数 n 和列数 m 变化的随机变量, 当然也可近似记为 $A(m)$, 则相干干扰的连续表达式为

$$\eta(x, y) = A(y) \cos[2\pi(f_0/f_s)y + \mathcal{Q}(x)]$$

为了寻求相干频率 f_0 , 这里引入相干干扰的自相关函数 $R_\eta(\tau_1, \tau_2)$ 和功率谱密度函数 $S_\eta(u, v)$, 并根据二阶均方遍历定理^[4], 可得

$$R_\eta(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{T_1 T_2} \int_0^{T_1} \int_0^{T_2} \eta(x, y) \eta(x + \tau_1, y + \tau_2) dx dy \tag{13}$$

$$S^{\eta}(u, v) = R^{\eta}(\pi, \tau) e^{-j2\pi(u\tau_1 + v\tau_2)} d\pi d\tau \quad (14)$$

同样,可以利用 Hough 变换在功率谱域中检测到两条间断的直线 $v = \pm 2f_0$, 此时便可确定相干干扰频率 f_0 , 由于篇幅所限, 具体的推导这里从略。

6 结 论

从以上的分析不难得出如下结论: 无论是采

参考文献:

- [1] Dennis A M, Rothery D A, et al. Lithological discrimination using landsat and JERS-1 SWIR data in the Oman Ophiolite[A]. The Tenth Thematic Conference on Geological Remote Sensing[C], Texas: 1994. 9- 12.
- [2] 王思贤, 曾发龙. 平滑图像噪声的插值滤波法[J]. 电子科学学刊, 2000, 22(3): 411- 415.
- [3] Ballerd D H. Generalizing the Hough transform of detect arbitrary shape[J]. Patt. Recog, 1981, 13(2): 111- 112.
- [4] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

Analysis of correlation jam in the remote sensing image based on the transformed space Hough algorithm

GUO Qiang, CHEN Gui-lin, TONG Wei-qi

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

Abstract: Since the correlation jam has a serious influence on the feature extraction of remote sensing images, as well as on the precise identification of the remote-sensing ground-objects, the paper not only presents small- and large-visual-angle models, but also gives corresponding transform space Hough algorithm on the basis of the quantitive analysis of the amplitude and the phase. Compared with the methods of neighbour average, median filtering and classical frequency space filtering, the algorithm proposed in the paper is useful in removing the random-phase jam of the images, reserving richer fine textures and edge information and getting higher PSNRs. The algorithm has been applied successfully to the real-time aquisition and processing system for remote sensing images.

Key words: transformed space analysis; Hough transform; remote sensing image; correlation jam; random amplitude; random phase

作者简介: 郭 强:(1975-),男,福建福州人,中国科学院上海技术物理研究所博士研究生,从事图像实时处理和模式识别方面的研究工作。

陈桂林,中国科学院上海技术物理研究所研究员,博士生导师,风云二号气象卫星副总设计师。

童卫旗,中国科学院上海技术物理研究所高级工程师,多年从事信号处理和在线检测方面的研究工作。

用小视场模型,还是大视场模型,均可以在变换域中(频率域——适用于小视场模型,功率谱域——适用于大视场模型)采用 Hough 变换算法提取出两条谱线,从而确定相干干扰频率 f_0 。实践表明,与传统的中值滤波、邻域滤波以及经典的频域滤波算法相比,该算法不仅高质量地消除了遥感图像中的相干干扰,同时还能有效地保留了原图像中的细微影纹和边缘信息,并获得较好的峰值信噪比。该算法已在航天遥感图像的实时采集和处理系统中获得成功应用。