

УДК 621.396.96:535.2

## ОТ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ЭХО-ПРОЦЕССОРОВ К ФОТОННЫМ

*д-р техн. наук, проф. Л.А. РАССВЕТАЛОВ**(Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, г. Новгород Великий, Россия)*

*Рассмотрена возможность выполнения интегральных преобразований одномерных и двумерных сигналов в фотонных эхо-процессорах. Обсуждены результаты использования долгоживущего фотонного эхо, которые пока недостижимы в цифровых технологиях.*

При обработке сигналов возникает проблема создания адаптивных, самонастраивающихся, интерпретирующих систем, систем распознавания зрительных и слуховых образов, решения управленческих задач в условиях неполной определенности параметров управляемых объектов, работающих в реальном масштабе времени. Как известно, потенциальные возможности перспективных цифровых технологий по обработке широкополосных сигналов и изображений не являются безграничными. Наибольшие проблемы при этом возникают при реализации интегральных преобразований типа свертки и преобразования Фурье, требующих большого количества операций умножения и сложения. Довольно широко распространено мнение, что распараллеливание операций и увеличение быстродействия элементов, составляющих большие интегральные схемы (БИС), могут решить эту проблему. Однако даже поверхностный анализ показывает, что это далеко не так [1].

Достаточно высокое быстродействие может быть получено в крупных мультипроцессорных сетях, в которых отдельный процессор может иметь относительно невысокое быстродействие. Однако для управления процессорами необходима своя система, уровень сложности которой выше возможностей современной микроэлектроники. Кроме того, из современной теории алгоритмов не следуют пути их глубокого распараллеливания, а новые параллельные алгоритмы находятся еще в стадии разработки. Связи между процессорами должны быть глобальными и исходя из требований адаптивности - перестраиваемыми, что обуславливает функциональную сложность системы, ее многомерность. Учитывая, что с ростом числа процессоров связи между ними возрастают нелинейно, в достаточно быстродействующей (а значит, большой) системе объем соединительных линий значительно превышает объем процессоров.

Таким образом, ограничения на параллельную структуру суперкомпьютера заключаются в неясности алгоритмов распараллеливания задач, сложности управления параллельными процессорами, невозможности эффективной перестраиваемости связей между ними. Поэтому решение проблемы быстродействия только за счет распараллеливания процессоров заходит в тупик.

Одним из путей существенного увеличения быстродействия систем обработки является выполнение интегральных преобразований специализированными аналоговыми процессорами, входящими составной частью в общую мультипроцессорную систему. В свою очередь, радикальным средством повышения быстродействия при вычислении интегральных преобразований является переход в частотное пространство. Частотно-временной дуализм, присущий нелинейным системам, позволяет организовать в частотном пространстве вычисление свертки с такой же связностью, как и умножение во временном пространстве.

Роль таких аналоговых устройств могут выполнять эхо-процессоры [2, 3]. В [4] показано, что нелинейные системы, состоящие из большого числа высокочастотных осцилляторов, образуют реальное частотное пространство. Роль осцилляторов могут выполнять микрочастицы (электроны или ядра атомов конденсированных сред), коллективные возбуждения среды (фотоны, магноны, фононы), молекулы, а также макроскопические частицы вещества.

Необходимым условием является наличие резонансного взаимодействия осциллятора с физическим (электромагнитным, акустическими и т.п.) полем сигнала и достаточно длительные собственные колебания осцилляторов, в течение которых происходят нелинейные взаимодействия между спектральными компонентами сигналов, возбуждающих данный осциллятор. При возбуждении подобной системы двумя сигналами  $X(t) + Y(t)$ , обладающими спектральными плотностями  $S_x(\omega)$  и  $S_y(\omega)$  соответственно, эти взаимодействия приводят к появлению перекрестных компонент вида  $S_x(\omega) \cdot S_y(\omega)$  и более высоких порядков.

Нелинейные эффекты при этом будут приводить не к смещению частот (в результате чего возникают колебания с комбинационными частотами), а к смещению времени, т.е. к возникновению сигналов (импульсов) в комбинационные моменты времени. Это ярко проявляется частотно-временного дуализма иллюстрирует рис. 1, а, б.

В соответствии с этим дуализмом в нелинейном частотном пространстве в ответ на многоимпульсное воздействие должны возникать отклики с новыми временными положениями аналогично возникновению новых частот в нелинейной цепи, если в последней действуют несколько эдс с различными частотами.

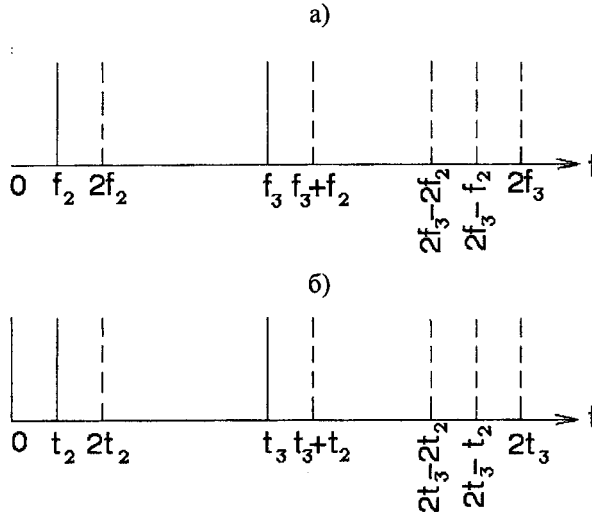


Рис. 1. Отклики нелинейных систем на многосигнальное воздействие:  
 а - нелинейной цепи на ряд гармонических воздействий;  
 б - нелинейной резонансной среды на воздействие в виде дельта-функций

Так же, как возникающие в нелинейной цепи комбинационные частоты жестко связаны с частотами воздействия, в нелинейном частотном пространстве временные положения откликов жестко связаны с временным положением воздействующих импульсов.

В дальнейшем среду, имитирующую реальное нелинейное частотное пространство, будем называть нелинейной резонансной средой (НРС).

Впервые подобные сигналы наблюдались Ханом [2] от протонов воды. Это явление было названо им спиновым эхо. Впоследствии явление эхо было обнаружено в самых различных средах - это электронное, фотонное (световое), плазменное, ферромагнитное, квадрупольное, поляризационное (пьезоэлектрическое или фононное) и т.п. эхо [2].

Отклик нелинейной резонансной среды, возникающий в момент времени  $t = 2t_1$  (см. рис. 1), называют зеркальным или двухимпульсным эхо, так как он обусловлен воздействием двух импульсов при  $t = 0$  и  $t = t_1$ , а в момент времени  $t = t_2 + t_1$  - стимулированным или трехимпульсным эхо. Устройства обработки, использующие эффект эхо, называются эхо-процессоры (ЭП). Наиболее часто употребляется трехимпульсный режим работы ЭП, при котором на его вход последовательно подают опорный  $S_{on}(t)$ , входной  $X(t)$  и считывающий  $S_{cv}(t)$  сигналы (рис. 2).

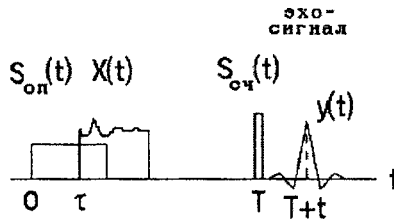


Рис. 2. Временная последовательность сигналов в ЭП

В НРС с нелинейностью третьего порядка («кубические среды») без учета релаксационных эффектов (эффектов затухания колебаний осцилляторов и их фазовой памяти) спектр отклика  $S_y(j\omega)$  будет содержать следующий член:

$$S_y(j\omega) = k_1 \cdot g(\omega) \cdot S_x(j\omega) \cdot |S_x(j\omega)|^2, \tag{1}$$

где  $k_1$  - постоянная, определяемая свойствами используемого вещества;  $g(\omega)$  - форма резонансной линии поглощения рабочего вещества;  $S_x(j\omega)$  - спектр входного воздействия.

Если в (1) в соответствии с рис. 2 подставить

$$S_x(j\omega) = S_{on}(j\omega) + S_{\alpha}(j\omega) \exp(-j\omega \tau) + S_{cv}(j\omega) \exp(-j\omega T) \tag{2}$$

и оставить лишь члены с временным множителем  $\exp[j\omega(T+\tau)]$ , то получим спектр трехимпульсного эхо-сигнала:

$$S_y(j\omega) = k_1 g(\omega) S_{on}^*(j\omega) S_{\alpha}(j\omega) S_{cv}(j\omega) \exp[-j\omega(T+\tau)], \tag{3}$$

где (\*) означает знак комплексного сопряжения.

Если считывающий сигнал является коротким (в идеале – дельта-функция) радиоимпульсом с равномерным в области существования  $g(\omega)$  амплитудным спектром

$$S_{сч}(j\omega) \exp[-j\omega(T+t)] = k_3 \exp[-j\omega(t+T)],$$

то

$$S_y(j\omega) = kg(\omega)S_{оп}^*(j\omega)S_{вх}(j\omega) \exp[-j\omega(T+\tau)], \quad (4)$$

где  $k = k_1 \cdot k_3 = const$ ; отклик является взаимокорреляционной функцией (ВКФ) опорного и входного сигналов.

Таким образом, импульсная характеристика ЭП определяется опорным сигналом, т.е. является программируемой. Время, в течение которого ЭП «помнит» импульсную характеристику, определяется длительностью релаксационных процессов в веществе.

Различают два вида релаксационных процессов: продольный и поперечный. Под продольной или энергетической релаксацией подразумевается процесс затухания колебаний возбужденного осциллятора после выключения вынуждающей силы. В спиновых средах, описываемых уравнениями Блоха [2], продольную релаксацию называют также спин-решеточной. В диа- и парамагнитных веществах релаксационные процессы имеют обычно экспоненциальный характер, и время продольной релаксации принято обозначать через  $T_1$ .

Поперечная релаксация характеризует потерю фазовой памяти в системе возбужденных осцилляторов и вызвана передачей энергии от возбужденного осциллятора к невозбужденному, имеющему близкую, но отличную от первого, собственную резонансную частоту. Благодаря такой передаче информация о возбуждающей группе осцилляторов спектральной компоненте сигнала (ее частоте и фазе) постепенно теряется, что и составляет сущность поперечного релаксационного механизма. Поперечная релаксация имеет, как и продольная, экспоненциальный характер и характеризуется временем  $T_2$ .

С точки зрения возможностей, для обработки сигналов величина  $T_2$  ограничивает максимальную задержку между опорным и входным сигналами, а  $T_1$  – максимальную задержку между входным и выходным сигналами. Влияние релаксационных процессов на амплитуду выходного сигнала ЭП иллюстрирует рис. 3.

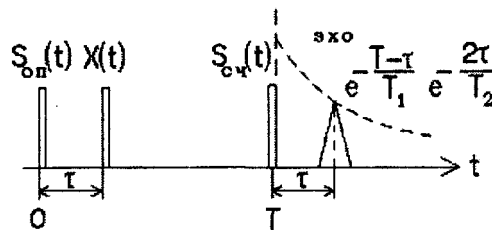


Рис. 3. Влияние релаксационных процессов на эхо-сигнал

Очевидно, (1) описывает также сигналы, возникающие в другие моменты времени, так называемые паразитные сигналы, подробно описанные в обзоре [4] наряду с другими функциональными возможностями ЭП.

Проведенные к настоящему времени исследования выявили наиболее эффективные виды эхо, которые могут быть использованы для обработки сигналов: электронное – в кристаллах с внутренним расщеплением энергетических уровней, ядерное – в ферромагнитных металлах и их соединениях, поляризационное в сегнетоэлектриках, магнитоакустическое и фотонное, за исключением электронного – полоса частот в котором может достигать нескольких сотен мегагерц, и фотонного, где этот показатель вне конкуренции. Остальные типы эха сравнительно узкополосны: при приемлемом динамическом диапазоне полоса воспроизводимых частот не превышает 30 МГц.

Практически все типы ЭП, кроме электронного и фотонного, не выдержали конкуренции с цифровыми устройствами по быстродействию; здесь полезно отметить, что гибкость и универсальность цифровых устройств находятся вне конкуренции.

Тем не менее, параметры электронных, и особенно фотонных эхо-процессоров, остаются пока недостижимыми для цифровой технологии.

Замечательное свойство фотонного эхо-процессора (ФЭП) – его способность обрабатывать изображения и поля, т.е. двумерные сигналы. Другая особенность – пространственный синхронизм выходных и входных сигналов – следует из (1) при учете волновых векторов входных сигналов (рис. 4, а, б). Благодаря однозначной зависимости волновых векторов возбуждающих и эхо-сигналов удастся не только отделять их друг от друга, но и выделять определенные типы эхо, т.е. подавлять нежелательные (паразитные) сигналы. Достаточно подробный обзор применения ФЭ для запоминания и обработки сигналов можно найти в [5]. Здесь же отметим основные свойства ФЭП.

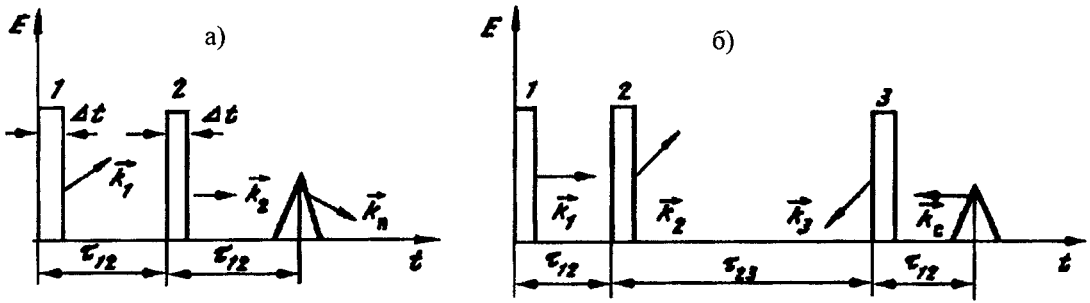


Рис. 4. Формирование ФЭ

Условия пространственного синхронизма для двухимпульсного (первичного) ФЭ имеют вид:  $\vec{k}_n = -\vec{k}_1 + 2\vec{k}_2$ , где  $\vec{k}_n$  – волновой вектор первичного ФЭ; для стимулированного ФЭ  $\vec{k}_n = -\vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \vec{k}_3$ . Возвращаясь к пространственным особенностям излучения ФЭ, отметим, что в резонансной среде формируется динамическая «решетка» населенности, свойства которой меняются с изменением угла  $\alpha$  между  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$ . Среда выполняет роль управляемого фильтра, коэффициент передачи которого зависит от угла  $\alpha$ . В оптических эхо-процессорах обычно используется сигнал стимулированного фотонного эха (СФЭ), который излучается средой через интервал  $\tau_{12}$  после третьего (считывающего) импульса в направлении волнового вектора  $\vec{k}_n$ .

Значительный интерес представляет долгоживущее фотонное эхо (ДФЭ) [6]. На его основе могут быть построены многоканальные согласованные фильтры, корреляторы и анализаторы спектров с параметрами, не достижимыми в настоящее время устройствами других классов, и постоянные запоминающие устройства большой емкости [5].

Долгоживущее фотонное эхо возникает в многоуровневой системе, один из уровней которой является метастабильным (рис. 5). Информация о воздействии первых двух импульсов сохраняется в виде неравновесной населенности метастабильного, следовательно, и основного уровней. Считывание этой информации третьим импульсом может происходить с участием лишь одного из этих уровней в течение времени жизни метастабильного уровня, которое и определяет время оптической памяти.

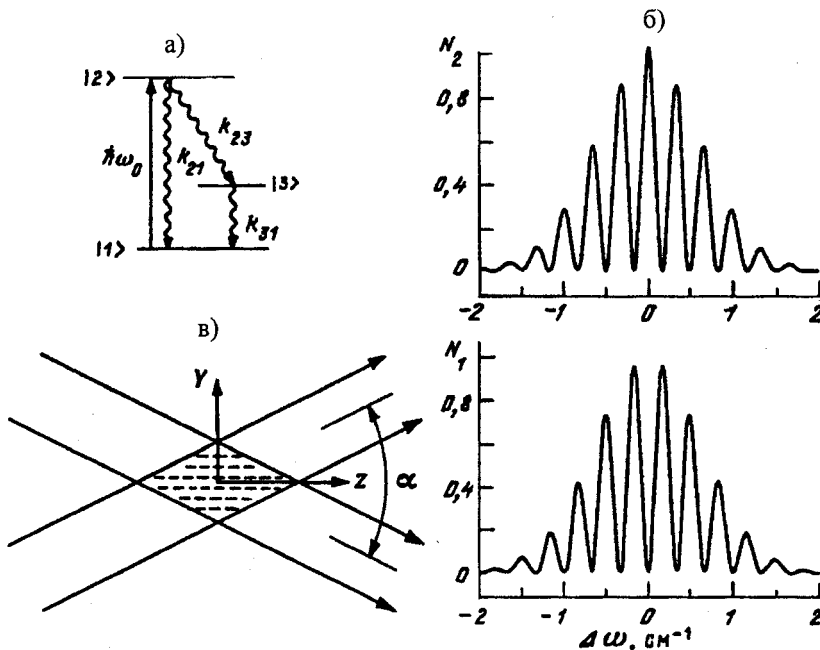


Рис. 5. Трехуровневая система:

а – метастабильный уровень  $|3\rangle$ ; б – неравновесная населенность уровней  $|1\rangle$  и  $|2\rangle$  в результате действия двух  $\pi/2$  импульсов, разделенных интервалом 100 пс; в – схема светоиндуцированной динамической решетки, возникающей в результате действия двух разделенных во времени импульсов

Как правило, спектр импульсов накачки может покрывать множество сверхтонких подуровней основного состояния. Первые два импульса переводят некоторую часть электронной плотности неспаренных электронов редкоземельных ионов в возбужденное состояние. В пределах временного интервала  $\tau_{23}$  между вторыми и третьими импульсами, эта неравновесная плотность может перейти в состояние  $|1\rangle$  через необратимую релаксацию. Однако некоторая часть этой плотности, которая зависит от скоростей релаксации  $k_{23}$ ,  $k_{21}$ , и  $k_{31}$  (для переходов между уровнями с соответствующими индексами), переходит в долгоживущее промежуточное состояние  $|3\rangle$ . В результате решетка неравновесной населенности возбужденного состояния переходит в вышеуказанное долгоживущее состояние. Время жизни этого состояния, фактически, определяет время оптического хранения данных.

В качестве веществ, способных генерировать ДФЭ, используют ван-флековские парамагнетики – примесные кристаллы, активированные некрамерсовыми редкоземельными ионами ( $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  и  $\text{Pm}^{3+}$ ), сверхтонкая структура подуровней которых обязана квадрупольному и псевдоквадрупольному взаимодействию. В этих структурах время жизни возбужденных сверхтонких подуровней основного состояния при низких температурах оказывается длинным и достигает десятка часов. К числу таких перспективных носителей информации относятся следующие кристаллы:  $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{YAlO}_3 : \text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Y}_2\text{SiO}_3 : \text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{LaF}_3 : \text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Y}_2\text{SiO}_5 : \text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{YAG} : \text{Tm}^{3+}$ .

Существенный вклад в создание надежных и высокоинформативных эхо-процессоров внесен Т. Моссбергом и др. [7]. Во-первых, эта группа исследователей показала, что целесообразнее всего временной интервал между первыми двумя возбуждающими импульсами делать нулевым. Во-вторых, для возбуждения использовался диодный лазер, а для детектирования – кремниевый лавинный фотодиодный детектор, что делало линейные размеры процессора небольшими. Была продемонстрирована рекордная информационная плотность 3 Гбит/см<sup>2</sup>, которая, по мнению авторов [7], может быть увеличена на два порядка.

Впечатляющие результаты достигнуты в обработке и запоминании изображений. В [8] сообщалось о запоминании ~ 4000 фреймов размером 1000 x 1000 пикселей в полосе частот  $F = 4$  ГГц. Скорость записи при этом доходила до  $4,3 \cdot 10^3$  фрейм/с. По сообщению [9], плотность записи составила  $2 \cdot 10^5$  фрейм/см<sup>2</sup> в полосе частот 5 ГГц и  $F \cdot T = 16000$ . Если считать, что динамический диапазон ФЭП обеспечивает эквивалентную разрядность 8 бит на пиксель, то плотность записи оказывается равной  $1,6 \cdot 10^{12}$  бит/см<sup>2</sup>.

В последние годы развивается еще одно направление, связанное с подключением оптических эхо-процессоров к световолоконным коммуникациям [10]. Большое внимание уделяется разработке голографических эхо-процессоров [11]. Значительные перспективы связывают также с созданием эхо-процессоров, функционирующих в режиме оптической нейронной сети [12, 13].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гвоздев В.И., Кузаев Г.А., Назаров В.И. Проблемы повышения быстродействия обработки цифровой информации // Зарубежная радиоэлектроника. - 1996. - № 6. - С. 19 - 30.
2. Корпэл А.Б., Чаттерджи М. Нелинейное эхо, фазовое сопряжение, обращение времени и электронная голография // ТИИЭР. - 1981 - Т. 69, № 12. - С. 22.
3. Рассветалов Л.А. Поляризационное эхо и его применение / Под ред. В.В. Самарцева. - М.: Наука, 1992.-С. 161-185.
4. Рассветалов Л.А. Генерация эхо-сигналов в нелинейной резонансной среде // Радиотехника и электроника. - 1987 - Т. 31, № 1. - С. 8 - 14.
5. Калачев А.А., Самарцев В.В. Когерентные явления в оптике. - Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина, 2003.-281 с.
6. Clen Y.C., Chiang K.P., Hartmann S.R. Photon echo relaxation in  $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$  // Optics Commun. - 1979. - Vol. 29.-P. 181-185.
7. Lin M., Wang T., Wilson G.A., Mossberg T.W. Experimental demonstration of swept-carrier time-domain optical memory // Optics Lett. - 1995. - Vol. 20, № 2. - P. 91.
8. Shen X.A., Chiang E., Cachru R. Time-domain holographic image storage // Optics Lett. - 1994. - Vol. 19, № 16.
9. Randall W., John A. Bell. Coherent transient continuous optical processor // Appl. Opt - 1994. - Vol. 33, № 8. - P. 1538
10. Luo B., Elman U., Kroll S. Amplification of photon echo signals by use of a fiber amplifier // Optics Lett. - 1998. - Vol. 23, № 6. - P. 442 - 444.
11. Shen X.A., Kachru R. Time-domain optical memory for image storage and high-speed image processing // Science - 1997. - Vol. 278, № 1. - P. 96.
12. Belov M.H., Manykin E.A. Optical implementation of neutral network models using the photon echo effect // Optics Commun. - 1991. - Vol. 84, № 1. - P. 1 - 6.
13. Бажанова Н.В., Калачев А.А., Самарцев В.В. Модель оптической нейронной сети на основе фотонного эха с временным кодированием данных // Известия РАН. Сер. Физика. - 2000. - Т. 64, № 10. - С. 2018.