

文章编号: 0253-2239(2001)01-0044-05

一个具有自适应取阈功能的光电网络系统 及其性能分析*

郭鹏毅 申金媛 刘 珩 陈 成 张文伟 张延烁

(教育部光电信息技术科学重点实验室, 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 提出了用光电混合网络来完成自适应取阈功能的硬件实现方法。该网络系统能根据输入状态的不同, 通过网络单元间的相互竞争而达到对系统的阈值的自适应调整, 使阈值总是等于最大输入值而完成“胜者全取”(WTA)。该网络系统主要由非晶硅半导体 PIN 光电探测阵列和“胜者全取”电子网络组成。又由于系统完全采用并行处理方式, 因而具有响应速度快、灵敏度高、寻址能力强、结构简单和性能稳定等优点, 能方便有效地应用于自适应取阈、相关峰检测、联想存储等光电混合系统。对一个 36 个单元的网络进行了实验测试并对其性能进行了分析。

关键词: 自适应取阈; 神经网络; “胜者全取”电子网络

中图分类号: TP183 文献标识码: A

1 引 言

自适应取阈在神经网络中起着重要的作用。众所周知, 神经网络系统是一个高度复杂的非线性动力学系统, 而其中每个神经元的结构和功能却是十分简单的^[1]。可以把神经元的输出和输入看作是非线性函数关系:

$$y_i = f \left[\left[\sum_{j=1}^m w_{ij} x_j \right] - \theta_i \right],$$

式中 y_i 为第 i 个神经元的输出值, $\sum_{j=1}^m w_{ij} x_j$ 为输入 x_i 通过互连权重 w_{ij} 加权求和的结果, θ_i 是第 i 个神经元的阈值。由以上可以看出, 阈值 θ_i 在决定神经元输出状态上有重要的作用。在许多实际应用中, 阈值往往不是固定不变的, 而应随着输入状态的改变需要通过自学习进行调整, 如通过自适应取阈使得不论输入状态如何变化, 具有最大输入的那个神经元总能通过阈值而得到输出, 其余的神经元则都被阈值所抑制而输出为零。这种自适应取阈可广泛应用于人工神经网络和光学信息处理等方面, 如胜者全取模型^[2-4]、联想存储^[4]、最大优化问题^[5]和相关峰的检测等。

由于自适应取阈的广泛应用和光电技术的不断

发展, 人们在进行了早期的理论模型研究和计算机仿真模拟之后, 开始逐渐的走向硬件实现。如 Cichocki 等人^[5]用函数发生器、电压比较器和互补型金属-氧化物-半导体器件(CMOS)开关电路通过自适应取阈来实现胜者全取网络, 用于解决最大优化问题^[5], Timothy^[6,7]则用大规模集成电路/液晶(VLSI/LC)技术制成的空间光调制器完成自适应取阈功能, 还有 Pankive^[8]利用了光控 PNP 半导体器件的电流电压特性曲线实现自适应取阈。这些器件都是为实现大规模胜者全取自适应取阈而设计的, 而对于中小规模的自适应取阈, 它们存在一些缺点, 如结构复杂、成本高、不灵活, 有些还不易与光信号接口, 而对于大规模的神经网络实现, 只有将高度并行的光学技术和灵活成熟的电子技术融合起来, 充分利用它们各自的优点, 取长补短, 才最有希望。

本文提出一种适用于中小规模胜者全取自适应取阈的光电网络, 它由非晶硅的 PIN 光电探测阵列和胜者全取电子网络组成, 该系统结构简单、成本低, 既可与光信号接口, 也可用于电信号。系统完全采用并行处理方式, 可满足实时识别的要求。我们对一个具有 36 个单元的自适应胜者全取取阈系统进行了实验测试并对其特性进行了分析和研究, 结果表明这个自适应取阈网络系统不仅性能好而且稳定, 响应时间仅几十微秒, 能满足实时性要求, 其灵敏度较高, 最小可分辨电压可达 1 mV。

* 天津市二十一世纪青年基金资助课题。

收稿日期: 1999-06-14; 收到修改稿日期: 1999-09-27

2 自适应取阈网络模型及其光电实现

2.1 自适应取阈网络模型

自适应取阈是在动态竞争中实现的,其基本模型可用单层反馈网络来表示,如图 1 所示。它可以

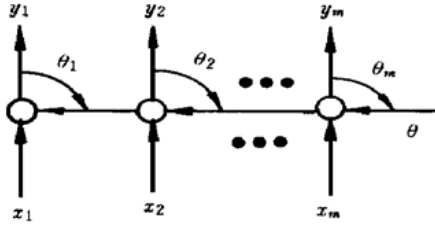


Fig. 1 Adaptive thresholding net model

从 \$M\$ 个神经元的初始状态出发,经过并行迭代给出最终的公共阈值,从而达到稳定的状态。\$\theta\$ 是公共反馈线上的阈值, \$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\$ 分别为各个神经元产生的阈值。每个神经元根据其输入的状态,都产生一个阈值,并由输出端把它送到公共反馈线来影响其他神经元的输出,使那些输入小于该阈值的神经元被抑制,输出为零,而其他的神经元有输出值。这样多个单元通过公共反馈线相连产生动态竞争,使阈值不断增大,直到最后,只有具有最大输入的那个神经元能越过阈值,给出输出,其他神经元输出皆为零。此网络模型具有高度并行性且互连数目少。本文中:

$$\theta = \max(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m),$$

$$\theta_i = x_i (i = 1, 2, \dots, m).$$

对于大多数自适应取阈网络,可有一个初始阈值,它根据输入的状态产生作用并影响竞争的结果。有些输入会受到初始阈值的制约而使自身输出得到抑制,退出竞争,有些则可以越过初始阈值而得到输出,并反馈回去参与系统竞争过程,最终使阈值达到稳定值,也获得了稳定的输出状态。本文所采用的自适应取阈网络系统是对应每一个输入 \$x_i\$ 都产生一个阈值 \$\theta_i\$, 通过 \$\theta_i\$ 之间的相互竞争,使阈值总是趋向于 \$\theta_i\$ 中最大者,最后达到稳定的公共阈值 \$\theta\$, 因而不需给系统设置初始阈值,系统完全根据输入状态来进行阈值的产生和自适应调整。

2.2 光电实现

除引言中提到的一些方法外,用于光电处理系统的自适应取阈网络一般有两种方法:一是采用 CCD 转换光信号,计算机完成胜者全取取阈。由于 CCD 的光敏面积小,需要将所采集的二维分布的光信号进行空间缩小,因此整个光电系统不能做得很小,而且 CCD 的像素多,计算机需要串行地将大量的数据进行采集并从中找出有用的信号,所以成为

影响光电信息系统处理速度的主要障碍之一,是系统实时处理信息的一个瓶颈所在。二是用独立的探测器排列成阵列转换光信号,用电路或计算机完成胜者全取取阈,它的主要缺点是各探测器不均匀而造成硬件误差,而且探测器的位置不能准确放置造成对准的困难。我们利用非晶硅镀膜和光刻技术设计了一个光电转换阵列,利用集成运放实现实时胜者全取电子取阈,两者组成一个具有自适应取阈功能的光电混合系统,如图 2 所示。

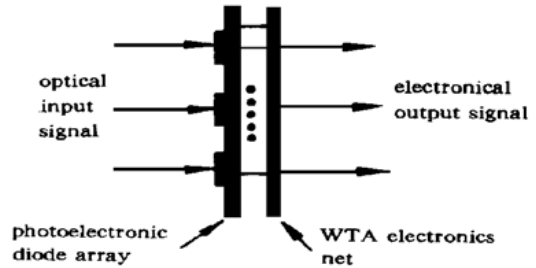


Fig. 2 Optoelectronic hybrid system of an adaptive thresholding

光电探测阵列把输入光信号转化为相应的电信号,然后输入到电子网络中完成自适应取阈并输出相应的电信号,当输入信号发生改变时,阈值可进行自适应调整而始终让最大输入的元素输出高电平,其余输出低电平。在自适应取阈网络后可接实际应用的电信号控制系统完成其他操作。该系统具有以下特点: 1) 探测器阵列暗电流小; 2) 由于每个探测器为“p 型硅-本征硅-n 型硅”结构(p-i-n),其反向特性优于普通的 pn 结构; 3) 组成网络的器件均匀性好; 4) 全并行处理数据; 5) 结构紧凑,简单易实现,既可用现有的运放实现中小规模的网络,也可利用超大规模集成电路技术实现大规模的胜者全取自适应取阈网络; 6) 使用灵活,探测器阵列和胜者全取电子网络二者既可以分别使用也可以联合使用,二者中间也可以插入其他电路联合使用。

胜者全取电子取阈网络原理如图 3 所示,由若干个相同的网络单元组成,图中虚线框内即为一个

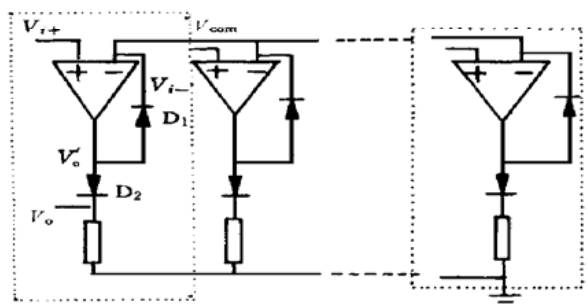


Fig. 3 Operational amplifier array

网络单元, 该网络根据多个输入值来确定公共阈值, 输入值改变时, 其公共阈值也相应的改变, 改变的结果总是使具有最大输入的网络单元才有输出。每个单元由一个运算放大器、两个开关二极管和一个输出电阻组成。输入信号由运算放大器的同相输入端输入, 输出端通过开关二极管 D_1 反馈到反相输入端, 所有单元的反相端都与公共馈线相连。用 V_{i+} 、 V_{i-} 、 V'_o 分别表示运放同相输入、反相输入和输出的电压信号。对于每个单元, 当 $V_{i+} \geq V_{i-}$ 时, D_1 导通, 此时运放作为电压跟随器,

$$V_{i-} = V_{i+}, \quad V'_o = V_{i-} + V_D = V_{i+} + V_D,$$

$$V_o = V'_o - V_D = V_{i+}.$$

V_D 为二极管的门限电压。当 $V_{i+} < V_{i-}$ 时, 输出为负电压, D_1 处于截止状态, 运算放大器开环工作,

$$V'_o = A_v (V_{i+} - V_{i-}),$$

A_v 为运放开环增益。 A_v 一般很大, 使输出为负饱和电压, 即 $V'_o = -V_c$ (V_c 为饱和电压), $V_o = 0$ 。由以上可知 V_{i-} 即作为阈值。把所有单元的反相端用公共馈线连接起来, 其上电压用 V_{com} 表示。各单元就是通过公共馈线进行相互影响、相互竞争的。由以上方程可知, $V_{i+} < V_{com}$ 时该单元被抑制, 不对 V_{com} 构成影响, 退出竞争。 $V_{i+} \geq V_{com}$ 时, 使 V_{com} 增大到 V_{i+} , 新的 V_{com} 将抑制所有输入小于 V_{i+} 的单元。这样在相互竞争中阈值 V_{com} 不断提高, 直到最后阈值等于最大输入, 达到稳定状态。此时最大输入单元对应输出 $V_o = V_{i+}$, 其余单元输出 $V_o = 0$ 。

这种自适应取阈网络系统理论上是很好的稳定性的。因为只要输入的状态一经确定, 每个单元就根据自身的输入产生相应的阈值, 去影响其他单元, 使输入小于该阈值的单元退出竞争, 而输入大于该阈值的单元得以继续参与竞争, 这样阈值在竞争中不断提升, 直到只剩下最大输入单元能通过阈值, 达到稳定状态。但是实际上系统的稳定性受输入的变化率和系统的灵敏度的约束。由于系统有一定的响应时间和竞争也需要一定的时间, 所以当输入的变化速度超出这个限制时, 竞争取阈就达不到稳定的状态或可能给出错误的结果。另外如果各输入之间的差别小于系统的灵敏度, 则竞争阈值不会收敛于稳定值, 输出也在不断的变化。

3 实验结果及分析

3.1 光电探测阵列

研究了 6×6 单元面积为 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的

$\alpha\text{Si:H p-i-n}$ 矩阵。该器件的暗电流很小, 为 10^{-12} A 量级, 光暗电导比达 5 个数量级, p 型硅-本征硅-n 型硅反向特性良好, 在正向由于串联了 $50 \text{ k}\Omega$ 的保护电阻, 所以正向电流受到钳位。

图 4 给出了暗态、100 lx、200 lx、300 lx 绿光照射下 p-i-n 矩阵 $I-V$ 特性曲线, 图 5 是反偏压为 V 时光电流 I 与光强 H 的变化关系曲线。由图 4 可以看出 p-i-n 矩阵的 $I-V$ 近似成线性变化。

图 5 表明光电流 I 随光强也近似地成线性变化, 曲线斜率 $K = 5 \times 10^{-10} \text{ A/lx}$ 。因而电压随光强单调变化且灵敏度较好。

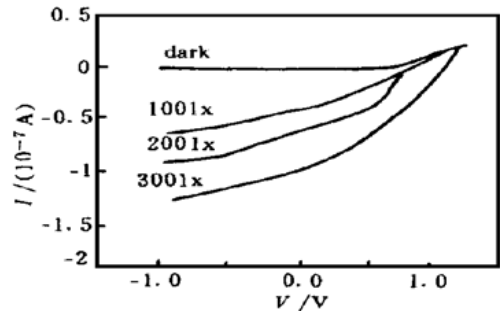


Fig. 4 $I-V$ characteristic curve of p-i-n array with different light intensity

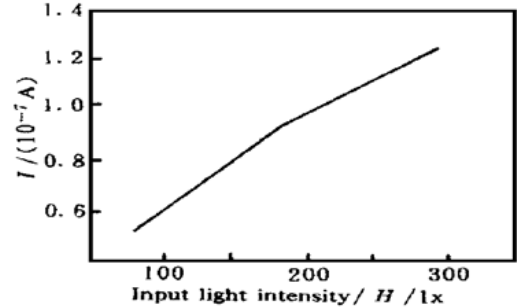


Fig. 5 Relationship of $I \sim H$

3.2 运算放大器阵列

连接具有 36 单元的运放网络, 分析其输入输出关系曲线。实验系统装置如图 6 所示。

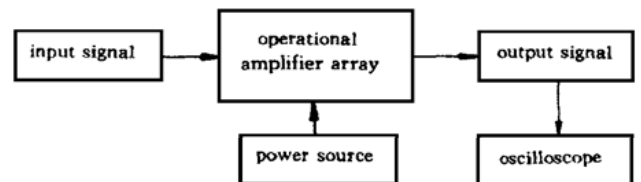


Fig. 6 Experimental setup

通过输入不同的信号给运放网络, 用示波器来测量其相应输出信号波形。为了测量方便, 采用了一简单输入模式, 提供 3 路输入信号。其中两路分别输入给两个单元, 另一路输入给其他所有的单元, 这并不影响一般性实验结果。示波器显示的输入、

输出波形如图 7 所示。图 7 中 (a) 为输入信号 (V_{i1} 、 V_{i2} 、 V_{i3}) 波形, (b) 为对应的输出 (V_{o1} 、 V_{o2} 、 V_{o3}) 波形。对波形的分析参考图 8。系统响应时间是一个重要的参数, 在实际应用中往往要求能够快速给出输出, 即具有实时性。理想情况下, $t_1 \sim t_2$ 时间内, V_{o1} 为一固定输出值, $V_{o2} = V_{o3} = 0$; $t_2 \sim t_3$ 时间内, V_{o2} 为一固定输出值, $V_{o1} = V_{o3} = 0$ 。但由于器件的非理想化, 当输入状态发生变化时, 输出状态不能立即发生变化, 而是有一定的上升时间(t_r) 和下降时间(t_f)。另外还发现 V_{o2} 有时间延迟(t_{d1} 、 t_{d2}), 这是由于 V_{o2} 是由 V_{i2} 和阈值 V_{com} 比较后产生的, 而 V_{com} 受 V_{o1} 反馈的作用, V_{o1} 又必须经过一定的上升时间和下降时间才能达到稳定值, 因而推迟了阈值 V_{com} 的到来时间, 导致了时间延迟。实验测得以上时间参数仅为几十微秒(图 8), 说明响应速度是非常快的, 能够满足实时性应用的要求。

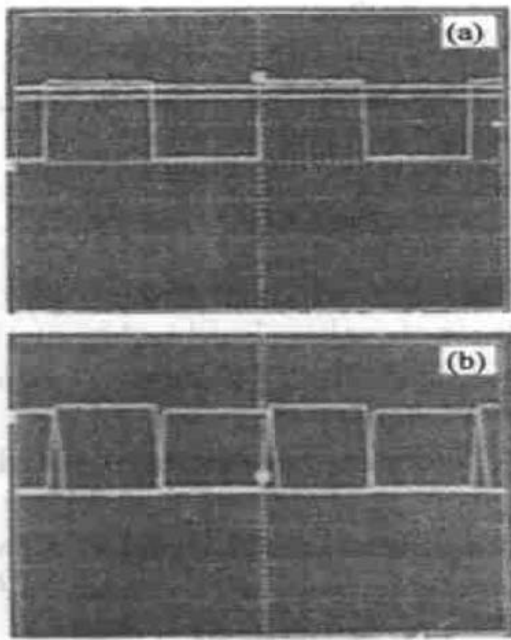


Fig. 7 (a) Waveforms of input signals; (b) Waveforms of output signals

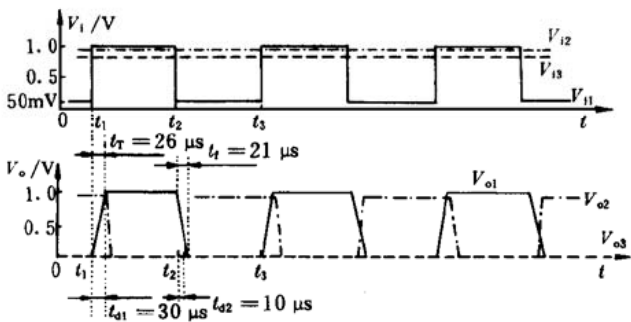


Fig. 8 Waveforms of input and output signals

表 1 列出了实验中测得的几组数据。由表中可以看出对于不同的输入状态 (V_{i1} 、 V_{i2} 、 V_{i3}), V_{com}

具有不同的值且总是自适应地调整在最大输入值附近, 因而完成了自适应取阈的功能, 得到了相应的输出 (V_{o1} 、 V_{o2} 、 V_{o3})。

Table 1 Experimental data of input, output and threshold

V_{i1}	V_{i2}	V_{i3}	V_{o1}	V_{o2}	V_{o3}	V_{com}
50mV	990mV	800mV	0	990mV	0	990mV
1V	997mV	840mV	1V	0	0	1V
1.2V	800mV	1.1V	1.19V	0	0	1.2V
390mV	650mV	410mV	10mV	646mV	0	650mV
750mV	730mV	1.3V	0	0	1.3V	1.3V
120mV	530mV	800mV	0	0	810mV	800mV

还研究了运放阵列的灵敏度。定义其灵敏度为最小可分辨的电压差 ΔV , 即能分辨的最大电压和次大电压差, ΔV 越小, 则灵敏度越高, 实验测的 ΔV 约为 1 mV。另外还分析了灵敏度和系统规模及输入电压值的关系, 并测得曲线如图 9 所示。图 9(a) 表示灵敏度与网络规模的关系, 图 9(b) 表示灵敏度与输入电压的关系。从图中可以看到 ΔV 随网络单元数 (N) 和输入电压 (V_i) 的改变而在 1 mV 上下变化, 这主要是由随机噪声和测量误差引起的。说明灵敏度基本上不受系统规模和输入值的影响。它取决于器件本身的分辨能力和各单元器件之间的性能均一性。

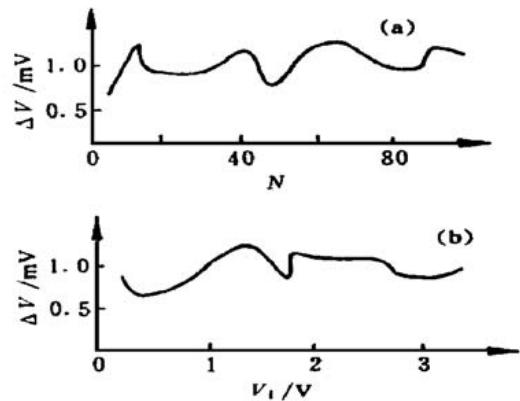


Fig. 9 (a) Relationship of sensitivity and net size; (b) Relationship of sensitivity and input volt

结论 本文根据自适应取阈网络的理论模型, 提出了一种基于并行处理方式的光电混合实现方法。根据该方法建立的硬件系统结合了光、电各自的优点, 因而具有迭代速度快、灵敏度高及性能稳定和精确性好等特点。这种系统结构简单, 可根据实际的需要增大或减小网络规模, 并且系统中的光、电

部分既可以联合起来使用,以便和光信号接口,也可以分开单独使用,直接和电信号接口。经过理论分析和实验证明,这种光电混合的方法是确实可行的,可以使它应用于神经网络中的胜者全取网络、联合存储、优化决策和光学信息处理中的相关峰的检测等方面。为了使系统的性能进一步得到提高,还需改善器件的特性和优化网络结构。另外,若能专门为本系统集成化,则不仅可以获得更好的性能,还会使系统的体积进一步减小。

参 考 文 献

- [1] 胡守仁,余少波,戴葵著.神经网络导论.长沙:国防科技大学出版社,1993. 1
- [2] 张延焯等.三种WTA神经网络模型的模拟与分析.模拟识别与人工智能,1992, 5(1): 1~ 7
- [3] 丁铁英,徐军,申金媛等.光电混合实现全双极WAT模型的新方法.光学学报,1995, 15(10): 1413~ 1417
- [4] 申金媛,常胜江,张延焯等.基于联想存储级联WAT模型的旋转不变识别.光学学报,1997, 17(10): 1352~ 1356
- [5] Cichocki A, Unbehaven R. Winner-take-all neural networks and its application to minimax optimisation problems. *Electron. Lett.*, 1991, 27(22): 2026~ 2028
- [6] Slagle T M, Wagner K. Winner-take-all spatial light modulator. *Opt. Lett.*, 1992, 17(16): 1164~ 1166
- [7] Wagner K, Slagle T M. Optical competitive learning with VLSI/liquid crystal winner-take-all modulators. *Appl. Opt.*, 1993, 32(8): 1408~ 1413
- [8] Pankove J, Radehaus C, Wagner K. Winner-take-all neural net with memory. *Electron. Lett.*, 1990, 26(6): 249~ 251

An Opto-Electrical Network with Ability of Adaptive Thresholding and Its Performance Analysis

Guo Pengyi Shen Jinyuan Liu Yue Chen Shu Zhang Wenwei Zhang Yanxin
 (Opto-Electronic Information Technical Science Lab., MOE., China
 Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)
 (Received 14 June 1999; revised 27 September 1999)

Abstract: A new opto-electrical network with the function of adaptive thresholding is proposed. According to the input modes, it can adaptively adjust the threshold value of the system through competition among the net units. As a result, the threshold is always equal to the maximum input. So the function of WAT (winner-take-all) is achieved. The system is mainly composed of α -Si PIN photo-electrical detector and WTA electrical network. With parallel processing, it permits rapid response, high sensitivity, better addressing capability, simpler structure and stable performance, etc. It can be conveniently applied to opto-electrical systems such as adaptive thresholding, correlation peak detecting and associative memory. A specific network with 36 units is analyzed and the experiment results are presented.

Key words: adaptive thresholding; neural network; winner-take-all electrical network