

Использование нейросетевых систем для контроля нестационарной многомодовой генерации лазеров

В.И.Леденев

Рассмотрена трехуровневая нейронная сеть с двадцатью пятью входами, двумя скрытыми элементами и четырьмя выходами, обученная распознаванию четырех ситуаций на входе: появление фундаментальной моды резонатора Фабри–Перо, суперпозиция фундаментальной и первой мод резонатора с нулевыми фазами, суперпозиция фундаментальной и первой мод резонатора с фазами 0 и π и появление второй моды и суперпозиция фундаментальной и второй мод. Показано, что сеть способна правильно распознавать изменения модового состава резонатора Фабри–Перо по модулю поперечного распределения поля при развитии двухмодовой генерации. Исследована работа сети при двух временах ее отклика – меньшем резонаторного времени и времени, определяющемся пироэлектрическим приемником лазерного излучения.

Ключевые слова: лазер, резонатор Фабри–Перо, динамика генерации, численное моделирование, нейронная сеть.

1. Введение

Современные теоретические методы позволяют подробно исследовать динамику поперечных распределений поля при лазерной генерации. Аналитические исследования динамики основаны на разложении распределений поля и усиления по набору ортогональных функций или по модам пустого резонатора и на описании динамики с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений [1–4]. Такое приближение позволило изучить бифуркационные механизмы переходов между различными режимами генерации, а также исследовать режимы вращения поперечных распределений поля и образование оптических вихрей [5–7]. К достоинствам этого подхода можно отнести возможность использования для решения обыкновенных дифференциальных уравнений численных методов высокой точности, позволяющих исследовать хаотическую динамику оптического поля. В работе [8] показано, что результаты, полученные при использовании данного подхода в случае стационарной накачки, в целом совпадают с численными, полученными методом Фокса–Ли. Однако профили распределений, полученных этими двумя методами, могут иметь локальные различия в пределах 10% [8].

В рамках численных исследований к настоящему времени хорошо отработаны методы определения стационарных типов колебаний оптических резонаторов [9–14]. Постановка задачи их нахождения по распределениям поля, получаемым при последовательных обходах резонатора излучением, приведена в работе [9], алгоритмы расчета с помощью методов Прони, Крылова и Арнольди – в [9–14]. В частности в работе [12] для сложного

случая неустойчивого конфокального резонатора показано, что относительная точность расчета собственных значений и собственных векторов может достигать 10^{-11} . Предварительное нахождение модовых распределений позволяет конкретизировать начальные условия для расчета нестационарной генерации лазеров с различными резонаторами и постоянной накачкой активной среды [15, 16]. Результатом таких расчетов является обнаружение новых типов генерации, присущих лазеру как распределенной системе [16], а также определение формы мод и профилей коэффициента усиления в нелинейном случае.

В настоящее время в лазерных технологических процессах начинают использоваться моды более высокого порядка, чем фундаментальная мода. Например, радикально поляризованные пучки, создаваемые на основе поля первой моды, могут сильнее поглощаться в металлических кавернах, чем пучки другой поляризации [17]. Наличие в световом поле примеси фундаментальной моды или мод более высоких порядков в данном случае нежелательно. С другой стороны, в тех технологических процессах, в которых используется фундаментальная мода, возбуждение первой поперечной моды также нежелательно, поскольку приводит к появлению осцилляций угловой направленности излучения. Эти осцилляции могут вызывать заметные изменения в освещенности отдельных участков глубоких металлических каверн при многократных отражениях в них излучения. Таким образом, совершенствование лазерных технологий нуждается в системах контроля модового состава лазеров в процессе генерации. Разработанные методики аналитических и численных исследований и полученные к настоящему времени результаты могут служить хорошей базой для создания таких систем.

В основу данной работы положено предположение о том, что поперечные распределения интенсивности излучения в ближней зоне имеют характерные признаки, по которым можно найти число генерируемых мод, а также соотношение их амплитуд и фаз (вид распределений по-

В.И.Леденев. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Россия, 140700 Шатура, Московская обл., Святозерская ул., 1; e-mail: ledenev_ilit@rambler.ru

казан, напр., в [18]). Современные методы организации контроля модового состава не требуют определения этих признаков. Достаточным является использование нейронных сетей (НС), обученных распознаванию нужных ситуаций [19, 20]. В настоящей работе к таким ситуациям отнесено появление на входе НС фундаментальной моды резонатора Фабри–Перо либо суперпозиции фундаментальной и первой мод резонатора с нулевыми фазами, либо суперпозиции фундаментальной и первой мод с фазами 0 и π , либо второй моды или суперпозиции фундаментальной и второй мод.

2. Нейронная сеть

Источник излучения, расположение и устройство НС представлены на рис.1. Предполагалось, что сеть имеет классическую трехуровневую структуру с двадцатью пятью входными нейронами, двумя нейронами в скрытом слое и четырьмя – в выходном. Отклик нейронов описывался сигмоидной функцией [19]. Предполагалось, что датчики излучения в первом слое имеют малые размеры по сравнению с шириной распределения и могут считаться точечными.

Вначале в численном эксперименте определялся модовый состав незаполненного резонатора Фабри–Перо и на его основе создавался набор примеров для обучения НС. Использованный набор состоял из 33 распределений, сгруппированных по количеству выходных нейронов. К первой группе относились распределения $a(j) \times |U_0(x)|$. При попадании на вход распределений из этой группы первый выходной нейрон y_1 должен был давать значение, равное единице, а остальные три ($y_2 - y_4$) – нулю. Во вторую и третью группы были включены распределения $a(j)|U_0(x) + b(l)U_1(x)|$ и $a(j)|U_0(x) - b(l)U_1(x)|$ соответственно. Для этих входных распределений дол-

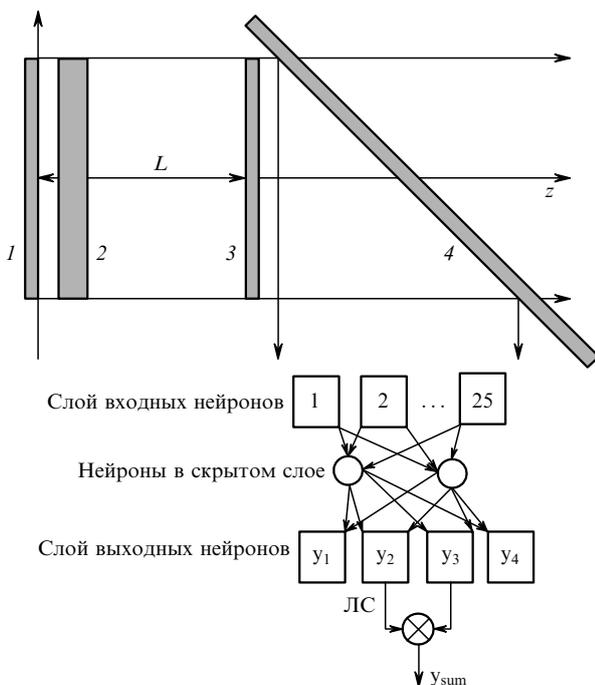


Рис.1. Система контроля модового состава излучения лазера: 1, 3 – зеркала резонатора Фабри–Перо; 2 – слой активной среды; 4 – ответвитель излучения; L – расстояние между зеркалами; ЛС – логическая схема, дающая значение $y_{\text{sum}} = y_2$ или $y_{\text{sum}} = y_3$, если y_2 или y_3 больше 0.5.

жны были выполняться условия $y_2 = 1$ ($y_1, y_3, y_4 = 0$) и $y_3 = 1$ ($y_1, y_2, y_4 = 0$). К четвертой группе относились распределения $a(j)|U_2(x)|$ и $a(j)|U_0(x) + b(l)U_2(x)|$. В этом случае $y_4 = 1$ ($y_1 = y_2 = y_3 = 0$). В приведенных выше выражениях $U_{0,1,2}(x)$ – распределения комплексных амплитуд фундаментальной, первой и второй мод соответственно; $j, l = 1, 2, 3$; $a_{1,2,3} = 0.8, 0.9, 1.0$; $b_{1,2,3} = 0.1, 0.2, 0.3$. Таким образом, на данном наборе примеров сеть обучалась распознаванию на входе не конкретных распределений, а некоторых их форм, представляющих собой фундаментальную моду, две суперпозиции фундаментальной и первой мод и суперпозиций, включающих вторую моду (на распознавание амплитуд мод НС не настраивалась).

При обучении использовались два метода: метод обратного распространения и эволюционный подход [19, 20]. В последнем случае процесс обучения проходил при смене поколений. В каждом поколении формировалась популяция, отдельная особь которой представляла собой набор весов скрытых и выходных нейронов, случайно возмущенных с небольшой амплитудой. Число особей в популяции составляло ~ 100 . При формировании популяции использовалась стратегия элитности [20]: в следующее поколение переходила наиболее успешная особь из предыдущего поколения (т. е. особь, наилучшим образом распознающая входные распределения) и на её основе в процессе мутаций (случайных возмущений весов) проходило формирование остальных членов популяции. Таким образом, следующее поколение не могло ухудшить распознавания форм мод. Скрещивания особей не проводилось, несмотря на рекомендации [20]. Тем не менее обучение протекало довольно быстро. На рис.2,а показана среднеквадратичная ошибка выхода сети в зависимости от времени для наиболее успешной особи. Видно, что за 6 мин ошибка уменьшилась от ~ 1 до 10^{-90} . При этом в процессе эволюции сменилось 6000 поколений. Как видно из рис.2,б, кривая не плавная, т. е. эволюция временами ослабевала. Это происходило, если в соответствующих поколениях не находилось особи, улучшающей популяцию.

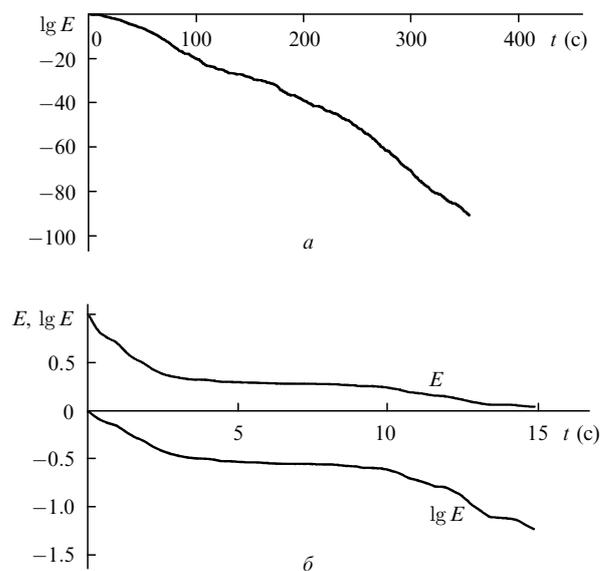


Рис.2. Зависимость логарифма среднеквадратичной ошибки выходов НС на обучающем наборе от времени (а) и замедление скорости обучения при отсутствии подходящих особей в популяции (б).

В соответствии с устройством НС ее скрытый слой фактически должен был сжимать информацию о входном распределении до двух бит. Наименее удачные значения выходов нейронов скрытого слоя для каждой из четырех групп равны соответственно $(1.17 \times 10^{-3}; 9.95 \times 10^{-1})$, $(3.18 \times 10^{-10}; 1.81 \times 10^{-4})$, $(1.00; 1.00)$ и $(9.97 \times 10^{-1}; 2.46 \times 10^{-4})$. Видно, что в процессе эволюции скрытый слой учился нумеровать группы двоичными числами $(0;1)$, $(0;0)$, $(1;1)$, $(1;0)$. Тем не менее ошибка в скрытом слое не так мала, как в выходном, т. е. НС компенсировала неточности работы скрытого слоя в выходном слое. Отметим, что обучение методом обратного распространения происходило существенно более медленно.

3. Расчетная схема

Задача расчета нестационарной генерации решалась в плоской геометрии. В малоугловом приближении скалярной теории дифракции электрическое поле E внутри резонатора представлялось в виде встречных плоских волн, модулированных плавными огибающими F , B :

$$E(x, z, t) = [F(x, z, t) \exp(ik_0z) + B(x, z, t) \exp(-ik_0z) \exp(-i\omega_0t)]. \quad (1)$$

Здесь ω_0 – несущая частота; $k_0 = \omega_0/c$. Динамика огибающих прямой ($F(x, z, t)$) и обратной ($B(x, z, t)$) волн описывалась следующими уравнениями:

$$2ik_0 \left(\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} - \frac{\partial B}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} - ik_0gB = 0, \quad (2)$$

$$2ik_0 \left(\frac{1}{c} \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - ik_0gF = 0. \quad (3)$$

На зеркалах резонатора волны удовлетворяли условиям отражения

$$F(x, 0, t) = -B(x, 0, t)r_1, \quad (4)$$

$$B(x, L, t) = -F(x, L, t)r_2. \quad (5)$$

Здесь множители r_1 и r_2 – коэффициенты отражения глухого и выходного зеркал; L – расстояние между зеркалами. Усиление излучения в активной среде описывалось уравнением

$$\tau \frac{\partial g}{\partial t} = g_0(x) - g(1 + I), \quad (6)$$

где $I = |F|^2 + |B|^2$ – усредненная по интерференционным колебаниям встречных волн интенсивность излучения, нормированная на величину насыщения [21]. Таким образом, в расчетах учитывались процессы вынужденного излучения и релаксации с постоянной времени τ .

Начальное условие $F(x, 0, 0)$ для прямой волны задавалось с помощью распределения фундаментальной моды $U_0(x)$. Начальное условие для обратной волны $B(x, 0, 0)$ находилось с помощью кругового обхода резонатора. Амплитуды начальных распределений прямой и обратной волн и начальное распределение коэффициента усиления выбирались близкими к стационарным значениям. Это обеспечивало возможность сравнения расче-

тов одномодовой генерации по (2)–(6) с аналитическими результатами для слабых возмущений [21].

Резонатор Фабри–Перо имел следующие характеристики: радиус зеркал $a = 1$ см, расстояние между зеркалами $L = 150$ см, коэффициенты отражения $r_1 = 1$ и $r_2 = 0.8$, число Френеля резонатора $N_F = 6.25$. Пороговый коэффициент усиления фундаментальной моды $g_t = 1.5337 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, превышение накачки над порогом $k = g_0/g_t$, время релаксации $\tau = 10^{-5}$ с. Таким образом, физические параметры задачи соответствовали параметрам работы [15]. Отличия состояли в том, что активная среда представляла собой только один тонкий слой, прилегающий к первому зеркалу (в [15] слой среды располагался посередине элемента сетки по оси z), а дифракционный шаг осуществлялся путем вычисления интеграла Френеля–Кирхгофа (в [15] использовался спектральный подход). Число узлов сетки в поперечном направлении $M_x = 257$. Расчеты проводились при превышении накачки над порогом $k = 1.34–1.55$. Наиболее трудными для распознавания оказались распределения, соответствующие малым значениям k , поэтому в дальнейшем временные зависимости приводятся для $k = 1.347$.

4. Нейронная сеть с быстрым откликом

Временная зависимость мощности излучения на выходном зеркале P_{out} для интервала 0–320 мкс показана на рис.3,а. Участок кривой 0–220 мкс соответствует одномодовой генерации, участок АВ – генерации фунда-

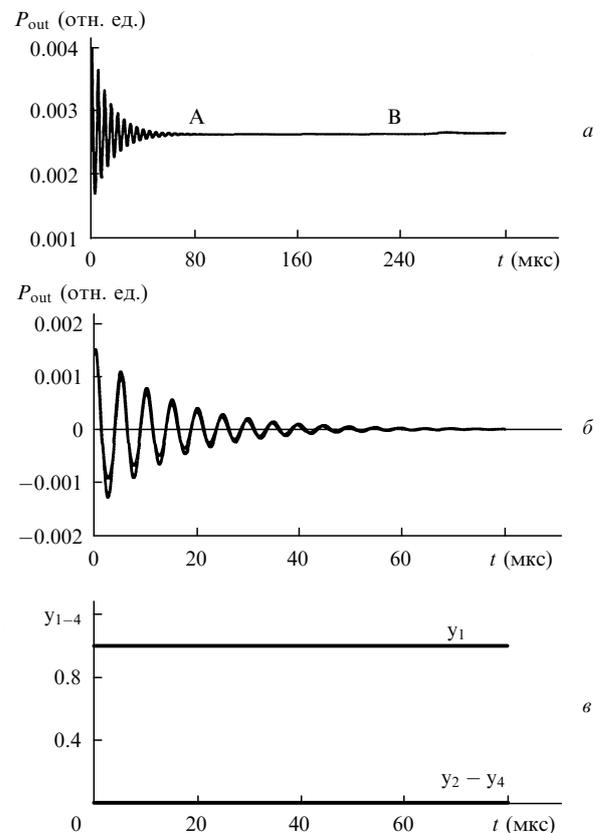


Рис.3. Зависимости мощности излучения на выходном зеркале P_{out} от времени (участок А – область установления одномодовой генерации, участок В – область перехода к двумодовой генерации) (а) и мощности P_{out} без постоянной составляющей для точечной модели (кривая с меньшей амплитудой) и для расчетной схемы (2)–(6) (б), а также выходы НС на участке А (в).

ментальной моды постоянной амплитуды. На рис.3,б представлены временные зависимости мощности P_{out} без постоянной составляющей для точечной модели (кривая с меньшей амплитудой) и для расчетной схемы (2)–(6). Видно, что совпадение кривых является достаточно хорошим, хотя расчетная модель сильно упрощена. Теоретическое значение периода релаксационных колебаний T_d , найденное по формулам [21] для точечной модели, составляло 5.96 мкс. В численном эксперименте период был равен 5.91 мкс при среднеквадратичном отклонении 0.003 мкс. Аналогично коэффициент затухания δ_d для точечной модели был равен 0.0675 мкс^{-1} , а его численное значение составляло 0.0706 мкс^{-1} при среднеквадратичном отклонении 0.006 мкс^{-1} . Такие отклонения в целом соответствуют результатам [15]. Следовательно, можно сделать вывод, что схема расчета пригодна для исследования нестационарных режимов генерации.

На рис.3,в показаны выходные сигналы $y_1 - y_4$ нейронной сети на участке А при быстром отклике сети (время отклика меньше времени обхода резонатора излучением). Значения $y_1 = 1$, на остальных выходах НС давала нулевые значения: $y_2 - y_4 = 0$. Таким образом, НС правильно распознала режим одномодовой генерации.

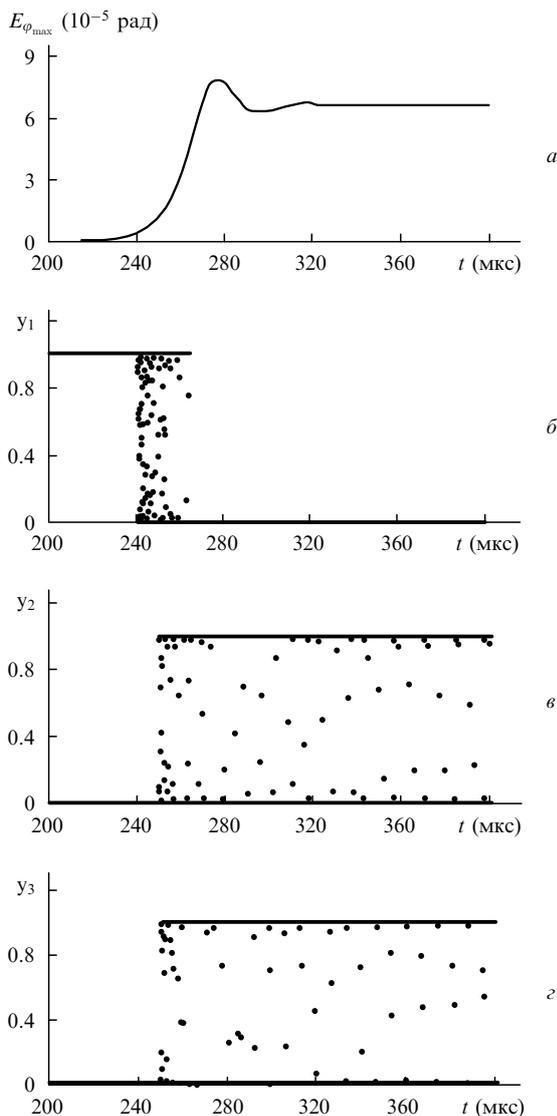


Рис.4. Временная зависимость огибающей смещений центрального максимума излучения в дальней зоне (а) и выходы НС $y_1 - y_3$ (б–г).

При переходе к двухмодовой генерации ($t > 200$ мкс) увеличение средней мощности излучения P_{out} на выходном зеркале мало ($\sim 0.5\%$) и на рис.3,а не заметно. На рис.4,а представлена огибающая амплитуды колебаний углового максимума излучения в дальней зоне (для показа самих колебаний шкала времени должна иметь значительно меньший масштаб). На рис.4,б–г показаны выходы $y_1 - y_3$ нейронной сети при быстром отклике (на каждом обходе резонатора). Выход $y_4 = 0$ и на рис.4 не показан. Видно, что НС правильно распознала изменение режима генерации в районе 240 мкс. Переходный участок, на котором значение y_1 находилось между 0 и 1, занял ~ 40 мкс (рис.4,б). После окончания переходного участка значение y_1 стабилизировалось на нуле – НС перестала наблюдать одномодовую генерацию, а значения y_2, y_3 (рис.4,в,г) показали появление первой моды. Однако y_2, y_3 также принимают нулевые и промежуточные значения. Причина этого понятна из рис.5. На нем показаны положения углового максимума φ_{max} излучения в дальней зоне на малых временных интервалах (рис.5,а) и значения выходов нейронов y_2, y_3 , которые, как следует из рис.5,б,в, соответствуют переменным отклонениям углового максимума излучения от оси резонатора. Приме-

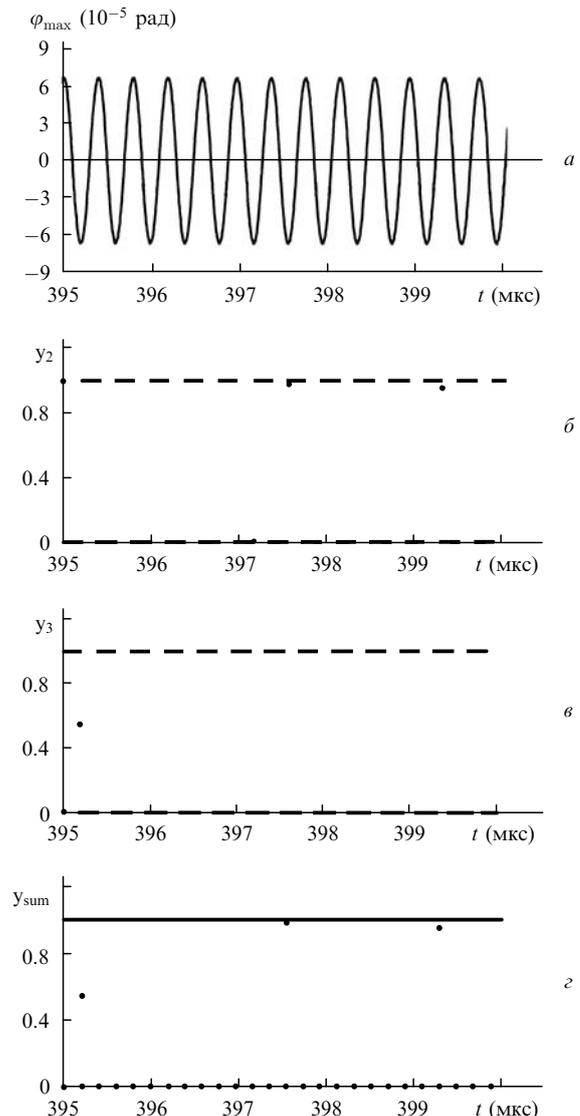


Рис.5. Угловое положение центрального максимума излучения в дальней зоне (а) и выходы НС y_1, y_2, y_3, y_{sum} (б–г).

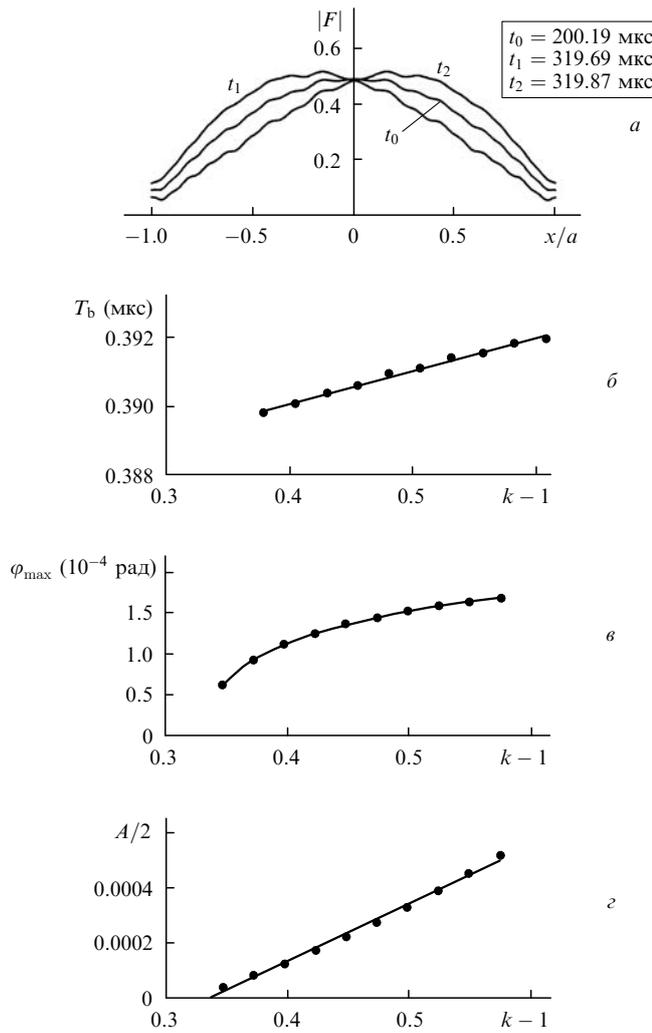


Рис.6. Режим установившихся биений – распределения модуля комплексной амплитуды излучения, падающего на выходное зеркало, в моменты максимальных отклонений (t_1 , t_2) и при одномодовой генерации (t_0) (а) и зависимости периода биений, амплитуды колебаний угловой направленности излучения и амплитуды колебаний средней интенсивности излучения, падающего на выходное зеркало, от превышения накачки над порогом k (б–г).

нение логической схемы (см. рис.1) значительно улучшает распознавание (рис.5,з). Значения $y_{\text{sum}} = 0$ соответствуют сдвигу фаз между фундаментальной и первой модами, равному $\pm \pi/2$.

Распределения $|F|(x/a)$ для двух моментов, различающихся примерно на половину периода биений, а также для установившейся одномодовой генерации показаны на рис.6,а. На рис.6,б–г представлены зависимости периода биений, амплитуды колебаний угловой направленности излучения и амплитуды колебаний средней по апертуре интенсивности волны на выходном зеркале от превышения накачки над порогом k . Все эти параметры растут с увеличением k . В данном случае период биений для пустого резонатора составляет 0.3884 мкс, что удовлетворительно согласуется с его значениями при двухмодовой генерации (рис.6,б). Угловые осцилляции пучка в дальней зоне согласуются с полученными в работе [15]. Можно отметить некоторую нелинейность в поведении амплитуды осцилляций пучка в дальней зоне (рис.6,в) по сравнению с зависимостью амплитуды колебаний средней по апертуре интенсивности \bar{I} волны (рис.6,г). Увеличение

мощности накачки улучшало условия распознавания входных распределений и приводило к уменьшению промежуточных значений выходов НС ($y_{1-4} \sim 0.5$). Соответствующие рисунки аналогичны рис.4,б–г и 5,б–г.

5. Нейронная сеть с медленным откликом

Пироэлектрические приемники ИК излучения на основе триглицинсульфата имеют время срабатывания 0.1–0.01 мкс при интервале между отсчетами 55.6 мкс [22]. Для определенности время срабатывания датчика было выбрано равным 0.1 мкс, что сопоставимо с периодом биений 0.39 мкс. Работа НС с такими характеристиками исследовалась в течение 3200 мкс (рис.7), на протяжении 0.1 мкс выходные сигналы $y_1 - y_{\text{sum}}$ интегрировались. Из рис.7,а видно, что НС хорошо распознает прекращение одномодовой генерации, однако двухмодовая генерация распознается НС с некоторыми пропусками (рис.7,б,в). Их появление связано с попаданием момента отсчета либо на сравнительно симметричное рас-

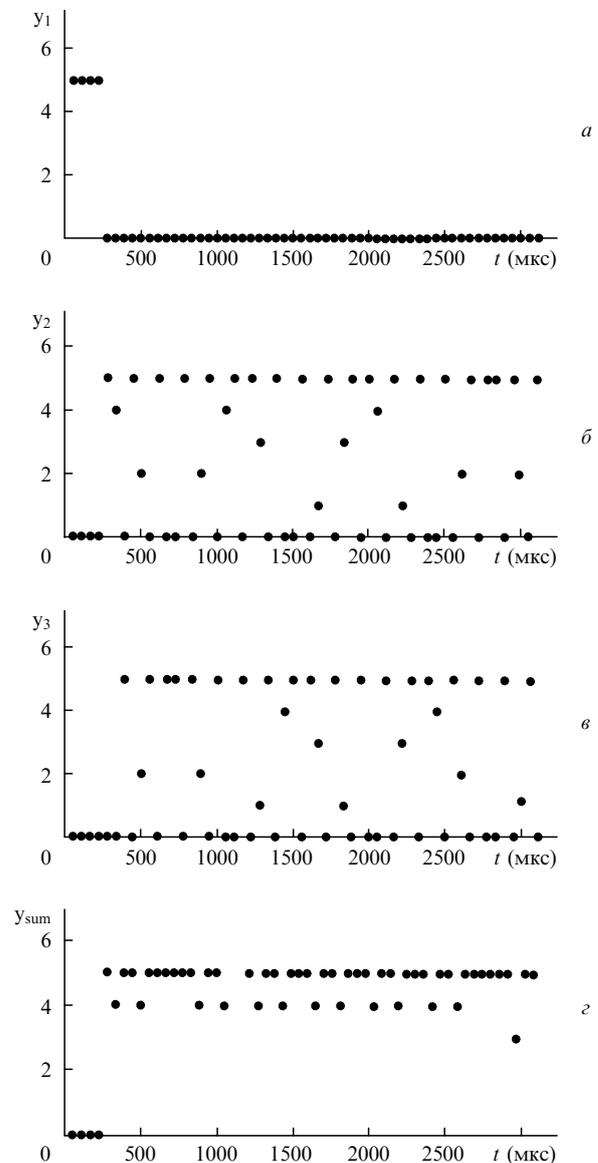


Рис.7. Моделирование работы нейронной сети при времени отклика, определяемом пироэлектрическим приемником лазерного излучения.

пределение, либо на распределение с другим соотношением фаз мод. В этом случае улучшить качество распознавания можно за счет объединения сигналов y_2 и y_3 . Суммарный сигнал показан на рис. 7, з. Видно, что пропуски при $y_{\text{sum}} = 5$ скомпенсированы меньшими значениями y_{sum} , что говорит о хорошем качестве распознавания.

Основным преимуществом представленной выше НС является малое число арифметических операций процессора, необходимых для получения значений $y_1 - y_4$ по входным сигналам (т. е. малое время распознавания τ_{rcg}). Для оценки τ_{rcg} была реализована процедура многократного распознавания входных распределений без обхода резонатора излучением и расчета коэффициента усиления. Число актов распознавания составляло 320000, время определялось по системным часам. Для процессора Celeron с тактовой частотой 500 МГц $\tau_{\text{rcg}} = 34.8$ мкс, что меньше интервала между отсчетами, равного 55.6 мкс.

6. Заключение

К основным результатам работы можно отнести демонстрацию возможности обучения нейронной сети на наборах распределений, полученных расчетным путем, и уверенное распознавание начала двухмодовой генерации. На взгляд автора, предложенный подход к контролю модового состава приемлем с практической точки зрения и позволяет глубже использовать теоретические наработки. Он имеет хорошие возможности для развития, что обусловлено использованием более совершенных нейронных сетей и лучшей обработкой их выходных сигналов с целью контроля более сложной динамики генерации.

Автор хотел бы поблагодарить Н.Н.Елкина за обсуждения схем расчета нестационарной генерации и В.Н.Глебова за полезные обсуждения методов детектирования ИК излучения.

1. Ханин Я.И. *Основы динамики лазеров* (М.: Наука, 1999).
2. Сучков А.Ф. *Труды ФИАН*, **43**, 161 (1968).
3. Беленов Э.М., Морозов В.Н., Ораевский А.Н. *Труды ФИАН*, **52**, 238 (1970).
4. Staliunas K., Tarroja M.F.H., Weiss C.O. *Opt. Commun.*, **102**, 69 (1993).
5. Brambilla M., Cattaneo M., Lugiato L.A., et al. *Phys. Rev. A*, **49**, 1427 (1994).
6. Prati F., Zucchetti L., Molteni G. *Phys. Rev. A*, **51**, 4093 (1995).
7. Владимиров А.Г., Скрыбин Д.В. *Квантовая электроника*, **24**, 913 (1997).
8. Bowers M.S., Moody S.E. *Appl. Opt.*, **29**, 3905 (1990).
9. Елкин Н.Н., Напартович А.П. *Прикладная оптика лазеров* (М.: ЦНИИатоминформ, 1989).
10. Murphy W.D., Bernabe M.L. *Appl. Opt.*, **17**, 2358 (1978).
11. Latham W.P. Jr, Dente M.L. *Appl. Opt.*, **19**, 1618 (1980).
12. Елкин Н.Н. *Математическое моделирование*, **2** (5), 104 (1990).
13. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. *Матричные вычисления* (М.: Мир, 1999).
14. Elkin N.N. *Lecture Notes in Computational Science*, **2542**, 430 (2003).
15. Елкин Н.Н. *Математическое моделирование*, **10** (4), 91 (1998).
16. Елкин Н.Н., Напартович А.П. *Квантовая электроника*, **30**, 1065 (2000).
17. Нестеров А.В., Низьев В.Г. *Изв. АН. Сер. физич.*, **63**, 2039 (1999).
18. Huyet G., Martinoni M.C., Tredicce J.R., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 4027 (1995).
19. Уоссермен Ф. *Нейрокомпьютерная техника* (М.: Мир, 1992).
20. Корнеев В.В., Гареев А.Ф., Васюнин С.В. и др. *Базы данных, интеллектуальная обработка информации* (М.: Изд-во С.В.Молгачева, 2001).
21. Звелто О. *Принципы лазеров* (М.: Мир, 1990).
22. Ишанин Г.Г. *Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов* (Л.: Машиностроение, 1986).