

# Design of an Adaptive Rate-Controlled FSO and Its Indoor Experimental Results

Changqi Yang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Sciences, Xi'an Shiyou University, Xi'an

<sup>2</sup>Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an

Email: changqiyang@foxmail.com

Received: Jul. 20<sup>th</sup>, 2013; revised: Aug. 1<sup>st</sup>, 2013; accepted: Aug. 15<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Changqi Yang. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** Free space optical communication (FSO) is the current research hotspot that encounters great difficulties. Because the wavelength is very small, FSO is vulnerable to transmission channel. A new kind of adaptive rate-controlled FSO system is designed. Usually radio frequency feedback is used to determine the channel conditions by other researchers, and change the transmission rate adaptively. In contrast, in this paper a beacon light power calibration method is employed to determine the channel condition. This paper introduces the work principle of adaptive rate-controlled FSO. Its function is simulated, and the hardware circuit is realized. The system is tested under indoor conditions. Two cases with and without adaptive rate-controlled are compared. The indoor experiment results show that the adaptive rate control can greatly improve the performance of the system, as well as high speed rate and reliability.

**Keywords:** Free-Space Optical Communication; Adaptive Rate-Controlled; Scintillation; Turbulent Atmosphere; RF Feedback

## 自适应速率 FSO 设计及室内实验结果

杨昌祺<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>西安石油大学理学院, 西安

<sup>2</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安

Email: changqiyang@foxmail.com

收稿日期: 2013 年 7 月 20 日; 修回日期: 2013 年 8 月 1 日; 录用日期: 2013 年 8 月 15 日

**摘要:** 自由空间光通信(FSO)是当前遇到困难较大的研究热点。由于光波长很小, FSO 很容易受到传输信道的影 响。由此一种自适应速率控制 FSO 系统被研发出来了。通常的研究是采用射频反馈来判定信道条件, 进而自 适应的改变传输速率。与之不同, 本文采用的是对信标光进行功率标定的方法来判定信道条件。本文介绍了自 适应速率控制 FSO 的工作原理, 对其进行了电路仿真与硬件实现。对设计的系统进行了室内的实验测试。分别 对有无自适应速率控制的两种情况进行了比较。室内实验结果表明自适应速率控制能极大的提高系统性能, 在 保证高速率的同时保证传输的可靠性。

**关键词:** 自由空间光通信; 自适应速率控制; 闪烁; 湍流大气; 射频反馈

### 1. 引言

自由空间光通信是目前最有潜力的通信方式之 一<sup>[1,2]</sup>。目前, 对光纤通信的应用暂时趋于饱和, 人

类又将目光投入自由空间光通信, 比如地面与太空的 通信、近地面水平链路之间的通信。

目前的技术, 在几百公里的传输距离内, 光纤通

信能够达到上百 Gbit/s 的传输速度。而对于 FSO 链路来说, 由于大气湍流导致的光信号起伏, 系统误码率很高。在这样的信道条件下, 以高速传输, 误码太多, 必须重新传输; 以低速传输, 效率又很低。这就导致了 FSO 链路不能直接使用光纤通信的高速收发机模块, 进而导致了 FSO 产业规模太小, 成本太高。这反过来这又限制了 FSO 的发展。

要提高 FSO 链路的传输速率, 目前成本最低的一种技术是根据信道的情况来自适应的改变发射速率。<sup>[3]</sup>对影响 FSO 链路的不同天气衰减条件进行了理论分析。这些研究主要是针对热带地区, 主要是提出一些 FSO 系统的参数设计。还有一些研究主要从通信编码方式来做一些仿真<sup>[4]</sup>。一些研究主要是通过反向的射频传输来探测信道条件, 这种通信主要借助射频通信<sup>[5,6]</sup>。

在地面与卫星之间使用激光通信的一个原因是光通信系统保密性好、不用申请频道资源、集成度高和功耗低。由于光波长短, 导致通信系统体积也小。而如果在 FSO 中使用射频反馈技术, 导致了 FSO 系统集成度降低, 功耗会加大。特别是如果把这样的系统放在卫星上, 它会增加卫星的功率消耗, 还不如完全使用射频通信为好。

本文介绍了作者研制的一套自适应速率的红外光通信机。与前人的工作<sup>[5,6]</sup>不同, 本文对信道的探测使用的是信标光的反馈, 而不是射频反馈。与前人的工作不同, 本文在探测信道条件的时候利用了湍流的冻结效应, 意图提高系统的效率。

第 2 部分将介绍作者设计的自适应速率光通信系统的工作原理。第 3 部分将会介绍一下基于 FPGA 的系统功能仿真和硬件实现。第四部分对其进行室内环境的实验测试。

## 2. 工作原理

假设通信机能容忍的误码率极限为  $10^{-9}$ , 对于理想光接收机来说, 此误码率对应的能够被识别的最小的光功率为<sup>[7]</sup>

$$P_r = 10 \lg \frac{nhcf_b}{2\lambda\eta} \quad (1)$$

其中,  $n$  是一个码元的平均光子数,  $h$  是普朗克常数,  $c$  是光速,  $f_b$  是发射速率,  $\lambda$  是光波长,  $\eta$  是量子效

率。将  $n = 21$ ,  $\eta = 0.7$ ,  $\lambda = 8.5 \times 10^{-7} \text{ m}$  代入公式(1), 其化简为

$$P_r = 10 \lg (351 \times 10^{-17} f_b) \text{ dBm} \quad (2)$$

本文将就 200 Mbit/s-1 Gbit/s 的传输速率区间进行研究。如表 1 所示。

在表 1 中, 针对 250 Mbit/s-1 Gbit/s 的速率区间, 根据公式(2)计算了相对应的最小探测到的光功率, 分别以 dBm 和 nw 作为单位表示了出来。表 1 最右一列的编码原理在后文叙述。

对于自适应速率 FSO 来说, 其工作机制如图 1 所示:

接收机把合作信标光发射给发送机, 为了便于弱光的探测, 可以对合作信标进行调制。发送机对信标进行检测放大, 判定探测到的光功率的大小; 查表, 判定其所属的发射速率; 产生该速率的电调制信号; 调制激光源, 发射出去。

如图 1 所示, 发送机对接收到的信标光进行检测、放大, 根据放大后的电压值, 确定探测到的光功率的大小。这是通常的思路。这个思路在实际设计电路和联调以后就会发现一个问题: 由于光波的传输穿过了湍流路径, 引起了接收到的光信号的起伏, 这是一部分噪声。另外由于探测电路自身的原因, 会产生另外一部分噪声。光信号会淹没在这些噪声里, 很微弱。如果真要检测放大光信号, 得到电压值, 进而反推出探测到的光功率, 通常很难实现。另外由于通常的光接收机的放大器有自动增益控制功能, 导致了从电压值反推光功率的想法很难实现。

下面本文提出一种新的标定技术, 来确定探测到的光功率值, 进而反推信道的扰动情况。具体参照表 1 来解释。首先在实验室环境下(空气扰动很小、传输距离很近, 导致湍流很弱)发射 1 Gbit/s 的占空比 50% 的信标光(见图 2), 发送端检测它, 观察它的误码率。从大到小地减少信标光的发射功率, 会发现误码率会上升。当误码率大于  $10^{-9}$  的那一时刻, 可以认为此时探测到的光功率对应着发射速率为 1 Gbit/s 的灵敏度。改变检测电路的放大倍数(见图 3, 放大电路里有可调电阻, 调整这个电阻), 使得此时检测放大电路得到的电压值为 2.55 V(这个值是人为选定的, 目的是方便编码)。这个电压值就对应着表 1 发射速率为 1 Gbit/s 时候的名义检测光功率 3.510 nw。对于检测放大电路

Table 1. Relationships between the rate and the sensitivity  
表 1. 速率与灵敏度的关系

速率 (Mbit/s)	根据公式(2)计算得到的最小探测到的光功率(dBm)	以 nw 作为单位的光功率	编码
250	-60.56	0.877	01000000
300	-59.77	1.05	01001100
350	-59.10	1.23	01011001
400	-58.52	1.40	01100110
450	-58.01	1.58	01110011
500	-57.56	1.75	01111111
550	-57.14	1.93	10001100
600	-56.76	2.106	10011001
650	-56.42	2.281	10100110
700	-56.10	2.457	10110011
750	-55.80	2.633	10111111
800	-55.52	2.808	11001100
850	-55.25	2.984	11011001
900	-55.00	3.159	11100110
950	-54.77	3.334	11110010
1000	-54.55	3.510	11111111

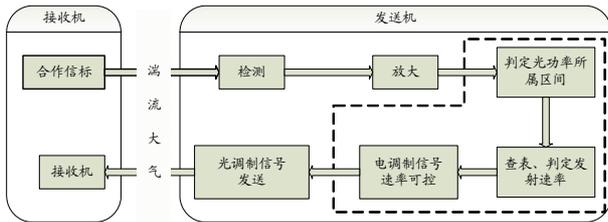


Figure 1. The operation principle of adaptive rate-controlled FSO  
图 1. 自适应速率控制光通信机工作机制

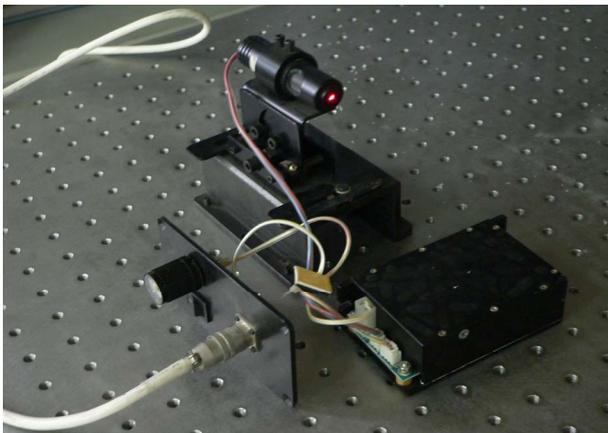


Figure 2. The laser beacon  
图 2. 信标光

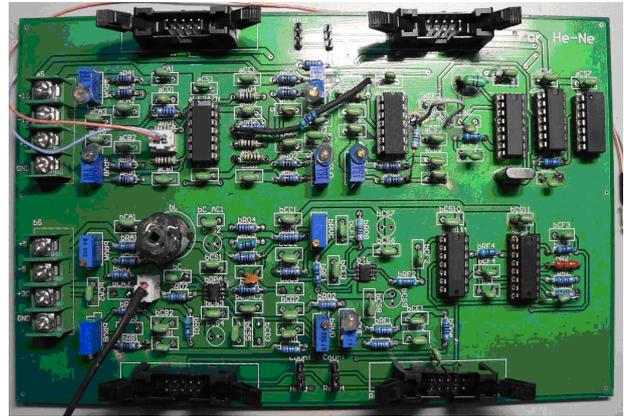


Figure 3. Detection and amplification circuit for the optical signals  
图 3. 光信号检测、放大的电路

的放大倍数来说,我们是不关心的。对这个电压值 2.55 V 进行编码,假设其对应着一个 8 比特位的 11111111 (对应着表 1 最后一行、最后一列的值)。把这个电压值分为 255 份,也就是说,每一份对应着一个数字比特 1。至此,检测、放大电路已经调整好,无需再改变。

接下来在进行通信的时候,由于放大倍数是固定的,假设某个时刻检测、放大电路探测到的电压值是 1.78 V,编码后对应着二进制的 10000001(十进制的 129),经过查表 1,发现其介于 1.75 nw 和 1.93 nw 之间,所以此时发射机会将发射速率定为 1.75 nw 对应的速率 500 Mbit/s(就低不就高)。

### 3. 软件仿真和硬件设计与实现

根据第 2 部分阐述的光通信机的基本工作原理,作者对这种新型光通信机的电路进行了基于 FPGA 的软件仿真和硬件设计与实现。图 4 是针对作为载波的时钟通道模块进行选择的仿真。仿真采用的是 Modelsim 软件。

如图 4 所示,有 3 个信号 clock、voltage 和 select16\_1。其中, clock 是一个同步触发时钟信号,每次在时钟的上升沿对 voltage 信号进行操作。voltage 是对信标光进行检测、放大和模数转换后的结果,它是一个 8 位的数字信号。图 4 用 10 进制来表示这个信号。当得到这个信号后,查表 1 的最后一列,看它属于哪个区间,然后找到对应的发射速率。表 1 里,一共有 16 种发射速率。图 4 用了一个 16 选 1 的多路选择器来进行通道选择,对应的是信号 select16\_1。

这是一个 16 位的二进制信号，任何时候只可能有其中一个位为 1。哪一个位为 1 就表示此时选择了对应的通道。每一个通道对应着一种已经被分频的时钟。当查表 1 选定了发射速率就可以通过 16 选 1 的多路选择器选择一个通道的时钟。然后把要发射的信号调制这个同频时钟的载波，再发射出去。

硬件控制电路的设计是基于红色飓风 II 代开发板，硬件芯片采用 xc3s400。硬件综合后的结果显示，xc3s400 芯片的资源完全可以满足设计需求。由于综合后形成的电路太过庞大，不适合于贴图，不在此显示。

图 3 是作者研制的信标光检测、放大电路和通信光源调制电路。

图 2 是作者研制的用做信标光的功率可调、速率可调的激光器。激光器波长 650 nm。大气湍流存在着一种叫做“湍流冻结”的效应，指的是湍流大气的变化是“起伏 - 停滞 - 起伏 - 停滞”这样的间歇的变化。每当由于大气温度、压力和风速变化导致湍流变化了以后，湍流会保持状态一段时间，然后再变化。保持的这一段通常时间是 2 个毫秒左右<sup>[8]</sup>。也就是说，在一段 2 ms 左右的时间内连续发射一束激光，这一段时间之内任何时刻发射的激光穿过湍流大气后，光强起伏是一样的，就好像在这段时间之内湍流被冻结住了一样。反过来，大气湍流每秒钟就会变化  $1/2 \text{ ms} = 500$  次左右。它和游泳有点类似，手和腿划水之后，一定要有一个身体整体滑水的过程。这个滑水的过程就相当于湍流冻结的过程。如果不考虑这种冻结效应，为了跟上大气的起伏变化，一个必然的做法是给予激光尽可能高的调制频率，比如 1 GHz 的调制。这非常浪费资源。论文中考虑到了湍流的这种冻结效应，给予信标光的调制频率是大气起伏的间歇频率 ( $1/2 \text{ ms} =$

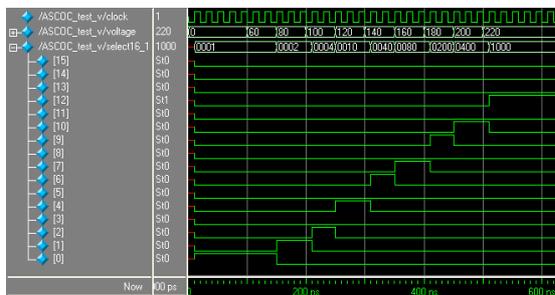


Figure 4. Simulation result  
图 4. 仿真结果

500 Hz)的十倍(5 KHz)。

#### 4. 室内实验结果

图 5 是在室内环境下对信道条件进行测量的示意图。接收机把信标光传输出去，在发射机一端对其进行探测。在靠近接收机的地方吹热风来产生长程湍流，在传输路径中添加衰减片来模拟信道对信号产生的衰减。室内温度是 25℃，热风温度是 83℃，风速是 3.3 m/s，传输距离 5 m，光束直径 10 cm。我们可以看到明显的光强闪烁。

作者对不使用自适应速率控制和使用自适应速率控制的两种情况进行了对比实验。分别测量了其误码率变化。一共进行了 30 次测量。图 6 是实验测量的结果。横轴是测量的次数，纵轴是误码率。圆圈表示未使用自适应速率控制的测量结果，点表示使用了自适应速率控制的测量结果。

从图 6 可以看出，在没有使用自适应速率控制的时候，误码率很高，远远大于  $10^{-9}$ 。超过了正常通信可以接受的程度。而使用了自适应速率控制以后，误码率有了很明显的减少。

#### 5. 结束语

本文设计了一种新式的 FSO 通信系统。根据湍流信道条件来自适应的改变发射速率。与前人的工作不同，本文对信道条件的测量并未使用反向的射频反馈，而是使用了对信标光进行标定的技术。本文对这一系统进行了室内性能测量。分别进行了未使用速率控制和使用自适应速率控制的实验测量。对其进行了对比分析。分析结果显示，自适应速率控制技术在提高 FSO 系统有效性和可靠性方面很有用。

论文也有不足的地方，比如系统的实验是在室内环境下进行。下一步的研究将会重点放在室外的真实湍流大气环境。传输距离逐渐增加，逐步从几百米增

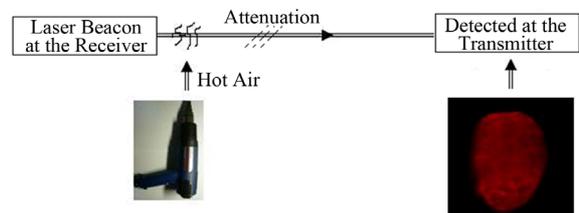


Figure 5. Diagrammatic sketch of the test method  
图 5. 测试方法示意图

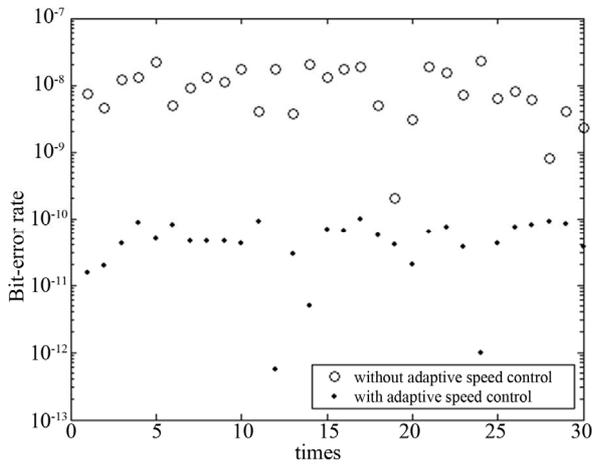


Figure 6. Comparison results  
图 6. 比较结果

加到几公里，以此验证自适应速率控制技术是否对于长程传输依然效果明显。

### 参考文献 (References)

- [1] L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen, et al. Theory of optical scintillation. The Journal of the Optical Society of America, 1999, 16(6): 1417-1429.
- [2] C. Yang, W. Jiang and C. Rao. Bit-error rate for free-space optical communication with tip-tilt compensation. Waves in Random and Complex Media, 2006, 16(3): 281-292.
- [3] S. A. Zabidi, W. A. Khateeb, M. R. Islam, et al. 2010 International Conference on Digital Identifier. Kuala Lumpur: IEEE Conference Publications, 2010.
- [4] M. Tatarko, L. Ovsenik and J. Turan. 2012 Proceedings of the 35th International Convention. Opatija: IEEE Conference Publications, 2012.
- [5] V. Sharma, G. Kaur. 2013 Third International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies. Rohtak: IEEE Conference Publications, 2013.
- [6] K. Fatima, S. S. Muhammad and E. Leitgeb. 2012 8th International Symposium on Digital Object Identifier. Poznan: IEEE Conference Publications, 2012.
- [7] 刘增基, 周洋溢, 胡辽林, 周绮丽. 光纤通信[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 87-88.
- [8] C. Yang, X. Li, W. Jiang, et al. Experimental validation that optical scintillation obeys the same rules of share price fluctuations. PIERS Proceedings. Suzhou: PIERS, 2011.