

# 二维位置敏感器件(PSD)的畸变校正算法研究

张风奇<sup>1</sup> 王永生<sup>2</sup> 张宝尚<sup>1</sup> 张求知<sup>1</sup>

(光电控制技术重点实验室 洛阳 471009) (洛阳光电设备研究所 洛阳 471009)<sup>2</sup>

**摘要** 光电位置敏感探测器(PSD)是对信号光的位置直接检测的光电传感器,它的原理是计算光的权重来测量光的位置,直接输出的是模拟电流信号。但 PSD 的非线性严重影响着其应用的准确性。由于四边电极的影响,会使靠近边缘附近产生严重的非线性。就如何对 PSD 进行畸变校正进行了研究。通过对插值算法的研究,提出了用双调和样条插值算法来校正 PSD 产生畸变的离散点。通过仿真分析,校正后的均方误差能达到 2.29 $\mu\text{m}$ 。与神经网络方法相比,该方法有了较大的提高,效果令人满意。

**关键词** PSD,位置检测,畸变校正,双调和插值

中图分类号 TN15 文献标识码 A

## Research on Algorithm of Revising Two Dimensions PSD

ZHANG Feng-qi<sup>1</sup> WANG Yong-sheng<sup>2</sup> ZHANG Bao-shang<sup>1</sup> ZHANG Qiu-zhi<sup>1</sup>

(Science and Technology on Electro-optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China)<sup>1</sup>

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment of AVIC, Luoyang 471009, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Position sensitive detector is a photo electricity sensor which is sensitive to the position of signal. By calculating the weight of light, PSD can measure the position of light and output the analogy current signal. The non-linear has impact on the reliability of PSD. As a result of the influence of the marginal electrodes, serious non-linearity appears on the edge of PSD, which restricts the reliability and application. This paper took a research on how to revise the distortion. By studying the interpolation arithmetic, this paper put forward Biharmonic Spline interpor so as to revise the distortion point. Through simulation and analysis, the error can be limited to within 2.29 $\mu\text{m}$ . It produces noticeably improvement compared with Nerve Network, which is satisfying.

**Keywords** PSD, Position detect, Distortion, Biharmonic spline interpolation

### 1 引言

光电位置敏感器件(Position Sensitive Detector, PSD)是一种可以直接将投射在 PSD 表面的光转化成位置信号的光电传感器,具有实时性、电路结构简单、没有工作死区、分辨率高、光谱范围宽等优点。PSD 由于有众多的优点,近年来已经应用于很多领域。利用 PSD 器件构成的光电检测系统可以直接测出目标的位置和动态位移,而且有很好的灵敏度,特别适用于有实时性要求、快速结果反馈的测量场合。目前国际上 PSD 已有了很大的发展,能达到 0.1%~0.2%的测量精度,而二维改进表面分离型 PSD 精度更高,如 52044,位置分辨率达 2.5 $\mu\text{m}$ <sup>[12]</sup>。本文就其在瞄准线测量方面应用进行研究,由于其严重的非线性畸变,在应用于瞄准线测量时会有很大的误差,使得整个器件测量的数据置信度下降。目前解决非线性的方法有双一次插值、双二次插值、双调和样条插值和神经网络等方法<sup>[5]</sup>。本方法研究的双调和样条插值方法是解决 PSD 非线性的一个有效途径。

### 2 二维 PSD 的工作原理

二维 PSD 器件是一种基于横向光电效应的器件,它以光能的照射,将电荷分配。在光敏面的两对边上的几何中心点

位置引出 4 个收集光电流的电极,当入射光束落在光敏面上形成光点时,光能将转换成穿过 PN 结的光电流<sup>[6]</sup>,这样 4 个电极就有相应的电流产生,分别为  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ 。光敏面的尺寸为  $l \times l$ 。四边形结构的 PSD 的结构示意图如图 1 所示。

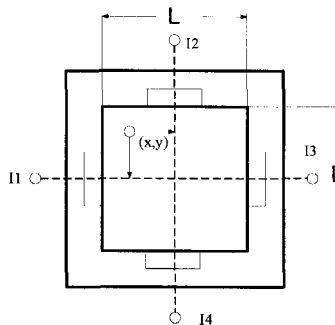


图 1 四边形 PSD 的结构示意图

以电极 1 和 4 的交界处为坐标原点的位置测量公式<sup>[1]</sup>为:

$$\begin{aligned} X &= \frac{l}{2} \left( 1 - \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right) \\ Y &= \frac{l}{2} \left( 1 - \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4} \right) \end{aligned} \tag{1}$$

本文受航空科学基金(20105113002)资助。

张风奇(1989—),男,主要研究方向为导航制导与控制。

以光敏面中心为原点的位置测量公式为:

$$\begin{aligned} X &= \frac{l}{2} \left( \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} \right) \\ Y &= \frac{l}{2} \left( \frac{I_4 - I_3}{I_3 + I_4} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可以看出,归一化的人射光位置 $(x, y)$ 可以由4个电极上的电流经过公式运算得到。

### 3 双调和样条插值

格林函数的名称来源于英国数学家乔治·格林(George Green),他最先在1830年提出这个概念。所谓样条插值就是寻找一个表面 $s(t)$ ,使得它满足最优平滑原则,也就是说利用样本点拟合光滑曲线,使其表面曲率最小。相当于一个扭曲的橡皮,使它通过所有的样本点,同时曲率最小。样条函数是灵活曲线规则的数学等式,为分段函数,一次拟合只有少数数据点配准,同时保证曲线段的连接处为平滑连续曲线。这就意味着样条函数可以修改曲线的某一段而不必重新计算整条曲线,插值速度快。双调和样条内插,或称双调和样条滤波,是以格林函数为基础的双调和方程的求解过程<sup>[10]</sup>。

一组离散的空间数据点之间通常可以用样条函数找出最平滑的曲线或曲面,从力学的角度看就是用很多富有弹性的样条来匹配各个数据点。这个插值的曲线或者曲面就满足双调和方程,有最小的曲率。离散的数据点可用下式<sup>[2]</sup>表示:

$$Z(x) = \phi[x_1, x_2, \dots, x_N] \quad (3)$$

$$Z_j = \phi(x_j), j=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中, $x$ 为连续的 $m$ 维矢量, $x_1, x_2, \dots, x_N$ 和 $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ 为样本数据的坐标和数值, $\phi$ 为映射关系。

对于 $m$ 维空间中散乱分布的 $N$ 个控制点 $X_i, i=1, 2, \dots, N$ , Biharmonic样条 $m$ 维插值问题转化为方程(5)的求解<sup>[7]</sup>:

$$\nabla^4 \phi(x) = \sum_{j=1}^N W_j \delta(x-x_j) \quad (5)$$

$$\phi(x_i) = Z_i, i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中, $\nabla^4$ 为双调和操作符; $W_j$ 为加权数; $\delta(x)$ 为采样函数; $x$ 是空间中的一个要插值的坐标位置。其通解如下:

$$\phi(x) = \sum_{j=1}^N W_j G_m(x-x_j), j=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$G_m$ 是 $m$ 维格林函数。将式(6)带入式(7)得

$$Z_i = \sum_{j=1}^N W_j G_m(x_i-x_j), i, j=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

式(8)是一个 $N$ 维的线性方程组,当利用样本点求得加权系数矩阵 $W_j$ 后,就可以唯一确定插值坐标 $x$ 的数据值 $Z$ 。当 $m=2$ 时,二维格林函数<sup>[11]</sup>为:

$$G_2 = |x|^2 (\ln|x| - 1) \quad (9)$$

### 4 PSD的非线性校正

由于4个电极的影响,直接由位置敏感探测器输出得到的数据点是有畸变的,如图2所示,图像会呈现枕形畸变。工程上一般运用修正因子法来进行修正,如图3所示。

本文所有的数据均是由PSD的数学模型得到。数学模型<sup>[8]</sup>为:

$$I_1 = \frac{4I_0}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{m^2+n^2} \frac{m}{n} (1-\cos m\pi) \sin \frac{m\pi X}{l} \sin \frac{n\pi Y}{l}$$

$$I_2 = \frac{4I_0}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-1}{m^2+n^2} \frac{m}{n} (1-\cos m\pi) \cos n\pi \sin \frac{m\pi X}{l} \sin \frac{n\pi Y}{l}$$

$$\frac{m\pi X}{l} \sin \frac{n\pi Y}{l}$$

$$I_3 = \frac{4I_0}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-1}{m^2+n^2} \frac{n}{m} (1-\cos m\pi) \sin \frac{m\pi X}{l} \sin \frac{n\pi Y}{l}$$

$$I_4 = \frac{4I_0}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-1}{m^2+n^2} \frac{n}{m} (1-\cos m\pi) \cos n\pi \sin \frac{m\pi X}{l} \sin \frac{n\pi Y}{l}$$

$$\sin \frac{n\pi Y}{l} \quad (10)$$

式中, $X, Y$ 分别是PSD感光面的横坐标和纵坐标, $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$ 。

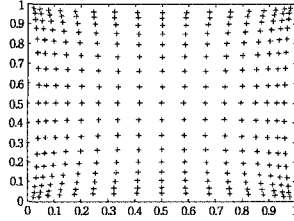


图2 畸变图像

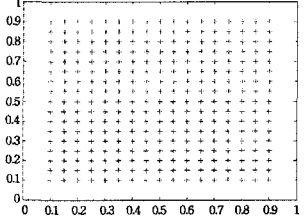


图3 校正图像

若令

$$x = x_m \times \alpha \quad (11)$$

$$y = y_m \times \beta$$

建立数据库,使每个点的实际坐标 $(x, y)$ 、测量坐标 $(x_m, y_m)$ 和修正因子 $(\alpha, \beta)$ 一一对应,经插值算法得到该点的修正因子,进而计算得到所求位置的插值坐标,如图4所示。

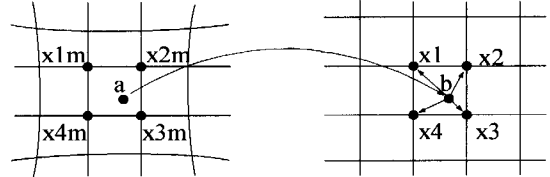


图4 插值点的对应关系

由于用修正因子来进行校正,如果采用感光面的中心点来作为坐标原点,则有可能是一个很小的数或者是0直接做分母。其在原点处没有意义,后果是修正因子曲面会出现一个断裂带(如图5所示),在断裂带的数值都是有很大偏差的。因此本文采用电极1和4的交点作为坐标原点,这样的好处是修正因子曲面比较平滑(如图6所示),有利于提高插值的精度。

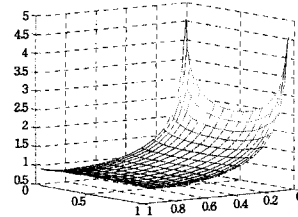


图5 电极1和4交界为原点的修正因子曲面

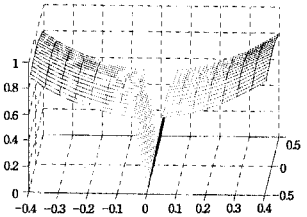


图6 感光面中心为原点的修正因子曲面

由图1可以看出修正因子的曲面是光滑的,变化趋势非常有规则,所以选择的插值方法的特点必须是有光滑性。这样就能最大程度接近修正因子的真实值。

### 5 二维双调和插值用于修正因子的计算

对修正因子曲面插值来得到任意坐标点的修正因子,进而可以求得任意坐标点的校正坐标值,式(7)可以写为:

$$\phi(x, y) = \sum_{j=1}^N w_j G(x, y) \delta(x-x_j, y-y_j) \quad (12)$$

其中  $G(x, y) = (x^2 + y^2) \ln(\sqrt{x^2 + y^2} - 1)$

定义

$$G_{i,j} = G(x, y) \delta(x_i - x_j, y_i - y_j) \quad (13)$$

简化为

$$\phi(x, y) = \sum_{j=1}^N w_j G_{i,j} \quad (14)$$

改写为

$$Z = GW \quad (15)$$

$Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_N]$  为样本点的值空间向量。其中  $G$  是样本点的格林函数矩阵:

$$G = \begin{bmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & \dots & G_{1,N} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & \dots & G_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N,1} & G_{N,2} & \dots & G_{N,N} \end{bmatrix} \quad (16)$$

格林函数矩阵的性质是:

$$\begin{cases} G_{ij} = G_{ji}; \\ G_{ij} = 0, & i=j; \\ G_{ij} \neq 0, & i \neq j \end{cases}$$

利用样本点就能求出权值向量  $W$ 。这样对于任意一点  $(x, y)$ , 都能求得其插值数值  $\phi(x, y)$ :

$$\phi(x, y) = gW \quad (17)$$

其中

$$g = [g_1, g_2, \dots, g_N] \quad g_i = G(x-x_i, y-y_i), i=1, 2, \dots, N$$

由式(17)得到任一点  $\phi(x, y)$  的插值数值后, 就可以拟合一个插值曲面, 将图 1 中所示的修正因子曲面在指定点进行插值, 进而由式(11)得到指定坐标点的修正坐标值。

## 6 仿真验证与分析

使用  $10 \times 10 \text{mm}$  的 PSD 的数学模型来产生  $17 \times 17$  的样本数据点, 归一化后使得  $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$ , 建立数据库, 使每个点的实际坐标  $(x, y)$ 、测量坐标  $(x_m, y_m)$  和修正因子  $(\alpha, \beta)$  一一对应。用 MATLAB 按上节的公式来编写插值程序。然后用网格数据点进行仿真验证, 数据点的  $x, y$  步进都是  $0.2 \text{mm}$ , 仿真的个数是  $36 \times 36$ 。所测得的部分位置读数如表 1 所列, 在全部的有效光敏面上测量所得的位置均方根误差为  $2.29 \mu\text{m}$ , 均方根非线性误差为  $0.0229\%$ , 最大误差为  $15 \mu\text{m}$ 。在图 7 中把误差超过  $1 \mu\text{m}$  的点用黑色的方块表示出来, 可以发现所有的大误差点都是在 PSD 感光面的边缘, 误差在  $1 \mu\text{m}$  以内的区域近似呈现一个枕形区域。如果去掉这些大误差的点, 在中心  $6 \times 6 \text{mm}$  内的感光面内, 所测得的位置均方根误差为  $0.44 \mu\text{m}$ , 非线性误差为  $0.007\%$ 。图 8 和图 9 是神经网络和双调和算法的误差对比。

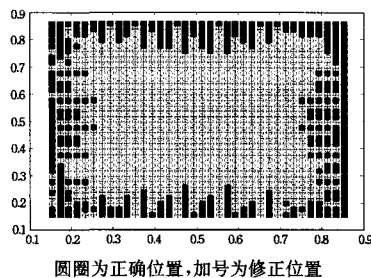


图 7 修正处理后的位置和正确的位置比较

表 1 用双调和插值算法修正的数据  
( $x, y$ ) 是理论坐标值, ( $x', y'$ ) 是修正坐标值, 单位 mm

x	y	x'	y'	e
7.94000000	2.16000000	7.93933218	2.16021552	0.00070173
8.14000000	2.16000000	8.13858949	2.16170484	0.00221270
8.34000000	2.16000000	8.33812434	2.16155004	0.00243326
8.54000000	2.16000000	8.53854769	2.15889315	0.00182601
1.54000000	2.36000000	1.53996158	2.35873193	0.00126865
1.74000000	2.36000000	1.73758416	2.36196177	0.00311205
1.94000000	2.36000000	1.93804004	2.36123561	0.00231693
2.14000000	2.36000000	2.13934062	2.35969371	0.00072705
2.34000000	2.36000000	2.33948504	2.35944289	0.00075866
2.54000000	2.36000000	2.53951200	2.35975165	0.00054756
2.74000000	2.36000000	2.73927235	2.35937092	0.00096188
2.94000000	2.36000000	2.93958204	2.35968022	0.00052626

注: 坐标误差  $e = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$

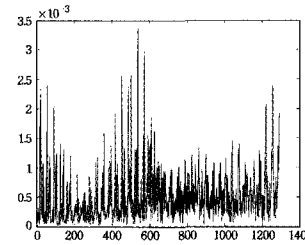


图 8 神经网络算法校正误差

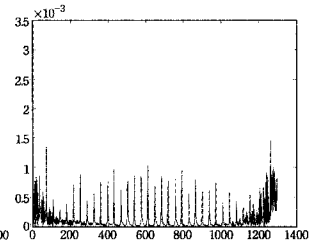


图 9 双调和样条插值算法校正误差

**结束语** 通过分析双调和样条插值算法原理, 提出了一种二维双调和样条插值算法, 用于 PSD 畸变校正方面, 其通过对修正因子的插值来进行畸变点的校正。用了  $36 \times 36$  个点来验证该算法的校正效果, 结果令人满意。该算法适用于三维网格插值、散乱数据点插值, 有很好的平滑性。仿真结果表明, 该算法能够很好地实现 PSD 的畸变校正, 在全部的感光面上的校正结果显示均方根非线性误差为  $0.0229\%$ , 均方根误差为  $2.29 \mu\text{m}$ 。而在  $6 \times 6 \text{mm}$  感光面中, 均方根非线性误差为  $0.007\%$ , 均方根误差为  $0.44 \mu\text{m}$ 。均方根误差小于  $1 \mu\text{m}$  的范围是一个枕形区域。显然在使用中如果仅使用  $6 \times 6 \text{mm}$  内的感光面, 线性度已经非常好了。通过图 8 和图 9 神经网络与双调和算法的误差对比可看出, 双调和算法误差很明显小于神经网络算法校正误差。本文介绍的是仿真分析的结果, 下一步将在实验数据的基础上进行分析。

## 参考文献

- [1] 黄梅珍. 位置敏感探测器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001
- [2] Sandwell D T. Biharmonic Splines Interpolation of Geos-3 and Seasat Altimeter Data[J]. Geophys. Res. Lett, 1987, 12(2): 139-142
- [3] Cui Song, Soh Y-C. Linearity Indices and Linearity Improvement of 2-D Tetralateral Position-Sensitive Detector[J]. IEEE, 2010
- [4] 齐奎洲. 基于 PSD 的光电位移测量系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011
- [5] 管炳良, 李星, 王俊. 二维 PSD 非线性修正技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(7): 1295-1299
- [6] 莫长涛, 陈长征. 二维 PSD 非线性修正共轭梯度算法[J]. 东北大学学报, 2003, 24(5): 507-509
- [7] 王亚涛, 董兰芳, 倪奎. 基于 Biharmonic 样条插值的图像渐变算法及实现[J]. 中国图像图形学报, 2007, 12(12): 2190-2194

(下转第 177 页)

其中,源 IP 地址列表是指在异常检测过程中,收集的攻击源的 IP 地址。与之前不同的为第 6 项攻击类型,这里特征信息里的攻击类型不仅仅是网络层和传输层的攻击,具体的攻击类型可以参照第 2 节,而攻击类型的判断依赖于基于正常用户行为的异常检测。

攻击特征信息是为了在下层让路由器识别攻击流量进行屏蔽并回溯,从而达到降低整个网络堵塞的目的。当异常检测得出攻击特征信息以后,从距离受攻击服务器最近的路由器开始发送攻击特征信息。路由器收到攻击特征信息之后,屏蔽源 IP 地址列表中的流量,同时向上游(攻击流量来的方向)路由器发送攻击特征信息,以此类推。接下来,在整个网络中的攻击流量都被屏蔽,大大降低了网络堵塞,同时保证了服务器的性能,避免了拒绝服务。

### 3.3 一种改进的应用层 DDOS 防范机制

DDOS 攻击是利用攻陷的电脑作为“丧尸”组建僵尸网络,向服务器发起密集式的 DOS 攻击。而异常检测得出的攻击源 IP 地址列表被加入黑名单之后,来自该地址列表内的任何流量都被屏蔽,即使是正常的流量。当“丧尸”没有被操纵,正常的用户想要访问网络服务的时候却被屏蔽。

为了解决这个问题,要区分恶意攻击源和被攻陷的“丧尸”,并且还要恢复部分被攻陷主机访问网络服务器的权限。对源 IP 地址定义以下参数 SourceType、AttackCount、Threshold、Timer,其含义如下:

1)ST(SourceType):表示此 IP 地址的主机类型。分为恶意攻击源 A(attacker)和被攻陷主机 B(bot)两种。

2)AC(AttackCount):表示此源地址对服务器攻击的次数。

3)T(Threshold):表示被攻陷主机攻击次数的最大值。

4)Timer:恢复访问计时器,源 IP 地址每被拉黑一次,计时器开始计时,记录距离恢复访问权限还有多久。随着 AttackCount 的增加,恢复访问时间呈指数倍增加。

改进后机制对攻击流量的处理过程:

攻击流量中,对于每个源地址的 SourceType 初始为 bot, AttackCount 初始为 1。Threshold 为设定的常量。Timer 的值与 AttackCount 正相关。

源地址每被加入黑名单一次,AttackCount 增加 1,恢复权限时间 Timer 随之增加。同时向源地址返回消息,提醒用户自己的机器被攻陷。

当 AttackCount 大于设定的 Threshold 时,将 SourceType 改为 attack,将 Timer 设为 -1,表示永久屏蔽。

改进后机制对攻击流量的处理过程如图 2 所示。

改进后机制可较好地解决以下问题:

(1)在入口检测处一旦检测到攻击流量,则立即将其源地址加入黑名单,防止了服务器受到持续的攻击,有效缓解了 DOS。

(2)根据来自源 IP 的攻击次数来判断源 IP 是否为恶意

攻击者,在拉黑的同时向源 IP 发出提醒,并且使用恢复服务 Timer 来进行流量控制,Timer 计时结束则将源 IP 从黑名单除去,恢复流量通过。该种做法,首先为被攻陷的机器恢复服务访问提供途径,并且提醒源 IP,让其摆脱控制。

(3)当攻击次数超过阈值的时候,则将源 IP 判断为恶意攻击者,永久加入黑名单,这样便杜绝了攻击者的再次攻击。

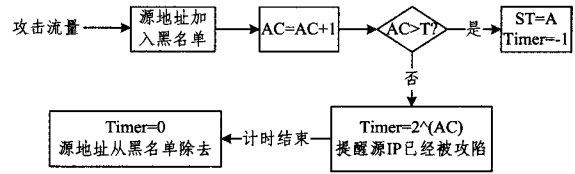


图 2 改进后机制对攻击流量的处理过程

### 3.4 讨论

本文给出的基于回溯的检测防范机制有两大核心功能。

首先是在整个网络中对攻击流量的特征进行回溯,并屏蔽攻击流量,缓解了网络资源消耗。该方法的优点是,可以在整个网络内减少攻击流量造成的带宽占用。

其次是通过攻击次数来判断源 IP 是否为恶意攻击者,同时提醒源 IP 已被攻陷,并且用 Timer 机制来恢复正常用户的网络访问。该方法的优点是,既兼顾了正常用户对网络服务的访问,又削弱了攻击者对傀儡机的控制。

**结束语** 针对 Web 上的应用层 DDOS 攻击的原理和种类进行了详细的介绍,分析了一些 DDOS 的检测和防范机制,并且结合现有的技术,设计了一种新的机制。新的机制旨在通过异常检测判断攻击流量,并且通过回溯屏蔽整个网络中的攻击流量,降低网络堵塞。改进之后的新机制还从客户端考虑,为用户脱离控制、恢复网络服务访问权限提供了途径。

### 参考文献

- [1] 肖军,张永铮,云晓春.一种应用层分布式拒绝服务攻击过滤方法及系统[P].中国,2011-05-25
- [2] Khamruddin M D, Rupa C. A Rule Based DDoS Detection and Mitigation[C]//Nirma University International Onfer Ence on Engineering,2012. India,2012
- [3] Kandula S,Katabi D,Jacob M,et al. Surviving Organized DDoS Attacks that Mimic Flash Crowds[C]//NSDI'05 Proceedings of the 2nd conference on Symposium on Networked Systems Design & Implementation. CA,USA:USENIX,Association Berkeley,2005
- [4] 谢逸,余顺争.基于 Web 用户浏览行为的统计异常检测[J].软件学报,2007,18(4):967-977
- [5] 赵国锋,喻守成,文晟.基于用户行为分析的应用层 DDOS 攻击检测方法[J].计算机应用研究,2011,28(2):717-719
- [6] 唐鹏,张自力.基于信息熵的多 Agent DDOS 攻击检测[J].计算机科学,2008,35(3):292-295

[J].石油与天然气地质,2010,31(2):244-249

- [11] 李元金,罗立民,张鹏程,等.基于校正靶特征与 Biharmonic 样条插值的 XRIT 图像扭曲校正[J].东南大学学报,2011,41(6):1213-1218
- [12] 董桦.基于 PSD 的激光位移检测中位移信号处理系统的研究[D].长春:长春理工大学,2010

(上接第 152 页)

- [8] 黄梅珍,林斌,唐九耀,等.不同阳极结构二维 PSD 的电流-位置输出特性[J].光电子·激光,2001,12(8):795-798
- [9] 黄传华,万晓明,吴魁.一种区域降水量网格算法[J].人民长江,2007,38(2):49-50
- [10] 夏吉庄.双调和样条内插方法在测井和地震资料整合中的应用