

光反馈垂直腔面发射半导体激光器的混沌驱动同步在保密通信中的应用

刘玉金¹ 张胜海² 杨 华² 谭建锋²

(¹河南理工大学万方科技学院, 河南 焦作 454003)
(²信息工程大学理学院数理系, 河南 郑州 450001)

摘要 基于光反馈垂直腔面发射半导体激光器(VCSELs)混沌驱动同步,提出了一种光反馈 VCSELs 混沌保密通信系统。通过模拟信号和数字信号在该系统的混沌保密通信的实现,验证了该系统的可行性。进一步利用该方案实现了对文字和数字图像的保密通信,并对解密图像及原始图像灰度值的差值做了相关计算。数值模拟结果说明该通信方案具有良好的解密效果。

关键词 非线性光学;混沌驱动同步;垂直腔面发射半导体激光器;保密通信;混沌

中图分类号 TN248.4;O415.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0905004

Application in Secret Communication of Chaos Driving Synchronization of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers with Optical Feedback

Liu Yujin¹ Zhang Shenghai² Yang Hua² Tan Jianfeng²

¹Wanfang College of Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

²Department of Mathematics and Physics, Institute of Science, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract Based on the chaos driving synchronization of vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) with optical feedback, the chaotic secure communication system of VCSELs with optical feedback is designed. Through the realizations of simulation signal and digital signal in the chaotic secure communication system, the feasibility of this system is verified. Besides, the secret communications of text and digital image can be well achieved by this scheme. Furthermore, the difference of image grey value between their histograms of encryption image and decryption image is calculated. Numerical simulation results show that the secret communication system has a good decryption effect.

Key words nonlinear optics; chaos driving synchronization; vertical cavity surface emitting laser; secret communication; chaos

OCIS codes 190.0190; 190.3100; 140.1540; 140.7260

1 引 言

早在 1990 年 Winful 等就在理论上预测了半导体激光器之间的混沌同步,随后对各类激光器的混沌同步及其保密通信的研究成为近年来的研究热点^[1,2]。在安全通信领域中,混沌以其在保密通信中的独特魅力显示了潜在的应用前景。近年来,垂直腔面发射半导体激光器(VCSELs)自身发展的日趋成熟,与传统半导体激光器相比,它具有体积小、阈值电流低、效率高、发散角小、可单模输出、易于和

光纤耦合等优异特性,在光通信、光互联、光储存光学器件集成等方面具有广阔的应用前景^[3~5]。因此基于 VCSELs 混沌同步以及其保密通信研究也成为当前的前沿课题。在实现混沌同步的 VCSELs 之间,利用激光混沌可以产生高维混沌载波,增加系统保密性的独特优势,可将保密信息加载到混沌信号中,发射到接受激光器,利用接收到的同步混沌信号可解调出保密信息,可实现现代光纤远程保密通信^[6~8]。无论从理论还是实际应用角度来说,深入

收稿日期: 2012-05-07; 收到修改稿日期: 2012-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(10975047),河南省基础与前沿技术研究项目(112300410305)资助课题。

作者简介: 刘玉金(1979—),男,硕士,主要从事光学混沌及其应用等方面的研究。E-mail: wflyj@hpu.edu.cn

研究光反馈 VCSELs 的混沌同步特性及其信息安全保密通信,对 VCSELs 和混沌保密通信的发展具有重要的现实意义。

本文主要研究了光反馈 VCSEL 的混沌保密通信。根据光反馈 VCSEL 的混沌同步,设计了一种混沌保密系统,利用此系统实现了对数字信号和模拟信号的混沌保密通信,并进一步研究了本方案在文字及数字图像的保密通信中的应用。

2 光反馈 VCSELs 的混沌驱动同步方案

混沌驱动同步法是指由一个可以产生混沌信号的驱动系统同时作用于两个被驱动系统,实现两个

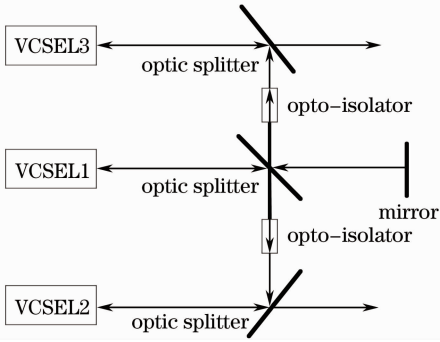


图 1 光反馈 VCSELs 的混沌驱动同步系统结构图
Fig. 1 Chaos driving synchronization system diagram of VCSELs with optical feedback

被驱动系统间的混沌同步^[9]。本文所采用的光反馈 VCSELs 的混沌驱动同步方案如图 1 所示。通过调节驱动激光器 VCSEL1 的部分出射光反射回谐振腔可使 VCSEL1 产生混沌光信号;将该混沌光信号同时注入到 VCSEL2、VCSEL3 中,调节驱动强度可实现 VCSEL2、VCSEL3 的混沌同步。在混沌同步及通信的数值模拟过程中,所采用 VCSELs 的典型参数见表 1^[10~14]。(1),(2)式分别为描述混沌驱动同步系统中驱动激光器和被驱动激光器的方程。

表 1 VCSELs 的典型参量

Table 1 Important parameters of VCSELs

Parameter	Value
Carrier lifetime τ_c /ns	2.7
Spontaneous emission factor β	1×10^{-4}
Group velocity v /(cm/s)	8.1×10^9
Lateral confinement factor Γ	1
Longitudinal confinement factor Γ_z	0.07
Equivalent cavity loss α /cm ⁻¹	50
Gain coefficient a_N /cm ⁻³	1.4×10^3
Gain suppression factor ϵ /cm ³	1×10^{-17}
Transparent carriers density N_0 /cm ⁻³	1.3×10^{18}
Recombination coefficient B_{sp} /(cm ³ /s)	1×10^{-10}
Linewidth-enhancement factor β_c	4.8
Thickness of active region d /μm	0.4
Injection current I /mA	6
Current aperture w /μm	5
Round-trip time of light τ_{in} /ps	0.04

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = [G_1(t) - v_g \alpha] P_1(t) + \beta_{sp} B N_1^2(t) + 2 \frac{k_1}{\tau_{in}} \sqrt{P_1(t) P_1(t - \tau_T)} \times \\ \cos[\omega_1 \tau_T + \Phi_1(t) - \Phi_1(t - \tau_T)] \\ \frac{d\Phi_1(t)}{dt} = \frac{1}{2} \beta_c [G_1(t) - v_g \alpha] - \frac{k_1}{\tau_{in}} \sqrt{\frac{P_1(t - \tau_T)}{P_1(t)}} \sin[\omega_1 \tau_T + \Phi_1(t) - \Phi_1(t - \tau_T)] \\ \frac{dN_1(t)}{dt} = \frac{I_1}{qV} - \frac{N_1(t)}{\tau_e} - G_1(t) P_1(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dP_{2,3}(t)}{dt} = [G_{2,3}(t) - v_g \alpha] P_{2,3}(t) + \beta_{sp} B N_{2,3}^2(t) + 2 \frac{k_{2,3}}{\tau_{in}} \sqrt{P_{2,3}(t) P_1(t - \tau_R)} \cos[\Delta\omega_{2,3}(t - \tau_R) + \\ \omega_1 \tau_R + \Phi_{2,3}(t) - \Phi_1(t - \tau_R)] \\ \frac{d\Phi_{2,3}(t)}{dt} = \frac{1}{2} \beta_c [G_{2,3}(t) - v_g \alpha] - \frac{k_{2,3}}{\tau_{in}} \sqrt{\frac{P_1(t - \tau_R)}{P_{2,3}(t)}} \sin[\Delta\omega_{2,3}(t - \tau_R) + \omega_1 \tau_R + \Phi_{2,3}(t) - \Phi_1(t - \tau_R)] \\ \frac{dN_{2,3}(t)}{dt} = \frac{I_{2,3}}{qV} - \frac{N_{2,3}(t)}{\tau_e} - G_{2,3}(t) P_{2,3}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $G(t) = \Gamma_z \Gamma_v v_g a_N \frac{\ln[N(t)/N_0]}{1 + \epsilon P(t)}$ 为光增益, $P(t)$ 为光子数密度, $\Phi(t)$ 为光场相位, $N(t)$ 为载流子密

度, q 为电子电荷, $V = \pi \omega^2 d$ 为有源区体积, ω 为电流孔径, ω_1 为模式频率, $\Delta\omega_2$ 、 $\Delta\omega_3$ 为驱动激光器与

被驱动激光器之间的频率失谐,其他参量含义详见表1。

利用该混沌驱动同步方案能够很好地实现两个被驱动激光器的混沌同步。对该系统混沌驱动同步相关系数的计算表明,当 $0.5 \times 10^{-4} \leq k_{2,3} \leq 1.2 \times 10^{-4}$, $k_{2,3} > 4.8 \times 10^{-4}$ 时,被驱动激光器间达到了完全同步^[15],驱动强度较大时两激光器更加容易达到混沌同步,本方案中驱动强度 $k_{2,3} = 6 \times 10^{-4}$ 。当然,激光器间参数失配对同步品质有一定的影响,但参数失配率在一定的范围内,两激光器仍能达到很好的同步效果。这种光反馈 VCSELs 的混沌信号驱动同步方案具有很好的稳健性^[15,16],为进一步研究光反馈 VCSELs 的混沌保密通信提供了重要的理论依据。

3 光反馈 VCSELs 的混沌保密通信

混沌掩盖技术具有容易受到信道噪声干扰等缺点,但它掩盖实现的方式多样,有相乘、相加或相减或相乘结合等,并且对系统结构要求简单,易于实现。在研究了光反馈 VCSELs 混沌驱动同步的基础上,利用相乘结合的混沌掩盖技术,提出了一种基于光反馈 VCSELs 混沌驱动同步的保密通信方案,如图2所示。

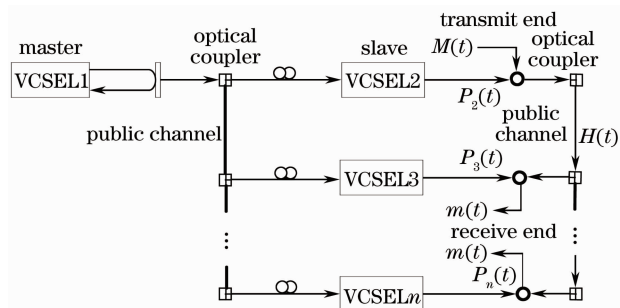


图2 光反馈 VCSELs 的混沌保密通信系统结构图

Fig.2 Chaotic secure communication system diagram of VCSELs with optical feedback

该混沌保密通信系统流程为:由主激光器 VCSEL1 通过光反馈产生混沌信号,产生的混沌信号通过光耦合器分离和光纤传输注入到多个从激光器,通过调节驱动强度等参数,实现激光器间的混沌驱动同步。在发送端激光器 VCSEL2 中,通过混沌掩盖技术,将需要加密传输的原始信息 $M(t)$ 振幅缩小并隐藏在输出的混沌信号 $P_2(t)$ 当中。加密后的混合信号 $H(t)$ 通过公用信道一对一、一对多、多对一的交互传递,传递到接收端激光器 VCSEL3、VCSEL4...VCSELn 中。通过同步解调去除接收端

混沌信号 $P_n(t)$,还原放大得到所需要的解密信息 $m(t)$,由此实现了秘密信息的混沌保密通信。一般说来, $M(t)$ 与 $m(t)$ 在一定的参数失配范围内是近似相等的,即 $M(t) \approx m(t)$,说明只要解密信息与原始信息在合理的误差范围内,这并不影响对混沌保密通信中信息的识别。需说明的是,在该混沌保密通信系统中并没有考虑到环境温度、气压变化、外部噪声等外界因素对同步激光器参数的影响,在实际的通信中,系统参数的不匹配甚至微小差别都可能导致精确混沌同步的失败,激光器的同步质量会随着参数失配程度的增大而降低,但是在内部参数失配 $\pm 5\%$ 的范围内,混沌同步能保持一定程度的容忍性,相关系数 ρ 都能保证在 0.90 以上^[16]。另外混沌同步质量对于两激光器的频率失谐较为敏感,只有在频率失谐较小的范围内才能实现同步,混沌通信系统的传输性能也会受到参数失配的影响。该方案提供的混沌保密通信系统只是一个理论上的初步方案,要在实验上加以实现还需要更进一步研究噪声、频率失谐等的影响。

3.1 方案的可行性

利用该通信方案,分别对模拟信号和数字信号在该系统的通信过程进行模拟。

首先,对模拟信号在该保密通信系统中的实现过程进行模拟。所用的模拟信号方程为

$$M(t) = A(1 - \sin \omega t). \quad (3)$$

式中 A 为模拟信号的振幅,圆频率 $\omega = 2\pi f$, f 为信号的频率。在数值模拟过程中,取 $A = 0.5$, $f = 2.5$ GHz。

图3是模拟信号在混沌保密通信系统中实现过程的模拟仿真结果,为了分析方便,图中的振幅和时间轴均取为任意单位。图3(a)为原始的模拟信号 $M(t)$,图3(b)为激光器间同步的混沌信号 $P(t)$,图3(c)为将模拟信号 $M(t)$ 的 1% 成功地隐藏在混沌信号 $P(t)$ 中,形成加密的混合信号 $H(t)$,图3(d)为通过解调去除混沌信号后,还原放大得到的解密模拟信号 $m(t)$ 。

模拟结果表明,加密信号的振幅在有些时间段较原来混沌信号振幅发生微小的变化,但整个信号的波形并没有发生明显的变化,加密信号也具有宽带类噪声的特性,其含有的原始信号很难被窃取。为了更好地定量说明解密的效果,图4给出了模拟信号的解密信号和原始信号差值的时间序列,结果表明解密效果非常好。

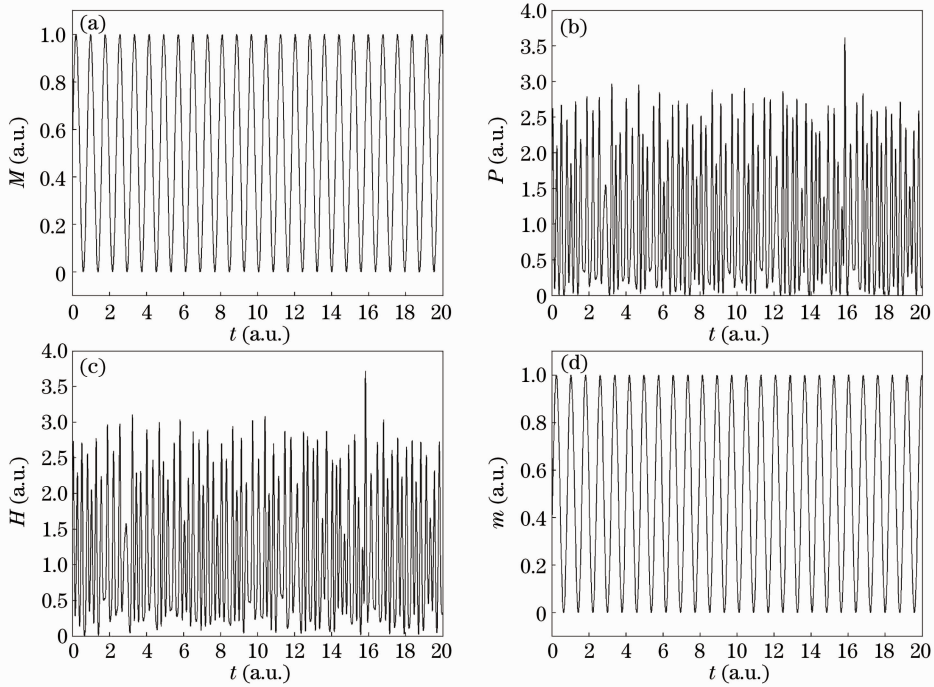


图 3 模拟信号在混沌保密通信中的数值模拟。(a)原始信号;(b)混沌信号;(c)加密信号;(d)解密信号
Fig. 3 Numerical simulation of analog signals in the chaotic secure communication. (a) Original signal;

(b) chaotic signal; (c) encryption signal; (d) decryption signal

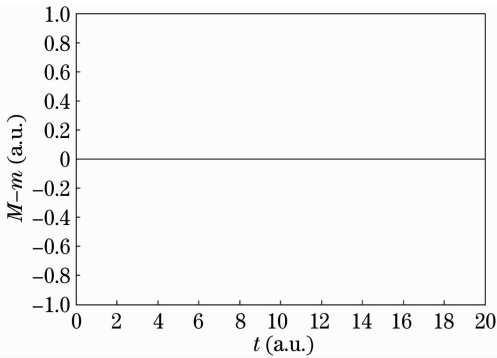


图 4 模拟信号的解密信号和原始信号差值时间序列

Fig. 4 Time series of the difference between the encryption and original signal of simulation signal

然后,对数字信号在该保密通信系统中的实现过程进行模拟。模拟中所用的数字信号振幅 $A=1$, 速率为 1 Gb/s 。图 5 为数字信号在混沌保密通信系统中实现过程的模拟结果。图 5(a)为原始的数字信号 $M(t)$,图 5(b)为混沌信号 $P(t)$,图 5(c)为加密的混合信号 $H(t)=P(t)+1\%M(t)$,图 5(d)为去除混沌信号后,放大得到的解密数字信号 $m(t)$ 。

模拟结果表明解密信号与原始信号完全相等。解密信号和原始信号差值的时间序列如图 6 所示,也表明解密效果非常好。

对模拟信号和数字信号的数值模拟结果表明,本文提出的光反馈 VCSELs 的混沌保密通信系统

对于保密通信的实现是可行的。

3.2 方案的应用

在证明该方案可行的基础上,利用混沌掩盖技术实现了文字、数字图像基于光反馈 VCSELs 的光学混沌保密通信。

图 7 是本文设计的文字、数字图像基于 VCSELs 混沌保密通信的方案。其思路为:首先将文字、数字图像通过计算机处理转变为数字信号,由一激光器将数字信号按光脉冲形式发送到 VCSELs 混沌驱动同步系统中。其次,利用混沌掩盖技术将光脉冲信号隐藏于 VCSELs 混沌驱动同步系统发送端的混沌光信号中,得到加密信号。然后加密信号由光纤公用信道传输到 VCSELs 混沌驱动同步系统的接收端,由于接收端激光器和发送端激光器完全同步,在接收端通过去除加密信号中的混沌光信号,解调还原得到原光脉冲信号。最后,通过计算机将接收到的光脉冲信号编码得到对应的数字信号,将数字信号还原就得到了原来传输的文字、数字图像信息。

图 8 是文本文字利用基于 VCSELs 的混沌保密通信系统的加密与解密模拟。图 8(a)为原始文本,它由英文字母和中文构成。图 8(b)为加密文本,可以看出加密后的文本出现了英文字母、数字和乱码,根本就不能识别出原来的文本文字。图 8(c)

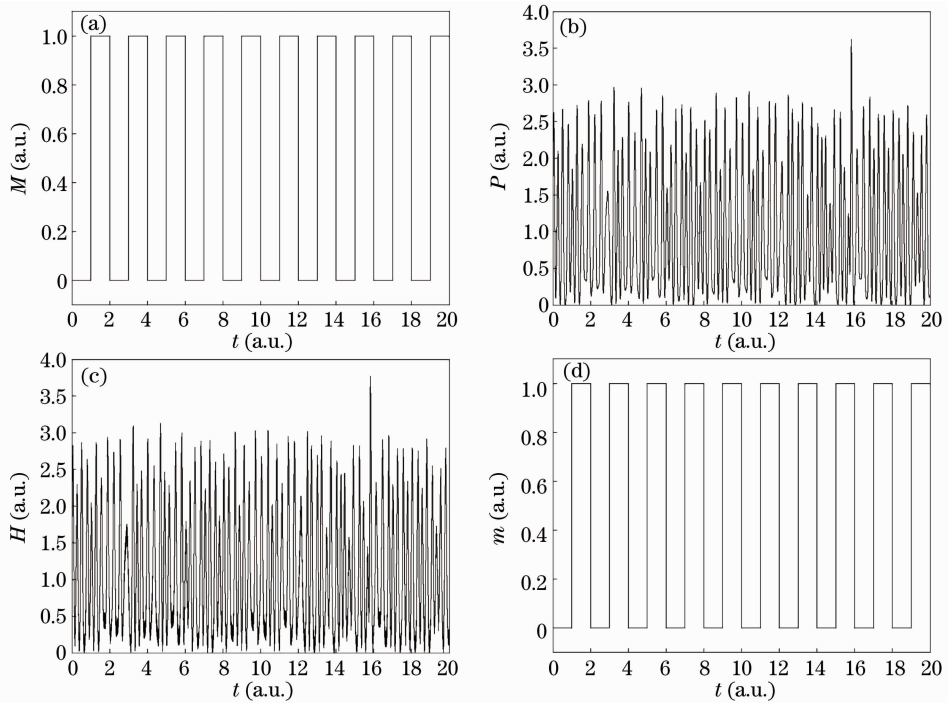


图 5 数字信号在混沌保密通信中的模拟。(a)原始信号;(b)混沌信号;(c)加密信号;(d)解密信号
 Fig. 5 Numerical simulation of digital signals in the chaotic secure communication. (a) Original signal; (b) chaotic signal; (c) encryption signal; (d) decryption signal

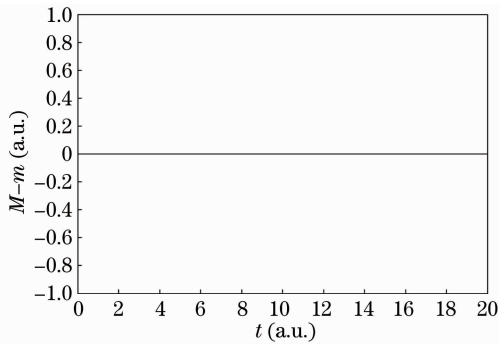


图 6 数字信号的解密信号和原始信号差值时间序列
 Fig. 6 Time series of the difference between the encryption and original signal of the digital signal

为解密文本,对比原始文本内容,解密后的文本与其一致。由此说明通过基于 VCSELs 的混沌保密通信方案实现了文字的混沌加密与解密。

图 9 为 256 pixel×256 pixel 的真彩色 jpg 数字图像 lena 利用该混沌保密通信系统的加密与解密模拟。图 9(a)是原始的 lena 图像及其直方图,图 9(b)是 lena 加密后的图像及其直方图,图 9(c)是 lena 解密后的图像及其直方图。这里需要说明的是,直方图是对数字图像每一灰度间隔内像素频率的统计,对于彩色图像的直方图可以分为 R、G、B 三通道。以灰度值为横轴,以像素数目为纵轴,按每个间隔内的像素数目做出的图就是一维直方图。由

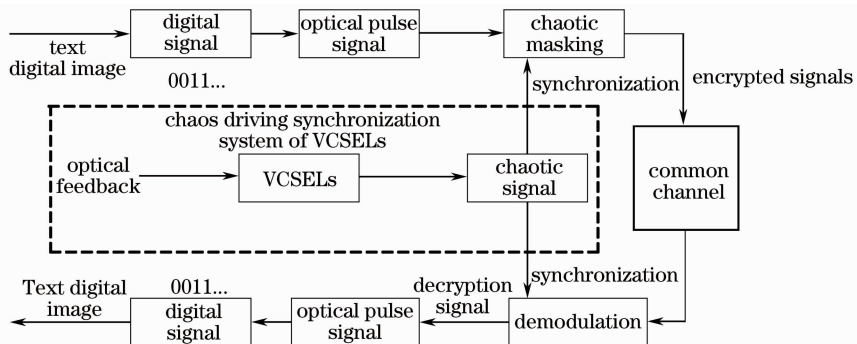


图 7 基于 VCSELs 对文字、数字图像混沌保密通信的方案
 Fig. 7 Scheme for chaotic secure communication of the text and digital image based on VCSELs

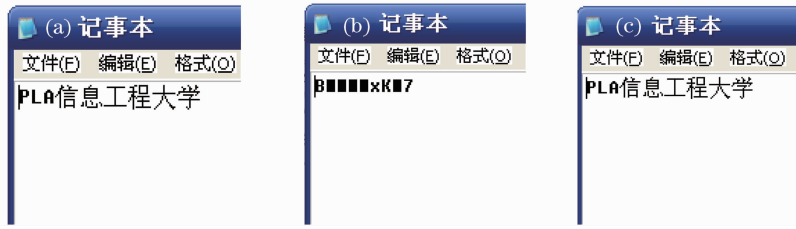


图 8 文字的混沌保密通信模拟。(a)原始文本;(b)加密文本;(c)解密文本

Fig. 8 Chaotic secure communication of the text. (a) Original text; (b) encryption text; (c) decryption text

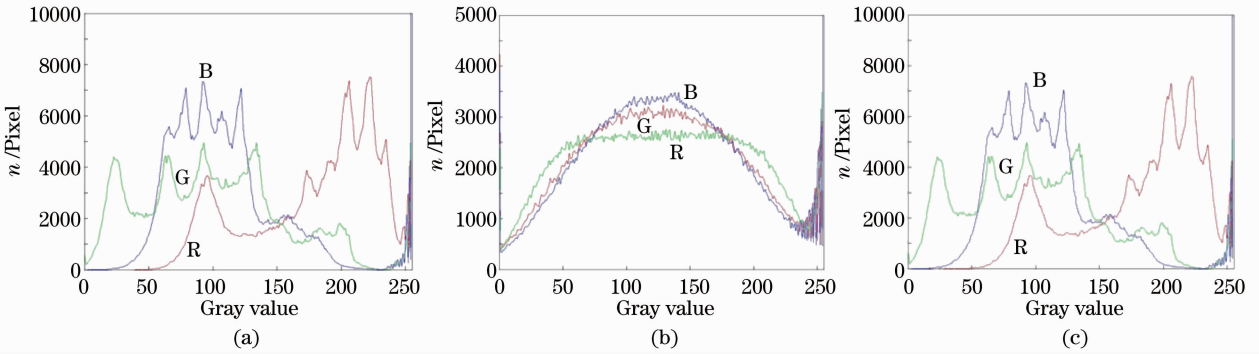
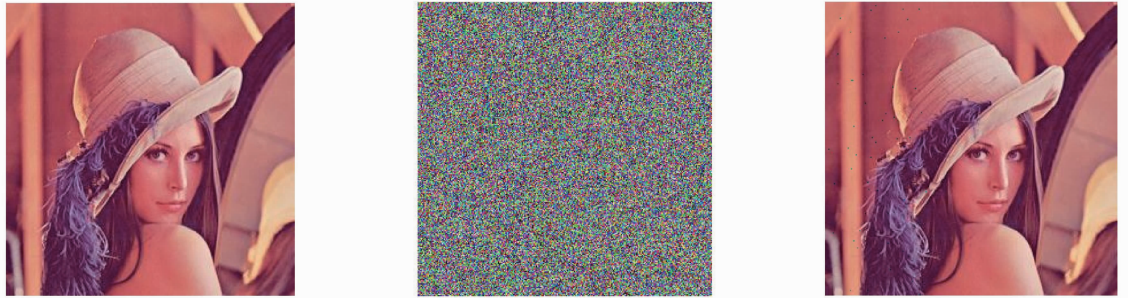


图 9 数字图像的混沌保密通信。(a)原始图像及其直方图;(b)加密图像及其直方图;(c)解密图像及其直方图

Fig. 9 Chaotic secure communication of the digital picture. (a) Original image and its histogram; (b) encryption image and its histogram; (c) decryption image and its histogram

图 9(b)可以看出, lena 加密图像的像素和灰度都被置乱,其 R、G、B 三通道在每一灰度间隔内像素频率分布起伏不是很大,已经根本看不出原始图像的任何信息,说明利用基于 VCSELs 混沌保密通信方案实现了图像的混沌加密。解密图像和原始图像从视觉上几乎一致,它们的 R、G、B 三通道直方图大致相同,这些都能说明利用基于 VCSELs 混沌保密通信方案解密后的图像,可以恢复原图像所包含的信息。

为了进一步分析图像解密的效果,图 10 给出了解密图像直方图与原始图像直方图的差值在每一灰度值上的分布。由图可以看到解密图像直方图与原始图像直方图在每一灰度值上有一定的误差,通过计算得到 R、G、B 三通道直方图的最大相对误差分别为 0.0423%、0.0186%、0.0279%。可以看出这些误差很小,对解密图像的整个像素频率在每一灰度值上分布的影响不大,解密图像和原始图像的像素频率在每一灰度值上分布几乎相等,进而说明本

方案的解密效果很好。

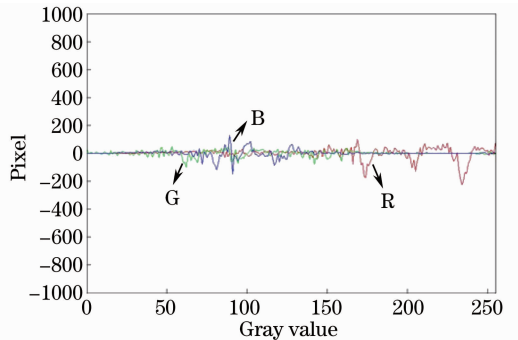


图 10 解密图像直方图与原始图像直方图的差值
Fig. 10 Difference value between the histograms of encryption image and decryption image

4 结 论

在光反馈 VCSELs 混沌驱动同步的基础上,采用混沌掩盖技术,提出了一种光反馈 VCSELs 混沌

保密通信系统。模拟信号和数字信号在该系统的混沌保密通信的实现证明了该系统的可行性。进一步利用该混沌保密通信方案,通过数值模拟实现了文字、数字图像的保密通信。该混沌通信方案稳健性好,解密信号精确。图像灰度值差值的计算也进一步说明解密效果良好。因此,这种光反馈 VCSELs 混沌保密通信方案能为混沌同步在保密通信的实际应用提供重要参考。

参 考 文 献

- 1 M. S. Torre, C. Masoller, K. A. Shore. Synchronization of unidirectionally coupled multi-transverse-mode vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(10): 1772~1780
- 2 Wang Wei, Zhang Shenghai, Qian Xingzhong *et al.*. Synchronization of chaotic VCSELs by external chaotic signal parameter modulation [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(10): 945~948
- 3 Han Liying, Jia Chunhui, Liu Lei *et al.*. Characteristic of vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Photon Technology*, 2006, **14**(4): 181~184
韩力英, 贾春辉, 刘磊等. 垂直腔面发射半导体激光器特性分析[J]. *光子技术*, 2006, **14**(4): 181~184
- 4 Song Junfeng, Fu Yanping, Liu Yang *et al.*. Analysis of vertical-cavity surface-emitting lasers small-signal modulation property [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(4): 345~348
宋俊峰, 付艳萍, 刘扬等. 垂直腔面发射激光器的动态特性分析[J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(4): 345~348
- 5 Li Lin, Zhong Jingchang, Su Wei *et al.*. Vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Journal of Chang Chun University of Science and Technology*, 2003, **26**(2): 68~72
李林, 钟景昌, 苏伟等. 垂直腔面发射半导体激光器[J]. *长春理工大学报*, 2003, **26**(2): 68~72
- 6 M. W. Lee, Y. H. Hong, K. A. Shore. Experimental demonstration of VCSEL-based chaotic optical communications [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10): 2392~2394
- 7 T. Matsuura, A. Uchida, S. Yoshimori. Chaotic wavelength division multiplexing for optical communication [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23): 2731~2733
- 8 A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger *et al.*. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links [J]. *Nature*, 2005, **437**(17): 343~346
- 9 Wang Rong, Shen Ke. Synchronization of chaotic erbium-doped fiber dual-ring laser by using the method of another chaotic system to drive them [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **65**(1): 016207
- 10 S. F. Yu. Nonlinear dynamics of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(3): 332~341
- 11 Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin *et al.*. Study of parameter for higher order bifurcation and chaos behavior of VCSELs control [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(11): 1789~1792
潘伟, 张晓霞, 罗斌等. VCSELs 高阶分岔及混沌行为的参数控制 [J]. *电子学报*, 2004, **32**(11): 1789~1792
- 12 Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin *et al.*. Analysis expression of rate equation for vertical cavity lasers [J]. *Semiconductor Photonics and Technology*, 2000, **6**(1): 40~42
- 13 Li Xiaofeng, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Nonlinear dynamic behaviors of an optically injected vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chaos, Soliton and Fractals*, 2006, **27**: 1387~1394
- 14 Li Xiaofeng, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Control of nonlinear dynamics in external-cavity VCSELs with delayed negative optoelectronic feedback [J]. *Chaos, Soliton and Fractals*, 2006, **30**: 1004~1011
- 15 Zhang Shenghai, Tan Jianfeng, Yang Hua *et al.*. Chaos driving synchronization of vertical cavity surface emitting lasers with optical feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402013
张胜海, 谭建峰, 杨华等. 光反馈垂直腔面发射半导体激光器的混沌驱动同步 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0402013
- 16 Yan Senlin. Theoretical studies on chaotic semiconductor laser dual directional secure communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1503~1509
颜森林. 半导体激光器混沌双向保密通信系统理论研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1503~1509

栏目编辑: 宋梅梅