

激光混沌并行串联同步及其在中继器 保密通信系统中的应用

颜森林[†]

(南京晓庄学院电子工程学院, 南京 211171)

(2019年2月18日收到; 2019年6月21日收到修改稿)

研究了两个不同半导体激光器的相互耦合与其他激光器之间的混沌并行同步和多周期并行同步. 提出激光并行串联复杂动力学系统与网络, 给出光学光路与数学物理模型. 由此提出中继器运行原则, 给出了信道编码方程. 成功实现了激光混沌再生与发送, 分别完成了有中继器系统的两个异路混沌加密通信. 这是一种新型的混沌编码网络系统, 具有中继器核心技术要素, 它具有多变量、高维度、多密钥以及两路不同混沌载波特点, 具有高度的安全性、不易被破解等特性. 其研究结果对混沌在保密通信应用、光网络和激光技术的研究具有重要的参考价值.

关键词: 混沌, 同步, 激光器, 网络

PACS: 05.45.Vx, 05.45.Xt, 42.60.-v

DOI: 10.7498/aps.68.20190212

1 引言

目前, 随着光通信和光网络的快速发展, 信息安全越来越重要. 人们对加密技术特别是激光混沌加密技术越来越感兴趣. 近年来, 激光混沌保密通信研究已取得了许多重要研究成果, 并被广泛应用^[1-4]. 然而, 一些低维混沌激光系统由于其较弱的非线性仅具有较低的安全性. 而高维混沌激光系统在进行加密时, 能够产生高维度的激光混沌输出, 具有较高的安全性, 因而具有一定的技术优势. 而耦合激光器具有高维非线性动力学特性^[5-19], 并被广泛地应用在双稳态和高速信号发生器等器件中^[10-16]. 本文主要研究两种不同半导体激光器的相互耦合. 与单个混沌激光器相比较, 如与注入激光器或延时反馈激光器等相比较^[17-19], 该系统具有更多空间变量或更多空间自由度, 并且能够

形成更高维的非线性动力学; 而与相同两个激光器耦合比较^[5-19], 具有更多自由变量和更多激光参数密钥. 因而, 系统总体上呈现出高度的安全性和难以破译的技术优点, 明显地增加了入侵者的破译难度. 此外, 人们还对混沌多路通信也特别关注. 但目前主要还是单个混沌激光器的多路通信^[3,4,20-23]. 所以在本文研究中, 我们也将关注该网络系统的并行同步在两个异路混沌通信中的应用等问题. 与以往单个激光器的两路混沌通信系统相比较, 它显示出更加明显的灵活性. 还有在远程混沌通信中, 由于能量分配、器件插入、信道吸收等因素, 信息信号会逐步减弱, 以至于接收机难以接收解调. 所以还需要混沌中继与放大. 由于光放大器成熟应用, 信号放大问题可以由光放大器很好地解决. 但由于混沌信号对系统参数、外界影响等因素具有极其敏感的特性, 进而导致混沌信号极易变异、以至于接收机难以实现同步解调. 因此, 混沌信号再生是实

[†] 通信作者. E-mail: senlinyan@163.com

现远程混沌通信中的一项关键技术. 本文提出了一个高维的激光混沌并行同步与中继技术方案, 研究有多个中继站的两路混沌通信等问题.

2 激光并行串联同步网络与数学物理模型

本文提出的两种不同半导体激光器的耦合发射系统, 能够输出两路混沌信号, 每路还串联多个激光器. 由此形成激光混沌并行串联同步网络与系统, 如图 1 所示. 其中, 图 1(a) 是网络拓扑图, 图 1(b) 是光路图. 图 1(a) 显示, 耦合激光器送出了两路激光, 分别驱动每路所串联的 N 个激光器 (N 是正整数), 这样构成两路串联激光器系统. 事实上, 这也是一个两路并行串联复杂动力学网络系统. 对该网络而言, 各个独立的激光器构成了网络节点 (且每个节点激光器都有一个反馈回路). 物理上, 我们把每个网络节点定义为中继器. 其主要功能是: 接收与同步, 再生与发射. 为了实现这两个功能, 每个节点激光器 (如: R_2 或 r_2) 接收上个激光器 (R_1 或 r_1) 信号, 同时还接收另外一路所对应节点 (r_2 或者 R_2) 的上个激光器 (r_1 或 R_1) 的信号, 获取同步并产生混沌. 以此类推, 两路各个激光器获得串联同步. 当然, 最后一组激光器可以作为接收机. 由此, 提出光学光路图 1(b). 为了保密通信以

及获取两路并行同步, 激光器 t, r_1, r_2, \dots, r_N 取相同的参数; 激光器 T, R_1, R_2, \dots, r_N 也取相同的参数. 图 1(b) 中, 最上层是发射机, 是由两个耦合激光器 t 和 T 组成, 输出两路激光 E_t 和 E_T . 第 2 层第一组两个中继器是激光器 R_1 和 r_1 (它们各存在一个光反馈回路). 对激光器 r_1 而言, 光 E_T 注入驱动激光器 r_1 到混沌态, 光 E_t 注入到激光器 r_1 中使激光器 r_1 获得与激光器 t 的同步. 对激光器 R_1 而言, 光 E_t 注入驱动激光器 R_1 到混沌态, 光 E_T 光注入到激光器 R_1 中使激光器 R_1 获得与激光器 T 的同步. 第三层第二组两个中继器是激光器 R_2 和 r_2 (它们各存在一个光反馈回路), 对激光器 r_2 而言, 光 E_{R_1} 注入驱动激光器 r_2 到混沌态, 光 E_{r_1} 注入到激光器 r_2 中使激光器 r_2 获得与激光器 r_1 的同步. 对激光器 R_2 而言, 光 E_{r_2} 注入驱动激光器 R_2 到混沌态, 光 E_{R_2} 注入到激光器 R_2 中使得激光器 R_2 获得与激光器 R_1 的同步. 以此类推, 最终获得激光器 $t, r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N-1}, r_N$ 的串联同步, 获得激光器 $T, R_1, R_2, R_3, \dots, R_{N-1}, R_N$ 的串联同步 (最后一组激光器 r_N 和 R_N 可作为接收机). 由此产生激光两路并行串联同步.

$$\frac{dE_t}{dt} = \frac{1}{2}(G_t - \gamma_p)E_t + \frac{k}{\tau_{L_t}}E_T \cos(\varphi_T - \varphi_t), \quad (1a)$$

$$\frac{d\varphi_t}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_t - \gamma_p) + \frac{k}{\tau_{L_t}}\frac{E_T}{E_t} \sin(\varphi_T - \varphi_t) - \Delta\omega, \quad (1b)$$

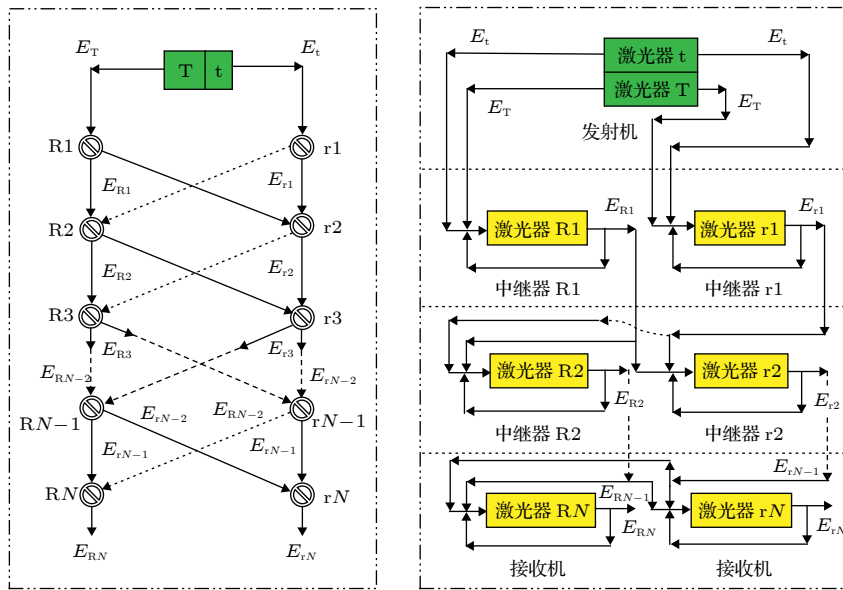


图 1 并行串联复杂动力学网络及中继器光路图 (a) 网络拓扑图; (b) 光路图

Fig. 1. Parallel series complex dynamical network and optical path of repeater: (a) Network topology; (b) optics path.

$$\frac{dN_t}{dt} = \frac{I_t}{q} - \gamma_{et}N_t - G_t V_{pt} E_t^2, \quad (1c)$$

$$\frac{dE_T}{dt} = \frac{1}{2}(G_T - \gamma_p)E_T + \frac{k}{\tau_{LT}} E_t \cos(\varphi_t - \varphi_T), \quad (1d)$$

$$\frac{d\varphi_T}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_T - \gamma_p) + \frac{k}{\tau_{LT}} \frac{E_t}{E_T} \sin(\varphi_t - \varphi_T) + \Delta\omega, \quad (1e)$$

$$\frac{dN_T}{dt} = \frac{I_T}{q} - \gamma_{eT}N_T - G_T V_{pT} E_T^2; \quad (1f)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{r1}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{r1} - \gamma_p)E_{r1} + \frac{k}{\tau_{Lr1}} E_T \cos(\varphi_T - \varphi_{r1}) \\ &+ \frac{k_{r1}}{\tau_{Lr1}} [E_t \cos(\varphi_t - \varphi_{r1}) - E_{r1}], \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{r1}}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_{r1} - \gamma_p) + \frac{k}{\tau_{Lr1}} \frac{E_T}{E_{r1}} \sin(\varphi_T - \varphi_{r1}) \\ &+ \frac{k_{r1}}{\tau_{Lr1}} \frac{E_t}{E_{r1}} \sin(\varphi_t - \varphi_{r1}) - \Delta\omega, \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\frac{dN_{r1}}{dt} = \frac{I_{r1}}{q} - \gamma_{er1}N_{r1} - G_r V_{pr1} E_{r1}^2, \quad (2c)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{R1}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{R1} - \gamma_p)E_{R1} + \frac{k}{\tau_{LR1}} E_t \cos(\varphi_t - \varphi_{R1}) \\ &+ \frac{k_{R1}}{\tau_{LR}} [E_T \cos(\varphi_T - \varphi_{R1}) - E_{R1}], \end{aligned} \quad (2d)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{R1}}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_{R1} - \gamma_p) + \frac{k}{\tau_{LR1}} \frac{E_t}{E_{R1}} \sin(\varphi_t - \varphi_{R1}) \\ &+ \frac{k_{R1}}{\tau_{LR1}} \frac{E_T}{E_{R1}} \sin(\varphi_T - \varphi_{R1}) + \Delta\omega, \end{aligned} \quad (2e)$$

$$\frac{dN_{rR1}}{dt} = \frac{I_{rR1}}{q} - \gamma_{erR1}N_{rR1} - G_{R1} V_{prR1} E_{rR1}^2; \quad (2f)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{r2}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{r2} - \gamma_p)E_{r2} + \frac{k}{\tau_{Lr2}} E_{R1} \cos(\varphi_{R1} - \varphi_{r2}) \\ &+ \frac{k_{r2}}{\tau_{Lr2}} [E_{r1} \cos(\varphi_{r1} - \varphi_{r2}) - E_{r2}], \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{r2}}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_{r2} - \gamma_p) + \frac{k}{\tau_{Lr2}} \frac{E_{R1}}{E_{r2}} \sin(\varphi_{R1} - \varphi_{r2}) \\ &+ \frac{k_{r2}}{\tau_{Lr2}} \frac{E_{r1}}{E_{r2}} \sin(\varphi_{r1} - \varphi_{r2}) - \Delta\omega, \end{aligned} \quad (3b)$$

$$\frac{dN_{r2}}{dt} = \frac{I_{r2}}{q} - \gamma_{er2}N_{r2} - G_r V_{pr2} E_{r2}^2, \quad (3c)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{R2}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{R2} - \gamma_p)E_{R2} + \frac{k}{\tau_{LR2}} E_{r1} \cos(\varphi_{r1} - \varphi_{R2}) \\ &+ \frac{k_{R2}}{\tau_{LR2}} [E_{R1} \cos(\varphi_{R1} - \varphi_{R2}) - E_{R2}], \end{aligned} \quad (3d)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{R2}}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_{R2} - \gamma_p) + \frac{k}{\tau_{LR2}} \frac{E_{r1}}{E_{R2}} \sin(\varphi_{r1} - \varphi_{R2}) \\ &+ \frac{k_{r2}}{\tau_{LR2}} \frac{E_{R1}}{E_{R2}} \sin(\varphi_{R1} - \varphi_{R2}) + \Delta\omega, \end{aligned} \quad (3e)$$

$$\frac{dN_{R2}}{dt} = \frac{I_{R2}}{q} - \gamma_{eR2}N_{R2} - G_{R2} V_{pR2} E_{R2}^2; \quad (3f)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{rN}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{rN} - \gamma_p)E_{rN} \\ &+ \frac{k}{\tau_{LrN}} E_{RN-1} \cos(\varphi_{RN-1} - \varphi_{rN}) \\ &+ \frac{k_{rN}}{\tau_{LrN}} [E_{rN-1} \cos(\varphi_{rN-1} - \varphi_{rN}) - E_{rN}], \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{rN}}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_{rN} - \gamma_p) \\ &+ \frac{k}{\tau_{LrN}} \frac{E_{RN-1}}{E_{rN}} \sin(\varphi_{RN-1} - \varphi_{rN}) \\ &+ \frac{k_{rN}}{\tau_{LrN}} \frac{E_{rN-1}}{E_{rN}} \sin(\varphi_{rN-1} - \varphi_{rN-2}) - \Delta\omega, \end{aligned} \quad (4b)$$

$$\frac{dN_{rN}}{dt} = \frac{I_{rN}}{q} - \gamma_{erN}N_{rN} - G_r V_{prN} E_{rN}^2, \quad (4c)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{RN}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{RN} - \gamma_p)E_{RN} \\ &+ \frac{k}{\tau_{LRN}} E_{rN-1} \cos(\varphi_{rN-1} - \varphi_{RN}) \\ &+ \frac{k_{RN}}{\tau_{LRN}} [E_{RN-1} \cos(\varphi_{RN-1} - \varphi_{RN}) - E_{RN}], \end{aligned} \quad (4d)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{RN}}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_{RN} - \gamma_p) \\ &+ \frac{k}{\tau_{LRN}} \frac{E_{rN-1}}{E_{RN}} \sin(\varphi_{rN-1} - \varphi_{RN}) \\ &+ \frac{k_{RN}}{\tau_{LRN}} \frac{E_{RN-1}}{E_{RN}} \sin(\varphi_{RN-1} - \varphi_{RN}) + \Delta\omega, \end{aligned} \quad (4e)$$

$$\frac{dN_{RN}}{dt} = \frac{I_{RN}}{q} - \gamma_{eRN}N_{RN} - G_{RN} V_{pRN} E_{RN}^2; \quad (4f)$$

脚标 $t, T, R1, R2, RN-1, RN, r1, r2, rN-1, rN$ 分别代表激光器 $t, T, R1, R2, RN-1, RN, r1, r2, rN-1, rN$; 变量 E, φ 和 N 分别表示激光振幅、相位和载流子数. 模式增益是 $G = (\Gamma v_g a/V) \times (N - N_{th})/\sqrt{1 + E^2/E_s^2}$, 其中 v_g 是光子群速度, a 是增益常数, $\Gamma = V/V_p$ 是压缩和限制因子, V 是腔体积, V_p 是激光模式体积, E_s 是饱和光子

场强. $N_{\text{th}} = n_{\text{th}}V$ 是激光透明时的载流子数, n_{th} 是它的密度值; $\gamma_p = v_g\alpha_m$ 是光子损耗速率, α_m 是光子损耗系数. I 是驱动电流, q 是单位电荷. β_c 是光线宽增强因子. $\gamma_e = A_{\text{nr}} + B(N/V) + C(N/V)^2$ 是载流子非线性损耗速率, A_{nr} 是非辐射复合速率, B 是辐射复合因子, C 是俄歇复合因子; $\tau_L = 2n_gL/c$ 是光在激光器腔长 L 内来回一周的时间, c 是真空中光速, $n_g = c/v_g$ 是激光器群速折射率; $\Delta\omega$ 是激光频率失谐; k 是耦合驱动系数; k_t 与 k_R 都是注入系数. 为了简化计算, 我们给出三组激光器进行数学讨论. 在本工作中, 取激光器 t , r_1 , r_2 的腔长是激光器 T , R_1 和 R_2 腔长的 2 倍, 即有 $L_{t, r_1, r_2} = 2L_{T, R_1, R_2} = 2L$. 这样导致和长度与体积有关的参量必须改写:

$$\tau_{L_{t,r_1,r_2}} = 2\tau_{L_{R_1,R_2}} = 4n_gL/c = 2\tau_L,$$

$$V_{t,r_1,r_2} = 2V_{T,R_1,R_2} = 2V, \quad V_{p_{t,r_1,r_2}} = 2V_{p_{T,R_1,R_2}} = 2V_p,$$

$$N_{\text{th}_{t,r_1,r_2}} = 2N_{\text{th}_{T,R_1,R_2}} = 2n_{\text{th}}V,$$

$$\gamma_{e_{t,r_1,r_2}} = A_{\text{nr}} + B(N_{t,r_1,r_2}/2V) + C(N_{t,r_1,r_2}/2V)^2,$$

$$\gamma_{e_{T,R_1,R_2}} = A_{\text{nr}} + B(N_{T,R_1,R_2}/V) + C(N_{T,R_1,R_2}/V)^2,$$

$$G_{t,r_1,r_2} = (\Gamma v_g a / 2V)(N_{t,r_1,r_2} - 2N_{\text{th}}) / \sqrt{1 + E_{t,r_1,r_2}^2 / E_s^2},$$

$$G_{T,R_1,R_2} = (\Gamma v_g a / V)(N_{T,R_1,R_2} - N_{\text{th}}) / \sqrt{1 + E_{T,R_1,R_2}^2 / E_s^2}.$$

3 并行同步

3.1 混沌并行同步

激光器基本参量见表 1, 其他参量取值: $k_{t1} = k_{r2} = k_{R1} = k_{R2} = 0.2$ 和 $I_t = I_{r1} = I_{r2} = 40$ mA, $I_T = I_{R2} = I_{R2} = 30$ mA. 在该工作条件下, 该网络能够取得并行串联同步, 其结果如图 2—图 5 所

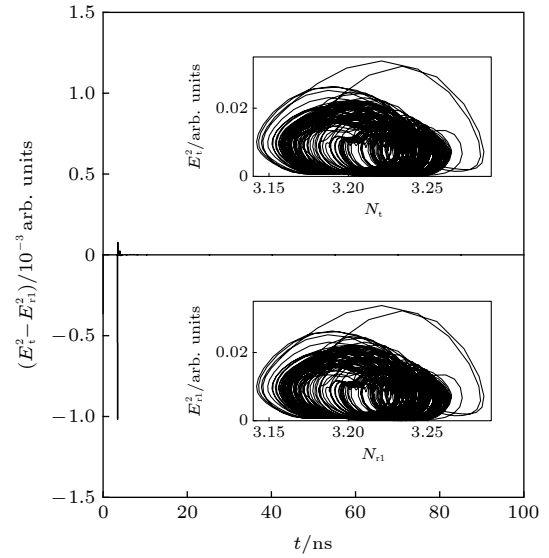


图 2 激光器 t 与 r_1 取得混沌同步过程, 其中内插图分别是两个激光器的混沌吸引子

Fig. 2. The laser t synchronizes with the laser r_1 . The inserted illustrations show the chaotic attractors of two lasers.

示. 其中, 图 2 和图 3(a) 显示第一路激光器 t , r_1 和 r_2 同步过程, 发现经过约 10 ns 后, 激光器 t 与激光器 r_1 、激光器 r_1 与激光器 r_2 分别实现混沌同步. 各图的 2 个小插图是各个激光器混沌吸引子, 显示它们的动力学变化轨迹已完全相同. 这里还以激光器 r_1 和 r_2 同步为例, 采用互相关函数 C_{r_1, r_2} 进行同步质量分析. 公式是

$$C_{r_1, r_2} = \frac{\langle [P_{r_1}(t - \Delta t) - \langle P_{r_1}(t - \Delta t) \rangle] \times [P_{r_2}(t) - \langle P_{r_2}(t) \rangle] \rangle}{\left\{ \langle [P_{r_1}(t - \Delta t) - \langle P_{r_1}(t - \Delta t) \rangle]^2 \rangle \right\}^{1/2} \times \left\{ \langle [P_{r_2}(t) - \langle P_{r_2}(t) \rangle]^2 \rangle \right\}^{1/2}},$$

表 1 激光器参量

Table 1. Laser parameters.

参量	值	参量	值
腔长 $L / \mu\text{m}$	350	俄歇复合因子 $C / \text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	3.5×10^{-29}
腔宽 $w / \mu\text{m}$	2	饱和光子场振幅 $ E_s / \text{m}^{-3/2}$	1.6619×10^{11}
腔厚 $d / \mu\text{m}$	0.15	增益常数 α / cm^2	2.3×10^{-16}
压缩和限制因子 Γ	0.29	光线宽增强因子 β_c	6
群速度折射率 n_g	3.8	耦合驱动系数 k	0.1
光子损耗系数 $\alpha_m / \text{cm}^{-1}$	49	频率 $\omega / \text{Rad} \cdot \text{s}^{-1}$	1438×10^{12}
非辐射复合速率 $A_{\text{nr}} / \text{s}^{-1}$	1.0×10^8	激光透明时 载流子密度 $n_{\text{th}} / \text{cm}^{-3}$	1.2×10^{18}
辐射复合因子 $B / \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1.2×10^{-10}		

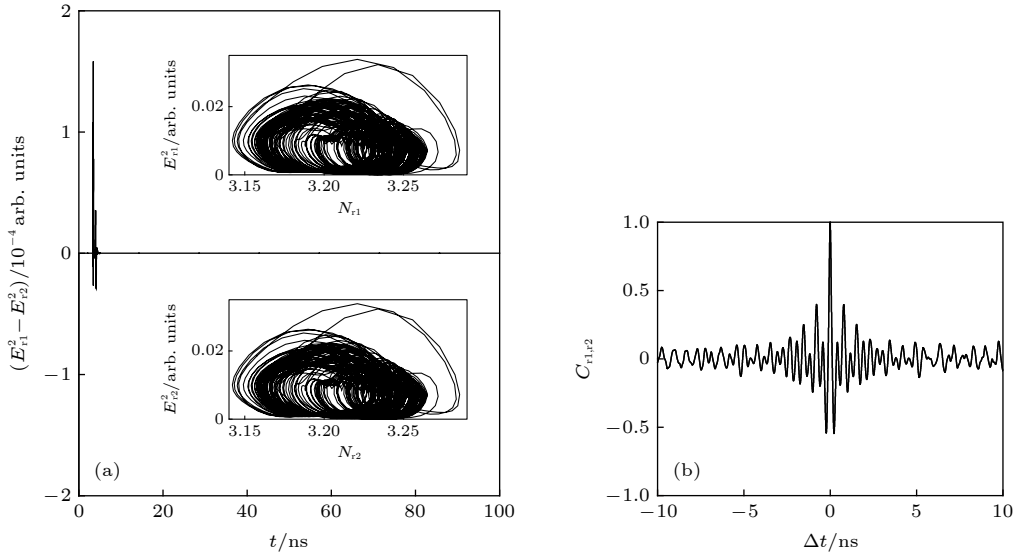


图 3 激光器 r1 与 r2 取得混沌同步 (a) 同步过程; (b) 互相关函数曲线

Fig. 3. The laser t synchronizes with the laser r2: (a) The synchronous process; (b) the cross-correlation function curve.

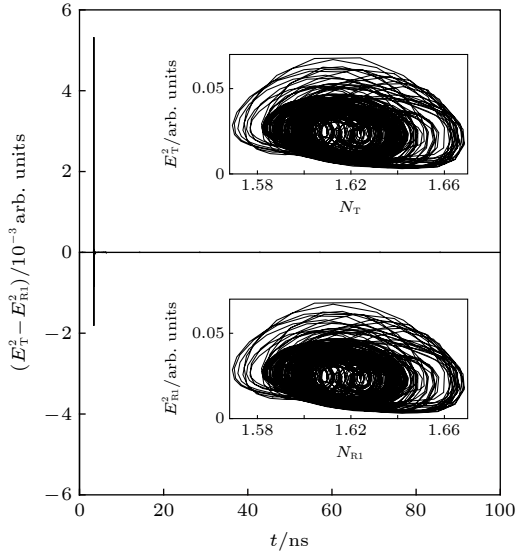


图 4 激光器 T 与 R1 的混沌同步过程

Fig. 4. The laser T synchronizes with the laser R1.

其中 $P = |E|^2$ 为光强度, Δt 为时移, $\langle \cdot \rangle$ 是时间平均值. $|C_{r1, r2}|$ 值范围是 0 到 1, $|C_{r1, r2}|$ 值越大, 同步性能越好, $|C_{r1, r2}| = 1$ 是完全同步. 激光器 r1 与 r2 的互相关函数曲线图见图 3(b). 其中, 当 $\Delta t = 0$ ns 时, $|C_{r1, r2}| = 1$ 表示已完全同步. 以上结果说明这一路三个激光器完全实现了串联混沌同步. 第 2 路激光器 T, R1 和 R2 的串联混沌同步结果如图 4 和图 5 所示. 由图 4 和 5(a) 可见, 经过 10 ns 后, 激光器 T 与激光器 R1、激光器 R1 与激光器 R2 都分别实现了混沌同步. 图 5(b) 是激光器 R1 与 R2 互相关函数曲线图 ($C_{R1, R2}$ 定义与

$C_{r1, r2}$ 完全相同), 它给出了零时移两激光器的完全同步. 图 4 和图 5 结果证明了这一路三个激光器实现了串联混沌同步. 至此, 激光网络取得了两路并行串联混沌同步.

3.2 多周期并行同步

为了进一步证明该网络具有并行串联同步能力, 我们还给出了该网络的多周期并行串联同步. 首先改变一路激光器驱动电流为 $I_T = I_{R1} = I_{R2} = 32$ mA, 由于发射器是两个不同的激光器, 由此导致两个激光器 t 和 T 表现出不同的周期变化行为, 分别呈现出 4 周期态和 3 周期态. 它们的并行串联同步结果如图 6—图 9 所示. 其中, 图 6 显示激光器 t 与 r1 取得 4 周期同步, 图 7 显示激光器 r1 与 r2 取得 4 周期同步. 说明这一路串联的三个激光器都取得了 4 周期同步. 而图 8 和图 9 则证明了另一路三个串联激光器的 3 周期同步结果. 上述结果足以说明该激光网络具有并行串联同步能力以及具有多周期并行同步能力.

下面继续改变电流为 $I_T = I_{R1} = I_{R2} = 34$ mA, 其他多周期并行串联同步同样可以获得, 其结果如图 10—图 13 所示. 其中, 图 10 显示激光器 t 与 r1 取得 10 周期同步, 图 11 显示激光器 r1 与 r2 取得 10 周期同步. 这三个激光器都取得了 10 周期串联同步. 而另一路串联的三个激光器同步是另外一个 10 周期状态同步模样, 其结果见图 12 和图 13. 由此可见, 两路激光器分别在不同的 10 周期状态

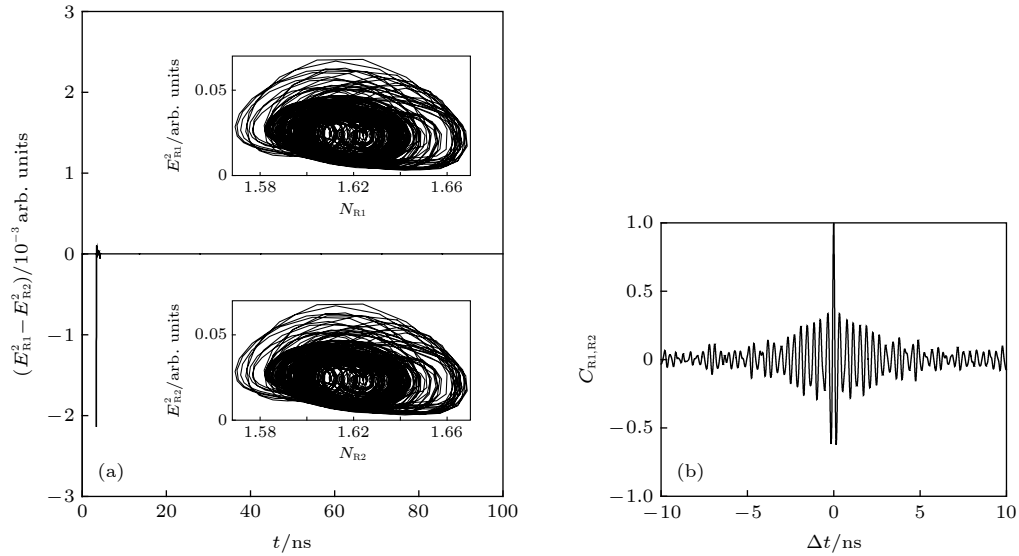


图 5 激光器 R1 与 R2 取得混沌同步 (a) 同步过程; (b) 互相关函数曲线

Fig. 5. The laser R1 synchronizes with the laser R2: (a) The synchronous process; (b) the cross-correlation function curve.

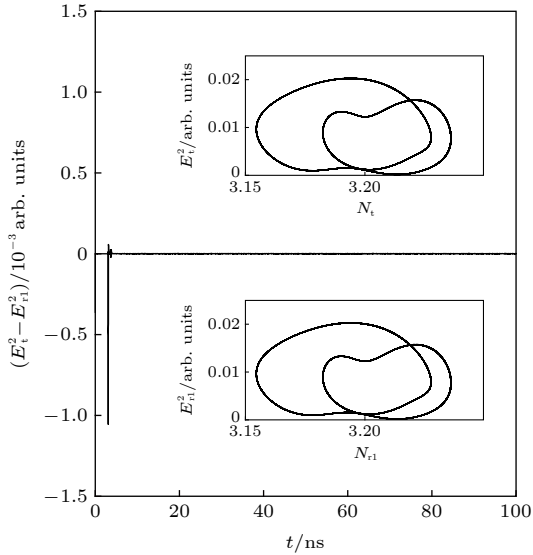


图 6 激光器 t 与 r1 取得 4 周期同步

Fig. 6. Period-4 synchronization between the lasers t and r1.

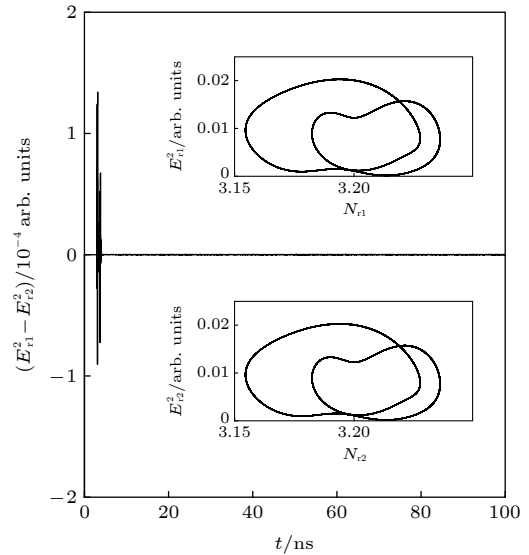


图 7 激光器 r1 与 r2 取得 4 周期同步

Fig. 7. Period-4 synchronization between the lasers r1 and r2.

上都取得了同步. 以上结果进一步证明激光网络具有并行串联同步能力.

4 中继器并行同步及信道编码方程

4.1 信道编码方程

必须指出, 由于发射器是由两个不同的激光器耦合而成, 两激光器定会呈现出不同的混沌变化, 并能输出两个不同的混沌载波. 所以该并行串联同步网络可以应用到有中继器的两个异信道通信中. 首先讨论有中继器的两个异信道混沌编码方程. 基

本原则是, 数字信息信号 $S(t)$ 分别隐藏在发射器两个混沌载波中, 分两路分次发送给下组两个中继器. 经过中继器同步再生后, 再发送给接收机.

先进行激光器 t1, r1 和 r2 串联组成的通信信道分析. 写出激光器 t1, r1 和 r2 信道编码方程, 把 (2a) 和 (2b) 式右边中的 E_t 改写成为 $(E_t + \gamma \times S)$, 其中 γ 是深度因子, S 变化在字节“1”或“0”上, 这样可完成字节“1”或“0”信息向激光器 r1 的传送. 经过同步解调后, 再把取得的信息信号经过载波 E_{r1} 传送给激光器 r2. 与此同时, (3a) 和 (3b) 式右边中的 E_{r1} 改写成 $(E_{r1} + \gamma \times S_d)$, 其中

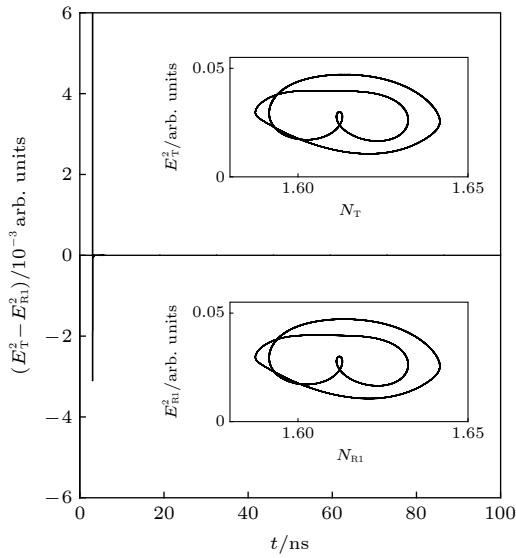


图 8 激光器 T 与 R1 取得 3 周期同步

Fig. 8. Period-3 synchronization between the lasers T and R1.

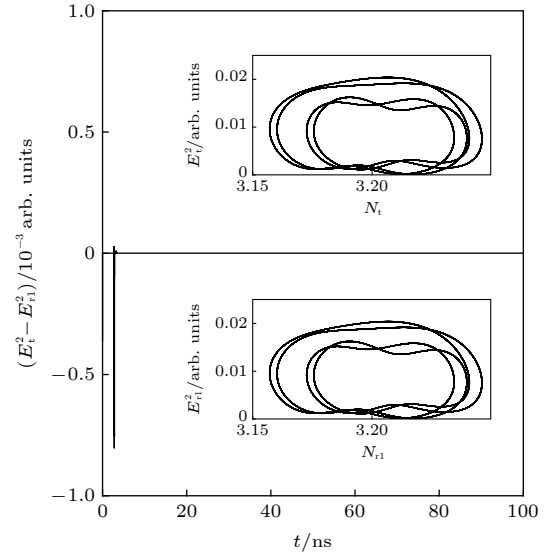


图 10 激光器 t 与 r1 取得 10 周期同步

Fig. 10. Period-10 synchronization between the lasers t and r1.

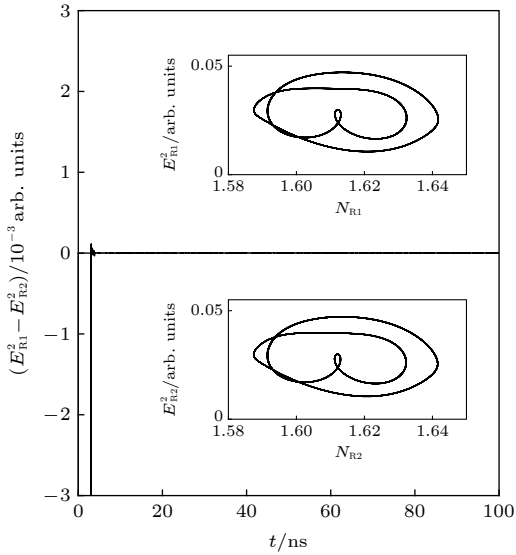


图 9 激光器 R1 与 R2 取得 3 周期同步

Fig. 9. Period-3 synchronization between the lasers R1 and R2.

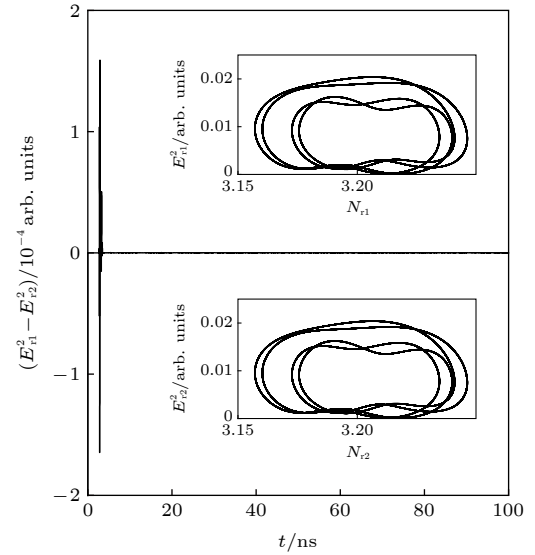


图 11 激光器 r1 与 r2 取得 10 周期同步

Fig. 11. Period-10 synchronization between the lasers r1 and r2.

γ 是深度因子, S_d 是同步解调出来的信息信号, 原则上有 $S_d = S$. 然后由接收器按照字节“0”或者“1”字节同步解调原则完成同步解调, 最后完成这一路有中继器的混沌通信.

第二路是激光器 T, R1 和 R2 串联组成通信信道分析. (2d) 和 (2e) 式右边中的 E_T 写成 $(E_T + \gamma \times S)$, 其中 γ 是深度因子, S 是信息信号, 接着向激光器 R1 传送. 经过同步解调后再把取得的信息信号经过载波 E_{R1} 传送给激光器 R2. 与此同时, (3d) 和 (3e) 式右边中的 E_{R1} 写成 $(E_{R1} + \gamma \times S_d)$, 其中 γ 是深度因子, S_d 是同步解调出来的信息信

号, 原则上有 $S_d = S$. 最后, 接收器按照字节“0”或者“1”字节的同步解调原则完成第二路有中继器的混沌通信.

4.2 通信结果

在工作中, 各个激光器参量取 3.1 节的值. 先给出激光器 t, r1 和 r2 串联通路通信结果. 信息信号速率是 0.1 Gbit/s, 取 γ 值为 0.005. 这个深度系数相当于激光器载波 E_t 平均值的 6%. 如此小深度完全是为了保密通信安全的需要. 图 14 是调制与解调过程. 其中, 图 14(a) 是混沌波隐藏了信息, 外

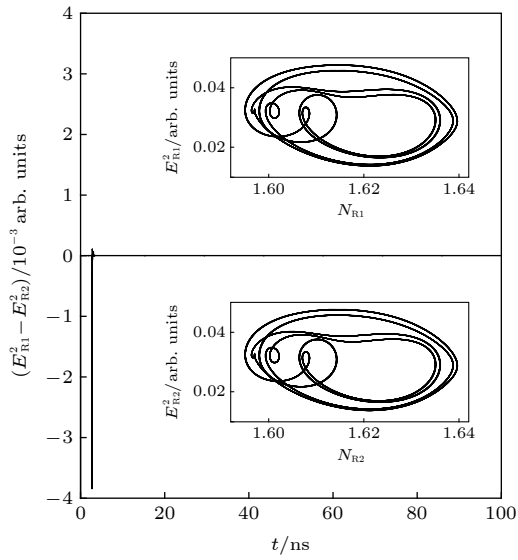


图 12 激光器 T 与 R1 的另一个 10 周期同步

Fig. 12. Another period-10 synchronization between the lasers T and R1.

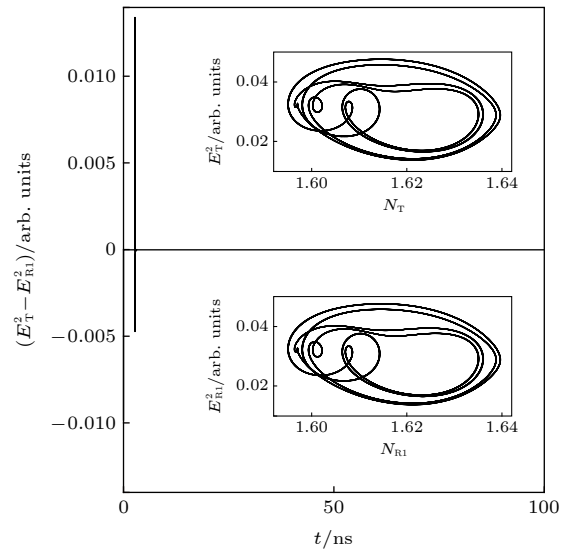


图 13 激光器 R1 与 R2 的另一个 10 周期同步

Fig. 13. Another period-10 synchronization between the lasers R1 and R2.

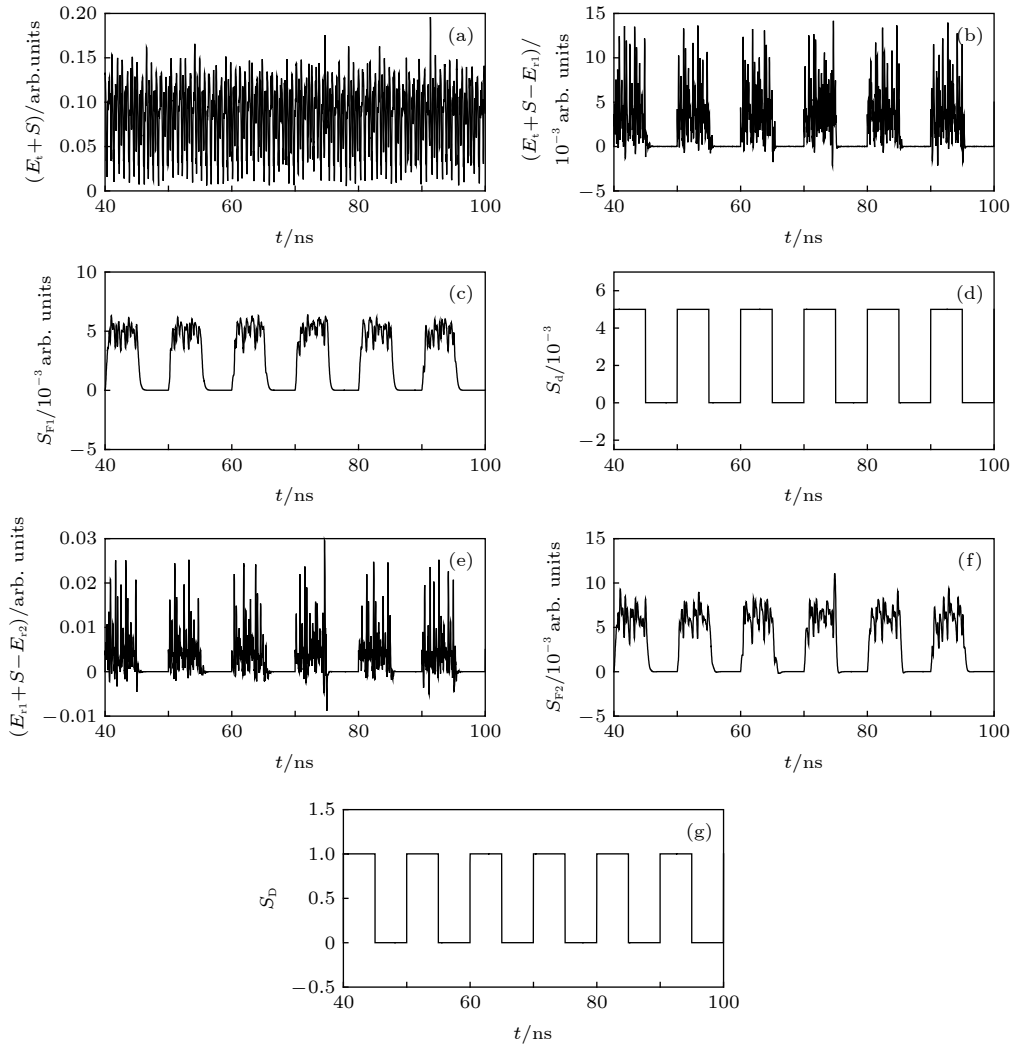


图 14 同步调制解调过程

Fig. 14. Synchronous decoding process.

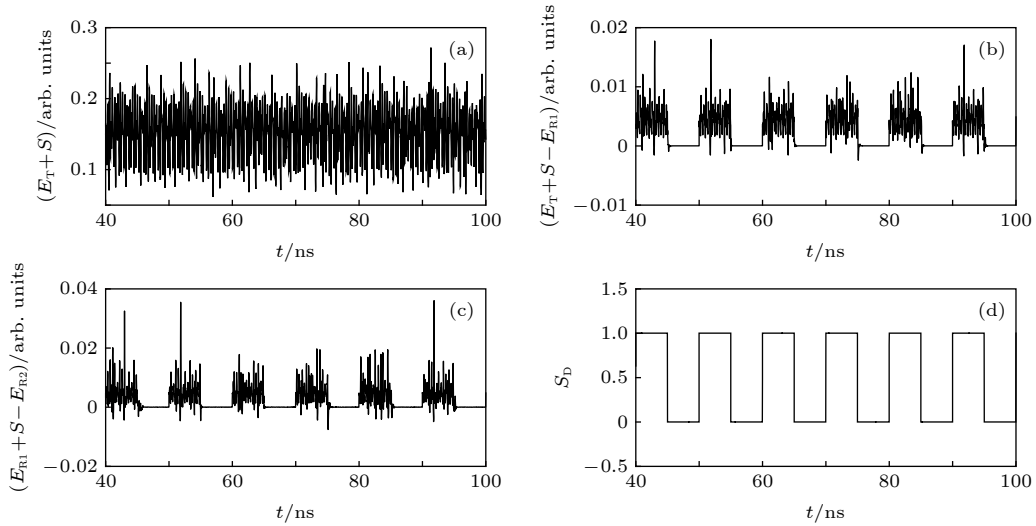


图 15 另一路同步调制解调过程

Fig. 15. Another synchronous decoding process.

界是难以从波形中提取信息信号的. 图 14(b) 是中继器的同步解调, “0”字节同步明显可见. 但是, 由于信息信号字节“1”干扰了同步并导致出现同步差, 而这个同步差刚好就是“1”字节. 图 14(c) 是滤波器滤波后结果 (S_{F1} 表示滤波后的信息), 我们计算出该同步差的平均值是 0.005, 这个值刚好等于 γ 值. 图 14(d) 是按照同步代表字节“0”, 同步差 0.005 代表“1”字节的原则提取的信息信号, 这也是字节归一化原则.

这个结果刚好验证了网络理论的正确性. 图 14(e) 是接收机的同步解调, 完全同步是“0”字节, 有同步差的是字节“1”. 经过滤波器滤波后, 该同步差平均值是 0.005, 等于 γ 值, 滤波结果见图 14(f) (S_{F2} 表示滤波后的信息). 图 14(g) 是归一化后的同步解调出来的信息信号, 其中 $S_D = S_d/\gamma = S$. 至此, 该路通信成功完成.

下面给出另外一路激光器 T, R1 和 R2 串联通路通信结果. 信息信号速率是 0.1 Gbit/s, $\gamma = 0.005$. 这个深度值相当于激光器载波 E_T 平均值的 3%. 图 15 是同步调制与解调过程. 其中, 图 15(a) 是信息信号成功隐藏于混沌载波中, 图 15(b) 和图 15(c) 分别是中继器以及接收机的同步解调结果, 图 15(d) 是归一化后同步解调出来的信息信号. 由此两路通信分别完成.

5 参数失配合

下面简单讨论参数失配问题. 当激光器 t 与激光器 r1、激光器 r1 与激光器 r2 完全不同步时, 计

算出非同步差是: $\langle |E_t - E_{r1}| \rangle = 0.0365 = \Delta_1$, $\langle |E_{r1} - E_{r2}| \rangle = 0.0423 = \Delta_2$. 完全同步时是:

$$\langle |E_t - E_{r1}| \rangle = 0, \langle |E_{r1} - E_{r2}| \rangle = 4.6533 \times 10^{-16}.$$

先计算电流参数失配. 取值 $I_t = 30 \text{ mA}$, $I_{r1} = 30.1 \text{ mA}$, $I_{r2} = 30.2 \text{ mA}$. 计算出 $\langle |E_t - E_{r1}| \rangle = 1.0281 \times 10^{-5}$ 和 $\langle |E_{r1} - E_{r2}| \rangle = 1.4187 \times 10^{-5}$ 非同步差与这两个比值分别是 $\Delta_1/\langle |E_t - E_{r1}| \rangle = 3550$ 与 $\Delta_2/\langle |E_{r1} - E_{r2}| \rangle = 2982$. 我们认为非同步与同步是可以识别的.

线宽增强因子参数失配. 激光器 T 取量值是 β_c , 激光器 r1 取量值是 $0.999\beta_c$, 激光器 r2 取量值是 $1.001\beta_c$. 计算出 $\langle |E_T - E_{r1}| \rangle = 1.1824 \times 10^{-5}$, $\langle |E_{r1} - E_{r2}| \rangle = 1.1960 \times 10^{-5}$ 比值是 $\Delta_1/\langle |E_T - E_{r1}| \rangle = 3086$, 以及比值是 $\Delta_2/\langle |E_{r1} - E_{r2}| \rangle = 3536$ 倍, 即非同步与同步是可以识别的.

增益常数参数失配. 激光器 t 取量值是 a , 激光器 r1 取量值是 $0.999a$, 激光器 r1 取量值是 $0.998a$. 计算出: $\langle |E_t - E_{r1}| \rangle = 1.6597 \times 10^{-4}$, $\langle |E_{r1} - E_{r2}| \rangle = 3.3007 \times 10^{-4}$, 比值是 $\Delta_1/\langle |E_t - E_{r1}| \rangle = 220$, 以及比值是 $\Delta_2/\langle |E_{r1} - E_{r2}| \rangle = 128$. 显然, 非同步与同步是可以识别的.

激光透明时的载流子数参数失配. 激光器 T 取量值是 $2N_{th}$, 激光器 r1 取量值是 $2 \times 0.999N_{th}$, 激光器 r1 取量值是 $2 \times 1.001N_{th}$. 计算出 $\langle |E_t - E_{r1}| \rangle = 2.8618 \times 10^{-4}$ 与 $\langle |E_{r1} - E_{r2}| \rangle = 3.7413 \times 10^{-4}$, 比值是 $\frac{\Delta_1}{\langle |E_t - E_{r1}| \rangle} = 127$ 与 $\frac{\Delta_2}{\langle |E_{r1} - E_{r2}| \rangle} = 114$. 即非同步与同步是可以识别的.

6 结 论

本文提出耦合不同半导体激光器并行串联非线性复杂动力网络及其并行串联同步系统. 发射器的两个激光器可以和其他两路多个激光器之间实现混沌或多周期并行同步. 成功实现了中继器同步解调与混沌再生发送, 分别完成两个异信道混沌加密. 研究了系统参数失配合问题, 在较小的参数失配情况下, 系统仍具有一定的同步能力. 这是一种新型的激光混沌编码网络系统, 具有高度非线性、多变量、多维度、多密钥的特点, 具有高度的安全性、不易被破解等优点. 其结果对混沌保密通信、光网络以及激光技术的应用研究具有重要的参考价值.

参考文献

- [1] Bayati B M A, Ahmad K A, Naimee M A 2018 *J. Opt. Soc. Am. B* **35** 918
- [2] Kang Z, Sun J, Ma L, Qi Y, Jian S 2014 *IEEE J. Quantum Electron.* **50** 148
- [3] Wang S T, Wu Z M, Wu J G, Zhou L, Xia G Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154205 (in Chinese) [王顺天, 吴正茂, 吴加贵, 周立, 夏光琼 2015 物理学报 **64** 154205]
- [4] Zhong D Z, Deng T, Zheng G L 2015 *Acta Phys. Sin.* **63** 070504 (in Chinese) [钟东洲, 邓涛, 郑国梁 2015 物理学报 **63** 070504]
- [5] Mulet J, Masoller C, Mirasso C R 2002 *Phys. Rev. A* **65** 063815
- [6] Erzgräber D, Lenstra D, Krauskopf B 2006 *Proc. SPIE* **6184** 618407
- [7] Arroyo-Almanza D A, Pisarchik A N, Fischer I, Mirasso C R, Soriano M C 2013 *Opt. Commun.* **301** 67
- [8] Erzgräber H, Wieczorek S 2009 *Phys. Rev. E* **80** 026212
- [9] Liu Q X, Pan W, Zhang L Y, Li N Q, Yan J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024209 (in Chinese) [刘庆喜, 潘炜, 张力月, 李念强, 阎娟 2015 物理学报 **64** 024209]
- [10] Wunsche H J, Bauer S, Kreissl J, Ushakov O, Korneyev N, Henneberger F, Wille E, Erzgräber H, Peil M, Elsaor W, Fischer I 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 163901
- [11] Mulet J, Mirasso C R, Heil T, Fischer I 2004 *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.* **6** 97
- [12] Hill M T, Waardt H D, Dorren H J S 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 405
- [13] Tang X, Wu Z M, Wu J G, Deng T, Fan L, Zhong Z Q, Chen J J, Xia G Q 2015 *Laser Phys. Lett.* **12** 015003
- [14] Quirce A, Valle A, Thienpont H, Panajotov K 2016 *J. Opt. Soc. Am. B* **33** 90
- [15] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zou X H, Wang M Y 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1276
- [16] Hong Y H 2015 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **21** 1801007
- [17] Wang A B, Wang Y C, Wang J F 2009 *Opt. Lett.* **34** 1144
- [18] Li Z, Feng Y L, Wang X Q, Yao Z H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 140501 (in Chinese) [李增, 冯玉玲, 王晓茜, 姚治海 2018 物理学报 **67** 140501]
- [19] Zhang H, Guo X X, Xiang S Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 204202 (in Chinese) [张浩, 郭星星, 项水英 2018 物理学报 **67** 204202]
- [20] Liu J, Wu Z M, Xia G Q 2009 *Opt. Express* **17** 12619
- [21] Wu J, Wu Z, Liu Y, Fan L, Tang X, Xia G 2013 *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* **31** 461
- [22] Mu P H, Pan W, Li N Q, Yan L S, Luo B, Zou X H, Xu M F 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124206 (in Chinese) [穆鹏华, 潘炜, 李念强, 闫连山, 罗斌, 邹喜华, 徐明峰 2015 物理学报 **64** 124206]
- [23] Li N Q, Pan W, Luo B, Yan L S, Zou X H, Jiang N, Xiang S Y 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1072

Chaotic laser parallel series synchronization and its repeater applications in secure communication

Yan Sen-Lin[†]

(*Electronic Engineering School, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China*)

(Received 18 February 2019; revised manuscript received 21 June 2019)

Abstract

In this paper, chaotic parallel synchronization and quasi-periodic parallel synchronization between two mutually coupled different semiconductor lasers and other lasers are studied, and the regeneration of chaotic laser and key technology of repeater are discussed. The complex dynamic system and network of laser parallel series are presented in mathematics and in physics, and the network topology diagram and optics path are specified. A mathematical-physical model is given to study how to obtain parallel synchronization via the coupled driving nonlinear equations. The operating principle of the repeater is put forward for chaotic secure communication, and the channel equation of repeater is established because the laser chaotic behavior is extremely sensitive to external influences and system parameter changes. The laser's chaotically regenerating and transmitting is successfully realized via two sets of repeaters. The chaotic encoding communication with repeaters is successfully completed while the encoding information signal is accurately extracted from the chaotic carrier by a filter and calculating the synchronous difference. We adopt three sets of lasers as a research case to simulate and verify the theory of laser parallel series network we put forward to fit perfectly the obtained numerical results. We study the parameter mismatch problem of the system, where the synchronous difference is numerically calculated by varying some parameters of the lasers. In the case of smaller parameter mismatch, the system has a highly synchronous capability to a certain degree. This is a novel laser chaotic encoding network in chaotic secure communication and characterizes the core technical elements of the repeater. The laser transmitter has four nonlinear interaction variables, where the nonlinear interaction between the amplitude and phase of the two optical fields results in highly nonlinear dynamics. The system has the characteristics of high nonlinearity, multi-variable, high-dimension, and multi-key. So it is highly secure and not easy to crack. The results have an important reference value for the chaos applications in remote secure communication, optical network and laser technology.

Keywords: chaos, synchronization, laser, network

PACS: 05.45.Vx, 05.45.Xt, 42.60.-v

DOI: 10.7498/aps.68.20190212

[†] Corresponding author. E-mail: senlinyan@163.com