

УДК 535.2+535.37

## АССОЦИАТИВНАЯ ВЫБОРКА ИНФОРМАЦИИ В ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО ЭХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДОВ ФРЭНКА

*Д.Д. Власова, А.А. Калачев, В.В. Самарцев*

### Аннотация

Показано, что в режиме долгоживущего фотонного эха с кодовым разделением каналов с использованием кодов Фрэнка можно осуществлять эффективную ассоциативную выборку информации. Исследовано влияние ошибок в кодах, а также влияние скорости смены фазы подимпульсов на воспроизведение сигнала.

### Введение

Современное развитие информационных технологий неразрывно связано с переходом от электронных к полностью оптическим методам обработки информации. В связи с этим ведутся интенсивные разработки систем оптической связи с высокими временной (порядка Тбайт/с) и частотной плотностями передаваемых данных, а также оптических запоминающих устройств, имеющих плотность записи информации порядка Гбайт/см<sup>2</sup> и время считывания порядка Гбайт/с. Поэтому возникает потребность в разработке многоканальных оптических процессоров, способных осуществлять параллельную обработку больших объемов данных, а также многоканальных систем оптической памяти. Хорошо известно, что оптические эхо-процессоры и оптические запоминающие устройства, основанные на таком перспективном явлении, как фотонное эхо, обладают большими возможностями записи, хранения и считывания информации [1, 2]. Основным недостатком этих устройств является необходимость работы при низких, как правило, гелиевых температурах. Однако проведенный недавно эксперимент по наблюдению фемтосекундного стимулированного фотонного эха в примесной полимерной пленке при комнатной температуре [3] позволяет утверждать, что данное явление по-прежнему является перспективным с точки зрения разработки эхо-процессоров и оптических запоминающих устройств.

Для построения многоканальных систем оптической обработки информации можно использовать различные способы разделения каналов. Интерес к системам связи, использующим кодовое разделение каналов, обусловлен рядом преимуществ, которыми обладают такие системы [4]: эффективным использованием частотного диапазона, высокой помехоустойчивостью, скрытностью передачи информации и др. Кодовое разделение каналов состоит в том, что каждому абоненту выделяется свой алфавит шумоподобных сигналов (или кодовых последовательностей), с помощью которого он передает информацию. Разделение каналов возможно потому, что сигналы различных абонентов существенно отличаются по форме. Это и позволяет организовать одновременную работу многих абонентов в общей полосе частот.

Следует отметить, что возможности использования шумоподобных сигналов для записи и считывания информации в режиме фотонного эха анализировались

в работах [5–8]. В них же была высказана идея осуществления многоканальной записи и считывания информации в режиме фотонного эха с помощью разных шумоподобных сигналов, что было реализовано и проанализировано в работе [9]. В данной работе исследуется возможность ассоциативной выборки информации в режиме долгоживущего фотонного эха с кодовым разделением каналов с использованием кодов Фрэнка, а также влияние ошибок в кодах и скорости смены фазы в подимпульсах на воспроизведение сигнала.

### 1. Ассоциативная выборка информации в режиме фотонного эха

Долгоживущее фотонное эхо (ДФЭ) представляет собой оптический когерентный отклик резонансной среды на воздействие трех возбуждающих лазерных импульсов в условиях, когда временной интервал между вторым (объектным) и третьим (считывающим) импульсами превышает время жизни возбужденного оптического уровня. При условиях, что временной интервал между первым и вторым импульсами короче времени необратимой фазовой релаксации в среде, «площади» возбуждающих импульсов малы, а неоднородная ширина оптического перехода существенно больше спектральной ширины возбуждающих импульсов, можно показать [2], что временная форма сигнала ДФЭ определяется следующим выражением

$$E_{\text{ДФЭ}} \sim \iint E_1^*(x) E_3(y+x) E_2(t-y) dx dy,$$

где  $E_n(t)$  – огибающая сигнала  $n$ -го возбуждающего импульса. Таким образом, огибающая сигнала ДФЭ представляет собой свертку огибающей второго импульса с функцией корреляции первого (референтного) и третьего (считывающего) импульсов. Поэтому временная форма сигнала ДФЭ будет воспроизводить временную форму объектного импульса при условии, что функция корреляции является дельтаобразной.

Установлено, что в качестве референтного и считывающего импульсов удобнее всего использовать продолжительные импульсы, модулированные по фазе или амплитуде таким образом, что их автокорреляционная функция является дельтаобразной.

Наиболее простым вариантом являются импульсы со случайной бифазовой модуляцией. Предположим, что референтный и считывающий импульсы имеют прямоугольную временную форму и характеризуются амплитудой  $E$  и длительностью  $T$ , а в течение каждого импульса фаза поля переключается случайным образом между значениями  $0$  и  $\pi$  через промежутки времени  $T_b = T/N$ . Тогда, если псевдослучайные последовательности референтного и считывающего импульсов совпадают, то их корреляционная функция является дельтаобразной, следовательно, сигнал ДФЭ будет воспроизводить форму объектного импульса, а если же не совпадают, то дельтаобразность функции корреляции пропадает, и сигнал ДФЭ полностью теряет информацию об объектном импульсе. Корреляционный пик шириной  $T_b$  имеет высоту в  $\sqrt{N}$  раз больше, чем среднеквадратичное отклонение случайного фона шириной  $2T$ .

Другим вариантом является многофазовая последовательность (сигнал) Фрэнка [10, 11]. Она состоит из  $N = M^2$  элементарных импульсов длительностью  $T_b$ , начальные фазы которых задаются в виде

$$\varphi_{jn} = 2\pi \frac{p}{M} jn,$$

где  $p$  – число, взаимно простое с  $M$  (далее будем полагать, что  $p = 1$ ),  $j, n = 0, 1, \dots, M-1$ , а номер элементарного импульса  $m = 1, \dots, N$  связан с индексами

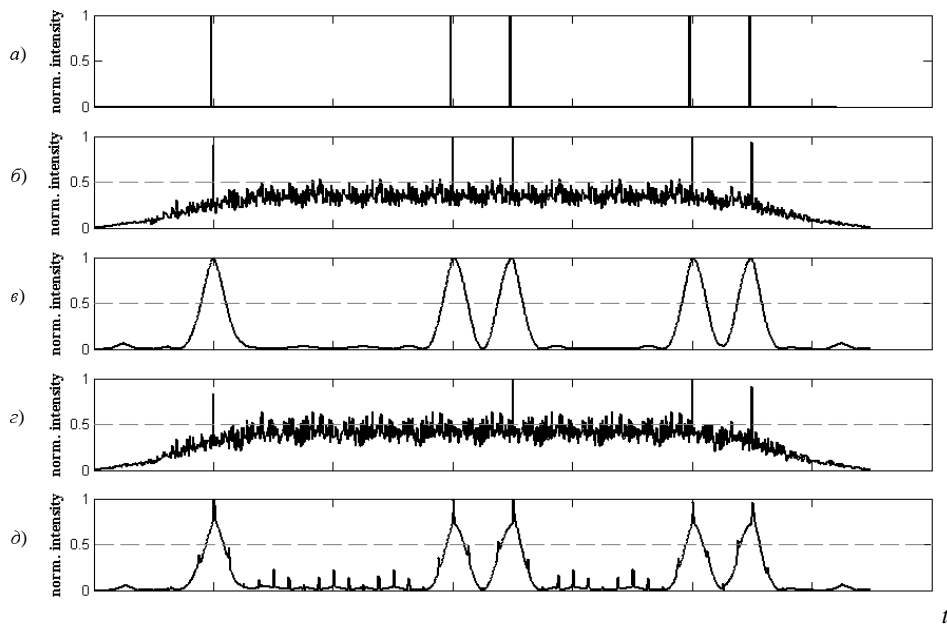


Рис. 1. Временная форма объектного импульса в канале, в котором производится считывание (а) и временная форма отклика ДФЭ для двух случаев: когда в качестве системы шумоподобных сигналов используются случайно бифазово модулированные сигналы (б, в) и сегменты последовательности Фрэнка (в, д); б и в соответствуют точному совпадению референтного и считывающего импульсов, г и д соответствуют наличию 15% ошибочных битов в считывающем импульсе

$j$  и  $n$  соотношением  $m = jM + n + 1$ . Другими словами, если представить начальные фазы  $\varphi_{jn}$  в виде матрицы, то последовательность элементарных импульсов в сигнале Фрэнка будет соответствовать построчному перечислению элементов этой матрицы. Численные расчеты показывают, что пик автокорреляционной функции сигнала Фрэнка в  $2N^{3/4}$  раз больше, чем среднеквадратичное отклонение случайного фона.

В работе [9] для организации многоканальной обработки информации в режиме ДФЭ было предложено использовать сегменты многофазовой последовательности Фрэнка в качестве простейшей системы шумоподобных сигналов, позволяющей осуществлять запись и считывание информации с кодовым разделением каналов. Если  $M$  является кратным некоторого целого числа  $q$ , то последовательность Фрэнка можно разбить на  $q$  подпоследовательностей (сегментов), каждая из которых содержит  $N/q$  элементарных импульсов и описывается  $M/q$  строками матрицы  $\varphi_{jn}$  и может рассматриваться как базовый фазоманипулированный сигнал для отдельного канала. В этом случае среднеквадратичное отклонение случайного фона возрастает, но остается меньшим среднеквадратичного отклонения фона случайной бифазовой последовательности той же длительности, а в силу ортогональности различных сегментов многофазовой последовательности Фрэнка взаимное влияние каналов получается намного меньшим, чем в случае использования бифазовых случайных последовательностей.

Предположим теперь, что с помощью данной системы фазоманипулированных сигналов осуществляется  $q$ -канальная запись и воспроизведение информации в режиме ДФЭ. В этом случае при записи информации на резонансную среду возмущает  $q$  пар возбуждающих импульсов. В каждой паре референтный импульс

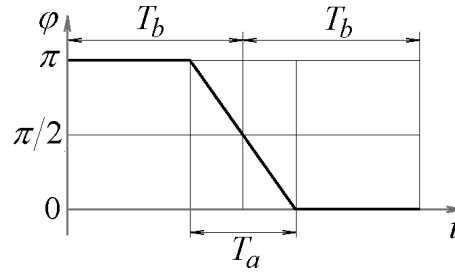


Рис. 2. Переключение фазы между двумя подимпульсами с разными фазами

является одним из  $q$  базовых фазоманипулированных сигналов, а объектный импульс имеет свою временную форму, содержащую определенную информацию. Для считывания информации, содержащейся в  $n$ -м канале, необходимо подать считывающий импульс, совпадающий с  $n$ -м референтным импульсом. При этом интенсивность сигнала ДФЭ определяется следующим выражением

$$I_{ДФЭ}(n) \sim \sum_{m=1}^q \left( \iint E_{1m}^*(x) E_{3n}(y+x) E_{2m}(t-y) dx dy \right)^2, \quad n = 1, \dots, q, \quad (1)$$

поскольку, как правило, отклики ДФЭ от разных пар записывающих возбуждающих импульсов складываются некогерентно. Таким образом, при считывании информации, записанной в определенном канале, возникает шум, обусловленный влиянием других каналов и связанный с тем, что взаимная корреляционная функция различных базовых сигналов не равна нулю.

На рис. 1 приведены результаты численного расчета временной формы сигнала ДФЭ по формуле (1) для двух случаев: когда в качестве системы шумоподобных сигналов используются случайно бифазово модулированные сигналы (рис. 1, б) и сегменты последовательности Фрэнка (рис. 1, в).

В обоих случаях число каналов было равно 50. В одном канале, где производится считывание информации, объектный импульс представлял собой последовательность элементарных импульсов вида  $\{1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1\}$  (рис. 1, а), а в оставшихся каналах имел вид  $\{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$ , то есть эти каналы создавали максимально возможный шум. Исходная последовательность Фрэнка задавалась параметром  $M = 100$ , поэтому шумоподобные референтные и считывающие импульсы в каждом канале содержали 200 элементарных импульсов. Видно, что использование системы многофазовых сигналов вместо системы бифазовых случайных сигналов обеспечивает значительно меньший уровень шума при считывании информации. Сигналом будем считать все то, что имеет интенсивность больше  $1/2$  максимального пика в отклике ДФЭ. Тогда при использовании случайной бифазовой модуляции в 50-канальном режиме записи и считывании информации корректного выделения  $n$ -го объектного импульса из отклика ДФЭ уже не происходит (рис. 1, б), то есть интенсивность шума превышает половину интенсивности максимального выброса в отклике. При использовании сегментов последовательности Фрэнка в качестве системы шумоподобных сигналов уровень шума значительно ниже половины интенсивности максимального пика в отклике ДФЭ, и  $n$ -й объектный импульс восстанавливается верно (рис. 1, в).

Если при считывании в коде считывающего импульса происходят фазовые ошибки, то качество воспроизведения ухудшается. Как было показано выше, использование случайной бифазовой модуляции не позволяет корректно выделить  $n$ -й объектный импульс в отклике ДФЭ даже в случае безошибочного совпадения

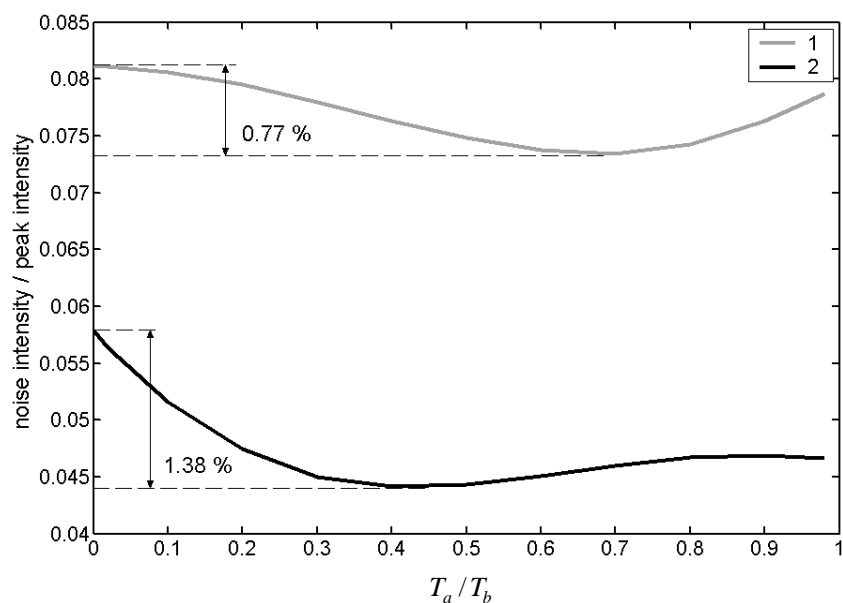


Рис. 3. Зависимость величины среднеквадратичного отклонения случайного фона от отношения длительности подимпульса  $T_b$  к времени смены фазы  $T_a$ . Кривая 1 – для случайно бифазово модулированной последовательности ( $N = 100$ ), кривая 2 – для сигнала Фрэнка ( $N = 100$ )

референтного и считывающего импульсов. При использовании сегментов последовательности Фрэнка ошибку в считывающем импульсе можно увеличивать до 15% (рис. 1, *д*). В этом случае все еще возможно корректно выделить  $n$ -й объектный импульс из отклика ДФЭ.

В действительности, смена фазы подимпульсов в сигнале происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени  $T_a$  (рис. 2). На рис. 3 показано, как меняется уровень среднеквадратичного отклонения при увеличении  $T_a$  от 0 до  $T_b$ . Видно, что величина среднеквадратичного отклонения не увеличивается при увеличении отношения  $T_a/T_b$  и изменяется не более чем на 1.3%.

### Заключение

В режиме ДФЭ можно осуществлять запись и считывание информации с кодовым разделением каналов, используя фазовую модуляцию референтного и считывающего импульсов. В качестве простейшей системы шумоподобных сигналов, позволяющей осуществлять такое разделение, в данной работе использованы сегменты многофазовой последовательности Фрэнка. Взаимное влияние каналов получается намного меньше, чем при использовании бифазовых случайных последовательностей в силу ортогональности сегментов многофазовой последовательности Фрэнка. Показано, что корректное восстановление сигнала в отклике ДФЭ происходит даже при внесении 15% ошибки в считывающий импульс и практически не зависит от скорости изменения фазы подимпульсов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 04-02-17082а, №05-02-16003, № 04-02-81009Бел2004, № 05-02-16169а), программ Президиума РАН «Квантовая макрофизика» и ОФН РАН «Оптическая спектроскопия и стандарты частоты», гранта КФТИ КазНЦ РАН для молодых ученых и аспирантов.

### Summary

*D.D. Vlasova, A.A. Kalachev, V.V. Samartsev.* Associative data sample in optical memory under photon echo regime with Frank code using.

It is shown that under long-lived photon echo regime with code division based on Frank sequence it is possible to realize effective associative data sample. Effects of mistakes in code and phase chirping speed to the pulses reconstruction is studied.

### Литература

1. *Манькин Э.А., Самарцев В.В.* Оптическая эхо-спектроскопия. – М.: Наука, 1984. – 270 с.
2. *Калачев А.А., Самарцев В.В.* Когерентные явления в оптике. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2003. – 281 с.
3. *Lobkov V.S., Salikhov K.M., Samartsev V.V., Safullin G.M., Zwikov V.A.* Femtosecond photon echo in dye-doped polymer films at the room temperature // *Laser Phys. Lett.* – 2006. – V. 3. – P. 26–30.
4. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
5. *Zhang J.M., Gauthier D.J., Huang J., Mossberg T.W.* Use of phase-noisy laser fields in the storage of optical pulse shapes in inhomogeneously broadened absorbers // *Opt. Lett.* – 1991. – V. 16. – P. 103–105.
6. *Bai Y.S., Kachru R.* Coherent time-domain data storage with a spread spectrum generated by random biphase shifting // *Opt. Lett.* – 1993. – V. 18. – P. 1189–1191.
7. *Shen X.A., Hartman R., Kachru R.* Impulse-equivalent time-domain optical memory // *Opt. Lett.* – 1996. – V. 21. – P. 833–835.
8. *Shen X.A., Kachru R.* Experimental demonstration of impulse-equivalent time-domain optical memory // *Opt. Lett.* – 1996. – V. 21. – P. 2020–2022.
9. *Власова Д.Д., Калачёв А.А., Самарцев В.В.* Кодовое разделение каналов в оптической памяти на основе фотонного эха // *Изв. РАН. Сер. Физическая.* – 2006. – Т. 70. – С. 521–524.
10. *Лезин Ю.С.* Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. – М.: Сов. Радио, 1969. – 448 с.
11. *Кук Ч., Бернфельд М.* Радиолокационные сигналы. Теория и применение. – М.: Сов. Радио, 1971. – 568 с.

Поступила в редакцию  
03.02.06

---

**Власова Дарья Дмитриевна** – стажер-исследователь Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КНЦ РАН.

**Калачев Алексей Алексеевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КНЦ РАН.

E-mail: [kalachev@kfti.knc.ru](mailto:kalachev@kfti.knc.ru)

**Самарцев Виталий Владимирович** – доктор физико-математических наук, академик РАЕН, профессор, заведующий лабораторией нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КНЦ РАН.

E-mail: [samartsev@kfti.knc.ru](mailto:samartsev@kfti.knc.ru)