

ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Экспериментальное исследование коррелятора совместного преобразования

М.С.Кузьмин, В.В.Давыдов, С.А.Рогов

Представлены результаты экспериментального исследования действующего макета коррелятора совместного преобразования с жидкокристаллическим пространственным модулятором света на входе. Проведено сравнение результатов работы коррелятора при амплитудной и фазовой модуляции и при различных методах обработки совместного спектра мощности, частично исследованных ранее с использованием математического моделирования. Предложен и исследован простой метод нелинейной обработки совместного спектра – ограничение его интенсивности с помощью фотоприемника.

Ключевые слова: коррелятор совместного преобразования, нелинейная обработка совместного спектра.

1. Введение

Коррелятор совместного преобразования (КСП) является одним из устройств оптической обработки информации, перспективных для систем распознавания образов [1–4]. Его схема была предложена в работе [5] и после этого неоднократно обсуждалась в литературе. Для получения корреляционной функции в таком корреляторе сначала с помощью линзы осуществляется прямое преобразование Фурье входного и опорного сигналов (изображений), расположенных рядом во входной плоскости коррелятора, и регистрируется пространственное распределение их совместного спектра мощности (в задней фокальной плоскости линзы). Затем с помощью той же или другой линзы выполняется обратное преобразование Фурье этого распределения. На выходе КСП, наряду с неинформативными оптическими сигналами (в центре плоскости регистрации), формируются (удаленные от оптической оси) распределения интенсивности света, пропорциональные корреляционным сигналам.

Свойства КСП интенсивно исследовались начиная с 1970-х годов. Был предложен ряд модификаций коррелятора для улучшения таких его характеристик, как отношение сигнал/шум, локализация корреляционных максимумов, способность к распознаванию различных типов сигналов и изображений. Улучшение достигалось в основном за счет обработки пространственного распределения их совместного спектра мощности перед его обратным преобразованием Фурье. Были предложены следующие методы воздействия на совместный спектр: бинари-

зация, ограничение по порогу, специальная амплитудная модуляция, блокировка постоянной составляющей и др. [6–10]. Основная цель применения этих методов заключалась в усилении высокочастотных составляющих спектра, отвечающих за мелкую структуру образов, важную для распознавания, и в уменьшении амплитуды нулевого порядка в корреляционной плоскости для снижения оптического фона. Были рассмотрены и другие методы совершенствования КСП, например использование чисто фазового ввода для устранения помех при распознавании изображений на светлом фоне [9]. Все упомянутые исследования проводились в основном методами математического моделирования, а публикаций по экспериментальным исследованиям было мало.

Для того чтобы сделать следующий шаг к практическому использованию КСП, нами были проведены экспериментальные исследования его действующего макета с работающим в реальном масштабе времени устройством ввода на основе жидкокристаллической (ЖК) матрицы от видеопроектора [11]. Макет состоял из фурье-процессора с ЖК пространственным модулятором света (ПМС) на входе и web-камеры на выходе. Этот процессор применялся как для формирования совместного спектра, так и для обратного преобразования Фурье при получении корреляционной функции на выходе системы. Ввод сигнала в ЖК ПМС, обработка совместного спектра (при реализации некоторых алгоритмов) и вывод информации из КСП на монитор осуществлялись с помощью компьютера. В макете использовался ЖК ПМС с числом элементов 1024×768 . Высокое оптическое качество ЖК матрицы обеспечивало отсутствие паразитной фазовой модуляции на входе процессора.

2. Использование метода ограничения совместного спектра фотоприемником для повышения качества сигналов КСП

При получении корреляции с помощью рассматриваемого макета КСП мы использовали нелинейность характеристики фотоприемника. Работа в нелинейной области амплитуд сигналов (близкой к насыщению фото-

М.С.Кузьмин, С.А.Рогов. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251 С.-Петербург, ул. Политехническая, 29; Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, Россия, 193232 С.-Петербург, просп. Большевиков, 22, корп. 1; e-mail: ranlitik@gmail.com, sarogov@mail.ru

В.В.Давыдов. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251 С.-Петербург, ул. Политехническая, 29

Поступила в редакцию 18 июня 2018 г., после доработки – 27 августа 2018 г.

приемника) позволяла достигать относительно низкого уровня шума детекторного узла и экспериментально реализовать некоторые методы нелинейной обработки, исследованные ранее с помощью математического моделирования. Уровень ограничения совместного спектра фотоприемником, эквивалентного пороговой обработке [7], мог легко регулироваться изменением мощности лазерного излучения, используемого при регистрации этого спектра. Применение такого аппаратного метода ограничения не требует дополнительного времени для компьютерной обработки спектра, как в предложенных ранее методах (бинаризация и др.), или использования дополнительных элементов оптической модуляции [10].

На рис.1 и 2 приведены полученные экспериментально выходные сигналы КСП для случаев автокорреляции и кросс-корреляции входного и опорного изображений в линейном и нелинейном режимах регистрации совместного спектра. Здесь использовалась амплитудная модуляция в ЖК ПМС.

На рис.1 показаны сигналы автокорреляции на выходе КСП (для входного и опорного сигналов в виде букв А). Видно, что при регистрации в нелинейном режиме совместный спектр (рис.1,д) насыщен, автокорреляционные максимумы (справа и слева от центрального пика на рис.1,е, жс) сужены и имеют существенно большую амплитуду, чем в линейном режиме (сигнал на рис.1,жс ослаблен поглощающим фильтром в 100 раз по сравнению с сигналом на рис.1,з). Эти эффекты связаны с существенным увеличением амплитуды совместного спектра при

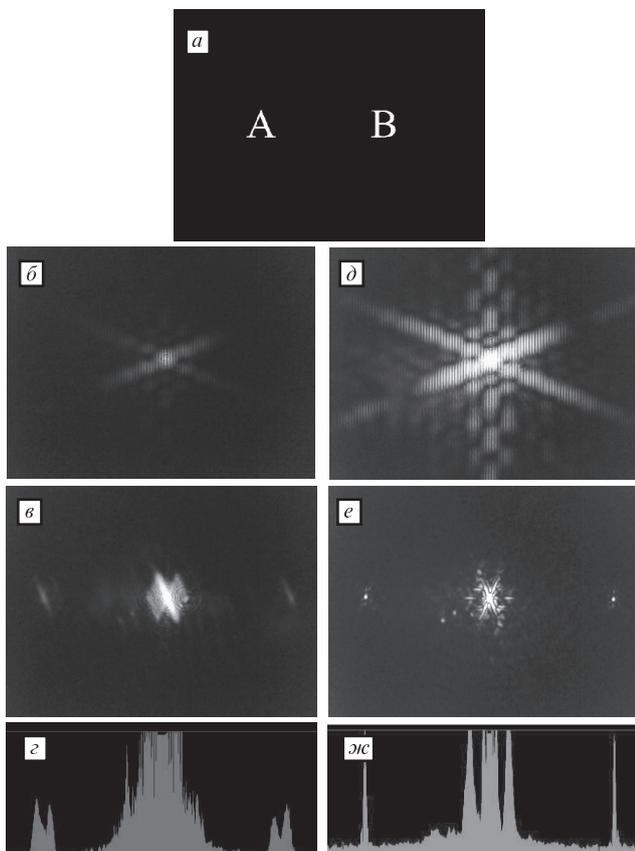


Рис.1. Сигналы КСП при линейном (б, в, з) и нелинейном (д, е, жс) режимах регистрации интенсивности совместного спектра для одинаковых входного и опорного сигналов КСП (а): совместные спектры (б, д), выходные сигналы КСП (в, е) и сечения выходных сигналов (з, жс).

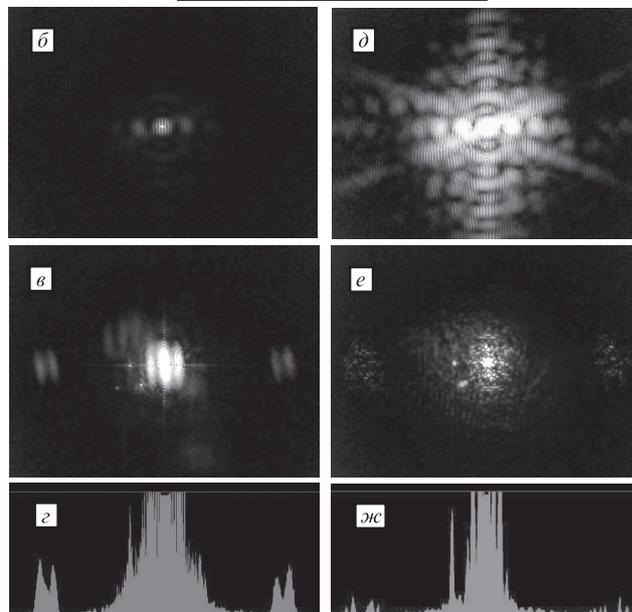
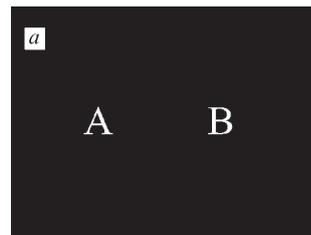


Рис.2. Сигналы КСП при разных входном и опорном сигналах (а) для линейного (б, в, з) и нелинейного (д, е, жс) режимов регистрации совместного спектра.

нелинейной регистрации и с ограничением его низкочастотной составляющей фотоприемником.

На рис.2 приведены сигналы кросс-корреляции на выходе КСП для входного и опорного сигналов в виде букв А и В. С учетом ослабления фильтрами выходных сигналов КСП в нелинейном режиме измеренное отношение мощностей сигналов автокорреляции (рис.1) и кросс-корреляции (рис.2) в нелинейном режиме было примерно в шесть раз больше, чем в линейном. Это связано с эффектом оконтуривания в нелинейном режиме изображений, участвующих в корреляции, за счет меньшего усиления низкочастотной части их совместного спектра по сравнению с высокочастотной частью.

3. Сравнение методов бинаризации и ограничения фотоприемником. Оценки динамического диапазона и отношения сигнал/шум

На рис.3 показаны сигналы КСП при бинаризации совместного спектра с помощью компьютера перед обратным преобразованием Фурье и при ограничении его интенсивности фотоприемником. Результаты приведены для разных интенсивностей регистрируемого совместного спектра букв А. Порог при бинаризации подбирался в каждом случае оптимальным для получения максимального отношения сигнал/шум в области автокорреляционного пика.

Как следует из приведенных данных, результаты обработки очень близки. Выходные сигналы автокорреля-

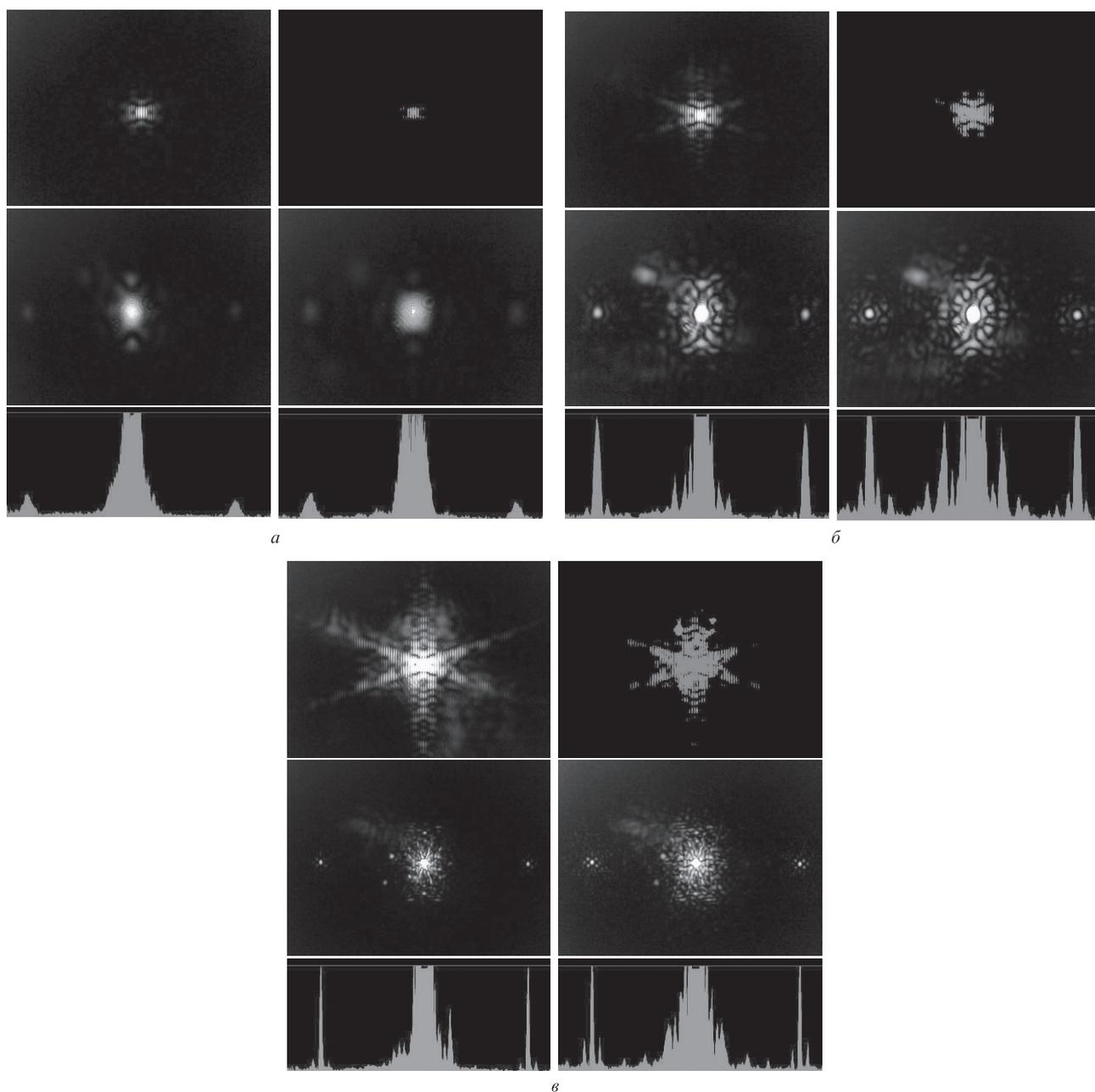


Рис.3. Сигналы КСП при обработке совместного спектра методами бинаризации (справа) и ограничения фотоприемником (слева) для низкой (*a*), средней (*б*) и высокой (*в*) интенсивностей совместного спектра.

ции возрастают по амплитуде и сужаются по мере увеличения амплитуды совместного спектра при регистрации и ограничении его низкочастотной части. Видно, что при сильном увеличении амплитуды совместного спектра увеличиваются амплитуды боковых лепестков корреляционных максимумов, особенно при бинаризации. При ограничении совместного спектра фотоприемником амплитуды боковых лепестков корреляционного максимума растут медленнее, что можно объяснить плавным уменьшением амплитуд в высокочастотной части регистрируемого совместного спектра (аподизация), которое частично сохраняется в этом случае.

Для оценки влияния уровня ограничения совместного спектра на отношение сигнал/шум на выходе КСП нами проводились регистрация этого спектра при разных мощностях излучения лазерного источника и измерение сигналов и шумов на выходе КСП. На рис.4 показаны сов-

местные спектры, зарегистрированные фотоприемником, и соответствующие им сигналы на выходе при входном сигнале коррелятора в виде двух входных и одного опорного образов (буквы А). Результаты измерений отношения сигнал/шум на выходе КСП в зависимости от экспозиции при регистрации интенсивности совместного спектра приведены на рис.5. Видно, что это отношение возрастает при увеличении уровня ограничения совместного спектра и остается большим в диапазоне экспозиций шириной около 10 дБ, а затем снижается. Достаточно широкий диапазон оптимальных экспозиций позволяет обойтись без подстройки КСП при существенном изменении величин его входных сигналов.

Для исследования возможности уменьшения шума на выходе коррелятора нами проводились эксперименты по блокировке совместного спектра в области низких пространственных частот. Сигнал на входе КСП в этих экс-

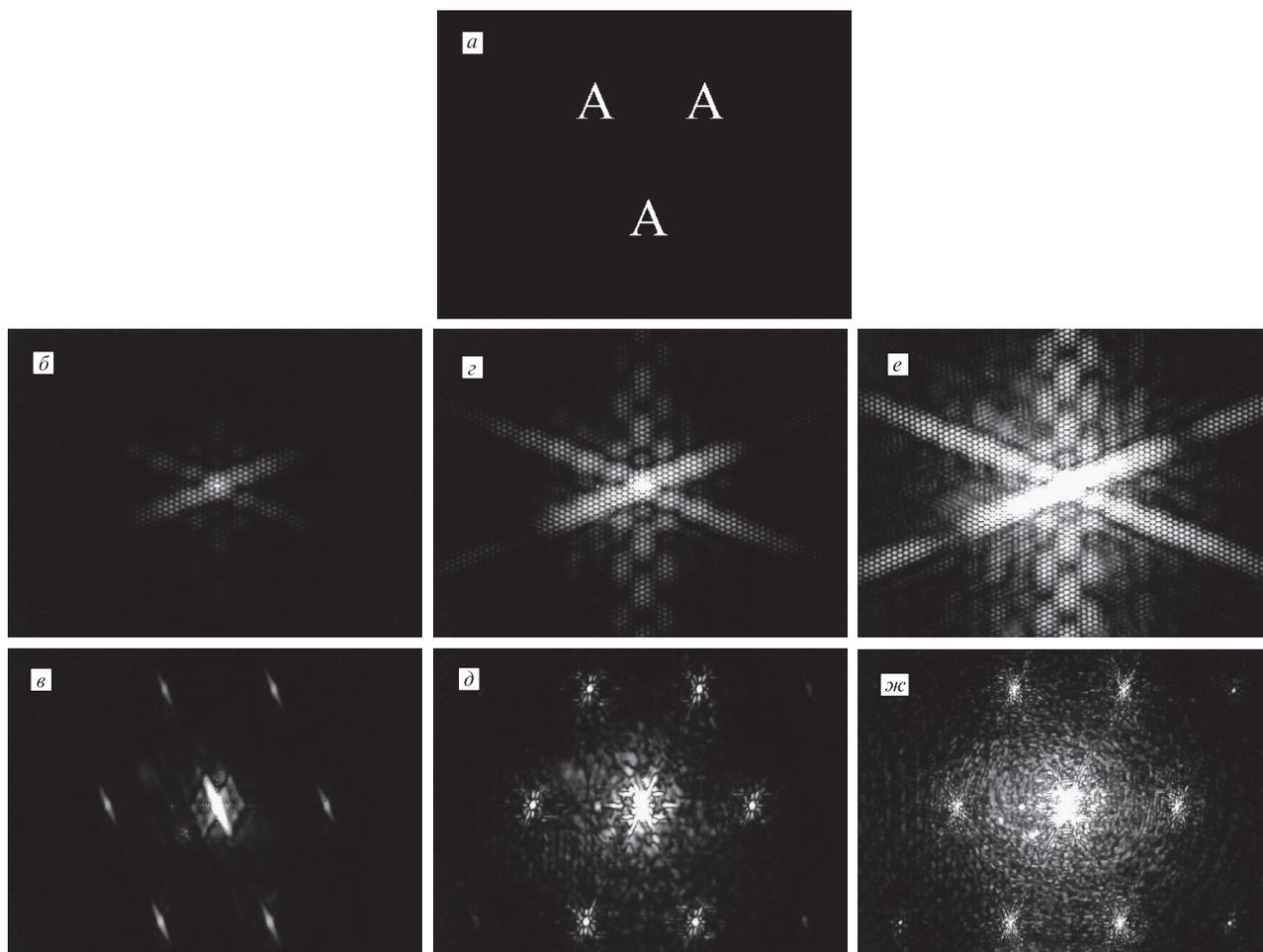


Рис.4. Совместные спектры (б, г, е) и выходные сигналы КСП (в, д, жс) при увеличении уровня ограничения совместного спектра для одинаковых двух входных и одного опорного сигналов на входе КСП (а).

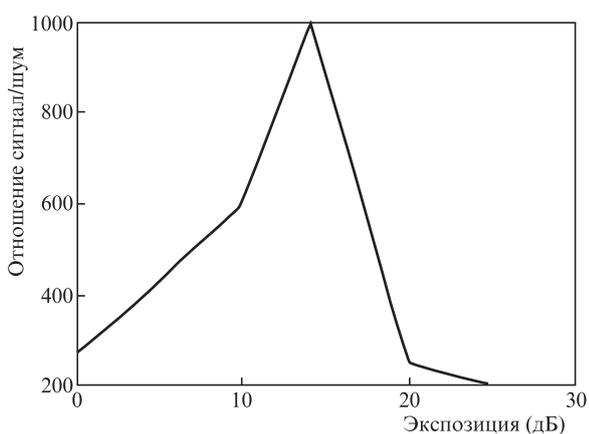


Рис.5. Изменение отношения сигнал/шум на выходе КСП в зависимости от экспозиции при регистрации интенсивности совместного спектра.

периментах состоял из одного опорного и одного входного образов (буквы А), разнесенных по вертикали. На рис.6 продемонстрирована зависимость отношения сигнал/шум в области корреляции от размера области блокировки нулевого порядка совместного спектра. Уровень шума (рис.6,в) и амплитуды корреляционных максимумов (рис.6,г) зависят от размера области блокировки (рис.6,а). Для данных экспериментов отношение сигнал/

шум составило 4×10^3 без блокирующего фильтра (круга), 5.8×10^3 с небольшим кругом и 4.5×10^3 с большим кругом. Таким образом, для получения максимального отношения сигнал/шум на выходе КСП нужно подбирать размер области блокировки нулевого порядка совместного спектра, при этом блокировка дает (рис.6) небольшой выигрыш в отношении сигнал/шум при условии необходимости специальной компьютерной обработки совместного спектра, на которую требуется дополнительное время, или применения отдельного фильтрующего устройства, усложняющего систему.

Нами проводились также исследования зависимости динамического диапазона коррелятора от числа одновременно обрабатываемых одинаковых входных сигналов. Из-за влияния нелинейности при регистрации совместного спектра в случае обработки нескольких сигналов в области корреляции появляются ложные максимумы перекрестной модуляции (слева и справа от максимумов автокорреляции, как представлено на рис.4,жс). Можно показать, что их величина быстро уменьшается с уменьшением величины входных сигналов (быстрее, чем величина корреляционных максимумов). Динамический диапазон изменения входных сигналов, соответствующий промежутку от появления корреляционных максимумов из-под шума до появления ложных максимумов в области корреляции, составил для двух сигналов около 17 дБ как при использовании метода ограничения фотоприемником,

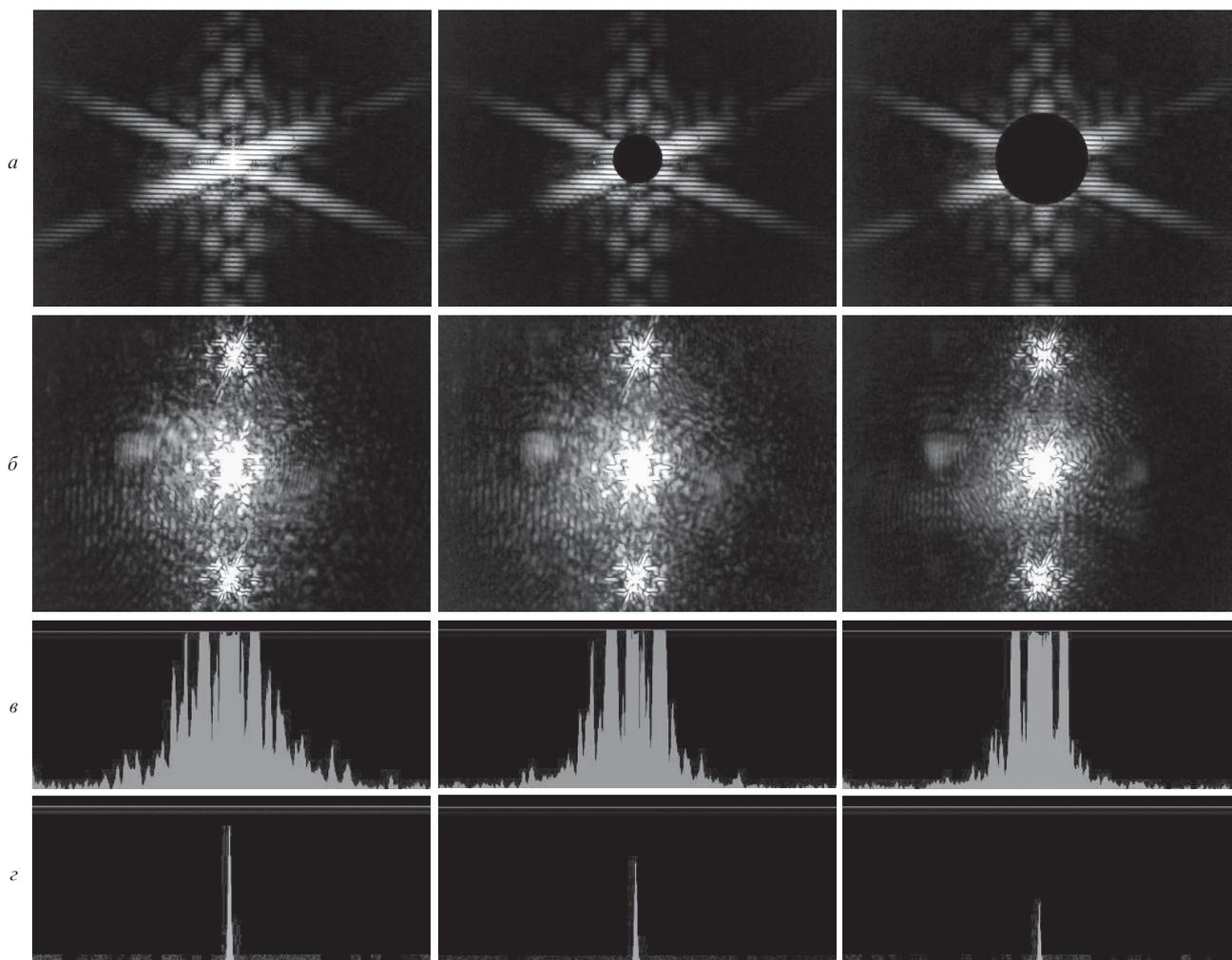


Рис.6. Изменение шума и сигнала на выходе коррелятора при разных размерах области блокировки низких пространственных частот в совместном спектре (слева – без блокировки): совместные спектры (а), распределение света в выходной плоскости КСП (б), сечение корреляционного максимума без ослабления (оценка шума) (в) и сечение корреляционного максимума с ослаблением (оценка сигнала) (г).

так и при бинаризации совместного спектра. При этом максимальный динамический диапазон достигался в нелинейном режиме работы коррелятора, который при ограничении совместного спектра фотоприёмником обеспечивался постоянным высоким уровнем опорного сигнала на входе КСП во всем динамическом диапазоне изменения амплитуд входных сигналов. Более подробно исследование работы коррелятора в нелинейном режиме рассмотрено нами в [12].

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что КСП с ограничением интенсивности совместного спектра фотоприёмником по динамическому диапазону, отношению сигнал/шум, форме выходного сигнала и по другим параметрам не уступает КСП с бинаризацией спектра, при этом не требуется дополнительных затрат времени на компьютерную обработку сигналов в спектральной плоскости или усложнения системы.

4. О целесообразности применения фазовой модуляции на входе для повышения дискриминационной способности КСП

Одним из недостатков КСП с амплитудной модуляцией (АМ) во входной плоскости считается невозможность

распознавания входных образов на светлом фоне и близких объектов, один из которых является частью другого, например букв F и E или C и O. Для преодоления этих трудностей было предложено использовать вместо амплитудной фазовую модуляцию (ФМ) на входе КСП [9]. При ФМ корреляционный отклик от любого участка области входных сигналов, в том числе и от участков яркого фона, фазовое распределение которого не совпадает с распределением опорного сигнала, будет иметь меньшую величину, чем автокорреляционный отклик опорного сигнала. Поэтому при ФМ наличие яркого фона на входе КСП не мешает его работе.

В то же время в КСП с ФМ для уменьшения шумов рекомендуется использовать блокировку низкочастотных составляющих совместного спектра. Применение этого метода, как и ограничение низкочастотных компонент при нелинейной обработке совместного спектра, приводит к оконтуриванию образов, участвующих в корреляции, и ослабляет отклик от медленно меняющегося фона как при фазовой, так и при амплитудной модуляции.

Для сравнения свойств КСП с амплитудной и фазовой модуляцией на входе нами был проведен ряд экспериментов. На рис. 7 и 8 показаны сигналы КСП для линейного и нелинейного режимов регистрации интенсивности совместного спектра при амплитудной и фазовой модуляции

на входе. Входные сигналы КСП (рис.7,*a, z*) состояли из бинарных изображений – букв О и С, не различимых обычным коррелятором с АМ, и белого квадрата, имитирующего яркий фон. Опорным сигналом являлась буква С. При фазовом вводе значительная часть входной плоскости не участвовала в формировании совместного спектра вследствие наложения бинарной дифракционной решетки $0-\pi$ (соответствует черным и белым линиям на рис.7,*z*) [9].

При режиме регистрации интенсивности совместного спектра, близком к линейному, совместные спектры и распределения в области корреляции представлены на рис.7. В случае АМ (рис.7,*б, в*) максимумы корреляций близких сигналов С*О и С*С не различимы по величине (сигналы справа и слева на рис.7,*в*), а в центре распределения присутствуют два максимума с большими амплитудами, соответствующие помехе от фона. В линейном режиме записи входных сигналов с ФМ (рис.7,*д, е*) сигналы корреляции близких сигналов различимы (рис.7,*е*), а помеха от фона значительно меньше, как и предсказывает простейший теоретический анализ [9].

Если КСП работает в нелинейном режиме с ограничением низкочастотной части спектра фотоприемником, то при АМ, как видно из рис.8,*б*, он уже позволяет различать близкие образы (буквы С и О) по величине корреляционных максимумов (для автокорреляции амплитуда сигнала С*С больше), а помехи от фона невелики. Для оценки величины помехи от фона на рис.8,*в* приведен выходной сигнал КСП без белого квадрата на входе. Как было показано выше, нелинейный режим регистрации совместных спектров предпочтителен для задач распознавания, при этом попутно решается задача уменьшения помех от медленно меняющегося яркого фона и использование ФМ не требуется.

Сигналы на выходе КСП при ФМ в нелинейном режиме регистрации совместного спектра представлены на рис.8,*д, е*. Для ФМ, как и для АМ, увеличение амплитуды совместного спектра и ограничение его низкочастотных

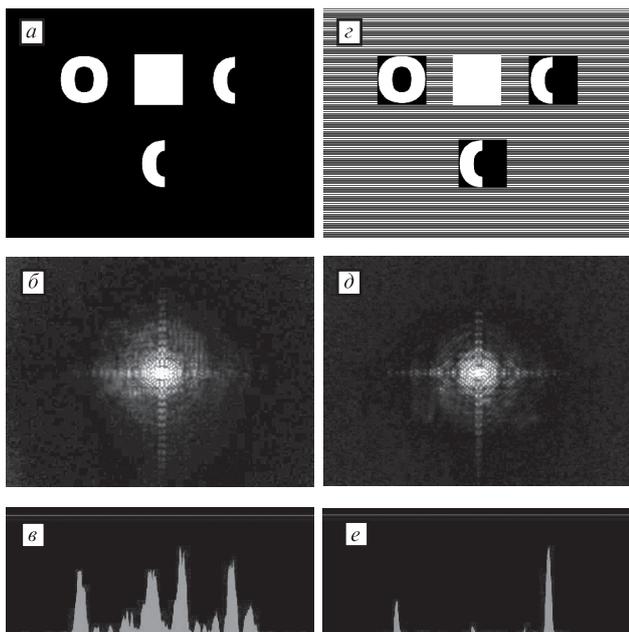


Рис.7. Сигналы КСП при амплитудной (слева) и фазовой (справа) модуляции на входе для линейного режима регистрации интенсивности совместного спектра: сигналы на входе КСП (*a, z*), совместные спектры (*б, д*) и сечения сигналов корреляции (*в, е*).

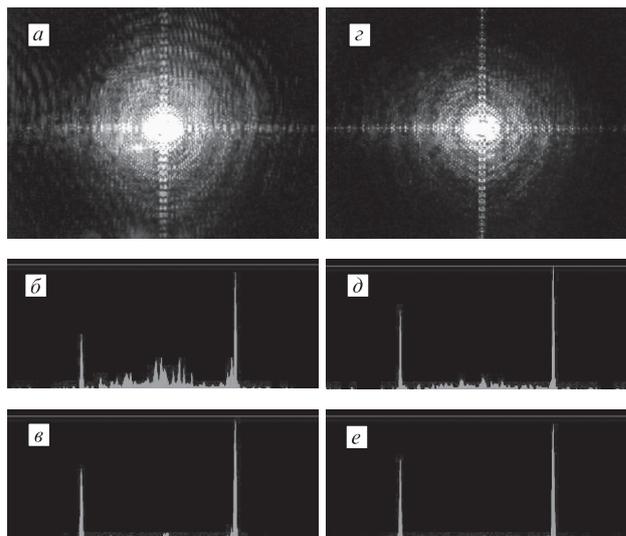


Рис.8. Сигналы КСП при амплитудной (слева) и фазовой (справа) модуляции на входе для нелинейного режима регистрации совместного спектра: совместные спектры (*a, z*), сечения сигналов корреляции для входных сигналов, показанных на рис.7,*a, z* (*б, в*), и для входных сигналов без белого квадрата (*в, е*).

составляющих также приводят к увеличению амплитуд и сужению корреляционных максимумов на выходе КСП. Зависимость отношения сигнал/шум от экспозиции, как показывают эксперименты, аналогична таковой в случае АМ (рис.5). Следует отметить, что отношение сигнала к шуму и отношение сигнала к помехе от фона для ФМ были несколько больше (примерно в два раза), чем для АМ. Это при бинарных сигналах связано с большей энергией опорного сигнала в случае ФМ (буква в прямоугольнике фона с ненулевым уровнем сигнала) в отличие от АМ (буква на фоне с нулевым уровнем).

Аналогичные результаты были получены нами при сравнении данных работы КСП с АМ и ФМ на входе и при плавном, а не бинарном характере входных сигналов. Мы использовали входные распределения в виде «косинус на пьедестале», сигналы с линейной частотной модуляцией и др. Когда АМ-сигнал не бинарный, а плавно меняющийся, то для получения ФМ на входе КСП используют функцию преобразования АМ в ФМ [9]. Эта функция для данной ЖК матрицы приведена на рис.9.

В качестве примера на рис.10 показаны сигналы на входе коррелятора (косинус на пьедестале), регистрируемые совместные спектры и соответствующие им выходные сигналы для АМ и ФМ при регистрации в линейном режиме. Корреляционная функция при фазовом вводе несколько уже, чем в случае АМ, что естественно, т.к. спектр сигнала с ФМ шире. При нелинейной регистрации совместного спектра, как и при обработке сигналов с бинарной модуляцией, выходные сигналы КСП сужались и увеличивались по амплитуде (в этих экспериментах примерно в 20 раз). Величина максимума корреляционной функции при ФМ или совпадала с таковой в случае АМ, или незначительно превышала ее в зависимости от формы сигнала и условий регистрации.

Таким образом, сравнение результатов работы КСП при АМ и ФМ на входе показало, что ФМ не дает существенного преимущества, если КСП работает в нелинейном режиме регистрации совместного спектра, который обычно более предпочтителен. Фазовая модуляция иног-

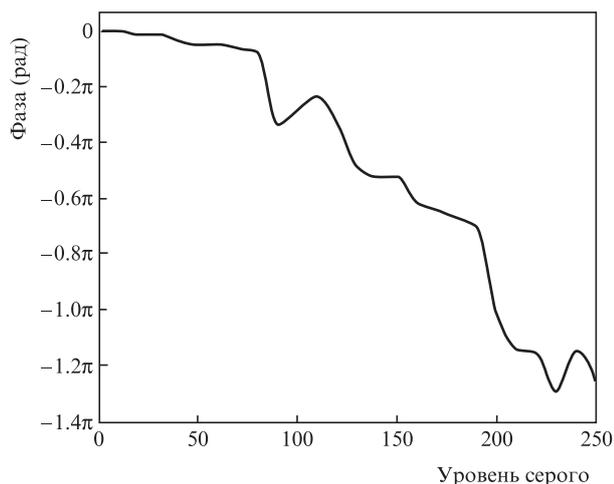


Рис.9. Фазовая задержка в используемой ЖК матрице как функция управляющего сигнала.

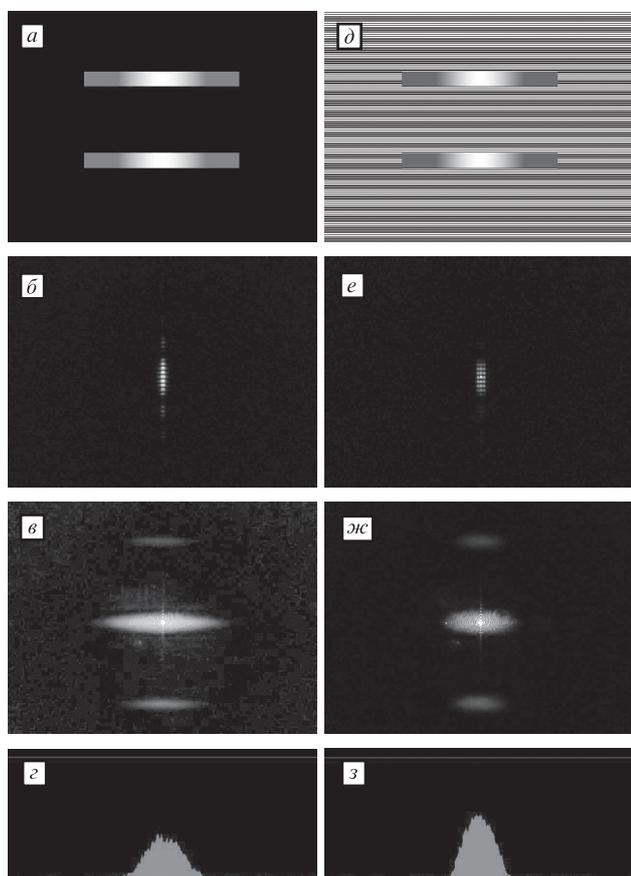


Рис.10. Сигналы на входе КСП (а, д) (косинус на пьедестале), регистрируемые совместные спектры (б, е), выходные сигналы (в, ж) и их сечения (з, з) для амплитудной (слева) и фазовой (справа) модуляции на входе при регистрации совместных спектров в линейном режиме.

да обеспечивает некоторый выигрыш в отношении сигнал/шум на выходе КСП, в то же время ее техническая реализация сложнее из-за необходимости устранения фона при формировании входных сигналов и необходимости разной настройки фурье-процессоров прямого и обратного преобразования Фурье, когда первый работает при ФМ, а второй – при АМ.

5. Выводы

Экспериментальные исследования КСП с жидкокристаллическим ПМС, результаты которых приведены выше, позволяют сделать следующие выводы:

- получено экспериментальное подтверждение возможности улучшения характеристик КСП за счет нелинейной обработки интенсивности совместного спектра – увеличения амплитуд корреляционных максимумов, их локализации, увеличения отношения сигнал/шум и повышения дискриминационной способности коррелятора;
- предложенный метод ограничения интенсивности совместного спектра фотоприемником позволяет довольно просто осуществить нелинейную обработку этого спектра, которую ранее предлагалось реализовать с помощью компьютера или специальных устройств модуляции света; при использовании этого метода не требуется дополнительных затрат времени на обработку совместного спектра или применения дополнительных устройств модуляции;
- метод ограничения интенсивности совместного спектра с помощью фотоприемника позволяет улучшать характеристики КСП не менее эффективно, чем предложенные ранее метод бинаризации с оптимальным выбором порога и метод блокировки низкочастотных составляющих спектра;
- ширина диапазона интенсивностей совместного спектра, в котором сохраняются параметры выходных сигналов КСП, необходимые для его работы, составляет около 10 дБ; этот диапазон нетрудно обеспечить в широком диапазоне амплитуд входных сигналов КСП за счет постоянного (высокого) уровня опорного сигнала (изображения);
- динамический диапазон входных сигналов (образов) КСП зависит от числа одновременно обрабатываемых одинаковых сигналов и для двух сигналов равен ~ 20 дБ;
- исследованный нами КСП с ПМС на основе ЖК матрицы от видеопроектора позволяет работать как с амплитудной, так и с фазовой модуляцией на входе; при использовании ФМ дискриминационная способность при распознавании изображений в линейном режиме регистрации совместного спектра повысилась;
- при нелинейном режиме регистрации интенсивности совместного спектра, который позволяет улучшить характеристики КСП как при амплитудной, так и при фазовой модуляции, преимущества ФМ незначительны (некоторое увеличение отношения сигнал/шум), а сложность реализации вызывает сомнения в целесообразности ее применения в КСП.

1. Alfalou A., Brosseau C., in *Face Recognition* (London, 2009, pp 353–380).
2. Su Zhang, Jin Duan, Qiang Fu, Wen-sheng Wang. *Proc. SPIE*, **9676**, 967607 (2015).
3. Xiao Xiao, Dongfeng Xue, Zhao Hui. *Opt. Eng.*, **55**, 053103 (2016).
4. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Проценко Е.Д. и др. *Квантовая электроника*, **42**, 1039 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 1039 (2012)].
5. Weaver C.S., Goodman J.W. *Appl. Opt.*, **5**, 1248 (1966).
6. Javidi B. *Appl. Opt.*, **28**, 2358 (1989).
7. Kaewkasi P., Widjaja J., Uozumi J. *Opt. Commun.*, **271**, 48 (2007).
8. Teusdea A.C. *Rom. J. Phys.*, **53** (1-2), 57 (2008).
9. Guowen Lu, F.T.S. Yu. *Appl. Opt.*, **35**, 304 (1996).
10. Alam M.S., Karim M.A. *Appl. Opt.*, **32**, 4344 (1993).
11. Кузьмин М.С., Рогов С.А. *Оптический журн.*, **82** (3), 23 (2015).
12. Кузьмин М.С., Рогов С.А. *Оптический журн.*, **84** (8), 64 (2017).