

基于模式侧抑制复杂背景下的小目标检测*

王岳环,陈妍,程胜莲,张天序

(华中科技大学 图像识别与人工智能研究所

图像信息处理与智能控制国家教育部重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:在复杂背景的图像序列中检测小目标一直是研究重点。提出了一种基于模式侧抑制的复杂背景下小目标检测的方法。将复杂背景下的小目标检测问题看作是在大量相似模式中寻找某个特殊模式的模式识别问题。通过建立基于模式的侧抑制网络模型,在模式空间中对模式进行侧抑制处理,达到突出特殊模式抑制相似模式的目的。同时指出,用该方法对图像进行多级处理可进一步改善处理效果。进行了该方法与去局部均值滤波、基于形态学 Top-Hat 算子滤波、多级滤波和基于侧抑制理论滤波四种传统方法的比较实验,并将信杂比(SCR)及信杂比增益作为评价算法性能的指标。实验结果表明,提出的方法在提高图像信杂比方面要优于其他几种方法,能有效抑制背景杂波,提高对目标的单帧检测能力。

关键词:小目标检测; 复杂背景; 模式侧抑

中图分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1007-2276(2005)06-0703-06

Small target detection in clutter based on pattern lateral inhibition*

WANG Yue-huan, CHEN Yan, CHENG Sheng-lian, ZHANG Tian-xu

(Key Laboratory of State Education Commission for Image Processing and Intelligent Control, Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: It is an important task to detect the small targets in a sequence of images against complex background. An algorithm of small target detection based on pattern lateral inhibition is proposed. Small target detection in complex background is considered as a problem of finding the special patterns in similar patterns. The special patterns are enhanced with the Lateral Inhibition network. At the same time, multi-level processing is presented to improve treatment effects. The performances of several traditional filters and the method in this paper are compared. Two definitions of SCR and SCR gain are defined to evaluate the performance of the approach. Experimental results show that the approach proposed is effective in detecting the small targets in clutter.

收稿日期:2005-04-20; 修订日期:2005-06-16

* 基金项目:国家自然科学基金重点项目(60135020);国防预研基金项目(51401020203JW0501)

作者简介:王岳环(1972-),男,湖北罗田人,博士,主要研究领域是图像分析、计算机主动视觉、精确制导技术、高性能 DSP 系统和智能仪器等。

Key words: Small target detection; Clutter; Pattern lateral inhibition

0 引言

所谓小目标,是指当成像系统和目标的相对位置较远时,目标在成像平面内仅表现为一到几十个像素面积。由于小目标没有形状和结构特征或不明显,检测起来极为困难,特别是在复杂背景下,极易被杂波所淹没。对于复杂背景下的小目标检测,寻求一种有效的抑制背景杂波的方法,将有助于提高检测性能。

目前的小目标检测系统一般由两个功能模块组成:一是背景抑制模块,通过对单帧图像的处理,达到抑制背景起伏,增加目标可检测性的目的;二是目标检测模块,通过对序列图像的处理,进一步剔除高频噪声干扰,最终实现对场景中存在的运动小目标的有效检测。二者中,背景抑制模块是前提,是后面目标检测模块的有利保障;而目标检测模块是关键,是检测性能的直接体现。本文针对复杂背景下运动小目标检测任务,对背景抑制这个主题展开讨论和研究。

以往关于复杂背景下小目标检测任务中的背景抑制问题的研究,主要提出了灰度变换和图像滤波两类方法。灰度变换方法中主要有直接灰度变换和直方图变换两种方法,它们运用灰度点运算来增加图像灰度的动态范围,从而增加了图像对比度。由于该方法对图像的处理是直接针对像素灰度的,而不对背景和目标加以区分,当目标灰度范围与整个背景灰度范围存在大的重叠时,相同的灰度级得到相同的处理,导致目标被增强的同时,背景也得到增强。此种情况下采用图像滤波的方法通常可以解决问题^[1-3]。图像滤波方法是从图像灰度空间分布角度考虑问题而提出的又一类方法。其中,多级滤波方法^[4,5],基于侧抑制理论的方法^[6]和基于背景预估的方法是几种比较典型的方法。多级滤波的方法基于背景在低频部分占有较大的比例,目标在中频而噪声在高频部分占有较大的比例的假设,是一种实际意义上的带通滤波器。背景预估的方法则基于背景在局部区域不会存在较大起伏的假设来对背景进行估计,再用原图减去背景预估结果,则结果图中只剩下目标。基于侧抑制理论的方法实质上是一空间频率的高通滤波器,其作用是增

强图像反差。

传统方法中,根据对图像中目标和背景特性的分析,对满足目标某些特性的区域加以突出。灰度变换方法从目标和背景的灰度差别上考虑问题,通过一定的变换来突出灰度值处于一定灰度范围的像素,图像滤波方法从灰度空间分布考虑问题,对处于一定频率范围的像素加以增强。在复杂背景条件下,由于背景杂波的大量存在,使得目标的灰度范围和频率范围往往存在重叠,因而用上述方法对图像进行处理后,可将图像中满足目标特性的区域突出,而这些区域中极有可能包含大量的背景杂波,还需要通过其他方法对真实目标作进一步的确定。

如果能在背景抑制阶段对背景进行有效的抑制,则无疑将减轻后续处理的负担,即在背景抑制阶段不仅要将在图像中的特殊区域突现出来,还要将其中可能的目标区域找出来。将二维灰度图像投影到三维空间,则图像表现为三维空间的一系列互相嵌套的波峰和波谷,在背景区域,由于背景之间的强相关性,各波峰波谷对应的峰值和谷值的变化缓慢,而目标在其所在区域表现为一个峰值突出的波峰。将灰度局部起伏的峰值作为模式,则可将复杂背景下的小目标检测问题描述为在大量相似模式中寻找某个特殊模式的模式识别问题,其中的背景抑制模块则要完成抑制大量相似模式突出特殊模式的任务。受传统的基于像素的侧抑制滤波方法启发,将图像投影到模式空间,建立相应的侧抑制网络模型,提出一种基于模式侧抑制的方法。为了更加充分地说明本文方法的性能,将本文方法与已经提出的一些方法进行比较实验,并将信杂比及信杂比增益作为评价算法性能的指标。实验结果表明,与其他方法相比,本文方法在强的背景杂波干扰下,可以较好地抑制背景,尤其在提高图像信杂比方面表现出较好的性能。

1 模式侧抑制在复杂背景下小目标检测中的应用实现

为了达到从大量相似模式中突出特殊模式的目的

的,提出了一种基于模式侧抑制的方法。与传统的基于像素的侧抑制方法不同,本文方法首先将图像投影到以局部灰度峰值描述的模式空间,然后在该空间内做针对模式的侧抑制处理,对大量相似模式进行抑制,对其中的特殊模式加以突出。

1.1 模式侧抑制

侧抑制是 Hartline 等人在对鲎视觉进行电生理实验时发现并证实的。将鲎复眼中的每一个小眼看作一个感受器,他们发现一个感受器周围邻近的感受器对其有抑制性作用,并且这种抑制性影响存在空间总和效应。同时发现,距某一感受器较近的感受器对它的抑制作用要比远一些的感受器的作用强^[7],侧抑制网络本身实际上是一种衰减低频响应的高通滤波器,因此人们利用侧抑制网络增强图像反差、检测图像边框^[8-10]。

与传统的基于像素的侧抑制滤波方法不同的是,模式侧抑制是将侧抑制应用于模式空间,通过建立基于模式的侧抑制网络模型,将对应于低频响应的大量相似模式进行衰减,对应于高频响应的特殊模式进行增强。建立的基于模式的侧抑制网络模型如下:

$$f'(x,y)=f(x,y) \sum_{u=startu}^{endu} \sum_{v=startv}^{endv} (M(u,v,x,y)-\overline{m(u,v,x,y)})^2 \quad (1)$$

式中 $f(x,y)$ 为图像中坐标为 (x,y) 处的像素灰度值,它是侧抑制网络的输入; $f'(x,y)$ 为其对应的网络输出; $startu,startv,endu,endv$ 分别为由像素 $f(x,y)$ 所决定的邻域的起止位置; $M(u,v,x,y)$ 为像素 $f(x,y)$ 邻域内坐标为 (u,v) 的像素所在局部区域中所有波峰峰值的最大值,它代表了一个可能的特殊模式; $\overline{m(u,v,x,y)}$ 为 $f(x,y)$ 邻域内坐标为 (u,v) 的像素所在局部区域中除 $M(u,v)$ 外的所有波峰峰值的平均值,它代表了大量相似模式的均值。当图像局部区域所包含的均为相似模式时,则经过侧抑制作用后这些相似模式互相之间被抑制掉;当图像局部区域包含有特殊模式时,则经过侧抑制作用后该特殊模式被增强。

1.2 采用多级方法改善处理效果

如果在模式空间来考虑问题,则本文方法可理解为一个模式空间内的高通滤波器。它首先将图像投影到由灰度峰值决定的模式空间,再在该空间内做一个

针对模式的高通滤波。对于高通滤波,如果两个高通滤波器连接起来,和单个的高通滤波器比较,总的频谱收缩了。这意味着,将两个高通滤波器连接起来,得到的新的高通滤波器比原来的高通滤波器的带宽要窄。因此,可以首先用一个带宽较宽的高通滤波器,不断叠加,直到带宽合适为止。

在对图像进行处理的过程中,随着处理级数的增加,对应于大量相似模式的背景被抑制,背景区域像素的灰度分布越来越均匀,对应的灰度梯度能量函数值也越来越小。文中将背景区域灰度梯度能量函数值的减小率作为多级处理停止的判决依据,即当该减小率大于给定多级处理停止判决门限时多级处理结束,大量实验表明门限取为 0.9 时能得到较理想的结果。对于复杂背景下的小目标检测,由于小目标只占据了图像一小部分,对整幅图像的灰度统计特性影响不大,可以用整幅图像的灰度梯度能量函数值来近似背景区域的灰度梯度能量函数值。图像灰度梯度能量函数定义为:

$$T=\sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \sqrt{f_x^2(x,y)+f_y^2(x,y)} \quad (2)$$

式中 N_x 和 N_y 分别为图像的行数和列数; $f_x(x,y)$ 和 $f_y(x,y)$ 分别定义为 $f(x,y)$ 与 K_x 和 K_y 的卷积。

K_x 和 K_y 分别定义为:

$$K_x=\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad K_y=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

第 n 级处理后灰度梯度能量函数值的减小率 $R(n)$ 定义为:

$$R(n)=\frac{T_0-T_n}{T_0} \quad (4)$$

式中 T_0 为原始图像的熵; T_n 为原始图像经 n 级处理后的结果图的熵。假设给定的处理停止判决门限为 Th ,则多级处理的流程如图 1 所示。

2 实验结果及其分析

对含有弱小斑状目标,且具有一定程度背景杂波

干扰的红外图像进行实验, 图像大小为 128×128, 目标大小约为 30 个像素左右。

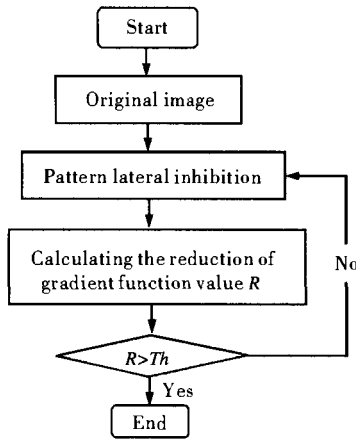


图 1 多级处理流程

Fig.1 Multi-level processing flow

2.1 背景抑制方法比较实验

如前所述, 针对复杂环境小目标检测中的背景抑制问题目前已提出了多种方法, 以下将在实际应用中较为有效的几种方法与本文方法进行比较。图 2 (a) 为一幅大小为 128×128, 以海面为背景的红外图像, 图像中有较强的海杂波起伏, 目标大小约为 5×5, 灰度为 151, 图像灰度均值 146, 图像信杂比 1.08891。图 2 (b)~(e) 分别为使用去局部均值滤波, 基于形态学 Top-Hat 算子的方法^[11], 多级滤波, 基于侧抑制理论的方法和基于模式侧抑制的方法对图 2(a) 进行预处理后的结果图像。

从图 2 可以看出, 几种方法的处理结果中, 目标在其局部背景中均被突现出来。其中, 基于形态学 Top-Hat 算子的方法和基于侧抑制理论的方法由于本质上均为高通滤波方法, 在目标被增强的同时, 背景杂波也得到增强, 背景没有得到好的抑制。去局部均值方法和多级滤波方法中, 在目标被增强的同时, 背景也得到抑制, 但背景杂波起伏仍很明显。基于模式侧抑制的方法中, 不仅使得目标增强, 而且整个背景区域也得到了很好的抑制, 较之去局部均值方法和多级滤波方法背景杂波起伏要小许多。

2.2 多级模式侧抑制性能测试

在实验过程中发现, 用本文方法对图像处理一次后, 一些很强的背景杂波也会得到增强, 同时, 被增强的

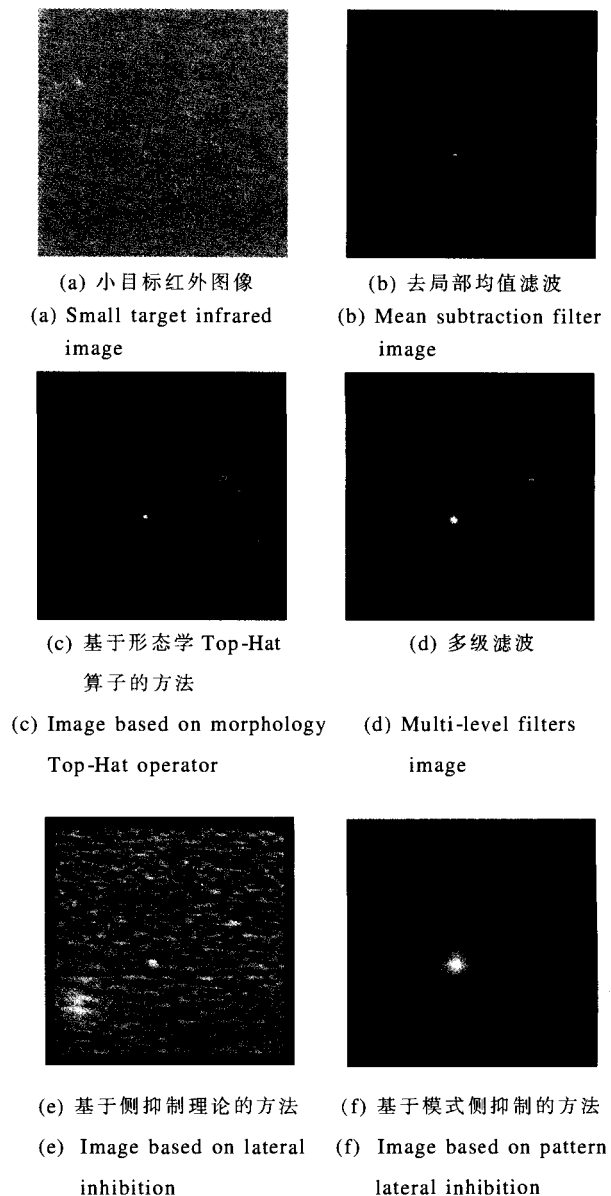


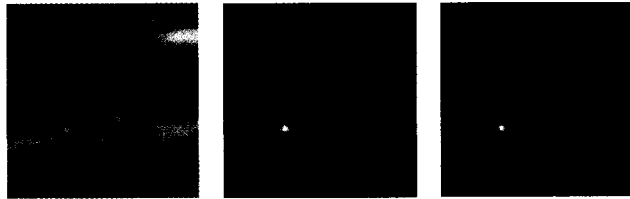
图 2 输入原图像及处理后图像

Fig.2 Original image and results

背景区域, 仍存在较大的相关性, 还有进一步处理的可能。以下对两幅真实的红外图像序列进行实验, 多级处理的停止判决门限为 Th 取 0.9。图 3(a) 为一幅大小为 128×128, 以天空为背景的红外图像, 图像中有云层起伏, 目标大小为 6×6, 灰度为 109, 图像灰度均值为 95, 图像信杂比为 1.41018。

实验结果表明, 对图 3(a) 和图 4(a) 中的两幅图像进行两级处理后其图像熵的变化率就超过了 T , 即对它们进行两级处理就达到要求。从各级处理的结果图来看, 用本文方法对图 3(a) 中的原始图像经过一级处理后一些较强的背景杂波干扰同样存在, 而经过两级

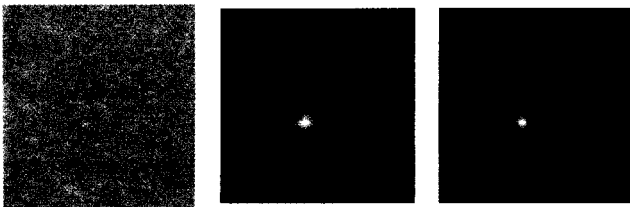
处理后,整个背景基本都被抑制掉了。图4(a)为图2中的原始红外图像,同样经过两级处理后得到了较理想的结果。



(a) 小目标红外图像 (a) Small target infrared image
(b) 一级处理结果 (b) First-level result
(c) 二级处理结果 (c) Second-level result

图3 多级处理效果图

Fig.3 Results of multi-level processing



(a) 小目标红外图像 (a) Small target infrared image
(b) 一级处理结果 (b) First-level result
(c) 二级处理结果 (c) Second-level result

图4 多级处理效果图

Fig.4 Results of multi-level processing

2.3 评价准则

在复杂环境下的小目标检测中,对图像进行预处理的目的是要增强目标,同时抑制背景,即要求预处理后图像的信号与杂波比(SCR)有显著提高。因而,预处理前后信杂比的改善程度是算法性能优劣的一个直接体现。文中采用如下定义的信杂比指标对算法性能进行比较,定义如下几个参量:

(1) 信杂比

$$SCR = \frac{g_0 - \bar{g}}{\delta} \quad (5)$$

式中 g_0 为目标灰度; \bar{g} 为图像灰度均值; δ 为均方差。图像均值和方差都以目标为中心的 64×64 像素计算。

(2) 信杂比增益

$$G_{SCR} = \frac{SCR_o}{SCR_i} \quad (6)$$

式中 SCR_i 为原输入图像的信杂比; SCR_o 为处理后输出图像的信杂比。信杂比增益,亦即信杂比改善因子,它反映了处理前后图像的信杂比改善情况。

按照上述评价准则,将以上图2~图4中各图像对应的评价结果列入表1~表3。

表1 图2中各图像评价结果

Tab.1 Evaluation results of Fig.2

Parameter	Fig.2 (a)	Fig.2 (b)	Fig.2 (c)	Fig.2 (d)	Fig.2 (e)	Fig.2 (f)
SCR	1.08891	1.58663	1.84552	3.33731	1.39445	5.61867
G_{SCR}	1	1.45708	1.69483	3.06482	1.28059	5.15990

表2 图3中各图像评价结果

Tab.2 Evaluation results of Fig.3

Parameter	Fig.3(a)	Fig.3(b)	Fig.3(c)
SCR	1.73809	7.67693	15.6371
G_{SCR}	1	4.41688	8.99671

表3 图4中各图像评价结果

Tab.3 Evaluation results of Fig.4

Parameter	Fig.4(a)	Fig.4(b)	Fig.4(c)
SCR	1.08891	5.61867	6.60921
G_{SCR}	1	5.15990	6.06956

从表1可以看出,与其他几种方法相比,本文方法在提高图像信杂比方面表现出良好的性能。从表2和表3所给出的图像评价结果可以看出,经过两级处理后图像的信杂比有进一步的提高。

3 结论

本文提出一种用于复杂环境下小目标检测的基于模式侧抑制方法。实验结果表明,该方法在有效增强目标的同时,又能对复杂背景进行很好的抑制。通过与其他方法的比较实验表明,该方法能有效提高强杂波背景下图像的信杂比,从而有利于小目标检测。

在算法运行速度方面,本文提出的方法与其他方法比较虽然多出一个模式提取的过程,但后续运算是针对模式进行的,是一个在降分辨率后的图像中进行处理的过程,运算量比针对像素的方法要低。另一方面,大量实验结果表明,使用本文提出的方法,通常经过两级处理即可得到满意的效果,因而该方法在运算速度上与其他方法接近。在进一步的工作中,将研究采用更复杂的模式定义,并将本文的方法应用于更复杂的目标检测任务,如自然场景中的目标检测。

参考文献:

- [1] YANG Wei-ping, SHEN Zhen-kang. Small target detection and preprocessing technology in infrared image sequences [J]. *Infrared and Laser Engineering* (杨卫平, 沈振康. 红外图像序列小目标检测预处理技术. *红外与激光工程*), 1998, 27(1): 23-28.
- [2] SUN De-bao, ZHOU Wei-xiang. Study of preprocessing algorithm of small moving target detection in infrared image sequences [J]. *Infrared and Laser Engineering* (孙德宝, 周卫祥. 红外图像序列运动小目标的预处理算法研究. *红外与激光工程*), 2000, 29(2): 12-14.
- [3] WU Wei, PENG Jia-xiong. Algorithm of infrared background suppression and small target detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(2): 148-152.
- [4] ZHANG Tian-xu, ZUO Zheng-rong. Detection of sea surface small targets in infrared images based on multilevel filter and minimum risk bayes test [J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2000, 14(7): 907-918.
- [5] ZHANG Cong, ZHANG Tian-xu. Research on detection and recognition method of moving targets [J]. *Infrared and Laser Engineering* (张聪, 张天序. 运动目标检测与识别方法研究. *红外与激光工程*), 2004, 33(2): 164-168.
- [6] CHEN Hui, OUYANG Kai. Simulation comparison of lateral inhibition models in image enhancement [J]. *Journal of System Simulation* (陈卉, 欧阳楷. 用于图像增强的侧抑制网络模型的仿真比较. *系统仿真学报*), 2003, 15(1): 100-103.
- [7] GU Fan-ji, WANG Yun-jiu. *Information Processing in Lateral Inhibition Network* [M]. Beijing: Science Press (顾凡及, 汪云九. 侧抑制网络中的信息处理. 北京: 科学出版社), 1983. 12-32.
- [8] ZHANG Yong-ping, ZHENG Nan-ning, ZHAO Rong-chun. An algorithm of image edge detection based on visual model [J]. *Acta Electronica Sinica* (张永平, 郑南宁, 赵蓉椿. 基于视觉模型的图像边缘检测算法. *电子学报*), 2000, 28(1): 101-103.
- [9] ZHANG Yong-ping, ZHENG Nan-ning, LEI Ya-li. A model of visual system with lateral inhibition mechanism and its application to image edge detection [J]. *Acta Electronica Sinica* (张永平, 郑南宁, 雷雅莉. 具有侧抑制机制的视觉系统模型及在图像边缘提取中的应用. *电子学报*), 1998, 26(8): 99-116.
- [10] FENG Xiao-yi, LIU Shi-bin. Edge enhancement based on a multi-resolution lateral inhibition network [J]. *Computing Technology and Automation* (冯晓毅, 刘诗斌. 图像边缘增强的多分辨率侧抑制网络方法. *计算技术与自动化*), 2003, 22(2): 97-99.
- [11] YE Bin, PENG Jia-xiong. Small target detection method based on morphology Top-Hat operator [J]. *Journal of Image and Graphics* (叶斌, 彭嘉雄. 基于形态学 Hop-Tat 算子的小目标检测方法. *中国图像图形学报*), 2002, 9(7): 638-642.

《湖北航天科技》《江南航天科技》征订启事

《湖北航天科技》由中国航天科工集团所属中国三江航天集团主办,以服务航天科研、突出地地战术导弹技术研究、交流科技成果为宗旨,为广大航天科技工作者提供学术技术交流的平台。1985年创刊,双月刊,内部发行,登记号为:鄂内资准印证第2103号。投稿与交换刊物,请与湖北武汉市长青路45号航天大厦联系(430023),电话:(027)83562127, E-mail: cssg@mail.cssg.com.cn

《江南航天科技》由中国航天科工集团所属中国江南航天工业集团公司主办,1975年创刊,季刊,系内部刊物。贵州内报刊登号:第07-K078号。投稿与交换刊物,请与贵州省遵义市北京路36号(563003)联系,电话:(0852)8611282。