

•激光技术•

基于信道特征和中心极限定理的大气激光通信帧同步算法

孙 韩,郝士琦,张 岱,赵青松,王 勇,王 磊,赵 琦

(电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室,合肥 230037)

摘 要:针对大气激光通信中的帧同步问题,分别基于信道特征和中心极限定理,提出了两种帧同步识别算法。首先分析了大气激光通信的信道特征并建立了相应的信道模型;随后利用此模型,对输出电平矩阵每一列的数据分布情况进行了讨论,提出了基于信道特征的帧同步算法;最后,针对输出电平矩阵帧数较少的情况,从输出电平矩阵和值的概率分布情况出发,提出了基于中心极限定理的帧同步算法。仿真结果表明,基于信道特征的帧同步算法在帧数较多的情况下性能较好,当信道比达到6 dB时帧同步识别率可达到100%,但是,随着帧数的减少,其帧同步识别率迅速下降;而基于中心极限定理的帧同步算法性能受帧数影响较小,在信噪比大于7 dB时,即使帧数下降到20,其帧同步识别率仍可达到100%,具有良好的帧同步性能。

关键词:大气激光通信;帧同步;信道特征;中心极限定理

中图分类号:TN929.1

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2016)-05-0012-05

Frame Synchronization Algorithm for Atmospheric Laser Communication Based on Channel Characteristics and Central Limit Theorem

SUN Han, HAO Shi-qi, ZHANG Dai, ZHAO Qing-song, WANG Yong, WANG Lei, ZHAO Qi

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: In view of the problem of frame synchronization in atmospheric laser communication and based on channel characteristics and central limit theorem, two kinds of frame synchronization recognition algorithms are proposed. At first, the atmospheric laser communication channel characteristics are analyzed and the corresponding channel model is established. And then, followed by this model, the data distribution of the output level matrix for each column is discussed, and the frame synchronization algorithm based on the channel characteristics is proposed. At end, aiming at less numbers of matrix frames of the output level, from the probability distribution of the sum value of the output level matrix, the frame synchronization algorithm based on the central limit theorem is proposed. The simulation results show that the performance of the frame synchronization algorithm based on channel characteristics is great on the condition of more number of frames. When SNR reaches 6 dB, the frame synchronous recognition rate can reach 100%, and when the frame number getting small, the frame synchronous recognition rate decreases rapidly. But the number of frames has little effect on the performance of the frame synchronization algorithm based on the central limit theorem. When the SNR is more than 7 dB, even if the number of frames drops to 20, the frame synchronous recognition rate can still reach 100%, which has better frame synchronous performance.

Key words: atmosphere laser communication; frame synchronization; channel characteristic; central limit theorem

在大气激光通信中,数据是以帧的格式进行发送和接收的。帧同步的功能就是指接收器识别接

收发送器发送的数据序列,从接收比特流中提取帧头和帧尾信息,判断帧数据的起始与结束,从而确

收稿日期:2016-08-02

作者简介:孙韩(1992-),男,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为大气激光通信。

定接收数据具体的帧结构的过程^[1]。目前为了实现帧同步功能一般有两种方法^[2]:一种方法是在信息流中插入特殊码组作为每帧的标记,接收端根据这些特殊标记实现帧同步;另一种方法是利用数字码组自身的特性进行同步。

文献[3]、文献[4]提出了一种在多径信道下利用编码辅助实现帧同步的算法;文献[5]、文献[6]从编码的校验关系出发,利用软信息设计了一种QC-LDPC编码系统的帧同步算法;文献[7]改进了传统算法,通过单帧判断同步位置的做法,利用多帧数据进行分析,在一定程度上减少了同步识别的模糊性;文献[8]~文献[10]利用编码辅助信息提出了期望最大化等算法。这些算法很好地解决了单一数据编码方式下数据的帧同步问题,但是对编码方式可变的大气激光通信自适应系统而言,不同的校验矩阵对应的约束关系不同,上述算法的适用性受到限制。

考虑上面的因素,从大气激光通信的信道特点入手,建立了大气激光通信信道模型;利用此模型,对输出电平矩阵每一列的数据分布情况进行了讨论,提出了相应的帧同步算法;特别地,针对输出电平矩阵帧数较少的情况,从输出电平矩阵和值的概率分布情况出发,提出了基于中心极限定理的帧同步算法。

1 基本原理

1.1 数据帧的基本结构

大气激光通信中的数据是按照一定的帧格式进行传输的,典型的帧结构简化模型如图1所示。每一帧包括帧头部分和数据部分,长度分别为 L 与 $N-L$ 。在发射端用 $s=(s_1, s_2, s_3, \dots, s_L)$ 表示同步码字序列,用 $d=(d_{L+1}, d_{L+2}, d_{L+3}, \dots, d_N)$ 表示数据序列。应当指出,对于不同的帧,同步码字序列一般具有固定性,而数据序列一般是随机的。

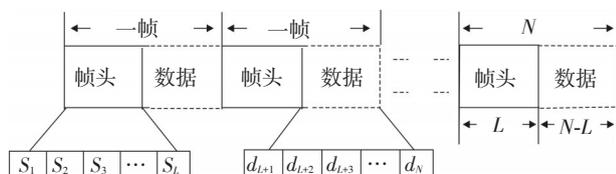


图1 帧结构简化模型

1.2 大气激光通信信道模型

大气激光通信系统主要受到大气衰减和大气湍流的影响。大气衰减效应使得激光在传输主轴方向上的辐射强度受到很大衰减;强湍流引起的光强起伏会造成较大的误码率和短时间通信中断,严重影响光通信的稳定性和可靠性^[11]。对于每一帧数据,经过大气信道后用光电探测器得到的输出电平用 $r=(r_{s,1}, r_{s,2}, \dots, r_{s,L}, r_{d,L+1}, r_{d,L+2}, \dots, r_{d,N})$ 表示,在大气激光通信OOK调制下,有下式

$$r = \begin{cases} \eta \alpha I_0 + n & \text{with signal} \\ n & \text{no signal} \end{cases} \quad (1)$$

其中, I_0 为无湍流情况下接收到的光功率; n 是光电转换过程以及接收机电路等系统引入的加性噪声,近似服从均值为0,方差为 σ^2 的高斯分布; η 为接收机电光转换效率; $\alpha=I/I_0$ 是光强起伏造成的乘性噪声,在弱湍流条件下服从对数正态分布^[12],此时 α 的概率密度函数为

$$\rho(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_t \alpha} \exp \left[-\frac{\left(\ln \alpha + \frac{1}{2} \sigma_t^2 \right)^2}{2\sigma_t^2} \right] \quad (2)$$

在强湍流条件下服从K分布^[13-14],此时 α 的概率密度函数为

$$\rho_\alpha(\alpha) = \frac{2t^{\frac{t+1}{2}}}{\Gamma(t)} \alpha^{\frac{t+1}{2}} K_{t-1}(2\sqrt{t\alpha}), \alpha > 0 \quad (3)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为gamma函数, $K_{t-1}(\cdot)$ 是 $t-1$ 阶第二类贝塞尔函数。 t 是与闪烁指数 σ_t 有关的信道参数,表达式为

$$t = 2/(\sigma_t^2 - 1) \quad (4)$$

σ_t 是Rytov方差,在平面波条件下满足

$$\sigma_t^2 = 1.23k^{7/6} L^{11/6} C_n^2 \quad (5)$$

式中, k 是波数; L 为传输距离; C_n^2 是大气折射率结构常数。

2 帧同步算法

2.1 基于信道特征的帧同步算法

为方便起见,举一具体实例进行说明。如图2所示,假设发送端数据帧长为100,帧同步码序列为13位巴克码[1,1,1,1,1,0,0,1,1,0,1,0,1],即图中虚线框中所示部分;数据部分长度为87,即图中实线框

中所示部分。

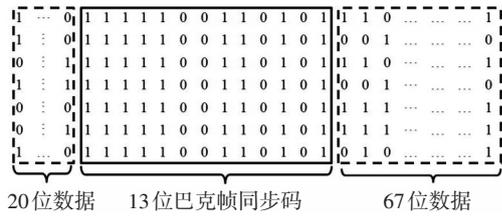


图2 数据矩阵示意图

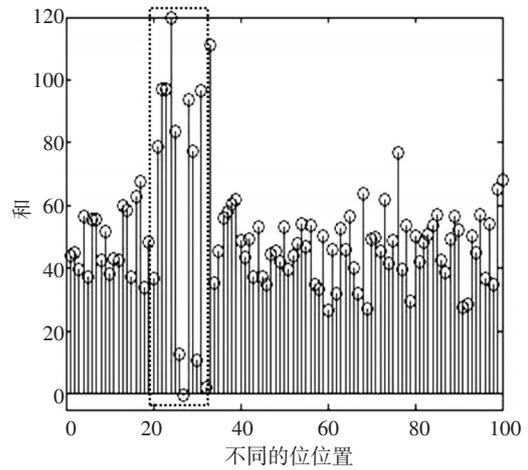
从图2中可以很明显看出,帧同步码序列具有固定性,而数据部分具有随机性。对于帧同步码来说,数据矩阵中相同的列对应的元素相同,为0或1;对于数据部分来说,数据矩阵中相同的列对应的0和1元素均匀分布。

由1.2节中的知识,对于发送数据,在接收端得到的输出电平值为

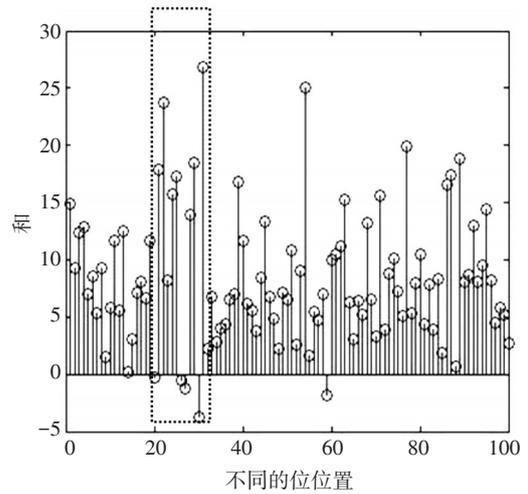
$$r = \begin{cases} \eta\alpha I_0 + n & \text{with signal} \\ n & \text{no signal} \end{cases} \quad (6)$$

那么对于帧同步码中0元素或1元素来讲,由于其在发送数据矩阵中所在列的位置相同,因此,参照1.2节中大气激光通信的信道分布特点,对应的列中的元素都应服从 $r=n$ 或 $r=\eta\alpha I_0 + n$ 分布;而对于随信息数据的部分来说,由于数据的随机性,对应列中的元素等概率也服从不同的分布规律。自然想到,对于帧同步码所在列和随机数据所在列来讲,其每列对应的输出电平均值是不同的:即对于帧同步码中1元素所在列其输出电平均值最高,帧同步码中0元素所在列其输出电平均值最低,而随机数列所在列其输出电平均值应位于两者之间。记数据矩阵每列对应的输出电平求和值为 $S = s_1, s_2, \dots, s_n (n = 1, 2, \dots, 100)$, 图3分别给出了针对图2所示的帧同步位置时帧数分别为100和20时各列输出电平的求和值示意图。

由图3可以看出,当可获得的数据矩阵帧数达到100帧时,帧同步码中的全“0”或者全“1”码对应的求和值有明显的不同,可以轻易的从数据矩阵中找出帧同步码的起始和结束位置,如图3a所示;但当帧数下降到20时,由于数据量较少,数据矩阵中每一列的数据统计特性没有充分显现出来,帧同步码被混杂到数据数据矩阵中难以分开,如图3b所示,这时需要新的算法实现帧同步。



(a) 帧数为100



(b) 帧数为20

图3 不同帧数的输出电平矩阵求和情况

2.2 基于中心极限定理的帧同步算法

对于均值为 μ , 方差为 $\sigma^2 > 0$ 的独立同分布随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n , 且 $E(X_k) = \mu, D(X_k) = \sigma^2 > 0 (k = 1, 2, \dots)$, 其标准化变量定义为

$$Y_n = \frac{\sum_{k=1}^n X_k - n\mu}{\sqrt{n\sigma^2}} = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (7)$$

当 n 充分大时, 有 $Y_n \sim N(0, 1)$, 或者 $X_n \sim N(\mu, \sigma^2/n)$ 。那么, 在数据矩阵中, 对于帧同步码的每一个“0”元素其对应的输出电平 X_1, X_2, \dots, X_{20} 来讲服从分布 $X_k = n$, 即 $E(X_k) = 0, D(X_k) = \sigma^2 > 0 (k = 1, 2, \dots, 20)$, 则 $X_n \sim [N(0, \sigma^2/20)]$ 。由

正态分布的概率密度图可知,当随机变量 X_n 服从均值为 μ , 方差为 $\sigma^2/20$ 的正态分布时, X_n 落在区间 $(\mu - 3\frac{\sigma}{\sqrt{20}}, \mu + 3\frac{\sigma}{\sqrt{20}})$ 的概率为 99% 以上。若将求和值判定阈值设定为 $T = 20(\mu + 3\frac{\sigma}{\sqrt{20}})$, 那么当 $sum \geq T$, $s_i = 1$; 否则, $s_i = 0$ 。最后在序列 S 中找出帧同步码的起始与结束位置, 即完成了帧同步的过程。

3 仿真结果与分析

在本节中利用 Matlab 软件, 通过 1 000 次蒙特卡洛仿真来对帧同步算法的性能进行仿真。图 4a、图 4b 分别给出了基于信道特征和中心极限定理的帧同步算法在码长为 200, 帧同步码为 13 位巴克码情况下, 不同帧数时的识别性能示意图。

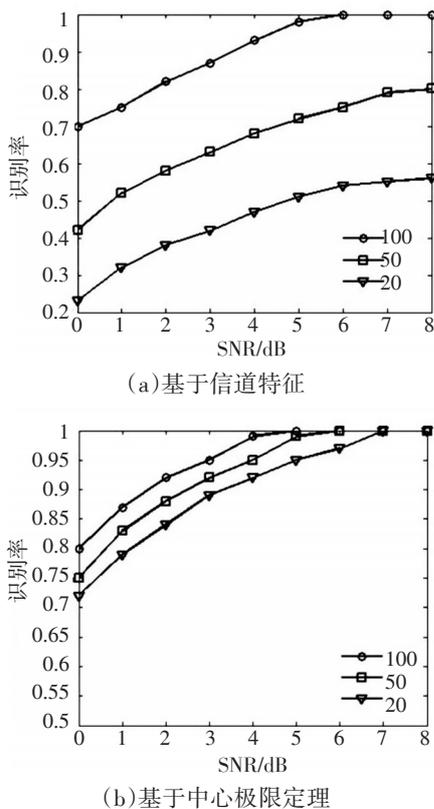


图4 不同算法的帧同步识别率

其中,从图 4a 中可以看出,基于信道特征的帧同步算法在帧数较多的情况下性能较好,当信道比达到 6 dB 时帧同步识别率可达到 100%;但是,随着

帧数的减少,其帧同步识别率迅速下降,在信噪比达到 8 dB 时识别率仍小于 60%,这是由于帧数减少,数据信道特征不显著所造成的。从图 4b 中可以看出,基于中心极限定理的帧同步算法性能受帧数影响较小,在信噪比大于 7 dB 时,即使帧数下降到 20,其帧同步识别率仍可达到 100%,这说明了算法有效性。

图 5 给出了基于中心极限定理的帧同步算法在不同长度帧同步码情况下的识别性能示意图。

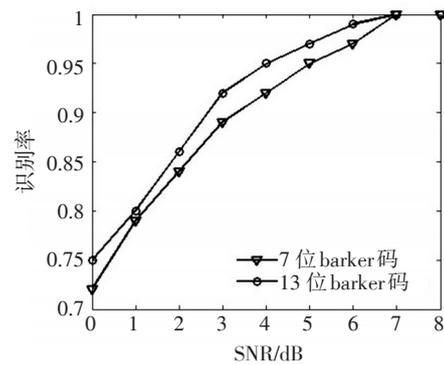


图5 不同长度帧同步码的识别率

从图中可以看出,不同长度的帧同步码对应的帧同步识别率差别不大,算法具有通用性。

4 结论

通过对大气激光通信信道模型的建立,对输出电平矩阵每一列的数据分布情况进行了讨论,针对输出电平矩阵帧数较多的情况提出了基于信道特征帧同步算法;针对输出电平矩阵帧数较少的情况提出了基于中心极限定理的帧同步算法。仿真结果表明,两种帧同步算法在各自适用条件下均具有良好的帧同步识别性能,可为未来大气激光通信帧同步问题提供参考。

参考文献

- [1] 陆凯,张旻,李歆昊.一种有效的等帧长帧同步盲识别方法[J].火力与指挥控制,2015(9):68-71.
- [2] 白戛,杨晓静,王懋.基于相关滤波和哈达玛变换的帧同步码识别[J].探测与控制学报,2011,33(3):69-72.
- [3] Jakubisin D J, Buehrer R M. Performance, complexity and receiver design for code-aided frame synchronization in multipath channels[J]. IEEE Transactions on Communi-

- cations, 2015, 63(9):3363-3376.
- [4] Jakubisin D, Buehrer R M. On the complexity- performance trade-off in code-aided frame synchronization[C]// IEEE, International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2014:364-368.
- [5] Chen Z, Yuan J. A code-aided soft frame synchronization algorithm for quasi-cyclic LDPC coded system[C]// International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, IEEE, 2009:1-4.
- [6] Imad R, Houcke S. Theoretical analysis of a MAP based blind frame synchronizer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(11):5472-5476.
- [7] Bastaki E, Tan H H, Shi Y, et al. Frame synchronization based on multiple frame observations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(3):1097-1107.
- [8] Wymeersch H, Moeneclaey M. Iterative code-aided ML phase estimation and phase ambiguity resolution[J]. Eurasip Journal on Applied Signal Processing, 2005, 2005(6):981-988.
- [9] Zhang H, Huang W, Wang Z, et al. Code-aided frame synchronization and phase ambiguity resolution[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(7):2747-2757.
- [10] Herzet C, Wymeersch H, Simoens F, et al. MAP-based code-aided hypothesis testing[J]. Wireless Communications IEEE Transactions, 2008, 7(8):2856-2860.
- [11] 易湘, 岳鹏, 刘增基, 等. 基于分集接收技术的相干大气激光通信系统性能分析[J]. 光电子·激光, 2012, 23(9):1743-1748.
- [12] YAO Qing-han, DANG An-hong, REN Yong-xiong, et al. Theoretical and experimental studies of turbo product code with time diversity in free space optical communication[J]. Optics Express, 2010, 26(18):26978-26988.
- [13] Theodoros A Tsiftsis, Harilaos G Sandalidis, George K Karagiannidis. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transaction on Wireless Communication, 2009, 8(2):951-957.
- [14] NIU Ming-bo, CHENG Ju-lian, Jonathan F Holzman. Exact error rate analysis of equal gain and selection diversity for coherent free-space optical systems on strong turbulence channels[J]. Optics Express, 2010, 18(13):13915-13926.

(上接第7页)

- 2006, 73(4):047201-4.
- [8] Rogister F, Roy R. Spatiotemporal chaos synchronization in a large array of locally coupled nonidentical lasers[J]. Laser Phys, 2005, 15(2):313-319.
- [9] Aviad Y, Reidler I, Kinze W, et al. Phase synchronization in mutually coupled chaotic diode lasers[J]. Phys Rev E, 2008, 78(2):025204-4.
- [10] Haken H. Analogy between higher instabilities in fluids and lasers[J]. Phys Lett A, 1975, 53(1):77-78.

(上接第11页)

- dium and low frequency underwater acoustic signals detecting with laser interferometry[J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 2009, 20(9):1189-1192.
- [6] Anthony D Matthews, Lisa L Arrieta. Acoustic optic hybrid (AOH) sensor [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(3):1089-1093.
- [7] CUI Gui-hua, LI Rong-fu, TIAN Zuo-xi. Study on laser-based remote sensing of underwater acoustic signals[J]. Ship and Marine Science & Technology, 2002, 24(1):46-50.
- [8] Antonelli Lynn, Blackmon Fletcher. Experimental demonstration of remote, passive acousto-optic sensing[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(6):3393-3403.
- [9] QIN Hui-ping, ZHOU Tian-hua, ZHANG De-kun. Study on laser-based underwater acoustic signal detection technologies[J]. Infrared, 2005, 26(8):25-28.
- [10] ZHANG Xiao-lin, TANG Wen-yan, DUAN Hai-peng. Under-water acoustic signals detecting with laser interferometry[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2009, 35(1):53-56.
- [11] ZHANG Xiao-lin, TANG Wen-yan, SUN He-yi. Laser interferometry of underwater acoustic signals[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4):809-815.