

Об использовании многорастрового ввода одномерных сигналов в двумерных оптических корреляторах

М.С. Кузьмин^{1,2}, В.В. Давыдов¹, С.А. Рогов^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Приводится математическое описание работы когерентного оптического коррелятора при многорастровом вводе длинных сигналов. Показано, что такой ввод позволяет ослабить величину ложных корреляционных максимумов, появляющихся в общем случае на выходе коррелятора с однорастровым вводом. Показано также, что ложные максимумы не появляются при обработке сигналов с кнопочной функцией неопределенности, что позволяет обойтись без многорастрового ввода. Результаты теоретического анализа подтверждаются экспериментами с ЛЧМ-сигналами и сигналами типа М-последовательности.

Ключевые слова: коррелятор, коррелятор совместного преобразования, жидкокристаллическое устройство ввода, обработка сигналов.

Цитирование: Кузьмин, М.С. Об использовании многорастрового ввода одномерных сигналов в двумерных оптических корреляторах / М.С. Кузьмин, В.В. Давыдов, С.А. Рогов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 3. – С. 391-396. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-391-396.

Введение

В последние годы продолжают исследования возможности создания когерентных оптических и оптико-цифровых систем спектрального анализа и систем распознавания сигналов и изображений на основе применения корреляционного алгоритма [1–6]. Перспективы применения таких систем значительно возросли с появлением серийно выпускаемых жидкокристаллических пространственных модуляторов света (ЖК ПМС) [7].

Возможности двумерной параллельной обработки в оптических системах могут быть использованы и при обработке одномерных (электрических) сигналов – в устройствах с растровым вводом. Эти устройства позволяют осуществлять обработку сигналов с большой базой, которые находят применение в целом ряде задач [8, 9]. К настоящему времени устройства с растровым вводом были предложены для спектрального анализа и для корреляционной обработки сигналов [2, 8, 10, 11].

Растровый ввод сигналов имеет свои особенности, которые могут приводить к появлению ложных сигналов на выходе оптической системы. Для уменьшения их величины в спектроанализаторах было предложено использовать многорастровый ввод сигналов [8, 10]. Возможность применения этого метода в корреляторах при обработке ЛЧМ-сигналов была показана нами экспериментально в работе [2]. К сожалению, при многорастровом вводе значительная часть полезной площади входного устройства (используемая для ввода копий растров входных сигналов) теряется. Это ограничивает предельные значения длительности и базы обрабатываемых сигналов. Для объяснения появления ложных максимумов в корреляторах, а также оценки возможностей и необходимости применения многорастрового ввода в этих устройствах ниже приводится теоретическое рассмотрение работы оптиче-

ского коррелятора с многорастровым вводом при обработке сигналов произвольного вида.

Схема когерентного оптического коррелятора с пространственным интегрированием (4f-коррелятора или коррелятора Вандер-Люгта) состоит, как известно, из двух последовательно работающих анализаторов спектра с пространственным интегрированием [8, 13]. После первого анализатора спектра в плоскости пространственных частот осуществляется перемножение пространственного спектра входного сигнала на комплексно сопряженный спектр опорного сигнала, записанного в виде фильтра. Обратное преобразование Фурье этого произведения во втором анализаторе спектра дает на выходе требуемую корреляционную функцию входного и опорного сигналов.

Работа 4f-коррелятора принципиально мало отличается от другого коррелятора с пространственным интегрированием – коррелятора с совместным преобразованием, в котором также используются два последовательных преобразования Фурье и перемножение спектров входного и опорного сигналов. Отличие заключается только в технике формирования произведения спектров. Поэтому полученные ниже результаты будут справедливы для обоих типов коррелятора.

Поскольку спектроанализатор (однокаскадная оптическая система) входит в коррелятор как его составная часть, рассмотрим вначале сигналы на выходе оптического спектроанализатора при однорастровом и многорастровом вводе сигналов.

1. Оптический спектроанализатор с растровым и многорастровым вводом сигналов

При растровом вводе сигналов в оптическую систему по горизонтальным строкам ПМС, как показано на рис. 1а, спектр сигнала формируется в плоскости пространственных частот также в растровой форме, в рассматриваемом случае – по вертикальным

(слегка наклонным) линиям, рис. 1б (т.н. «свернутый спектр») [12].

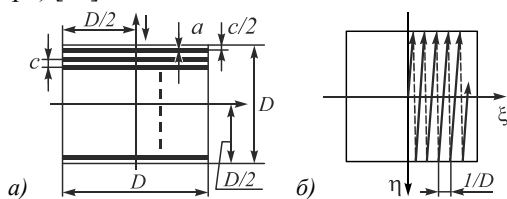


Рис. 1. Входной растровый формат (а); траектория пятна на выходе анализатора спектра в области первого дифракционного порядка при изменении частоты входного гармонического сигнала (б). При вещественном входном сигнале, наряду со спектром первого порядка, формируется симметричный (относительно начала координат) спектр минус первого порядка

Выражения для входного пространственного сигнала (комплексной амплитуды света) и интенсивности света в области первого порядка его спектра в случае гармонического сигнала с пространственной частотой ξ_0 будут:

$$f(x, y) = \sum_{n=1}^N \sin \left[2\pi\xi_0 \left(x + \frac{2n-1}{2} D \right) \right] \times \text{rect} \left(\frac{x}{D} \right) \left\{ \text{rect} \left(\frac{y}{a} \right) \otimes \delta \left[y - \frac{D - (2n-1)c}{2} \right] \right\}, \quad (1)$$

$$I(\xi, \eta) = |F_1(\xi, \eta)|^2 = a^2 D^2 \text{sinc}^2 \left[\pi D(\xi - \xi_0) \right] \times \text{sinc}^2(\pi a \eta) \frac{\sin^2 \left[\pi D(N-1)(\xi_0 + \eta/N) \right]}{\sin^2 \left[\pi D(\xi_0 + \eta/N) \right]}, \quad (2)$$

где N – число строк входного раstra, $F_1(\xi, \eta)$ – преобразование Фурье входного сигнала (свернутый спектр) в первом порядке дифракции.

Из выражения (2) следует, что каждой частотной компоненте ξ_0 на входе системы в свернутом спектре первого порядка соответствует пятно, положение которого по оси ξ описывается основным лепестком функции $\text{sinc}^2[\pi D(\xi - \xi_0)]$, определяющим грубую оценку частоты ξ_{0cp} (ближайшая к ξ_0 величина, содержащая целое число разрешимых элементов $1/D$ по этой оси), а по оси η – ближайшим к оси ξ максимумом функции

$$\frac{\sin^2 \left[\pi D(N-1)(\xi_0 + \eta/N) \right]}{\sin^2 \left[\pi D(\xi_0 + \eta/N) \right]},$$

определяющим точную оценку частоты $\xi_{0точ} = \eta/N$, так что $\xi_0 = \xi_{0cp} + \eta/N$. Это пятно имеет одинаковую полуширину, равную $1/D$, как по «грубой» частотной оси ξ , так и по «точной» η . Разрешающая способность анализатора спектра по входной частоте ξ_0 составляет при этом вдоль грубой оси $\Delta\xi_{0|\xi} = 1/D$, а по точной, вдоль которой пятно перемещается с изменением частоты ξ_0 в N раз быстрее, $\Delta\xi_{0|\eta} = 1/ND$.

Шаг между линиями свернутого спектра также составляет величину $1/D$, поэтому на любую линию спектра могут попадать составляющие и из соседних

линий и из более дальних, поскольку сечение интенсивности (2) в направлении «поперек» линий спектра, пропорциональное выражению $\text{sinc}^2[\pi D(\xi - \xi_0)]$, имеет достаточно большую протяженность (с учетом боковых лепестков этой функции). Эти сигналы от соседних линий обычно слабее основных, но все же они могут привести к ошибкам при регистрации спектра в анализаторе со свернутым спектром.

Если для уменьшения помех от соседних линий спектра использовать на входе системы обработки вместо одного раstra сигнала два или несколько расположенных рядом одинаковых растров, суммарный входной сигнал $f_{\Sigma}(x, y)$ можно представить как свертку сигнала одного раstra $f(x, y)$ с суммой нескольких эквидистантно расположенных во входной плоскости δ -функций:

$$f_{\Sigma}(x, y) = f(x, y) \otimes \sum_{m=0}^{M-1} \delta(x - mD, y - mc).$$

Используя теорему свертки фурье-преобразования [13], получим суммарный спектр от многорастрового входного сигнала:

$$F_{\Sigma}(\xi, \eta) = F_1(\xi, \eta) \sum_{m=0}^{M-1} e^{-2\pi j m(D\xi + c\eta)} = F_1(\xi, \eta) \frac{\sin \left[\pi M(D\xi + c\eta) \right]}{\sin \left[\pi(D\xi + c\eta) \right]} e^{-j\pi(M-1)(D\xi + c\eta)},$$

где $F_1(\xi, \eta)$ – двумерный спектр от одного входного раstra. Интенсивность суммарного спектра равна:

$$I_{\Sigma}(\xi, \eta) = |F_1(\xi, \eta)|^2 \frac{\sin^2 \left[\pi M(D\xi + c\eta) \right]}{\sin^2 \left[\pi(D\xi + c\eta) \right]}. \quad (3)$$

Сечение этого распределения по линии, которая проходит параллельно оси ξ через максимум пятна, в случае гармонического входного сигнала можно получить, полагая в (3) $c\eta = -D\xi_0$ (см. выражение (2)):

$$I_{\Sigma}(\xi, \eta = -\frac{D}{c}\xi_0) \sim \text{sinc}^2 \left[\pi D(\xi - \xi_0) \right] \times \frac{\sin^2 \left[\pi MD(\xi - \xi_0) \right]}{\sin^2 \left[\pi D(\xi - \xi_0) \right]}.$$

Второй множитель существенно (в M раз) сужает ширину сечения линий спектра по оси ξ , что препятствует проникновению ложных спектральных составляющих в область соседних линий свернутого спектра.

2. Коррелятор с растровым вводом. Ложные максимумы и их подавление

Если в корреляторе длинных сигналов с растровым вводом [2] пренебречь проникновением свернутого спектра в соседние линии раstra, формируемого в спектральной плоскости системы, то в корреляторе осуществляется умножение свернутого спектра входного сигнала на комплексно сопряженный свернутый спектр опорного сигнала, в результате чего получается свернутый спектр корреляционной функции. Об-

ратное преобразование Фурье этого свернутого спектра позволяет получить на выходе корреляционную функцию, свернутую в виде раstra.

Если учитывать проникновение входного и опорного свернутых спектров в соседние и более дальние линии спектрального раstra, то на выходе коррелятора будут появляться ложные сигналы корреляции, соответствующие произведениям этих ложных свернутых спектров.

Свернутый спектр, формируемый в корреляторе с учетом дополнительных (ложных) свернутых спектров, может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned} & \left[F_{in}(0) + F_{in}(+\Delta\xi_0) + F_{in}(-\Delta\xi_0) + \right. \\ & \left. + F_{in}(+2\Delta\xi_0) + F_{in}(-2\Delta\xi_0) + \dots \right] \times \\ & \times \left[F_{ref}^*(0) + F_{ref}^*(+\Delta\xi_0) + F_{ref}^*(-\Delta\xi_0) + \right. \\ & \left. + F_{ref}^*(+2\Delta\xi_0) + F_{ref}^*(-2\Delta\xi_0) + \dots \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где $F_{in}(0)$ и $F_{ref}^*(0)$ – основные (правильные) свернутые спектры входного и опорного сигналов коррелятора. Остальные слагаемые соответствуют проникновению спектров из соседних строк, через строку и т.д., «справа» и «слева». Соответствующие свернутые спектры слабее основных и смещены по частоте на $+\Delta\xi_0$, $-\Delta\xi_0$, $+2\Delta\xi_0$, $-2\Delta\xi_0$ и т.д., где $\Delta\xi_0 = 1/D$ – шаг по частотной оси ξ между линиями свернутого спектра.

Произведения всех этих свернутых спектров из выражения (4) дают на выходе коррелятора основной и ложные корреляционные максимумы. Наиболее сильные сигналы на выходе дадут следующие слагаемые свернутого спектра (4):

$$\begin{aligned} & F_{in}(0)F_{ref}^*(0) + F_{in}(+\Delta\xi_0)F_{ref}^*(0) + \\ & + F_{in}(-\Delta\xi_0)F_{ref}^*(0) + F_{in}(0)F_{ref}^*(+\Delta\xi_0) + \\ & + F_{in}(0)F_{ref}^*(-\Delta\xi_0). \end{aligned}$$

Смещение по частоте в том или ином свернутом спектре эквивалентно смещению несущей частоты соответствующего входного или опорного сигнала. Поэтому вид и величину ложной корреляционной функции можно оценить, исходя из известного для многих сигналов отклика коррелятора на входной сигнал со сдвигом частоты относительно опорного. Такой отклик описывается функцией неопределенности радиолокационного сигнала [9].

В частности, для ЛЧМ-сигнала небольшое отличие несущей частоты входного сигнала от опорного приводит к смещению во времени выходного корреляционного отклика. Некоторые сигналы с псевдослучайной фазовой модуляцией при смещении частоты дают на выходе коррелятора два максимума меньшей интенсивности и т.д. Наилучшее подавление коррелятором сигналов, отличающихся несущей частотой от опорного, имеет сигнал с «кнопочной» функцией неопределенности. Для подобных сигналов помехи, связанные с проникновением свернутого спектра в соседние линии, могут не проявляться и для

них нет необходимости использовать многорастровый ввод входного сигнала.

3. Экспериментальное исследование

Эффективность применения многорастрового ввода в корреляторе длинных сигналов при разном числе входных растров для ЛЧМ-сигналов была проверена нами экспериментально с использованием действующего макета коррелятора совместного преобразования (КСП) [14]. Ввод сигналов в оптическую систему осуществлялся с помощью ЖК-матрицы с электронным управлением от компьютера [15]. Число её элементов составляло 1024×768 . Матрица имела хорошее оптическое качество, достаточное для применения в когерентных системах. В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер мощностью 25 мВт с длиной волны 0,65 мкм. Прямое и обратное преобразование Фурье осуществлялось в макете последовательно во времени с помощью одной и той же линзы с фокусным расстоянием 250 мм. Для регистрации совместного спектра и выходных сигналов коррелятора использовалась WEB-камера, выходные сигналы которой выводились на монитор. Оптическая схема включала также нейтральные фильтры для регулировки используемой мощности лазера и пленочные поляризаторы, обеспечивающие работу жидкокристаллической матрицы в режиме амплитудной модуляции.

На рис. 2 приведен вид входного и опорного сигналов во входной плоскости КСП при однорастровом, двух- и четырехрастровом их вводе в коррелятор.

На рис. 3 приведены совместные свернутые спектры (в +1 и -1 порядках дифракции) и корреляционные сигналы, полученные в КСП в случаях входного и опорного сигналов в виде одного, двух и четырех растров ЛЧМ-сигнала на входе. В случае одного раstra в свернутом спектре, как видно из рис. 3а, наблюдается взаимное влияние линий раstra, что приводит к интерференционным явлениям в совместном спектре, а также к дополнительным (ложным) максимумам на выходе коррелятора, как показано на рис. 3б, сдвинутым по координатным осям в растре корреляционной функции. Величина этого сдвига (задержки корреляционного пика) должна быть пропорциональна сдвигу частоты в спектре, как следует из функции неопределенности ЛЧМ-сигнала [9]. На рис. 3б заметную интенсивность имеют ложные максимумы, соответствующие сдвигам по частоте $\pm \Delta\xi_0$ и $\pm 2\Delta\xi_0$. Оценка пространственного смещения этих максимумов в выходной плоскости коррелятора соответствует теоретически ожидаемым временным сдвигам корреляционных максимумов, полученным из параметров использованного ЛЧМ-сигнала.

На рис. 3в–е приведены сигналы КСП при двух (рис. 3в, г) и четырехрастровом (рис. 3д, е) вводе входного и опорного сигналов. Видно, что с увеличением числа растров на входе наблюдается уменьшение интерференционных явлений между линиями свернутого спектра и ослабление ложных корреляционных максимумов (по сравнению с основными).

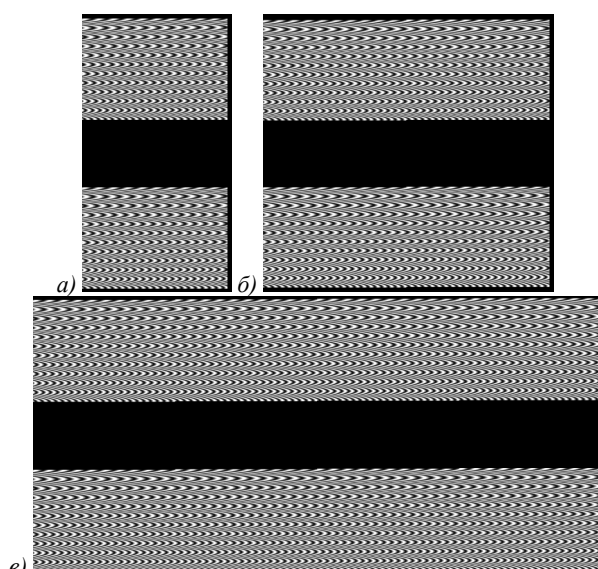


Рис. 2. Опорный и входной сигналы коррелятора совместно преобразования при однорастровом (а), двух- (б) и четырехрастровом (в) их вводе в коррелятор

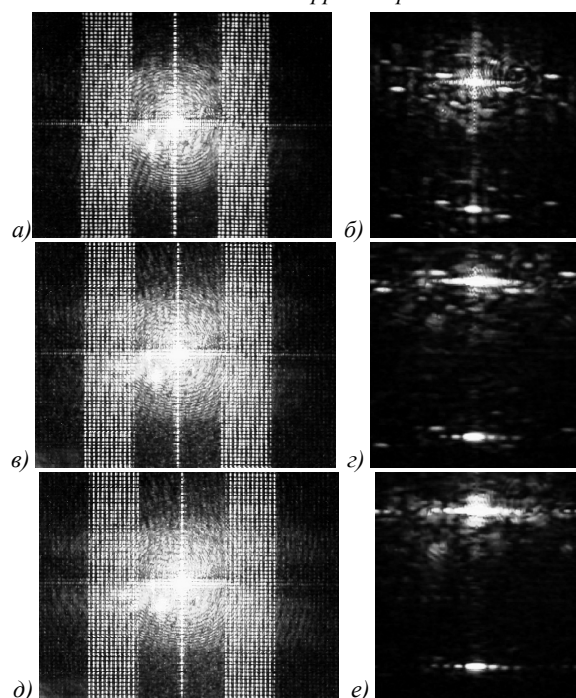


Рис. 3. Свернутые совместные спектры (а, в, д) и выходные сигналы КСП (б, г, е) (нулевой – сверху, и один из корреляционных порядков) при однорастровом (а, б), двух- (в, г) и четырёхрастровом (д, е) входных сигналах

Как было отмечено выше, при корреляционной обработке длинных сигналов, имеющих «кнопочную» функцию неопределенности, можно избежать ложных сигналов на выходе коррелятора и без применения многорастрового ввода. На рис. 4 приведен выходной сигнал коррелятора при однорастровом вводе входного и опорного сигналов такого типа (М-последовательности). Как и ожидалось, в области корреляции не наблюдается заметных ложных сигналов. Эксперименты показали, что отношение сигнал-

помеха не увеличивается при использовании многорастрового ввода для этого типа сигналов.

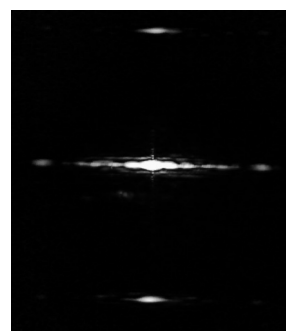


Рис. 4. Выходной сигнал коррелятора при однорастровом вводе входного и опорного сигналов в виде М-последовательности

Заключение

Как следует из полученных результатов, применение многорастрового ввода длинных сигналов в когерентных оптических корреляторах позволяет существенно уменьшить величину ложных корреляционных максимумов, появляющихся при однорастровом вводе некоторых типов сигналов (в наших экспериментах – ЛЧМ-сигналов). Платой при этом является уменьшение площади входного устройства, используемой для ввода полезной информации, что приводит к уменьшению максимальной базы обрабатываемых сигналов.

При корреляционной обработке длинных сигналов, имеющих «кнопочную» функцию неопределенности, можно избежать ложных сигналов на выходе коррелятора и без применения многорастрового ввода.

Литература

1. Радзиевский, В.Г. Направления развития методологии обоснования средств радио- и радиотехнической разведки при разведывательно-информационном обеспечении радиоэлектронной борьбы / В.Г. Радзиевский // Радиотехника. – 2010. – № 6. – С. 67-73.
2. Кузьмин, М.С. Обработка одномерных сигналов с растровым вводом в двумерных оптических корреляторах / М.С. Кузьмин, С.А. Рогов // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 4. – С. 156-158.
3. Евтихийев, Н.Н. Реализация инвариантных голографических фильтров с линейным фазовым коэффициентом в схеме коррелятора Вандер Люгта / Н.Н. Евтихийев, С.Н. Стариков, Е.Ю. Злоказов, С.А. Сироткин, Р.С. Стариков // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 2. – С. 191-193.
4. Beri, V.K. Enhancing the capabilities of binary phase only filter / V.K. Beri, A. Aran, S. Munshi, A.K. Gupta, V.K. Rastogi // Optics and Laser Technology. – 2010. – Vol. 42, Issue 1. – P. 70-80. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2009.04.018.
5. Manzur, T. Optical correlator based target detection, recognition, classification, and tracking / T. Manzur, J. Zeller, S. Serati // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51, Issue 21. – P. 4976-4983. – DOI: 10.1364/AO.51.004976.
6. Ikeda, K. High-speed image matching with coaxial holographic optical correlator / K. Ikeda, E. Watanabe // Japanese Journal of Applied Physics. – 2016. – Vol. 55, Issue 9S. – 09SC01. – DOI: 10.7567/JJAP.55.09SC01.

7. HOLOEYE. Pioneers in photonic technology [Electronical Resource]. – URL: <https://holoeye.com/> (request date 12.02.2019).
8. Оптическая обработка информации. Применения // под ред. Д. Кейссента. – М.: Мир, 1980. – 350 с.
9. Кук, Ч. Радиолокационные сигналы / Ч. Кук, М. Бернфельд. – М.: Советское радио, 1971. – 567 с.
10. Thomas, C.E. Optical spectrum analysis of large space bandwidth signals / C.E. Thomas // Applied Optics. – 1966. – Vol. 5, Issue 11. – P. 1782-1790. – DOI: 10.1364/AO.5.001782.
11. Кузьмин, М.С. Анализатор свернутого спектра с жидкокристаллическим устройством ввода сигналов / М.С. Кузьмин, С.А. Рогов // Письма в журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, № 15. – С. 1-5.
12. Тарасов, Л.В. Когерентно-оптическая обработка радиосигналов / Л.В. Тарасов, В.А. Ежов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1980. – № 2. – С. 3-36.
13. Гудмен, Дж. Введение в Фурье-оптику / Дж. Гудмен. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
14. Кузьмин, М.С. Оптический фурье-процессор с жидкокристаллическим устройством ввода информации / М.С. Кузьмин, С.А. Рогов // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82, № 3. – С. 23-29.
15. Kuzmin, M.S. Spatial light modulator based on liquid-crystal video projector matrix for information processing systems / M.S. Kuzmin, S.A. Rogov // Optical Memory and Neural Networks. – 2013. – Vol. 22, Issue 4. – P. 261-266. – DOI: 10.3103/S1060992X13040103.

Сведения об авторах

Кузьмин Михаил Сергеевич, 1990 года рождения, в 2014 окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, является аспирантом высшей школы прикладной физики и космических технологий ИФНиТ СПбПУ. Область интересов: оптическая обработка информации и гибридные оптико-цифровые системы. E-mail: ranlitik@gmail.com.

Давыдов Вадим Владимирович, 1966 года рождения, в 1989 окончил Ленинградский ордена Ленина политехнический институт им М.И. Калинина по специальности «Радиофизика и электроника», работает доцентом высшей школы прикладной физики и космических технологий ИФНиТ СПбПУ. Область интересов: оптические технологии. E-mail: davydov_vadim66@mail.ru.

Рогов Сергей Александрович, 1946 года рождения, в 1971 окончил Ленинградский ордена Ленина политехнический институт им М.И. Калинина по специальности «Радиофизика и электроника», работает профессором высшей школы прикладной физики и космических технологий ИФНиТ СПбПУ и СПбГУТ. Область интересов: оптическая обработка информации и гибридные оптико-цифровые системы. E-mail: sarogov@mail.ru.

ГРНТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 15 июня 2018 г. Окончательный вариант – 22 февраля 2019 г.

On the use of a multi-raster input of one-dimensional signals in two-dimensional optical correlators

M.S. Kuzmin¹, V.V. Davydov¹, S.A. Rogov^{1,2}

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,

² The Bonch-Bruевич Saint – Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia

Abstract

A mathematical description of a coherent optical correlator for the multi-raster input of long signals is given. It is shown that such an input makes it possible to reduce the value of false correlation maxima that are generally found at the output of a correlator with a single-raster input. It is shown that false maxima do not appear when processing signals with a thumbtack ambiguity function, allowing one to do without a multi-raster input. The results of the theoretical analysis are confirmed by experiments with chirp signals and M-sequence type signals.

Keywords: correlator, joint transform correlator, JTC, liquid-crystal input device, signal processing.

Citation: Kuzmin MS, Davydov VV, Rogov SA. On the use of a multi-raster input of one-dimensional signals in two-dimensional optical correlators. Computer Optics 2019; 43(3): 391-396. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-391-396.

References

- [1] Radzievsky VG. Directions of development of methodology of substantiation of means of communication and electromagnetic intelligence at engineering-information for radio-electronic war [In Russian]. Radioengineering 2010; 6: 67-73.
- [2] Kuzmin MS, Rogov SA. Processing of 1D signals with raster input in 2D optical correlators. Technical Physics 2015; 60(4): 631-633. DOI: 10.1134/S1063784215040179.
- [3] Evtikhiev NN, Starikov SN, Zlokazov EYu, Starikov RS. Realisation of invariant holographic filters with the linear phase coefficient in a Van der Lugt correlator. Quantum Electron 2008; 38(2): 191-193. DOI: 10.1070/QE2008v038n02ABEH013638.
- [4] Beri VK, Aran A, Munshi S, Gupta AK, Rastogi VK. Enhancing the capabilities of binary phase only filter. Optics & Laser Technology 2010; 42(1): 70-80. DOI: 10.1016/j.optlastec.2009.04.018.

- [5] Manzur T, Zeller J, Serati S. Optical correlator based target detection, recognition, classification, and tracking. *Appl Opt* 2012; 51(21): 4976-4983. DOI: 10.1364/AO.51.004976.
- [6] Ikeda K, Watanabe E. High-speed image matching with coaxial holographic optical correlator. *Japanese Journal of Applied Physics* 2016; 55(9S): 09SC01. DOI: 10.7567/JJAP.55.09SC01.
- [7] HOLOEYE. Pioneers in photonic technology. Source: (<https://holoeye.com/>).
- [8] Casasent D, ed. *Optical data processing. Applications*. Berlin: Springer; 1978.
- [9] Cook CE, Bernfeld M. *Radar signals*. New York: Academic Press; 1967.
- [10] Thomas CE. Optical spectrum analysis of large space bandwidth signals. *Appl Opt* 1966; 5(11): 1782-1790. DOI: 10.1364/AO.5.001782.
- [11] Kuzmin MS, Rogov SA. A folded-spectrum analyzer with a liquid-crystal input device. *Technical Physics Letters* 2014; 40(8): 629-631.
- [12] Tarasov LV, Yezhov VA. Coherent-optical processing of radio signals [In Russian]. *Zarubezhnaya radioelektronika* 1980; 2: 3-36.
- [13] Goodman JW. *Introduction to Fourier optics*. New York: McGraw-Hill; 1968.
- [14] Kuzmin MS, Rogov SA. Optical Fourier processor with a liquid-crystal information-input device. *Journal of Optical Technology* 2015; 82(3): 147-152. DOI: 10.1364/JOT.82.000147.
- [15] Kuzmin MS, Rogov SA. Spatial light modulator based on liquid-crystal video projector matrix for information processing systems. *Opt Mem Neural Net* 2013; 22(4): 261-266. DOI: 10.3103/S1060992X13040103.

Author's information

Mikhail Sergeyeovich Kuzmin, (b. 1990) graduated from Saint-Petersburg State Polytechnic University in 2014. Postgraduate at the Higher School of Applied Physics and Space Technologies PHNT SPbPU. Field of interest: optical processing of information and hybrid optical-digital systems. E-mail: ranlitik@gmail.com.

Vadim Vladimirovich Davydov, (b. 1966) graduated from Leningrad Orden of Lenin Polytechnic Institute named after M.I.Kalinin on the speciality "Radiophysics and Electronics" in 1989. Associate professor at the Higher School of Applied Physics and Space Technologies PHNT SPbPU. Field of interest: optical technologies. E-mail: davydov_vadim66@mail.ru.

Sergey Aleksandrovich Rogov, (b. 1946) graduated from Leningrad Orden of Lenin Polytechnic Institute named after M.I.Kalinin on the speciality "Radiophysics and Electronics" in 1971. Professor at the Higher School of Applied Physics and Space Technologies PHNT SPbPU and SPbGUT. Field of interest: optical processing of information and hybrid optical-digital systems. E-mail: sarogov@mail.ru.

Received June 15, 2018. The final version – February 22, 2019.
