文章编号　2095-1531(2014)02-0245-08

无线光链路快速同步技术

王　旭[1],王挺峰[2],王弟男[2],王化龙[2*]
(1. 总参四部驻沈阳地区军事代表办事处,辽宁 锦州 121000;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
激光与物质相互作用国家重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要:介绍了一种小型无线激光通信系统的硬件结构以及针对该硬件的物理层收发协议。具体阐述了该协议中采用的快速同步技术,该技术能够降低通信终端间同步过程中的带宽浪费。在硬件结构中,主要介绍了激光驱动系统、信号放大和整形系统以及信号接口。硬件相关的物理层协议主要用于外部信号接口、数据流的串行化和解串行化、传输错误在线检测以及传输调度。系统主要针对地基无线光通信设计,使用多相位采样技术在本地生成接收端的采样时钟,与基于PLL的时钟复原方法相比具有更快的同步速度,有效提高了无线光通信系统的带宽利用率,降低了通信误码率。

关　键　词:FSO;无线激光通信;物理层;同步;FPGA

中图分类号:TN929.12　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20140702.0245

Rapid synchronization technology for wireless optical link

WANG Xu[1], WANG Ting-feng[2], WANG Di-nan[2], WANG Hua-long[2*]
(1. *Resident Representative Agency of Fourth Department of General Staff in Shenyang*, *Jinzhou* 121000, *China*;
2. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter*, *Changchun Institute of Optics*,
Fine Mechanics and Physics, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *qhelie@163.com*

Abstract: A small size free space optical communication system is introduced, including the hardware structure and the hardware specified physical layer protocol. The rapid synchronization technology applied in protocol is introduced in detail. The technology could reduce waste of bandwidth in the synchronization process between the communication terminals. The hardwares of the system include the laser driver system, the signal amplifying and shaping system, the data interface system. The hardware specified physical layer protocol is used for external signal interface, serialization and de-serialization of the data stream, checking transmission errors and scheduling the data transmission. The system is designed mainly for terrestrial FSO link whose signal channel is the atmosphere. In our system, the sampling clock is generated locally by using multi-phase sampling technique rather than PLL-based clock recovery, which can obtain more rapid synchronization speed and improve the utilization efficiency of bandwidth in the wireless optical communication system and reduce the Bit Error Rate(BER) in the communication.

Key words: FSO; wireless optical communication; physical layer; synchronization; FPGA

收稿日期:2013-12-14;**修订日期**:2014-02-13
基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2011AA7031024G)

1 引 言

激光通信是以激光为载波的通信方式。现有的激光通信系统主要是以光纤为传输介质的光纤通信系统和以自由空间为传输介质的自由空间激光通信(FSO)系统。当 FSO 的传输介质为近地大气时,该系统又称为近地 FSO 系统。在过去的几十年中,光纤系统取得了长足发展,与 FSO 系统相比,其信道模型更为简单,现有多模光纤的衰减约为几个 dB/km,单模光纤的衰减约为几十 dB/km[4]。随着光电器件技术的发展,光纤通信系统已经相当成熟并已成为高速通信领域中最重要的通信方式,光纤的发明者也因此获得诺贝尔奖。而 FSO 系统的信道模型更加复杂,对载波方向和光强的影响更加严重,比如不同能见度下,其对光强的衰减可能低至 1 dB/km,也可能高至几百 dB/km[4]。

FSO 系统的构建必须在分析信道特性的前提下,设计符合信道特性的硬件以及相关的物理层通信协议。本文分析了大气信道特性的传输特性,设计了一种小型激光通信系统;简要介绍了针对大气信道和该硬件结构设计的通信协议;针对大气激光链路中通信频繁中断导致带宽利用率低的问题,采用了串行通信中并不常用的本地时钟生成方法,通过多相位采样技术解决了本地时钟生成方法中的时钟对齐问题和频率漂移问题。经测试,本地时钟生成的方法适合于大气激光通信系统,能够加快信道失败后的再同步过程,有效降低同步带宽需求。

2 信道特性

针对大气对无线光通信信道可用率和可靠性的严重影响,信道本身特性的研究已经成为无线光通信领域的重要研究内容。大气对其内传输激光束的影响主要有大气吸收、大气散射以及大气湍流等[1]。

大气吸收主要包括气体分子吸收和水分子吸收。在近红外波段,气体分子吸收与水分子吸收相比要微弱得多,因此在无线光通信信道分析中常常忽略气体分子的吸收作用。大气对光波的吸收线谱如图 1 所示[5],在吸收带中的少数几个窗口中光的透过率较高,这些窗口称为“大气传输窗口”。在大气激光通信中,为了减小大气吸收造成的功率衰减,通常选取大气窗口中的波长作为通信载波。根据现有的激光器、光电检测器件技术,常用的波长主要有 850 nm 附近、1 550 nm 附近和 2.06 μm 附近等。在 FSO 系统中,选取了人眼安全的 1 550 nm 半导体激光器作为通信光源[4]。

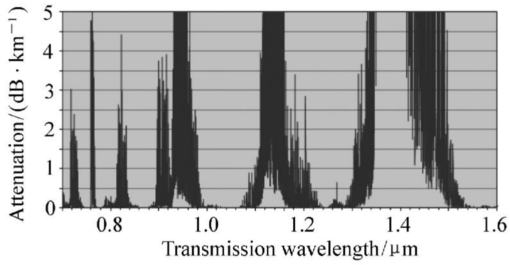


图 1 大气吸收谱线

Fig. 1 Atmospheric absorption spectrum

大气散射包括瑞利散射、米耶散射和几何散射。在 FSO 系统的常用波段,瑞利散射是由大气分子引起的。瑞利散射的体散射系数 $\sigma_m(\lambda)$ 如式(1)所示:

$$\sigma_m(\lambda) = \frac{8\pi^3(n^2-1)^2N}{3N_s^2\lambda^4}\cdot\frac{6+3\delta}{6-7\delta}, \quad (1)$$

式中:N 为单位体积内的气体分子数,N_s 为海平面处标准大气条件下单位体积内的气体分子数,δ 为散射的退偏振因子,n 为大气折射率。由式(1)可知,瑞利散射造成的功率衰减正比于 λ^{-4},因此波长越长瑞利散射的影响越小。在 FSO 系统中的常用波段,瑞利散射造成的功率衰减在总的信道衰减中所占的比重很小,因此一般忽略瑞利散射造成的影响。

大气中除了大气分子外还有大量直径在 0.03 和 2 000 μm 之间的固态和液态微粒,这些微粒称为大气气溶胶。气溶胶粒子尺度一般大于 FSO 载波波长或与波长相当,由其产生的散射为米耶散射。在近地大气,造成 FSO 系统功率衰减

的主要因素是米耶散射,其散射系数如式(2)所示:

$$\sigma_a = \sum_i N_i \pi r_i^2 Q_{(si)}(X_i, m) \ , \qquad (2)$$

式中,N_i为单位体积粒子 i 的粒子数,r_i为粒子 i 的半径,$Q_{s(i)}$为粒子 i 的散射效率,X_i是粒子 i 的相对尺度,m 是粒子的复折射率。在实际工程应用中,N_i难于实时获得,因此一般是用经验式(3)来计算米耶散射系数[7]:

$$\sigma_a = \frac{3.912}{V_M}\left[\frac{\lambda}{550\ \text{nm}}\right]^{-q}, \qquad (3)$$

式中,V_M为能见度,q 为以能见度为变量的经验常数,如式(4)所示:

$$q = \begin{cases} 1.6, & (V_M > 50\ \text{km}) \\ 1.3, & (6\ \text{km} < V_M < 50\ \text{km}) \\ 0.16V_M + 0.34, & (1\ \text{km} < V_M < 6\ \text{km}) \\ V_M - 0.5, & (0.5\ \text{km} < V_M < 1\ \text{km}) \\ 0, & (V_M < 50\ \text{km}) \end{cases} . \qquad (4)$$

当粒子的尺寸远大于载波波长或其相对尺度大于 50 时,其产生的散射为几何散射,并且可以用几何光学加以分析。几何散射的消光系数与光束波长无关,因此又称为非选择性散射。雨、雪、冰雹等造成的散射都属于几何散射[8],文献[9]详细给出了各种天气状况下的几何散射系数。

大气湍流造成大气折射率随时间和空间的随机变化,其对光载波的主要影响包括功率闪烁、光束漂移和散斑效应等[3,6]。弱湍流情况下,大气湍流对 FSO 系统造成的等效衰减由式(5)给出[10-11]:

$$\sigma_{scin} = 2\sqrt{1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}} \ , \qquad (5)$$

$$k = 2\pi/\lambda \ , \qquad (6)$$

式中,C_n^2 为大气折射率结构系数,L 为通信距离,k 为波数,由式(6)给出[12]。

在地面站 FSO 系统中,信道衰减主要包括上述的大气吸收衰减、大气散射衰减、大气湍流的等效衰减以及光束传输过程中的几何衰减 σ_g。当选用大气窗口中的波长时,大气吸收衰减可忽略不计,而大气散射中的瑞利散射衰减也可忽略不计,所以大气散射衰减主要为大气气溶胶的米耶散射衰减 σ_a 以及雨、雪、冰雹等造成的几何散射衰减 σ_{gs},因此信道总的衰减可由式(7)表示:

$$\sigma \approx \sigma_a + \sigma_{gs} + \sigma_{scin} + \sigma_g. \qquad (7)$$

由于大气信道的复杂性及其对系统可靠性的严重影响,FSO 系统的设计比光纤系统的设计更为复杂。在这种情况下,在 FSO 系统的设计中,必须针对大气信道特性对设计的硬件和通信协议进行专门的优化。

3　硬件结构

本文设计的 FSO 系统是一个基于 FPGA 的全双工点对点系统,每个通信终端由发送端和接收端构成,如图 2 所示。

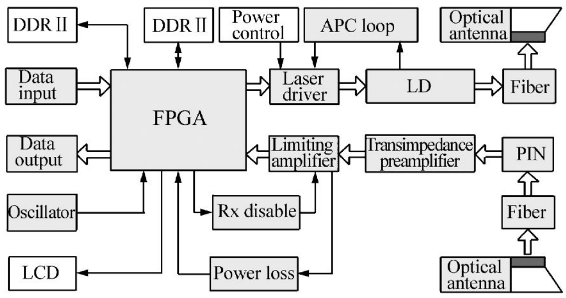


图 2　FSO 系统硬件结构

Fig. 2　Hardware structure diagram of FSO system

图 2 中,发送数据通过 8 位并口送入 FPGA 芯片,经芯片内部物理层协议的缓存、编码和串行化后输出至激光驱动模块。FPGA 芯片和激光驱动模块之间的数据接口为 LVDS 总线,该低摆幅差分总线的应用能够提高数据传输速度。接收端的信号链路与发送端相反。光学天线接收到的光信号经由引导光纤耦合至 PIN 光电管并转换为与光强成正比的微弱电流信号。该微弱电流经放大、变换、整形后通过 LVDS 接口送入 FPGA 芯片。在 FPGA 芯片内部,接收协议持续采样接收到的串行数据流,并对其进行解串行化。解串后的内容如果是命令,则协议执行该命令;如果是数据,则协议将该数据存入 FIFO 缓存,并通过 8 位并行总线与外部接口。

3.1 自动功率控制

发送端激光驱动模块如图3所示。为了防止温度改变和激光器老化造成的光功率漂移，在激光驱动模块的设计中必须考虑光功率的自动控制。

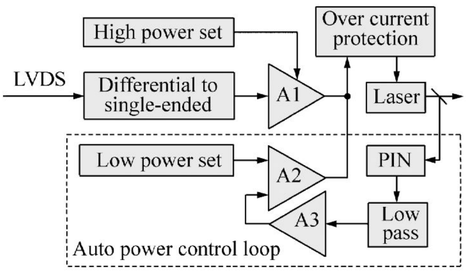


图3 激光驱动模块原理

Fig. 3 Laser driver module structure

在本文系统中，通过使用一个功率监控PIN管实现输出功率的稳定。激光功率输出由两部分组成—高功率和低功率。当输出为逻辑0时，光功率输出为低功率；当输出为逻辑1时，光功率输出为高功率和低功率的和。监控PIN管采集部分输出光，并将采集到的电信号送入低通滤波器，经放大后与“低功率预设值”进行比对，从而调整A2的输出，最终控制平均光功率稳定在预设值上。“低功率预设值”和“高功率预设值”由两个需求决定，一个是所需的输出功率，另一个是所需的消光比。使用这种方法实现平均光功率的稳定，必须保证输出高功率和低功率的概率相等，亦即数据流中出现逻辑0和逻辑1的概率相等，从而确保没有基线漂移情况发生。

3.2 信号放大与整形

接收端的信号放大与整形环节如图4所示。其主要由互阻放大器和限幅放大器构成。互阻放大器使用了MAX3665芯片，用于将PIN管生成的微弱电流信号转换成电压信号并移除信号中的直流成分。限幅放大器使用了MAX3748芯片，用于将微弱的电压信号放大并整形为LVDS接口信号。

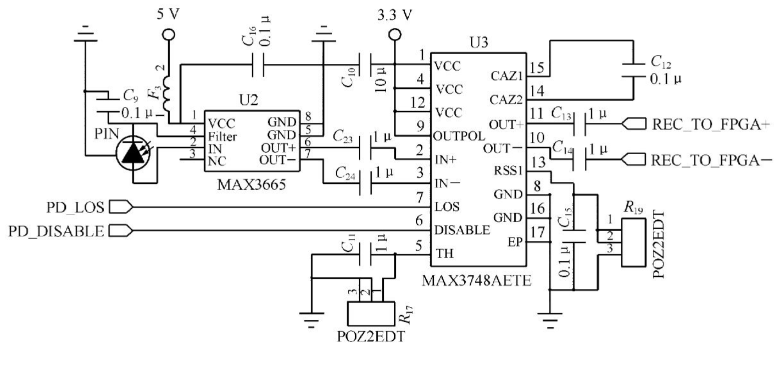


图4 信号放大与整形

Fig. 4 Signal amplifier and shaping

MAX3665芯片的直流移除环路通过使用低频反馈将PIN管电流的直流分量移除。该环路能够将净输入信号限制在芯片的动态范围之内，并减小大信号的脉宽畸变。但是另一方面，它却带来了基线漂移的问题。当数据流中出现长连0或长连1时，由于直流移除环路的存在，放大器将有用信号全部滤除，芯片输出零功率信号，其后端的限幅放大器将会输出功率丢失错误，而事实上PIN管已经检测到了信号，只是全部被互阻放大器滤除了。因此接收端同样要求收发协议保证光信号的高功率和低功率具有相同的输出概率。

3.3 物理层收发协议

物理层收发协议如图5所示。发送端协议主要完成系统与外界接口、输入数据缓存、数据流编码、串行化并输出串行数据至激光驱动模块。协议内部的输出管理单元用于管理协议各单元的运行。接收端协议主要完成接收数据流的同步、过滤、解串行化、解码、检错、异常处理并与外界接口等。整套物理层协议可以在单片FPGA芯片内实现，从而提高系统的集成度并降低系统成本。

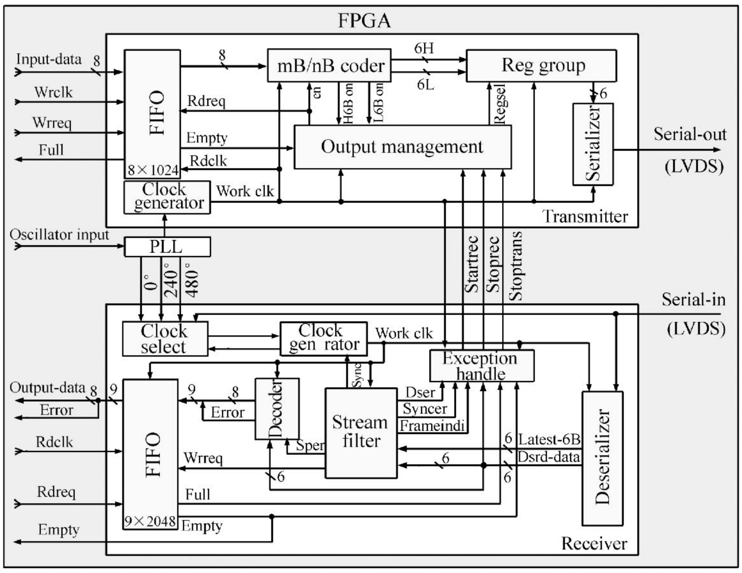


图 5　物理层协议结构

Fig. 5　Physical layer protocol structure

4　快速同步技术

大多数高速串行通信采用基于 PLL 的时钟数据恢复电路来生成同步采样时钟,这种方法对于具有稳定信道的串行链路来说具有很高的可靠性[2]。但是 PLL 需要很长的时间才能得到稳定的时钟输出,一般来说需要几百到几千数据位。对于大气 FSO 系统来说,信道可用率随环境会有很大的变化,尤其是天气对信道影响巨大。当信道可用率很低时,通信将会频繁失败,这种基于 PLL 的时钟生成方法将会占用大量的带宽用于协议间的同步,从而降低有效的数据带宽。

本文设计的物理层收发协议中,为了克服 PLL 过长的稳定时间,采用了多相位采样机制,在本地生成数据采样时钟。应用该方法,必须解决两个关键问题:一个是时钟与输入数据流的同步问题,另一个是收发两端频率漂移造成的时基误差。商用晶振通常具有 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 的频率误差,随着时间推移,还会有频率漂移,在异步通信中,如果采用本地晶振生成采样时钟,误码率性能不会优于收发双方的频率误差,失同步现象会频繁发生,浪费大量的有效带宽,如图 6 所示。为了消除这种频率误差带来的影响,本文采用多相位采样的方法,如图 7 所示,其中阴影部分为实际用于

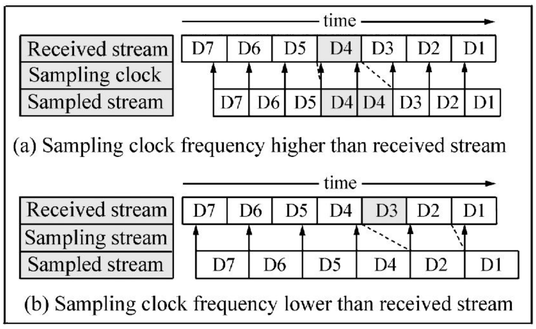


图 6　采样时钟误差

Fig. 6　Sampling frequency mismatch

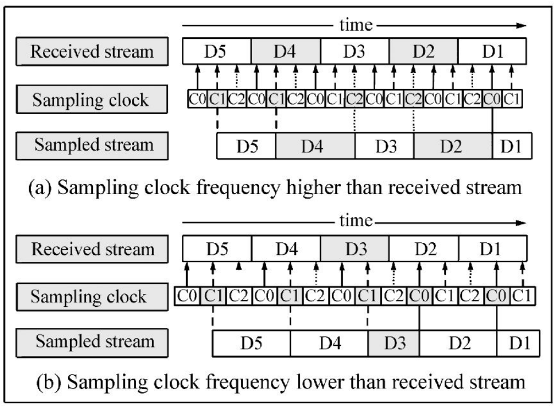


图 7　多相位采样

Fig. 7　Multi-phase sampling

时钟生成的时钟相位。

图8和图9给出了采样时钟生成的时序。

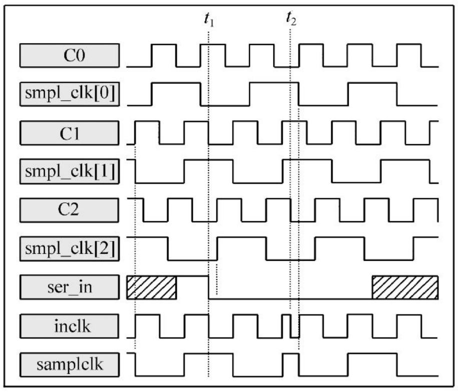


图8 采样时钟生成($f_R < f_T$)

Fig. 8 Sampling clock generation($f_R < f_T$)

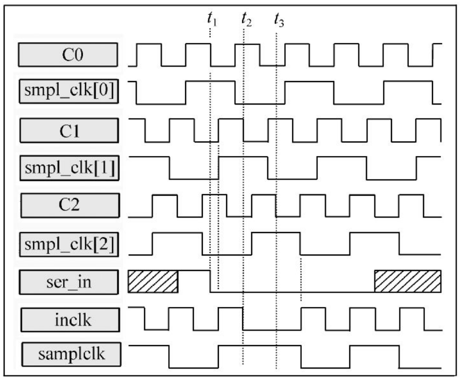


图9 采样时钟生成($f_R > f_T$)

Fig. 9 Sampling clock generation($f_R > f_T$)

Cn 为3个时钟相位,它们两两相差240度;smpl_clk[n]是由 Cn 生成的监测时钟,clk[n]是由 Cn 生成的监测时钟,它们两两相差120度;Ser_in 是输入数据流;Inclk 是用于生成实际采样时钟的相位;Smplclk 是最终生成的采样时钟。使用该方法,当收发双方的时钟误差在一定范围内时,将不会影响数据的准确传输,该时钟误差范围由式(8)给出,其中 f_R 为接收端时钟频率,f_T 为发送端时钟频率,$\max_{1s}$ 为数据流中可能出现的长连1的最大位数,$\max_{0s}$ 为数据流中可能出现的长连0的最大位数。

$$f_T \cdot \left[1 - \frac{1}{3(\max_{1s} + \max_{0s})}\right] < f_R < f_T \cdot \left[1 + \frac{1}{3(\max_{1s} + \max_{0s})}\right]. \quad (8)$$

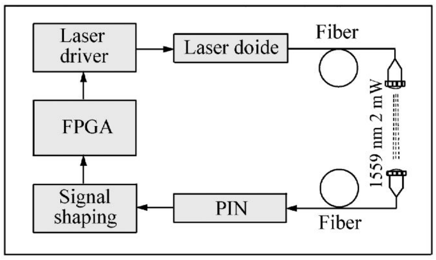


图10 测试实验硬件连接

Fig. 10 Hardware connection in verification

实验中,采用波长为1 550 nm 的半导体激光管为光源,输出载波经引导光纤耦合至光学镜头,输出峰值光功率为2 mW,采用 FPGA 为收发协议执行单元,对研究的快速同步技术进行了验证。该快速同步技术的关键方法是基于多相位时钟采样机制生成本地采样时钟,因此在验证过程中人为加入了收入两端的时钟偏差,当收发双方时钟频率分别为51.67和50 MHz 时,FPGA 内部采集到的同步时序如图11所示,图中关键时间点分别为:

172.5 s:当前使用的全局时钟为 C1,数据流中出现下降沿,之后第一个采样到下降沿的时钟为 smpl_clk[0],因此下一个应该选择的全局时钟仍为 C1;

196.5 s:当前使用的全局时钟为 C1,数据流中出现下降沿,之后,第一个采样到下降沿的时钟为 smpl_clk[1],因此下一个应该选择的全局时钟应为 C2;

203.5 s:开始将全局时钟由 C1 切换到 C2;

210.5 s:全局时钟已经切换到 C2;

213.5 s:此点说明此时的全局时钟已经为 C2,smplclk 也与 smpl_clk[2]同相。

图11中,生成的采样时钟 smplclk 始终与输入数据流 ser_in 相同步,采样边沿始终位于数据位中间位置附近,说明该时钟生成方法能够在接收端时钟频率低于发送端时钟频率时完成本地时钟的生成和对齐。

当收发双方时钟频率分别为48.44和50 MHz时,FPGA 内部采集到的同步时序如图12所示,与图11同理,图12证明了该时钟生成方法能够在接收端时钟频率高于发送端时钟频率时完成本地时钟的生成和对齐。

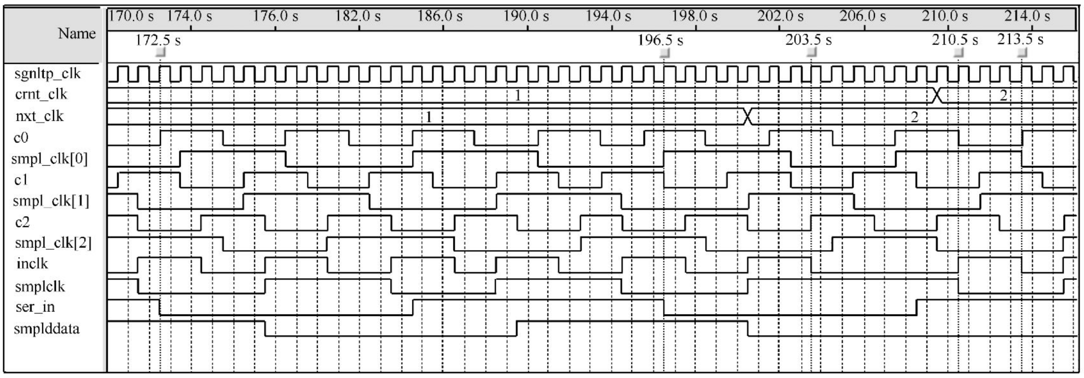


图 11　采样时钟生成实时逻辑波形($f_R=51.67$ MHz, $f_T=50$ MHz)

Fig. 11　Sampling clock generation working wave($f_R=51.67$ MHz, $f_T=50$ MHz)

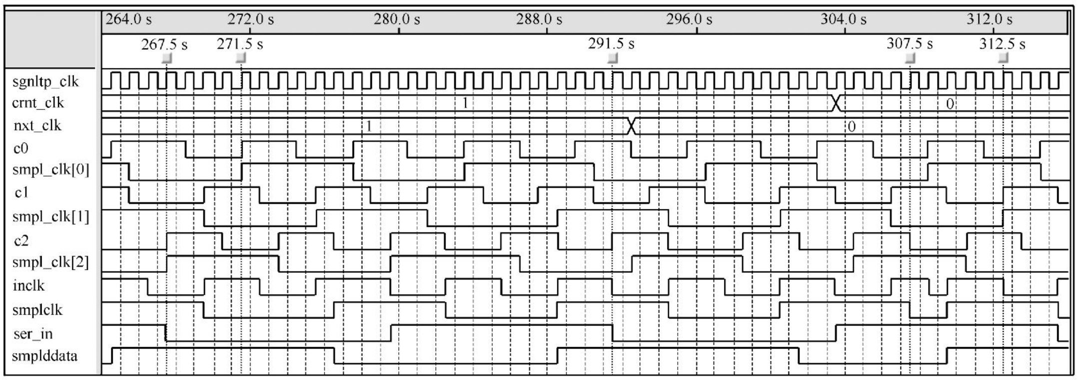


图 12　采样时钟生成实时逻辑波形($f_R=48.44$ MHz, $f_T=50$ MHz)

Fig. 12　Sampling clock generation working wave($f_R=48.44$ MHz, $f_T=50$ MHz)

因此,使用多相位时钟采样机制生成本地采样时钟的方法,只要能够解决收发两端频率偏差问题和时钟对齐问题,是能够应用于地面站间 FSO 通信。由于采样时钟在本地生成,只要接收到任何一个数据跳变沿(本文为下降沿),就能够完成时钟和数据的同步,而不像基于 PLL 的时钟生成方法那样需要较长的时钟稳定时间,这样就加快了链路失败后的再同步过程,从而减少通信频繁中断时的带宽浪费,是一种应用于 FSO 通信时钟生成的可行方法。

5　结　论

本文介绍了 FSO 系统的硬件结构,阐述了 FSO 物理层收发协议的构架,验证了使用本地时钟生成数据采样时钟从而提高 FSO 系统同步速度的可行性,给出了具体的实现方法以及该方法的使用条件。该硬件系统和收发协议在 100 Mbps 测试条件下能够完成收发端的快速同步,同步速度优于两个编码符号。实验证明,使用多相位采样机制是一种切实可行的 FSO 同步方案,解决了本地时钟和数据流的同步问题,消除了收发两端频率误差带来的影响,实现了 FSO 链路的快速同步,降低了同步过程的带宽浪费,提高了同等信道可用率下的等效数据带宽。

参考文献:

[1]　徐晓静,元秀华,黄德修.影响激光大气通信距离的诸因素分析[J].光学 精密工程,2002,10(5):493-496.

XU X J,YUAN X H,HUANG D X. Analysis on influencing factors to FSO communication distance[J]. *Opt. Precision Eng.*,2002,10(5):493-496.(in Chinese)

[2] 顾海军,宋建中,解成俊.机动式大气激光通信系统中的电学系统接口设计及其CPLD实现[J].光学 精密工程,2001,9(1):24-27.

GU H J,SONG J ZH,XIE C J. Electronic interface design and CPLD implementation for mobile FSO system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2001,9(1):24-27.(in Chinese)

[3] 王俊波,盛明,谢秀秀,等.强湍流下并行中继自由空间光通信的中断分析[J].光学 精密工程,2012,20(4):745-751.

WANG J B,SHENG M,XIE X X,*et al.*. Outage analysis for parallel relay free-space optical communication in strong turbulence[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(4):745-751.(in Chinese)

[4] KIM I I,MCARTHUR B,KOREVAAR E. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications[J]. *SPIE*,2001,4214:26-37.

[5] BLOOM S,KOREVAAR E,SCHUSTER J,*et al.*. Understanding the performance of free-space optics[J]. *J. Optical Networking*,2003,2(6):178-200.

[6] REN Y X,DANG A H,LUO B,*et al.*. Capacities for long-distance free-space optical links under beam wander effects[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2010,22(14):1069-1071.

[7] PEREZ J. Ethernet FSO communications link performance study under a controlled fog environment[J]. *IEEE Communications Letters*,2012,16(3):408-410.

[8] SURIZA A Z,WAJDI A K,MD R I,*et al.*. Preliminary analysis on the effect of rain attenuation on Free Space Optics(FSO) propagation measured in tropical weather condition[C]. IEEE IconSpace,Penang,Malaysia,12-13 July 2011:96-101.

[9] ZABIDI S A,KHATEEB W A,ISLAM M R,*et al.*. The effect of weather on free space optics communication(FSO) under tropical weather conditions and a proposed setup for measurement[C]. IEEE ICCEC,Kuala Lumpur,Malaysia,11-12 May 2010:1-5.

[10] ZHAO L L,WANG T F,SUN W T,*et al.*. Protocol design for free space optical communication[J]. *Chinese Optics*,2011,4(6):639-647.

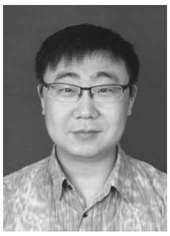
[11] 刘杰,陈涛,王建立,等.无线激光通信在高速视频传输中的应用[J].中国光学,2010,3(3):290-295.

LIU J,CHEN T,WANG J L,*et al.*. Application of wireless laser communication to high speed video transmission[J]. *Chinese Optics*,2010,3(3):290-295.(in Chinese)

[12] 穆赫辛·凯夫拉德,元秀华.光无线技术及其应用[J].光学与光电技术,2013,11(2):1-7.

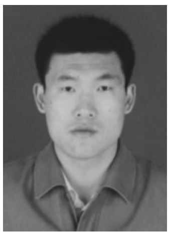
KAVEHRAD M,YUAN X H. Optical wireless technology and applications[J]. *Opt. Optoelectronic Technologys*,2013,11(2):1-7.(in Chinese)

作者简介:



王　旭(1979—),男,吉林德惠人,本科,工程师,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail:www_wx@hotmail.com

王弟男(1955—),男,吉林长春人,高级工程师,主要从事电子学总体设计、船载光电测控设备、舰载光电对抗设备方面的研究。E-mail:wangdinan926@sina.com



王挺峰(1977—),男,山东文登人,博士,研究员、硕士生导师,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光应用方面的研究。E-mail:wtfeng@sina.com

王化龙(1981—),男,吉林通化人,博士,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光主动照明、大气光通信方面的研究。E-mail:qhelie@163.com