

无线激光通信系统弱光干扰技术

陈 静¹ 薛海中^{1,2} 刘学文² 魏龙超² 张芳沛²

(¹ 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071
² 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450017)

摘要 为了探求对无线激光通信最有效、最实用的干扰方式, 针对目前应用范围最广泛的强度调制/直接检测无线激光通信系统, 采用理论分析、仿真和实验相结合的方法详细地研究了无线激光通信系统的弱光干扰的原理和条件, 验证了弱光干扰的可行性, 发现其干扰现象主要表现为误码率升高。同时, 研究了干扰光的不同重复频率、功率和占空比对采用不同通信体制、速率、发射功率等设计的无线激光通信系统产生的不同的干扰原理和现象。发现了同步通信与异步通信因其不同的时钟体制造成的弱光干扰差异, 同步通信主要发生“比特干扰”和“时钟恢复干扰”, 异步通信系统主要发生“起始位干扰”和“数据位干扰”。由于异步通信中帧结构和编码都较为简单, 与同步通信相比更易受到干扰光的影响, 受到干扰的程度更为严重。

关键词 光通信; 激光干扰; 强度调制/直接检测; 时钟篡改; 误码率

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0106005

Low-Power Laser Jamming Techniques to Free Space Optical System

Chen Jing¹ Xue Haizhong^{1,2} Liu Xuewen² Wei Longchao² Zhang Fangpei²

(¹ Department of Technology Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China
² 27th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou, Henan 450047, China)

Abstract The intensity modulation direct detection (IM/DD) is widely used for the free space optical (FSO) system currently. In order to explore the most effective and the most practical way to jam the FSO systems, the principle and efficiency of how the low power laser jams the FSO system is researched by using theoretical analysis, simulation and experiment. The feasibility of low-power laser jamming is validated. The jamming phenomenon is mainly manifested as bit error rate increases. At the same time, different principles and phenomena affect by different repetition rates, power and duty cycle of jamming laser on wireless laser communication systems with different communication systems, rates, transmitting power are studied. Because of their different clock systems, synchronous and asynchronous communications have different principles and phenomena. Synchronous communication mainly occurs in the "bit interference" and "clock recovery interference", asynchronous communication system mainly occurs "start bit interference" and "data bit interference." Asynchronous communication that has simple frame structure and coding relatively from synchronous communication can be influenced more easily and serious.

Key words optical communications; laser jamming; intensity modulation/direct detection; clock tampering; bit error rate

OCIS codes 060.2605; 140.3330; 350.1820; 350.4600

1 引 言

大气激光通信凭着通信容量大、速率快、保密性

好、灵活方便和无须频率许可等优点, 已成为深空、星-地、星-星和局域网等领域的一种重要的通信方

收稿日期: 2011-07-18; **收到修改稿日期**: 2011-09-19

基金项目: 国家 863 计划(2006AA12Z144)资助课题。

作者简介: 陈 静(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事无线激光通信与激光干扰等方面的研究。

E-mail: chenbaobaoguai@126.com

导师简介: 薛海中(1960—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要从事光电技术及其应用等方面的研究。

E-mail: information27@126.com

式^[1~4],其应用范围和领域也在不断扩展。研制无线激光通信系统激光干扰技术可在现代战争通信对抗中占据有利地位,是现代光电对抗领域必不可少的重要技术之一。

激光有源干扰目前主要以压制式激光干扰为主,主要是以损伤光电探测器和硬摧毁为目的^[5~8],但由于所需的激光功率很高,同时无线激光通信系统的接收视场又非常小,使其进入接收视场的实现难度很大。而采取利用周围的物体反射或散射的方法进入接收机视场的弱光干扰技术,所需干扰光功率较小,实现难度低,可行性更大,在实际对抗中更具有应用价值。但目前对于弱光干扰技术的研究却鲜见报道。同时,目前激光干扰的研究主要还处于单点突破阶段,只考虑对各种单一光电探测器的研究和分析^[9~12],很少考虑激光干扰对整个无线激光通信系统的影响。

本文以无线激光通信系统中使用最早、应用最广泛的强度调制/直接检测(IM/DD)通信体制为例,详细地分析和仿真了弱光干扰无线激光通信系统的工作原理和干扰条件,提出了弱光干扰的概念。利用自主研发的同步和异步无线激光通信系统,采用不同调制重复频率、不同占空比的各种干扰光源进行了多次激光干扰实验。

2 无线激光通信弱光干扰原理分析

实现无线激光通信的弱光干扰要求采用与通信信号光波长相同或接近的激光作为干扰光源,这样干扰光才可以顺利地通过接收机窄带滤光片与信号光同时进入光电探测器。同时,要求干扰光的频率在接收机带宽范围内,功率在脉冲时间内的积分超过设定的判决阈值。这样接收机无法剔除干扰光,对于IM/DD通信系统,光电探测器输出的电信号与干扰光和信号光的功率之和成正比,这是实现弱光干扰无线激光通信系统的先决条件。

假设干扰信号为 $n_T(t)$,则接收端接收到的信号在1个码元内的表达式为

$$y_T(t) = \begin{cases} A\cos \omega_c t + n_T(t) \\ n_T(t) \end{cases}, \quad (1)$$

则通信系统信噪比为

$$r = \frac{A^2}{2\sigma_n^2}, \quad (2)$$

式中 σ_n 为带有干扰信号的方差,通信系统误码率为

$$R_{BE} = \frac{1}{2} \exp(-r/4). \quad (3)$$

可见,当有干扰光进入接收系统会导致系统信噪比降低,误码率随着信噪比的降低而升高,使传输的图像变形,传输的数据出现错误,这是弱光干扰无线激光通信系统的主要外在表现。

对于不同通信体制、通信速率的无线激光通信系统和干扰光的不同种类和参数,其内在的干扰原理是不同的。弱光对无线激光通信系统最基本的干扰是“比特干扰”,它几乎可以发生在各种无线激光通信体制中。其基本原理是干扰光脉冲出现在信号光比特“0”的判决时刻,当干扰脉冲的积分超过判决阈值,则导致判决器将比特“0”误判为比特“1”,产生位判决错误,“10100”被误判为“11101”,如图1所示。

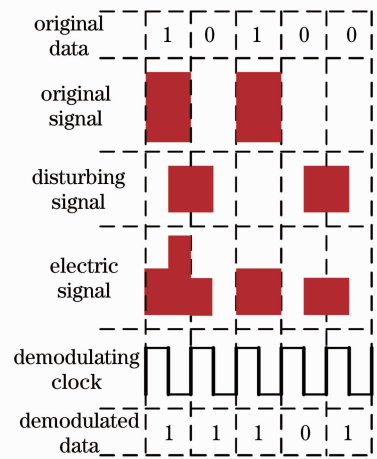


图1 比特干扰原理示意图

Fig. 1 Illustration of bit jamming

同步通信和异步通信以其不同的时钟方式,其弱光干扰原理和现象也有所不同。

2.1 同步通信弱光干扰原理

同步数字通信系统中,光电探测器输出的信号经均衡、放大后分为两路,一路输入时钟恢复电路用来恢复时钟,一路输入判决器进行判决。因此,干扰光对同步数字通信系统的干扰可能出现两种情况,即判决器产生“比特干扰”和时钟恢复电路产生“时钟恢复干扰”。

1) 比特干扰

根据错误比特在每帧数据中出现的位置不同可以分为两种情况:一是出现在帧同步头位置,导致帧同步头无法被还原,从而出现丢帧现象;二是出现在数据位位置,出现数据位错误,称为“数据位干扰”。

2) 时钟恢复干扰

时钟恢复是同步通信中的关键环节,一般而言,时钟恢复采取锁相环检测并控制本地时钟的相位与接收信号一致,如果连续 N 个本地时钟信号的相位

均超前或滞后于接收信号,锁相环即进行相位调整,调整的结果为使本地时钟信号与接收信号同步^[13,14],这是实现时钟恢复干扰的条件。

对不同重复频率的干扰光干扰时钟恢复的过程进行仿真分析,首先利用随机数产生器产生码速率为64 kb/s的非归零码(NRZ)的原始信号光(original signal),利用方波产生器生成占空比为

50%,重复频率分别为(a)10 kHz,(b)64 kHz,(c)80 kHz和(d)200 kHz的干扰光(disturbing signal)。仿真过程如图2所示,图中,“synthesized signal”是光电探测器输出的信号光与干扰光的合成信号,“clock signal”为接收机的本地时钟信号,“output signal”为同步判决后的输出信号。

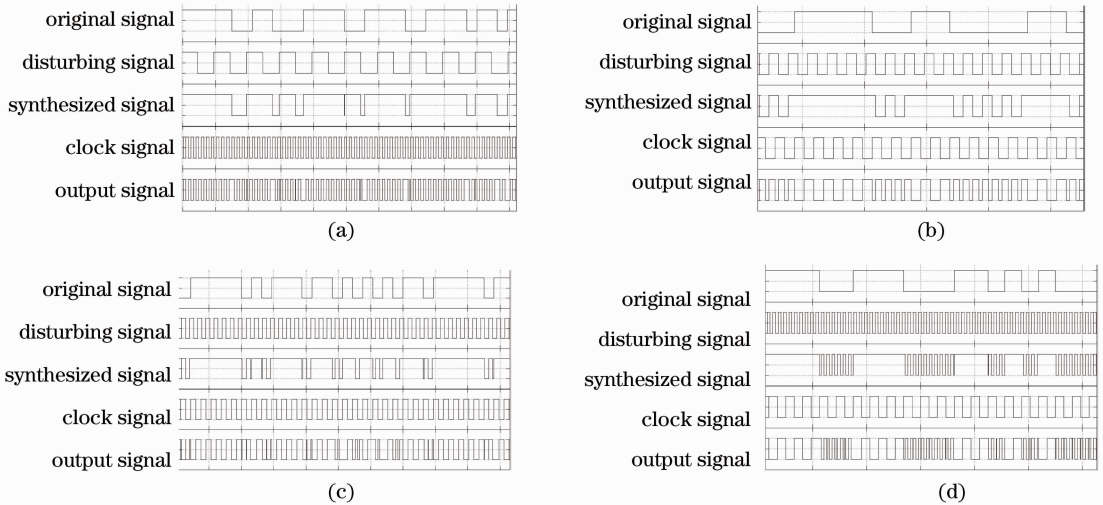


图2 时钟恢复干扰过程仿真结果。(a) 10 kHz; (b) 64 kHz; (c) 80 kHz; (d) 200 kHz

Fig. 2 Simulation result of laser jamming the clock tampering. (a) 10 kHz; (b) 64 kHz; (c) 80 kHz; (d) 200 kHz

由仿真结果可以看出:

1) 当干扰光重复频率为10 kHz时,“synthesized signal”出现连“1”和连“0”的情况增加,鉴相器输出的相位差信号短期不连续且相位差不固定,时而输出超前信息,时而输出滞后信息。在此种情况下,锁相环不会进行时钟调整操作,基于未被干扰的本地时钟进行判决输出的数字电平信号与原始信号序列将会出现大量不一致的比特,干扰效果表现为“比特干扰”;

2) 当干扰光重复频率为64 kHz时,鉴相器连续输出相位误差信号,且相位差固定,此种情况下,锁相环将进行时钟相位调整操作,使本地时钟与干扰光中包含的时钟同步,时钟被篡改,这种理想情况我们可称之为“时钟篡改”;

3) 干扰光重复频率为80 kHz时的情况与10 kHz时相近,锁相环一般不会进行相位调整操作;

4) 干扰光重复频率为200 kHz时,“original signal”中连“0”的时隙内出现了大量的干扰光脉冲,鉴相器在该时隙内输出较多的相位调整命令,当其数量超过锁相环的滤波器计数阈值后将会触发锁相环进行时钟调整,当其数量未超过锁相环的滤波器计数阈值,锁相环将不进行调整,干扰效果取决于信

号光中的连“0”长度。

综上所述,时钟恢复干扰要求干扰光的重复频率和占空比与接收机本地时钟的频率和占空比均相同或在一定容忍范围内接近,这样,干扰光可以突破接收机滤波器带宽的限制,实现干扰。当满足条件的干扰光脉冲任意时刻插入进信号光脉冲序列后,被干扰的信号序列经鉴相器后始终输出超前或滞后的调整命令或输出调整命令的个数超过锁相环的设定上限,此时锁相环即进行相位调节,理想情况下会出现本地时钟被篡改的现象。接收机本地时钟被篡改以后,由于判决时刻始终位于干扰光脉冲的位置,导致判决后的数据均为“1”。

2.2 异步通信弱光干扰原理

异步通信中所发送的字符之间的时间间隔可以是任意的,发送端可以在任意时刻开始发送字符,因此必须在每一个字符的开始和结束的地方加上标志,即加上起始位和终止位^[15]。异步通信是通过每帧中的起始位和终止位来判决信号的。因此,根据错误比特出现的时刻,弱激光对异步无线激光通信系统的干扰主要可分为两种,一种是错误比特出现在每帧之间的静默时段,先于起始位进入判决器,使起始位被误认,从而导致整帧数据错误,称此种情况

为“起始位干扰”；另一种是错误比特出现在每帧的数据位置，导致数据发生错误，称此种情况为“数据位干扰”。由于干扰光在一段时间内是持续出现的，错误比特可能出现在异步通信中每帧的任意时刻，因此，上述两种干扰情况均有可能出现。

对于“起始位干扰”，不同重复频率干扰光的干扰效果是不同的：

1) 当干扰光重复频率与通信速率相差较大时，干扰原理如图 3(a)所示，干扰光脉冲产生的错误比

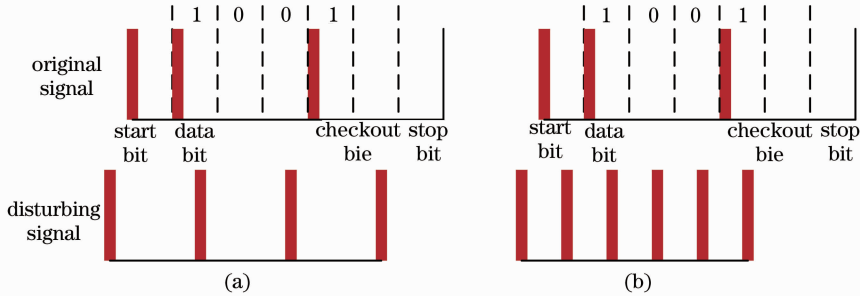


图 3 异步通信起始位干扰示意图。(a)频率不等；(b)频率相等

特被误判为信号光起始位，计数器开始计数，由于干扰光和接收机判决时钟没有稳定的时序关系，因此判决时钟位置随机地出现光脉冲，将会出现大量的比特错误，导致接收机的误码率升高；

2) 当干扰光重复频率与通信速率相等或相近时，如图 3(b)所示，干扰光脉冲只要有一次先于起始位进入判决器，就会导致接收机每次判决均正好对应干扰光脉冲位置，即每次判决时都会把干扰光误以认为信号光判决，导致接收到的数据均为“FF”。

Fig. 3 Illustration of start bit jamming asynchronous communication. (a) different frequencies; (b) same frequencies

单纯的“数据位干扰”，只有当干扰光重复频率远远低于信号光码速率且占空比非常小时才可能出现，例如采用调 Q 高重复频率激光器产生的窄脉冲激光作为干扰源。当接收机开始接收到起始位后，在每帧数据的传输过程中，只有当干扰光脉冲精确地出现在判决时刻才会出现“数据位干扰”。由于干扰光脉冲与信号光之间没有固定的时序关系，因此，单纯的“数据位干扰”出现的几率很低。

3 干扰实验与结果分析

为了验证理论分析结果，分别进行了基于 IM/DD 通信体制的同步通信图像传输和异步通信数据传输的弱光干扰实验。为了寻找误码的真实来源，

最低限度地减少其它因素产生的影响，防止大气湍流、云、风和温度等信道因素和跟瞄系统造成的误差等其它因素对于实验结果的影响，实验场所选在室内 1000 级超净间内进行。室内温度 26 °C，采用定点通信的方式，在相距 4 m 的两个光学平台间进行。干扰光由信号发生器调制后经过漫反射屏以漫反射的方式进入接收视场，功率较低，不会引起光电探测器的饱和与堵塞。实验装置如图 4 所示。图像由帧频为 30 frame/s 的 CCD 采集并传送，由监视器还原和显示。数据由计算机 1 经串口发出，计算机 2 进行数据恢复和误码率监测。同时使用示波器对眼图信号和接收机预处理后的数字电平信号进行实时监测，使用功率计对干扰激光器出口处的平均功率进行测量。

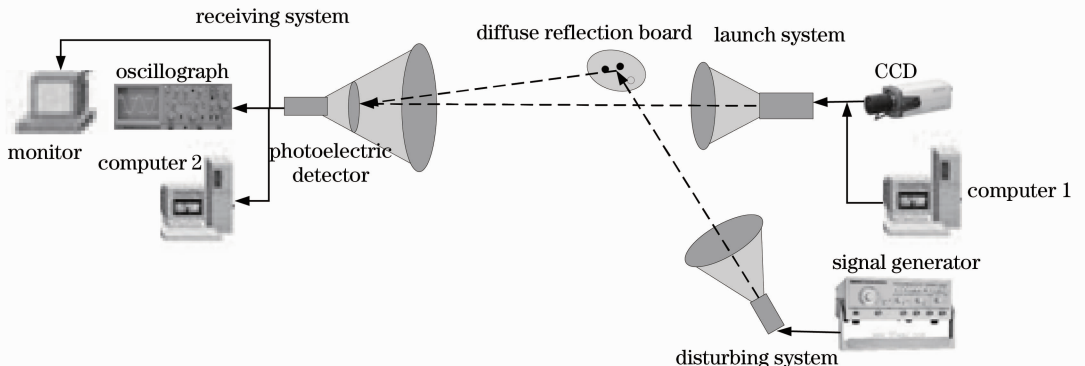


图 4 干扰实验装置结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the structure of jamming experiment

3.1 同步通信图像干扰实验

采用自主研发的基于同步数字序列的无线激光通信系统进行图像干扰实验。信号光波长 1550 nm, 发射功率 10 mW, 通信码速率 155.52 Mb/s, 接收机采用 PIN 光电探测器, 接收镜头视场 1° 。干扰光波长 1550 nm, 由信号发生器调制成占空比为 50%、不同平均功率和重复频率的干扰激光进行实验。

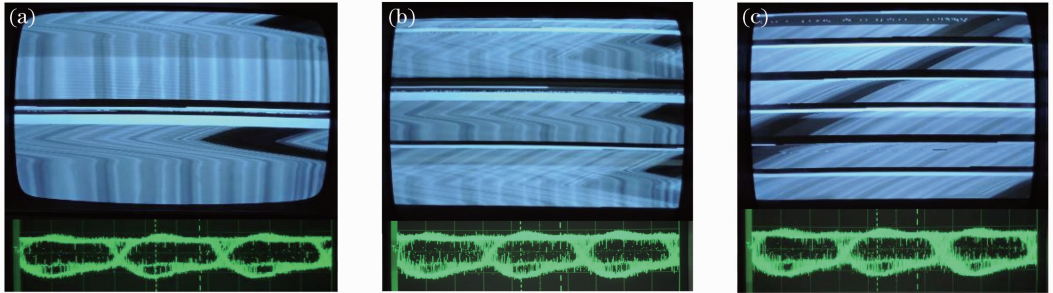


图 5 不同重复频率激光干扰图像及眼图。(a) 50 Hz; (b) 100 Hz; (c) 150 Hz

Fig. 5 Images and eye diagram under laser jamming with different repetition rate. (a) 50 Hz; (b) 100 Hz; (c) 150 Hz

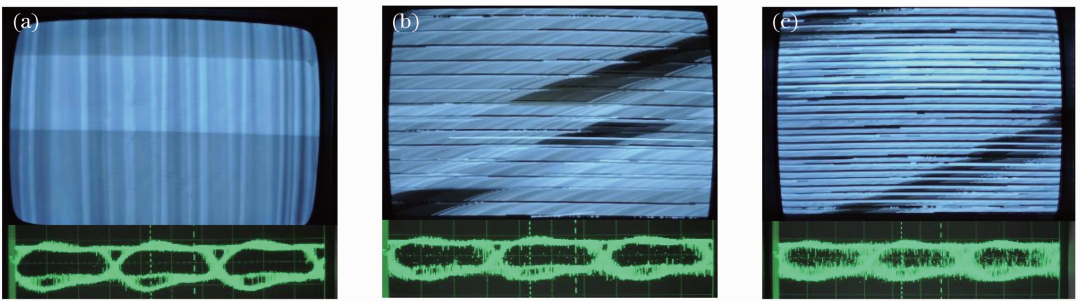


图 6 不同功率激光干扰图像及眼图。(a) 5 mW; (b) 30 mW; (c) 100 mW

Fig. 6 Images and eye diagram under laser jamming with different power. (a) 5 mW; (b) 30 mW; (c) 100 mW

通过上述实验发现：

1) 同步通信系统设计中, 原则上当接收机连续 3 ms 收不到帧同步信息时, 确定通信失败, 业务中断。而 50 Hz 的干扰光持续时间为 10 ms, 如果整个干扰光脉冲在判决器中均产生比特错误, 因此, 通信中断时间为 10 ms, 这会导致 CCD 一帧图像中应该有 $1/3$ 的图像无信号。但由图 5(a) 并未发现此现象, 而是部分图像扭曲, 出现一个黑白纹组合且黑白纹之间有图像存在。因此可以得到一个结论: 脉冲宽度宽的干扰光并不是持续干扰通信, 只是在其上升沿和下降沿出现干扰, 每次干扰均导致一帧图像中有几行数据受到干扰, 即发生“比特干扰”。

2) 通过对不同重复频率干扰光的实验现象进行比较, 发现对于固定帧频的 CCD, 干扰光重复频率不同, 则每帧干扰图像受到的干扰次数不同。设干扰脉冲的频率为 ν_1 , CCD 图像帧频为 ν_2 , 则每帧图像会受到 ν_1/ν_2 次干扰。即, 在相同的平均功率条件下, 在

1) 干扰光平均功率为 100 mW, 重复频率分别为 (a) 50 Hz, (b) 100 Hz 和 (c) 150 Hz 时的干扰现象及眼图信号, 如图 5 所示。

2) 干扰光重复频率为 1 kHz、平均功率分别为 (a) 5 mW, (b) 30 mW 和 (c) 100 mW 时的干扰现象及眼图信号, 如图 6 所示。

达到一定的重复频率范围内, 干扰光的重复频率越高, 每帧图像受到的干扰次数越多, 图像变形得越严重, 如图 5(a)~(c) 所示。

3) 当干扰光平均功率过低时, 对通信质量基本不会造成影响, 干扰效果不明显, 如图 6(a) 所示。这是因为当干扰功率较低时, 接收机探测器平均电平有小幅升高, 但不足以导致连“1”的出现, 只是会降低信噪比, 出现较多误码, 导致图像清晰度下降。但随着功率的提高将会出现不同的干扰现象: 信噪比降低或比特干扰。当功率升高到一定值的时候, 就会出现上面分析的上升沿和下降沿的码元干扰现象。

综上所述, 由于无线激光通信系统设置了接收带宽和动态判决阈值, 当干扰光脉冲宽度远远超过信号光比特宽度时, 在干扰光脉冲的上升沿和下降沿时刻无线激光通信系统易受到干扰。

3.2 异步通信数据干扰实验

采用自主研发的异步无线激光通信系统进行数

据干扰实验。信号光波长 980 nm,通信速率 64 kb/s,接收采用雪崩光电二极管(APD)探测器,接收视场为 2° 。干扰光波长 980 nm,利用信号发生器调制产生占空比为 20%,不同重复频率的干扰光源。正常数据传输时的波形如图 7 所示。图 8 是信号光分别受到重复频率分别为(a) 10 kHz,(b) 64 kHz,(c) 80 kHz和(d) 200 kHz的激光干扰后的数字电平信号。

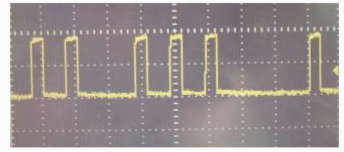


图 7 正常通信时的数字电平信号

Fig. 7 Digital signal of normal communication

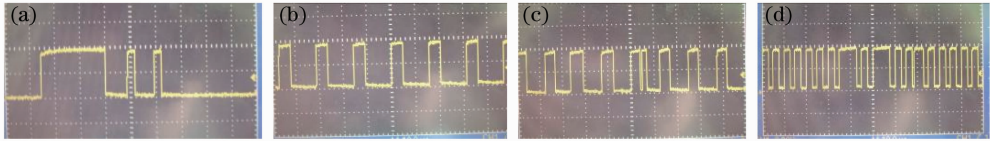


图 8 受不同重复频率干扰后的接收机数字电平信号。(a) 10 kHz;(b) 64 kHz;(c) 80 kHz;(d) 200 kHz

Fig. 8 Jammed digital signal of the receiver under different repetition rate. (a) 10 kHz;(b) 64 kHz;(c) 80 kHz;(d) 200 kHz

通过对接收到的数据进行分析比对并结合图 8 中的波形和误码率测试软件,得出以下实验现象:

1) 当干扰光重复频率为 10kHz 时,接收机的数据出现大量连“1”的情况,误码率测试软件显示误码率上升,由无干扰时的 10^{-6} 迅速上升为 10^{-3} ;

2) 干扰光重复频率为 64 kHz 时,示波器出现重复频率为 64 kHz,占空比为 20%的脉冲序列,是由于干扰光的时序与信号光时序没有拉开,信号光信号被淹没在干扰光里;误码率剧增,接收到的解码数据均为“FF”,说明此时系统起始位已经被干扰;

3) 干扰光重复频率为 80 kHz 和 200 kHz 时,接收机数据原来为“0”的位置上出现“1”的干扰脉冲,发生“比特干扰”,误码率上升。

4 结 论

以基于 IM/DD 体制的异步和同步无线激光通信系统为模型,通过理论分析、仿真和实验研究,证明了弱光对无线激光通信系统干扰的可行性,得出以下结论:

1) 采用与通信光波长相同或接近的干扰光源,干扰光的频率在接收机带宽范围内,功率在脉冲时间内的积分超过设定的判决阈值设置是实现弱光干扰的先决条件。

2) 同步通信中,主要发生“比特干扰”和“时钟恢复干扰”。时钟恢复干扰对通信系统的影响最为严重,误码率最高。其发生条件要求干扰光的重复频率和占空比与接收机本地时钟的频率和占空比均相同或在一定容忍范围内接近。

3) 弱光对异步无线激光通信系统主要引起“起始位干扰”和“数据位干扰”。由于异步通信中帧结

构和编码都较为简单,与同步通信相比更容易受到外界的干扰,干扰现象更为严重。

参 考 文 献

- Zhang Tieying, Wang Hongxing, Cheng Gang *et al.*. A novel fixed length digital pulse interval modulation for optical wireless communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34** (12): 1655~1659
张铁英,王红星,程刚等. 无线光通信中的定长数字脉冲间隔调制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1655~1659
- Lu Sha, Liang Zhongcheng, Wang Tingyu *et al.*. Study and simulation of the moving ship platform with free-space optical communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36** (11): 2934~2938
卢莎,梁忠诚,汪亭玉等. 船载无线激光通信系统模拟运动平台的研制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2934~2938
- Ivan B. Djordjevic, Goran T. Djordjevic. On the communication over strong atmospheric turbulence channels by adaptive modulation and coding [J]. *Opt. Express*, 2009, **17** (20): 18250~18262
- Wang Yong, Cao Jianian. Performance analysis of atmospheric laser communication system basing on asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing intensity modulation and lower density parity check code[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3031~3036
王勇,曹家年. 基于低密度奇偶校验码和非对称限幅光正交频分复用技术的大气激光通信系统性能[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3031~3036
- Xue Haizhong. Analysis of jamming characteristics of satellite-borne infrared detectors[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2008, **27**(4): 313~316
薛海中. 星载红外探测器干扰特征分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(4): 313~316
- Liu Changan, Chen Jinbao, Ma Jinlong *et al.*. Jamming of visible light array CCD imaging system by infrared laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1727~1730
刘长安,陈金宝,马金龙等. 红外激光对可见光 CCD 成像系统的干扰[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(8): 1727~1730
- Yan Wuliu. Analysis of laser disturbance to anti-ship missile IR detector[C]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 40~41, 974~978
- Wang Siwen, Li Yan, Guo Lihong *et al.*. Analysis on the

- disturbance of CO₂ laser to long-wave infrared HgCdTe detector [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2010, **29**(2): 102~104
- 王思雯, 李 岩, 郭立红等. CO₂ 激光对长波红外 HgCdTe 探测器干扰的分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(2): 102~104
- 9 Zhang Zhen, Cheng Xiangai, Wang Rui *et al.*. Dazzling effect of repetitive short pulse laser on TDI CCD camera [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, (S0143-8166), 2011, 49: 292~296
- 10 Xu Jie, Zhao Shanghong, Hou Rui *et al.*. Laser jamming analysis of combined fiber lasers to imaging CCD[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2009, **47**: 800~806
- 11 Lin Junyang, Shu Rong, Huang Genghua *et al.*. Study on threshold of laser damage to CCD and CMOS image sensors[J]. *J. Infrared and Millimeter*, 2008, **27**(6): 475~478
- 林均仰, 舒 嵘, 黄庚华等. 激光对 CCD 及 CMOS 图像传感器的损伤阈值研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(6): 475~478
- 12 Zhang Zhen, Cheng Xiangai, Jiang Zongfu. Mechanism analysis of CCD excessive saturation effect induced by intense light [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(2): 233~236
- 张 震, 程湘爱, 姜宗福. 强光致 CCD 过饱和效应机理分析[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(2): 233~236
- 13 Li Tiansong, Yuan Chaowei, Yi Miao *et al.*. Time jitter effects on bit error probability in multi-pulse position modulation satellite optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 26~30
- 李天松, 袁超伟, 易 淼等. 多脉冲位置调制卫星光通信中时钟抖动对比特错误概率影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 26~30
- 14 Zhang Aixu, Yu Jinlong, Wang Wenrui *et al.*. Investigation on packet clock recovery with fastened unlocking time using an optical band-pass filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 151~156
- 张爱旭, 于晋龙, 王文睿等. 利用光窄带滤波器加快帧时钟消失速度的理论和实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 151~156
- 15 Ke Xizheng, Xi Xiaoli. Introduction to Wireless Laser Communications[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004. 180~190
- 柯熙政, 席晓莉. 无线激光通信概论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004. 180~190

栏目编辑: 谢 婧