

基于码移键控-光码分多址技术的光隐匿通信系统实验

朱华涛 蒲涛 方涛* 陈寅芳 郑吉林 赵继勇

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 为进一步提高光隐匿通信系统的安全性,提出了基于码移键控-光码分多址(CSK-OCDMA)技术的光隐匿通信方案,搭建了 2.5 Gb/s 的实验系统。实验装置中采用低成本分布反馈半导体激光器作为隐匿光源,宿主光源采用贴近波分复用(WDM)光网络实际的光波长转换板(OTU)。实验结果表明,隐匿信道可实现背靠背无误码传输,且隐匿信道的引入对宿主信道接收机灵敏度的影响仅为 0.1 dBm。在保证隐匿信道无误码传输的情况下,宿主与隐匿信号功率差最大可达 24.6 dBm。加入前向纠错设备(FEC)后,实现了光隐匿通信系统 100 km 无误码传输。

关键词 光通信;光隐匿;码移键控;偏振调制器

中图分类号 TN914.53 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0906001

Experiment of Optical Stealth Communication System Based on Code Shift Keying-Optical Code Division Multiple Access Technology

Zhu Huatao Pu Tao Fang Tao Chen Yinfang Zheng Jilin Zhao Jiyong

(*Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*)

Abstract To enhance the security of optical stealth transmission system, an optical stealth scheme based on code shift keying-optical code division multiple access (CSK-OCDMA) technology is proposed, and a 2.5 Gb/s experiment system is setup. The optical source of stealth channel is a low cost distributed feed back (DFB) semiconductor laser, and the public channel is optical transform unit (OTU) near wavelength division multiplexing (WDM) optical networks. The experiment demonstrates that the stealth channel can transmit back to back without bit error, and the penalty for public is only 0.1 dBm. When the stealth channel work without bit error is promised, the difference between public and stealth channels can be 24.6 dBm for the largest. After introducing the forward error correction (FEC), the system can transmit 100 km without bit error.

Key words optical communications; optical stealth; code shift keying; polarization modulator

OCIS codes 060.2330; 000.2190; 060.4510

1 引 言

随着全球化信息进程的推进,通信网络的安全需求日益迫切,其中光网络的物理层安全近年来备受关注,与高层的加密方案相比,物理层安全性能的

改善为通信网络提供了新的保护层。光隐匿通信是一种提高光网络物理层安全的新技术,它在现有的公共光网络上建立了一个隐蔽信道来实现安全通信^[1-8]。光隐匿通信的实现方案主要有利用放大自

收稿日期: 2014-01-01; **收到修改稿日期**: 2014-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(61177065,61032005)、国家 973 计划(2012CB315603)

作者简介: 朱华涛(1990—),男,硕士研究生,主要从事光码分多址和光隐藏通信等方面的研究。

E-mail: zhuhuatao2008@163.com

导师简介: 蒲涛(1974—),男,教授,硕士生导师,主要从事光纤通信系统、微波光子学和光传感技术等方面的研究。

E-mail: putao_nj@163.com

* **通信联系人**。E-mail: juence@163.com

发辐射(ASE)噪声作为隐匿信道光源来模拟公共信道噪声^[3], 利于色散器件来实现隐匿信号时域扩展^[4]以及利用光码分多址技术(OCDMA)来改变隐匿信号时频域特性得到类噪声信号^[5-7]等。由于OCDMA用户在发送端对信号编码^[9-10], 因此接收端必须有与发送端匹配的解码器才能恢复原始信息, 这使得基于OCDMA技术的方案具有更高的安全性。文献[5-6]采用频谱相位编码(SPE)OCDMA方案, 文献[7]采用时域相位编码(TPE)OCDMA方案, 将OCDMA信号隐匿在公共的波分复用(WDM)光网络。但是, 单用户的开关键控(OOK)调制的OCDMA系统不具有安全性^[11-12], 一旦非法用户或窃听者怀疑有隐匿信道的存在, 采用可调谐滤波器滤出部分隐匿信号, 使用比特速率功率检测方法即有可能恢复出隐匿信号, 即基于OOK-OCDMA技术的光隐匿系统存在一定的安全漏洞。

本课题组提出了利用单个偏振调制器(PolM)实现码移键控(CSK)调制的OCDMA系统方案, 实验结果表明单用户的CSK-OCDMA信号可以抵抗比特速率功率检测的窃听者, 提高单用户OCDMA系统的安全性^[13]。本文提出基于CSK-OCDMA技术的隐匿通信系统方案, 搭建了2.5 Gb/s光隐匿通信实验

系统, 并分析了关键问题对系统性能的影响, 实现了100 km 无误码传输。

2 实验结构及原理

将单用户的CSK-OCDMA信号隐匿到单波道WDM光网络中, 实验框图如图1所示, 粗线表示宿主信道, 细线表示隐匿信道。在隐匿信道发送端, 光源为低成本分布反馈(DFB)半导体激光器; 输出光脉冲的中心波长为1550.08 nm; 20 dB带宽为1.16 nm; 偏振控制器(PC)调整光脉冲的线偏振方向与偏振调制器(PolM)主轴的夹角为45°; 脉冲序列发生仪(PPG)输出速率为2.5 Gb/s的非归零(NRZ)光信号, 即隐匿信号, 通过PolM调制光脉冲的偏振态; 偏振分束器(PBS)将不同偏振态的光脉冲分为时域互补的两路信号; 编码器用超结构光纤光栅制作而成, 其地址码采用63位的gold码。在宿主信道发送端, 同频数字体系(SDH)网络分析仪输出中心波长为1551.6 nm的NRZ光信号, 信号速率为2.5 Gb/s, 送入光波长转换板(OTU)经过光电和电光转换, 输出光为中心波长稳定在1551.72 nm的NRZ光信号, 20 dB带宽为0.1 nm; 掺铒放大器(EDFA)用作ASE噪声源, 模拟光网络中的噪声。

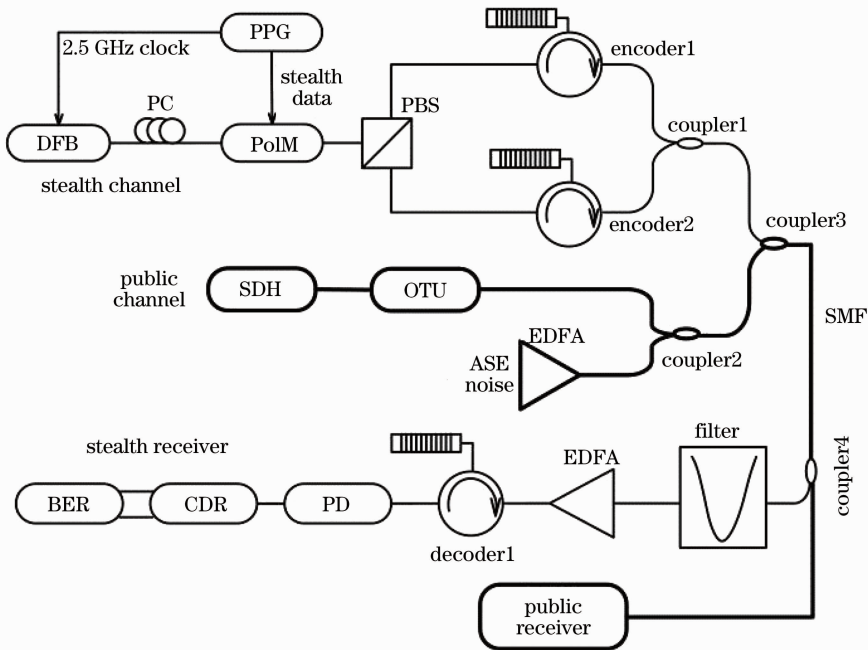


图1 光隐匿通信系统实验框图

Fig. 1 Experiment setup of optical stealth communication

在隐匿信道接收端, 受实验条件的限制, 采用单端接收方式。其中基于光纤光栅的带陷滤波器滤除

宿主信道, 滤波器中心波长为1551.8 nm, 10 dB带宽为0.1 nm, 调节光栅位移台可以改变光纤张力进

而调节滤波器中心波长；解码器与 encoder1 匹配；光电探测器 (PD) 模块集成了 10 GHz 光检测器和跨阻抗放大器时钟；数据恢复模块 (CDR) 的判决门限可调节；误码率 (BER, R_{BE}) 监测仪接收 CDR 恢复的时钟和数据信号，检测隐匿信道的误码率。在宿主信道接收端，耦合器 4 分出的一路信号直接传输到宿主信道接收器。

图 2 为各信道的时域波形图，隐匿信道发送端信号波形如图 2(a) 所示。从波形看，两个编解码器

编码之后的信号合路成全“1”归零 (RZ) 信号，无明显的功率突变，有利于提高时域隐匿性；图 2(b) 为宿主信道原始波形图，即在耦合器 2 处测得；在耦合器 3 测得如图 2(c) 所示的波形图，即隐匿信号和宿主信号合路后，可以看出，隐匿信号的引入对宿主信号几乎无影响；在隐匿信道接收端，经过陷波和解码之后，隐匿信号波形图如图 2(d) 所示，隐匿信道恢复出了原始信息。

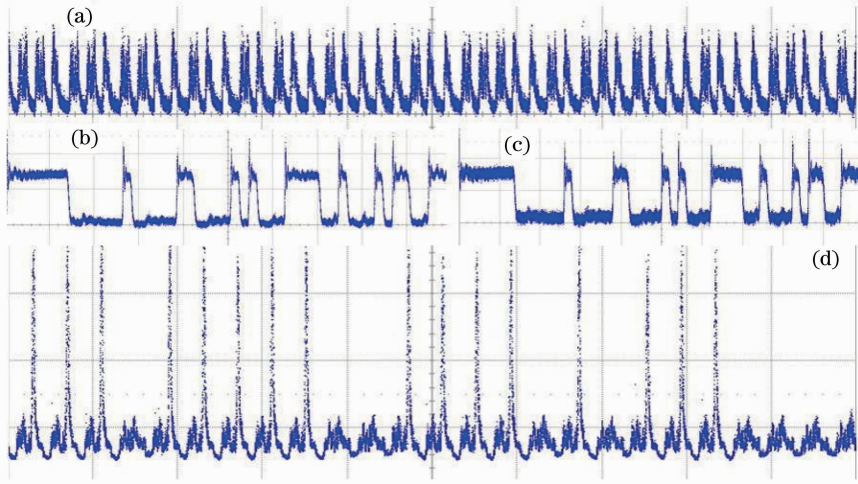


图 2 信道波形图。(a) 隐匿信道发送端；(b) 宿主信道；(c) 隐匿宿主合路后；(d) 隐匿信道接收端

Fig. 2 Waveforms of each channels. (a) Transmitter of stealth channel; (b) public channel; (c) stealth over public channel; (d) receiver of stealth channel

3 结果与讨论

在光隐匿通信系统的设计与实现中，重点研究隐匿信道对宿主信道的影响程度 (即隐匿信道的隐匿性)、宿主信道对隐匿信道的影响以及光网络中的噪声对隐匿信道的影响 (即隐匿信道的可用性)。

3.1 隐匿信道对宿主信道的影响

隐匿信道对宿主信道的影响是首要考虑的问题，即评价隐匿信道的隐匿性。如果隐匿信道的影

响大，则宿主信道接收者可判断有外加信道的存在，即隐匿信道失去隐匿性。在宿主信号功率 P_p 为 -1.29 dBm，隐匿信号功率 P_s 为 -14.28 dBm 时，宿主信道光域眼图如图 3 所示。图 3(a) 与图 3(b) 相比，可以看出隐匿信号的加入对宿主信号影响很小，通过对宿主信道光域眼图的检测无法发现隐匿信号的存在。

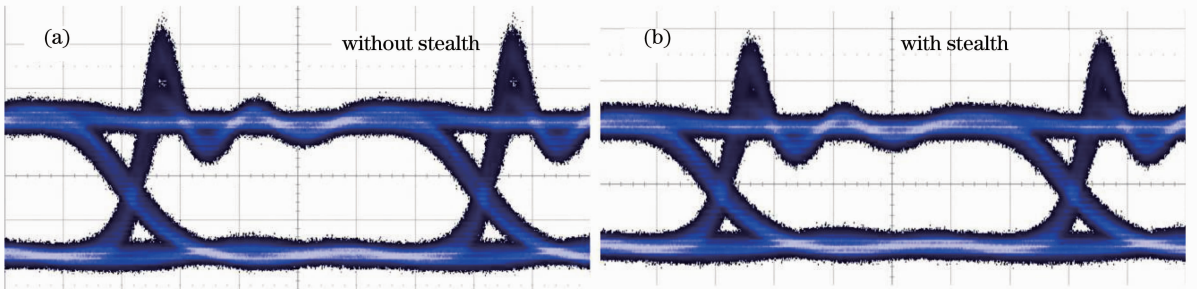


图 3 宿主信道光域眼图。(a) 无隐匿信号时；(b) 有隐匿信号时

Fig. 3 Optical eye diagrams for public channel. (a) Without stealth signal; (b) with stealth signal

图 4 为同条件下宿主信道的误码率曲线,此时实线和虚线分别为加与不加隐匿信道时的误码率曲线。两者误码率曲线变化趋势一致,接收机灵敏度损失约为 0.1 dBm,可以看出隐匿信道的加入对宿主信道传输性能的影响很小。

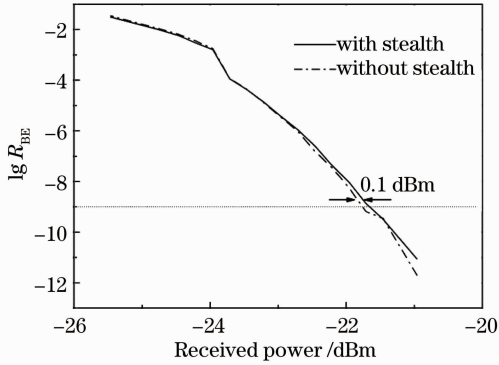


图 4 宿主信道误码率曲线

Fig. 4 BER curve versus received power for public channel

3.2 宿主信道对隐匿信道的影响

光隐匿系统中另一个重点问题是考虑宿主信道对隐匿信道的影响,即隐匿信道的可用性。由于宿主信号功率大于隐匿信号功率,且两信号频谱有重叠,在隐匿信道接收端,必须先用带陷滤波器将宿主信号滤除。在带陷滤波器固定时,不同功率的宿主信号滤波的程度不同,本节中隐匿信号功率 P_s 固定为 -17.4 dBm,分别调整宿主信号功率 P_p 至 4.2 dBm, 7.2 dBm, 15.32 dBm。图 5 是不同宿主功率大小时隐匿信道误码率曲线,在宿主信号功率 P_p 在 4.2 dBm,

7.2 dBm 时,隐匿信道误码率相似,可以实现无误码接收,在宿主功率 P_p 为 15.32 dBm 时,通信质量恶化,最低误码率在 10^{-6} 量级。可以看出,宿主隐匿信号功率差在 24.6 dBm 时,通信质量仍可以得到保证。

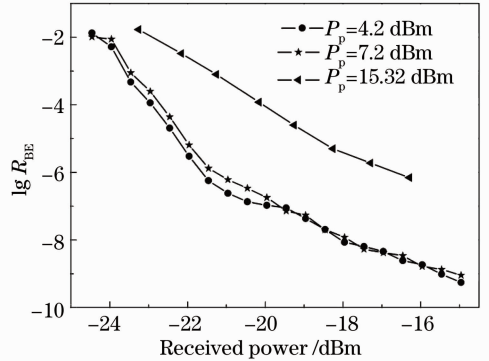


图 5 不同宿主功率时隐匿信道误码率曲线

Fig. 5 BER curve versus received power for stealth channel with different public signal powers

3.3 噪声对隐匿信道的影响

在 WDM 光网络中,不仅有 WDM 信号存在,还存在噪声,因此噪声对隐匿信道的影响是又一主要问题,这也是制约隐匿信道可用性的一个主要因素。本文以宿主端的 ASE 噪声源模拟 WDM 光网络中的各类噪声。图 6 是隐匿信道接收端电域波形图和眼图,图 6(a)和图 6(c)不加 ASE 噪声,图 6(b)和图 6(d)加了功率 P_n 为 -11.67 dBm 的 ASE 噪声。可以看出,加入噪声后波形底部变厚,眼图的张开度变小,眼皮变厚。

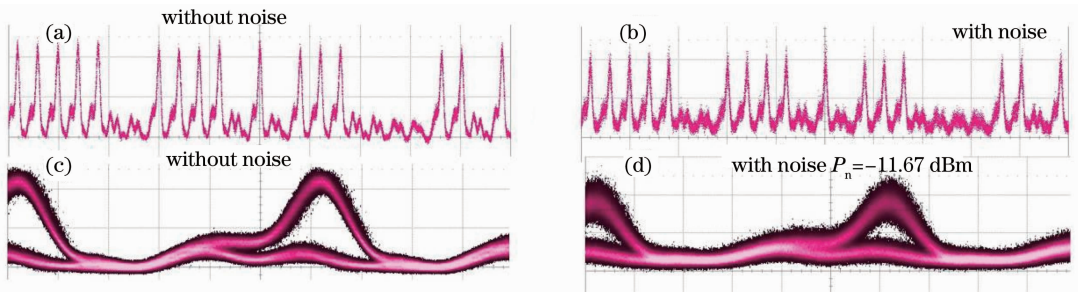


图 6 隐匿信道接收端电域波形图和眼图。(a)不加 ASE 噪声的波形图;(b)加 ASE 噪声的波形图;(c)不加 ASE 噪声的眼图;(d)加 ASE 噪声的眼图

Fig. 6 Electronic waveforms and eye diagrams for the stealth receiver. (a) Waveform without ASE; (b) waveform with ASE; (c) eye diagram without ASE; (d) eye diagram with ASE

图 7 是不同噪声强度对应的隐匿信道误码率曲线。其中宿主信道功率为 4.2 dBm,隐匿信号功率为 -13.69 dBm,ASE 噪声功率 P_n 分别取 -17.69 dBm, -14.71 dBm, -11.67 dBm, -8.65 dBm。可以看出,与无噪声时相比,加入功率为 -17.69 dBm 的噪声

后,接收机灵敏度下降了 2.28 dBm,随着噪声功率的增大,接收机灵敏度依次降低,即降低了隐匿信道的可用性。

3.4 100 km 传输误码测试

与 OOK 系统相比,CSK 系统具有更好的传输

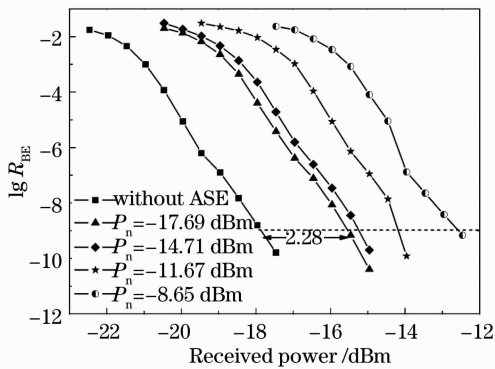


图7 不同噪声强度时隐匿信道误码率曲线
Fig. 7 BER curve versus received power for stealth channel with different noise powers

性能^[14],系统的传输距离可以增大,尤其在接收端采用平衡检测器时。除上述结果外,在隐匿系统中加入前向纠错设备(FEC),耦合器3与4之间加入100 km的单模光纤(SMF)。宿主信道功率 P_p 为19.7 dBm,隐匿信道功率 P_s 为2.8 dBm,接入100 km的SMF后,宿主信道直接分一路光信号进SDH仪测试误码率,隐匿信道先经过带陷滤波,在滤波之后进行用一盘676 ps/nm和一盘989 ps/nm色散补偿光纤(DCF)串联对信号进行色散补偿,补偿后的信号送入小信号放大器再解码,其余装置与背靠背传输实验一样。SDH仪测得接收误码个数为零,隐匿信道误码率40 min测试结果为 7.8×10^{-11} 。

4 结 论

提出了基于CSK-OCDMA技术的光隐匿通信系统,相比较于OOK-OCDMA技术的光隐匿通信系统,它可以提高系统的时域隐匿性,并解决单用户隐匿系统的安全漏洞。分析了隐匿对宿主信道的影响,得出隐匿信号的加入使宿主信道接收机灵敏度仅降低0.1 dBm。研究了不同宿主信号功率对隐匿信道的影响,在保证隐匿信道通信质量的情况下,宿主隐匿信号功率差最大可达24.6 dBm。分析了噪声对隐匿信道的影响,在噪声功率为-17.69 dBm时,隐匿信道接收机灵敏度下降2.28 dBm。最后引入前向纠错设备(FEC),实现了系统100 km无误码传输。

参 考 文 献

- 1 B B Wu, E E Narimanov. Analysis of stealth communications over a public fiber-optical network [J]. Opt Express, 2007, 15(2): 289-301.
- 2 Z Wang, M P Fok, L Xu, *et al.*. Improving the privacy of optical steganography with temporal phase masks [J]. Opt Express, 2010, 18(6): 6079-6088.
- 3 Ben Wu, Z Wang, T Yue, *et al.*. Optical steganography based on amplified spontaneous emission noise [J]. Opt Express, 2013, 21(2): 2065-2071.
- 4 M P Fok, P R Prucnal. A compact and low-latency scheme for optical steganography using chirped fiber Bragg gratings [J]. Electron Lett, 2009, 45(3): 179-180.
- 5 Zhensen Gao, Xu Wang, N Kataoka, *et al.*. Stealth transmission of time domain spectral phase encoded OCDMA signal over WDM system [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2010.
- 6 Zhensen Gao, Xu Wang, N Kataoka, *et al.*. Stealth transmission of time domain spectral phase encoded OCDMA signal over public WDM network [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(13): 993-995.
- 7 X Hong, D Wang, L Xu, *et al.*. Demonstration of optical steganography transmission using temporal phase coded optical signals with spectral notch filtering [J]. Opt Express, 2010, 18(12): 12415-12420.
- 8 Zhenxing Wang, P R Prucnal. Optical steganography over a public DPSK channel with asynchronous detection [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(1): 48-50.
- 9 Wu Pengfei, Ke Xizheng, Liang Wei. A modified blind multi-user detection algorithm for wireless optical code division multiple access systems [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0206005. 吴鹏飞, 柯熙政, 梁 薇. 无线光码分多址中一种改进的盲多用户检测算法[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0206005.
- 10 Chen Yinfang, Wang Rong, Pu Tao, *et al.*. Experimental demonstration of measuring optical threshold in nonlinear optical loop mirror based on variable pulse duty cycle [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0605004. 陈寅芳, 王 荣, 蒲 涛, 等. 变占空比脉冲测量非线性光环境阈值特性的实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0605004.
- 11 Thomas H Shake. Security performance of optical CDMA against eavesdropping [J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(2): 655-671.
- 12 Z Jiang, D E Leaird, A M Weiner. Experimental investigation of security issues in OCDMA: a code-switching scheme [J]. Electron Lett, 2005, 41(14): 717-819.
- 13 Zhu Huatao, Pu Tao, Fang Tao, *et al.*. Experimental demonstration of security-improved optical CDMA system based on polarization modulator [J]. J Optoelectronics•Laser, 2014, 25(2): 227-232. 朱华涛, 蒲 涛, 方 涛, 等. 基于偏振调制器的光学CDMA系统安全性改进实验研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(2): 227-232.
- 14 Xu Wang, N Wada, T Miyazaki, *et al.*. Asynchronous multiuser coherent OCDMA system with code-shift-keying and balanced detection [J]. J Sel Top Quantum Electron, 2007, 13(5): 1463-1470.

栏目编辑: 王晓琰