

# CCD 推扫遥感成像中的欠采样噪声处理

迟学芬<sup>1,2</sup>, 韩昌元<sup>2</sup>, 金 辉<sup>3</sup>

(1. 吉林大学通信工程学院, 吉林长春 130012; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130021; 3. 北京邮电大学继续教育学院, 北京 100876)

**摘 要:** 欠采样噪声产生分布于整个画面的小尺寸附加像, 给目标识别等应用带来困难. 本文推导并优化了 CCD 图像捕捉系统中消除欠采样噪声算法, 提出新的 CCD 推扫和采样数据处理方法, 在 CCD 只能有推扫方向位移的遥感成像应用条件下, 消除了图像中的欠采样噪声. 扫描位移误差小于 CCD 间隔的 1/4 范围内, 能消除或减小欠采样噪声. 图像处理实验结果证明了欠采样噪声处理方法的正确性和有效性.

**关键词:** 欠采样噪声; CCD 线性探测阵列; 遥感; 空间频率

**中图分类号:** TN919.82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 09-1323-04

## Aliasing Noise Processing Methods in Push-Broom CCD Remote Sensing Imaging System

CHI Xue-fen<sup>1,2</sup>, HAN Chang-yuan<sup>2</sup>, JIN Hui<sup>3</sup>

(1. Telecommunication Engineering College, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;  
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun, Jilin 130021, China;  
3. School of Continuing Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** The small-scale artifacts generated by aliasing noise existing everywhere in an image, bring difficulties to some applications, such as target identification. Eliminating aliasing noise algorithm used in push-broom CCD image gathering system is derived and optimized. The strategies for CCD push-broom scanning and the novel methods for data processing are proposed. Aliasing in image are eliminated although CCD array can only move in one direction in remote sensing imaging system. The relative scan error must be less than 1/4 of CCD interval. The results of images processing experiments verify the validity of aliasing noise processing methods.

**Key words:** aliasing noise; CCD linear detector array; remote sensing; spatial frequency

### 1 引言

CCD 推扫遥感成像技术中, 采样前光学成像系统的截止频率通常比 CCD 采样间隔决定的 Nyquist 频率高很多倍<sup>[1]</sup>, 因此, 欠采样是普遍的. 欠采样噪声产生的小尺寸附加像分布于整个画面, 给目标识别等应用带来困扰. 欠采样噪声处理是 CCD 遥感成像技术中尚未解决的问题. 文献[2]提出了消除欠采样噪声的基本原理, 即利用彼此有相对位移的若干幅图之间的相位差消除欠采样噪声. 但这种理论在 CCD 推扫遥感成像应用中遇到困难. CCD 空间遥感成像用 CCD 线阵纵向(沿飞行方向, 垂直于 CCD 排列方向)移动扫描地面目标, 得到二维图像. CCD 线阵只在纵向移动, 不能在横向移动. 而且, 对确定的 CCD 探测系统, CCD 像元宽度和像元之间的距离为确定值, 所以无法得到有横向(CCD 排列方向)位移的图像.

本文建立了 CCD 图像捕捉系统模型, 推导了 CCD 图像捕

捉系统中的消除欠采样噪声算法, 面向应用, 实现了算法的实用化和简化. 提出新的图像推扫和数据处理方法, 提高纵向扫描率, 改变采样数据结构, 得到了彼此有相对位移的若干幅图像, 消除了图像中的欠采样噪声. CCD 线阵纵向位移精度影响欠采样噪声处理效果, 因此, 本文对算法的有效性与纵向位移误差的关系做出定量分析, 确定了算法应用的条件.

目前 CCD 纵向扫描周期在毫秒量级, 因此有提高纵向扫描率的冗余度. 文中图像处理试验结果证明了欠采样噪声处理方法的正确性、有效性.

### 2 CCD 图像捕捉系统模型和欠采样噪声

#### 2.1 CCD 图像捕捉系统模型

CCD 图像捕捉过程如图 1 所示.  $G$  为系统的稳态增益.  $h(x, y)$  是图像捕捉系统的空间响应函数,  $n_p(x, y)$  为探测器光电子噪声.  $o(x, y)$  为图像捕捉系统的输入信号, 是待捕捉的



图1 图像采集系统模型

目标  $s(x, y)$  为捕捉后的信号.  $\text{comb}(x, y)$  为采样网格函数. 在此模型下, 捕捉的信号可表示为

$$s(x, y) = [Go(x, y) * h(x, y)] \text{comb}(x/a, y/b) + n_p(x, y) \quad (1)$$

$a, b$  为  $x, y$  方向的采样间隔,  $\text{comb}(x/a, y/b) = \sum_{l, k} \delta(x - la, y - kb)$ .  $s(x, y)$  的傅立叶变换  $S(u, v)$  为

$$S(u, v) = A [GO(u, v) H(u, v)] * \text{COMB}(u/f_x, v/f_y) + N_p(u, v) \quad (2)$$

其中,  $O(u, v)$  是目标  $o(x, y)$  的付氏变换,  $H(u, v)$  是图像捕捉设备的空间频率响应,  $N_p(u, v)$  是噪声的付氏变换.  $A = f_x f_y$ ,  $f_x = 1/a, f_y = 1/b$  分别是  $x, y$  方向的采样频率. 对  $\text{COMB}(u/f_x, v/f_y)$  进一步分解

$$\begin{aligned} \text{COMB}(u/f_x, v/f_y) &= \sum_{l, k} \delta(u - lf_x, v - kf_y) \\ &= \delta(u, v) + \sum_{l, k} \delta(u - lf_x, v - kf_y) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)代入式(2)中有

$$S(u, v) = AGO(u, v) H(u, v) + AG \sum_{l, k} O(u - lf_x, v - kf_y) \cdot H(u - lf_x, v - kf_y) + N_p(u, v) \quad (4)$$

由式(4)知, 采样产生基带谱的复制谱(式中第二项). 式(4)的第一项代表图像捕捉系统的光学模糊效应, 第二项代表欠采样噪声效应, 第三项代表光电子噪声效应.

图像捕捉设备包含光学成像系统和 CCD 探测器阵列. 假设光学系统的点扩散函数为圆对称的高斯分布函数<sup>[3]</sup>, 光学响应指数为  $\alpha$ , 设 CCD 探测器的像元宽度为  $\Delta$ , 则图像捕捉设备的响应函数可建模为

$$H(u, v) = \text{sinc}(\alpha u) \text{sinc}(\alpha v) \exp(-\alpha^2 / 2) \quad (5)$$

## 2.2 欠采样噪声讨论

由式(4)第二项知, 在空间频域, 在采样频率的整数倍频率上, 采样产生基带频谱的复制谱. 当采样频率小于采样前信号截止频率的两倍时, 复制谱在基带内产生伪响应, 基带频谱发生畸变. 这种伪响应就是欠采样噪声. 当采样频率远小于 Nyquist 频率时, 出现高阶欠采样<sup>[2]</sup>. 通常用采样后的滤波滤掉基带以外的复制谱, 但是, 当发生欠采样时, 由于频谱混叠, 这种方法失效. 一定的采样频率下, 空间截止频率越高的光学系统产生越大的欠采样噪声. 这是 CCD 采样成像系统中光电系统设计的难题<sup>[4]</sup>.

## 3 CCD 图像捕捉系统中消欠采样噪声原理

对上文 CCD 图像捕捉系统的目标  $o(x, y)$  进行移动采样. 设采样函数在  $x$  方向移动了  $M$  次, 在  $y$  方向移动了  $N$  次, 即采样网格与目标相对移动了  $M \times N$  次. 任一次采样, 采样函数与原点之间的位移为  $(x_m, y_n)$ , 则采样后的图像  $s_{m, n}(x,$

$y)$  为

$$s_{m, n}(x, y) = [Go(x - x_m, y - y_n) * p(x, y)] \text{comb}(x/a, y/b) + n_p(x, y), \quad m = 0, 1, \dots, M-1; n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

$s_{m, n}(x, y)$  的付立叶变换为

$$S_{m, n}(u, v) = \sum_{l, k} GAO(u - lf_x, v - kf_y) P(u - lf_x, v - kf_y) \exp[-j2(u - lf_x)x_m] \exp[-j2(v - kf_y)y_n] + N_p(u, v) \quad (7)$$

设存在一个系数矩阵  $C_{m, n}(u, v)$ , 满足

$$S(u, v) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} C_{m, n}(u, v) S_{m, n}(u, v), \quad m = 0, 1, \dots, M-1; n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

$S(u, v)$  为图像基带频谱. 即  $M \times N$  个彼此有位相差的采样图像与  $C_{m, n}(u, v)$  相乘后叠加, 可消除复制谱, 得到基带频谱  $S(u, v)$ . 对  $S(u, v)$  做低通滤波, 然后做付氏反变换, 即可得到采样图像.  $C_{m, n}(u, v)$  满足下列方程<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} C_{m, n}(u, v) \exp[-2j(ux_m + vy_n)] = 1 \\ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} C_{m, n}(u, v) \exp[-2j(ux_m + vy_n)] \times \exp[j2(lf_x x_m + kf_y y_n)] = 0 \end{cases} \quad (9)$$

若采样得到 8 幅图像,  $M = 4, N = 2$  (第 5 部分试验条件), 则根据式(9)可得到系数  $C_{m, n}(u, v)$

$$\begin{aligned} c_{0,0}(u, v) &= \frac{W_{1,x} W_{2,x} W_{3,x} W_{1,y}}{h_{0,x}(u) h_{0,y}(v) (W_{3,x} - W_{0,x}) (W_{2,x} - W_{0,x}) (W_{1,x} - W_{0,x}) (W_{1,y} - W_{0,y})} \\ c_{0,1}(u, v) &= \frac{W_{1,x} W_{2,x} W_{3,x} W_{0,y}}{h_{0,x}(u) h_{1,y}(v) (W_{3,x} - W_{0,x}) (W_{2,x} - W_{0,x}) (W_{1,x} - W_{0,x}) (W_{1,y} - W_{0,y})} \\ c_{1,0}(u, v) &= \frac{W_{0,x} W_{2,x} W_{3,x} W_{1,y}}{h_{1,x}(u) h_{0,y}(v) (W_{3,x} - W_{1,x}) (W_{2,x} - W_{0,x}) (W_{1,x} - W_{0,x}) (W_{1,y} - W_{0,y})} \\ c_{1,1}(u, v) &= \frac{W_{0,x} W_{2,x} W_{3,x} W_{0,y}}{h_{1,x}(u) h_{1,y}(v) (W_{3,x} - W_{1,x}) (W_{2,x} - W_{1,x}) (W_{1,x} - W_{0,x}) (W_{1,y} - W_{0,y})} \\ c_{2,0}(u, v) &= \frac{W_{0,x} W_{1,x} W_{3,x} W_{1,y}}{h_{2,x}(u) h_{0,y}(v) (W_{3,x} - W_{1,x}) (W_{2,x} - W_{0,x}) (W_{3,x} - W_{2,x}) (W_{1,y} - W_{0,y})} \\ c_{2,1}(u, v) &= \frac{W_{0,x} W_{1,x} W_{3,x} W_{0,y}}{h_{2,x}(u) h_{1,y}(v) (W_{3,x} - W_{1,x}) (W_{2,x} - W_{0,x}) (W_{3,x} - W_{2,x}) (W_{1,y} - W_{0,y})} \\ c_{3,0}(u, v) &= \frac{W_{0,x} W_{1,x} W_{2,x} W_{1,y}}{h_{3,x}(u) h_{0,y}(v) (W_{3,x} - W_{2,x}) (W_{3,x} - W_{1,x}) (W_{3,x} - W_{0,x}) (W_{1,y} - W_{0,y})} \\ c_{3,1}(u, v) &= \frac{W_{0,x} W_{1,x} W_{2,x} W_{0,y}}{h_{3,x}(u) h_{1,y}(v) (W_{3,x} - W_{2,x}) (W_{3,x} - W_{1,x}) (W_{3,x} - W_{0,x}) (W_{1,y} - W_{0,y})} \end{aligned}$$

$$h_{m,x}(u) = \exp(-j2\pi ux_m), \quad W_{m,x} = \exp(j2\pi fx_x m) \quad (10)$$

$$h_{n,y}(v) = \exp(-j2\pi vy_n), \quad W_{n,y} = \exp(j2\pi fy_y n)$$

根据采样定理,谱面上,大于 Nyquist 频率两倍的频率响应是没有意义的,他们是伪响应,因此求解式(8)~(10),计算  $C_{m,n}(u,v)$ 、 $S(u,v)$  时,只需在  $(-f_x/2, f_x/2)$ 、 $(-f_y/2, f_y/2)$  范围内进行。

### 4 图像扫描和数据处理方法

由消除欠采样噪声原理知,必须得到若干幅有相对位移的采样图像,才有可能消除欠采样噪声。而且若干幅图像之间必须有横向和纵向两个方向的位移,如果任意一个方向没有位移,则系数矩阵奇异。

目前 CCD 推扫遥感成像中用 CCD 线阵纵向(沿飞行方向)移动扫描地面目标,得到二维图像。采样目标如图 2 所示。设 CCD 像元间隔为  $a$ ,像元宽度为  $b$ 。通常情况下的采样网格如图 3 所示。纵向采样间隔与横向采样间隔相等,  $b = a$ 。

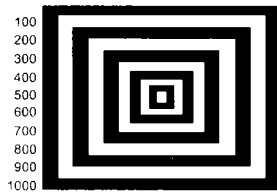


图 2 采样目标

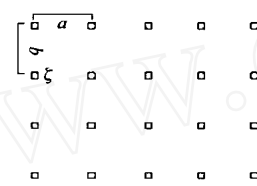


图 3 采样网格

本文采取提高纵向扫描频率、改变数据结构的方法得到彼此有相对位移的采样图像。取横向扫描间隔为  $a$ ,纵向扫描间隔  $b = a/N$  扫描图像,可得到一幅采样点比原来多  $N$  倍的扫描图像。若  $N = 4$ ,可把扫描像素重组为  $2 \times N$  幅横向间隔为  $2a$ ,纵向间隔为  $a$  的图像,从而,得到  $2 \times N$  幅有相对位移的图像,扫描网格如图 4 所示。

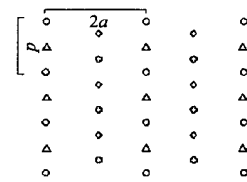


图 4 高纵向采样率的采样网格

### 5 欠采样噪声处理实验结果

为减小欠采样噪声,通常处理是设法降低光学成像系统的截止频率<sup>[5]</sup>(如引入离焦量),这样处理代价是图像模糊效应增大。采用本文的欠采样噪声处理方法捕捉图像,不用降低光学成像系统性能,模糊效应小,同时,消除了欠采样噪声。

以图 2 方框组为采样目标。为数据处理、计算方便,设 CCD 线阵由 256 个像元组成,像元间隔  $a = 1$ ,像元宽度  $b = 1/4$ ,采样频率为 1。光学成像系统的光学响应指数取为 1.2。

用普通方法,对方框组采样成像,得到的图像和其局部放大图如图 5(a)、(b)所示。从图中可以清楚的看到类似莫尔图形的欠采样噪声。用第 4 部分介绍的方法扫描、处理图像,改变数据结构,得到 8 幅有相对位移的图像,用第 3 节中的算法处理欠采样噪声,处理后的图像及其局部放大图如图 5(c)、(d)所示,欠采样噪声被消除。

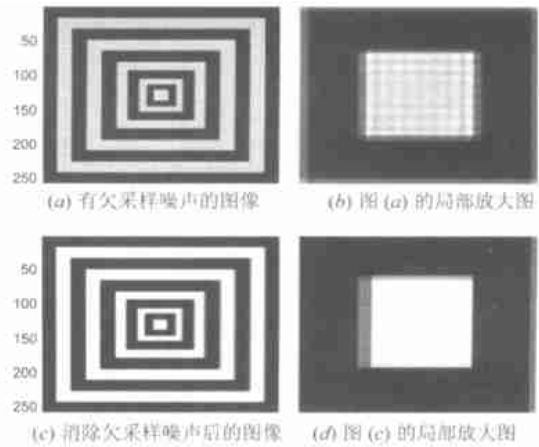


图 5 消除欠采样噪声的效果

### 6 纵向位移精度分析

本文消除欠采样的基础是若干幅有相对位移的图像,CCD 线阵纵向扫描的位移精度影响欠采样噪声处理效果,决定算法的有效性。因此,本文对算法的有效性与纵向位移误差的关系做出定量分析。

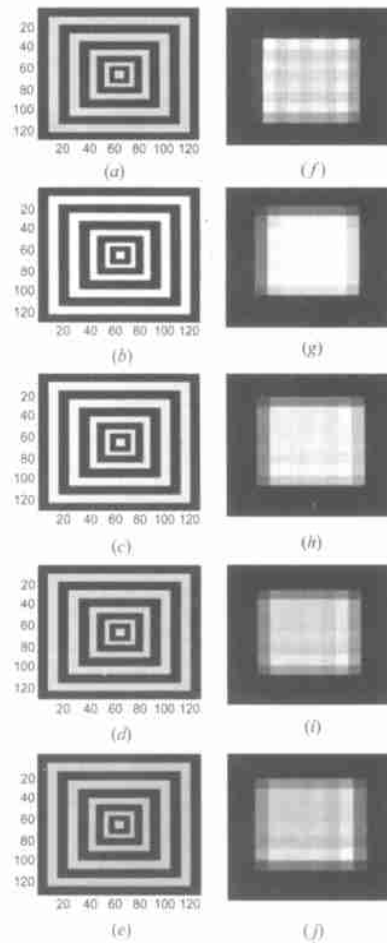


图 6 扫描误差对消噪声效果的影响

取  $128 \times 128$  像素图像分析. 这时采样间隔  $b = 2$ , 采样间隔内, 纵向位移误差分别取为  $0, 1/8, 2/8, 3/8$ , 取  $\alpha = 0.9$ . 欠采样噪声处理效果如图 6 所示. 图 6(a)、(f) 为有欠采样的原图和其局部放大图, 图 6(b) ~ (e) 为位移误差分别为  $0, 1/8, 2/8, 3/8$  的消欠采样噪声恢复图, 图 6(g) ~ (j) 为图 6(b) ~ (e) 的局部放大图. 分析图像质量知, 位移误差小于  $1/8$  时, 有较好的去噪效果. 扫描位移误差大于  $3/8$  时, 处理方法失效.

## 7 结论

欠采样噪声产生的附加像给军事、医学等应用带来极大困扰. 空间遥感成像的应用条件下, 欠采样噪声更强烈. 本文提出的方法, 不用改变探测系统硬件结构, 容易应用. 只要扫描定时准确, 就能得到良好的消噪声效果. 欠采样是采样成像系统普遍存在的问题, 本文提出的方法可灵活应用于各种采样成像系统.

## 参考文献:

- [ 1 ] Gerald C H. CCD Arrays Cameras and Displays [M]. Washington USA:SPIE Optical Engineering Press, 1998. 231 - 266.
- [ 2 ] Chen Z K, Mohammad A K, Majeed M H. Elimination of higher aliasings by multiple interlaced sampling [J]. Opt Eng, 1999, 38(5): 879 - 885.
- [ 3 ] Eddie L J, Timothy C E. Sampling criteria for sensor simulation [J].

Opt Eng, 1999, 38(5): 827 - 835.

- [ 4 ] 迟学芬, 石文孝, 韩昌元, 等. 基于信息理论的采样成像系统优化设计 [J]. 通信学报, 2002, 23(9): 88 - 93.
- [ 5 ] Euliss G W, Gracht J V D. Information theoretic analysis of a birefringent blur filter [J]. App Opt, 2001, 40: 6492 - 6498.

## 作者简介:



迟学芬 女, 1962 年 12 月出生于吉林省长春市, 吉林大学通信工程系副教授、中科院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 从事光电信息处理、宽带通信技术方面的研究.



韩昌元 男, 1940 年 7 月出生于吉林省延吉市, 现为中科院长春光学精密机械与物理研究所研究员、博士生导师, 从事光学信息处理、光学检测方面的科学研究.