

一种降低自由空间光通信误码率的新技术

杨昌旗

(西安石油大学 理学院, 西安 710065)

摘要:提出了一种降低自由空间光通信误码率的新技术,介绍了这种新技术的原理,对其做了仿真,并与前人的理论分析结果进行了比较。比较结果显示新技术系统中误码率明显降低许多。

关键词:自由空间光通信;周期信号;自相关;闪烁;湍流大气

中图分类号:TN929.12 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2010)08-0043-03

A kind of new technique to reduce the bit-error rate for free-space optical communication

YANG Chang-qi

(School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: A kind of new technique to reduce the bit-error rate for free-space optical communication is proposed in this paper. The technique's principle is described, a simulation is performed, and the simulation results are compared with other people's theoretical analysis results. The comparison result shows a very distinct decrease of bit-error rate.

Key words: free-space optical communication, periodical signal, autocorrelation, scintillation, turbulent atmosphere

0 引言

自由空间光通信(Free-space Optical Communication, 简称 FSO)^[1]是在大气或真空这类自由空间、利用光学的方法来传递消息的一种通信方式。FSO 有其与光纤通信不同的地方。目前,短距离的 FSO 主要用于一些不宜布线或是布线成本高、施工难度大、经市政部门审批困难的地方,如市区高层建筑物之间、马路(铁路)两侧的建筑物之间、不易架桥的河流两岸之间、古建筑、高山、岛屿以及沙漠地带等。

早在上个世纪中叶之前,前苏联人就开始在几百米的距离上用白炽灯进行大气传输的实验。实验中发现湍流大气会导致光信号的起伏(这被称为闪烁)。在传输距离稍微长一点、或者天气条件恶化的时候,光强的闪烁非常强烈,信号会出现严重的衰减,同时伴随着很大的噪声。接收机通常会预先设定一个门限阈值。当这个光强值小于接收端的门限阈值的时候,这个时刻的信号值会被判定为“0”。这就是误码。对光纤通信来说,由于,光信号被局限于光纤内传输,信号起伏很小,噪声很低,光接收机可以很容易恢复出其时钟。因此,光纤通信从研制之初,就进展迅速,传输速

率从最早的几 Mb/s,提高到现在的几十 Gb/s。而在 20 世纪 70 年代,自由空间光通信的传输速率是几 Mb/s,现在依然是几十 Mb/s 左右,进展不大。并不是说人类研制不了高速率的通信机,而是由于大气闪烁导致的高误码率,使得高速率的通信机发挥不出效能。究其原因,是由于信号的噪声太大,接收机的锁相环无法从信号中提取出同步时钟,就更不可能在每个时钟周期内提取信号了。因此,如何降低误码率,是提升 FSO 性能的关键。

1 减少光强闪烁的传统方法

为了减少光强闪烁对自由空间光通信的影响,人们做了很多这方面的尝试。第一种方法是从光波的空间相干性入手^[2]。相对于点光源而言,部分相干光传输受到的湍流大气影响会明显减小,相应的误码率也会有所减少。第二种方法是在发射端使用自适应光学相位校正技术^[3,4]。第三种方法是根据湍流大气的起伏强弱来决定发射端的发射速率^[5]。第四种方法是通过增大发射机的孔径直径来减小光波受到的起伏。在以上这几种方法中:第一种方法是治标不治本,对解决问题的作用只有一点改善;第二种方法是一种主动尝试治本的方法,也是成本比较昂贵的一种方法,而且,这

收稿日期:2010-04-12。

作者简介:杨昌旗(1980-),男,主要从事嵌入式实时操作系统研究。

杨昌旗:一种降低自由空间光通信误码率的新技术

种技术(包括一系列辅助技术)是属于军方垄断的技术。在一些不计成本、不计代价的国家战略需求上可以使用,而在一些要求低成本、低成本的场合(比如民用系统或者“最后一千米”等等),就不是太合适。同时,目前来说,这种技术在远距离、或者大天顶角传输的情况下,自身就不工作了。使用自适应光学来进行自由空间光通信,还需要一段很漫长的路要走;第三种方法是完全从电路设计上来解决问题,成本降下来了,可是,这种方法是属于被动的。一旦闪烁很强,通信速率就会自动降得很低;第四种方法会加大光学机械部件的尺寸,导致其需要很庞大的光学机械装置(比如大口径光学镜面)和控制机构(比如高精度的定向机构),这也会加大系统集成化、小型化和控制成本的难度。

2 用于 FSO 的新技术

2.1 理论分析

通常把湍流大气中光信号的起伏称为闪烁。它的具体表现就是信号不断的上下起舞。假设在自由空间中发射了一个余弦调制信号,可以用 $U=U_0\exp[i(\Omega t+\varphi)]$ 来表示这个信号,其中 U_0 是它的常数幅度,而 $i^2=-1$, Ω 是调制频率, φ 是它的初始相位。

在接收端,若接收到这个信号,则变为 $U'=U_0'(t)\exp[i(\Omega t+\varphi'(t))]$ 。它的幅度由 U_0 变为 $U_0'(t)$,它的相位由 φ 变为 $\varphi'(t)$ 。一个明显的区别就是:在接收端,信号的幅度不再是个常数,而是随着时间 t 而变化。简而言之,在接收端可以接收到一个幅度随着时间而变化的信号,这个信号不停地上下起舞。上面提到的第二种方法就是抑制这种信号的起舞。

只要光波在湍流大气中传输,信号强度就会有闪烁。如果非要针对信号的幅度进行研究(比如前述四种方法),则必然会被湍流大气牵着鼻子走,很难达到满意的结果。

在上面的方程中,调制频率并不是时间的函数。 $\Omega=2\pi/T$,其中 T 是信号的脉冲周期。 Ω 是个常数, T 也是个常数。也就是:如果在湍流大气中传输一束余弦调制的光信号,它的幅度会受到大气的影晌而随着时间的变化,它的相位会受到大气的影晌而随着时间的变化,但是,它依然还有一个参量不受大气影晌,这就是调制频率。本文提出的新方法就是利用了这个特性。

2.2 新技术特点与仿真

由于严重的噪声影晌,传统的自由空间光接收机的误码率都很高。通常做如下定义:接收机的灵敏度

指的是,当误码率小于 10^{-9} 时(小于此量级的误码率是可以容忍的),接收机最小能识别的光功率。当噪声很大时,由于信噪比(SNR)严重降低,误码率会急剧增加。文献[6]表明,在下行链路,当 $SNR=21(=10\log 21 \approx 13.2\text{dB})$, 0° 天顶角的时候,通信的误码率为 10^{-4} 。此时的有效通信速率近似为 $1/10^{-4} \approx 10^4\text{b/s}$ 。换一句话说,此时使用通信速率为 1Gb/s 的通信机和 10kb/s 的通信机没什么区别。在这种天气条件下,自适应光学校正了前 50 阶相位的时候,误码率才降低为 10^{-8} ,此时,依然未达到正常通信的基本要求。

误码率始终降不下来的原因在于噪声太大。预先设定一个阈值的直接检测系统对这样的信噪比几乎是束手无策。此时,系统的同步时钟难以恢复,也就无法识别出原始的信号。

自相关是一种提取微弱信号的行之有效的方法。如图 1 所示,对一个信号的自相关进行了仿真,其中,横轴是信号的时间变量,用采样点数表示,纵轴是电压的幅度。图 1(a)是一正弦电压信号 $x=A\sin(\omega t+\varphi)$ (其中, $A=1$, ω 是角频率, φ 是其初相位),此信号的功率为 $P_x=A^2/2$ 。图 1(b)是将此信号与一个白噪声相叠加的结果。此白噪声的均值为 0,方差为 1,噪声功率为其方差,即 $P_n=1$ 。因此,这个信号的 $SNR=10\log(P_x/P_n)=-3\text{dB}$ 。假设这个信号出现在文献[6]的情况中,则其对应的误码率只会更恶劣(在那个例子中,它是 13.2dB ,误码率已经很大了)。图 1(c)是对图 1(b)进行自相关的结果。这个信号非常干净,而且和原始信号同周期,相位有

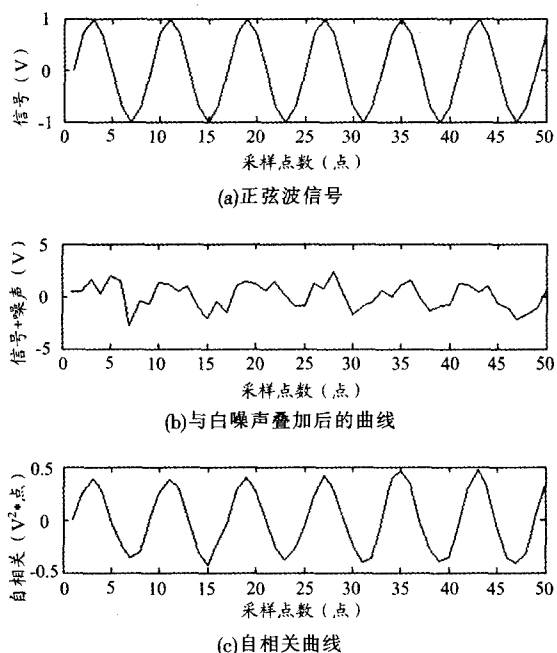


图 1 周期信号的自相关

固定延迟(只显示了自相关的右半部份的结果),很少出现误码情况。

由以上分析可知:在自由空间里,由于湍流大气的起伏,接收端的信号的信噪比很低,此时,会有很大的误码率;但是,假如传输的是不含信息的纯周期信号,利用周期信号的自相关性,在信噪比很低的条件下,依然可以轻松地恢复出这个周期信号。利用这一个优点,可以考虑在自由空间光通信里单独传送一束周期信号作为同步时钟,利用其自相关来恢复。假设要发送一帧的信号,其内容是“0110 1001”。图2是发送端发射的信号的示意图。

如图2所示,同时发送两种不同调制频率的光信号,上部分是用于同步的时钟,调制频率为 f ,下部分是用于传递信息的已编码信号,调制频率为 $2f$ 。其中,编码信号的频率被设置为同步时钟的频率的两倍,是为了提取编码信号的方便。图3是与此对应的接收机示意图。

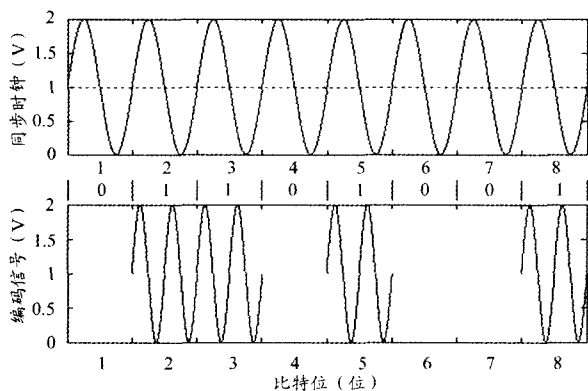


图2 发送的信号的示意图

在图3中,如图2所示的光信号进入光电探测器后,先后经历前放、主放和均衡器,然后由变压器耦合到下一级。多级放大电路中,随着级联级数的增加(会满足自激震荡的相位条件),或者无限制的放大信号(会满足自激震荡的幅度条件),很容易出现自激震荡。所以,我们使用了一个变压器来进行信号的耦合,这样可以破坏满足自激震荡的条件。然后,信号会分别经历两个调Q的LC振荡器。在调Q滤波器中,通常在负反馈放大电路的回路中放置一个LC振荡器来选择需要放大的信号频段。一个叫做“Q”的参数被用来定义电路对中心共振频率之外的频段的排斥度。通过改变L和C的参数值,可以改变电路的Q值。Q值越大,通过的频带宽度越窄,同时,电路的放大倍数也会越大。在图3中,上面的一个调Q滤波器用来通过频率为 f 的同步时钟,下面的一个调Q滤波器用来通

过频率为 $2f$ 的已编码信号。将频率为 f 的信号进行自相关,即可恢复出同步时钟。然后,根据此同步时钟来恢复已编码信号。

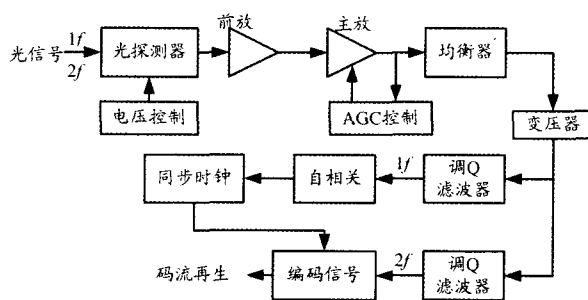


图3 接收机示意图

3 结束语

目前的自由空间光通信机的传输速率都很高,达到几百兆b/s,甚至上Gb/s。这种性能的通信机的有效工作范围大概在水平4km之内。基本上可以把这种系统看作功能演示系统。其实用价值不大。在距离稍微有点远的情况下,由于湍流大气的影 响,这种高速性能未能得到充分发挥,系统的误码率很高。从文献[6]中可以看到,稍微恶劣一点的情况下的误码率居然高达 10^{-2} 。也就是说,目前的自由空间光通信的有效通信速率为几百b/s。这也是为什么历经这么多年,自由空间光通信未能获得像光纤通信一样大规模应用的基本原因。利用本文提出的技术,在 $SNR=-3dB$ 的条件下,有效通信速率几乎为100Mb/s。与文献[6]的理论结果进行比较,这是明显的改进。随着集成电路技术的发展,A/D转换速率的进一步提高将会进一步的提高自由空间光通信的有效通信速率。

参考文献:

- [1] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [2] RICKLIN J C, DAVIDSON F M. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication[J]. J. Opt. Soc. Am. A., 2002, 19(9): 1794-1802.
- [3] HAYANOY. Proceedings of Adaptive Optics and Applications [C]. Bellingham: SPIE Press, 1997.
- [4] YANG C, JIANG W, RAO C. Bit-error rate for free-space optical communication with tip-tilt compensation[J]. Waves in Random and Complex Media, 2006, 16(3): 281-292.
- [5] ARNON S, KOPEIKA N S. Adaptive optical transmitter and receiver for space communication through clouds [J]. Appl. Opt., 1997, 36 (9): 1987-1993.
- [6] TYSON R K. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications[J]. J. Opt. Soc. Am. A., 2002, 19: 753-758.