

基于相干光码分多址技术的隐藏通信系统仿真

余罗陈¹ 卢麟¹ 朱勇¹ 张秋芳²

(¹ 解放军理工大学通信工程学院电信工程系, 江苏 南京 210007; ² 南京军区空军司令部通信总站, 江苏 南京 210018)

摘要 提出了光域隐藏通信的概念以及评价其性能的指标: 隐藏性、可用性和稳健性, 给出了基于现有光纤通信体制的三种光域隐藏通信方案及其对系统配置的要求。使用光纤通信系统仿真软件对所提出的方案进行了仿真研究, 针对现有的光纤宿主信道的特点, 提出了采用码移键控(CSK)平衡调制方式和基于等效相移超结构光纤光栅(EPS-SSFBG)双边带编/解码器的系统配置方案以提高系统的性能。结果表明, 该方法各项性能指标良好。在信噪比为-13 dB, 信号完全隐藏在信道噪声中的情况下, 仍然能够以 1.25 Gb/s 的速率保持通信, 能够抑制隐藏系统与宿主系统间的相互影响, 是一种具有较高应用价值的光域隐藏通信方法。

关键词 相干光码分多址; 隐藏通信; 系统仿真; 系统方案

中图分类号 TN929 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092902.0316

Simulation on Covert Communication System Based on Coherent OCDMA Technology

Yu Luo Chen¹ Lu Lin¹ Zhu Yong¹ Zhang Qiufang²

¹ Department of Telecommunications Engineering ICE, PLAUST, Nanjing, Jiangsu 210007, China

² General Communication Station of Airforce Army in Nanjing Military Area, Nanjing, Jiangsu 210018, China

Abstract The concept of covert communication in optical domain and its performance estimation indexes of imperceptibility, usability, and robustness were illuminated. The method of optical domain covert communication based on coherent optical code division multiple access (OCDMA) technology was analyzed. Three covert schemes and their system configuration parameters were offered. Aiming at the properties of existing optical communication host channel, code-shift-keying (CSK) balance modulation and double side band en/decoder based on equivalent phase shift-superstructure fiber Bragg grating (EPS-SSFBG) were proposed to improve the performance of the system. The simulation results show that the proposed schemes can obtain a good performance. With signal-to-noise rate (SNR) of -13 dB, under the condition that the signal was completely covered by channel noise, and in this situation, the system still kept communication with a bit rate of 1.25 Gb/s, the inter-influence between covert signal and host signal was suppressed.

Key words coherent optical code division multiple access; covert communication; system simulation; system scheme

1 引言

作为一种光域扩频通信手段, 相干光码分多址(OCDMA)技术自提出以来, 良好的保密性就成为其最为显著的特征之一^[1]。编码信号经过光纤传输, 在接收端必须由与编码器相匹配的解码器进行相关解码, 在编解码器不被窃取的情况下, 窃听者通过强力搜索的方法来获取密钥几乎不可能^[2]。在不知道码字的情况下, 窃听者即使能够成功截获光信

号, 得到的也只是一片噪声, 而且在目前的技术条件下, 对于高速光信号, 也不可能像对抗传统电域 CDMA 信号那样, 通过对信号的存储、比较和分析的手段破译码字信息。另外, OCDMA 信号具有很高的扩频增益^[3,4], 使其在极低信噪比的条件下仍然能够工作。因而, OCDMA 技术不仅可以作为一种传输手段, 用来提高光纤链路的安全性, 还可以作为一种光域隐藏通信的方法加以研究。

本文将提出基于相干 OCDMA 技术的光域隐藏通信概念及其性能评价指标,结合现有光纤通信链路的特点,给出三种基于相干 OCDMA 技术的光域隐藏通信方案,并进行仿真研究。

2 基于相干 OCDMA 技术的光域隐藏通信

2.1 光域隐藏及其评价指标

在研究相干 OCDMA 技术的过程中,提出了光域隐藏的概念。相干 OCDMA 技术利用光的相干

特性,对光脉冲的相位进行编码,是一种双极性编码方式,可以大大提高系统的自/互相关性^[5]。经编码后的光信号具有宽频谱、类噪声、功率谱密度低、传输速率高等特点。在发送端,通过合理地设计编码器,并对编码信号进行适当处理,将保密信息伪装成已有光纤宿主系统中的噪声,隐藏在宿主系统中进行传输,这样,即不会影响宿主系统的正常通信,又可以减少保密信息被窃听者发现和截获的可能性,从而加强信息的安全性。基于 OCDMA 技术的光域信息隐藏通信原理示意图如图 1 所示。

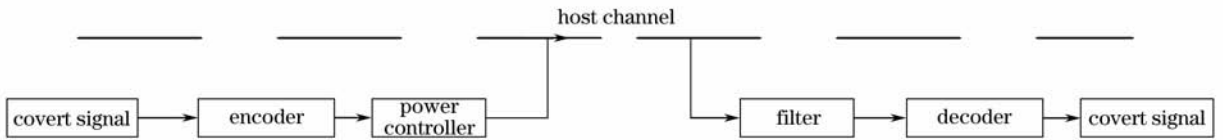


图 1 基于 OCDMA 技术的光域信息隐藏通信原理示意图

Fig. 1 Schematic of OCDMA-based covert communication in optical domain

借鉴信息隐藏学的研究方法^[6],评价光域隐藏通信性能的指标包括隐蔽性、可用性和稳健性。

隐蔽性是最基本的性能指标,是指经过一系列隐藏处理,使宿主信号没有明显的降质现象,而隐藏的数据不能被察觉。

隐藏通信系统的可用性是指在保证其隐蔽性的前提下,系统的有效性和可靠性,即系统的信息速率和误码率指标。大带宽、高速率是光通信的优点之一,所以隐藏通信系统的信息速率不是主要问题。对于隐藏通信的误码率指标,相对于电信级的要求,可以适当降低,将该指标定为小于 10^{-6} 。

光域隐藏通信的稳健性考虑的是对宿主光信号实施滤波、放大操作后隐藏通信系统的隐蔽性和可用性变化。

以上三个指标从根本上决定了隐藏通信系统的性能,而三者是一个矛盾的统一体,彼此之间相互制约,因此,在设计系统时必须充分考虑三者的关系,寻求适当的平衡点。

2.2 基于相干 OCDMA 技术的隐藏通信系统方案^[7]

针对纯光噪声、单波长光链路、波分复用(WDM)光链路等多种信道环境,提出三种基于相干 OCDMA 技术的隐藏通信方案。

光纤信道噪声产生的原因很多,光纤的非线性效应,光放大器的自发辐射(ASE)等,都是噪声来源,当光纤链路上使用 EDFA 时,ASE 噪声常常是链路光噪声的主要成分。

ASE 噪声平均功率比较小,在链路中一般不会超过 -10 dBm,而且谱宽较宽。可以利用 OCDMA 信号类噪声特点,使其隐藏于 ASE 噪声中。此时,需要严格控制 OCDMA 信号的功率,从而在时域、频域上都与噪声相似,如图 2(a)所示。

该方案下,实现隐藏的方法有两种:直接衰减 OCDMA 信号的总功率,但同时也会使信号的信噪比(SNR)下降,解码信号质量恶化,接收误码率上升,这种方法需要尽可能压缩编码前光脉冲的时域宽度,增加其可编码谱宽,同时提高编码器的扩时性

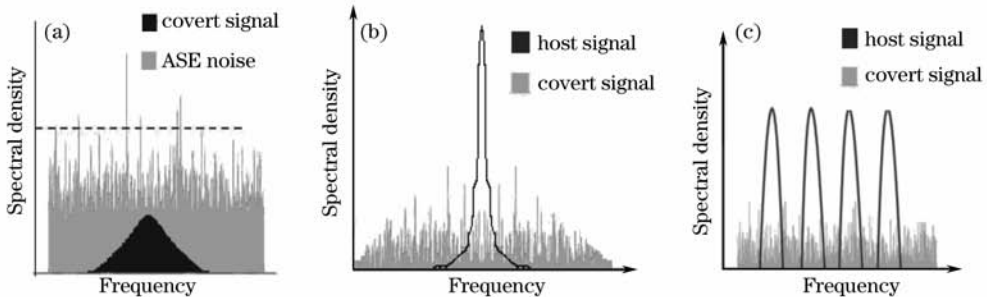


图 2 OCDMA 信号隐藏于 ASE。(a)噪声中,(b)单波长光信号链路中,(c)WDM 链路中

Fig. 2 OCDMA signal covert in (a) ASE noise, (b) single wavelength channel, (c) WDM channel

能;利用 OCDMA 信号类噪声特性,将编码信号伪装成噪声,填充进经过滤波处理的 ASE 噪声中,该方法可以提高系统的可用性,但隐蔽性随之降低,特别是传统的 OOK(On-Off-Keying)系统,窃听者只需采用窄带滤波加能量检测的方法就可以完成对隐藏信号的截获、破解。可以采取 CSK(Code-Shift-Keying)平衡调制方式^[8]对“0”和“1”同时编码,提高隐蔽性。

单波长光信号链路是光纤通信链路中最简单的一种,在这种通信链路中,宿主信号一般是 NRZ 码形式,信号谱宽取决于系统所用的光源类型。当宿主链路正常工作时,在光纤信道中传输的是“0”、“1”均匀的光脉冲码流,OCDMA 信号可以此掩护进行通信。OCDMA 信号的隐藏环境比在纯噪声中要好些,如图 2(b)所示,大功率的宿主信号无论在时域还是频域都可以轻易掩盖 OCDMA 信号,使其较难被捕捉,而且,信道噪声对信号的隐藏也有一定的作用。但同时大功率的单波长光信号的存在,提高了隐藏信号的接收难度,为了有效接收,OCDMA 信号的频谱宽度必须远大于单波长宿主信号,可能还需要在接收时使用窄带滤波器滤除宿主信号,降低宿主信号对隐藏信号的强烈干扰,因此,对系统的稳健性要求较高,在仿真中,将采用一种基于等效相移超结构光纤光栅(EPS-SSFBG)^[9]双边带编/解码器,

利用其独特的谱结构,以提高系统的稳健性。

近十年来,波分复用(WDM)技术发展极其迅速,被广泛用于海底、陆地长途干线、本地网甚至接入网,WDM 光网络几乎成为了全光网络的代名词。WDM 网络的全光传输特点,对于隐藏通信来说至关重要(因为一旦经过光-电,电-光转换的中继处理,隐藏信号将完全丢失),因此,相比于以上提到的两种方案,将 OCDMA 信号隐藏于 WDM 传输网络中是最为实用的方法。图 2(c)是该隐藏方案的频谱图^[10]。

OCDMA 信号隐藏于 WDM 信道中时,让频谱覆盖多个 WDM 波道,从而在频域上隐藏。利用滤波器把 WDM 波道间隔间的 OCDMA 信号提取出来,再进行解码是拟采用的接收方法。同单波长光信号链路一样,OCDMA 信号频谱宽度要大,并且要求滤波器性能好,稳定度和隔离度要高。

3 仿真研究

使用光纤通信系统仿真软件,对以上提到的前两种隐藏方案进行仿真研究(通过适当地设计编解码器,第三种方案可以等效为第二种)。

3.1 隐藏于 ASE 噪声中

OCDMA 信号隐藏于 ASE 噪声中的仿真框图如图 3 所示。

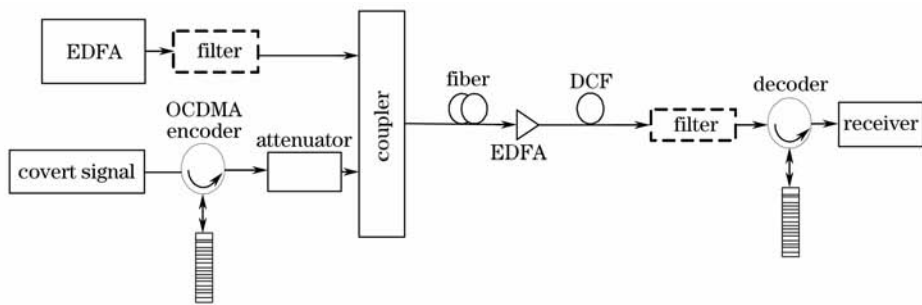


图 3 OCDMA 信号隐藏于 ASE 噪声中的仿真框图

Fig. 3 Simulation setup of OCDMA signal covert in ASE noise

发送端的 EDFA 作为噪声源,输出噪声平均功率约为 -10 dBm。首先采用直接衰减信号功率的方法进行隐藏。此时要求编码器具有良好的扩时性能,大的编码谱宽,我们使用的是基于等效相移技术的 511 位超结构光纤光栅时域相位编解码器的性能数据。编码谱宽约为 5.4 nm, P/W(Ratio of peak to wing, 自相关峰值旁瓣比,用来衡量码字的非周期自相关性能)约为 44,光源的半峰全宽约为 2 ps,中心波长对应频率为 193.21 THz,采用 625 Mb/s 传输速率。经过衰减,信号的平均功率为 -37.5 dBm,

经过耦合器后,信号完全隐藏于 ASE 噪声中,如图 4 所示。

可以看出,该方法具有很好的隐藏效果。在接收端,采用匹配的解码器进行解码。接收信号及原始信号波形如图 5 所示。接收端 P/W 约为 1.5,测得 BER 约为 7.9×10^{-6} ,能够满足可用性要求。但该方法对编解码器及光源的要求太高,在实用中存在技术以及成本的问题。

将采用对 ASE 噪声进行滤波,把信号填充进去的方法仿真,这样可以降低对编解码器的要求。使用

127 位超结构光纤光栅时域相位编解码器的性能数据。编码谱宽约为 2.5 nm, P/W 约为 62, 光源的半高全宽约为 6 ps, 中心波长对应频率为 193.79 THz, 采用 1.25 Gb/s 传输速率。带阻滤波器的带宽为 50 GHz, 经过衰减后信号的平均功率为 -32.9 dBm, 经过耦合器填充进 ASE 噪声后, 信号完全隐藏于噪

声中, 其隐藏效果与图 4 完全相同。

这种情况下仍然能获得良好的隐藏效果, 而对编解码器的要求降低了, 信号的平均功率也增加了 5.6 dBm, 接收性能得到改善。接收信号及原始信号波形如图 6 所示。

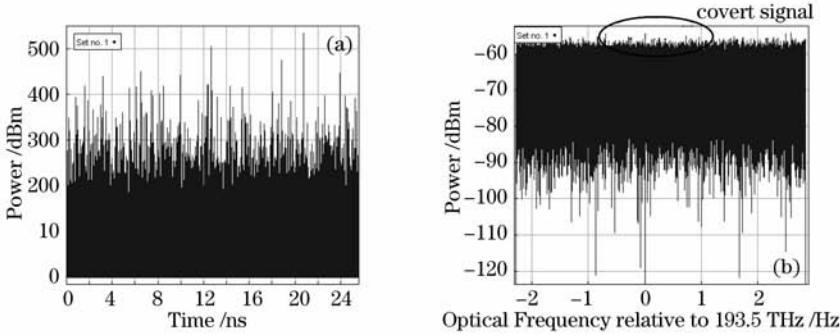


图 4 信号隐藏于 ASE 噪声中的时域(a)和频域(b)波形

Fig. 4 Waveforms of signal covert in ASE noise. (a) Temporal domain, (b) spectral domain

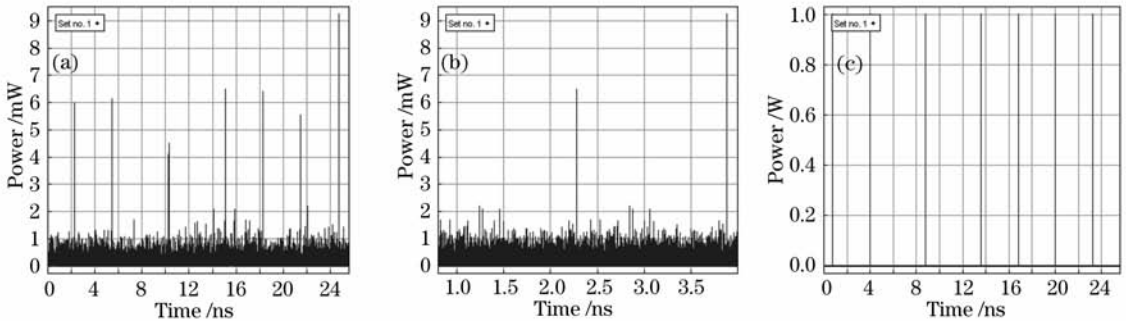


图 5 (a)解码信号波形, (b)解码信号眼图, (c)原始信号

Fig. 5 (a) Waveform of decoded signal, (b) eyediagram of decoded signal, (c) original signal

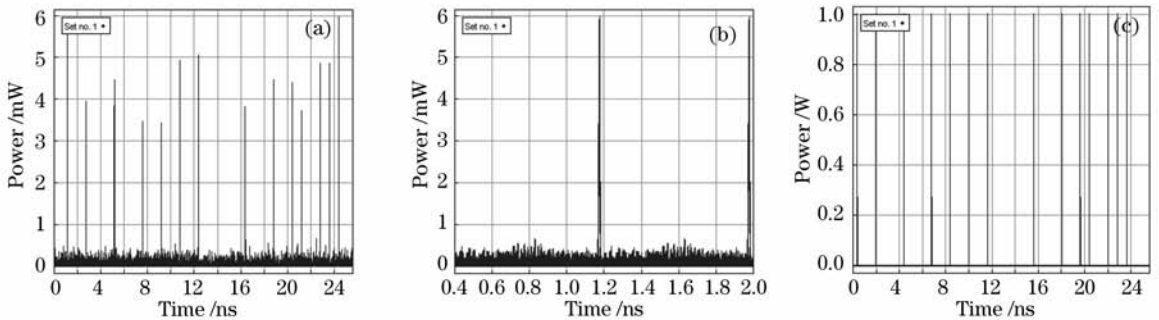


图 6 (a)解码信号波形, (b)解码信号眼图, (c)原始信号

Fig. 6 (a) Waveform of decoded signal, (b) eyediagram of decoded signal, (c) original signal

此时, P/W 约为 5, 误码率 (BER) 约为 5×10^{-16} , 相比于直接衰减信号, 这种方法对接收性能有很大的提高, 但同时隐藏性降低。因为, 传统光通信多采用 OOK 调制方式, 只对数据“1”进行编码, 窃听器只需要使用窄带滤波加能量检测的方法就可以破解隐藏信号。图 7(a)是经过窄带滤波后接收

信号的波形图, 与图 6(c)对比可以看出, 该隐藏方法存在很大的安全隐患, 测得该信号的 BER 约为 7×10^{-3} , 这对于窃听器已足够了。

可以采用 CSK 平衡调制方式对“0”和“1”同时编码, 以解决这一问题。采用 CSK 调制方式的系统原理框图如图 8 所示。

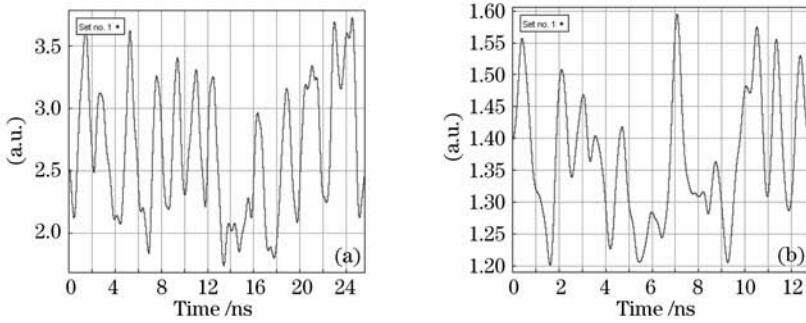


图 7 经窄带滤波的接收信号波形。(a)OOK 调制方式,(b)CSK 调制方式

Fig. 7 Waveforms after narrowband filter. (a) OOK modulation, (b) CSK modulation

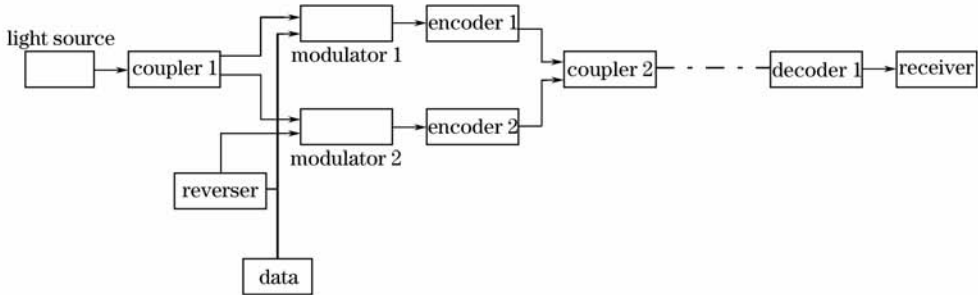


图 8 采用 CSK 调制方式的系统原理框图

Fig. 8 Schematic of CSK modulation system

经过窄带滤波后接收信号的波形如图 7(b)所示,很难分辨出原始信号了。此时,测得的 BER 约为 0.317。

仿真结果表明,采用直接衰减信号隐藏的方法时,隐藏效果较好,但可用性不理想,而且对系统配置要求太高;采用滤波填充的方法时,提高了系统的可用性,降低了对系统配置的要求,但隐藏性下降;

而 CSK 调制方式可以大大改善隐藏性,因此,在该隐藏方案下进行系统设计时,应综合使用滤波填充和 CSK 调制方式。

3.2 隐藏于单波长光信号链路中

OCDMA 信号隐藏于单波长光信号链路中的仿真框图如图 9 所示。

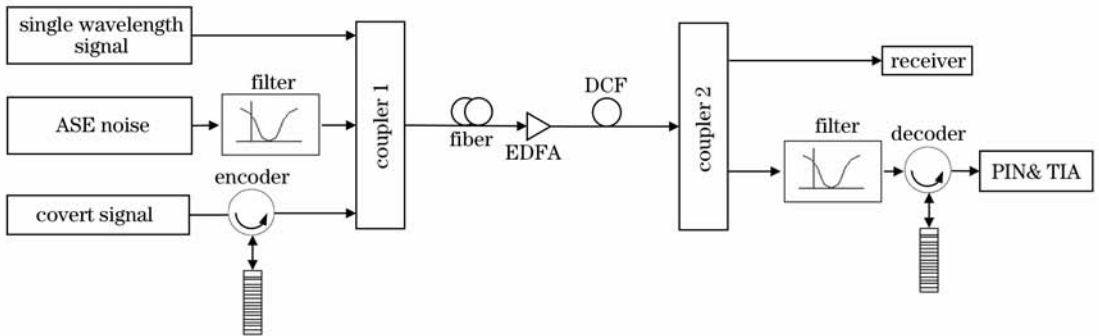


图 9 OCDMA 信号隐藏于单波长链路的仿真框图

Fig. 9 Simulation setup of OCDMA signal covert in single wavelength channel

这种情况相当于在方案 1 中加入了一路单波长光信号,此时,OCDMA 信号可以完全隐藏在宿主信号中,但大功率的单波长光信号也加大了对隐藏信号的影响,提高了接收难度,在接收端必须使用一个带阻滤波器将单波长信号滤去,滤波的过程必将对隐藏信号产生影响,这样就对系统的稳健性提出了

更高的要求。同时,隐藏信号也将对单波长宿主信号产生影响,进而影响隐藏性能。

在仿真中采用一种双边带频谱结构的编解码器^[11]以解决上述问题。其独特的频谱结构(图 10)十分适合这种隐藏方案。

仿真采用的编解码器的码片数为 63,编码谱宽

约为 1.2 nm, P/W 约为 18。光源的半峰全宽约为 10 ps, 中心波长对应频率为 193.70 THz, 采用 1.25 Gb/s 传输速率。发送端宿主信号平均功率约为 20 dBm, ASE 噪声平均功率约为 -10 dBm, 隐藏信号平均功率约为 -24 dBm, 经耦合器后, OCDMA 信号完全隐藏于 ASE 噪声和宿主信号中, 如图 11 所示。

从图中可以看出, 得益于 ASE 噪声以及宿主信号, 该方法具有很好的隐藏效果。单波长信号顶端的起伏主要是由于 ASE 噪声造成的。在接收端, 采用匹配的解码器进行解码。接收信号及原始信号波形如图 12 所示。此时, P/W 约为 3.5, 测得 BER 约为 7.8×10^{-8} 。

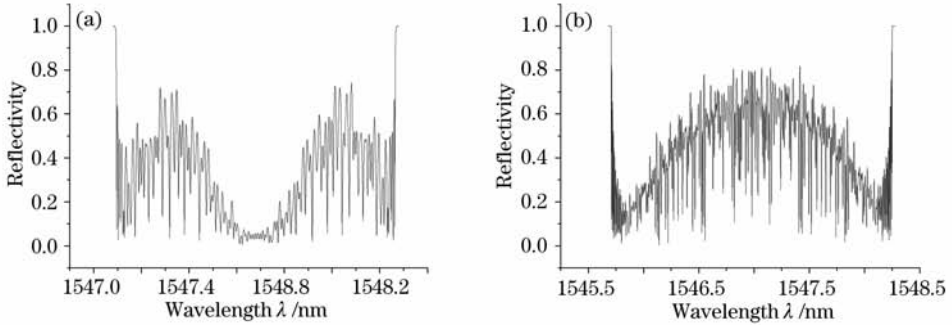


图 10 (a) 双边带编解码器频谱图, (b) 一般编解码器频谱图

Fig. 10 (a) Spectral diagram of double side band en/decoder, (b) spectral diagram of normal en/decoder

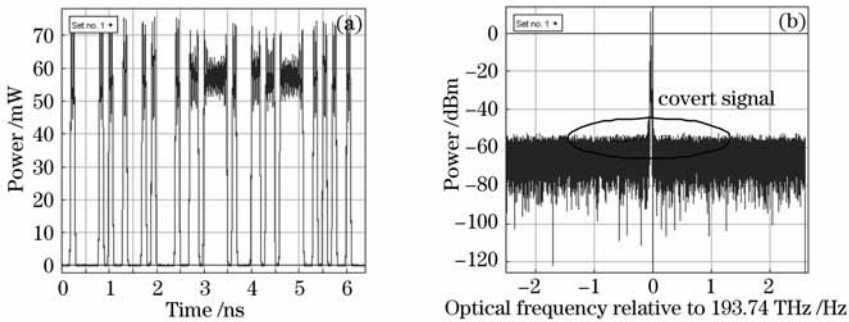


图 11 信号隐藏于单波长信号链路中的时域(a)和频域(b)波形

Fig. 11 Waveforms of signal covert in single wavelength channel. (a) Temporal domain, (b) spectral domain

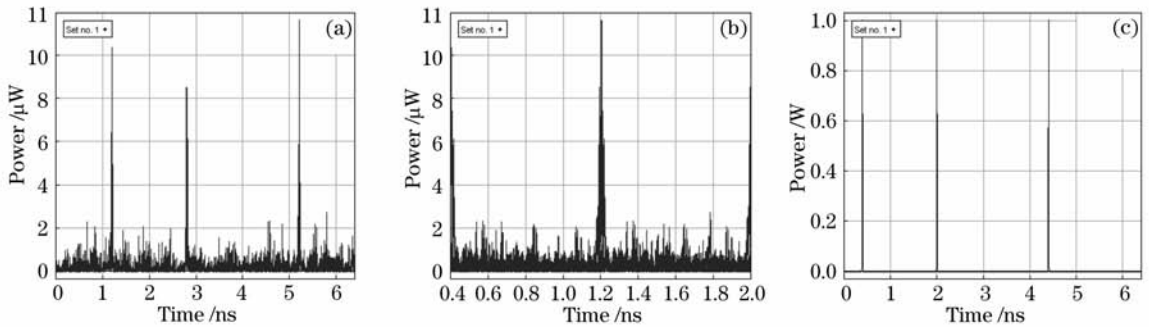


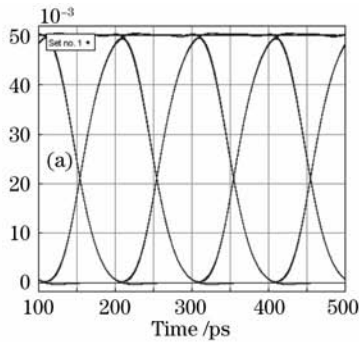
图 12 (a) 解码信号波形, (b) 解码信号眼图, (c) 原始信号

Fig. 12 (a) Waveform of decoded signal, (b) eyediagram of decoded signal, (c) original signal

利用滤波器滤出宿主信号, 接收后信号眼图如图 13 所示。从图中可以看出, 与无隐藏信号的情况相比, OCDMA 隐藏信号对宿主信号的接收几乎没有影响。

在隐藏于单波长宿主链路的基础上, 可以顺利过渡到隐藏于 WDM 宿主系统的方案, 但是该方案的实现难度较大, 对系统要求高, 如何消除隐藏信号与宿主信号之间的相互影响是需要解决的问题。仿

真中采用了一种具有双边带频谱结构的编解码器,可以提高系统的可用性和稳健性,但这种编解码器



也存在自相关性能较差的缺点。如何改善系统配置方案是今后研究的方向。

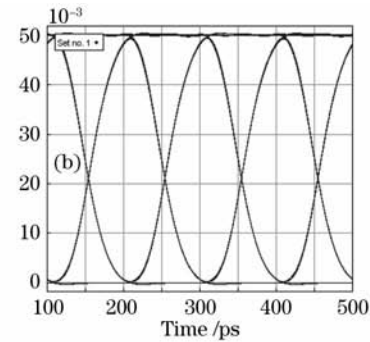


图 13 宿主信号的接收眼图。(a)无隐藏信号,(b)有隐藏信号

Fig. 13 Eyediagram of received signal of host channel. (a) Without covert signal, (b) with covert channel

4 结 论

介绍了基于相干 OCDMA 技术的光域隐藏通信方法,并给出了该方法的性能评价指标。针对目前光纤传输链路的特点,提出了三种隐藏通信方案,并进行了仿真研究。结果表明该方法在不影响宿主信道的基础上,具有较高的隐藏性和安全性,并且具有很高的传输速率,另外,凭借 OCDMA 技术良好的扩频特性,也具有较弱的稳健性,是一种很有应用前景的光域隐藏通信方法。

参 考 文 献

- 1 P. Torres, L. C. G. Valente, M. C. R. Carvalho. Security system for optical communication signals with fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2002, **50**(1): 13~16
- 2 Thomas H. Shake. Security performance of optical CDMA against eavesdropping[J]. *J. Lett. Technol.*, 2005, **23**(2): 655~670
- 3 Pu Tao, Wang Rong, Li Yuquan. Non-Gaussian approximation method for phase encoding optical code division multi-access system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 10~14
- 薄涛,王荣,李玉权. 相位编码光码分多址系统中的非高斯分析方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 10~14
- 4 Zhu Yingxun, Wang Rong, Ding Xiaoguang *et al.*. Performance analysis of temporal phase optical code-division multiple access system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1875~1882

朱英勋,王荣,丁晓光等. 时域相位 OCDMA 系统性能分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1875~1882

- 5 K. Kitayama, X. Wang, N. Wada. Coherent techniques for optical code division multiple-access systems[C]. *OSA Optical Amplifiers and Their Applications and Coherent Optical Technologies and Applications (OAAC/OTA)*, 2006, No. CFD3
- 6 Xu Xianling, Cui Nan. The information hiding technology and application[J]. *Information Security*, 2007, (3): 27~30
- 徐献灵,崔楠. 信息隐藏技术及其应用[J]. *信息安全*, 2007, (3): 27~30
- 7 Wu Weilei. Research on the scheme of OCDMA-based covert communication[D] Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2007. 24~31
- 吴伟磊. 基于 OCDMA 技术的隐藏通信研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2007. 24~31
- 8 Xu Wang, Naoya Wada, Tetsumiya Miyazaki *et al.*. Asynchronous multiuser coherent OCDMA system with code-shift-keying and balanced detection[J]. *IEEE JSTQE*, 2007, **13**: 1463~1470
- 9 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Shizhong Xie *et al.*. Equivalent phase shift in a fiber Bragg grating achieved by changing the sampling period[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10): 2284~2286
- 10 Bernard, B. Wu Evgenii, E. *et al.*. A method for secure communications over a public fiber-optical network[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(9): 3738~3751
- 11 Chen Peng, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Double band encoder based on super structured fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**: 陈鹏,王荣,薄涛等. 基于超结构光纤光栅的双边带编/解码器[J]. *中国激光*, 2009, **36**: