

双星并联光纤激光同步网络研究

颜森林

南京晓庄学院电子工程学院, 江苏 南京 211171

摘要 提出双星光纤激光同步网络,具体研究双星交叉驱动-反相控制并联光纤激光同步网络系统与理论。该网络的结构和光学特点是:先利用双环掺铒光纤激光器构成网络“双星”激光双驱动源;然后采用“双星交叉驱动”对两组并联的多个单环掺铒光纤激光器进行驱动,由此构成双星交叉驱动两组并联光纤激光网络;最后分别利用“反相位控制与光学驱动”技术实现两组网络并节点同步,并进一步实现两组网络并节点与双星的交叉同步,即实现双星光纤激光同步网络功能。由此设想与构建,给出网络的数学物理光学方程组。从理论上证明了网络并节点同步以及网络节点与双星的交叉同步,形成了网络“星-节点”同步簇理论模式,并成功预测了双“星-节点”并列同步簇的存在。针对两组相互独立并节点簇的单环掺铒光纤激光器以及作为网络双星的双环掺铒光纤激光器对应激光环的同步进行了数值模拟。本研究发现了网络的单“星-节点”同步簇、混沌同步簇、类周期同步簇、并列双“星-节点”同步簇等。本文还讨论了不同参数条件下双星交叉驱动-反相位控制并联同步光纤激光网络功能的实现。本研究对于光学网络、光纤激光同步网络及其应用具有重要的参考价值。

关键词 光纤光学;激光技术;光网络;同步;光纤激光器;双星;混沌

中图分类号 O436

文献标识码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1106003

1 引言

当前,复杂系统与神经网络等研究成果在人工智能、信息通信与网络领域被广泛应用,已成为数字社会重要的数学物理理论基础^[1-6]。人们在复杂动力学系统与网络以及神经网络的研究与构建中发现,网络拓扑结构主要有总线型、星型、环型、树型、网状型等。在研究过程中,人们不仅关注网络节点的动力学(如混沌非线性动力学)行为,还关注网络节点的同步问题^[1-6],如,研究人员提出了多节点网络混沌同步、星型网络同步、串联同步以及多信道混沌同步系统等^[1-6]。20世纪80年代,人们应用光学与光电技术构成了光学网络及神经元^[7-10]。光学神经网络的特点是并行计算能力强、高速、存算模块化集成、能耗低、抗干扰能力强,在人工智能、光计算、光通信与光网络等领域具有明显优势^[11-14],目前已出现了两两相互耦合的广义混沌同步激光小世界网络、多个环形激光器组成的且通过一个“中心”激光器相互连接而成的单

中心激光网络、宽带混沌“驱动-响应”单中心同步网络、对称结构可变偏振光反馈垂直腔面发射激光器集群同步网络、激光混沌并列同步网络^[15-19]。随着激光技术、集成光子学、微纳光子集成微器件技术的发展,构建复杂的光学网络系统成为可能,因此,新型的光学网络与系统是一个重要的研究方向。

众所周知,单个混沌激光器是一个复杂的非线性光学动力学系统,可作为保密通信编码器、随机数字信号发生器、雷达与传感器等使用^[20-22]。20世纪90年代,Pecora和Carroll^[23]提出了“驱动-响应”混沌同步方法,之后,激光混沌同步研究发展迅速,在光保密通信、光超宽带通信、光计算等领域得到了广泛应用^[15,19,24-25],激光同步网络就是在其理论上发展形成的。目前,掺铒光纤激光器作为成熟的光源和光放大器在光纤通信与光网络领域中得到了广泛应用。光纤激光器混沌同步与应用的研究成果有“双环-单环”掺铒光纤激光器混沌同步、两组双环掺铒光纤激光器混沌系统的同步等^[24-26]。本研究团

收稿日期:2021-10-18;修回日期:2021-11-11;录用日期:2021-11-15

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20151079)

通信作者:*senlinyan@163.com

队曾经开展过双环掺铒光纤激光器混沌两个响应系统同步、激光混沌串联同步、激光混沌并行同步网络以及激光网络控制同步等研究^[27-30]。基于以上研究基础,本文开展了光纤激光同步网络研究。

由于星型网络各个结点可以“点对点”地与中心进行通信联系,便于中心结点的“星”管理整个网络^[4,6],所以星型网络结构简单,方便管理,易于实现。并行传输方式,即在多条并行信道同时传送的方式,具有数据传输速度快、处理简单的特点。基于星型网络、并行网络、混沌同步网络、激光混沌同步及激光网络等的基本思想方法,本文基于光网络、光传送、激光驱动与光调控等技术,提出了双星并联光纤激光同步网络系统及该网络的数学物理模型。其组织结构创新点是:具有星型网络与并行网络(并联是实现多路并行的物理基础)的“星”与“并行”物理结构的综合特点。与单星网络相比,该网络双星结构的动力学行为更加丰富,双星可以动态交替管理网络,更加灵活,其双发送终端多,可以并行传送信息,比单星或单链路网络以及单发送终端并行网络更加方便、高效,突破了单终端发送的限制,优势明

显。与反馈同步网络相比,其驱动同步结构更加简单,且易于实现和控制。该新型光纤光学网络的提出对光学网络的研究具有一定的参考作用^[31-32]。

2 网络结构和数学物理模型

本文提出的网络总体结构是由光纤激光器和光器件等系统与网络框架构建的,根据双星网络物理功能要求,其中的双星必须是双驱动源,能够输出两路光信号。由于掺铒光纤激光器具有技术成熟、与光纤兼容性好、在光纤网络通信中应用广泛等优点,因此本研究选取双环掺铒光纤激光器作为双星光纤激光网络的双星信号发射驱动源。作为网络双星驱动源,该型激光器能够确保输出两路光信号,网络能使两个星源驱动两路并联的多个激光器(形成两组两类节点簇),即网络节点由两组并联的多个单环光纤激光器组成,由此形成并联光纤激光网络与系统,如图 1 所示。其中,图 1(a)是网络拓扑图,图 1(b)、(c)、(d)是物理光学光路图。拓扑图显示,双环掺铒光纤激光器环 a 和环 b 作为网络双星驱动源。其中,星 b 驱动 4 个并联的单环掺铒光纤激光器,这 4

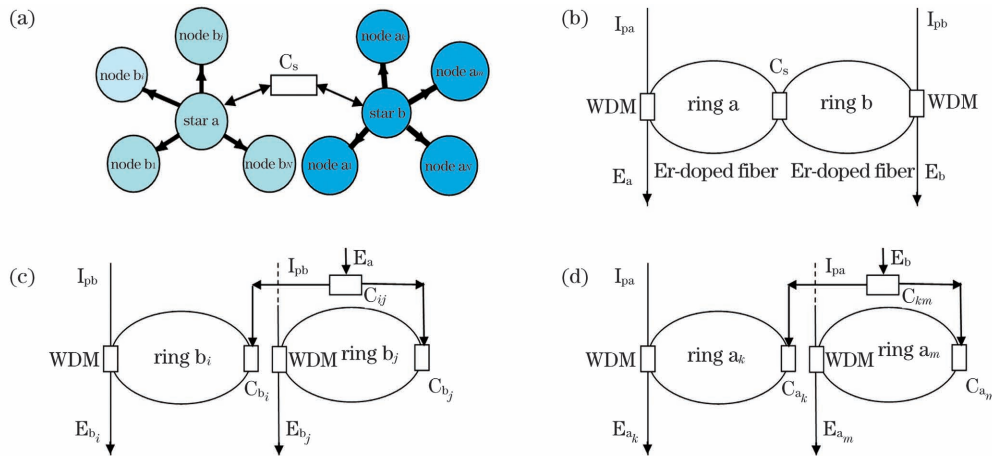


图 1 双星并联光纤激光网络与系统。(a) 双星网络拓扑图,其中 a 和 b 是双星, C_s 是耦合器,并联的节点是 b_1 、 b_i 、 b_j 和 b_N ,另外一组并联的节点是 a_1 、 a_k 、 a_m 和 a_N ; (b) 双环掺铒光纤激光器作为双星的光路图,其中 I_{pa} 和 I_{pb} 是泵浦光束, C_s 是耦合器, WDM 是波分复用器, E_a 和 E_b 是环 a 和环 b 的激光束; (c) 两对单环掺铒光纤激光器作为并节点 b_i 和 b_j 的光路图,其中 C_{ij} 和 C_{b_i} 、 C_{b_j} 是耦合器; E_{b_i} 、 E_{b_j} 是环 b_i 、 b_j 的激光束; (d) 另外两对单环掺铒光纤激光器作为并节点 a_k 和 a_m 的光路图,其中 C_{a_k} 和 C_{a_m} 是耦合器, E_{a_k} 和 E_{a_m} 是环 a_k 和 a_m 的激光束

Fig. 1 Dual-star parallel fiber laser network and system. (a) A dual-star network topology, where the dual-star is “a” and “b”, C_s is the dual-star coupler, a set parallel nodes are b_1 , b_i , b_j , and b_N , and another set of parallel nodes are a_1 , a_k , a_m , and a_N ; (b) optical path using a dual-ring erbium-doped fiber laser as dual-star, where I_{pa} and I_{pb} are the pump beams, C_s is the coupler, WDM is the wavelength division multiplexer, E_a and E_b are laser beams from rings a and b; (c) optical path using two pairs of single-ring erbium-doped fiber lasers as parallel nodes b_i and b_j , where C_{ij} , C_{b_i} , C_{b_j} are the couplers, E_{b_i} and E_{b_j} are laser beam from rings b_i and b_j ; (d) optical path using another pair of single-ring erbium-doped fiber lasers as parallel node a_k and a_m , where C_{a_k} and C_{a_m} are the couplers, E_{a_k} and E_{a_m} are laser beams from rings a_k and a_m

个激光器作为节点 a_1, a_k, a_m, a_N 。星 a 驱动 4 个并联的单环掺铒光纤激光器,这 4 个激光器作为节点 b_1, b_i, b_j, b_N 。事实上,可以推广假设两路并联有 $2N(N$ 是正整数)个节点的单环掺铒光纤激光器。这样构成两路并联光纤激光器网络系统。从数学物理上讲,这是一个两路并联的 $(2N+2)$ 维复杂动力学光学网络系统,其中两组各个独立的 $2N$ 个光纤激光器构成了光纤激光网络节点。

作为网络双星的双环掺铒光纤激光器的基本物理结构和光路如图 1(b)所示,两个单模掺铒光纤环形激光器 a 和 b 耦合构成了双环掺铒光纤激光器。其中, E_a 和 E_b 分别是环 a 和 b 的激光, I_{pa} 和 I_{pb} 分别是环 a 和 b 的泵浦光, C_s 是耦合器。耦合器 C_s 导致两环 a 和 b 的激光通过光耦合器后产生了 $\pi/2$ 的相移。由此,获得的环 a 和 b 激光器的归一化光场和载流子数非线性耦合动力学方程组^[25-27,30]为

$$\frac{d}{dt}E_a = -k_a(E_a + \eta_0 E_b) + g_a E_a D_a, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}D_a = -(1 + I_{pa} + E_a^2)D_a + I_{pa} - 1, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}E_b = -k_b(E_b - \eta_0 E_a) + g_b E_b D_b, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}D_b = -(1 + I_{pb} + E_b^2)D_b + I_{pb} - 1, \quad (4)$$

式中: k_a 和 k_b 表示损耗系数; η_0 表示耦合器的耦合系数; g_a 和 g_b 表示增益系数; D_a 和 D_b 表示反转粒子数; E_a 和 E_b 分别表示激光器环 a 和环 b 的激光场; I_{pa} 和 I_{pb} 分别表示激光器环 a 和环 b 的泵浦光强度。

图 1(c)是激光器 a 环驱动下的网络两路节点激光器(为了简化分析,这里仅显示 2 个节点 b_i 和 b_j 的并联),其中网络“双星”系统中的 a 环激光反相位(可以由相位控制器控制相位)分别注入到网络节点激光器环 b_i 和 b_j 中,注入的目的是驱动节点 b_i 和 b_j 分别与星 b 同步,本文定义它们是“星 b-节点 b_i ”同步簇。a 环激光注入到环 b_i 和环 b_j 中,这就是所谓的“交叉驱动-反相位控制”。为了网络同步,需要保证环 b_i, b_j 与 b 具有相同的光学参数。这样,并联的交叉驱动-反相位并联两环 b_i 和 b_j 激光器两节点对星“b”同步系统就构成了。由此激光束 E_a 驱动反相控制下的节点 b_i 环激光器输出激光的动力学行为可由下列方程组描述:

$$\frac{d}{dt}E_{b_i} = -k_a(E_{b_i} - \eta_0 E_a) + g_b E_{b_i} D_{b_i}, \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt}D_{b_i} = -(1 + I_{pb} + E_{b_i}^2)D_{b_i} + I_{pb} - 1. \quad (6)$$

节点 b_j 环激光器输出激光的动力学行为可由下列方程组描述:

$$\frac{d}{dt}E_{b_j} = -k_b(E_{b_j} - \eta_0 E_a) + g_b E_{b_j} D_{b_j}, \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt}D_{b_j} = -(1 + I_{pb} + E_{b_j}^2)D_{b_j} + I_{pb} - 1. \quad (8)$$

在这里,节点 b_i 和 b_j 将分别与星“b”实现混沌同步,即相互独立的两并联单环掺铒光纤激光器的激光分别与双环掺铒光纤激光器中 b 环激光器的激光实现同步。与此同时,这两个相互独立的环 b_i 和 b_j 也必将实现相互同步。当然“i”和“j”可以取正整数 N ,扩展为并联单星 $N+1$ 维复杂动力学光学网络系统。

图 1(d)是激光器 b 环驱动下的网络两独立节点 a_k 环和 a_m 环激光器,两个节点具有并联形式,其中“双星”系统中的 b 环激光器输出的激光分别注入网络节点激光器 a_k 环和 a_m 环中,目的是实现节点 a_k 和 a_m 分别与星“a”同步。这里定义它们是“星 a-节点 a_k ”同步簇。激光束 E_b 驱动控制下的节点 a_k 环激光器输出激光的动力学行为可由下列方程描述:

$$\frac{d}{dt}E_{a_k} = -k_b(E_{a_k} + \eta_0 E_b) + g_a E_{a_k} D_{a_k}, \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt}D_{a_k} = -(1 + I_{pa} + E_{a_k}^2)D_{a_k} + I_{pa} - 1. \quad (10)$$

节点环 a_m 激光器输出激光的动力学行为可由下列方程描述:

$$\frac{d}{dt}E_{a_m} = -k_a(E_{a_m} + \eta_0 E_b) + g_a E_{a_m} D_{a_m}, \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt}D_{a_m} = -(1 + I_{pa} + E_{a_m}^2)D_{a_m} + I_{pa} - 1. \quad (12)$$

为了网络同步,环 a_m, a_k 和 a_m 取相同的光学参数。在光学驱动作用下,节点 a_k 和 a_m 将分别与星“a”实现同步,即相互独立的并联单环掺铒光纤激光器的激光分别与双环掺铒光纤激光器中 a 环激光器的激光实现同步。同时,这两个相互独立的 a_k 环和 b_m 环也必将实现相互同步。当然“k”和“m”可以取正整数 N ,扩展为单星 $N+1$ 维并联复杂动力学光学网络系统。

由此,本文成功地构建了双星 $2N+2$ 维并联光纤激光网络系统。

3 双星并联同步稳定性理论及同步簇预测

首先证明节点 a_i 和 a_j 分别与星“a”实现同步的理论,然后证明节点 b_i 和 b_j 分别与星“b”实现同步的理论,以及与同步相关的推论等。

3.1 节点 a_k 、 a_m 与星“a”稳定性同步的理论及同步簇预测

由于式(9)、(10)与式(1)、(2)有相同的数学形式且参数相同,所以式(9)、(10)与式(1)、(2)对应的稳定点数值应该相同。用式(9)、(10)减去式(1)、(2),先得到节点 a_k 和星“a”的一次近似同步方程,即

$$\frac{d}{dt} \delta e_{a_k} = -k_a \delta e_{a_k} + g_a \delta e_{a_k} D_{a_k 0} + g_a E_{a_k 0} \delta e_{a_k}, \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \delta d_{a_k} = -(1 + I_{pa} + E_{a_k 0}^2) \delta d_{a_k} - 2\delta e_{a_k} E_{a_k 0} D_{a_k 0}, \quad (14)$$

式中: $\delta e_{a_k} = E_{a_k} - E_a = E_{a_k 0} + \delta E_{a_k} - (E_{a0} + \delta E_a) \approx \delta(E_{a_k} - E_a)$, $\delta d_{a_k} = D_{a_k} - D_a = D_{a_k 0} + \delta D_{a_k} - (D_{a0} + \delta D_a) \approx \delta(D_{a_k} - D_a)$,“0”表示稳定点。取式(13)、(14)的特征值为 λ ,获得特征值方程为

$$\begin{vmatrix} -k_a + g_a D_{a_k 0} - \lambda & g_a E_{a_k 0} \\ -2E_{a_k 0} D_{a_k 0} & -(1 + I_{pa} + E_{a_k 0}^2) - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (15a)$$

或

$$\lambda^2 + B\lambda + C = 0, \quad (15b)$$

则 $\lambda = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4C}}{2}$, 其中, $C = 4g_a E_{a_k 0}^2 D_{a_k 0} + (1 + I_{pa} + E_{a_k 0}^2)(g_a D_{a_k 0} - k_a)$, $B = (1 + I_{pa} + E_{a_k 0}^2 + k_a - g_a D_{a_k 0})$ 。

如果 $B > 0, C > 0$,即特征值 λ 具有负实部,则方程(13)、(14)将有稳定性解,其不动点将是稳定的,即节点 a_k 将与星“a”呈渐进稳定性同步。在数学上,由于式(11)、(12)与式(9)、(10)具有相同的形式,所以类似的推导可以得到节点 a_m 将与星“a”同步的方程。这里不再重复。

推论 1:若节点 a_k 和 a_m 分别与星“a”同步,并联的节点 a_k 和 a_m 也必然同步,即:当系统参数条件满足式(15)所示的稳定性条件时,该单星并联网路存在同步功能,“星 a-节点 a_k ”同步簇($k=1, 2, \dots, N$)存在的预测成立,该单星并联网路同步可以实现。

3.2 节点 b_i 、 b_j 和星“b”稳定性同步的理论及同步簇预测

由于式(5)、(6)与式(3)、(4)具有相同的数学形式且参数相同,两组方程式对应的稳定点数值应相同。用式(5)、(6)减去式(3)、(4),得到节点 b_i 和星“b”的一次近似同步方程为

$$\frac{d}{dt} \delta e_{b_i} = -k_b \delta e_{b_i} + g_b \delta e_{b_i} D_{b_i 0} + g_b E_{b_i 0} \delta e_{b_i}, \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} \delta d_{b_i} = -(1 + I_{pb} + E_{b_i 0}^2) \delta d_{b_i} - 2\delta e_{b_i} E_{b_i 0} D_{b_i 0}, \quad (17)$$

其中, $\delta e_{b_i} = E_{b_i} - E_b = E_{b_i 0} + \delta E_{b_i} - (E_{b0} + \delta E_b) \approx \delta(E_{b_i} - E_b)$, $\delta d_{b_i} = D_{b_i} - D_b = D_{b_i 0} + \delta D_{b_i} - (D_{b0} + \delta D_b) \approx \delta(D_{b_i} - D_b)$,“0”表示稳定点。取上述方程组的特征值为 η ,获得特征值方程为

$$\begin{vmatrix} -k_b + g_b D_{b_i 0} - \eta & g_b E_{b_i 0} \\ -2E_{b_i 0} D_{b_i 0} & -(1 + I_{pb} + E_{b_i 0}^2) - \eta \end{vmatrix} = 0, \quad (18a)$$

或

$$\eta^2 + H\eta + Q = 0, \quad (18b)$$

则 $\eta = \frac{-H \pm \sqrt{H^2 - 4Q}}{2}$, 其中, $H = (1 + I_{pb} + E_{b_i 0}^2 + k_b - g_b D_{b_i 0})$, $Q = 4g_b E_{b_i 0}^2 D_{b_i 0} + (1 + I_{pb} + E_{b_i 0}^2)(g_b D_{b_i 0} - k_b)$ 。

如果 $H > 0, Q > 0$,特征值 η 具有负实部,则方程(16)、(17)将有稳定性解,其不动点将是稳定的,即节点 b_i 将与星“b”呈现出渐进稳定性同步。类似的推导可以得到节点 b_j 将与星“b”同步的方程。这里不再重复。

推论 2:若节点 b_i 和 b_j 分别与星“b”同步,则并节点 b_i 和 b_j 也必然同步,即:当系统参数条件满足式(18)的稳定性条件时,该单星并联网路存在同步功能,“星 b-节点 b_i ”同步簇($i=1, \dots, N$)存在的预测成立,该单星并联网路同步可以实现。这也预测了两“星-节点”同步簇的存在。

结论:若系统参数条件同时满足式(15)、(18)的稳定性条件,即推论 1 和 2 同时成立,则网络必然存在两组并节点与双星同步的功能,即光纤激光网络存在着并联同步现象。这样由推论 1、推论 2 及结论形成了网络“星-节点”同步簇理论模型,预测了“星-节点”并列同步簇的存在。

4 数值模拟结果

4.1 节点 b_i 、 b_j 与星“b”同步及其同步簇同步现象的数值模拟呈现

由于双环掺铒光纤激光器存在着两光场的非线性耦合相互作用,参数变化可导致倍周期分岔、混沌等现象出现^[6-7],因此取归一化参数值,即: $I_{pa} = I_{pb} = 4, k_a = k_b = 1000, \eta_0 = 0.2, g_a = 10500, g_b = 4800$ 。图 2 呈现的是作为网络双星的两环激光器输出激光动力学行为的变化。变量 E_a 和 E_b 构成了

相图,如图 2(a)所示,该图显示的是激光双涡旋混沌吸引子。图 2(b)是两环输出的两路激光及波形变化。图 3 是节点 b_i 、 b_j 与星“b”同步及同步簇同步现象的呈现,可以发现这种同步是渐进式同步。该图显示经过一段张弛振荡后, b_i 环与 b 环混沌激光的同步差异逐步消失并趋于完全同步。计算发现:从 $t=10$ ms 开始, $E_{b_i} - E_b = 0$ 。两插入图呈现了 b_j 环与 b 环同步以及 b_i 环与 b_j 环同步现象。

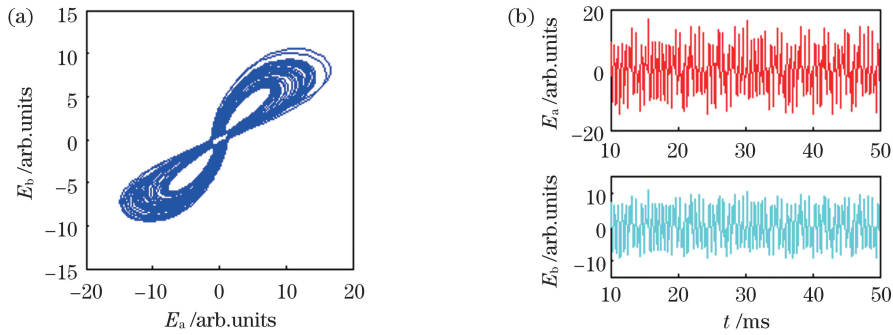


图 2 双星动力学状态。(a)激光双涡旋混沌吸引子;(b)两环输出的两路激光

Fig. 2 Dynamic state in the dual-star. (a) Twin-scroll chaotic attractor of the laser; (b) two ring output

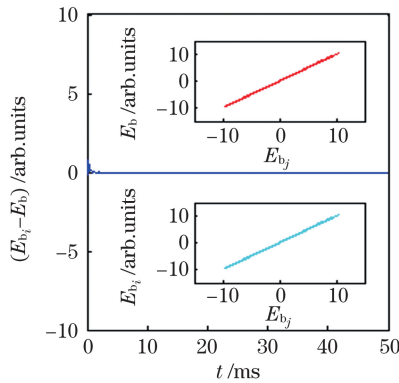


图 3 “星 b-节点 b_i ”同步簇同步过程呈现

Fig. 3 Synchronization process of “star b-node b_i ” synchronization cluster

4.2 节点 a_k 、 a_m 与星“a”同步及其同步簇同步现象的数值模拟呈现

在理论推演过程中,本文并未考虑激光器本身

计算发现:从 $t=10$ ms 开始, $E_{b_j} = E_b$, $E_{b_i} = E_{b_j}$ 。独立的节点 b_i 和 b_j 激光器是稳定态,但“星”是混沌态,当前“星 b-节点 b_i ”同步簇是混沌同步,显然“星”引导了网络的动力学行为。进一步研究后发现,在当前的参数条件下,仅存在“星 b-节点 b_i ”同步簇,“星 a-节点 a_k ”同步簇是不存在的,而星 a 与各个节点(a_k 、 a_m)并不同步。也就是说,在当前参数条件下,仅存在单个“星 b-节点 b_i ”同步簇。

特性对网络的影响。事实上,网络双星激光器本身的特性(如动力学)会控制整个网络的动力学行为。通常,参数变化可导致双环掺铒光纤激光器呈现倍周期分岔、混沌等现象。而这里每个独立节点激光器动力学变化是不一样的。但进一步研究发现,双星确实能够引导网络的动力学状态并导致所有节点呈现与之相应的动力学行为。当改变参数值为 $g_a = 5000$ 和 $g_b = 10500$ 时,两激光器动力学变化行为如图 4 表示。其中图 4(a)是激光四周期吸引子,图 4(b)是两环输出的激光及波形。图 5 是节点 $a_{i,j}$ 和星“a”同步及同步簇同步现象的呈现,这种四周期同步是渐进式激光同步。在经过一段张弛振荡后, a_m 环和 a 环激光混沌同步逐步实现了。计算发现:从 $t=10$ ms 开始, $E_{a_m} - E_a = 0$ 。图 5 中的插入图呈现出了 a_m 环与 a 环同步以及 a_k 环与 a_m 环同步。

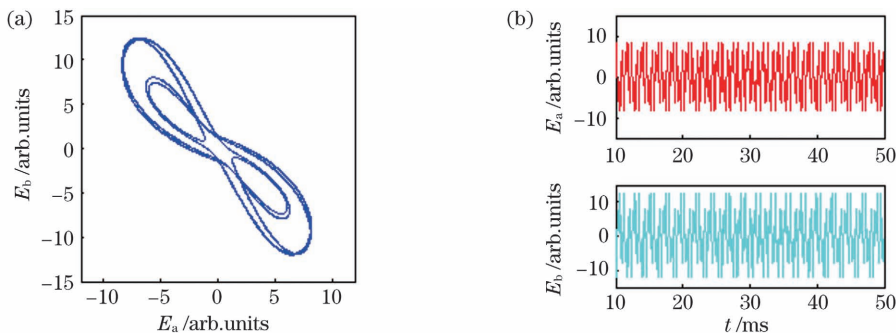


图 4 四周期状态。(a)四周期轨迹;(b)两四周期激光

Fig. 4 Four-period state. (a) Four-period trajectory; (b) two four-period lasing

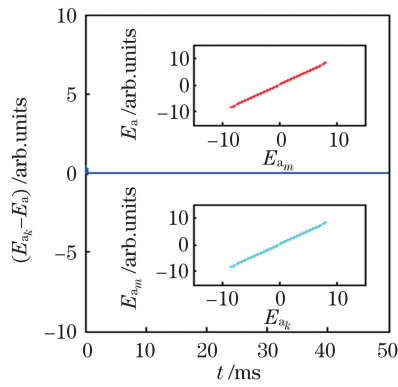


图 5 “星 a-节点 a_k ”同步簇同步过程呈现

Fig. 5 Synchronization process of “star a-node a_k ” synchronization cluster

计算发现:从 $t = 10$ ms 开始, $E_{a_m} = E_a, E_{a_k} = E_{a_m}$ 。通常,独立节点 a_k, a_m 激光器是稳定态的,而当前星是四周期态,且“星 a-节点 a_k ”同步簇是四周期同步,是星引导了网络的动力学状态。当然,在目前的参数条件下,仅存在“星 a-节点 a_i ”同步簇,“星 b-节点 b_i ”同步簇是不存在的。也就是说,在当前的参数条件下,仅存在单个“星 a-节点 a_k ”同步簇。当然,通过改变参数也可以观察到混沌以及其他类周期“星 a-节点 a_k ”同步簇现象,这里不再重复展现。

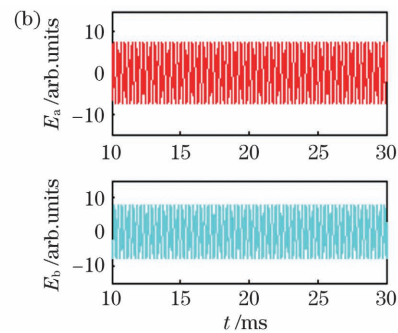
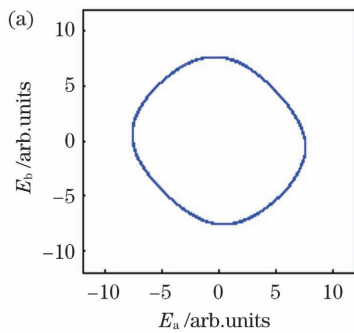


图 6 单周期。(a)单周期轨迹;(b)两激光周期脉动

Fig. 6 Single-cycle. (a) Single-cycle trajectory; (b) two lasing pulses

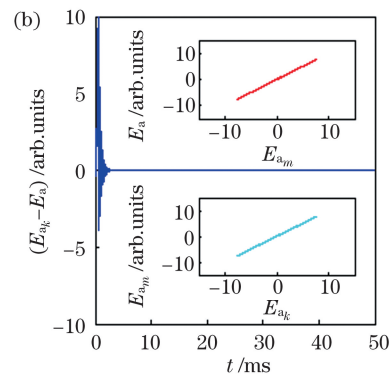
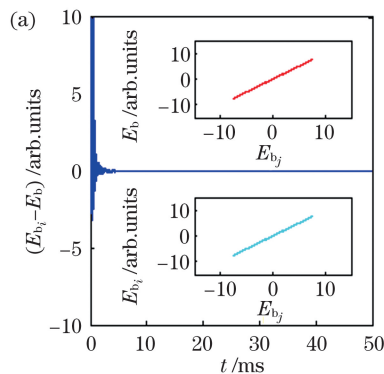


图 7 并行同步簇同步过程呈现。(a)节点 b_i, b_j 与星“b”同步;(b)节点 a_k, a_m 与星“a”同步

Fig. 7 Synchronization process of parallel synchronization cluster. (a) Nodes b_i and b_j synchronize with star b; (b) nodes a_k and a_m synchronize with star a

4.3 网络双星并联同步及其双并列同步簇现象

继续改变参数,以控制双环动力学行为,使双星引导网络的动力学状态到周期态。选取参数值为 $I_{pa} = 3.9, I_{pb} = 4.1, k_a = k_b = 1000, \eta_0 = 0.2, g_a = 10800, g_b = 10500$ 。图 6 是两环激光的周期态动力学变化,图 6(a)显示的是激光单周期极限环,图 6(b)是两环输出的激光周期脉冲。图 7 是网络双星与并联轴节点的同步以及并列同步簇现象的数值模拟呈现,其中图 7(a)显示的是节点 b_i, b_j 与星“b”的同步现象以及与同步簇的同步现象。可以发现,经过一段张弛振荡后, b_i 环和 b 环激光逐步实现了同步。计算发现:从 $t = 10$ ms 开始, $E_{b_i} - E_b = 0$ 。同样, b_j 环与 b 环同步以及 b_i 环与 b_j 环同步由插入图呈现。计算发现:从 $t = 10$ ms 开始, $E_{b_j} = E_b, E_{b_i} = E_{b_j}$ 。当前“星 b-节点 b_i ”同步簇是存在的。进一步发现,在当前参数条件下,不仅存在“星 b-节点 b_i ”同步簇,还存在“星 a-节点 a_k ”同步簇,如图 7(b)所示。该图呈现了节点 b_i, b_j 与星“b”同步以及与同步簇的同步现象,在经过一段张弛振荡后, a_m 环与 a 环激光同步逐步实现。计算发现:从 $t = 10$ ms 开始, $E_{a_m} - E_a = 0$ 。同样, a_m 环与 a 环同步

以及 a_k 环与 a_m 环同步由两插入图呈现。计算发现:从 $t=10$ ms 开始, $E_{a_m} = E_a, E_{a_k} = E_{a_m}$ 。即:在当前参数条件下,存在着“星 a -节点 a_i ”同步簇。也就是说,在当前参数条件下存在并列同步簇,即存在着网络双并联并列同步现象。

4.4 参数失配对同步性能的影响

这里简单地分析参数失配对同步性能的影响。下面计算并讨论 b_i 环与 b 环混沌激光同步差异 Δ_b 以及 a_k 环与 a 环混沌激光同步差异 Δ_a 在存在参数失配时的数值。计算时,将同步差异的绝对值分成 20000 等份,按时间间隔 40~50 ms 进行统计并平均。利用图 7 所示的参数,当没有驱动时, $\Delta_b = 5.9535 = \Delta_{bd}, \Delta_a = 5.9781 = \Delta_{ad}$, 即非同步;当有驱动但没有参数失配时, $\Delta_b = 0, \Delta_a = 0$, 即 b_i 环与 b 环同步, a_k 环与 a 环同步。当 b_i 环的损耗系数 k_b 与 b 环的损耗系数 k_b 以及 a_k 环的损耗系数 k_b 与 a 环的损耗系数 k_b 失配 0.01% 时, $\Delta_b = 0.0042, \Delta_a = 0.0166$ 。此时, $\Delta_{bd}/\Delta_b = 1.4 \times 10^3, \Delta_{ad}/\Delta_a = 360$ 。本文认为同步与非同步还是可以识别的。如果泵浦参数失配 0.01% 时, $\Delta_{bd}/\Delta_b = 4.78 \times 10^3, \Delta_{ad}/\Delta_a = 1.13 \times 10^3$ 。此时,本文认为同步与非同步也是可以识别的。当然,随着现代光子集成技术的发展,小于 0.01% 的参数失配是完全可能的。所以说本文提出的同步网络不仅具有理论研究价值,而且可以利用现代光子集成技术去实现^[33-36]。

5 结 论

本文研究了双星并联同步光纤激光网络系统,给出了该网络的数学物理光学方程组,并在理论上证明了网络节点并联同步以及网络节点与双星的交叉同步,形成了网络“星-节点”同步簇理论模式,成功预测了“星-节点”同步簇、双“星-节点”并列同步簇的存在。针对两组相互独立并联轴节点的单环掺铒光纤激光器与作为网络双星的双环掺铒光纤激光器对应激光环的同步进行了数值模拟。本研究发现了单“星-节点”同步簇及混沌同步簇、类周期同步簇、并列双“星-节点”同步簇等。另外,本文具体分析了不同参数条件下双星并联同步光纤激光网络功能的实现。本研究对于光学网络、光纤激光同步网络及其应用具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Arenas A, Díaz-Guilera A, Kurths J, et al. Synchronization in complex networks [J]. Physics Reports, 2008, 469(3): 93-153.
- [2] Barahona M, Pecora L M. Synchronization in small-world systems [J]. Physical Review Letters, 2002, 89(5): 054101.
- [3] 孔江涛, 黄健, 龚建兴, 等. 基于复杂网络动力学模型的无向加权网络节点重要性评估 [J]. 物理学报, 2018, 67(9): 098901.
- [4] Kong J T, Huang J, Gong J X, et al. Evaluation methods of node importance in undirected weighted networks based on complex network dynamics models [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(9): 098901.
- [4] 舒睿, 陈伟, 肖井华. 多个耦合星型网络的同步优化 [J]. 物理学报, 2019, 68(18): 180503.
- [5] Shu R, Chen W, Xiao J H. Optimizing synchronizability of multiple coupled star networks [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(18): 180503.
- [5] Dörfler F, Chertkov M, Bullo F. Synchronization in complex oscillator networks and smart grids [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(6): 2005-2010.
- [6] 秦洁, 于洪洁. 超混沌 Rössler 系统构成的星形网络的混沌同步 [J]. 物理学报, 2007, 56(12): 6828-6835.
- [6] Qin J, Yu H J. Synchronization of star-network of hyperchaotic Rössler systems [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(12): 6828-6835.
- [7] Xiao Y, Deng T, Wu Z M, et al. Chaos synchronization between arbitrary two response VCSELs in a broadband chaos network driven by a bandwidth-enhanced chaotic signal [J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 1442-1448.
- [8] Aviad Y, Reidler I, Zigzag M, et al. Synchronization in small networks of time-delay coupled chaotic diode lasers [J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4352-4359.
- [9] Lindley B S, Schwartz I B. Modeling synchronization in networks of delay-coupled fiber ring lasers [J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24460-24467.
- [10] Nixon M, Friedman M, Ronen E, et al. Synchronized cluster formation in coupled laser networks [J]. Physical Review Letters, 2011, 106(22): 223901.
- [11] Nixon M, Fridman M, Ronen E, et al. Controlling synchronization in large laser networks [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(21): 214101.
- [12] Ohtsubo J, Ozawa R, Nanbu M. Synchrony of small nonlinear networks in chaotic semiconductor lasers [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(7): 072702.
- [13] Argyris A, Bourmpos M, Syvridis D. Experimental synchrony of semiconductor lasers in coupled

- networks[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5600-5614.
- [14] Mihana T, Fujii K, Kanno K, et al. Laser network decision making by lag synchronization of chaos in a ring configuration [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 40112-40130.
- [15] Liu S Q, Jiang N, Zhao A K, et al. Secure optical communication based on cluster chaos synchronization in semiconductor lasers network [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 11872-11879.
- [16] Zhang L Y, Pan W, Yan L S, et al. Cluster synchronization of coupled semiconductor lasers network with complex topology [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(6): 18686195.
- [17] Xu M F, Pan W, Xiang S Y, et al. Cluster synchronization in symmetric VCSELs networks with variable-polarization optical feedback [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10754-10761.
- [18] 吕翎, 商锦玉, 朱佳博, 等. 激光 Maxwell-Bloch 方程时空混沌网络的同步研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(14): 140504.
- Lü L, Shang J Y, Zhu J B, et al. Study on spatiotemporal chaos network synchronization of the laser Maxwell-Bloch equation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(14): 140504.
- [19] 林书庆, 江宁, 王超, 等. 基于动态混沌映射的三维加密正交频分复用无源光网络 [J]. *物理学报*, 2018, 67(2): 028401.
- Lin S Q, Jiang N, Wang C, et al. A three-dimensional encryption orthogonal frequency division multiplexing passive optical network based on dynamic chaos-iteration [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(2): 028401.
- [20] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 151-162.
- [21] 姬玉林, 郭晓敏, 李璞, 等. 滤波对激光混沌信号时延特征抑制与随机统计特性增强的研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1008001.
- Ji Y L, Guo X M, Li P, et al. Suppression of time-delay signature and enhancement of stochastic statistical properties of chaotic laser by filtering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1008001.
- [22] 王宇, 靳宝全, 张建国, 等. 基于混沌激光干涉的分布式光纤声音传感 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328016.
- Wang Y, Jin B Q, Zhang J G, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing based on chaotic laser interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328016.
- [23] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems [J]. *Physical Review Letters*, 1990, 64(8): 821-824.
- [24] Luo L G, Chu P L, Liu H F. 1-GHz optical communication system using chaos in erbium-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(3): 269-271.
- [25] Shen K, Wang R. Synchronization of chaotic systems modulated by another chaotic system in an erbium-doped fiber dual-ring laser system [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(8): 960-963.
- [26] 范文华, 田小建, 于永力, 等. 基于反馈参数调制的掺铒光纤激光器混沌同步 [J]. *物理学报*, 2006, 55(10): 5105-5108.
- Fan W H, Tian X J, Yu Y L, et al. Synchronizing erbium-doped fiber dual-ring lasers by using the method of feedback modulating-parameter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(10): 5105-5108.
- [27] 颜森林, 迟泽英, 陈文建. 掺铒光纤激光器反相位混沌同步及其编码 [J]. *光学学报*, 2004, 24(1): 29-32.
- Yan S L, Chi Z Y, Chen W J. Chaos synchronization through reverse-phase and its encoding in erbium-doped fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(1): 29-32.
- [28] 颜森林. 激光局域网络的混沌控制及并行队列同步 [J]. *物理学报*, 2021, 70(8): 080501.
- Yan S L. Chaos-control and parallel queue synchronization of laser local area network [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(8): 080501.
- [29] 颜森林. 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 [J]. *物理学报*, 2019, 68(17): 170502.
- Yan S L. Chaotic laser parallel series synchronization and its repeater applications in secure communication [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(17): 170502.
- [30] Yan S L. Study of chaos control of a dual-ring erbium-doped fiber laser using parameter method [J]. *Journal of Optical Communications*, 2021, 42(1): 9-15.
- [31] 李磊, 方捡, 王陆唐, 等. 储备池计算硬件实现方案研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 080005.
- Li L, Fang N, Wang L T, et al. Research progress in hardware implementations of reservoir computing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 080005.
- [32] 杨凌雁, 张林. 光蓄水池神经网络研究进展 [J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1906001.
- Yang L Y, Zhang L. Recent progress in photonic reservoir neural network [J]. *Chinese Journal of*

- Lasers, 2021, 48(19): 1906001.
- [33] Han Y N, Xiang S Y, Wang Y, et al. Generation of multi-channel chaotic signals with time delay signature concealment and ultrafast photonic decision making based on a globally-coupled semiconductor laser network[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(11): 1792-1799.
- [34] Liu D J, Zhang L, Jiang H X, et al. First demonstration of an on-chip quadplexer for passive optical network systems [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 757-763.
- [35] 颜森林. 激光混沌交叉发射与交替并行接收在保密通信中应用的基本理论与技术[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0906001.
- Yan S L. Theory and technique of cross transmittance and alternate parallel reception of laser chaos in secure communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0906001.
- [36] Ma C G, Wu J L, Xiao J L, et al. Wideband chaos generation based on a dual-mode microsquare laser with optical feedback [J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(11): 111401.

Synchronization Network of Dual-Star Parallel Fiber Lasers

Yan Senlin

Electronic Engineering School, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, Jiangsu, China

Abstract

Objective Currently, complex systems and neural networks research achievements are widely used in artificial intelligence, information, communication, and networks and have become an important mathematical physical theoretical basis of digital society. Optical and photoelectric technologies were used to construct optical networks and neurons in the 1980s. Furthermore, the optical neural network has strong parallel computing ability, high speed, modular integration of memory and computation, low energy consumption, and strong antiinterference ability, so it has obvious advantages and characteristics in artificial intelligence, optical computing, optical communication, optical communication network, and other fields. People put forward a small world network of generalized chaotic synchronization of two mutual coupling lasers, a single-center network formed by a “center” laser, a single center broadband chaos synchronization network driven by a chaotic signal, and a laser chaotic parallel synchronous network with symmetric structure variable feedback polarized light vertical cavity surface emitting lasers. With the development of laser technology, integrated photonics, and micronano photonic integrated microdevices, it is possible to construct a complex optical network system. Therefore, proposing new optical networks and systems is an important research direction. Since each node in a star network can communicate with the center through “point-to-point”, it can manage the entire network with the “star” of the center node. So, a star network structure is a simple, convenient management, easy to implement. Additionally, the parallel transmission mode has the characteristics of fast data transmission and simple processing. Based on the basic ideas and methods of a star network, parallel network, chaotic synchronization network, laser chaos synchronization, and laser network, we use the optical network, optical transmission, laser drive, and optical control technology to put forward the dual-star parallel fiber laser synchronization network system and mathematical and physical model, etc. And we give our theory of the “single-star-node” synchronization cluster and parallel “dual-star-node” synchronization cluster about the network. The network has the characteristics of a star network and a parallel network. The proposed new optical fiber network can play a certain reference role in studying optical networks, fiber laser synchronization networks, and their application.

Methods The overall structure of the proposed network is built by the system and network frameworks such as fiber lasers and optical devices. The dual-star must be a double drive source and can output two optical signals according to the physical function requirements of the dual-star network. The advantages of erbium-doped fiber laser include mature technology, good compatibility with fiber, and wide application in fiber network communication. Therefore, the dual-ring erbium-doped fiber laser is chosen as the dual-star signal transmission driver of the dual-star fiber laser network. This type of laser can ensure the output of two optical signals as a network dual-star drive source, and the network can make two-star sources to drive two multiple parallel lasers (forming two groups of two

types of node cluster), i. e., the network nodes are composed of two groups of multiple single-ring fiber lasers in parallel, thus forming a parallel fiber laser network and system. The parallel fiber laser synchronization network system is cross-driven and antiphase-controlled by a dual star. Its network structure and optical characteristics are as follows: first, a dual-ring erbium-doped fiber laser creates two double driving sources, and then the dual-star cross drive is used to drive two groups of single-ring erbium-doped fiber lasers to create two groups of parallel fiber laser networks. Finally, antiphase control and optical driving technology are used to realize synchronizations of two sets of parallel nodes of a network, as well as cross-synchronization of two sets of parallel nodes of the network with dual-stars, thereby realizing the function of dual-star fiber laser synchronization network. The mathematical and physical optical equations of the network are given out.

Results and Discussions Using synchronization equations of the network, our theory proves that the network parallel node cluster synchronization and cross synchronization with dual-star can form a theoretical model of the network “star-node” synchronization cluster, and successfully predicts the existences of “single-star-node” synchronization cluster and “dual-star-node” parallel synchronization cluster. Under different parameters, the functions realization of a parallel synchronous fiber laser network cross-driven and antiphase-controlled by dual-star is discussed. The numerical calculations shows that the synchronization difference between the star and each ring gradually disappears and approaches complete synchronization when $t = 10$ ms starts. We also discover that changing the parameters can control the dynamic behavior of the dual-ring, so the dual-star can guide the dynamic state of the network to the chaotic state, the quasi-periodic state, and the periodic state. The synchronization of two groups of independent parallel node clusters with the corresponding ring of dual-ring erbium-doped fiber laser as the dual-star of the network is simulated numerically. The results obtained are that the “single-star-node” synchronization cluster, chaos synchronization cluster [Fig. 2 and Fig. 3], quasi-period synchronization cluster [Fig. 4 and Fig. 5], and parallel “dual-star-node” synchronization cluster [Fig. 6 and Fig. 7] are found in the network.

Conclusions This research investigated a dual-star parallel synchronous fiber laser network system. It theoretically proves the network parallel node cluster synchronization and the cross synchronization with dual-star, forming the theoretical mode of the network “star-node” synchronous cluster, and successfully predicting the parallel existences of “star-node” synchronization cluster and double “star-node” synchronous cluster. The synchronization of two groups of independent parallel nodes of the single-ring erbium-doped fiber laser and the corresponding laser ring as the network dual-star dual-ring erbium-doped fiber laser is simulated successfully. The single “star-node” synchronization cluster, chaotic synchronization cluster, quasi-period synchronization cluster, parallel double “star-node” synchronization cluster are found. The realization of a dual-star parallel synchronous fiber laser network under different parameters is analyzed. Compared with a single star network, the dynamic behavior of the network's structure becomes rich, and its double send terminal breakthroughs the limitation of the single terminal send parallel network and shows the obvious advantages and can transfer information efficiently. This research has significant implications for optical networks, fiber laser synchronization networks, and applications.

Key words fiber optics; laser technology; optics network; synchronization; fiber laser; dual-star; chaos