

文章编号: 0258-7025(2010)06-1520-05

采用混合控制器稳定超荧光光源的输出功率

杨九如 叶红安* 柳春郁

(黑龙江大学黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室, 黑龙江, 哈尔滨 150080)

摘要 抽运源功率漂移与放大自发辐射(ASE)噪声是导致超荧光光源(SFS)输出功率起伏的主要因素。为了实现 SFS 功率的稳恒输出,设计了一种新颖的数字模糊控制与模拟比例控制相结合的混合控制器。由于混合控制器对系统内的高频/低频噪声均能够有效抑制,因此 SFS 输出功率的稳定性得到显著提高。实验结果表明,SFS 输出功率的短期稳定度达到 $\pm 0.032\%$ (± 0.0014 dB),长期稳定度达到 $\pm 0.041\%$ (± 0.0018 dB)。

关键词 激光技术;超荧光光源;功率稳定;混合控制器;放大自发辐射

中图分类号 TN 248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1520

Stabilize the Output Power of Superfluorescent Source by Using Hybrid Controller

Yang Jiuru Ye Hong'an Liu Chunyu

(Key Laboratory of Electronics Engineering, College of Heilongjiang Province, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract The power drift of pump source and amplified spontaneous emission(ASE) noise are the main factors that result in the fluctuation of output power of superfluorescent fiber source(SFS). In order to obtain a stable output power of the SFS, a novel hybrid controller is designed, which combines the digital fuzzy control with the analog proportional control. Because both the high and low frequency noises can be constrained by the hybrid controller efficiently, the stability of output power of the SFS is clearly improved. The experimental results show that, with the hybrid controller, the short-term stability of output power of the SFS is $\pm 0.032\%$ (± 0.0014 dB), and the long-term stability of that is $\pm 0.041\%$ (± 0.0018 dB).

Key words laser technique; superfluorescent source; stabilizing output power; hybrid controller; amplified spontaneous emission

1 引言

基于放大自发辐射(ASE)的光纤超荧光光源(SFS)具有高稳定性、高功率输出特性、低时间相干性等特点,已在光纤传感、光学精密测量、光纤通信等诸多领域中得到广泛应用^[1~6]。在有关超荧光宽带光源输出特性的理论及实验研究中,功率输出特性是人们一直关注的焦点。采用数字比例-积分-微分(PID)控制器稳定 SFS 输出功率是常见的方法,但所报道的实验结果却难以令人满意^[7~10]。研究表明,抽运源的功率漂移和光纤内部的 ASE 噪声是 SFS 系统内的主要噪声源^[11~13]。其中电流漂移、温升、老化等是导致抽运源功率漂移的主要因素,它们属于低频噪声;

而源于光量子随机自发辐射的 ASE 噪声则视为高频噪声。因此,若要获得稳定的功率输出,需同时对宽带光源的高频/低频噪声进行压缩^[14]。本文提出一种新颖的采用数-模混合的功率控制方案,通过主动稳定抽运源的方式实现 SFS 的功率稳恒输出。数字单元采用二维模糊控制器,对光源功率的长期漂移进行抑制;模拟单元由比例控制器实现,实时监控光源功率的快速涨落。

2 控制系统与控制原理

如图 1 所示的实验装置由光源系统与闭环控制系统两部分构成。光源系统采用单程前向抽运结

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-07

基金项目: 黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室杰出青年基金(DZZD201003)资助课题。

作者简介: 杨九如(1978—),男,博士,副教授,主要从事激光技术与光纤传感方面的研究。E-mail: totti9555@163.com

* 通信联系人。E-mail: yehongan@hlju.edu.cn

构,主要包括抽运源(980 nm LD)、波分复用器(980/1550 WDM)、掺铒光纤(EDF),隔离器等元件。控制系统则通过耦合器 C 与光源系统连接,并将采样光信号经光电转换、差分放大后送入到混合控制器中,判断光信号的功率起伏状态,最后以电信号的形式输出误差控制量,实现对 SFS 输出功率的闭环稳恒控制。设光源的初始额定功率为 P_0 , 功率变化为 ΔP , 则相应的输出功率应为 $P_{\text{out}} = P_0 + \Delta P$ 。于是,光功率控制系统的输出特性可以描述为

$$P_{\text{out}} = P_0 - Kg \mathcal{R}mP_{\text{out}}, \quad (1)$$

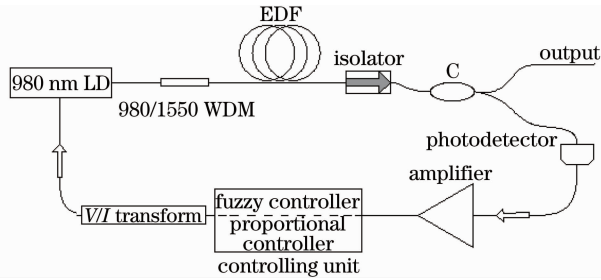


图 1 SFS 功率控制系统

Fig. 1 Power-controlling system of the SFS

式中 \mathcal{R} 为光电探测器的响应度, g 为探测器的增益, m 为耦合器的分束比, K 为控制器的控制因子。由于混合控制器包含数字控制单元与模拟控制单元两部分,所以因子 K 可以表示为数字单元控制因子 k_1 与模拟单元控制因子 k_2 的线性组合,即 $K = k_1 + k_2$ 。

2.1 数字控制单元

数字控制单元采用基于最大隶属度原则的单变量二维模糊逻辑控制器^[15]。设采样信号为 u_i , 系统基准信号为 u_0 , 则得到 i 时刻的误差 $e_i = u_i - u_0$ 与误差变化量 $\Delta e_i = e_i - e_{i-1}$ 。进而,控制器将 e_i 和 Δe_i 分别量化为模糊输入量“误差 E ”和“误差变化量 EC ”,并根据模糊控制表输出对应的模糊控制量 k_1 (见表 1)。最后,经数/模转换输出控制量到抽运源中,补偿 SFS 光源的功率漂移。对应模糊变量的论域为: $E\{\text{NB(负大)、NS(负小)、O(零)、PS(正小)、PB(正大)}\}$, $EC\{\text{NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、PZ(正零)、NZ(负零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)}\}$, $k_1\{\text{NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、O(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)}\}$ 。

表 1 模糊控制表

Table 1 Fuzzy control table

E	EC							
	NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
k_1								
NB	PB	PB	PM	PM	PM	PM	O	O
NS	PB	PM	PS	PS	PS	O	NS	NM
O	PM	PM	PS	O	O	NL	NM	NM
PS	PM	PM	O	NS	NS	NM	NB	NB
PB	O	O	NM	NM	NM	NB	NB	NB

2.2 模拟控制单元

数字控制虽然具有稳定性好、灵活度高的优点,但受限于模/数和数/模转换器件的分辨率,其控制精度亦会受到一定的限制。设最小控制精度为 Δ_{min} , 则当误差 $e_i < \Delta_{\text{min}}$ 时,模糊控制器将无法识别该时刻的光功率起伏,输出 $k_1 = 0$ 。而且,数字单元相对较长的控制周期也使得其难以对光源内部的高频 ASE 噪声进行有效抑制。为了弥补不足,模拟控制单元被引入系统中来进一步提高控制精度。于是,当系统处于稳态时($k_1 = 0$), (1)式可改写为

$$P_{\text{out}} = P_0 - k_2 g \mathcal{R}mP_{\text{out}}, \quad (2)$$

对(2)式微分,得到稳态时光源的输出功率变化

$$\Delta P = -k_2 g \mathcal{R}m \Delta P, \quad (3)$$

亦即

$$k_2 = -\frac{1}{g \mathcal{R}m}. \quad (4)$$

显然, k_2 的取值由控制方法决定。模拟 PID 控制是

非常成熟、有效的控制技术。然而在实际处理高频干扰信号时,模拟微分控制常会引起系统的振荡,而模拟积分控制也易产生积分饱和,使得整个控制系统面临崩溃。因此,为了保证控制系统的整体稳定性与可靠性,在模拟控制单元中仅使用了比例控制器,直接根据误差信号的大小对光源输出功率进行反馈补偿。设比例控制器的放大因子为 A , 光功率起伏所引起的误差为 $\Delta u = g \mathcal{R}m \Delta P$, 且光源在阈值以上的工作区域存在 $\Delta P = \eta \Delta I = \eta \Delta u / r$, 其中 η 为 SFS 的斜率效率, r 为匹配电阻。与(2)~(4)式联立,得到 $k_2 = A \eta / r$ 。于是,对应比例控制器的放大因子为

$$A = -\frac{r}{g \mathcal{R}m \eta}. \quad (5)$$

3 实验研究与测试结果

实验选用上海 DARE 公司出品的 980 nm 半导体

激光器组件作为 SFS 的抽运源。峰值波长为 979.23 nm,最大注入电流 330 mA,最大输出功率 110 mW。抽运源的温度控制利用高功率电流放大器 DRV591 与组件内部自带的热敏电阻及热电制冷器完成,温度稳定度达 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。选用 15.6 m 长 DF1500F 980 型铟光纤作为放大媒质,插入损耗典型值为 18.4 dB。光电探测器为 New Focus 公司出品的 v2011 PIN 型光电探测器,其在 1550 nm 波段附近的响应度为 $\mathcal{R}=0.54\text{ V/mW}$ 。数字控制单元以 PC89C52 单片机为核心,辅以高精度(12 bit)模/数和数/模转换器,控制周期为 $120\text{ }\mu\text{s}$,可有效压缩 2 kHz 以内的光功率起伏,最小控制精度 $\Delta_{\min}=3.89\text{ }\mu\text{A}$ 。模拟控制单元则由精密仪表放大器 AD620 为核心,构成差分运算放大电路,监测光源功率的动态变化。实验中,首先获得了 SFS 的输出光谱与 P - I 特性曲线如图 2 和图 3 所示,经计算得到 $\eta=0.083\text{ mW/mA}$,匹配电阻 $r=21.1\text{ }\Omega$ 。进而取 $g=1, m=0.5$,代入(5)式得到 $A\approx 0.993$,考虑到电路中个别器件间的失配,实际选取 $A=1.01$ 。

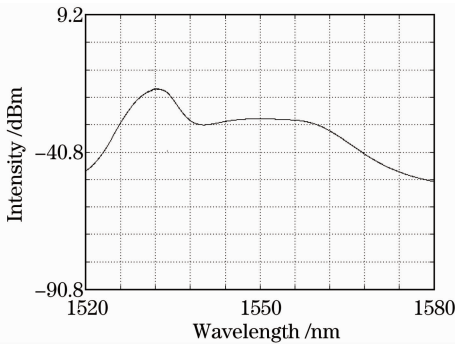


图 2 SFS 输出光谱

Fig. 2 Output spectrum of the SFS

3.1 短期稳定度测试

实验中,设定工作电流 $I=57.2\text{ mA}$,环境温度 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$,首先测试了模拟比例控制条件下,SFS输出

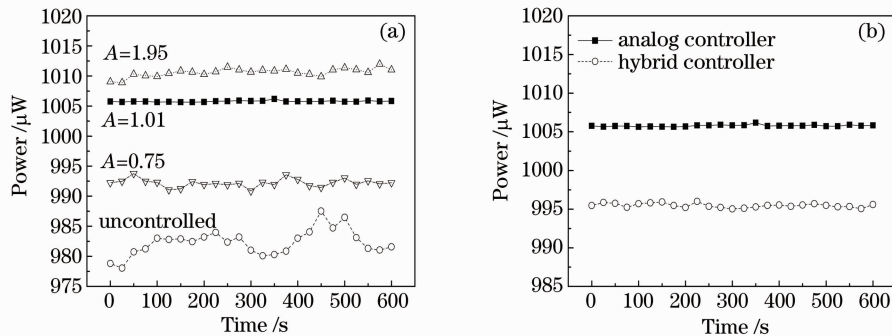


图 4 SFS 输出功率短期稳定度。(a)模拟控制器;(b)混合控制器

Fig. 4 Short-term output power stability of the SFS. (a) analog controller; (b) hybrid controller

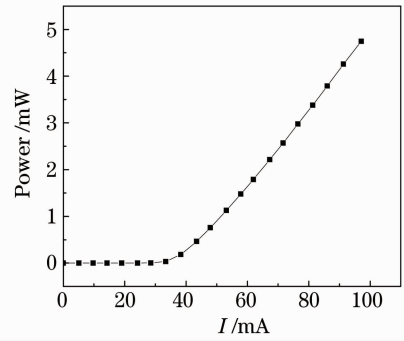


图 3 SFS P - I 特性曲线

Fig. 3 P - I curve of the SFS

功率的短期稳定度 $S_1, S_1 = \pm \frac{(P_{\max} - P_{\min})/2}{\bar{P}}$, 其

中 P_{\max} 和 P_{\min} 为最大和最小输出功率, \bar{P} 为监测周期内的平均输出功率。由图 4(a)可知,未施加控制时,光源输出功率曲线的起伏最大, S_1 达到 $\pm 0.64\%$ ($\pm 0.028\text{ dB}$)。对应地,此时抽运源(恒流、恒温条件)的输出功率漂移仅为 $\pm 0.2\%$,由于隔离器已消除了大部分的拍频噪声,因此可以间接证明铟光纤中的 ASE 过程是导致宽带光源功率起伏的主要原因。施加比例控制后,当 $A=0.75$ 和 $A=1.95$ 时,光源的输出功率虽得到一定程度上的抑制,但短期稳定度仍相对较高 ($S_1 \approx \pm 0.16\% \sim \pm 0.18\%$);只有当 $A=1.01$ 时,光源的输出功率起伏才最小, $S_1 = \pm 0.032\%$ ($\pm 0.0014\text{ dB}$),与文献[7~10]所报道的 SFS 输出功率的短期稳定度相比,其数值结果提高了 1 个数量级以上。另一方面,图 4(b)则表明,与单纯地使用模拟比例控制器相比,混合控制器并没有使得宽带光源的短期稳定度得到改善 ($S_1 = \pm 0.034\%$)。换言之,若在短周期内(10~15 min)使用宽带光源,仅采用模拟比例控制器即可获得稳定的光功率输出。

3.2 长期稳定度测试

为了验证对于 SFS 的输出功率控制, 是否有必要引入数字模糊控制这一疑问, 分别测试了模拟比例控制与混合控制条件下光源输出功率的长期稳定性(工作电流 $I = 57.2 \text{ mA}$, 环境温度 $23 \text{ }^\circ\text{C}$, $A = 1.01$)。由图 5(a)可知, 当仅采用模拟比例控制时, 经过 8 h 的连续工作, 光源的输出功率已开始有下降的趋势, 输出功率的整体起伏达 $1.36 \text{ } \mu\text{W}$, 长期稳

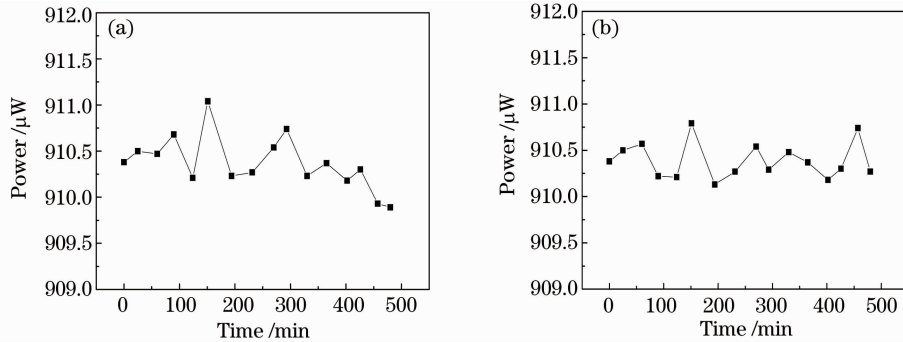


图 5 SFS 输出功率长期稳定度。(a)模拟控制器; (b)混合控制器

Fig. 5 Long-term output power stability of the SFS. (a) analog controller; (b) hybrid controller

4 结 论

SFS 的输出功率起伏主要源于光子的放大自发辐射过程和抽运源功率漂移。为实现光源功率的稳定输出, 分别采用模拟控制与数字控制对二者进行有效抑制。实验结果表明, 短期工作条件下, 单纯地使用模拟比例控制即可获得高稳定度的功率输出; 长期工作条件下, 数字模糊控制则能够有效克服温度、老化等不良因素所产生的慢变干扰, 保证了 SFS 的持续高稳定输出。从数值结果上看, 基于混合控制的 SFS 系统的功率输出稳定度远远优于目前所报道的光源产品(短期稳定度 $S_1 < \pm 0.02 \text{ dB}$, 长期稳定度 $S_2 < \pm 0.05 \text{ dB}$), 它将为实现更高精度的光纤传感测量提供有力保障。

参 考 文 献

- 1 Qian Jingren, Cheng Xu, Zhu Bing. The experimental research of a broadband erbium-doped fiber superfluorescence source [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(11): 989~992
钱景仁, 程旭, 朱冰. 掺铒光纤超荧光宽带光源的实验研究 [J]. *中国激光*, 1998, **A25**(11): 989~992
- 2 Guotong Du, Chengdong Xu, Yang Liu *et al.*. High-power integrated superluminescent light source [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(1): 149~153
- 3 P. Wang, J. K. Sahu, W. A. Clarkson. High-power broadband ytterbium-doped helical-core fiber superfluorescent source [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(5): 300~302
- 4 Wang Xiulin, Huang Wencai, Ming Hai. Broadband and high stability erbium-doped superfluorescent fiber source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(5): 32~36

定度为 $S_2 = \pm 0.075\%$ 。相比之下, 采用混合控制方案时, 光源在 8 h 内的功率输出则较为平稳, 如图 5(b)所示。平均功率起伏仅为 $0.73 \text{ } \mu\text{W}$, S_2 达到 $\pm 0.041\%$ ($\pm 0.0018 \text{ dB}$)。由此可见, 长期工作稳定性差是模拟比例控制器的固有缺陷。相反, 数字模糊控制则可有效抑制器件温升、老化等慢变干扰的影响。因此, 它的引入对于保证 SFS 长期、连续、稳定地工作具有重要意义。

- 王秀琳, 黄文财, 明海等. 高稳定掺铒光纤超荧光光源 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(5): 32~36
- 5 Li Chuanqi, Zhou Xu, Zhu Yingchun *et al.*. The spectral analysis of the fiber grating arrays encoder/decoder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3277~3281
李传起, 周谔, 朱迎春等. 光纤光栅阵列编解码器反射谱性能研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3277~3281
- 6 Liu Chunyu, Ye Hong'an, Kong Jing. Research on fiber stress sensor based on Mach-Zehnder fiber filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(S2): 288~291
柳春郁, 叶红安, 孔婧. 基于马赫-曾德尔滤波器的光纤应力传感器的研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(S2): 288~291
- 7 Liu Yinggang. The research of optical source in fiber grating sensing system [D]. Xi'an: Northwest University, 2007. 27~47
刘颖刚. 光纤光栅传感系统光源研究 [D]. 西安: 西北大学, 2007. 27~47
- 8 Guo Xiaodong, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. A novel C+L band erbium-doped fiber broadband light source with high power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5): 609~612
郭小东, 乔学光, 贾振安等. 一种高功率掺铒光纤超荧光光源 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 609~612
- 9 Wei Aixin, Li Xuhui, Tang Wei. High stability broadband Er-doped fiber source [J]. *Semiconductor Technology*, 2007, **32**(3): 223~226
魏爱新, 李旭辉, 汤炜. 高稳定宽光谱掺铒光纤光源 [J]. *半导体技术*, 2007, **32**(3): 223~226
- 10 Guo Yubin, Wang Tianshu, Li Jun *et al.*. A super-fluorescent source using high erbium-doped fiber [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(5): 316~318
郭玉彬, 王天枢, 李军等. 一种高掺铒光纤超荧光辐射源 [J]. *半导体光电*, 2003, **24**(5): 316~318
- 11 Shen Linfang, Qian Jingren. High-stability and broad-band erbium-doped superfluorescent fiber source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 300~304
沈林放, 钱景仁. 高稳定宽频带掺铒光纤超荧光光源 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 300~304

- 12 Zhang Guicai. Superfluorescent fiber source for precision grade fiber optic gyroscope application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(10): 9~16
张桂才. 应用于高精度光纤陀螺的超荧光光纤光源[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(10): 9~16
- 13 Chang Cun, Yang Jiuru, Ye Hong'an. The research by simulation on the output power characteristic of superfluorescent source based Giles model[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(S2): 1~4
常存, 杨九如, 叶红安. 基于 Giles 模型的超荧光光源功率输出特性仿真研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(S2): 1~4
- 14 Yang Jiuru, Li Cheng, Ye Hong'an *et al.*. A study on power stabilizer of laser diode based on Fuzzy-P control [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 804~806
杨九如, 李成, 叶红安等. 基于 Fuzzy-P 控制的半导体激光器功率稳定研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(6): 804~806
- 15 Li Shiyong. *Fuzzy Control · Neuro Control and Intelligent Cybernetics*[M]. 2nd Edition, Harbin: The Press in Harbin Institute of Technology, 1998. 254~286
李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 第二版, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998. 254~286

2010 年度“大珩杯”中国光学期刊优秀论文奖评选

为了提高中国光学期刊的学术水平和质量,吸引和催生优秀稿件,鼓励和培育优秀作者,促进中国光学科技事业发展,在中国杰出的战略科学家、中国近代光学与光学工程的奠基人与组织领导者、中国光学学会的创始人王大珩先生的支持下,中国光学学会决定组织学会主办的 10 种期刊并邀请中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)所有入网期刊参加 2010 年度“大珩杯”中国光学期刊优秀论文奖评选活动。

从发表在《光学学报》、《中国激光》等共计 39 种期刊(包括增刊)2007,2008,2009 年的学术论文中评选出优秀论文 40 篇(简讯、消息、综述类论文和上一届已经获奖的论文不再参评)。

评选程序及日程

- 1) 论文作者 2010 年 5 月 30 日前提交申请材料(论文被引的材料和论文所在项目或课题获奖的证明);
- 2) 6 月 10 日前各编辑部组织汇总各项统计信息,经评选推荐交中国光学学会,同时提交推荐评选成员名单;
- 3) 6 月 15 日学会公布经遴选组成的评选委员会名单,并开始以网络通信方式组织网络投票评审;
- 4) 7 月 15 日前评选结束,确定初步评选结果,并在中国光学学会网站(www.cncos.org.cn)以及中国光学期刊网站(www.opticsjournal.net)上公示名单;公示期 2 周,接受异议投诉。如无论文抄袭、剽窃等学术不端行为等举报或投诉,论文获奖生效。
- 5) 8 月 10 日在中国光学学会网站、中国光学期刊网和各相关期刊及网站上公布获奖名单。8 月下旬在天津举办的中国光学学会 2010 年学术年会上,举行颁奖仪式。

联系方式

网址: 中国光学学会 <http://www.cncos.org>

中国光学期刊网 <http://www.opticsjournal.net/Daheng.htm>

联系人: 段家喜, 庞立

电 话: 021-69918426 010-82616604