

# Предварительное «обучение» самонакачивающегося петлевого ОВФ-зеркала на фоторефрактивном кристалле

Мехран Вахдани Могаддам, В.В.Шувалов

*На примере петлевого самонакачивающегося ОВФ-зеркала (СОВФЗ) на фоторефрактивном кристалле (ФРК) ВаТiО<sub>3</sub> показано, что формирование обращенной волны в СОВФЗ можно значительно ускорить за счет его предварительного «обучения». Для этого в СОВФЗ надо заранее подать вспомогательное (обучающее) оптическое поле, учитывающее некоторую информацию о свойствах входного сигнала, волновой фронт которого впоследствии придется обращать. Благодаря этому уже на этапе обучения в ФРК записываются статические решетки показателя преломления, наличие которых затем и обеспечивает значительно более быстрое (в 6–20 раз) формирование нужных для эффективного ОВФ сигнального излучения объемных решеток показателя преломления. Проведено моделирование нескольких вариантов статических и динамических процедур обучения СОВФЗ, позволяющее сравнить их эффективность.*

**Ключевые слова:** петлевое ОВФ-зеркало, фоторефрактивная нелинейность, динамические голограммы, формирование нелинейного отклика.

## 1. Введение

Фазовые искажения, обусловленные распространением лазерного излучения по неоднородным трассам, могут быть скомпенсированы с помощью ОВФ-зеркал (ОВФЗ) на фоторефрактивных кристаллах (ФРК) [1], сохраняющих работоспособность при интенсивности  $I$  непрерывного излучения вплоть до нескольких мВт/см<sup>2</sup> [2]. При этом так называемые самонакачивающиеся ОВФЗ (СОВФЗ) не требуют даже дополнительных источников излучения накачки [3, 4], являясь, по сути, беспороговыми (относительно  $I$ , но не констант нелинейного взаимодействия) параметрическими генераторами света. Например, в двойных СОВФЗ [5–7] одновременно обращаются две некогерентные [8], ортогонально поляризованные [9] либо различающиеся по несущим частотам [10] световые волны.

Развитие генерации происходит за счет самоорганизации (фазового перехода) в системе «нелинейная среда – световое поле» [11, 12]. В этом смысле ситуация оказывается похожей на процесс формирования излучения с обращенным волновым фронтом в ВКР- и ВРМБ-ОВФЗ [13]. Вполне естественно поэтому, что, хотя стационарные значения коэффициента нелинейного отражения  $R$  и интеграла перекрытия  $H$  в СОВФЗ и достигают при этом 0.8–0.9 и более 0.9 соответственно, длительность этапа формирования обращенной волны оказывается весьма большой, превышая десятки секунд (см., напр., [14]).

Отметим, что хорошо известные способы повышения скорости записи динамических голограмм в ФРК, основанные на вариациях параметров и геометрии задачи

[14], увеличении уровня затравочных шумов [13, 15], использовании частотных сдвигов [16, 17], а также внешнего постоянного [18, 19] или переменного [20–22] электростатического поля, оказываются в этой ситуации практически неприменимыми. Их реализация либо резко снижает эффективность ( $R$  и  $H$ ) СОВФЗ, либо приводит к развитию неустойчивостей и самовозбуждению, т.е. к реализации сложных автоколебательных режимов генерации с характерными временами вплоть до нескольких часов и суток [2].

Ниже, на примере петлевого СОВФЗ на фоторефрактивном кристалле ВаТiО<sub>3</sub> с использованием расчетных процедур, описанных в [23, 24], мы покажем, что процесс формирования обращенной волны в СОВФЗ можно существенно ускорить за счет процедуры его предварительного «обучения». Для этого в СОВФЗ надо заранее подать вспомогательное (обучающее) оптическое поле, благодаря которому в ФРК будут записаны некие динамические голограммы, наличие которых впоследствии и обеспечит существенно более быстрое формирование нужных для эффективного ОВФЗ сигнального излучения объемных решеток показателя преломления. Естественно, что процедура такого обучения СОВФЗ не может быть универсальной, и для ее практической реализации (оптимального выбора пространственной структуры обучающего поля) необходимо заранее иметь определенную информацию о некоторых свойствах сигнального излучения, волновой фронт которого придется обращать.

Идея обучения, рассматриваемая нами ниже, тесно смыкается с задачами распознавания образов [25, 26], разработки оптических корреляторов [27] и элементов ассоциативной памяти [28–30] на базе СОВФЗ. В одном из рассматривавшихся ранее вариантов реализации подобных устройств авторами [30] была апробирована возможность одновременной голографической записи в ФРК нескольких разделенных во времени (а по мнению самих авторов [30] и в пространстве) входных изображе-

Мехран Вахдани Могаддам, В.В.Шувалов. Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: vsh@vsh.phys.msu.ru

ний. В экспериментах использовалось СОВФЗ на фоторефрактивном кристалле КНСВН:Cu. На этапе записи (в используемых нами терминах – обучения) два оптических изображения – «позитивное» и «негативное», формируемых с помощью жидкокристаллического транспаранта и отличающихся друг от друга полной инверсией контраста, поочередно сменяли друг друга на входе СОВФЗ с частотой  $f_m = 30$  кадров в секунду. При этом период смены изображений  $\tau_m = 1/f_m$  был умышленно выбран гораздо меньшим, чем время формирования и стирания динамических голограмм в ФРК. По окончании переходного процесса этапа записи начинался этап чтения (в наших терминах – старт процесса ОВФ сигнального излучения), при котором на СОВФЗ подавалось некое новое входное изображение, формируемое с помощью того же транспаранта.

Основной интерес для нас представляют два полученных авторами [30] результата. Во-первых, ими было установлено, что на самом этапе записи по окончании всех переходных процессов пространственная структура выходного сигнала СОВФЗ в каждый момент времени не совпадает ни с одним из чередующихся входных изображений. Во-вторых, было показано, что на этапе чтения время формирования стационарного нелинейного отклика СОВФЗ чрезвычайно резко меняется с изменением степени корреляции нового входного изображения с изображениями, использованными при записи. Хотя после завершения переходного процесса этапа чтения пространственная структура выходного сигнала СОВФЗ всегда точно соответствовала ОВФ нового входного изображения, в тех случаях, когда пространственная структура последнего совпадала со структурой одного из записываемых полей, нелинейный отклик СОВФЗ формировался на 2–3 порядка быстрее. Однако ответа на естественный вопрос о необходимой степени корреляции нового входного изображения с записываемыми (обучающими) полями и об оптимальном построении самой процедуры обучения СОВФЗ авторами [30] дано не было.

## 2. Модель петлевого СОВФЗ и схема численного расчета

Геометрия рассматриваемой модельной задачи иллюстрируется на рис.1,а. Как и в [23], считалось, что «прямая» и «обратная» световые волны с амплитудами  $A_{f,b}$  и волновыми векторами  $\mathbf{k}_{f,b} = \{k_x, \pm k_z\}$  распространяются от противоположных граней ФРК (плоскости  $z = 0$  и  $z = L$ ) под небольшим ( $k_z \gg k_x$ ) углом  $\alpha/2$  к положительному (отрицательному) направлению оси  $z$  соответственно. Полагалось, что волна  $A_b$  формируется оптической системой из двух поворотных зеркал и линзы. При этом зеркала меняют направление распространения волны  $A_f$  на угол  $(\pi - \alpha)$ , а линза без масштабирования отображает распределение поля  $A_f$  на выходную грань ФРК. За счет этого выполнено граничное условие  $A_b(x, z = L, t) = A_f(-x, z = L, t) \exp(-ik_x \sin \alpha)$ .

Как и в [23, 24], кинетика нелинейного отклика ФРК рассчитывалась на основе системы микроскопических уравнений [31], полученной для двумерного случая (так называемые щелевые пучки [32]) с учетом только просветных динамических голограмм (вектор  $\mathbf{k}$  решеток показателя преломления  $\delta\eta(x, z, t)$ , записываемых в ФРК, направлен вдоль оси  $x$ ) в пренебрежении фотовольтаическим эффектом [1, 14, 18]. Считалось, что внешнее элект-

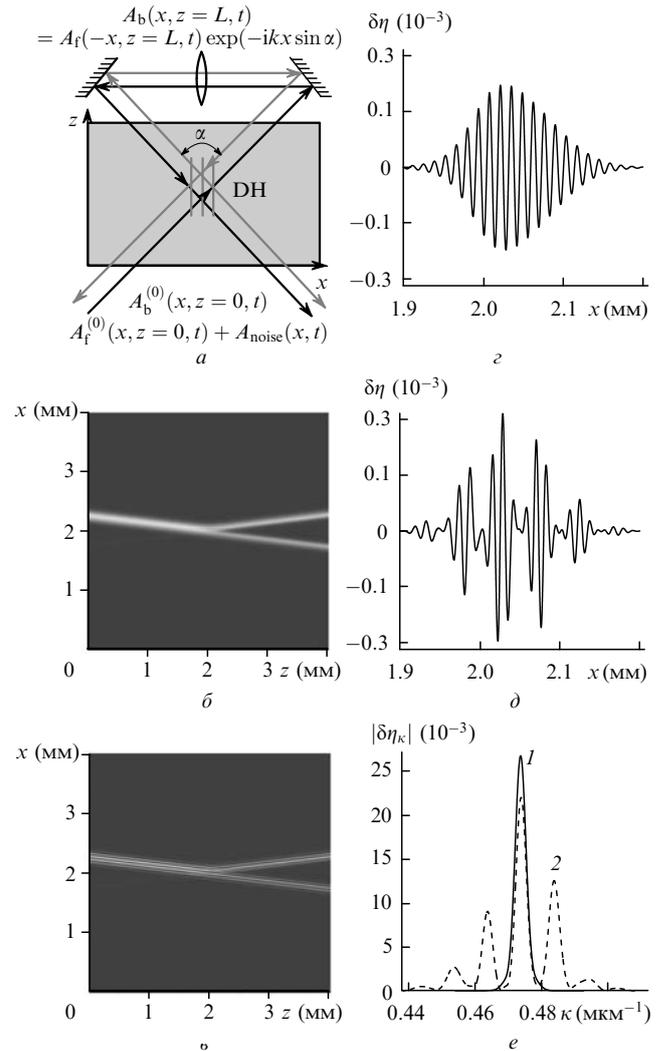


Рис.1. Петлевое СОВФЗ. Геометрия взаимодействия волн  $A_{f,b}$  (а) и карты (линейная шкала серого цвета) распределений  $I_b(x, z)$  (б, в),  $\delta\eta(x)$  (г, д) и их спектры  $\delta\eta_\kappa(\kappa)$  (е) в сечении  $z = L/2$  динамических голограмм ДН при стационарном ОВФ гауссова пучка без гармонической модуляции входного поля  $A_f(x, z = 0)$  с пространственным периодом  $A_m = 100$  мкм ( $I_{max} = 35$  мВт/см<sup>2</sup>, рис.б, г и кривая 1 на рис.е) и при ее наличии ( $I_{max} = 55$  мВт/см<sup>2</sup>, рис.в, д и кривая 2 на рис.е). Здесь и далее диаметр пучка  $2\rho_0 = 230$  мкм,  $\alpha = 14^\circ$ ,  $\langle I_{noise} \rangle / I_{max} = 10^{-4}$ ,  $E_0 = 1$  В/см.

ростатическое поле  $E_0$  в ФРК направлено вдоль оси  $x$  и сравнительно невелико ( $E_0 = 1$  В/см). Решаемая задача переводилась в класс самосогласованных с учетом связи распределений интенсивности  $I_{f,b}(x, z, t) = |A_{f,b}(x, z, t)|^2$  с внутрикристаллическим полем  $E_{sc}(x, t) \propto \delta\eta(x, z, t)$ , заданной стандартными укороченными волновыми уравнениями относительно амплитуд  $A_{f,b}(x, z, t)$  взаимодействующих волн. Укороченные уравнения записывались в параксиальном приближении в пренебрежении пространственно однородной добавкой к показателю преломления ФРК  $\eta$ , обусловленной внешним полем  $E_0$ . Как и в [23, 24], рассматривалась ситуация, при которой полная интенсивность определяется суммой интенсивностей  $I(x, z, t) = I_f(x, z, t) + I_b(x, z, t)$ , т. е. случай некогерентных либо ортогонально-поляризованных встречных волн.

При решении самосогласованной задачи проводился численный расчет эволюции распределений  $A_{f,b}(x, z, t)$  и  $\delta\eta(x, z, t)$  во времени. Все переменные описывались по сетке с числом узлов на апертуре ФРК, равным 8192 (по

ширине  $h = 4$  мм) и 512 (по длине  $l = 4$  мм). Начальные условия соответствовали «включению» ОВФЗ в момент времени  $t = 0$ . После этого ( $t \geq 0$ ) входное поле  $A_f(x, z = 0, t)$  определялось как суперпозиция полезного (обучающего или информационного) сигнала  $A_f^{(0)}(x, z = 0, t)$  и  $\delta$ -коррелированного (с учетом шага по  $x$  и  $t$ ) шума  $A_{\text{noise}}(x, t)$ , средняя интенсивность  $\langle I_{\text{noise}} \rangle = \langle |A_{\text{noise}}(x, t)|^2 \rangle$  которого во всех реализациях составляла  $10^{-4}$  от максимальной интенсивности  $I_{\text{max}} = 35$  либо  $55$  мВт/см<sup>2</sup> полезного сигнала (см. ниже). Задача решалась в рамках адиабатического приближения с использованием метода разделения по физическим факторам и процедуры БПФ [33, 34]. Как и в [23, 24], шаг во времени ( $\Delta t \approx 0.15$  с) выбирался много меньшим, чем время эволюции состояния ФРК, а основная часть параметров задачи не варьировалась и их значения определялись выбранным типом ФРК (BaTiO<sub>3</sub>, см. табл.1 в [23, 24]). Период записываемых в ФРК динамических голограмм задавался углом схождения пучков  $\alpha = 14^\circ$ , который был также фиксирован.

Пространственное распределение излучения с длиной волны  $\lambda = 0.514$  мкм на входе в ФРК определялось как

$$A_f^{(0)}(x, z = 0, t) = G(x)M(x, t), \tag{1}$$

где функции  $G(x)$  и  $M(x, t)$  описывали гауссову огибающую светового пучка (диаметр пучка по полю  $2\rho_0 = 230$  мкм) и его пространственную (информационную) модуляцию. Именно мгновенное изменение  $M(x, t)$  в моменты времени  $t = 0$ , отвечающие началу ( $M(x, t < 0) \equiv 0 \rightarrow M(x, t \geq 0) \neq 0$ ) и окончанию ( $M(x, t < 0) \neq 0 \rightarrow M(x, t \geq 0) \equiv 0$ ) этапа обучения СОВФЗ (в использованной записи учтено, что в эти моменты отсчет времени начинался заново), и моделировало интересующий нас переходной процесс, ускорение которого являлось основной целью настоящей работы. Конкретный вид функции  $M(x, t)$  в разных реализациях был разным и будет описан несколько позднее.

Поскольку все параметры задачи были нами ранее оптимизированы [23], СОВФЗ прекрасно обращало волновой фронт входного пучка как в отсутствие гармонической информационной модуляции ( $M(x, t \geq 0) = 1$ ), так и при ее наличии ( $M(x, t \geq 0) = \sin(2\pi\kappa_m x)$ ). На рис.1,б,в в градациях серого цвета (более темные места соответствуют меньшим значениям  $I$ ) показаны карты распределения  $I_b(x, z)$  в ФРК после окончания переходного процесса ( $t = 150$  с) в этих двух случаях. Распределение  $I_b(x, z)$  на рис.1,б соответствует периоду пространственной модуляции  $A_m = \kappa_m^{-1} = 100$  мкм. При этом в области самопересечения прямого и обратного пучков формировались стационарные динамические голограммы ДН (рис.1,а). Их распределения ( $\delta\eta_\kappa(x, z)$ , рис.1,в,з) и пространственные спектры ( $\delta\eta_\kappa(\kappa)$ , рис.1,е) для сечения  $z = L/2$  в отсутствие гармонической модуляции (рис.1,з и сплошная линия 1 на рис.1,е) и при ее наличии ( $A_m = 100$  мкм для рис.1,д и штриховая линии 2 на рис.1,е) иллюстрирует рис.1,з-е. Положения максимумов на зависимостях  $\delta\eta_\kappa(\kappa)$  соответствуют  $\alpha = 14^\circ$  и указанной частоте пространственной модуляции  $\kappa_m$  входного сигнала.

Кинетика коэффициента нелинейного отражения СОВФЗ

$$R(t) = \int_0^{H/2} |A_b(x, z = 0, t)|^2 dx / \int_0^{H/2} |A_f(x, z = 0, t)|^2 dx \tag{2}$$

и интеграла перекрытия

$$H(t) = \left| \int_0^{H/2} A_f(x, z = 0, t) A_b^*(x, z = 0, t) dx \right|^2 \times \left[ \int_0^{H/2} |A_f(x, z = 0, t)|^2 dx \int_0^{H/2} |A_b(x, z = 0, t)|^2 dx \right]^{-1}, \tag{3}$$

а также их нормированного произведения  $RH$ , характеризующего мгновенную долю мощности обращенной компоненты выходного поля на входной грани ФРК относительно ее максимально возможного в рассматриваемой реализации значения  $(RH)_{\text{max}}$ , для этих двух случаев иллюстрируется на рис.2. Легко убедиться, что, хотя максимальные значения указанных параметров  $R_{\text{max}} \approx 0.83$  и  $H_{\text{max}} > 0.95$ , интервал времени, нужный для выхода СОВФЗ на стационарный режим генерации, оказывается при этом очень длительным. Определив его через время  $\tau_t$ , необходимое для достижения параметром  $RH$  величины, равной 90 % от  $(RH)_{\text{max}}$ , получим  $\tau_t = 60$  и  $65$  с для случаев отсутствия (рис.2,а-в) и наличия (рис.2,з-е) гармонической информационной модуляции. Отметим, что, как и в [23, 24], при расчете зависимостей  $R(t)$  и  $H(t)$  выходное поле  $A_b(x, z = 0, t)$  предварительно пропускалось через пространственный фильтр, выделяющий ту

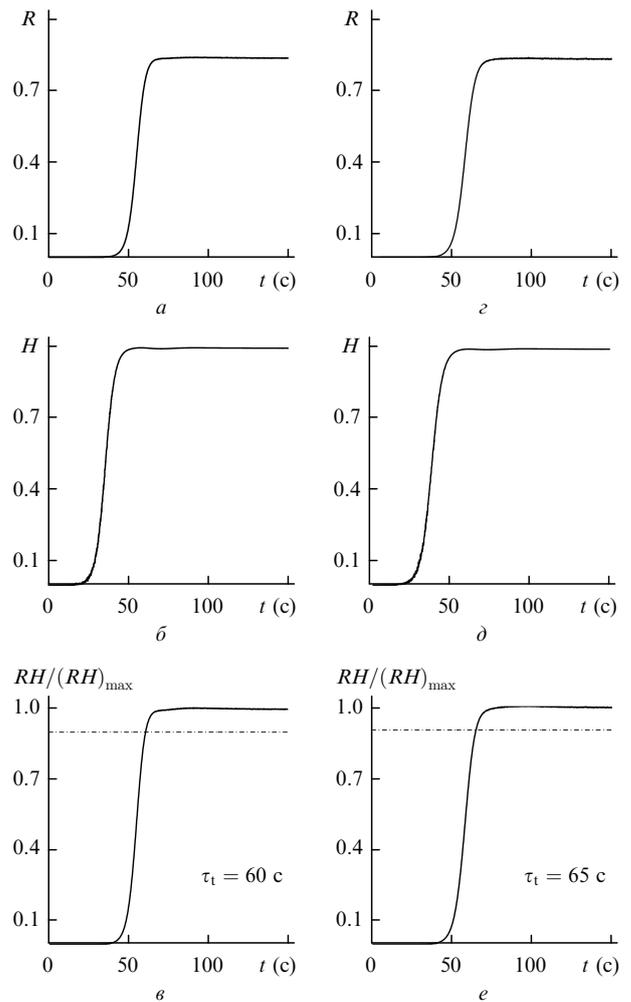


Рис.2. Переходной процесс для  $R$  (а, д),  $H$  (б, е) и  $RH$  (в, е) при обращении гауссова пучка без пространственной гармонической модуляции  $M(x)$  поля  $A_f(x, z = 0)$  с периодом  $A_m = 100$  мкм ( $I_{\text{max}} = 35$  мВт/см<sup>2</sup>, а-в) и при ее наличии ( $I_{\text{max}} = 55$  мВт/см<sup>2</sup>, з-е).

половину линейной апертуры ФРК, которая соответствовала положению максимума интенсивности входного пучка  $A_f$  на входной плоскости (см. (2) и (3)). За счет этого параметр  $R$  характеризовал мощность той части входной волны, которая в данный момент времени  $t$  отражалась от динамической голограммы, а  $H$  – степень ее корреляции со входным полем.

### 3. Статическое обучение СОВФЗ

Как уже отмечалось, процедура обучения СОВФЗ не может быть универсальной, т. к. ее реализация (оптимальный выбор пространственной структуры обучающего поля) заведомо требует учета ряда свойств информационного сигнала, волновой фронт которого впоследствии придется обрабатывать. Поэтому ниже мы будем полагать, что почти все его характеристики заранее известны. Будем считать, что после старта этот сигнал представляет собой описанный выше гауссов пучок с промодулированной по гармоническому закону амплитудой. Однако для функции  $M(x, t \geq 0) = \sin(2\pi\kappa_m x + \varphi)$  (здесь  $t = 0$  – момент старта) в (1) неизвестны ее начальная фаза  $\varphi$  и пространственный период  $\Lambda_m = \kappa_m^{-1}$ . Отметим сразу, что все приведенные ниже результаты будут относиться к наилучшему с точки зрения реализованного значения  $\tau$  случаю выбора  $\varphi$  в каждой реализации и к трем возможным значениям  $\Lambda_m$  после старта – 100, 90 и 80 мкм.

С этой точки зрения конечное стационарное состояние ФРК, т. е. распределение  $\delta\eta(x, z)$  при  $\Lambda_m = 100$  мкм в момент времени  $t = 150$  с, показанное на рис.1,е, само может рассматриваться как некое новое начальное (относительно момента  $t = 0$  старта процесса ОВФ) состояние СОВФЗ, реализованное за счет обучения последнего гауссовым пучком с промодулированной по гармоническому закону амплитудой поля. Поскольку при таком обучении не учитывалась возможность существования разных фаз  $\varphi$  у информационного сигнала, то вряд ли можно было ожидать, что эта процедура окажется эффективной. Это подтвердили и результаты проведенного нами моделирования. Переходные процессы для  $R$ ,  $H$  и  $RH$  в случае пучка, у которого в момент  $t = 0$  фаза  $\varphi$  информационной модуляции  $M(x)$  скачком сдвигается на  $\pi/2$  и одновременно меняется  $\Lambda_m$  ( $\Lambda_m = 100, 90$  и  $80$  мкм для кривых 1, 2 и 3) иллюстрируют рис.3,а–в. Легко убедиться, что, хотя для достижения параметром  $RH$  величины, равной 90 % от  $(RH)_{\max}$ , нужно несколько меньшее, чем раньше, время ( $\tau_{1-3} = 39, 27$  и  $20$  с при  $\Lambda_m = 100, 90$  и  $80$  мкм), полученный вследствие предварительного обучения СОВФЗ выигрыш в величине  $\tau$  оказывается незначительным. Однако существенно более важным является то, что этот выигрыш заметно уменьшается при совпадении значений  $\Lambda_m$  обучающего и обрабатываемого сигналов. Это явно свидетельствует о нецелесообразности использования данной процедуры с точки зрения предварительной записи в СОВФЗ начальной информации об ожидаемом значении  $\Lambda_m$  информационного сигнала.

Поскольку предварительная информация об ожидаемом значении  $\Lambda_m$  в описанной выше реализации процедуры обучения СОВФЗ оказалась вредной, можно было ожидать, что при прочих равных условиях ее исключение на этапе обучения должно сыграть позитивную роль. Это и подтвердили результаты нашего расчета. Переходные процессы при установлении  $R$ ,  $H$  и  $RH$  для пучка с гладкой гауссовой огибающей, у которого в момент  $t = 0$

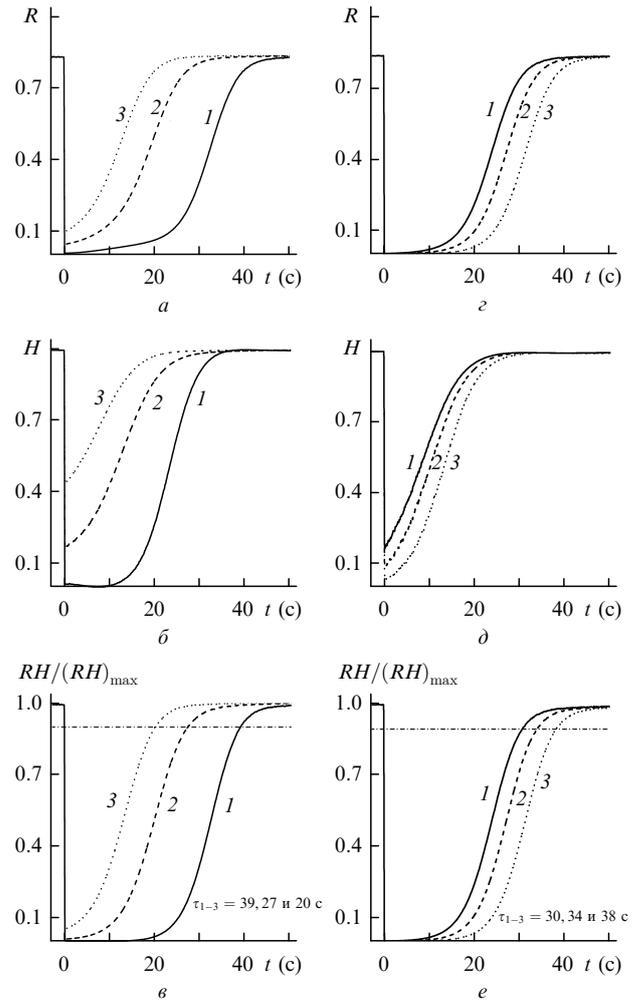


Рис.3. Обучение СОВФЗ пространственно модулированным пучком ( $\Lambda_m = 100$  мкм, а–в) и пучком без модуляции (z–e). Переходной процесс для  $R$  (а, z),  $H$  (б, d) и  $RH$  (e, e) после обучения. При старте (момент  $t = 0$ ) фаза  $M(x)$  сдвигается на  $\pi/2$  и меняется  $\Lambda_m$  ( $\Lambda_m = 100, 90$  и  $80$  мкм для кривых 1, 2 и 3).

значение  $I_{\max}$  скачком меняется от 35 до 55 мВт/см<sup>2</sup> (при сохранении полной мощности пучка) и одновременно появляется гармоническая модуляция  $M(x)$  амплитуды светового поля с пространственным периодом  $\Lambda_m = 100, 90$  и  $80$  мкм иллюстрирует рис.3, z–e (кривые 1, 2 и 3). Легко заметить, что общий характер зависимости  $\tau(\Lambda_m)$  становится здесь противоположным ( $\tau_{1-3} = 30, 34$  и  $38$  с при  $\Lambda_m = 100, 90$  и  $80$  мкм). Однако выигрыш, полученный за счет обучения СОВФЗ, и в этом случае оказывается совсем небольшим, что говорит о необходимости использования каких-то других процедур, позволяющих записать в ФРК информацию об ожидаемом значении  $\Lambda_m$  (но не  $\varphi$ ) при его тренировке.

### 4. Динамическое обучение СОВФЗ

Общую схему подобных процедур построить совсем несложно, если учесть следующие простые соображения. Поскольку при обучении СОВФЗ нам нужно записать в ФРК информацию об ожидаемом значении  $\Lambda_m$ , на этом этапе надо подавать в ФРК излучение, модулированное именно на соответствующей  $\Lambda_m$  пространственной частоте. В то же время, т. к. информация о фазе  $\varphi$  пространственной модуляции сигнала, который затем придется

обращать, у нас отсутствует, во время обучения запоминать значение фазы  $\varphi$  функции  $M(x)$  нельзя. С учетом большой инерционности ФРК наиболее простым способом одновременного выполнения этих двух требований является быстрое изменение фазы функции  $M(x)$  во времени, при котором  $\varphi$  за время обучения много раз пробегает все свои возможные значения.

Именно такая ситуация и будет реализована, например, если на этапе обучения задать закон модуляции амплитуды входного сигнала в виде  $M(x, t) = \sin[2\pi(\kappa_m x + f_m t)]$ , где частота модуляции  $f_m$ , характеризующая скорость линейного нарастания фазы  $\varphi$  во времени, выбрана настолько большой, что записываемые в ФРК решетки показателя преломления  $\delta\eta(x, z)$  не успевают отслеживать ее изменение. Результат моделирования соответствующей процедуры иллюстрирует рис.4. Как следует из рис.4,а-в, этап обучения СОВФЗ ( $A_m = 100$  мкм, фаза  $\varphi$  меняется на  $2\pi$  за 2 с) оказывается при этом весьма длительным. Переходной процесс для  $R$  (рис.4,а),  $H$  (рис.4,б) и  $RH$  (рис.4,в) продолжается теперь почти 200 с и, что самое важное, даже после его окончания значения  $R$ ,  $H$  и  $RH$  продолжают быстро осциллировать во времени (см. вставки на рис.4,а,б,в). По сути наблюдаются вынужден-

ные колебания значений всех перечисленных выше параметров на частоте  $f_m$  изменения внешней «силы»  $M(x, t)$ . Отметим здесь, что амплитуда вынужденных колебаний  $R$  при этом очень мала.

Переходные процессы для  $R$ ,  $H$  и  $RH$  после такого обучения в случае гауссова пучка, у которого в момент старта ( $t = 0$ ) фаза  $\varphi$  информационной модуляции  $M(x, t)$  скачком сдвигается на  $\pi/2$  и одновременно меняется  $A_m$  ( $A_m = 100, 90$  и  $80$  мкм для кривых 1, 2 и 3) иллюстрирует рис.4,з-е. Видно, что для достижения параметром  $RH$  величины, равной 90 % от  $(RH)_{\max}$ , теперь нужно существенно меньшее, чем раньше, время ( $\tau_{1-3} = 16, 17$  и  $22$  с при  $A_m = 100, 90$  и  $80$  мкм) и полученный за счет предварительного обучения СОВФЗ выигрыш в значении  $\tau$  оказывается в этом случае существенно больше.

Ясно, что описанная нами выше динамическая процедура обучения не является единственной хотя бы потому, что быстро менять фазу  $\varphi$  информационной модуляции сигнала во времени можно самыми разными способами. В качестве еще одного варианта такого обучения нами была рассмотрена ситуация с быстрыми осцилляциями  $\varphi$ . При этом на этапе обучения СОВФЗ закон модуляции амплитуды входного сигнала задавался в виде  $M(x, t) = \sin\{2\pi[\kappa_m x + \sin(f_m t)/2]\}$  при тех же значениях  $f_m = 0.5$  Гц и  $A_m = 100$  мкм. Результат моделирования представлен на рис.5. Видно (рис.5,а-в), что в этом случае этап обучения СОВФЗ оказывается гораздо менее длительным. Переходной процесс для  $R$  (рис.5,а),  $H$  (рис.5,б) и  $RH$  (рис.5,в) продолжается теперь менее 120 с. Однако и здесь после его окончания значения  $R$ ,  $H$  и  $RH$  продолжают быстро осциллировать во времени. Размах этих вынужденных колебаний оказывается еще большим, а сами они (см. вставки на рис.5,а, б, в) перестают быть гармоническими. Однако на обсуждении этого вопроса мы остановимся чуть позднее.

Переходные процессы для  $R$ ,  $H$  и  $RH$  после процедуры такого обучения для пучка, у которого в момент старта ( $t = 0$ ) фаза  $\varphi$  модуляции  $M(x, t)$  сдвигается на  $\pi/4$  и одновременно меняется  $A_m$  ( $A_m = 100, 90$  и  $80$  мкм для кривых 1, 2 и 3) показаны на рис.5,з-е. Видно, что теперь для достижения параметром  $RH$  величины, равной 90 % от  $(RH)_{\max}$ , нужно еще меньшее, чем раньше, время  $\tau$  ( $\tau_{1-3} = 3, 6$  и  $10$  с при  $A_m = 100, 90$  и  $80$  мкм), а полученный за счет обучения СОВФЗ выигрыш в значении  $\tau$  оказывается еще больше.

Для того чтобы понять, почему две описанные выше процедуры столь разительно отличаются друг от друга с точки зрения конечного результата, остановимся подробнее на вопросе о том, что же происходит с выходным полем СОВФЗ на этапе обучения. На рис.6 представлены отвечающие вынужденным колебаниям  $R$ ,  $H$  и  $RH$  периодические изменения пространственных распределений амплитуд  $A_{f,b}(x, z = 0)$  (рис.6,а,в,д) и фаз  $\varphi_{f,b}(x, z = 0)$  (рис.6,б,з,е) для входного и выходного (сплошные и штриховые линии) полей СОВФЗ в три последовательных момента времени, соответствующих минимуму (рис.6,а,б), максимуму (рис.6,в,з) и следующему минимуму (рис.6,д,е) зависимости  $H(t)$  в случае линейного нарастания фазы  $\varphi(t)$ . Видно, что пространственно модулированная часть поля  $A_b(x, z = 0)$  отслеживает сдвиги максимумов распределения  $A_f(x, z = 0)$ . Причем в те моменты времени, когда  $H(t)$  имеет минимальные значения, волновой фронт поля  $A_b(x, z = 0)$  наклоняется, а глубина модуляции распределения его амплитуды падает. С учетом ма-

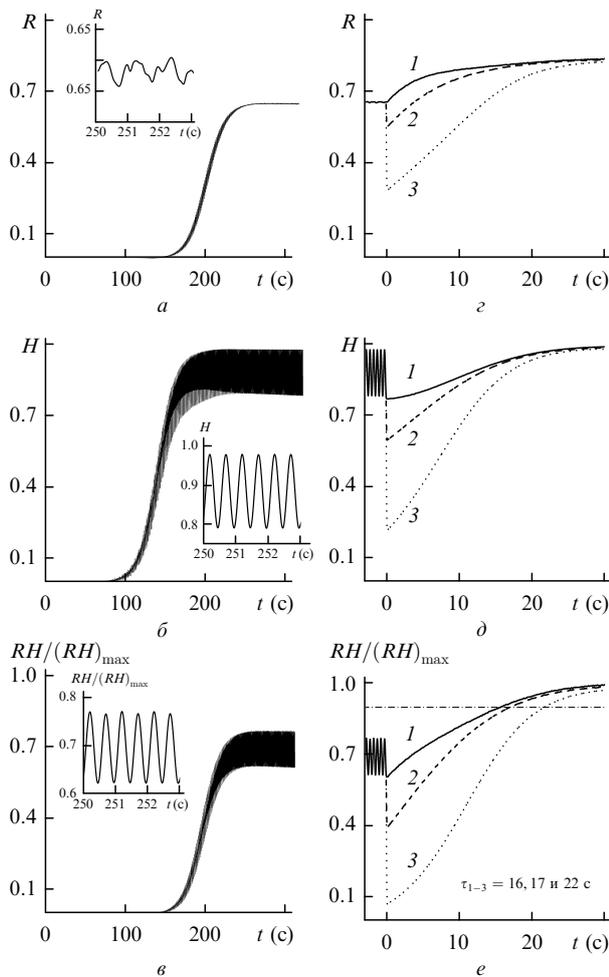


Рис.4. Обучение СОВФЗ пучком с линейно растущей по  $t$  фазой  $M(x)$  ( $A_m = 100$  мкм, фаза меняется на  $2\pi$  за 2 с). Переходной процесс для  $R$  (а, з),  $H$  (б, д) и  $RH$  (в, е) на этапе обучения (а, б, в) и после старта (з, д, е). На вставках рис.а, б и в показан характер установившихся вынужденных колебаний  $R$ ,  $H$  и  $RH$ . При старте фаза  $M(x)$  сдвигается на  $\pi/2$  и меняется  $A_m$  ( $A_m = 100, 90$  и  $80$  мкм для кривых 1, 2 и 3 на рис.з, д, е).

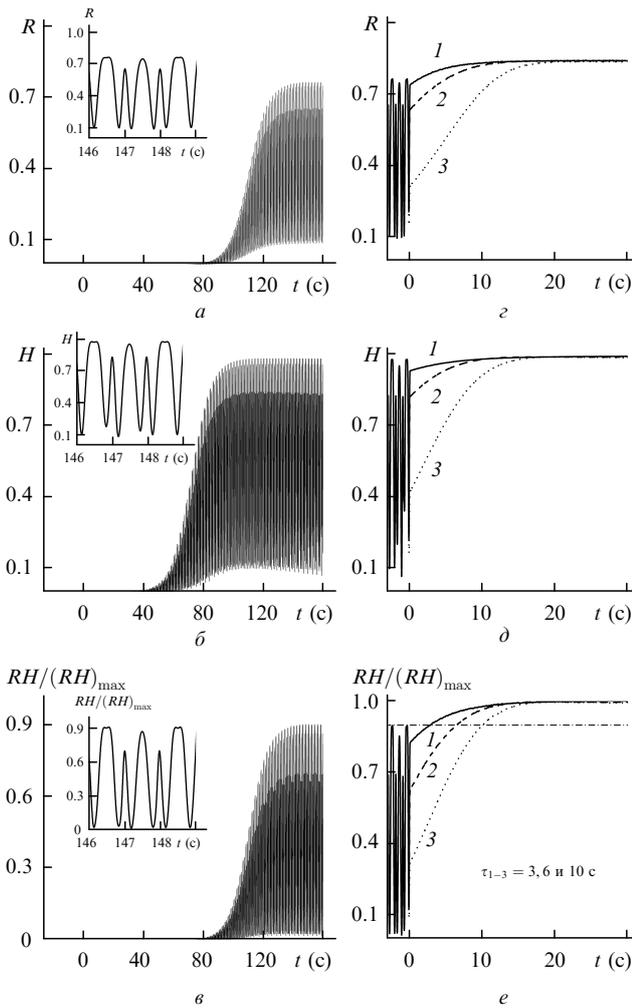


Рис.5. Обучение СОВФЗ пучком с осциллирующей по  $t$  фазой  $M(x)$  ( $A_m = 100$  мкм, размах и период колебаний фазы  $2\pi$  и  $2$  с). Переходной процесс для  $R$  ( $a, z$ ),  $H$  ( $б, д$ ) и  $RH$  ( $в, е$ ) на этапе обучения ( $a, б, в$ ) и после старта (момент  $t = 0$  на рис. $z, д, е$ ). На вставках рис. $a, б$  и  $в$  показан характер установившихся вынужденных колебаний  $R$ ,  $H$  и  $RH$ . При старте фаза  $M(x)$  сдвигается на  $\pi/4$  и меняется  $A_m$  ( $A_m = 100, 90$  и  $80$  мкм для кривых 1, 2 и 3 на рис. $z, д$  и  $е$ ).

лой амплитуды вынужденных колебаний  $R$  это значит, что в отраженном от динамической голограммы ДН поле постоянно присутствуют две компоненты. Одна из них – гауссов пучок с гладкой огибающей и плоским волновым фронтом – «качается» по направлению распространения, а вторая – пространственно модулированная – точно отслеживает распределение амплитуд  $A_f(x, z = 0)$ . Соотношение вкладов этих двух компонент также осциллирует во времени. Все это свидетельствует о крайне малой угловой селективности решетки  $\delta\eta(x, z)$  показателя преломления, записанной в ФРК в процессе обучения.

Случай быстрых гармонических осцилляций  $\varphi(t)$  (см. рис.5) оказывается с этой точки зрения гораздо проще. Характер временной эволюции пространственных распределений  $A_{f,b}(x, z = 0)$  (рис.7, $a, в, д$ ) и  $\varphi_{f,b}(x, z = 0)$  (рис.7, $б, z, e$ ) входного и выходного (сплошные и штриховые линии) полей во времени, показанных на рис.7 для трех последовательных моментов времени (максимум (рис.7, $a, б$ ), минимум (рис.7, $в, z$ ) и следующий максимум (рис.7, $д, e$ ) зависимости  $H(t)$ ), с учетом большой амплитуды вынужденных колебаний  $R$ , напротив, свидетельствует о чрезвычайно высокой угловой селективности запи-

санной в ФРК при обучении СОВФЗ решетки  $\delta\eta(x, z)$  показателя преломления.

Существенное различие между двумя рассмотренными нами выше динамическими процедурами иллюстрирует рис.8. Распределения показателя преломления  $\delta\eta(x, z)$  (рис.8, $a, z$ ) в центральном сечении  $z = L/2$  динамических голограмм ДН, записанных в ФРК, и их пространственные спектры  $\delta\eta_k(x)$  (рис.8, $б, д$ ) по окончании переходного процесса этапа обучения СОВФЗ пучком с линейно растущей (фаза меняется на  $2\pi$  за  $2$  с, рис.8, $a, б, в$ ) и осциллирующей (размах и период колебаний фазы  $2\pi$  и  $2$  с, рис.8, $z, д, e$ ) фазой  $\varphi(t)$  пространственной модуляции  $M(x)$  входного сигнала показаны здесь сплошными линиями 1. Штриховые линии 2 соответствуют тем же зависимостям после завершения переходного процесса при ОВФ сигнального излучения с  $A_m = 100$  мкм. Легко убедиться, что результат использования двух этих процедур действительно оказывается совершенно разным (рис.8, $a, б, z, д$ ). При обучении СОВФЗ гауссовым пучком с осциллирующей фазой пространственной модуляции  $M(x)$  динамические голограммы ДН, записанные в ФРК уже на этапе обучения, практически идеально соответствуют тому,

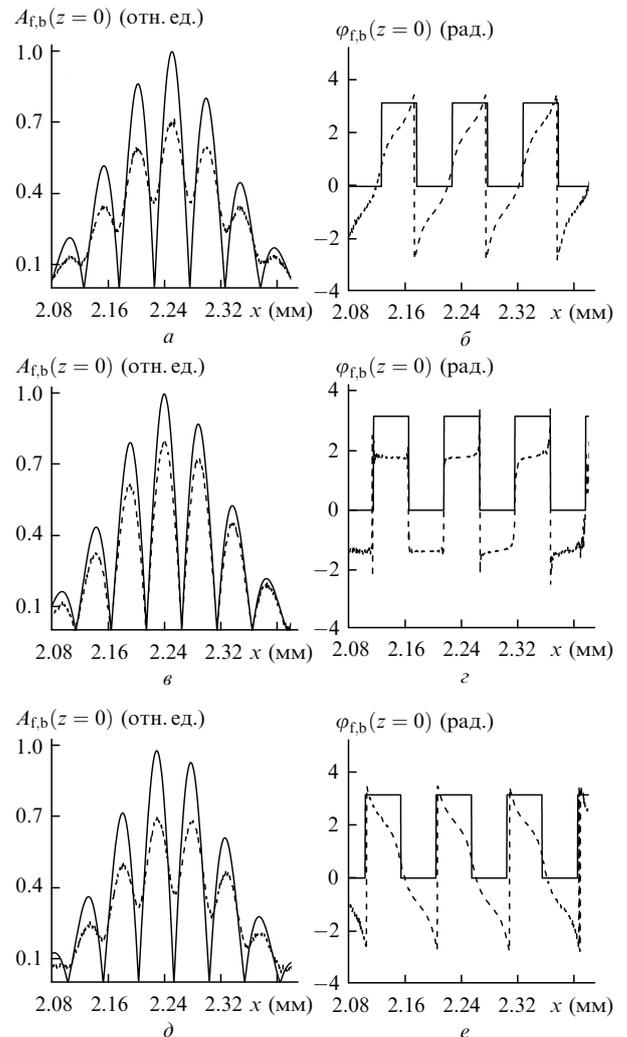


Рис.6. Обучение СОВФЗ пучком с линейно растущей по  $t$  фазой  $M(x)$  ( $A_m = 100$  мкм, фаза меняется на  $2\pi$  за  $2$  с). Распределения  $A_{f,b}(x, z = 0)$  ( $a, в, д$ ) и  $\varphi_{f,b}(x, z = 0)$  ( $б, z, e$ ) (сплошные и штриховые кривые) в три последовательных момента времени, отвечающих минимуму ( $a, б$ ), максимуму ( $в, z$ ) и следующему минимуму ( $д, e$ ) зависимости  $H(t)$ .

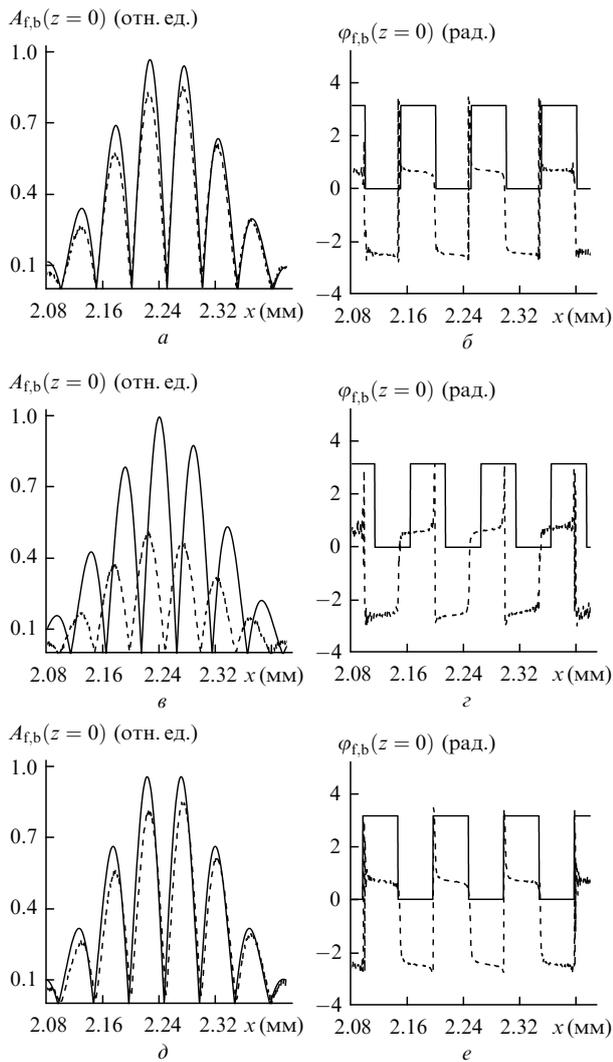


Рис.7. Обучение СОВФ пучком с осциллирующей по  $t$  фазой  $M(x)$  ( $A_m = 100$  мкм, размах и период колебаний фазы  $2\pi$  и  $2$  с). Распределения  $A_{f,b}(x, z = 0)$  (а, б, д) и  $\varphi_{f,b}(x, z = 0)$  (б, з, е) (сплошные и штриховые кривые) в три последовательных момента времени, отвечающих минимуму (а, б), максимуму (б, з) и следующему минимуму (д, е) зависимости  $H(t)$ .

что и должно быть в нем сформировано на этапе ОВФ (см. зависимости 1 и 2 на рис.8,з,д).

На наш взгляд, причиной этого является то, что в пучке с осциллирующей фазой пространственные и временные гармоники входного сигнала хорошо «перемешиваются», что и позволяет записать в ФРК существенно больший объем полезной информации. Об этом свидетельствует характер пространственно-временных спектров интенсивности обучающего поля  $I_{f,\kappa}(f, \kappa)$ , показанный для двух рассмотренных случаев на рис.8,в,е. Положение точки  $\kappa = 0$  сдвинуто на частоту, соответствующую углу схождения пучков  $A_{f,b}$ . Видно, что для гауссова пучка с осциллирующей фазой зависимость  $I_{f,\kappa}(f, \kappa)$  содержит гораздо больше пространственных и временных гармоник, что, судя по всему, и обуславливает существенно более высокую угловую селективность стационарной решетки  $\delta\eta(x, z)$  показателя преломления, записанной в ФРК на этапе обучения. Однако более важным является то, что за счет эффективного «перемешивания» пространственных и временных гармоник в обучающем входном поле инерционность ФРК (выделение гармоник, для

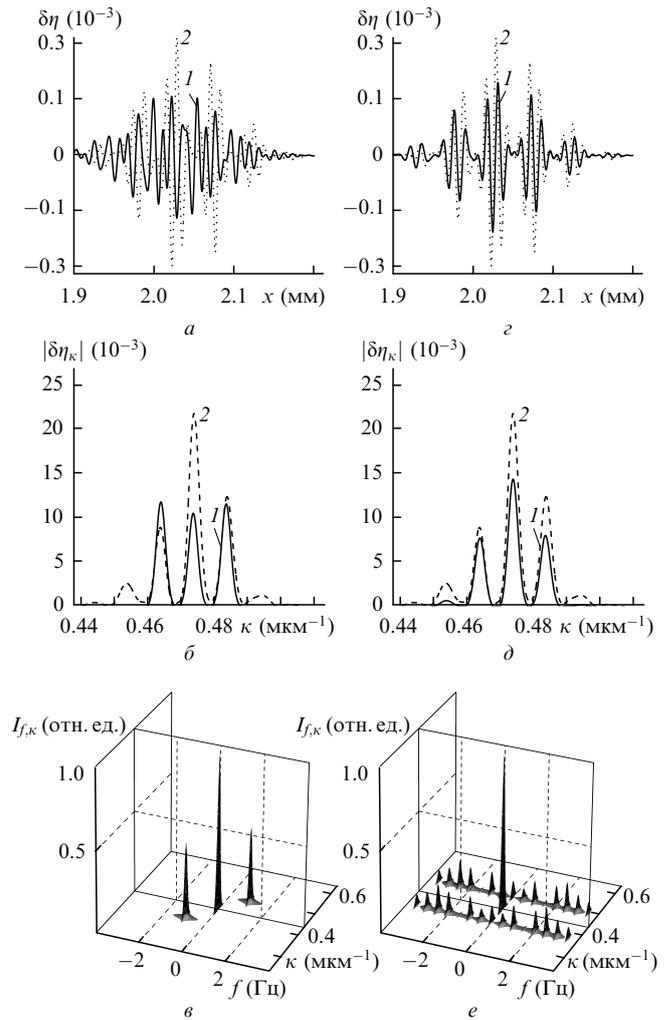


Рис.8. Обучение СОВФ пучком с линейно растущей (фаза меняется на  $2\pi$  за 2 с; а, б, в) и осциллирующей (размах и период колебаний фазы  $2\pi$  и 2 с; з, д, е) фазой  $M(x)$  при  $A_m = 100$  мкм. Распределения  $\delta\eta(x, z = L/2)$  (а, з) и установившиеся спектры  $\delta\eta_\kappa(\kappa)$  (б, д) по окончании переходных процессов на этапе обучения (1) и после старта (2) (а, б, з, д). Пространственно-временные спектры интенсивности обучающего поля  $I_{f,\kappa}(f, \kappa)$  (в, е), положение точки  $\kappa = 0$  сдвинуто на частоту, соответствующую углу схождения волн  $A_{f,b}$ .

которых  $f = 0$ ) не препятствует в этом случае записи информации об ожидаемом значении  $A_m$  (см. рис.8,е).

### 5. Заключение

Итак, проведенное нами в настоящей работе моделирование на примере петлевого самонакачивающегося ОВФ-зеркала на фоторефрактивном кристалле  $BaTiO_3$  показывает, что время, необходимое для формирования обращенной волны в СОВФ, можно существенно уменьшить за счет использования специальных процедур – так называемого предварительного обучения. Для этого в СОВФ надо заранее подать вспомогательное (обучающее) пространственно модулированное оптическое поле, благодаря которому в ФРК еще до прихода сигнального излучения будут записаны статические динамические голограммы, наличие которых в дальнейшем и обеспечит значительно более быстрое (в 6–20 раз) формирование объемных решеток показателя преломления, нужных для эффективного ОВФ. Конечно, для реализации подобных процедур (оптимального выбора пространственной стру-

ктуры обучающего поля) необходимо заранее знать некоторые свойства сигнального излучения, волновой фронт которого надо будет обрабатывать.

Проведенное нами для нескольких вариантов статических и динамических процедур предварительного обучения СОВФЗ моделирование показывает, что при прочих равных условиях эффективность динамических процедур, основанных на временном усреднении (то есть использовании инерционности нелинейного отклика ФРК), должна быть существенно выше, чем статических. Однако при осуществлении таких процедур необходимо учитывать, что временное усреднение должно эффективно «перемешивать» пространственные и временные гармоники обучающего поля, перенося информацию об ожидаемом пространственном периоде сигнального излучения на нулевую частоту.

По нашему мнению, использованный в настоящей работе подход может быть полезен и при решении задач распознавания образов [25, 26], а также при разработке оптических корреляторов [27] и элементов ассоциативной памяти [28–30] на базе СОВФЗ.

Авторы признательны Программе Президента РФ по поддержке ведущих научных школ России (грант НШ-1583.2003.2) за поддержку настоящей работы.

- Одулов С.Г., Соскин М.С., Хижняк А.И. *Лазеры на динамических решетках* (М.: Наука, 1990).
- Mailhan C., Fressengeas N., Goetz M., Kugel G. *Phys. Rev. A*, **67**, 023817 (2003).
- Feinberg J. *Opt. Lett.*, **7**, 486 (1982).
- Cronin-Golomb M., Fischer B., White J.O., Yariv A. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 689 (1982).
- Kwong S.-K., Cronin-Golomb M., Yariv A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **22**, 1508 (1986).
- Weiss S., Sternklar S., Fischer B. *Opt. Lett.*, **12**, 114 (1987).
- Fischer B., Sternklar S., Weiss S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 550 (1989).
- Segev M., Weiss S., Fischer B. *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1397 (1987).
- Kung H., Yau H., Lee H., et al. *Opt. Lett.*, **25**, 1031 (2000).
- Sternklar S., Fischer B. *Opt. Lett.*, **12**, 711 (1987).
- Engin D., Orlov S., Segev M., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 1743 (1995).
- Oduolov S.G., Goukov M.Yu., Shinkarenko O.A. *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 3637 (1999).
- Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
- Photorefractive Materials and Applications* Ed. by P.Gunter, J.-P.Huigrand (Topics in Applied Physics; Heidelberg: Springer, 1988, v. 61; 1989, v. 62).
- Krause A., Notni G., Wenke L. *Opt. Mater.*, **4**, 386 (1995).
- MacDonald K.R., Feinberg J. *Phys. Rev. Lett.*, **55**, 821 (1985).
- Зельдович Б.Я., Кундикова Н.Д., Наумова И.И. *Квантовая электроника*, **19**, 785 (1992).
- Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. *Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике* (С.-Петербург: Наука, 1992).
- Kamshilin A.A., Nazhestkina N., Kobozev O.V., Jaaskelainen T. *Opt. Lett.*, **26**, 527 (2001).
- Зельдович Б.Я., Нестеркин О.П., Новиков А.В., Шершаков Е.П. *Письма в ЖЭТФ*, **56**, 301 (1992).
- Esselbach M., Cedilnik G., Kiessling A., et al. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **1**, 735 (1999).
- Taj I.A., Xie P., Mishima T. *Opt. Commun.*, **187**, 7 (2001).
- Вахдани Могаддам Мехран, Шувалов В.В. *Квантовая электроника*, **35**, 729 (2005).
- Вахдани Могаддам Мехран, Шувалов В.В. *Квантовая электроника*, **35**, 862 (2005).
- Chang Chi-Ching, Tong Yuh-Ping, Yau Hon-Fai. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, L43 (1992).
- Yau Hon-Fai, Cheng Nai-Jen, Tsou Ren-Han, et al. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 4834 (1998).
- Ryf R., Montemezzani G., Gunter P., et al. *Opt. Lett.*, **26**, 1666 (2001).
- Selviah D.R., Chang Chi-Ching. *Optics & Lasers in Eng.*, **23**, 145 (1995).
- Duelli M., Cudney R., Gunter P. *Opt. Commun.*, **123**, 49 (1996).
- Zhao Mingjun, Vorontsov M.A., Ricklin J.C. *Opt. Lett.*, **21**, 257 (1996).
- Kukhtarev N.V. et al. *Ferroelectrics*, **22**, 949 (1979).
- Duree G. et al. *Opt. Lett.*, **19**, 1195 (1994).
- Выслоух В.А., Кутузов В., Шувалов В.В. *Квантовая электроника*, **23**, 157 (1996).
- Выслоух В.А., Кутузов В., Шувалов В.В. *Квантовая электроника*, **23**, 881 (1996).