

# Лекция 13

## Адаптивные системы с оптической обратной СВЯЗЬЮ

### Содержание

1 ЖК-транспаранты с оптическим управлением	1
2 АОС с оптической обратной связью	1
3 Взаимосвязь амплитудной и фазовой модуляции	2
4 Система с фазовым «ножом»	3
5 Система со сдвиговым интерферометром	4
6 ДВФ – нелинейный фильтр Цернике	6
7 Задания по Лекции 13	7
8 Вопросы по Лекции 13	8

### 1 ЖК-транспаранты с оптическим управлением

Количество субапертур адаптивных зеркал – до  $10^2$ . Эффективное количество субапертур ЖК–транспарантов –  $10^4 \dots 10^5$ .

Феноменологическое уравнение для набега фазы  $u$ , вносимый ЖК–транспарантом (см. рис. 1):

$$T_0 \frac{\partial u}{\partial t} + u = l_d^2 \Delta u + G(I) \quad (1)$$

где  $T_0$  – постоянная времени транспаранта,  $l_d$  – характерная длина диффузии зарядов в фотопроводнике,  $G(I)$  – его статическая модуляционная характеристика (рис. 2),  $I$  – управляющее распределение интенсивности.

### 2 АОС с оптической обратной связью

Общие свойства систем адаптивной коррекции фазовых неоднородностей с оптической обратной связью (рис.3): компенсируют только достаточно мелкомасштабные искажения, крупномасштабные искажения ухудшают компенсацию, ограничение

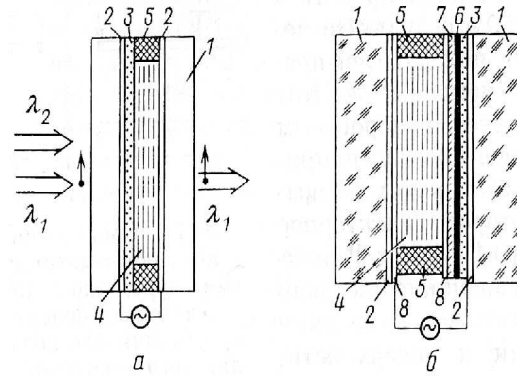


Рис. 1: Оптически управляемые прозрачные структуры на основе структуры фотопроводник–ЖК; а – с модуляцией проходящего света; б – с модуляцией отраженного света; 1 – подложки, 2 – прозрачные электроды, 3 – фотопроводящий слой, 4 – ЖК, 5 – прокладки, 6 – светоблокирующий слой, 7 – диэлектрические зеркала, 8 – ориентирующий слой.

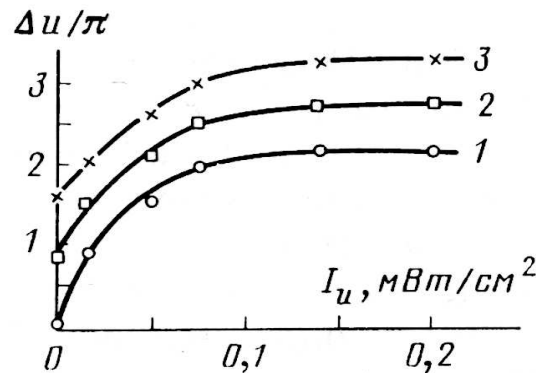


Рис. 2: Статические модуляционные характеристики оптически управляемого прозрачного материала на основе нематического ЖК (S – эффект); амплитуда управляющего напряжения: 1) – 3.2 В, 2) – 3.6 В, 3) – 4 В.

на масштаб корректируемых искажения снизу — диффузия зарядов в фотопроводнике

### 3 Взаимосвязь амплитудной и фазовой модуляции

Аналог из радиотехники: Амплитудная модуляция одномерного сигнала:

$$\begin{aligned}
 A(t) &= A_0(1 + q \sin \omega t) = A_0 \left\{ 1 + q \frac{q}{2i} [e^{i\omega t} - e^{-i\omega t}] \right\} \\
 &= A_0 \left[ 1 + \frac{q}{2} e^{i(\omega t - \pi/2)} + \frac{q}{2} e^{-i(\omega t - \pi/2)} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Фазовая модуляция:

$$B(t) = B_0 e^{iq \sin \omega t} = B_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(q) e^{im\omega t}
 \tag{3}$$

При малых  $q$  можно оставить члены с  $m=-1,0,1$  и воспользоваться асимптотической функций Бесселя:

## Liquid Crystal Spatial Light Modulator (LCLM)

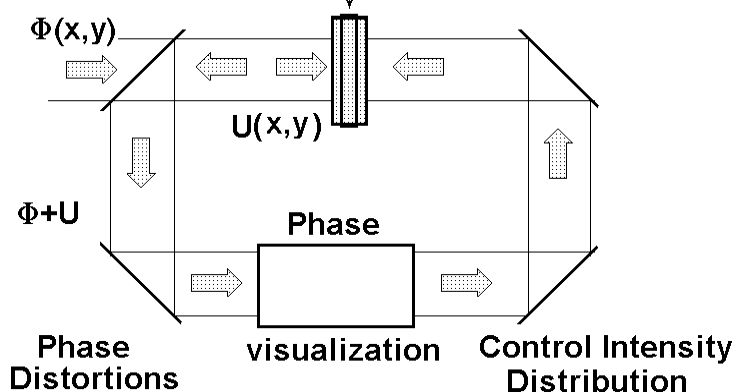


Рис. 3: Обобщенная схема адаптивной оптической системы компенсации фазовых искажений с оптически управляемым ЖК-транспарантом.

$$B(t) \approx B_0 \left[ 1 + \frac{q}{2} e^{i\omega t} - \frac{q}{2} e^{-i\omega t} \right] \quad (4)$$

Из сравнения (2) и (4) — при малой глубине модуляции отличие амплитудной модуляции от фазовой — лишь в сдвиге фаз гармоник на  $\pi$  ( $-1$ ) и в дополнительном сдвиге в  $\pi/2$ .

## 4 Система с фазовым «ножом»

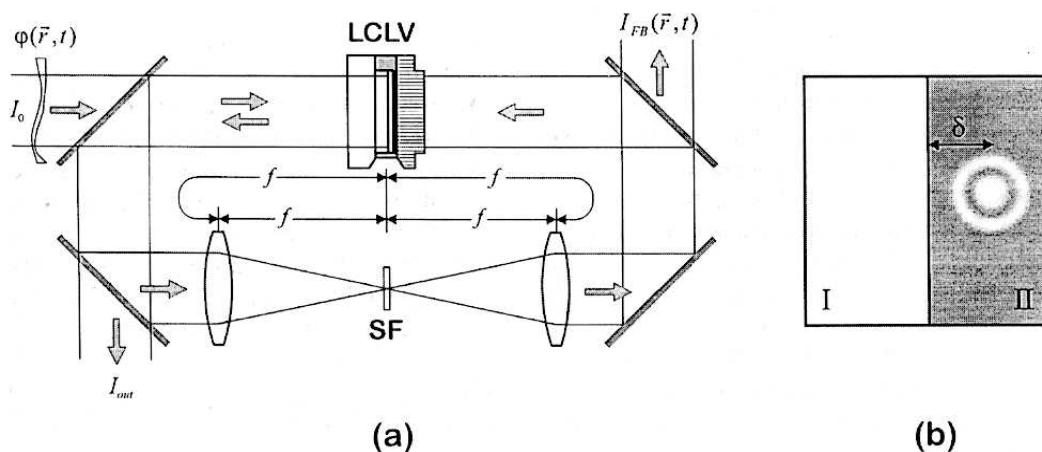


Рис. 4: Блок-схема адаптивной системы с фазовым ножом в Фурье-плоскости — а); вид пучка в Фурье-плоскости — б).

Подавление гармонических фазовых неоднородностей [2]. Входная и вносимая фаза:

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= a_0 \cos \nu x \\ u(x, t) &= b_1(t) \cos \nu x + b_2(t) \sin \nu x \\ \nu &> \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\delta}{F} \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $\delta > 0$  — поперечный сдвиг ножа в фокальной плоскости (рис. 4), благодаря чему визуализируются гармоники с частотами  $\nu > \nu_0$ . Модуляционный член в формуле (1) в линейном приближении:

$$G(I) = -I_0 \eta g(x, t) = -K g(x, t) \quad (6)$$

$\eta$  — коэффициент пропускания пассивных оптических элементов. Из (5) для  $g$  получим:

$$g(x, t) \approx \bar{g} + 2 [b_2 \cos \nu x - (a_0 + b_1) \sin \nu x] \quad (7)$$

Из (5) и (7) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} T_0 \frac{dc_1}{dt} = -\rho c_1 + 2K c_2 + \rho a_0 \\ T_0 \frac{dc_2}{dt} = -\rho c_2 - 2K c_1 \\ \nu > \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\delta}{F} \end{cases} \quad (8)$$

где

$$\rho = 1 + (\nu_0 l_d)^2, \quad c_1 = b_1 + a_0, \quad c_2 = b_2.$$

Устойчивая точка системы:

$$\bar{c}_1 = \frac{a_0}{1 + (2K/\rho)^2}, \quad \bar{c}_2 = -\frac{2K}{\rho} \frac{a_0}{1 + (2K/\rho)^2}. \quad (9)$$

Амплитуда выходной фазы:

$$\sigma_{out} = \sqrt{\frac{\bar{c}_1^2 + \bar{c}_2^2}{2}} = \frac{\sigma_{in}}{\sqrt{1 + (2K/\rho)^2}}, \quad \sigma_{in} = \frac{a_0}{\sqrt{2}}. \quad (10)$$

Для фазовых искажений с пространственными частотами  $1/l_d > \nu > \nu_0$  величина  $\rho \approx 1$  и амплитуда фазы выходного сигнала тем меньше, чем больше  $K$ .

**Ограничения:** малая амплитуда входных фазовых возмущений.

## 5 Система со сдвиговым интерферометром и голографическим фильтром

Интерференция двух плоских пучков на выходе клинообразной пластинки (выходная фокальная плоскость второй линзы):

$$I = (I_1 + I_2)(1 + \gamma_0 \cos \theta x). \quad (11)$$

Здесь  $I_1$  и  $I_2$  — интенсивности пучков,  $\gamma$  — контраст,  $\theta$  — пространственная частота:

$$\theta = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\cos \alpha} \sin \beta \quad (12)$$

$n$  — коэффициент преломления пластинки,  $\alpha$  — угол падения пучка на пластинку,  $\beta$  — угол между поверхностями пластинки–клина. Зарегистрируем распределение (11) на фотопластинку, проявим и “вернем пластинку на место”, получим коэффициент пропускания:

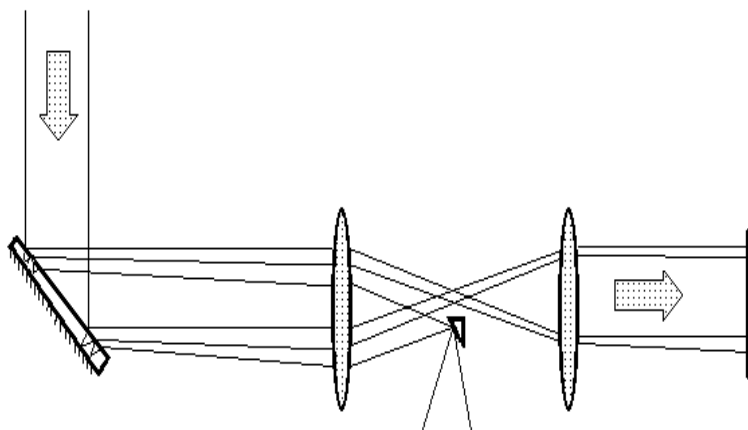


Рис. 5: Схема сдвигового интерферометра с голографическим фильтром [3]

$$B(x) = B_0(1 + \gamma_0 \cos \theta x). \quad (13)$$

Теперь интенсивность света за пластинкой:

$$I = B(x + \Delta x)(I_1 + I_2) \{1 + \gamma \cos [H(x + S) - H(x) + \theta x]\}, \quad (14)$$

где  $\Delta x$  — сдвиг пластинки в поперечном к пучку направлении,  $H$  — фаза пучка на входе интерферометра,  $S$  — поперечный сдвиг между пучками:

$$S \approx \frac{2d \sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \quad (15)$$

Усреднение за счет диффузии заряда в фотопроводнике даст:

$$\begin{aligned} \langle I \rangle &\approx B_0(I_1 + I_2)[1 + \gamma \cos(\Delta H + \Delta_0)], \\ \Delta_0 &= \theta \Delta x. \end{aligned} \quad (16)$$

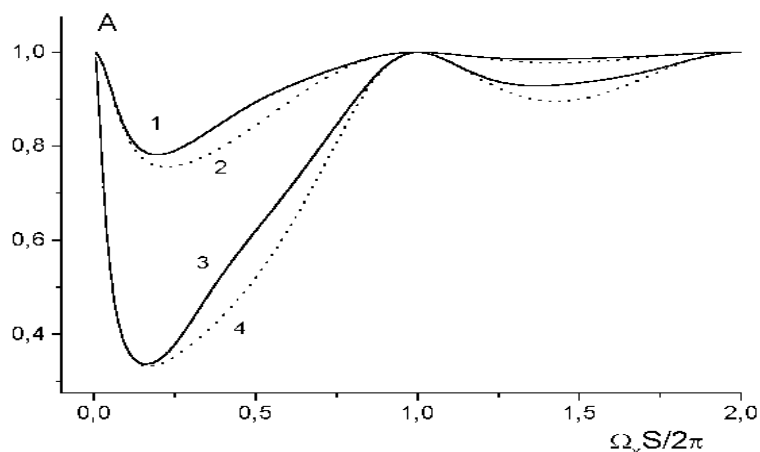


Рис. 6: Зависимость коэффициента подавления от пространственной частоты фазовых искажений. Пунктир — линейное приближение; сплошная линия — численное моделирование.  $K_0=1$  (1),  $K_0=5$  (2).

Для линейризованной системы без учета граничных условий стационарный коэффициент подавления гармонических фазовых искажений:

$$A = \left| \frac{\bar{U} + \bar{F}}{\bar{F}} \right| = \frac{D}{\sqrt{D^2 + 2K_0(K_0 + D)(1 - \cos \Omega_x S)}} \quad (17)$$

$$D = 1 + l_d^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)$$

$$K_0 = -kB_0(I_1 + I_2)\gamma^2 \sin \Delta_0.$$

$K_0$  – коэффициент обратной связи.

## 6 ДВФ – нелинейный фильтр Цернике

Принцип действия ДВФ Цернике (фильтр Цернике) – фазовый сдвиг 0-го порядка спектра светового излучения на  $\pm\pi/2$ .

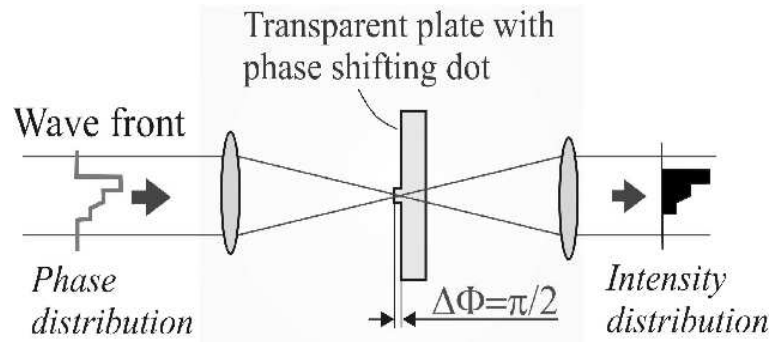


Рис. 7: Принцип действия фильтра Цернике

Запишем аналог ф-лы (4) для плоской волны с малой гармонической фазовой модуляцией:

$$U(kr) \cong U_0 \left[ 1 + \frac{q}{2}e^{ikr} - \frac{q}{2}e^{-ikr} \right] \Rightarrow U_0 \left[ 1e^{i\pi/2} + \frac{q}{2}e^{ikr} - \frac{q}{2}e^{-ikr} \right] =$$

$$U_0 e^{i\pi/2} \left[ 1 + \frac{q}{2}e^{i(kr - \pi/2)} + \frac{q}{2}e^{-i(kr + \pi/2 - \pi)} \right] = \quad (18)$$

$$U_0 e^{i\pi/2} \left[ 1 + \frac{q}{2}e^{i(kr - \pi/2)} + \frac{q}{2}e^{-i(kr - \pi/2)} \right] = U_0 e^{i\pi/2} [1 + q \sin kr].$$

Из сравнения (18) и (4) следует, что в результате получили амплитудную модуляцию световой волны. Общий фазовый множитель при переходе к интенсивности несуществен, поэтому, при  $q \ll 1$ :

$$|U|^2 \cong |U_0|^2 [1 + 2q \sin kr]. \quad (19)$$

Аналогично (18-19) для сдвига  $-\pi/2$  получим:

$$|U|^2 \cong |U_0|^2 [1 - 2q \sin kr]. \quad (20)$$

Нелинейный фильтр Цернике с оптически управляемым ЖК-транспарантом в фокальной плоскости линзы [4]. Важное достоинство – нечувствительность к наклонам ВФ. Основные характеристики:

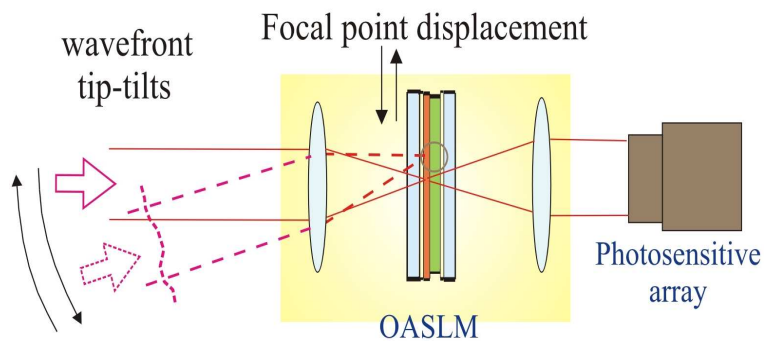


Рис. 8: Принцип действия нелинейного фильтра Цернике

- Интенсивность входного пучка – 0.4 ... 1.6 микроватт!
- Время отклика ЖК – 10мсек;
- Входная апертура – 10 см (фокусн. Расст. Объектива 50 см);
- Частота дифференциальных кадров – свыше 200 Гц;
- Разрешение – 128x128.

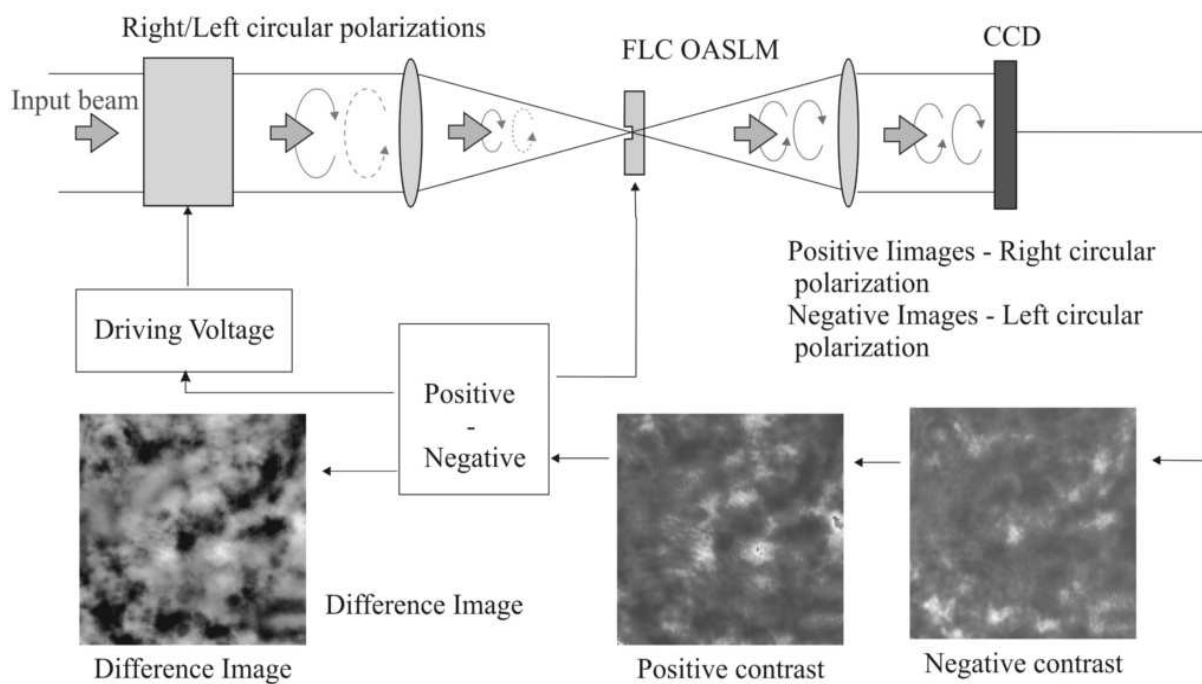


Рис. 9: Схема нелинейного фильтра Цернике

6

## 7 Задания по Лекции13

1. Вывести формулы (2) и (4).
2. Вывести уравнения (8) и найти решение (9).

## 8 Вопросы по Лекции 13

1. Обобщенная схема адаптивной системы с оптической обратной связью. Обзор методов «визуализации» фазовых искажений. Устройство и характеристики ЖК- транспаранта с оптическим управлением. Основное уравнение.
2. Устройство и характеристики АО системы с «фазовым ножом».
3. Устройство и характеристики АО системы со сдвиговым интерферометром и голографическим фильтром.
4. Принцип действия фильтра Цернике; особенности нелинейного фильтра Цернике.

## Список литературы

1. Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В. И. Управляемые оптические системы, М.: Наука, 1988, 248 с.
2. Larichev A. V., Nikolaev I. P., Costamagna S., Violino P. , "Advanced phase knife technique" Optics Communications, 121 (4), p.95-102, Dec 1995.
3. Иванов П. В., Корябин А. В., Шмальгаузен В. И., "Сдвиговый интерферометр в адаптивной системе с оптической обратной связью Квантовая Электроника, т.27, №1, 1999, 78-81; "Адаптивная система со сдвиговым интерферометром в цепи оптической обратной связи Вестник МГУ, серия 3. Физика. Астрономия, 2000, №4, 45-47.
4. Koryabin A. V., Vorontsov M. A., Beresnev L. A. "Wavefront measurements of distant phase-distorting layers along propagation path", Proc.SPIE, Vol. 5162, pp. 103-112, 2004 (San-Diego, CA, Aug. 2004)