

О передаче информации в двухуровневых схемах оптически связанных хаотических лазеров

В.И.Леденев

Предложены двухуровневые схемы передачи информации, в которых верхний уровень состоит из сфазированных хаотических лазеров, синхронно возмущающих динамику генерации передатчика и приемника, находящихся на нижнем уровне и составляющих линию связи. Для четырех схем (с инжекцией излучения с управляющего уровня на управляемый уровень, со взаимной инжекцией излучения между двумя уровнями и со случайным синхронным возмущением периодов модуляции накачки лазеров на управляемом уровне в каждой из предыдущих схем) численно исследованы ошибки восстановления сигнала в зависимости от коэффициента связи между уровнями. Показано, что ошибки восстановления минимальны только на управляемых приемниках и восстановленные на них функции кода близки к заданной функции.

Ключевые слова: динамический хаос, передача информации, инжекция внешнего сигнала.

В последнее десятилетие активно развиваются линии связи на основе сфазированных режимов генерации оптически связанных хаотических лазеров [1–5]. Идея линии связи, кодирующей один бит информации в отдельный импульс хаотического носителя, впервые была предложена в работе [1]. Такая линия позволяет достичь максимальной скорости передачи данных при последовательном доступе к ним. Другая схема кодирования хаотического носителя, в которой функция кодирования не привязана к случайно следующим импульсам, предложена в [2]. Эта схема более пригодна для параллельного доступа к данным. Линии связи [1, 2] имеют малую пропускную способность (~ 1 Мб/с), что связано с используемыми в них лазерами – Nd:YAG-лазерами в [1] и CO₂-лазерами в [2]. Поскольку линия связи на основе CO₂-лазеров [2] может найти применение, особенно при развитии коммуникаций в свободном пространстве, вопрос об увеличении ее пропускной способности не утратил актуальности. Высокую пропускную способность линий связи (~ 10 Гб/с) могут обеспечить полупроводниковые лазеры [3–5].

Считается, что линии связи [1–5] имеют эксплуатационные достоинства и позволяют увеличить безопасность передачи сообщений [4–6]. Следует, однако, отметить, что защита линии связи [1–5] может быть нарушена, если параметры передатчика оказались известными. Желательно иметь такую защиту, которая успешно функционировала бы при известных параметрах излучателя. В настоящей работе рассматривается одна из возможностей усиления защиты информации в линии и увеличения пропускной способности последней, связанная с усложнением схемы канала и переходом к нестационарной накачке.

Рассмотрим двухуровневый канал связи (рис.1), состоящий из верхнего управляющего (лазеры T' и R') и нижнего управляемого (лазеры T и R) уровней. Будем считать, что генерация излучения в приемнике R' синхронизируется излучением передатчика T', а генерация излучения в приемнике R – излучением передатчика T. В общем случае периоды накачки лазеров T' и R' могут не совпадать с периодами накачки лазеров T и R, что приводит к различному временному поведению их полей.

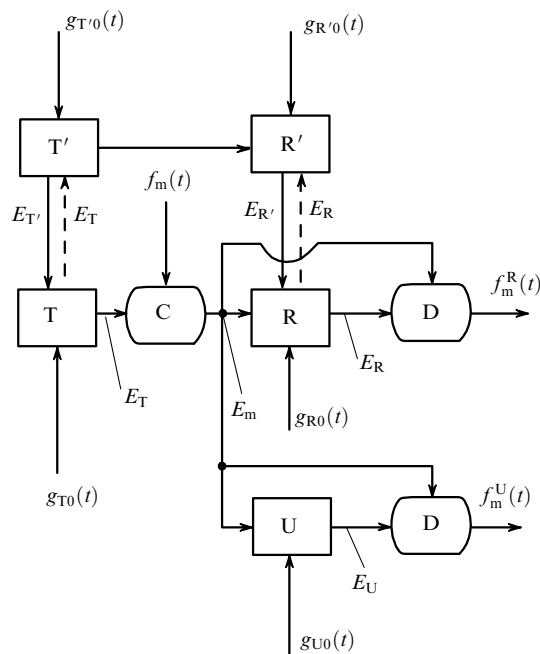


Рис.1. Двухуровневые схемы оптически связанных лазеров: T', T – передатчики; R', R – приемники; C – кодер; D – декодер; E_L , $g_{L0}(t)$ – поля лазеров и скорости накачки соответственно ($L = T', T, R', R, U$); T', R' – управляющий уровень; T, R – управляемый уровень; U – независимый приемник; E_m – инжектируемый сигнал; $f_m(t)$ – функция кодирования; $f_m^{R,U}(t)$ – восстановленные по формуле (11) функции кодирования.

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

Поступила в редакцию 8 января 2004 г., после доработки – 13 мая 2004 г.

Если излучение лазеров T' и R' инжектируется соответственно в лазеры T и R , то временное поведение их полей оказывается возмущенным. Будем считать также, что периоды накачки лазеров T и R могут быть синхронно возмущены одной и той же случайной функцией. Кроме того, будем считать, что на нижнем уровне имеется дубликат приемника U , к которому поступает сигнал с передатчика T , но не поступает управление с верхнего уровня, т. е. от приемника R , и накачка которого не возмущается. Можно предположить, что в такой двухуровневой схеме функция кодирования восстанавливается на приемнике R и не восстанавливается на дубликате приемника U . Если это предположение выполняется, то двухуровневая схема передачи информации имеет более сильную защиту, т. к. для доступа в нее нужно восстанавливать параметры двух лазеров и функцию возмущения периода накачки (если он возмущался). Отметим также, что увеличение числа линий связи на управляемом уровне может увеличить пропускную способность канала, не снижая защиты информации.

В работе рассматривались четыре двухуровневых схемы: схема 1 с инжекцией излучения только с управляющего уровня на управляемый (E_T, E_R не инжектируются в T', R') и без возмущения периода накачки; схема 2 с инжекцией излучения только с управляющего уровня на управляемый (E_T, E_R не инжектируются в T', R') и с возмущением периода накачки; схема 3 со взаимной инжекцией излучения между управляющим и управляемым уровнями (E_T, E_R инжектируются в T', R') и без возмущения периода накачки и схема 4 со взаимной инжекцией излучения между управляющим и управляемым уровнями (E_T, E_R инжектируются в T', R') и с возмущением периода накачки.

В проведенных расчетах считалось, что канал связи создается на основе CO_2 -лазеров. Поведение отдельного генератора описывалось в приближении заданной накачки и одного эффективного времени релаксации [2]. Кроме того, был избран способ кодирования [2]. В соответствии с этим уравнения, определяющие временное поведение лазеров, имели следующий вид:

$$\tau \frac{dg_{L1}(t)}{dt} = g_{L0}(t) - g_{L1}(t)(1 + |E_L|^2), \tag{1}$$

$$g_{L0}(t) = A_L \left[1 + \sin \frac{2\pi t}{T_L(t)} \right], \tag{2}$$

$$\frac{dE_L}{dt} = \frac{1}{2}(g_{L1} - g_{thL}) + Z_L, \tag{3}$$

$$Z_{T'} = M(E_T - E_{T'}) + M_{TR}(E_{R'} - E_{T'}), \tag{4}$$

$$Z_{R'} = M(E_R - E_{R'}) + M_{TR}(E_{T'} - E_{R'}), \tag{5}$$

$$Z_T = M(E_{T'} - E_T), \tag{6}$$

$$Z_R = M(E_{R'} - E_R) + M_{TR}(E_m - E_R), \tag{7}$$

$$Z_U = M_{TR}(E_m - E_U), \tag{8}$$

$$E_m = [1 + f_m(t)]E_T, \tag{9}$$

$$f_m(t) = 2A_c \theta \left[\text{sign} \left(\sin \frac{2\pi t}{T_c} \right) \right] - 1. \tag{10}$$

Здесь E_L – комплексные амплитуды полей; $g_{L1}(t)$ – коэффициенты усиления излучения; $g_{L0}(t)$ – скорости накачки; A_L – амплитуды модуляции накачки лазеров ($L = T', R', T, R, U$); Z_L – функция, описывающая воздействие на генерацию излучения, инжектированного в лазер L . В расчетах отношение периодов модуляции накачки лазеров T', R' к периодам модуляции накачки лазеров T, R таково: $T_{T,R,U}/T_{T',R'} = 0.75, 1.0$ и 1.25 . Пороги генерации всех лазеров были одинаковыми. Коэффициенты связи M_{TR} между лазерами T' и R' и лазерами T и R одинаковыми и постоянными, а коэффициенты связи M между лазерами T и T' и лазерами R и R' менялись в диапазоне $0-0.05$. Для удобства сопоставления результатов в уравнениях (1)–(10) использована та же нормировка, что и в работе [2], т. е. усиление было нормировано умножением на удвоенную длину резонатора $2L$, амплитуды полей при интенсивности насыщения равнялись единице, время было нормировано на пролетное время резонатора $\tau_r = 2L/c$. Сигнал инжекции E_m модулировался по амплитудной схеме меандром с параметрами

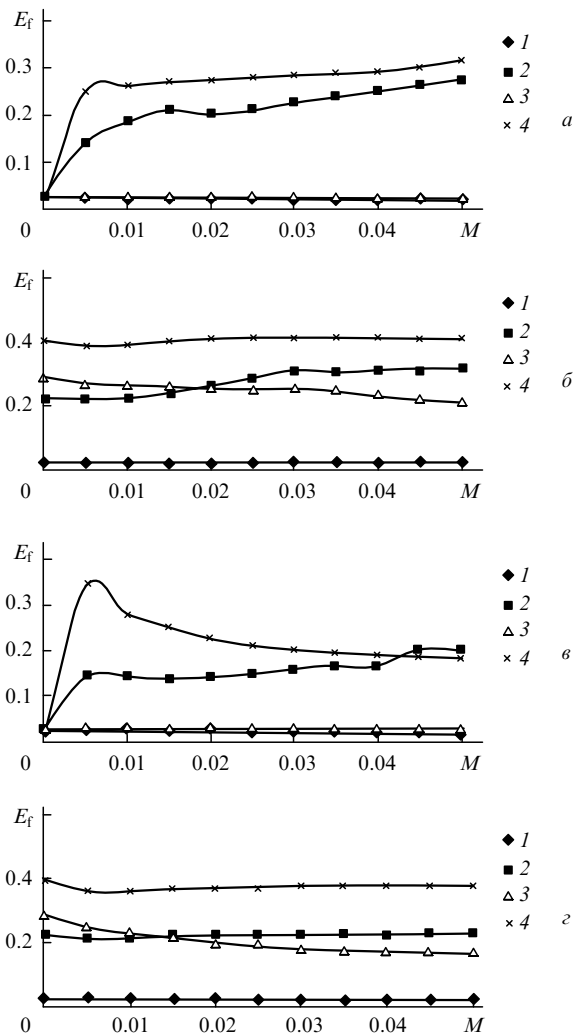


Рис.2. Зависимости ошибок восстановления E_f функции кодирования от коэффициента связи M между лазерами T' и T, R' и R (здесь и далее рисунки $a-z$ соответствуют рассматриваемым схемам 1-4); 1 – E_f для лазера R ($T_{T,R}/T_{T',R'} = 0.75$); 2-4 – E_f для лазера U ($T_{T,R,U}/T_{T',R'} = 0.75, 1.0, 1.25$).

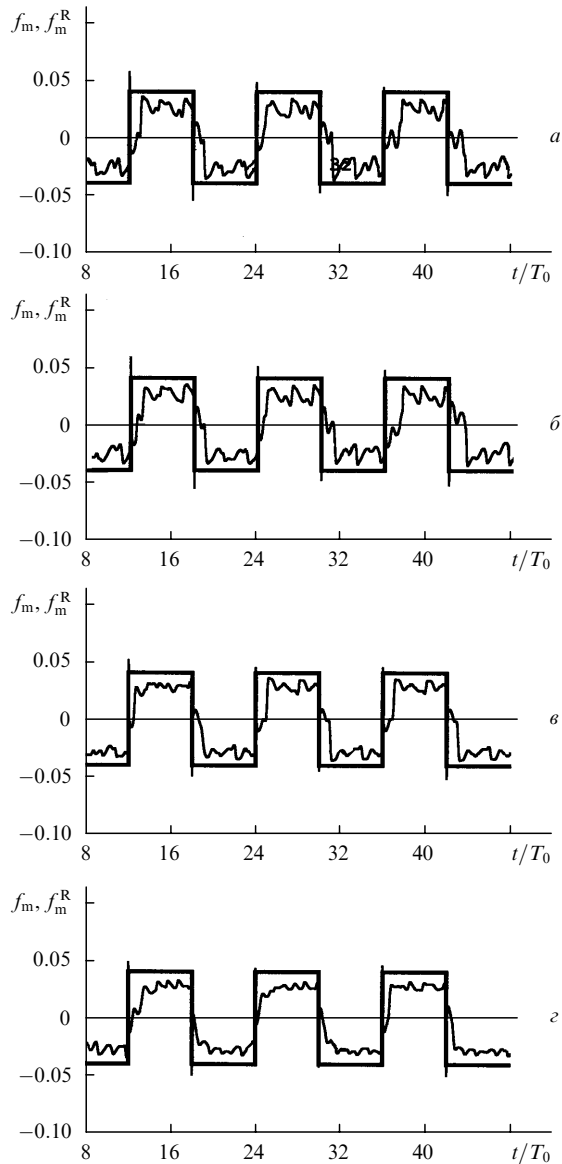


Рис.3. Временные зависимости меандра f_m и восстановленного по формуле (11) сигнала f_m^R на лазере R ($T_{T,R,U}/T_{T',R'} = 0.75$) при $M = 0.05$; T_0 – невозмущенный период накачки.

$A_c = 0.04$ и $T_c/T_T = 16$; $f_m(t)$ – функция кодирования; $\theta(x)$ – функция Хевисайда. В соответствии с рис. 1 для восстановления функции кодирования лазерами R или U использовались значения полей, имеющих на приемных концах линий связи:

$$f_m^{R,U}(t) = (|E_m| - |E_{R,U}|)/|E_{R,U}|, \quad |E_{R,U}| \neq 0. \quad (11)$$

Ошибка E_f функции кодирования f_m определялась как

$$E_f = \left\{ \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_1} [f_m^{R,U}(t) - f_T(t)]^2 dt \right\}^{1/2}, \quad (12)$$

где $\Delta t = t_1 - t_0$; t_0, t_1 – времена начала и конца исследования соответственно. В отсутствие модуляции излучения и возмущений в канале связи параметр E_f является нормой отклонения поля лазера R или U от поля лазера T (отклонение связано с различием накачек лазеров R или U и T или с инжекцией излучения в лазеры T и R из лазеров T' и R'). Если накачки лазеров одинаково зависят

от времени и инжектированное излучение модулировано, критерий (12) дает ошибку восстановления функции кодирования.

Временные зависимости периодов $T_{T,R}(t)$ накачки лазеров T и R для схем 2 и 4 определялись по формулам

$$T_{T,R}(t) = T_{T,R} + \sigma_{T_{T,R}} T_{ran}(t). \quad (13)$$

Здесь $T_{T,R}$ – невозмущенный период накачки; $\sigma_{T_{T,R}}$ – соответствующее среднее квадратичное отклонение. В качестве функции T_{ran} выбиралась случайная последовательность с гауссовой функцией корреляции между элементами и временем корреляции, составленным $\frac{1}{3}$ среднего интервала между импульсами, генерируемыми при данной амплитуде накачки лазером T (время корреляции случайной последовательности оказывалось при этом примерно в два раза больше средней длительности импульса). Моделирование последовательностей осуществлялось с помощью алгоритма скользящего суммирования [7] при $\sigma_{T_{T,R}}/T_{T',R'} = 0.25$. Система уравнений (1) – (10) решалась методом Рунге – Кутты четвертого порядка точности с малым постоянным шагом интегрирова-

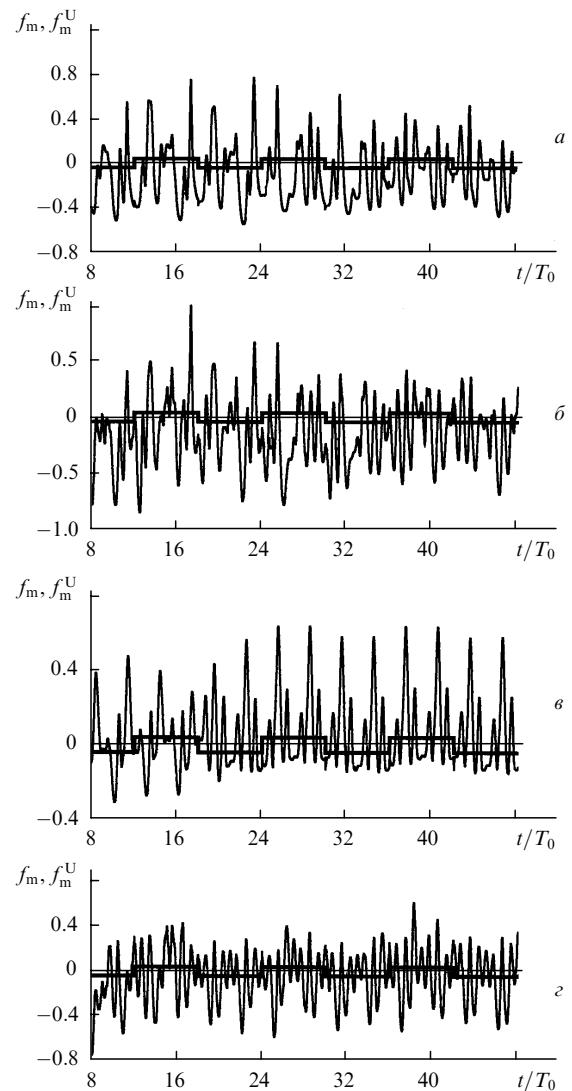


Рис.4. Временные зависимости меандра f_m и восстановленного по формуле (11) сигнала f_m^U на лазере U ($T_{T,R,U}/T_{T',R'} = 0.75$) при $M = 0.05$.

ния по времени для удобства введения в расчеты дискретной последовательности $T_{\text{ган}}(t)$.

Зависимости ошибок восстановления функции кодирования E_f от коэффициента связи M для лазеров R и U показаны на рис.2 для четырех исследованных схем и трех периодов модуляции накачки. Рассмотрим вначале схемы 1 и 3. Если периоды накачки лазеров T, R и U равны периодам накачки лазеров T', R', сигнал успешно декодируется при любом коэффициенте M (совпадающие линии 1 и 3 на рис.2,а и в). Отклонения $T_{T,R,U}$ от $T_{T',R'}$ приводят к рассогласованию временного поведения полей лазеров T, R и U и T', R'. В результате возникает синхронное возмущение полей лазеров T и R, которое, однако, не мешает декодированию сигнала лазером R (рис.3,а и в) при любом значении M . Независимый приемник U не испытывает тех же воздействий, что и приемник R, сигнал на нем не декодируется (рис.4,а и в) и ошибки декодирования при $M > 0.01$ велики (кривые 2 и 4 на рис.2,а и в). При $M = 0$ возмущающий сигнал не поступает на управляемый уровень, поэтому все зависимости на рис.2,а и в сходятся в одной точке.

Возмущения периодов модуляции лазеров T, R приводят к рассогласованию поведения полей лазеров T, R и T', R', U даже при совпадении средних значений периодов $T_{T,R}(t)$ и $T_{T',R',U}$. Поэтому в данном случае кривые 3 и 1 на рис.2,б и г не совпадают. Кроме того, поскольку возмущаются накачки лазеров T и R, образующих канал связи, и не возмущается накачка лазера U, ошибки декодирования на этом лазере возникают и при $M = 0$. Таким образом, в данном случае при любом значении M

успешно восстанавливает функцию кода лазер R, находящийся под действием двух возмущений (рис.3,б и г), а не лазер U (рис.4,б и г).

Проведенные исследования показали, что двухуровневые схемы сохраняют синхронизацию лазеров на передающем и приемном концах линии связи в широком диапазоне значений коэффициентов связи между уровнями и обеспечивают декодирование сигнала. Независимый приемник, не получающий управляющих воздействий, декодирования не обеспечивает. Коэффициент связи между уровнями $M \sim 0.01$ вполне достаточен, чтобы подавить восстановление функции кодирования независимым приемником. Выдвигаемые при передаче информации требования состоят как в увеличении пропускной способности канала, так и в усилении его защиты. Этим требованиям легче удовлетворить на основе многоуровневых схем, в которых защита всей системы определяется защитой уровня управления (например, с помощью квантовой линии связи), а пропускная способность – большим числом линий на управляемом уровне.

1. Colet P., Roy R. *Opt. Lett.*, **19**, 2056 (1994).
2. Напартович А.П., Сухарев А.Г. *Квантовая электроника*, **25**, 85 (1998).
3. Tang S., Chen H. *Opt. Lett.*, **26**, 1843 (2001).
4. Liu J., Chen H., Tang S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, 1155 (2002).
5. Heil T., Mulet J., Fischer I., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, 1162 (2002).
6. Donati S., Mirasso C.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, 1138 (2002).
7. Быков В.В. *Цифровое моделирование в статистической радиотехнике* (М.: Сов. радио, 1971).