

# 相控红外玫瑰扫描超分辨率成像技术<sup>1</sup>

傅志中 李在铭 熊文汇

(电子科技大学通信学院 成都 610054)

**摘要** 红外玫瑰线扫描亚成像目标识别系统是当今主要的末制导系统,但该类系统的成像空间分辨率较低。该文研究了玫瑰扫描参数最优控制准则,提出了扫描初始相位参数控制法,通过改变每帧的初始相位并进行多帧扫描相图重叠,高速高效地形成了高分辨率成像空间。DSP 系统实验结果表明,该技术有效地提高了系统的成像空间分辨率。

**关键词** 玫瑰扫描,末制导,相移控制,超分辨率

**中图分类号** TN219, TN911.72

## 1 引言

红外热成像制导,红外热成像导引技术经历了两个阶段<sup>[1]</sup>:第一阶段为采用探测器和旋转光机扫描器相结合的图像扫描制导技术,第二阶段是红外焦平面成像制导技术。图像扫描制导的精度低于焦平面成像制导,但其实现成本低,易于小型化;将双色信息融合技术与之相结合可在费用增加不多的情况下,能获得较好的抗干扰、识别真假目标、高效搜索与跟踪目标的功能,因而是当前深受国内外重视的发展方向之一。理论分析及实验表明<sup>[2]</sup>:在诸多光栅扫描、螺旋扫描、往复扫描、玫瑰扫描方式中,对于人工引导目标进入导弹寻的器视场中心后再转入自动跟踪的工作方式,玫瑰扫描方式是最合适的。采用玫瑰扫描方式,如果探测器和旋转光机扫描器的参数保持恒定不变,扫描图像是亚图像,它不能覆盖整个观测空间。玫瑰扫描图像中有一些盲区,不利于对目标的检测、识别和跟踪。

超分辨率成像是基于低分辨率帧序列,引入其他约束条件,得到更高分辨率图像的一种图像增强方法<sup>[3]</sup>。文献[4,5]针对亚成像平台抖动等造成的图像采样误差,提出了通过帧间亚图像数据联合配准和时空滤波而提高扫描图像的输入信噪比的方法。但由于图像采样固有的不完全性和估计的逼近性,这些方法最终不能真实、完全地反映原图像。本文通过对红外扫描特性的研究,充分利用现有资源,对系统进行优化设计,在分辨率、实时性和高效等条件约束下,提出了玫瑰线扫描的相位控制法。通过有效控制相位,利用文献[6]给出的实时高精度锁相方位转换成像算法,使红外玫瑰扫描图形在最少的帧重叠下按最佳准则对观测空间进行覆盖、采样,将多帧亚图像经配准、重合,转换为致密图像,提高成像空间分辨率,实现最优红外玫瑰扫描亚成像空间。

## 2 相控原理

玫瑰扫描成像方程如(1)式:

$$\left. \begin{aligned} x(t - nT_s) &= \frac{d}{2}(\cos(\omega_1 t + \alpha) + \cos(\omega_2 t - \alpha))\delta(t - nT_s) \\ y(t - nT_s) &= \frac{d}{2}(\sin(\omega_1 t + \alpha) - \sin(\omega_2 t - \alpha))\delta(t - nT_s) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$d$  为扫描半径,  $n$  为数字化时标,  $\omega_1 = 2\pi F_1$ ,  $\omega_2 = 2\pi F_2$  是扫描角频率,  $T_s$  是采样周期,  $\alpha(\alpha \in R)$  是玫瑰线图形逆时针旋转角,  $\delta(\bullet)$  是狄拉克函数;  $x(t - nT_s)$ ,  $y(t - nT_s)$  是经过

<sup>1</sup> 2000-10-16 收到, 2001-08-27 定稿  
国家部级基金资助课题

数字锁相得到的二维亚图像像素在  $nT_s$  时的直角坐标<sup>[6]</sup>, 取整以后简记为  $x(n), y(n)$ , 其周期  $T = 1/\text{com}(F_1, F_2)$ .  $\text{com}(\bullet)$  是最大公约数算子;  $N_T = [T/T_s]$  表示一维采样序列一个帧周期  $T$  中所有的采样像素,  $[\bullet]$  是取整算子.

对一种典型闭合扫描(见图 1),  $\bar{F} = \bar{F}_0 (=70\text{Hz}, 290\text{Hz})$ ,  $d = d_0 (=64)$  像素, 参数  $\alpha = \alpha_0 (=0)$ , 采样周期  $T_s = 5\mu\text{s}$ , 帧成像周期  $T=100\text{ms}$ . 由(1)式可以得知, 玫瑰扫描线只能周期扫描部分观测空间, 而不能覆盖半径为  $d_0$  的整个观测空间  $S$ . 玫瑰扫描线稳定收敛于如图 1 所示的  $A$  区域, 称为(1)式的  $x$ - $y$  相图(简称为相图), 存在采样盲区(视场区域中不能采样的区域), 且图像中心部分采样点较密并有大量像素重叠, 随着半径的增大, 盲区增大, 并对扫描中心呈中心对称分布. 令  $\gamma_l$  为该扫描模式的线分辨率, 定义为(1)式中任意相邻两个时标采样点像素之间距离的倒数, 则有

$$S(d_0) = \{(i, j) | i^2 + j^2 \leq d_0, i, j \in Z\} \quad (2)$$

$$A(d_0, \bar{F}_0, \alpha_0, T_s) = \{(i, j) | i = [x(n)], j = [y(n)], n \in [0, N_T], i^2 + j^2 \leq d_0^2\} \quad (3)$$

$$\gamma_l(d_0, \bar{F}_0, \alpha_0, T_s) = 1/(\Delta x \Delta y) \geq 2/(d_0^2 T_s^2) \quad (4)$$

其中  $\Delta x = x(t - (n+1)T_s) - x(t - nT_s)$ ,  $\Delta y = y(t - (n+1)T_s) - y(t - nT_s)$ ,  $Z, Z^+$  分别是整数集合和正整数集合. 线分辨率  $\gamma_l > 1$ , 满足图像在扫描线上致密采样的要求.

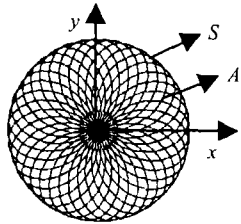


图 1 扫描模式

由图 1 知,  $A(d_0, \bar{F}_0, \alpha_0, T_s) \subset S(d_0)$ , 定义玫瑰线扫描的覆盖率:

$$\mu_{d_0} = |A|/|S| \quad (5)$$

其中  $|A|, |S|$  是集合  $A(d_0, \bar{F}_0, \alpha_0, T_s)$  和  $S(d_0)$  的元素数的度量.

**定义 1** 设区域  $Q$  划分为有限个子区域  $q_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 即  $Q = \bigcup_{i=1}^n q_i, q_i \cap q_j = \Phi, (i, j \in [1, n], i \neq j)$ ,  $q_i$  是第  $i$  个区域的面积(区域  $q_i$  的栅格数), 则称该子区域的分辨率  $\gamma_{si} = 1/q_i$ , (为与线分辨率相区别) 简称为面分辨率. 区域  $Q$  的平均面分辨率为  $\bar{\gamma}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_{si}$ .

由定义知离散观测空间  $S$  的分辨率最大且恒等于 1, 玫瑰线扫描的面分辨率随半径的增大而降低. 计算得出图 1 的  $\gamma_{\min} = 1/35$ . 当距离为  $l(\text{km})$ , 扫描波束为  $\beta(\text{mrad})$  时, 对于典型坦克目标, 其最大对角长度为  $L(\text{m})$ , 最大成像像素数为  $N \times N = (L/(l \times \beta)) \times (L/(l \times \beta))$ . 当  $N \times N < 1/\gamma_{\min}$  时, 目标识别系统将因目标可能出现在扫描盲区而漏检. 因面分辨率与覆盖率成正比, 所以下通过分析覆盖率来讨论成像空间特性.

图 2(a) 为单帧相图, 与图 1 形状相似, 但改变了相位; 覆盖率  $\mu_{d_0} = 0.4239$ , 在整个观测空间存在较大的采样盲区; 与 CCD 成像扫描得到的致密图像相比较, 该扫描图像是非致密图像. 图 2(b) 是没有进行相位控制的随机相位的四帧相图重合的结果. 图 2(c) 是仅改变(3)式  $A$  中的两个扫描频率参数得到的一帧相图, 玫瑰花瓣分布不均匀, 扫描线不能覆盖的观测空间比图 2(a) 更大. 图 2(d) 是图 2(a) 的覆盖率随相图半径变化的曲线. 由此进行目标的分割、识别和跟踪, 会产生较大的误差. 因此提高成像空间对观测空间的覆盖率, 使非致密图像接近致密图像, 减小盲区在观测空间中的分布密度及其分布面积, 有利于目标的高分辨成像.

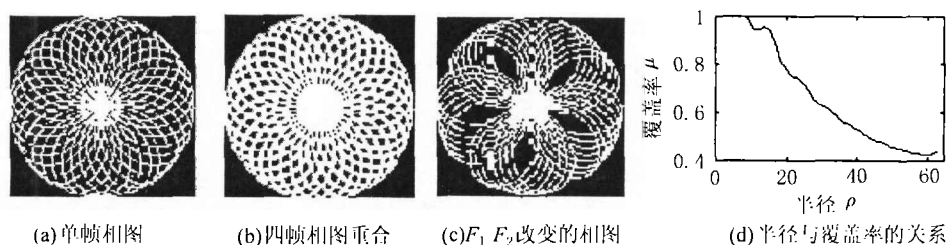


图 2 相图与扫描参数及单帧图覆盖率曲线

保持 (1) 式中的 5 个参数恒定不变, 玫瑰扫描线将稳定收敛于图 1 的相图  $A$ 。改变初相  $\alpha$ , 玫瑰线扫描所得到的图形依然是玫瑰线图形, 不同的只是花瓣的位置有变动。如果对初相不同的两帧玫瑰扫描图像进行配准、重合, 就能覆盖更多的观测空间。理论与实践研究表明, 通过有效控制玫瑰扫描模式的相位, 并将多帧相图配准后按一定规则重合, 能有效地提高观测空间的覆盖率。

使  $d_0, \bar{F}_0, T_s$  保持不变, 按一定的规则改变每帧扫描时的初相  $\alpha$ , 对应的相图  $A$  简记为  $A(\alpha)$ 。

令  $\text{cum}_l(\rho) = \bigcup_{k=1}^l A_\rho(\alpha_k), A_\rho(\alpha_k) = \{(i, j) | i^2 + j^2 \leq \rho^2, (i, j) \in A(\alpha_k), \rho \in [0, d_0]\}$

则  $\text{cum}_1(\rho) \subseteq \dots \subseteq \text{cum}_l(\rho) \subseteq \dots \subseteq S(\rho)$

覆盖率:  $\mu_{S(\rho)}(\text{cum}_1(\rho)) \leq \dots \leq \mu_{S(\rho)}(\text{cum}_l(\rho)) \leq \dots \leq 1$

解 (6) 式以  $\alpha_i$  为参数的一组非线性约束方程, 即得出最佳扫描相位序列。

$$\left. \begin{array}{l} \min(l) \\ \text{const: } 1: \mu_{S(d_0)}(\text{cum}_l(d_0)) \geq \eta; 2: \text{cum}_l(d_0) = \bigcup_{i=1}^l A_{d_0}(\alpha_i); 3: c \end{array} \right\} \quad (6)$$

给定覆盖率  $\eta$ , 在满足盲区均匀分布条件  $c$  时, 采用最优化技术<sup>[7]</sup> 求解式 (6), 就能得到最少帧  $l$  的最佳相图初始相位控制变化规律。

由 (1) 式可得, 一帧内有 36 个玫瑰花瓣均匀分布在圆周上, 相邻花瓣之间的夹角为  $10^\circ$ , 相图在角度方向呈周期性分布, 其周期  $T_\theta = 10^\circ$ 。对每一采样帧, 中心区域是采样点比较密集的致密区域, 而边缘却有较大的空隙, 在扫描半径  $d=64$  的边缘处, 每帧扫描图像中在圆周方向最大盲区长度约为 10 个像素。将玫瑰扫描线在扫描中心处沿逆时针旋转, 总可以将整个观测空间覆盖。

$\alpha$  的取值区间是  $[0^\circ, +10^\circ]$ 。当旋转角度  $\alpha = 1^\circ$  时, 扫描线在半径  $d$  处的弧长增量近似为 1。因此, 10 次相图的重合可以将整个观测空间完全覆盖, 旋转角  $\alpha$  对表 1 中序列进行循环取值。但为了有效并快速地进行目标的识别, 可以对覆盖率和处理时间采用折衷办法, 采取 2 帧、3 帧或 4 帧等等为一个覆盖周期或成像周期  $T_c = k \times T$ ,  $k$  是覆盖帧数。序列中  $\alpha$  的取值是每帧相图的初相针对初始相位  $0^\circ$  的偏移量。

通过表 1 中的相位控制方式, 得到了以下结果: (1) 在覆盖帧数相同的条件下, 该控制方式能获得最佳的红外玫瑰扫描亚成像空间, 即最佳的局域面分辨率和最大的覆盖率; (2) 在相同的覆盖率条件下, 该相位控制方法能获得最快的成像时间和最佳的局域面分辨率。系统最快处理时间:  $T_s = T_c + T_a$ 。其中  $T_c$  是覆盖周期 (也即成像时间),  $T_a$  是系统进行目标识别处理所需的时间。

表 1 最佳相位控制序列

帧数	10 帧	4 帧	3 帧	2 帧
相位控制序列 (°)	0, +1, +2, +3, +4 +5, +6, +7, +8, +9	0, +2.5 +5, +7.5	0, +3.3, +6.7	0, +5

### 3 DSP 系统实现与实验结果

采用双 C50 系统的实时相控成像目标识别与跟踪硬件系统原理框图如图 3<sup>[8]</sup>。双 C50 共用同一 20MHz 外部时钟，从 C50 采用数字锁相优化迭代同步转换算法，启动内部定时器进行定时采样，定时中断发生，使用  $T_{out}$  直接启动 A/D 变换并读入初相控制角  $\alpha$ ， $F_i(t), i \in \{1, 2\}$  脉冲触发从 C50 的外部可屏蔽中断，中断发生，则运算下一锁相步长。主 C50 完成后继的识别跟踪处理。地址机控制帧存和 D/A，实时显示采集的图像数据。

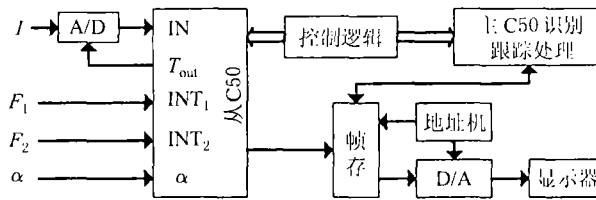


图 3 系统实现原理

图 4 显示了超分辨成像的 DSP 实验结果。实验中作者设计了玫瑰扫描仿真卡，用以模拟实际的红外光机扫描机构。图 4(a) 是由红外焦平面成像获取的高分辨率图像序列中的一幅，被作为玫瑰线扫描的原始输入图像。玫瑰线仿真卡模拟红外扫描光机扫描原始图像，产生一维连续模拟图像信号  $I(t)$ 、两路方位同步控制信号  $F_i(t), i \in \{1, 2\}$  和最优相位控制信号角度  $\alpha$ ，从 C50 通过数字锁相将一维图像信号转换为二维玫瑰亚图像。图 4(b) 是 1 帧 ( $k=1$ ) 扫描图像，它等效于多帧没有进行相位控制的扫描图像，目标图像被采样点数较少，不能反映出原始目标的基本信息，若存在强干扰，则目标被漏检的机率较大。图 4(c) 是进行 2 帧 ( $k=1$ ) 相位控制的扫描图像，目标图像被采样点数增加较多，目标的基本轮廓已显现出来。图 4(d) 是进行 3 帧 ( $k=3$ ) 相位控制的扫描图像，原图中的目标图像基本上被完全采样，目标的红外图像形状信息已突现出来，可以有效地进行目标的检测与识别。图 4(e) 是进行 10 帧 ( $k=10$ ) 相位控制的扫描图像，扫描图像覆盖整个观测空间，不再存在盲区，能准确地检测与识别目标。由此可见，对相位进行有效的控制后，采用多帧扫描相图配准重合，能显著提高采样空间的面分辨率，有利于对目标的分割、识别和跟踪。

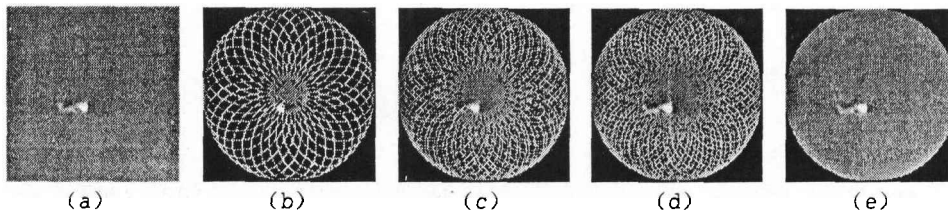


图 4 超分辨成像测试结果

对图 1 中的典型应用, 玫瑰线扫描成像时间为 100ms。由于该方法是控制扫描机构的初始相位, 配准重合时不须消耗额外的运算负荷, 能实时完成超分辨率成像。对静止不动或低速运动目标的成像, 该方法较之单帧成像具有较高的空间分辨率。对高速运动目标, 由于玫瑰扫描周期及其非均匀性特点, 该方法会导致处于视场边缘处目标的像空间产生运动模糊, 不利于对目标精确定位, 但它利于快速、及时地发现目标, 对实际应用中的末制导系统具有重要意义。

## 4 结 论

本文经过对红外扫描特性的研究, 提出了玫瑰扫描的初始相位移动法。通过对多帧初始相位移动进行配准重合, 而不是采用图像内插方法, 能提高输入图像的面分辨率, 增大目标的检测概率。在低漏警率和实时处理条件下, 使红外玫瑰扫描图形在最少的单帧(相图)图形重叠下能均匀覆盖整个观测空间, 将亚图像转换为致密图像, 降低目标检测的漏警率; 同时该方法避免了亚图像处理中图像采样不完全的限制, 有利于采用一般的致密图像处理办法。最后利用 DSP 的实时中断服务策略, 在双 C50 实时相控成像目标识别与跟踪系统上实时实现了该技术。实验表明, 该技术能有效地提高成像空间的分辨率, 提高目标的检测概率并降低亚成像条件下目标检测与识别算法难度。

## 参 考 文 献

- [1] 刘永昌等, 红外寻的制导技术的发展现状与新趋势, 红外技术, 1999(7), 7-12.
- [2] 冯焜焘, 立文, 使用“玫瑰线/螺线”图形扫描的双色制导技术, 红外技术, 1993(2), 2-8.
- [3] 李在铭等, 数字图像处理、压缩与识别技术, 成都电子科技大学出版社, 2000 年 11 月第 1 版, 第一章.
- [4] M. Fernandez, A. Aridgides, D. Randolph, *et al.*, Optimal subpixel-level IR frame-to-frame registration, SPIE Vol.1481 Signal and Data Processing of Small Targets, 1991, 173-179.
- [5] A. Aridgides, G. Cook, S. Mansur, K. Zonca, Correlated adaptive clutter suppression and normalization techniques, Proc. SPIE, 1998, Vol.933, 32-44.
- [6] 罗智勇, 李晓峰, 李在铭, 红外玫瑰扫描 DSP 实时亚成像的优化实现, 系统工程与电子技术, 2000, 22(8), 72-74, 81.
- [7] 傅英定, 成孝子, 唐应辉, 最优化理论与方法, 电子科技大学出版社, 1996 年 9 月第 1 版, 第五章.
- [8] 罗智勇, 李晓峰, 李在铭, 双 C50 多模同步采集高速目标识别系统, 系统工程与电子技术, 2000, 22(9), 16-19.

## THE PHASE CONTROLLING TECHNOLOGY OF SUPER-RESOLUTION IMAGING OF INFRARED ROSETTE SCAN

Fu Zhizhong    Li Zaiming    Xiong Wenhui

(Comm. and Info. Eng. Institute, UEST of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** The subimaging target recognition system of infrared rosette scanning is the main optimal terminal guidance system, however, the resolution of the imaging space is not high. Based on the optimal controlling rule of scanning parameter, this paper proposes the phaseshift parameter controlling method which is performed through shifting the phase and overlapping the multi-frame phase diagrams. Thus, high resolution of imaging space under the condition of high speed, nice efficiency is achieved. The experimental results of DSP system show that this technology improves the image resolution of the system effectively.

**Key words** Rosette scan, Terminal guidance, Phaseshift controlling, Super-resolution

傅志中: 男, 1970 年生, 博士生, 已发表论文 4 篇, 主要研究多媒体信息处理, 目标识别, 高速 DSP 与多媒体信息实现技术等。

李在铭: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究多媒体信息处理, 信号检测与估计, 通信综合服务技术等。

熊文汇: 男, 1977 年生, 硕士生, 主要研究图像信息处理, 目标自动识别等。