

文章编号:1001-9014(2005)05-0352-05

# 复杂环境下半导体致冷器的动态模型及温度控制

宋绍京, 薛永祺

(中科院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 半导体致冷器在环境温度变化大, 热传导不稳定, 温度调节时间要求快等恶劣条件下工作时具有复杂的热电特性. 基于小信号线性化方法得出了半导体致冷器在复杂环境下的线性动态模型, 推导结果表明该模型有两个极点和一个零点, 并且模型随工作条件的变化而变化. 基于平均意义上的动态模型, 采用模糊自适应PID控制算法和脉宽调制技术设计了半导体致冷器冷端的温度控制系统. 阶跃反应表明该温度控制系统具有良好的动态性能和稳态品质, 并具有良好的抗干扰特性, 制冷10℃的时间约为70s, 稳态误差非常小, 达到0.1℃. 在简单环境下工作, 其温度控制效果优于0.1℃. 实验亦表明该温度控制系统在常温环境下, 最大制冷温度与环境温度之差达到23℃, 且随着控制温度的降低, 阶跃反应的时间也越来越长, 主要是和半导体致冷器的制冷效率、热沉的散热功率和半导体致冷器的供电电流饱和有关.

**关键词:** 半导体致冷器; 模糊PID控制; 脉宽调制器; 串口通讯

**中图分类号:** TP273.4 **文献标识码:** A

## DYNAMIC MODEL AND TEMPERATURE CONTROL OF THERMOELECTRIC COOLER UNDER COMPLEX ENVIRONMENT

SONG Shao-Jing, XUE Yong-Qi

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

**Abstract:** Thermoelectric cooler has dynamic thermoelectric performance under complex environment. A linear dynamic model of the thermoelectric cooler was derived by using small-signal linearization method. It shows that the dynamic model of the thermoelectric cooler has one zero and two poles. The dynamic model of the thermoelectric cooler is showed to vary with operating conditions. Based on average linear dynamic model of a thermoelectric cooler, a temperature control system was designed for the cold end temperature of the thermoelectric cooler by using fuzzy-PID algorithm and Pulse Width Modulator. The step response tests show that the controller has satisfying dynamic and static performance. In room temperature environment, the response time for cooling down 10℃ is around 70s and the steady error is very small. the cold-end temperature can be maintained at the setting value within 0.1℃. Experiment results also show that the setting temperature can be 23℃ below the environment temperature. And the setting value is smaller, the step response time is longer.

**Key words:** thermoelectric cooler; fuzzy-PID control; pulse width modulator; serial communication

### 引言

在航空航天遥感领域, 热红外通道通常采用黑体辐射源来进行定标,<sup>[1]</sup> 半导体致冷器在红外器件以及红外系统中得到了普遍利用,<sup>[2]</sup> 机载成像光谱仪的热辐射定标源主要采用半导体制冷器来稳定温度. 因为机载设备工作时条件非常恶劣, 环境温度变化大, 热传导不稳定, 温度调节时间要求快等, 半导体制冷器要想维持在恒定的温度, 不随环境温度和

热端温度的变化而变化, 需要有良好的控制技术. 对于一个好的控制器设计, 首先应该知道半导体致冷器的系统模型. 对于半导体的系统模型, 许多学者研究了半导体致冷器的动态性能和传输特性, Gray 使用小信号线性化方法, 理论上推导出了半导体致冷器的传递函数模型并计算了温度反应.<sup>[3]</sup> Bywaters 和 Blum 假设半导体致冷单元的温度分布是线性的, 解算出了控制方程.<sup>[4]</sup> 这些研究都是基于一对半导体单元的分析, 对于由许多半导体单元串联的

收稿日期: 2004-12-28, 修回日期: 2005-06-14

基金项目: 国家海洋局资助项目(020201)

作者简介: 宋绍京(1974-)男, 山东泰安人, 在读博士生, 研究方向为智能控制, 数字图像处理, 红外系统工程等.

Received date: 2004-12-18, revised date: 2005-06-14

半导体致冷模块、热沉和热负载组成的半导体制冷器,忽视连接在半导体冷端的热负载和热端的热沉会导致明显的温度控制误差。

## 1 半导体致冷器的系统动态模型

### 1.1 调节方程

半导体致冷器由半导体致冷模块,热沉,和热负载组成。半导体致冷模块由许多串联在一起的  $p$ - $n$  结组成,并焊接在两块基板上,热负载吸收的热负荷  $Q_L$  传输给冷端基板,并泵到半导体致冷模块的热端。假设分布在冷端基板内部的温度和热负载的温度一致,冷端基板和热负载作为一个整体,由能量平衡可以导出

$$(M_L C_L + M_C C_C) \frac{dT_L}{dt} = Q_L - Q_k - I \alpha_{pn} T_L \quad (1)$$

$M_L, C_L$  是冷端热负载的质量和比热;  $M_C, C_C$  是冷端基板的质量和比热;  $T_L$  是冷端的温度;  $I$  是流过半导体致冷器的平均电流;  $Q_k$  是半导体致冷模块冷端边界热传导率,可以表示为

$$Q_k = -kA \left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (2)$$

$k$  是  $p$ - $n$  结材料的平均热传导率,  $A$  是半导体致冷材料的总面积,  $T(x,t)$  是半导体致冷模块的热分布。根据热电材料的能量平衡可导出下式:

$$C\gamma \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = k \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\tau}{A} I \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + \frac{\rho}{A^2} I^2 \quad (3)$$

$\tau$  是由  $T d\alpha_{pn}/dT$  定义的汤姆逊系数,  $\rho$  是热电材料的平均电阻率,  $C$  是热电材料的平均比热,  $\gamma$  是热电材料的平均密度,方程右端第二部分是汤姆逊效应所产生的热。同样,把热沉和热端基板看作一个整体,由能量平衡可以导出:

$$(M_F C_F + M_H C_H) \frac{dT_H}{dt} = I \alpha_{pn} T_H + Q_0 - hA_F (T_H - T_a) \quad (4)$$

$M_F, C_F$  是热沉的质量和平均比热;  $M_H, C_H$  是半导体致冷模块热端基板的质量和平均比热;  $T_H$  是热端的温度;  $A_F$  是热端热沉的散热总面积;  $T_a$  是环境温度;  $Q_0$  是半导体致冷模块热端的热传导率,可以表达为

$$Q_0 = -kA \left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L} \quad (5)$$

方程(1),(3)和(4)是半导体致冷器动态性能的控制方程,这个模型由于依赖温度的物理特性,阻抗发热,帕尔帖效应而高度非线性。

### 1.2 线性化

由于控制器设计是基于线性控制理论,因此使用

小信号分析方法对其进行线性化,让半导体致冷器的所有变量为稳态值和扰动量的和如式(6)所示。

$$T(x,t) = \bar{T}(x) + \tilde{T}(x); T_L(t) = \bar{T}_L + \tilde{T}_L(t); I(t) = \bar{I} + \tilde{I}(t)$$

$$T_H(t) = \bar{T}_H + \tilde{T}_H(t); T_a(t) = \bar{T}_a + \tilde{T}_a(t); Q_L(t) = \bar{Q}_L + \tilde{Q}(t) \quad (6)$$

由泰勒级数展开的塞贝克系数近似关系为:

$$\alpha_{pn}(T) = \alpha_L + \frac{\tau}{T_L} \tilde{T}_L = \alpha_H + \frac{\tau}{T_H} \tilde{T}_H \quad (7)$$

$\alpha_L = \alpha_{pn}(\bar{T}_L)$ ;  $\alpha_H = \alpha_{pn}(\bar{T}_H)$ ,把式(6)和式(7)代入式(1),(3),(4),省略掉高阶项,除去稳态值,得到

$$k \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} - \frac{\tau \bar{I}}{A} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} + \left[ \frac{2\rho \bar{I}}{A^2} - \frac{\tau(\bar{T}_H - \bar{T}_L)}{AL} \right] \tilde{I} = C\gamma \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_L - (\alpha_L + \tau) \bar{I} \tilde{T}_L - \alpha_L \bar{T}_L \tilde{I} + kA \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} \right|_{x=0} \\ = (M_L C_L + M_C C_C) \frac{d\tilde{T}_L}{dt} \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\alpha_H + \tau) \bar{I} \tilde{T}_H + \alpha_H \bar{T}_H \tilde{I} - kA \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} \right|_{x=L} - hA_F (\tilde{T}_H - \tilde{T}_a) \\ = (M_F C_F + M_H C_H) \frac{d\tilde{T}_H}{dt} \quad (10) \end{aligned}$$

式(8)成立的前提是假设稳态温度在热电材料中的分布是线性的,比如  $d\bar{T}(x)/dx \approx (\bar{T}_H - \bar{T}_L)/L$ 。

### 1.3 半导体致冷器的系统动态模型

拉普拉斯变换后解方程(8),(9)和(10)可得到具有扰动的冷端温度传递函数

$$\tilde{T}_L(s) = G_I(s) \tilde{I}(s) + G_Q(s) \tilde{Q}_L(s) + G_a(s) \tilde{T}_a(s) \quad (11)$$

$$G_I(s) = \frac{N(s)}{sD(s)} \quad (12)$$

$$G_Q(s) = \frac{E_H \sinh(qL) + Akq \cosh(qL)}{D(s)} \quad (13)$$

$$G_a(s) = \frac{AA_F h k q}{D(s)} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} N(s) = \{ Akq [ \alpha_L \bar{T}_L \cosh(qL) - \alpha_H \bar{T}_H ] + \alpha_L \bar{T}_L E_H \sinh(qL) \} s \\ + \frac{Akq\beta}{C\gamma} [ E_H (1 - \cosh(pL)) - Akp \sinh(pL) ] \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D(s) = Akq E_L \cosh(qL) + E_H E_L \sinh(qL) \\ + Akq E_H \cosh(pL) + A^2 k^2 p q \sinh(qL) \quad (16) \end{aligned}$$

$$p(s) = \frac{\tau \bar{I}}{A} + \sqrt{\frac{\tau^2 \bar{I}^2}{A^2} + 4kC\gamma s}$$

$$q(s) = \frac{\tau \bar{I}}{A} - \sqrt{\frac{\tau^2 \bar{I}^2}{A_2} + 4kC\gamma s} \quad (17)$$

$$E_L(s) = (M_L C_L + M_C C_C) s + (\tau + \alpha_L) \bar{I} \quad (18)$$

$$E_H(s) = (M_F C_F + M_H C_H) s + hA_F - (\tau + \alpha_H) \bar{I} \quad (19)$$

$$\beta = \frac{2\rho \bar{I}}{A^2} - \frac{\tau(\bar{T}_H - \bar{T}_L)}{AL} \quad (20)$$

式(11)表明半导体致冷器的冷端温度  $T_L$  受电流  $I$ 、冷负荷  $Q_L$  和环境温度  $T_a$  的影响。  $G_I(s)$ 、 $G_Q(s)$  和  $G_a(s)$  分别是代表电流、冷负荷和环境温度行为的传递函数。对于工作在稳定环境、固定冷负荷条件下的半导体致冷器,我们关心的系统模型便是:

$$G_I(s) = \frac{\bar{T}_L(s)}{\bar{I}(s)} = \frac{N(s)}{sD(s)} \quad (21)$$

#### 1.4 模型简化

式(21)表明半导体致冷器的动态模型是一个无限阶系统,为了方便系统设计,需要对模型进行适当的简化,在实际过程中,半导体致冷模块中的汤姆逊效应相比较赛贝克效应来说是很小的,因此,可以作以下的近似简化:

$$\alpha_H = \alpha_L = \alpha_{pn}; p(s) = q(s) = \lambda(s) = \sqrt{\frac{C\gamma s}{k}}; \quad \sinh(\lambda L) \approx \lambda L; \cosh(\lambda L) \approx 1 + \frac{\lambda^2 L^2}{2} \quad (22)$$

得到半导体致冷器的简化模型为:

$$G_I(s) = \frac{\bar{T}_L(s)}{\bar{I}(s)} = -K \frac{\frac{s}{z} + 1}{\left[ \frac{s}{p_1} + 1 \right] \left[ \frac{s}{p_2} + 1 \right]} \quad (23)$$

$$K = \left\{ Ak\alpha_{pn}(\bar{T}_H - \bar{T}_L) + L\alpha_{pn}^2 \bar{I} \bar{T}_L + \left( \frac{\rho L^2 h A_F}{A} + 2\rho Lk \right) \bar{I} + \frac{\rho L^2 \alpha_{pn} \bar{I}^2}{A} + L\alpha_{pn} h A_F \bar{T}_L \right\} / (AA_F h k + Lh A_F \alpha_{pn} \bar{I} - L\alpha_{pn}^2 \bar{I}^2) \quad (24)$$

$$z = AA_F h k + Lh A_F \alpha_{pn} \bar{I} - L\alpha_{pn}^2 \bar{I}^2 / \left\{ \left[ \frac{1}{2} A \alpha_{pn} L^2 C \gamma + L\alpha_{pn} (M_F C_F + M_H C_H) \right] \bar{T}_L - \frac{\rho L^2}{A} (M_L C_L + M_C C_C) \bar{I} \right\} \quad (25)$$

$$p_{1,2} = a \pm \sqrt{a^2 - b^2} \quad (26)$$

$$a = \frac{\left\{ Lh A_F (M_L C_L + M_C C_C) + A C \gamma L \left( Ak + \frac{1}{2} h A_F L \right) + Ak (M_F C_F + M_L C_L + M_C C_C + M_H C_H) + L\alpha_{pn} (M_F C_F + M_L C_L) \bar{I} \right\}}{\left\{ 2L (M_F C_F + M_H C_H) (M_L C_L + M_C C_C) + AL^2 C \gamma (M_F C_F + M_L C_L + M_C C_C + M_H C_H) \right\}}$$

$$b = \frac{\{ AA_F h k + Lh A_F \alpha_{pn} \bar{I} - L\alpha_{pn}^2 \bar{I}^2 \}}{L (M_F C_F + M_H C_H) (M_L C_L + M_C C_C)} \left\{ + \frac{1}{2} AL^2 C \gamma (M_F C_F + M_L C_L + M_C C_C + M_H C_H) \right\} \quad (28)$$

式(24)~(26)是式(23)动态模型中的各个参数,其中  $K, p_1, p_2, z$  是工作条件  $\bar{I}, \bar{T}_L, \bar{T}_H$  的函数,因此模型的增益和零、极点随着工作点不同而变化,增益  $K$  随着冷端温度的增高而增大,随电流的增大而急剧增大;零点和极点基本上保持常量,不随电流和温度的变化而变化。基于上面的分析,半导体致冷器的动态模型基本上是非线性的,但实际的非线性模型可以看作几个在不同工作点具有线性扰动模型的合成。为了方便控制器的设计,使用各个参数的平均值建立平均意义下的数学模型。对于本研究中的半导体致冷器,  $\rho = 10^{-5} \Omega m$ ,  $\gamma = 200 \text{kgm}^{-3}$ ,  $A = 0.00145 \text{m}^2$ ,  $\alpha_{pn} = 0.168 \text{VK}^{-1}$ ,  $k = 1.5 \text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ ,  $h = 10 \text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$ ,  $L = 0.0025 \text{m}$ ,  $M_c = M_h = 0.05 \text{kg}$ ,  $M_L = 0.6 \text{kg}$ ,  $M_F = 0.4 \text{kg}$ ,  $A_F = 0.1625 \text{m}^2$ ,  $C_C = C_H = 500 \text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ,  $C_L = 400 \text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ,  $C_F = 850 \text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$ 。

## 2 基于半导体致冷器动态模型的温度控制

### 2.1 控制器设计

基于上面得出的动态模型,建立一个温度控制系统,通过半导体致冷模块的电流是由一脉宽调制器来控制的,在半导体致冷模块的热端安装一个热沉,热沉是由一块基板和散热翼片构成,一个直流风机安装在热沉的旁侧进行加速散热。温度传感器采用铂电阻,通过 A/D 转换变成数字量,经由 RS232 串口传送给计算机采集。经过控制器计算得出的控制量,控制脉宽调制器的占空比,达到控制流过半导体致冷器的电流,系统结构如图 1 所示。因为该系统的模型是随着工作条件的变化而变化,当工作条件变化时,常规的数字 PID 控制器难于适应系统的变化,所以控制器采用模糊自适应 PID 控制器,模糊 PID 自适应控制算法是在 PID 算法的基础上将模糊控制理论应用于 PID 控制器的参数整定,使 PID 控制器的参数调节适应控制对象数学模型的参数变化,使系统不仅具有良好的动态特性,还使系统具有比较理想的稳态品质。<sup>[5,6]</sup> 自适应模糊 PID 控制器初始条件按照平均数学模型下整定的 P、I、D 各参数,根据动态模型和实际操作经验,建立模糊规则表,得到针对  $k_p, k_i, k_d$  三个参数分别整定的模糊控

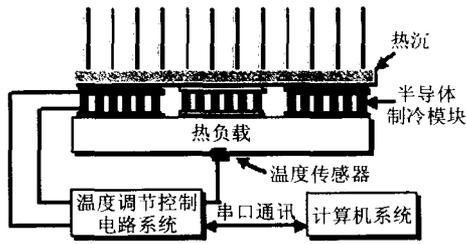


图1 温度控制系统结构示意图  
Fig.1 Sketch map of temperature control system

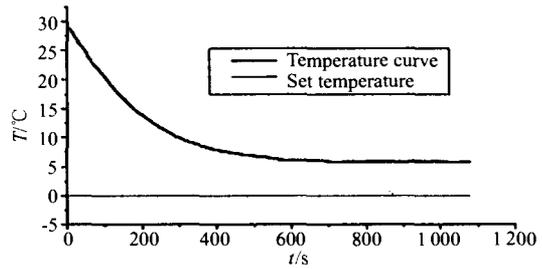


图3 系统制冷曲线图  
Fig.3 Cooling curve of temperature system

制表. 将系统误差  $e$  和误差变化率  $ec$  变化范围定义为模糊集上的论域

$$e, ec = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}, \quad (29)$$

其模糊子集为  $e, ec = \{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ , 子集中元素分别代表负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大. 设  $e, ec$  和  $k_p, k_i, k_d$  均服从正态分布, 因此可得出各模糊子集的隶属度, 根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模型, 应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表, 查出修正参数代入式(30)计算. 在线运行过程中, 控制系统通过对模糊逻辑规则的结果处理、查表和运算, 完成对 PID 参数的在线校正, 控制器根据系统误差  $e$  和误差变化率  $ec$  实时计算出控制量, 然后利用控制量计算脉宽调制器的占空比, 将此脉冲信号作为半导体热电堆的供电电源的开关控制信号.

$$\begin{aligned} k_p &= k'_p + \{e_i, ec_i\}_p; & k_i &= k'_i + \{e_i, ec_i\}_i; \\ k_d &= k'_d + \{e_i, ec_i\}_d, \end{aligned} \quad (30)$$

### 2.2 性能实验

为评估温度控制系统的性能, 执行阶跃反应测试试验, 试验中不停改变半导体制冷器热负载与环境的热传导, 用于模拟复杂的工作环境, 电流在控制温度过程中不停的变化. 图2为系统的阶跃反应曲线, 环境温度为  $29.2^\circ\text{C}$  的情况下, 设定温度为  $20^\circ\text{C}$ , 系统稳定时稳态误差非常小, 达到  $0.1^\circ\text{C}$ , 阶跃反应

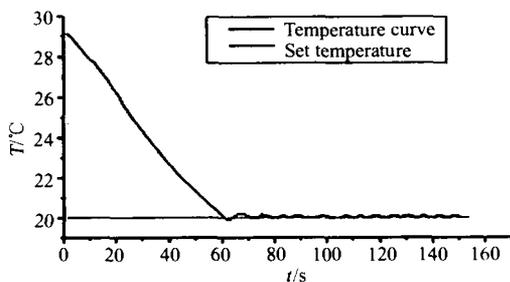


图2 系统的阶跃反应曲线  
Fig.2 Step response curve of ture control system

时间约为  $65\text{s}$  左右. 在不改变热传导的情况下, 控制精度优于  $0.1^\circ\text{C}$ . 通过实验亦表明随着设定温度的降低, 阶跃反应时间也越来越长, 主要是和半导体致冷器的制冷效率、热沉的散热功率和半导体致冷器的供电电流饱和有关. 在本实验中, 当环境温度为  $29^\circ\text{C}$  时, 最大制冷温度与环境温度之差为  $23^\circ\text{C}$  左右, 如图3所示.

### 3 结论

半导体致冷器的温度控制不仅仅只是依靠半导体致冷模块的非线性动态特性, 热沉和冷端负载的热动态特性对半导体致冷器施加了不可忽略的影响, 在本研究中, 利用小信号线性化方法推导出了半导体致冷器在复杂环境下的线性动态模型(包括半导体致冷器模块、热沉和热负载), 通过推导可以看到半导体致冷器的模型有两个极点和一个零点, 并且模型随着工作条件的变化而变化, 但实际的非线性模型可以看作几个在不同工作点具有线性扰动模型的合成. 基于平均意义上的动态模型, 采用模糊自适应 PID 控制算法和脉宽调制技术设计了半导体致冷器冷端的温度控制系统. 阶跃反应表明该温度控制系统具有良好的动态和稳态性能, 并具有良好的抗干扰特性, 试验表明该温度控制系统制冷  $10^\circ\text{C}$  的时间约为  $70\text{s}$ , 稳态误差非常小, 达到  $0.1^\circ\text{C}$ , 简单环境下的温度控制精度优于  $0.1^\circ\text{C}$ . 通过实验亦表明该温度控制系统在常温环境下最大制冷温度与环境温度之差达到  $23^\circ\text{C}$ , 且随着控制温度的降低, 阶跃反应的时间也越来越长, 主要是和半导体致冷器的制冷效率、热沉的散热功率和半导体致冷器的供电电流饱和有关.

### REFERENCES

[1] HUANG Ye, FANG Yong-Hua, XUN Yu-Long, et al. Calibration methods of infrared spectrum radiometer at various temperatures and background temperature adjustment [J].

- J. Infrared Millim. Waves* (黄焯, 方勇华, 荀毓龙等. 红外光谱仪多点定标方法及环境温度校正. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(2): 131—134.
- [2] XU Long, YI Xin-Jian. The design for TEC circuits and timing sequence of  $128 \times 128$  infrared focal plane array [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐隆, 易新建.  $128 \times 128$  红外焦平面阵列时序分析与温控电路设计. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(4): 261—264.
- [3] Gray P E. *The dynamic behavior of thermoelectric devices* [M]. New York and London: John Wiley and Sons, Inc, 1960.

- [4] Richard P Bywaters, Harold A Blum. The transient behavior of cascade thermoelectric heat pumps [J]. *Energy Conversion*, 1970, **10**: 193—200.
- [5] TAO Yong-Hua. *New type PID control and applications* [M]. Beijing: China Machine Press, (陶永华. *新型 PID 控制及其应用*. 北京: 机械工业出版社), 2002.
- [6] LIU Jin-Kun. *Advanced PID control and MATLAB simulations* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (刘金琨. *先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真*. 北京: 电子工业出版社), 2003.

(上接第 351 页)

$$I = \frac{1}{\sigma^2} \begin{bmatrix} 2M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8\pi^2 A^2 M & 8\pi^2 A^2 \sum_{m=0}^{M-1} m & 8\pi^2 A^2 \sum_{m=0}^{M-1} m^2 \\ 0 & 8\pi^2 A^2 \sum_{m=0}^{M-1} m & 8\pi^2 A^2 \sum_{m=0}^{M-1} m^2 & 8\pi^2 A^2 \sum_{m=0}^{M-1} m^3 \\ 0 & 8\pi^2 A^2 \sum_{m=0}^{M-1} m^2 & 8\pi^2 A^2 \sum_{m=0}^{M-1} m^3 & 8\pi^2 A^2 \sum_{m=0}^{M-1} m^4 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

而 CRB 界为 Fisher 信息矩阵的逆矩阵的对角线元素确定. 在均匀采样, 采样间隔为  $T$  的条件下, 高斯白噪声环境的各参数 CRB 界由下式确定:

$$\left. \begin{aligned} CRB[\hat{A}] &= \frac{\sigma^2}{2M} \\ CRB[\hat{\varphi}_0] &= \frac{3\sigma^2}{32\pi^2 A^2 M(M^2 - 4)} \\ CRB[\hat{f}_r] &= \frac{3\sigma^2}{32\pi^2 A^2 T^2 M(M^2 - 1)} \\ CRB[\hat{f}_t] &= \frac{45\sigma^2}{2\pi^2 A^2 T^4 M(M^4 - 5M^2 + 4)} \end{aligned} \right\}, \quad (25)$$

## REFERENCES

- [1] LOU Guo-Wei, LI Xing-Guo, WU Wen. Fmcw Short-range

- Radar of 3mm Wave Band [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (姜国伟, 李兴国, 吴文. 3mm 波段 FMCW 近程雷达的研究. *红外与毫米波学报*), 2001, **4**, **20**(2): 117—119.
- [2] LIU Gui-Xi, LING Wen-Jie. Dense-moving target detection of IFMCW radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘贵喜, 凌文杰. LFM CW 雷达密集运动目标检测. *红外与毫米波学报*) 2005, **24**(1): 76—80.
- [3] Griffiths H D. New ideas in FM radar [J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*. 1990, **10**, **2**(5): 185—194.
- [4] Shimon Peleg, Benjamin Friedlander. The Discrete Polynomial-Phase Transform [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*. 1995, **8**, **43**(8): 1901—1914.
- [5] Xia X G. Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation [J]. *IEEE Trans. signal processing*. 2000, **11**, **48**(11): 3122—3133.
- [6] Legg J A, Gray D A. Performance bounds for polynomial phase parameter estimation with nonuniform and random sampling schemes [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2000, **2**, **48**(2): 331—337.
- [7] Wojtkiewicz A, Rytel-Andrianik R. A New Estimation For Target Range, Velocity And Acceleration In FMCW Radar [J]. *Proc. Int. Conf. on Signal and Electronic System 2000*, Poland: 439—444.
- [8] Steven M Kay. *Fundamentals of statistical signal processing* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993 (Steven M Kay 著, 罗鹏飞译. *统计信号处理基础*, 北京: 电子工业出版社. 2003)

## 2006 年征订启事

《光学学报》、《中国激光》、《中国光学快报》(英文版), 由中国光学学会、中国科学院上海光学精密机械研究所主办, 中国科学出版社出版, 国内外公开发售。《光学学报》, 报道我国光学领域的各个分支的新概念、新成果、新进展。为“中国自然科学核心期刊”、荣获 2001 年“百种中国杰出学术期刊”称号, 《EI》、《AJ》、《CA》、《INSPEC》收录。《中国激光》是中国唯一全面反映激光领域最新成就的专业学报类期刊。为“中国自然科学核心期刊”、《EI》、《CA》、《INSPEC》、《AJ》收录。《中国光学快报》是中国光学界唯一的全英文学术期刊, 平均发表周期 6 个月, 报道国内外光学及相关领域的重要进展和最新成果。《EI》、《CA》收录。《光学学报》, 月刊, 160 页, 大 16 开, 进口铜版纸印刷。定价: 35 元/期。《中国激光》, 月刊, 144 页, 大 16 开, 进口铜版纸印刷。定价: 25 元/期。《中国光学快报》, 月刊, 64 页, 大 16 开, 进口铜版纸印刷。定价: 35 元/期。

地址: 上海市嘉定区清河路 390 号 中国光学期刊联合编辑部

电话: 021-69918427, 69918222 传真: 021-69918098 邮编: 201800