

УДК 002:004.64

В. В. Данилов, В. А. Ченская**СПЕКТРАЛЬНОЕ УПЛОТНЕНИЕ-РАЗУПЛОТНЕНИЕ ПОТОКОВ ДАННЫХ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

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

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

Введение. Пропускная способность (ПС) информационно-коммуникационной системы (ИКС) – важнейшая ее характеристика. 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]. В настоящей работе предложены: математические описания и модель акустооптического элемента спектрального уплотнения-разуплотнения (У-Р) потоков данных на основе коллинеарного акустооптического взаимодействия, в частности, его физической модели – коллинеарной акустооптической ячейки (КАОЯ); физико-технические аспекты реализации физической модели КАОЯ; технические возможности коллинеарной акустооптической ячейки по спектральному уплотнению-разуплотнению потока данных на макете линии оптической связи; физические возможности КАОЯ по формированию спектральных каналов связи коммутируемых ею; методика и структура аппаратных средств измерения аппаратной функции КАОЯ.

Спектральное уплотнение (частотное уплотнение в оптическом диапазоне) позволяет использовать всю оптическую полосу пропускания ВСв. Существуют ситуации, когда спектральное уплотнение оказывается предпочтительнее по сравнению с другими видами. Например, в сетях связи ИКС, при реализации тракта на волоконных световодах с допустимой скоростью передачи 10 Гбит/с, на одной оптической несущей [3]. Современная электронная коммутационная техника, еще как-то «справляется» с импульсами не короче 1 нс, а имеющиеся электронные терминалы работают на скорости передачи не более 1 Гбит/с. При скорости 10 Гбит/с, требуется дорогостоящая разработка электронных средств уплотнения и разуплотнения, причем проблемы возникнут на стадии подбора соответствующей полупроводниковой элементной базы. Несмотря на широкое распространение ВСв со ступенчатым профилем показателя преломления, параметр широкополосности у них мал. Поэтому при использовании одной оптической несущей никакой из известных радиоэлектронных принципов уплотнения не поможет передать по такому волоконному световоду большой поток информации [3].

В оптической спектроскопии, спектральные линии считаются разрешенными, если удовлетворяется критерий Рэлея. В ИКС этого недостаточно. Во-первых, при разделении линий (рис. 1), необходимо как можно полнее собрать энергию от каждой из них (заштриховано на рис. 1), поскольку для высокопрозрачных современных ВСв каждый децибел потерянной мощности эквивалентен уменьшению длины линии связи [4].

Во-вторых, доля энергии от соседней линии (область двойной штриховки, рис. 1) должна быть очень малой, что определяет низкий уровень перекрестных помех между каналами.

В-третьих, желательным является минимальный частотный интервал между оптическими несущими для более полного использования полосы пропускания ВСв.

В оптической спектроскопии для разделения линий предназначены монохроматоры, как правило, имеющие большие габариты, что обусловлено стремлением к высокому спектральному разрешению. Поскольку, в оптической связи интервалы между несущими составляют не менее 10 нм [4], малогабаритные делители каналов могут быть выполнены по аналогии с применяемыми в спектроскопии. Ближе всего делители каналов стоят к полихроматорам – спектральным приборам для одновременной селекции и регистрации многих линий.

Уровень выходного сигнала фотоприемников пропорционален принимаемой мощности оптической

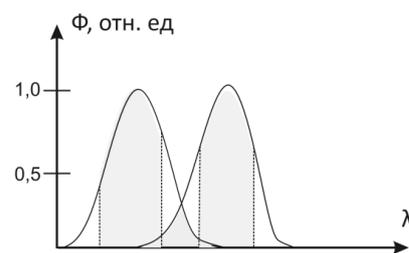


Рис. 1. Спектральное распределение мощности двух оптических несущих

ского сигнала. Поэтому при заданном максимальном уровне перекрестных помех по электрической мощности, порядка 40 дБ, достаточно снизить перекрестные помехи по мощности оптического сигнала в делителе каналов до 20 дБ. И хотя нормативно технической документации регламентирующей эти соотношения нет, они хорошо согласуются с мнением специалистов [4].

Математическое описание акустооптического элемента на основе анизотропной акустооптического взаимодействия [5]. Основываясь на физике акустооптического взаимодействия селекции оптических сигналов, можно утверждать, что световые волны разной поляризации имеют разные фазовые скорости. Поэтому когда при дифракции происходит поворот плоскости поляризации световой волны, характер дифракции существенно меняется. При анизотропной дифракции Брэгга, угол падения света определяется выражением (1),

$$\sin \Theta_i = \frac{\lambda_0}{2n_i\Lambda} \left[1 + \left(\frac{\Lambda}{\lambda_0} \right)^2 (n_i^2 - n_d^2) \right] = \frac{\lambda_0\Omega}{2n_iV} \left[1 + \frac{V^2}{\Omega^2\lambda_0^2} (n_i^2 - n_d^2) \right]. \quad (1)$$

Угол отклоненного светового пучка в этом случае, не равен углу Брэгга, и определяется соотношением

$$\sin \Theta_d = \frac{\lambda_0}{2n_d\Lambda} \left[1 - \left(\frac{\Lambda}{\lambda_0} \right)^2 (n_i^2 - n_d^2) \right] = \frac{\lambda_0\Omega}{2n_dV} \left[1 - \frac{V^2}{\Omega^2\lambda_0^2} (n_i^2 - n_d^2) \right]. \quad (2)$$

Зависимость углов Θ_d и Θ_i от частоты акустической волны Ω , для случая $n_i > n_d$ представлена на рис. 2, из которого видно, что при анизотропной дифракции существует минимальная частота акустической волны – Ω_x , ниже которой дифракция с поворотом плоскости поляризации становится невозможной. Формально Ω_x определяется (3,4). Согласно графическому виду зависимости (рис. 2), при изменении акустической частоты вблизи Ω_0 , угол Брэгга меняется незначительно, в то же время как угол дифракции Θ_d изменяется в широких пределах

$$\Omega_x = V(|n_i \pm n_d|)/\lambda_0, \quad (3)$$

$$\Omega_x = V(|n_i - n_d|)/\lambda_0 = V|\Delta n|/\lambda_0. \quad (4)$$

Важной особенностью анизотропной дифракции является возможность коллинеарного акустооптического взаимодействия (КАОВ), при котором волновые вектора падающего и дифрагированного световых пучков параллельны и направлены в одну сторону. Такое АОВ возможно, если частота акустической волны определяется (4). Формальное описание процесса КАОВ, рассмотрим на примере акустооптической ячейки с коллинеарным акустооптическим взаимодействием (КАОЯ), структурные элементы которой показаны на рис. 3, где 1 – поляризатор (призма Глана); 2 – светозвукопровод; 3 – пьезопреобразователь продольной акустической волны

Для коллинеарной АОЯ уравнения связанных волн запишем в виде:

$$\frac{dE_x}{dy} = j \frac{n_i n_d^2 p_{\text{эфф}}^2 \omega}{4c} S E_z e^{j\Delta ky}; \quad \frac{dE_z}{dy} = j \frac{n_i n_d^2 p_{\text{эфф}}^2 \omega}{4c} S^* E_x e^{-j\Delta ky}; \quad (5)$$

где $\Delta k = k_i - k_d - K$, $p_{\text{эфф}}$ – эффективная фотоупругая константа, S – упругая деформация, c и ω – скорость и частота света. Решение системы с учетом граничных условий ($E_x = 0$, $E_z(0) = E_z^0$) позволяет найти акустооптическую эффективность дифракции в виде:

$$\frac{I_d}{I_i} = \Gamma^2 L^2 \frac{\sin^2(L^2 \Gamma^2 + \Delta k^2 L^2 / 4)^{1/2}}{L^2 \Gamma^2 + \Delta k^2 L^2 / 4}, \quad (6)$$

$$\Gamma^2 = \frac{(n_i n_d p_{\text{эфф}})^2 \pi^2}{4\lambda_0^2} |S^2| = \frac{n_i^3 n_d^3 p_{\text{эфф}}^2 \pi^2}{2\rho V^3 \lambda_0^2} \left(\frac{P_a}{A} \right), \quad (7)$$

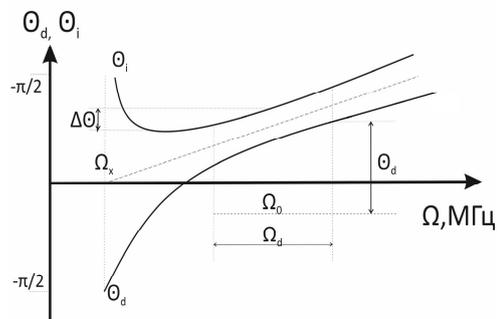


Рис. 2. Угло-частотные характеристики дифракции при анизотропном акустооптическом взаимодействии

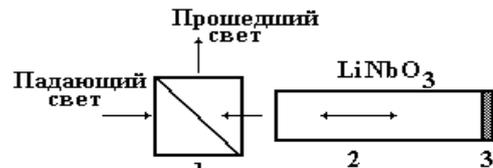


Рис. 3. Структура КАОЯ

ρ – плотность, V – скорость акустической волны и P_a / A – плотность мощности акустической волны в среде АОВ. Из выражения (6) следует, что при фазовом синхронизме волновых векторов, при $\Delta k = 0$, $I_d / I_i = \sin^2 GL$, т.е. для получения 100 % эффективности дифракции необходимо выполнение условия:

$$GL = \pi / 2. \quad (8)$$

Откуда, плотность мощности акустической волны равна:

$$P_a / A = \lambda_0^2 / (2L^2 M_{эфф}), \quad (9)$$

$M_{эфф} = n_i^3 n_d^3 p_{эфф}^2 / (\rho V^3)$ – акустооптическая добротность среды АОВ коллинеарной акустооптической ячейки. Полученное выражение не учитывает изменения плотности мощности при распространении акустической волны по СЗП, связанного с ее расходимостью, вязким поглощением и другими причинами. Как показала экспериментальная проверка (8) и (9), более точно процесс КАОВ описывает выражение

$$\frac{I_d(\omega, \Omega)}{I_i(\omega, \Omega)} = K(\omega) \frac{P_a}{P_m} \frac{\sin^2(\pi/2) \sqrt{P_a/P_m + 4(\Delta\Omega)^2 \tau^2}}{P_a/P_m + 4(\Delta\Omega)^2 \tau^2}, \quad (10)$$

где I_d / I_i – амплитудно-частотная характеристика АОВ при селекции оптических сигналов АОЯ, т.е. I_d / I_i , в общем случае зависит от плотности мощности акустической волны P_a , диапазона частот акустических сигналов $\Delta\Omega$ и амплитудно-частотной характеристики элементов оптической схмотехники, входящих в состав оптического тракта АОЯ – $|K(j\omega)| = K(\omega)$, P_m – плотность мощности акустической волны, при которой в отсутствие расстройки достигается значение $I_d / I_i = 1$.

Важной характеристикой процесса КАОВ является полоса пропускания, которая по уровню 0,5, без учета дисперсии показателя преломления среды акустооптического взаимодействия, определяется:

$$\Delta\lambda = 5\lambda_0^2 / (2\pi\Delta nL) \quad (11)$$

Несложный расчет показывает с то с учетом дисперсии, уравнение (11) можно переписать в виде:

$$\Delta\lambda = 5\lambda_0^2 / [2\pi L(\Delta n + \lambda_0 \frac{\partial \Delta n}{\partial \lambda_0})]. \quad (12)$$

Дисперсия показателя преломления в зависимости от типа среды АОВ может, как увеличивать, так и уменьшать полосу пропускания. Затухание и расходимость акустической волны увеличивает полосу пропускания КАОВ.

Одной из основных характеристик КАОВ, является диапазон перестройки оптических волн, соответствующих диапазону частот акустических волн. Как показали экспериментальные исследования КАОЯ, граница диапазона определяется двумя факторами: областью оптической прозрачности среды АОВ и широкополосностью модуля возбуждения акустической волны. Частота акустической волны может быть найдена из условия синхронизма при коллинеарном АОВ, в виде:

$$\Omega_i = (V / \lambda_i)(n_0 - n_e). \quad (13)$$

Тогда задавшись крайними значениями длины волны света, для конкретной среды АОВ, находится граничные частоты диапазона акустических частот.

Другой важной характеристикой КАОЯ является величина ослабления оптического излучения вдали от центра полосы пропускания. Из (7) следует зависимость акустооптической эффективности от расстройки Δk , которая подчиняется функции типа $(x^{-1} \sin x)^2$, характеризующейся наличием боковых максимумов убывающей амплитуды. Очевидно, что при значительных расстройках, акустооптическая эффективность в боковом максимуме имеет вид:

$$(I_i / I_d)_N = 2 / [\pi^2 (2N + 1)^2]. \quad (14)$$

где N – относительная расстройка, нормированная к полосе пропускания КАОЯ по уровню 0,5. Откуда следует, что требуемое ослабление принципиально возможно за пределами полосы, определяемой (14). Экспериментальные исследования, показали, что реальное ослабление зависит от качества используемого поляризатора.

Следующей важной характеристикой КАОЯ, является её угловая апертура. Полная входная апертура коллинеарной акустооптической ячейки, с погрешностью приемлемой в инженерных расчетах, с учетом преломления света на входной грани среды акустооптического взаимодействия, имеет вид:

$$\Psi = 2n_i(\lambda_0 / L\Delta n)^{1/2}. \quad (15)$$

Число информационных каналов и быстродействие коллинеарной акустооптической ячейки. Идеализированный вид аппаратной функции КАОЯ, представлен на рис. 4. При анализе числа возможных каналов разуплотнения с помощью КАОЯ, важным фактором является вид спектральной кривой источника излучения, т.е. его полуширина и центральная частота излучения.

Быстродействие оптической системы связи ограничено дисперсионными свойствами передающей среды, приводящими к «размытию» формы передаваемого импульса излучения. В одномодовых ВСв, это обусловлено зависимостью групповой скорости от длины волны. В многомодовых ВСв, это обусловлено межмодовой дисперсией, которая возрастает пропорционально спектральной ширине оптического сигнала источника. В первом приближении уширение импульса обусловлено материальной дисперсией ВСв, пропорциональной

$(\lambda/c)[(\partial^2 n)/(\partial \lambda^2)]$. Увеличению быстродействия препятствует и волноводная дисперсия. В одномодовом ВСв, материальная дисперсия является определяющим фактором, превосходящим дисперсию, определяемую размерными эффектами световода. Коэффициент широкополосности (произведение длины линии на ширину полосы) определяет предельное быстродействие данной линии передачи. Это параметр введен для случая передачи на одной оптической несущей и характеризует предельную широкополосность сигнала, модулирующего оптическую несущую, который может быть передан этой линией на расстояние 1 км, без искажений. Очевидно, что этот же параметр, связанный с частотой модуляции, устанавливает связь и предельную скорость передачи информации. Так как частота модуляции не может превышать частоты несущей, значит, этот параметр и определяет наибольшее быстродействие. Таким образом, скорость передачи данных $1/T$, где T – временная полуширина передаваемого импульса, для оптических систем связи ограничена рядом факторов: быстродействием источника оптического сигнала или частотой модуляции, дисперсией среды распространения, быстродействием переключателя каналов, быстродействием фотоприемников.

Расчеты показывают, что если спектральная полоса пропускания километрового отрезка ВСв, составляет 0,5...1,8 мкм, что соответствует предельному быстродействию $2,5 \cdot 10^5$ Гбит/с, то дисперсия среды ограничивает эту величину до 250 Гбит/с. Предельная частота следования импульсов лазерных источников составляет 10^3 ГГц. Достигнутая скорость переключения каналов механическими устройствами составляет 2,5 кГц, акустооптических ячеек в режиме временного разуплотнения – до 1,5 ГГц, электрооптических переключателей – до 300 МГц [4]. Быстродействие серийных фотозлектронных умножителей, составляет ~ 200 ГГц. Приведенные оценки быстродействия элементов систем оптической связи показывают, что самыми инерционными являются переключатели. При использовании КАОЯ, в качестве переключателя, быстродействие его будет определяться временем пробега фронта акустической волны по среде АОВ. Если длина среды акустооптического взаимодействия составляет ~20 см, при скорости акустической волны 5750 м/с, время заполнения среды АОВ акустической волной составит $\tau = L/V = 35$ мс. Таким образом, предельная скорость посылки импульса акустической волны, с другой частотой заполнения не превышает $\tau^{-1} = 27$ кГц. Откуда следует, что предельная скорость произвольно переключения информации из канала в канал с помощью КАОЯ не превышает 27 кбит/с.

Метод расчета числа коммутируемых каналов связи коллинеарной акустооптической ячейкой. Спектральное уплотнение каналов в оптической связи ставит задачу их последующего разуплотнения на стороне потребителя информации. Для оценки числа каналов, разуплотняемых КАОЯ, рассмотрим следующую модель. Пусть в интервале рабочих длин волн от λ_{\min} до λ_{\max} равномерно размещены K каналов, спектральная ширина каждого составляет $\Delta\lambda$. Предположим что спектральная плотность интенсивности каналов постоянна и равна P . Для характеристики используемой КАОЯ примем следующие обозначения: $A(\lambda)$ – аппаратная функция КАОЯ; $\delta\lambda$ – ширина полосы пропускания по уровню 0,5; m – оптический контраст ячейки, в предположении 100 % акустооптической эффективности пропускания. Допустимое значение перекрестных искажений, зададим β_{\max} – максимальное отношение энергии, поступающей потребителю от всех боковых лепестков к энергии, регистрируемой в данном канале.

Рассмотрим случай когда $\Delta\lambda \geq \delta\lambda$. Это условие реализуется на практике, когда в качестве источника когерентного излучения используется полупроводниковый инжекционный лазер, ширина полосы излучения которого составляет несколько нанометров, тогда как ширина полосы пропускания КАОЯ

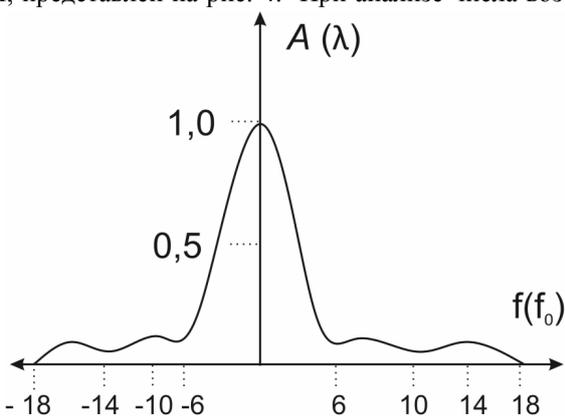


Рис. 4. Идеализированная аппаратная функция КАОЯ

составляет несколько ангстрем [5]. При настройке КАОЯ на один из каналов, интенсивность излучения пропущенного ею составляет

$$I = P\delta\lambda(I_d / I_i). \quad (16)$$

Интенсивность излучения одного из боковых каналов, отстоящего от измеряемого канала, при прохождении через КАОЯ определяется контрастом последней и равна [5]

$$I' = P\Delta\lambda m. \quad (17)$$

Вблизи измеряемого канала, интенсивность излучения боковых каналов, прошедших через КАОЯ, определяется аппаратной функцией $A(\lambda)$. Наибольший вклад боковые каналы вносят при совмещении их с боковыми максимумами аппаратной функции. Для оценки этого вклада необходимо учесть спад максимумов функции $A(\lambda)$, вплоть до значения m , после которого расчет ведется согласно (17). Из вида $A(\lambda)$, следует, что по мере удаления от центра полосы пропускания КАОЯ, боковые максимумы аппаратной функции спадают как $1/(1,7N_2)$, где N – расстояние от центра полосы, нормированное к величине $\delta\lambda$. Откуда следует, что вклад боковых каналов, определяемых функцией $A(\lambda)$, необходимо учитывать в пределах спектрального интервала, отстоящего от центра пропускания на $\pm N_{\max}\delta\lambda$, где N_{\max} определяется из соотношения $I_d/(7,5N_{\max}^2 I_i) = m$, так что вышеупомянутый интервал составляет $2\delta\lambda\sqrt{I_d/I_i}/\sqrt{7,5m}$. Поскольку расстояние между каналами составляет $(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/K$, то число каналов внутри рассматриваемого интервала равно

$$\frac{2\delta\lambda\sqrt{I_d/I_i}K}{\sqrt{7,5m}(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})} = 2M.$$

Очевидно, что вклад каждого из этих каналов в величину перекрестных искажений не превышает величины:

$$I'' = P\Delta\lambda \frac{K^2(\delta\lambda)^2(I_d / I_i)}{7,5i^2(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})^2}, \quad (18)$$

где i – порядковый номер бокового канала при начале отсчета после измеряемого канала.

Суммируя интенсивность излучения, соответствующую всем боковым каналам, получим полную величину интенсивности перекрестных помех:

$$I_n = 2 \sum_{i=1}^{i=M} I'' + (K - 2M - 1)I' = 2 \sum_{i=1}^{i=M} P\Delta\lambda \frac{K^2(\delta\lambda)^2(I_d / I_i)}{7,5i^2(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})^2} + (K - 2M - 1)P\Delta\lambda m. \quad (19)$$

Учитывая допустимое значение перекрестных искажений

$$(I_n / I) \leq \beta_{\max}, \quad (20)$$

выражение (19) перепишем в виде:

$$2 \sum_{i=1}^{i=M} \frac{K^2\delta\lambda\Delta\lambda}{7,5i^2(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})^2} + (K - 2M - 1)\frac{\Delta\lambda m}{\delta\lambda(I_d / I_i)} \leq \beta_{\max}. \quad (21)$$

Сделав допущение вида $M \ll K$ и $\sum_{i=1}^{i=M} i^2 = 1,5$, из уравнения (21) следует:

$$\frac{\delta\lambda(I_d / I_i)}{2,5(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})^2} K^2 + \frac{m}{\lambda} K - \frac{(I_d / I_i)\beta_{\max}}{\Delta\lambda} = 0. \quad (22)$$

Решение (22) дает допустимое значение числа каналов, разуплотняемых КАОЯ, при условии принятых ограничений. Например, при $\beta_{\max} = 4 \cdot 10^{-2}$ (14 дБ); $\lambda_{\max} - \lambda_{\min} = 4000 \text{ \AA}$; $\Delta\lambda = 20 \text{ \AA}$; $\delta\lambda = 2 \text{ \AA}$; $m = 1,5 \times 10^{-5}$; $I_d / I_i = 0,6$ следует что число каналов уплотняемых (разуплотняемых) КАОЯ равно $K = 110$.

Экспериментальное исследование элемента спектрального разуплотнения в макете линии оптической связи структуры оптического вычислительного средства. Структура установки моделирующей оптическую линию связи показана на рис. 5, где 1 – лазер ЛГ-70; 2 – лазер ЛГ-44; 3 – механический модулятор-обтюратор; 4,5 – металлические зеркала; 6 – диэлектрическое полупрозрачное зеркало; 7, 13, 14 – поляризаторы пленочные; 8, 9 – КАОЯ; 10, 11 – устройства управления АОЯ; 12 – поляриод типа призмы Глана; 15, 16 – собирающие линзы; 17, 18 – фотодиоды ФД-9Э111, 19 – осциллограф С1-68; 20 –

осциллограф С1-72 и 21 дБ соответственно. Очевидно, что увеличение акустооптической эффективности позволит еще более подавить перекрестные помехи.

Тракт источника оптических сигналов сформирован с помощью двух лазеров, с длинами волн 0,63 и 0,44 мкм, пучки которых объединены с помощью зеркал. Механический обтюратор предназначен для прерывания красного луча с частотой 1 кГц, синего – с частотой 0,5 кГц. С помощью акустооптических фильтров произвольно выделялся любой из каналов. Для оценки уровня перекрестных помех, измерялся контраст обоих АОФ, он составлял $4,5 \cdot 10^{-4}$ и $3 \cdot 10^{-4}$. При этом получены следующие значения максимального и минимального сигналов, измеренные в первой КАОЯ фильтре для красного и синего лучей соответственно при установке поляризаторов параллельно и перпендикулярно друг другу 37,8 мВ и 17 мкВ, 50 мВ и 15 мкВ. Выделение первым АОФ красного либо синего лучей осуществлялось подачей на него управляющего радиосигнала частотой 82 либо 122 МГц. Значения зарегистрированных сигналов на частотах модуляции 0,5 и 1 кГц составили соответственно 3 и 2 мВ, что соответствует акустооптической эффективности 8 % и 4 %. Уровни перекрестных помех составляли $5 \cdot 10^{-3}$ и $8,5 \cdot 10^{-3}$ для красного и синего лучей, или 23 дБ.

Методика и структура средств измерения аппаратной функции элемента спектрального разуплотнения. Предел спектрального уплотнения каналов, как было показано выше, определяется максимальным уровнем перекрестных помех. Применение КАОЯ в качестве разуплотнителя накладывает специфические требования на спектральное уплотнение, поскольку перекрестные помехи оказываются связанными, во-первых контрастом КАОЯ (оптический контраст характеризует отношение сигналов на выходе элемента с полезной и паразитной поляризацией), во-вторых, наличием боковых лепестков аппаратной функции АОЯ. Анализ работы спектрального разуплотнителя на основе КАОЯ показал, что количество разуплотняемых каналов определяется, с одной стороны диапазоном рабочих длин волн ($\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$), спектральной шириной разуплотняемых каналов $\Delta\lambda$ и допустимым уровнем перекрестных помех β_{\max} , а с другой стороны, такими параметрами КАОЯ как акустооптическая эффективность I_d / I_i , оптический контраст m , ширина полосы пропускания $\delta\lambda$.

Оценка соответствия реальной аппаратной функции КАОЯ (рис. 6) ее теоретическому представлению (рис. 3) производилась на установке, структура которой показана на (рис. 7); где 1 – газовый лазер;

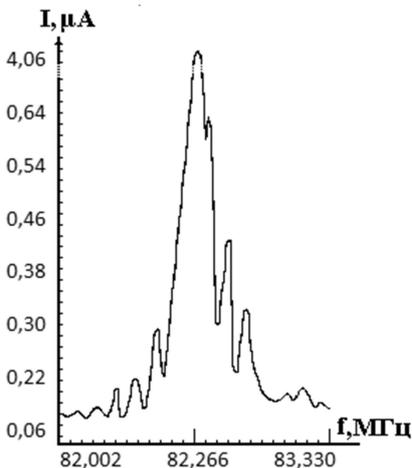


Рис. 6. Реальная аппаратная функция КАОЯ

пропускания коллинеарной акустооптической ячейки, соответствующий разным частотам управляющего радиосигнала, регистрировался одновременно с регистрацией уровня входного излучения лазера (элементы 8, 9), что учитывалось при последующем построении $A(\lambda)$. Как видно из графика (рис. 7), величина боковых максимумов уменьшается по мере удаления от центра полосы пропускания однако степень спада величины боковых максимумов не соответствует зависимости $1/7,5 N_2$, а существенно слабее. Отсюда следует, что при инженерных расчетах полного числа разуплотняемых каналов или уровня перекрестных помех необходимо исходить из учета реальной аппаратной функции КАОЯ.

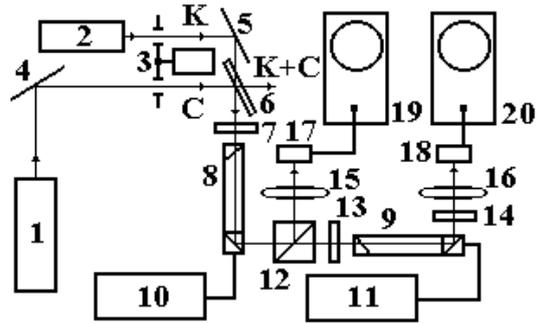


Рис. 5. Блок-схема макета оптической линии связи

2 – полупрозрачное зеркало; 3, 5 – поляризатор и анализатор; 6, 8 – фотоприемники; 7 – универсальный вольтметр; 10 – широкополосный усилитель мощности управляющего радиосигнала; 11 – генератор Г4-107; 12 – импульсный генератор Г5-54. На КАОЯ подавался сигнал от генератора 11, через усилитель мощности 10. Уровень

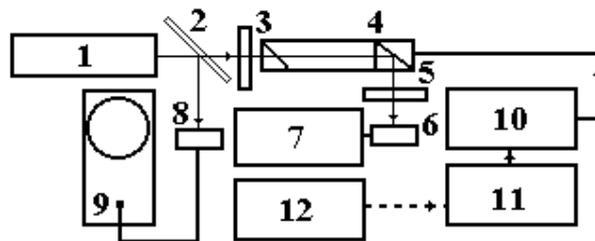


Рис. 7. Структура установки для метрологического контроля аппаратной функции АОФ

Выводы. По исследованиям элемента спектрального разуплотнения, установлено:

- математическое описание и модель элемента спектрального разуплотнения оптического потока данных, на основе коллинеарной акустооптической ячейки (6,7);
- расчетные соотношения, позволяющие определить полосу оптических частот и оптическое разрешение коллинеарной акустооптической ячейки (КАОЯ) – $\Delta\lambda$ (11,12), частоты синхронизма – $\Delta\Omega_i$ на которых возможно коллинеарное акустооптическое взаимодействие (13) а также входную угловую апертуру КАОЯ – Ψ (15);
- величина боковых максимумов аппаратной функции КАОЯ уменьшается по мере удаления от центра полосы пропускания, однако, степень спада величины боковых максимумов не соответствует зависимости вида $1/(7.5 N_2)$, наблюдающейся у теоретической кривой, а существенно слабее.

По исследованиям элемента спектрального разуплотнения, предложено:

- структура аппаратных средств моделирующих оптическую линию связи ОВС с спектральным уплотнением каналов, на макете которой проведены исследования возможностей КАОЯ по спектральному разуплотнению каналов связи;
- метод расчета числа коммутируемых коллинеарной акустооптической ячейкой оптических каналов при спектральном их уплотнении, и также определена предельная скорость произвольного переключения каналов КАОЯ, при спектральном разуплотнении (27 кбит/с);
- метод и структура аппаратных средств для измерения аппаратной функции (АФ) коллинеарной акустооптической ячейки, а также определен ее реальный вид для КАОЯ созданной автором;
- в связи с тем, что величина боковых максимумов КАОЯ уменьшается по мере удаления от центра полосы пропускания, не в соответствии теоретической кривой, а существенно слабее, при проектировании полного числа разуплотняемых каналов или уровня перекрестных помех элемента, необходимо исходить из учета реальной аппаратной функции КАОЯ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов В. В. Оптоэлектронные вычислительные сети / В. В. Данилов, М. В. Плыс, А. Н. Крищенко // Вісн. Донец. ун-ту. Сер. А: Природн. науки. – 2007. – Вып. 2. – С. 176–197.
2. Данилов В. В. Соотношение сигнал-помеха в каналах ВОЛС на основе акустооптической ячейки для оптоэлектронных вычислительных средств / В. В. Данилов, Л. М. Роганов // Радиотехника. – Запорожье, 1995. – № 31. – С. 285–294.
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. Данилов В. В. Физические основы построения акустооптических устройств селекции оптических сигналов / В. В. Данилов // Радиотехника. – Запорожье, 2001. – № 117. – С. 65–70.

Поступила в редакцию 22.04.2014 г.

РЕЗЮМЕ

Розглядаються фізичні основи створення систем технічного захисту інформації, зокрема, побудова фізичної та математичної моделей оптоелектронних пристроїв спектрального (частотного) ущільнення-разуплотнення потоків даних для волоконно-оптичних інформаційно-комунікаційних систем і мереж, на основі акустооптичного взаємодії.

Ключові слова: акустооптичне взаємодія, акустооптичний осередок, волоконно-оптична лінія передачі, поляризація, лазерний пучок.

SUMMARY

The article offered the description of the physical basis for the creation of technical protection of information. Particularly, the construction of the physical and mathematical models of optoelectronic devices spectral compaction-decompression of data streams for fiber optic ICT systems and networks based on acoustooptic interaction.

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