

УДК 002:004.64

У. Г. Богомаз, Т. В. Белик, В. В. Белоусов

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ.
ВРЕМЕННОЕ УПЛОТНЕНИЕ–РАЗУПЛОТНЕНИЕ ПОТОКОВ ДАННЫХ**

Рассматриваются физические основы создания систем технической защиты информации, в частности, построение физической и математической моделей оптоэлектронных устройств временного уплотнения–разуплотнения потоков данных для волоконно-оптических информационно-коммуникационных систем и сетей, на основе акустооптического взаимодействия.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, волоконно-оптическая линия передачи, поляризация, лазерный пучок.

Введение. Одной из важнейших технических характеристик любой информационно-коммуникационной системы (ИКС) является ее пропускная способность (ПС). Наибольшей ПС обладают ИКС на основе волоконно-оптических линии передачи [1]. Вместе с тем, из-за дисперсионных свойств волоконного световода (ВСв) реализовать соответствующие каналы связи в ИКС без уплотнения - разуплотнения весьма проблематично [2]. Проведенные исследования показывают, что спектральная полоса пропускания кварцевого одномодового километрового отрезка волоконного световода лежит в области 0,8 ... 1,8 мкм, что соответствует $\Delta f \approx 2 \cdot 10^5$ ГГц. Временное уплотнение (укорачивание длительности оптических импульсов с одновременным ростом их частоты следования) предъявляет высокие требования к быстродействию лазеров, модуляторов и приемников излучения и все равно не может исчерпать пропускной способности ВСв. Известно, что возможности временного уплотнения ограничены дисперсионными характеристиками волоконного световода [1, 2]. Для обработки сложных быстропеременных последовательностей потребуется применение электронно-оптических способов временного уплотнения. Уровень развития быстродействующих интегральных микросхем и полупроводниковых фотоприемников, позволяет вести сегодня обработку со скоростью порядка 1 Гбит/с [3, 4]. Схемы уплотнения (разуплотнения), позволяют повысить ее до 10–15 Гбит/с [5].

В настоящей работе предложены математическое описание и математические модели акустооптических (оптоэлектронных) элементов временного уплотнения-разуплотнения (У-Р) потоков данных (оптических) и физико-технические аспекты реализации их физической модели.

Постановка и решение задачи. Проблему временного уплотнения-разуплотнения оптических каналов ИКС предлагается решить путем использования известного в радиофизике, акустооптического взаимодействия (АОВ) которое может быть реализовано в акустооптической ячейке (АОЯ), в режиме дифракции Брэгга, при отсутствии акустической нагрузки [6]. В этом случае, в светозвукопроводе АОЯ создается стоячая акустическая волна и лазерный пучок (ЛП) модулируется акустической волной со скоростью превышающей частоту акустической волны. Доказательство отмеченного свойства АОЯ, проведем в предположении, что в качестве его светозвукопровода (СЗП) используется изотропная среда, в которой отсутствуют потери энергии лазерного и акустических пучков [7]. В такой среде, в условиях стоячей волны происходит модуляция показателя преломления, обусловленная фотоупругим эффектом, в соответствии:

$$n^2 = n_0^2 + 2n_0n_1 \cos(\Omega t) \cos(Ky), \quad (1)$$

где n_0 – невозмущенный показатель преломления, n_1 – пиковое значение возмущенного показателя преломления, Ω и K – частота и волновое число акустической волны. Уравнение движения для компонент электрического поля оптических волн в среде взаимодействия, запишем в форме

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (n^2 \vec{E}), \quad (2) \quad \nabla^2 \vec{E} = k^2 [1 + 2(n_1 / n_0) \cos(\Omega t) \cos(Ky)] \vec{E}, \quad (3)$$

где $k = \omega_0 / (c / n_0)$, c – скорость света в свободном пространстве. Уравнение (3) решается методом разделения переменных [8]. В результате амплитуды недифрагированного (0-й порядок) и дифрагированного лазерного пучка (1-й порядок) можно записать в виде:

$$E_{0t} = E_0 \cos\left[\frac{\pi n_1 L \cos(\Omega t)}{\lambda \cos \Theta_B}\right], \quad (4) \quad E_{1s} = E_0 j \sin\left[\frac{\pi n_1 L \cos(\Omega t)}{\lambda \cos \Theta_B}\right], \quad (5)$$

где L – ширина акустического столба, λ и E_0 – длина волны и амплитуда поля входного лазерного пучка, Θ_B – угол Брэгга. Зависимость интенсивности в нулевом и первом порядке дифракции соответственно определяются:

$$I_{0t}(t) = I_0 \cos^2 \left[\frac{\pi n_1 L \cos(\Omega t)}{\lambda \cos \Theta_B} \right], \quad (6) \quad I_{1s}(t) = I_0 \sin^2 \left[\frac{\pi n_1 L \cos(\Omega t)}{\lambda \cos \Theta_B} \right]. \quad (7)$$

Анализируя уравнения (4)–(7), отметим, что аргументы их модулируются с частотой акустической волны Ω , при этом интенсивности световых лучей $I_{0t}(t)$ и $I_{1s}(t)$ модулируются с удвоенной частотой акустической волны, что видно из результата разложения уравнений (6), (7) по частотным компонентам:

$$I_{0t} = \frac{I_0}{2} \left[1 + J_0 \left(\frac{2\pi n_1 L}{\lambda \cos \Theta_B} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n} \left(\frac{2\pi n_1 L}{\lambda \cos \Theta_B} \right) \cos 2n\Omega t \right], \quad (8)$$

$$I_{1s} = \frac{I_0}{2} \left[1 + J_0 \left(\frac{2\pi n_1 L}{\lambda \cos \Theta_B} \right) - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n} \left(\frac{2\pi n_1 L}{\lambda \cos \Theta_B} \right) \cos 2n\Omega t \right]. \quad (9)$$

Практическая значимость модуляции на удвоенной частоте, заключается в том, что скорость модуляции оказывается не зависящей от времени пересечения оптической апертуры акустической волной. Исходя из приведенного описания АОВ следует практический вывод о возможности реализации высокоскоростной последовательной модуляции света, пользуясь коллимированным световым пучком и акустической волной большой апертуры. Предлагается величины I_{0t}/I_0 и I_{1s}/I_0 , уравнения (6), (7), назвать модуляционными функциями $M_0(t)$ и $M_1(t)$ соответственно. Таким образом, с помощью акустооптической ячейки на стоячей акустической волне можно решить задачу оптического переключения для последовательности световых импульсов, которое со скоростью вдвое превышающей частоту акустической волны направляет падающий луч света попеременно в различные, пространственно разнесенные направления, разделенные на двойной угол Брэгга. Для определенности, устройство, принцип действия которого основан на фотоупругом эффекте, основным структурным элементом которого является АОЯ на стоячей акустической волне, обладающее отмеченными функциональными признаками, назовем акустооптическим временным разуплотнителем (АОВР).

Учитывая временную зависимость модуляционной функции M (рис. 1), можно выделить два типа рабочих мод АОВР. Рабочая мода, показанная на рис. 1, б, характеризуется частотой акустической волны, равной четверти частоты следования оптической последовательности импульсов или любой нечетной гармонике. Таким образом, последовательность оптических импульсов может быть расщеплена в две серии импульсов, каждая из которых характеризуется частотой следования, равной половине исходной частоты следования.

Второй тип рабочей моды АОВР показан на рис. 1, в. В этом случае частота акустической волны равна $1/6$ частоты следования оптических импульсов или частоте, кратной произведению $(3n+1)$ или $(3n+2)$ на частоту следования, где n – целое число.

Применяя двухполяризационную систему уплотнения и пользуясь режимами 2-х и 3-х канальной обработки, можно реализовать одновременно обработку информации в 4 и 6 каналах, соответственно (рис. 2).

Структура экспериментального макета акустооптического элемента временного разуплотнения оптических каналов, показана на рис. 3, где 1 – лазер на ионах аргона; 2 – компенсатор Бобине; 3 – $p-i-n$ фотодиод; 4 – смеситель; 5 – усилитель ВЧ; 6 – элемент развязки и подстройки; 7 – датчик температуры акустооптического разуплотнителя; 8 – стабилизатор температуры; 9 – нагреватель; 10 – светоделительная призма; 11 – лавинный фотодиод; 12 – $p-i-n$ фотодиод; 13 – триггер; 14 – стробоскопический осциллограф.

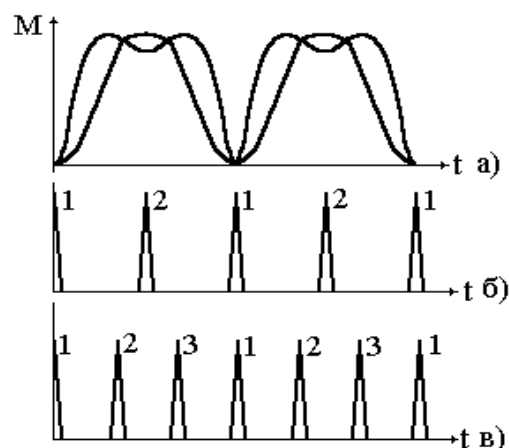


Рис. 1. Типы рабочих мод акустооптического разуплотнителя

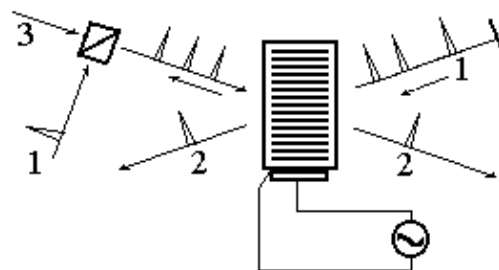


Рис. 2. Схема регистрации временного разуплотнения в режиме трехканальной обработки

В качестве СЗП АОВР использовался молибдат свинца ($PbMoO_4$). Пьезопреобразователь (ППр) на основе пластины ниобата лития ($LiNbO_3$), прикреплялся к СЗП методом термокомпрессионной сварки. Центральная частота АОВР – 110 МГц, при полосе ± 40 МГц. Возбуждая акустическую волну в ППр на частоте 5 гармоники, удалось реализовать режим переключения оптических последовательностей со скоростью 3,9 Гбит/с при двухполяризованном уплотнении.

В шестиканальном разуплотнителе на АОВР, структурная схема которого для одной поляризации показана на рис. 4, под углом Брэгга направлены 2 различных световых пучка с 2-мя поляризациями симметрично относительно распространения акустической волны. В исследованиях использовался импульсный аргонный лазер с частотой следования импульсов 75 Мбит/с, работающий в режиме синхронизации мод. Длительность импульсов составляла 0,5 нс (по уровню интенсивности $1/e^2$) и 0,3 нс (по уровню половинной интенсивности). С целью повышения частоты следования импульсов, выходной пучок лазера делился светоделительной пластиной, а затем вновь собирался в один пучок, чтобы задержка (обусловленная оптической разностью хода) равнялась обратной величине требуемой скорости следования. Таким образом, для луча одной поляризации удавалось получить скорость следования оптических импульсов до 2 Гбит/с. Уровень перекрестных искажений оценивался по формуле:

$$n = 10 \lg P_0 / P_1,$$

где P_0 – импульсная мощность в возмущающем канале, P_1 – импульсная мощность в возмущенном канале. Величина n составила для первого и нулевого дифракционных каналов, соответственно, -9 и -12 дБ. При этом для реализации 100% эффективности в АОВР, потребовалась мощность управляющего радиосигнала в 3,5 Вт. Экспериментальные исследования позволили разобраться с механизмом АОВ на стоячей акустической волне и узнать потенциальные возможности быстродействующих акустооптических переключателей оптических кодированных последовательностей.

Исследованы факторы, определяющие перекрестные искажения, это: недостаточный по длительности временной интервал между смежными оптическими импульсами; не оптимальная мощность акустической волны, обусловленная отсутствием методов ее расчета и моделирования; ошибки во временной синхронизации серии оптических импульсов в стоячей акустической волне [7].

Вариант обработки 4-х каналов на одном АОВР показан на рис. 5. Представляется целесообразным использование такой структуры для систем временного уплотнения, где все отдельные каналы имеют одинаковую поляризацию, на второй и последующих стадиях каскадного мультиплексора-демультиплексора. Пусть скорость прохождения информации $4/T$ (рис. 5, а). Полагая, что частота аку-

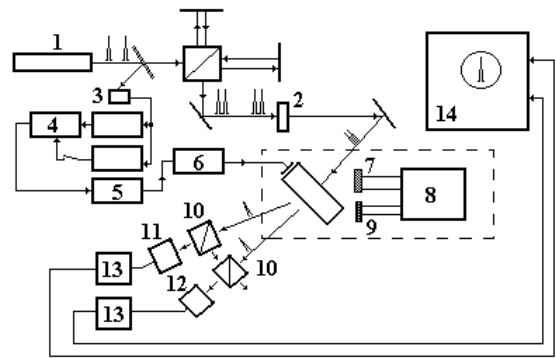


Рис. 3

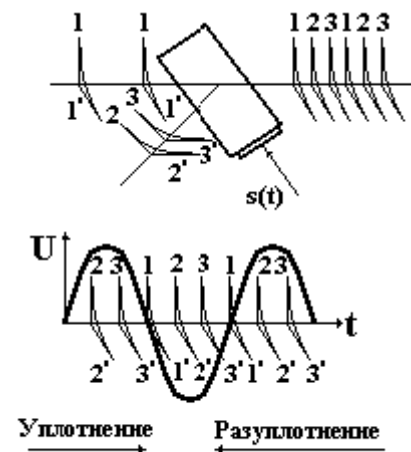


Рис. 4. Временная диаграмма 6-ти канальной структуры АОВР для разуплотнения последовательности оптических импульсов

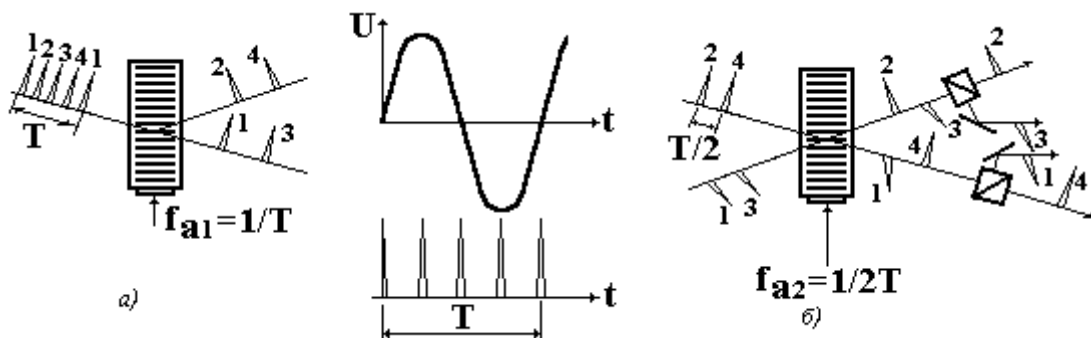


Рис. 5. Структура акустооптического разуплотнителя составной серии оптических импульсов одинаковой поляризации: два оптических канала на один АОВР (а) и четыре оптических канала на один АОВР (б)

стической волны в АОВР – f_{a1} , равна $1/4$ полной скорости прохождения информации, т.е. $f_{a1} = 1/T$, на выходе его будет две серии сложных двухканальных импульсов, разделенных в пространстве. Таким образом, данная структура является 4-х канальным устройством, позволяющим производить обработку 2-х серий двухканальных оптических импульсов с помощью одного АОВР.

Поместив на пути одного из двухканальных оптических пучков полуволновую пластину и оптическую линию задержки, можно повернуть поляризацию этого составного сигнала на $\pi/2$ и при этом обеспечить надлежащую задержку между двумя сериями импульсов. Обе серии составных импульсов посылаются под двойным углом Брэгга на акустический пучок СЗП для повторного АОВ в тот же момент времени. В результате, возникают две новые серии сложных оптических импульсов (рис. 5, б). Теперь, уже каждая составная серия содержит два различных оптических канала, отличающихся один от другого ортогональной поляризацией. Окончательное разделение 4 каналов осуществляется с помощью призмы Глана-Томсона. Предложенное 4-х канальное устройство с каскадным включением элементов для обработки N – кратно уплотненных оптических каналов, где N – четное число, нуждается в $N/2$ акустооптических переключателях.

Выводы. На основе известного в радиофизике акустооптического взаимодействия, показана возможность реализации временного уплотнения (разуплотнения) информации, представленной в виде оптических сигналов (данных). В соответствии с приведенным математическим описанием процесса У-Р, акустооптическая ячейка, физическая модель демонстрации АОВ, имеет две рабочие моды. Первая мода (рис. 1, б) характеризуется частотой акустической волны, равной четверти частоты следования оптической последовательности импульсов или любой нечетной гармонике. При этом последовательность оптических импульсов может быть расщеплена в две серии импульсов, каждая из которых характеризуется частотой следования, равной половине исходной частоты следования. Второй тип рабочей моды АОВР (рис. 1, в) характеризуется частотой акустической волны равной $1/6$ частоты следования оптических импульсов или частоте, кратной произведению $(3n + 1)$ или $(3n + 2)$ на частоту следования, где n – целое число. Для экспериментальной проверки математической модели взаимодействия в АОВР создана установка, структура аппаратных средств которой показана на рис. 3. Показаны диаграммы, иллюстрирующие шести (рис. 4) и четырех (рис. 5) канальную обработку по уплотнению-разуплотнению временных последовательностей информации (данных). Экспериментальное исследование АОЯ в качестве АОВР показало возможность достижения пропускной способности разуплотнения оптических последовательностей со скоростью 3,9 Гбит/с при двухполяризационном уплотнении.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Элементы и устройства на основе одномодовых волоконных световодов / В. В. Данилов, А. Ю. Липинский, А. Н. Рудякова др. // Вісн. Донецьк. ун-ту. Сер. А: Природн. науки. – 2005. – Ч. 2, № 2. – С. 175–189.
2. Данилов В. В. Оптикоэлектронные вычислительные сети / В. В. Данилов, М. В. Плыс, А. Н. Крищенко // Вісн. Донецьк. ун-ту. Сер. А: Природн. науки. – 2007. – Вип. 2. – С. 176–197.
3. Whitman M. Principles of Information Security / M. Whitman, H. Mattord. – Boston: 20 Channel Center, 2013. – 601 p.
4. Pfleeger C. P. Security in Computing / C. P. Pfleeger. – Colorado: HMG Press, 2012. – 812 p.
5. Шереметьев А. Г. Когерентная оптическая связь / А. Г. Шереметьев. – М.: Радио и связь. – 1991. – 192 с.
6. Данилов В. В. Преобразование информации при акустооптическом взаимодействии / В. В. Данилов // Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – 2002. – Т. 7, № 2. – С. 365–378.
7. Данилов В. В. Физические основы построения акустооптических устройств селекции оптических сигналов / В. В. Данилов // Радиотехника: Всеукр. науч.-техн. сб. – 2001. – № 117. – С. 65–70.
8. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго; Пер. с франц. под ред. К. С. Шифрина. – М.: Наука. – 1965. – 780 с.

Поступила в редакцию 18.04.2014 г.

РЕЗЮМЕ

Розглядаються фізичні основи створення систем технічного захисту інформації, зокрема, побудова фізичної та математичної моделей оптикоелектронних пристроїв тимчасового ущільнення - розущільнення потоків даних для волоконно-оптичних інформаційно-комунікаційних систем і мереж, на основі акустооптичної взаємодії.

Ключові слова: акустооптична взаємодія, волоконно-оптична лінія передачі, поляризація, лазерний пучок.

SUMMARY

The physical basis for the creation of technical protection of information, in particular, the construction of the physical and mathematical models of optoelectronic devices temporary seal - decompression data streams for fiber optic communication and information systems and networks based on acousto-optic interaction.

Keywords: acousto-optic interaction, fiber-optic transmission, polarization, the laser beam.