

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКУСТООПТИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯТОРОВ ДЛЯ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

*Н. А. Есепкина, А. П. Лавров, С. В. Прусс-Жуковский,
П. А. Фридман, М. Н. Ананьев*

Обсуждается возможность применения оптической обработки для вычисления взаимной корреляционной функции сигналов радиоинтерферометра со сверхдлинной базой. Оптический коррелятор состоит из лазерного диода, акустооптического модулятора и фотоприемника на базе прибора с зарядовой связью. Для модуляции излучения диода и несущей акустооптического модулятора используются ограниченные по нулевому уровню шумовые сигналы. Приводится описание экспериментальной установки.

Possibility of using the optical reduction for calculation of reciprocal correlation function of signals obtained with the long-base-line radio interferometer is discussed. The optical correlator consists of a laser diode, an acousto-optical modulator and a photoreceiver made on the basis of the device with the charge communication. For modulation of the diode emission and of the acousto-optical modulator carrier the noise signals limited by the zero level are used. A description of the experimental device is presented.

Для измерения координат компактных источников и построения их радиоизображения в радиоастрономии используются радиоинтерферометры, включающие две или более разнесенных антенн. В настоящее время наиболее перспективными являются радиоинтерферометры со сверхдлинной базой (РСДБ). В таких системах сигналы, принятые на антеннах, разнесенных на сотни—тысячи километров, преобразуются в видеополосе с помощью гетеродинов, частота которых стабилизирована квантово-механическими стандартами. Затем сигналы вместе с метками времени записываются на магнитофоны. Ленты привозятся в центр обработки, где вычисляется взаимно-корреляционная функция этих сигналов и делается вторичная обработка (вычисление задержки, частоты интерференционных лепестков и т. д.). Корреляционная обработка осуществляется в цифровой форме программным (на универсальных ЭВМ) или аппаратным (в специализированных процессорах) способом в зависимости от применяемых магнитофонов [1—4]. Полоса частот обрабатываемых сигналов определяется возможностями магнитофонов.

Требования, предъявляемые к системам обработки в современных радиоинтерферометрах, становится все труднее реализовать с помощью магнитофонной записи. Например, в системе «Полигам», где отдельные элементы объединяются в единую сеть с помощью геостационарного спутника связи, аппаратура центра обработки должна обеспечивать в реальном времени обработку сигналов в полосе 50—100 МГц с десяти радиотелескопов [5]. Для обеспечения широкой полосы предлагается использовать параллельную обработку в стандартной полосе 2 МГц, это порождает громоздкость и сложность гетеродинной системы приемников. Объем аппаратуры существенно возрастает при обработке сигналов для многих баз.

Одним из возможных путей преодоления указанных трудностей является использование в центре обработки гибридных оптико-цифровых систем, в частности акустооптических корреляторов [5]. Такие системы позволяют оптимальным образом использовать возможности аналоговых (оптических) и цифровых вычислительных устройств. В данной статье рассматривается способ применения акустооптических корреляторов для обработки сигналов радиоинтерферометров, а также приводятся результаты экспериментального исследования макета акустооптического коррелятора.

Акустооптический коррелятор (АОК) с интегрированием во времени. Оптические схемы корреляторов могут быть выполнены различным образом. Обзор методов и схем корреляционной обработки сигналов с помощью акустооптики приведен в [6]. Рассмотрение возможностей и недостатков известных схем позволило выбрать схему, отвечающую требованиям, предъявляемым к корреляторам в РСДБ, т. е. обрабатывающую в реальном времени сигналы с большим произведением полосы на длительность. Эта схема приведена на рис. 1. Она известна в литературе как схема акустооптического коррелятора с интегрированием во времени. Основными элементами, определяющими характеристики схемы, являются модулируемый источник света, акустооптический модулятор (АОМ) и многоэлементный фотоприемник с накоплением. В настоящее время наиболее перспективными являются фотоприемники на основе приборов с зарядовой связью (ПЗСФП). Типы, характеристики и основные параметры ПЗСФП, выпускаемых нашей промышленностью, приведены в [7, 8].

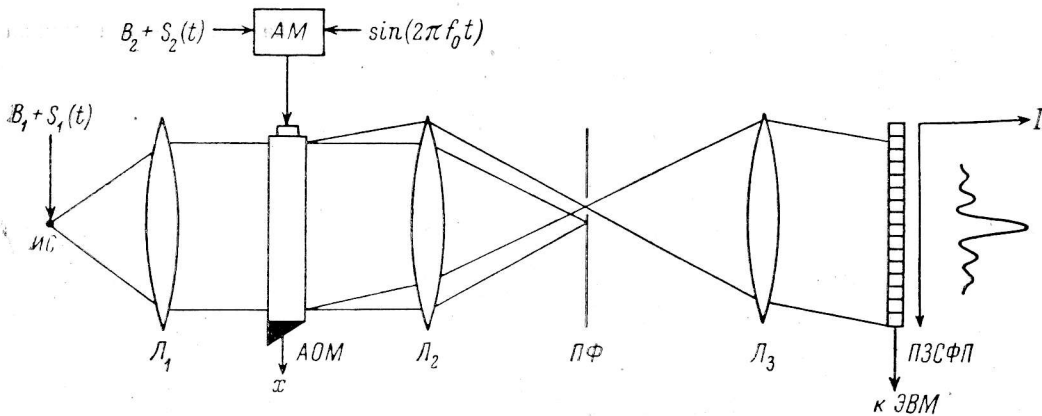


Рис. 1. Структурная схема акустооптического коррелятора с интегрированием во времени: ИС — модулируемый источник света; АОМ — акустооптический модулятор; АМ — амплитудный модулятор; ПФ — пространственный фильтр; ПЗСФП — многоэлементный фотоприемник на приборах с зарядовой связью; L_1 — L_3 — сферические линзы.

Схема на рис. 1 позволяет получить взаимно-корреляционную функцию двух видеосигналов. Один из обрабатываемых сигналов $S_1(t)$ модулирует интенсивность I_1 источника света:

$$I_1(t) = b_1 + s_1(t),$$

где b_1 — необходимое смещение, так как интенсивность света — величина положительная, а в общем случае $s_1(t)$ может принимать отрицательные значения. С помощью линзы L_1 формируется пучок, равномерно освещающий апертуру АОМ. Вторым обрабатываемый сигнал $s_2(t)$ модулирует по амплитуде радиочастотную несущую, подаваемую на АОМ, так, чтобы интенсивность света $I_2(t)$ в первом дифракционном порядке этого модулятора была

$$I_2(t, x) = b_2 + s_2\left(t - \frac{x}{v}\right),$$

где b_2 — необходимое смещение; x — координата по апертуре модулятора; v — скорость звука в звукопроводе модулятора. Система линз L_2 и L_3 и пространственный фильтр ПФ формируют изображение АОМ, восстановленное в дифрагированном свете в плоскости многоэлементного фотоприемника. С помощью фильтра ПФ фильтруется нулевой порядок дифракции. Распределение интенсивности в плоскости фотоприемника определяется произведением $I_1(t) I_2(t, x)$.

Отдельные элементы ПЗСФП, расположенные в дискретных позициях x_i , осуществляют накопление заряда, пропорциональное экспозиции. Результа-

рующее выходное напряжение с i -го элемента $\Phi\Pi$, следовательно, можно записать в следующем виде:

$$R_{12}(x_i) = k \int_0^T I_1(t) I_2(t, x_i) dt,$$

где T — время интегрирования $\PiЗСФ\Pi$ (определяется схемой управления $\Phi\Pi$); k — коэффициент пропорциональности. Система линз L_2 и L_3 обеспечивает соответствие осей AOM и фотоприемника в отношении 1 : 1. Подставляя вместо $I_1(t)$ и $I_2(t, x)$ их выражения, получим

$$R_{12}(x) = k \int_0^T [b_1 + s_1(t)] \left[b_2 + s_2\left(t - \frac{x}{v}\right) \right] dt = k \int_0^T s_1(t) s_2\left(t - \frac{x}{v}\right) dt + \\ + \int_0^T b_1 b_2 dt + k \int_0^T b_1 s_2\left(t - \frac{x}{v}\right) dt + k \int_0^T b_2 s_1(t) dt.$$

Если сигналы s_1 и s_2 таковы, что их средние значения на промежутке интегрирования равны нулю, т. е.

$$\frac{1}{T} \int_0^T s_1(t) dt = 0 \quad \text{и} \quad \frac{1}{T} \int_0^T s_2(t) dt = 0,$$

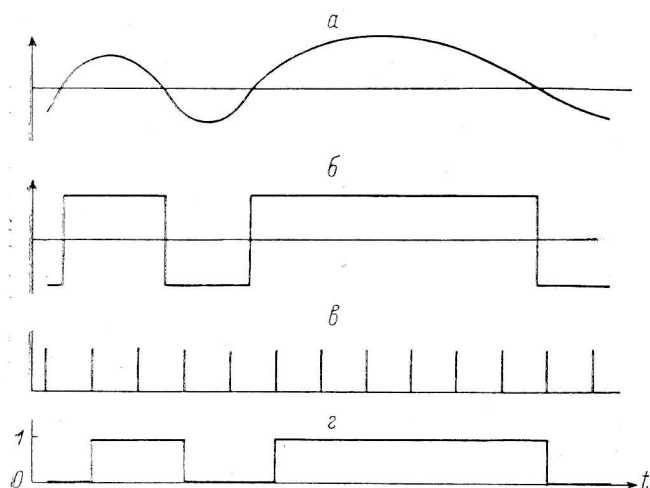
то выходное напряжение есть сумма искомой взаимно-корреляционной функции сигналов s_1 и s_2 (первое слагаемое) и некоторой постоянной составляющей $kb_1 b_2 T$ (второе слагаемое).

Корреляционная функция в таком устройстве вычисляется параллельно для диапазона задержек от 0 до L/v , где L — апертура AOM . Максимальное время задержки сигнала L/v AOM может составлять десятки, чаще — единицы микросекунд. Число получаемых отсчетов по задержке равно числу элементов в $\PiЗСФ\Pi$. Оно может быть $\sim 10^3$ в приборах с линейным расположением фоточувствительных элементов [7, 8]. Полоса частот сигналов, обрабатываемых в таком корреляторе, определяется полосой AOM и полосой модуляции источника света, в качестве которого целесообразно использовать полупроводниковый лазер или светоизлучающий диод. Полоса частот современных AOM достигает сотен мегагерц [9], полоса модуляции источников света также достаточно велика: десятки и сотни мегагерц [10]. Важным преимуществом такой схемы является значительное время интегрирования. Современные $\PiЗСФ\Pi$ обеспечивают времена накопления в десятки и даже сотни миллисекунд при комнатной температуре. Время интегрирования может быть существенно увеличено за счет применения буферной электронной памяти либо за счет охлаждения $\PiЗСФ\Pi$.

Рассмотренной схеме акустооптического коррелятора присущи определенные недостатки. В данной схеме необходимым условием получения действительной корреляционной функции обрабатываемых сигналов является линейная модуляция интенсивности света как первым, так и вторым модуляторами. В случае обработки биполярных сигналов необходимо внимательно подойти к выбору рабочих точек на модуляционных характеристиках модуляторов и установке пространственного фильтра $\Pi\Phi$. В частности, интенсивность света в первом порядке дифракции на выходе AOM пропорциональна $\sin^2(k_1 u)$, где u — амплитуда радиочастотной несущей, подаваемой на AOM , k_1 — константа. Для получения наибольшего размаха линейного участка модуляционной характеристики амплитуда несущей должна меняться по закону $u = b_2 + s_2(t)$, где величина смещения b_2 подбирается так, чтобы $k_1 b_2 = \pi/4$. Эта рабочая точка соответствует 50 % эффективности дифракции. Итак, для работы на линейных участках модуляционных характеристик обрабатываемые сигналы должны быть смещены и, кроме того, нормализованы (масштабированы), чтобы не выходить за пределы выбранных участков. В итоге схема должна работать с низким отношением сигнала к смещению, т. е. с малой глубиной модуляции. Это

Приводит к низкому контрасту в выходном сигнале, что ограничивает динамический диапазон коррелятора и используемый динамический диапазон фотоприемника. В случае обработки в данной схеме шумовых сигналов величина постоянной составляющей на выходе не менее чем на порядок превышает полезный сигнал. Большая постоянная составляющая на выходе ограничивает время интегрирования в фотоприемнике. Кроме того, с расширением полосы АОМ их эффективность уменьшается, это также ведет к уменьшению глубины модуляции при сохранении линейности.

Обработка в акустооптическом корреляторе знаковых сигналов. Для исключения влияния нелинейности модуляционных характеристик и повыше-



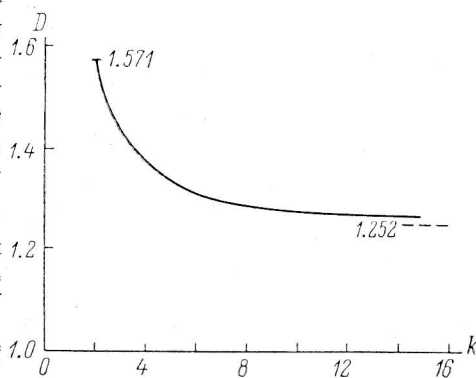
ния контраста выходного распределения в схеме АОК с интегрированием во времени следует перейти от обработки видеосигналов к обработке соответствующих им знаковых сигналов. Следует отметить, что все современные системы обработки РСДБ реализуют (в цифровой форме) этот способ косвенного измерения коэффициента корреляции с помощью знакового метода [1—5]. Согласно этому методу [11], для получения оценки коэффициента взаимной корреляции $\rho_{xy}(\tau)$ между процессами $x(t)$ и $y(t)$ вначале оба процесса подвергаются ограничению по нулевому уровню (рис. 2, а, б) (однобитовое или знаковое представление сигналов), затем вычисляется знаковая взаимно-кор-

Рис. 2. Преобразование входных шумовых сигналов в знаковую и цифровую форму.

Рис. 3. Зависимость коэффициента уменьшения D от нормированной частоты выборки $k=f/F_v$ для коррелятора с квантованием по двум уровням.

Рис. 3. Зависимость коэффициента уменьшения D от нормированной частоты выборки $k=f/F_v$ для коррелятора с квантованием по двум уровням.

$$D = \frac{\text{отношение сигнал/шум в аналоговом корреляторе}}{\text{отношение сигнал/шум в цифровом корреляторе}}$$



реляционная функция ограниченных сигналов, от которой с помощью корреляции Ван-Флека можно перейти к $\rho_{xy}(\tau)$.

При цифровой обработке ограниченные по нулевому уровню исходные сигналы дискретизируют (квантуют) по времени тактовыми импульсами (рис. 2, в) с частотой $f \geq 2F_v$, где F_v — верхняя частота спектра сигналов $x(t)$ и $y(t)$. Затем производится подсчет среднего числа совпадений $P_{x\bar{y}}$ значений сигналов x и \bar{y} за время T (x и \bar{y} — ограниченные и квантованные по времени сигналы, показанные на рис. 2, г в коде «без возврата к нулю»). От $P_{x\bar{y}}$ можно по известным формулам перейти к $\rho_{xy}(\tau)$ [11].

Однобитовое представление исходных сигналов и квантование во времени приводят к уменьшению отношения сигнал/шум на выходе коррелятора по сравнению с аналоговым коррелятором, обрабатывающим исходные сигналы $x(t)$ и $y(t)$. Коэффициент уменьшения отношения сигнал/шум D можно оценить по графику, приведенному на рис. 3 [12]. В цифровом корреляторе при нормированной частоте квантования $k=f/F_v=2$, $D=1.571$. Обработка знаковых сигнала-

лов в аналоговом корреляторе соответствует обработке в цифровом корреляторе при высоких значениях нормированной частоты квантования k . Следовательно, при такой обработке коэффициент $D=1.252$.

Переход в АОК к обработке знаковых сигналов позволяет установить в каждом модуляторе теоретическое минимально возможное смещение и при этом получить 100 %-ную глубину модуляции интенсивности света. Это дает значительное повышение контраста выходного распределения (отношение постоянной составляющей к полезному сигналу ~ 1 при обработке шумовых сигналов с $\rho_{xy} = 1$), а также лучшее использование динамического диапазона фотоприемника. При этом существенно упрощается реализация ряда элементов схемы. Все это вместе делает реальным использование таких корреляторов. Следует отметить, что акустооптические корреляторы с интегрированием во времени сейчас широко исследуются с целью применения в различных областях радиоэлектроники для обработки радиосигналов [13, 14]. На наш взгляд, они являются весьма перспективными и для радиоастрономии.

Структурная схема использования АОК. Структурная схема использования АОК в центре обработки сигналов интерферометра приведена на рис. 4. Сигналы в каждом приемнике после гетеродинирования к видеодиапазону ограничиваются по нулевому уровню, затем

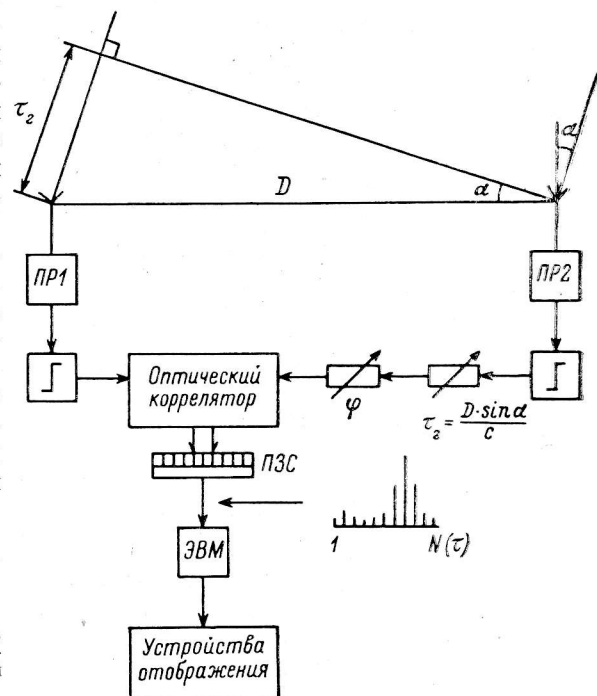


Рис. 4. Структурная схема интерферометра с оптическим коррелятором в центре обработки.

$PP1$ и $PP2$ — приемники гетеродинного типа; $P3C$ — многоэлементный фотоприемник на основе приборов с зарядовой связью.

выбираются расчетные геометрическая задержка и частота интерференционных полос (в компенсаторе Доплера). После этого сигналы подаются на коррелятор, работа которого рассмотрена выше.

Корреляционная функция с выхода $P3C$ вводится в ЭВМ для последующей обработки (получение оценок интерференционного отклика с большим частотным разрешением). Число отсчетов по задержке равно числу элементов в $P3C$ ($\sim 10^3$). Для регистрации корреляционного пика нужно гораздо меньшее число отсчетов. Поэтому в ЭВМ отсчеты вводятся из небольшого окна по задержкам; это окно необходимо сделать управляемым — скользящим таким образом, чтобы отслеживать перемещение корреляционного пика по элементам $P3C$ при изменении геометрической задержки из-за вращения Земли. В этом случае акустооптический коррелятор берет на себя часть функций линии задержки (ЛЗ) интерферометра, что позволяет делать основную ЛЗ с более крупным шагом, равным времени задержки АОМ, т. е. величине L/v (единицы и десятки микросекунд). Это обстоятельство существенно упрощает задачу изготовления широкополосной ЛЗ и управления ее работой.

Очень важным обстоятельством, определяющим преимущества оптических корреляторов перед цифровыми, является двумерность оптических систем обработки. Вторая координата может быть эффективно использована при обработке сигналов многоэлементных интерферометров в одном устройстве. Габариты акустооптического коррелятора при этом практически не изменяются.

Результаты экспериментов. Для исследования работы АОК с интегрированием во времени и характеристик ряда его элементов был собран макет корреля-

лятора, схема которого приведена на рис. 5, в. В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер (лазерный диод) типа ИЛПН ($\lambda = 0.82$ мкм, ток порога ~ 170 мА, $P_{\text{изл}} \approx 5$ мВт при токе 270 мА). В эксперимен-

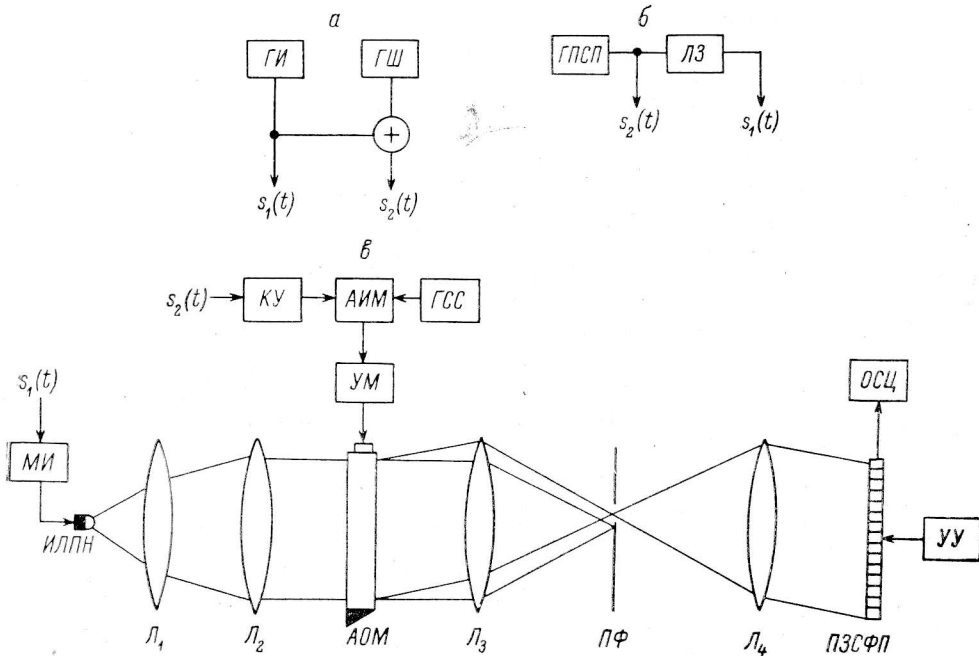


Рис. 5. Структурные схемы.

а — имитатор сигналов; *ГИ* — генератор импульсов, *ГШ* — генератор случайного шума с нормальным законом распределения; *б* — имитатор сигналов; *ГПСП* — генератор псевдослучайной последовательности, *ЛЗ* — регулируемая линия задержки; *в* — экспериментальный макет акустооптического коррелятора с интегрированием во времени (*ИЛПН* — лазерный диод типа ИЛПН, *МИ* — модулятор интенсивности, *КУ* — амплитудно-импульсное устройство — жесткий ограничитель, *ГСС* — генератор синусоидального сигнала, *АИМ* — амплитудно-импульсный модулятор, *УМ* — усилитель мощности, *АОМ* — акустооптический модулятор, *Л₁* и *Л₂* — коллиматор, *Л₃* и *Л₄* — сферические линзы, *ПФ* — пространственный фильтр, *ПЗСФП* — многоэлементный фотоприемник на основе приборов с зарядовой связью, *УУ* — устройство управления работой *ПЗСФП*; *ОСЦ* — осциллограф).

тах использовался жидкостный АОМ со следующими параметрами: центральная частота $f_0 = 30$ МГц, полоса пропускания ~ 4 МГц, апертура ~ 7.6 мкс. Первоначальная настройка оптической схемы осуществлялась с помощью элек-

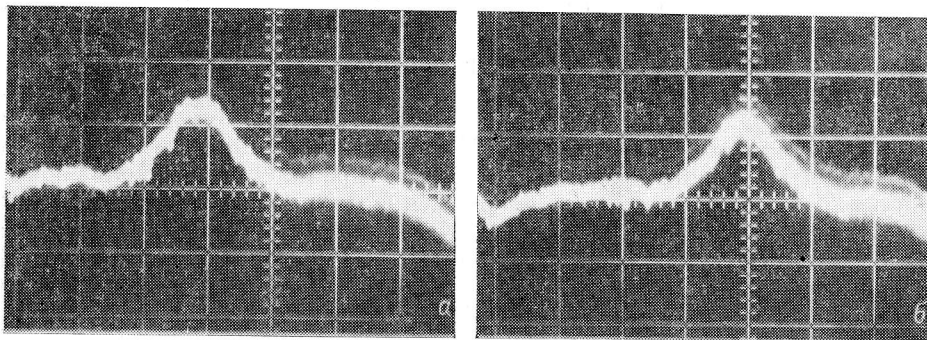


Рис. 6. Корреляционная функция псевдослучайной последовательности при двух значениях задержки в одном из каналов.

Задержка, мкс: *а* — 12, *б* — 13; масштаб: по горизонтали — 0.9 мкс/дел, по вертикали — 100 мВ/дел.

трооптического преобразователя, более точная — с помощью ПЗС-фотоприемника. В экспериментах использовался 500-элементный ПЗСФП с совмещенными секциями накопления и сдвига [8]. Для управления работой ПЗСФП было разработано специальное устройство управления, во многом аналогичное устрой-

ству управления, приведенному в [15]. Сигнал с ПЗСФП выводился на экран осциллографа. Время интегрирования в ПЗСФП составляло 30 мс. Результаты экспериментов приведены на рис. 6 и 7.

На рис. 6 приведена корреляционная функция псевдослучайной последовательности (псп). Схема использовавшегося в этом эксперименте имитатора сигналов приведена на рис. 5, б. Псп использовалась для модуляции как лазерного диода, так и радиочастотной несущей, подаваемой на АОМ. Псп генерировалась регистром сдвига с обратными связями и тактовой частотой 1 МГц. Сигнал,

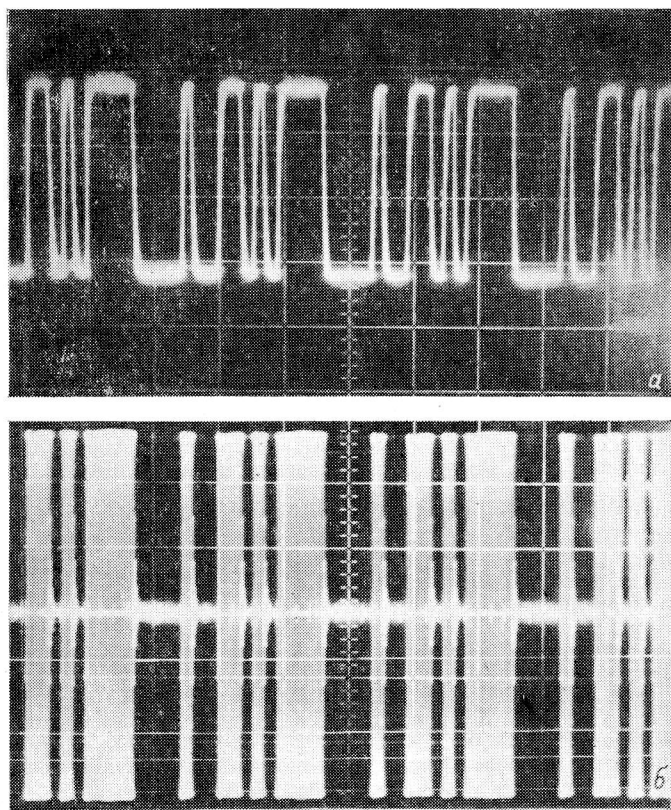


Рис. 7. Осциллограммы сигналов.

а — псевдослучайная последовательность, подаваемая на модулятор интенсивности лазерного диода; б — радиочастотная несущая, промодулированная псевдослучайной последовательностью и подаваемая на АОМ. Масштаб по горизонтали 6 мкс/дел, по вертикали — 2 В/дел.

подаваемый на лазерный диод, задерживался. Рис. 6, а соответствует задержке 12, рис. 6, б — 13 мкс. На рис. 7, а, б приведены осциллограммы сигналов, подаваемых на лазерный диод и АОМ соответственно.

Заключение. Рассмотрение возможностей акустооптических корреляторов с интегрированием во времени показало, что они являются перспективными для использования в системах корреляционной обработки сигналов радиоинтерферометров, при этом они имеют определенные преимущества перед цифровыми системами обработки. Имеющаяся в настоящее время элементная база достаточно развита и позволяет обрабатывать сигналы в полосе 50—100 МГц. Двумерность оптических систем обработки позволяет эффективно обрабатывать в одном компактном устройстве сигналы многоэлементных интерферометров. Проведенные экспериментальные исследования характеристик макета АОК при обработке знаковых видеосигналов показывают, что схема коррелятора достаточно проста в настройке и при использовании полупроводникового лазера и многоэлементного ПЗС-фотоприемника может быть реализована в виде малогабаритного, надежного, сравнительно недорогого устройства. При этом получены параметры экспериментального макета, близкие к расчетным. В дальней-

шем необходимо провести более детальное исследование характеристик акустооптического коррелятора совместно с ЭВМ в составе гибридной оптико-цифровой системы. Это позволит приступить непосредственно к разработке и созданию оптико-цифрового широкополосного коррелятора для обработки сигналов РСДБ.

Литература

1. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 416 с.
2. Кларк Б. Интерферометрическая система с магнитной видеозаписью НРАО. — ТИИЭР, 1973, 61, № 9, с. 94—103.
3. Левина М. Д., Резников С. В., Фридман П. А. Цифровой знаковый коррелятор для радиоинтерферометра со сверхдлинной базой. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1982, 16, с. 93—99.
4. Комплекс аппаратуры РСДБ на волну 18 см / Б. З. Каневский, Л. Р. Коган, Л. И. Матвеевко и др. — В кн.: XIV Всесоюзная радиоастрономическая конференция. Тез. докл. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1982, с. 410—411.
5. Проект «Полигам» / В. А. Алексеев, С. Я. Брауде, В. А. Брумберг и др. — Сообщ. САО, 1980, с. 27—30.
6. Родес У. Т. Акустооптическая обработка сигналов: свертка и корреляция. — ТИИЭР, 1981, 69, № 1, с. 74—91.
7. Фоточувствительные схемы с зарядовой связью: состояние и перспективы развития / В. А. Вето, Е. В. Костюков, Ю. А. Кузнецов, Ф. П. Пресс. — Электрон. пром-сть, 1982, вып. 7, с. 3—6.
8. Выходные устройства систем оптической обработки информации на основе приборов с зарядовой связью / В. А. Арутюнов, Н. А. Есепкина, Б. А. Котов и др. — В кн.: Оптико-электронные методы обработки изображений / Под ред. С. Б. Гуревича и Г. А. Гаврилова. Л.: Наука, 1982, с. 147—165.
9. Широкополосный акустооптический спектроанализатор для радиоастрономии / Н. А. Есепкина, Г. М. Блаер, З. В. Дравских и др. — ЖТФ, 1982, 52, вып. 3, с. 540—543.
10. Semiconductor Devices for Optical Communication / Ed. by H. Kressel. Berlin: Springer-Verlag, 1980. 164 p.
11. Грибанов Ю. И., Веселова Г. П., Андреев В. Н. Автоматические цифровые корреляторы. М.: Энергия, 1971, с. 34—46.
12. Цифровой корреляционный спектрометр, использующий многоуровневые квантования / Ф. Бауэрс, Д. Уайт, Т. Лэндкер, Р. Клинглер. — ТИИЭР, 1973, 61, № 9, с. 226—232.
13. Rotz F. B. Time-integrating optical correlator. — In: Active Optical Devices / Ed. by J. Tracy. Proc. SPIE, 1979, vol. 202, p. 163—169.
14. Goutzoulis A. P.; Vijaya Kumar B. V. K. Squared signal correlation and a possible acoustooptic implementation. — Appl. Opt., 1984, 23, N 6, p. 798—802.
15. Использование приборов с зарядовой связью в системах оптической обработки информации / В. А. Арутюнов, Н. А. Есепкина, Б. А. Котов и др. — ИТЭ, 1982, № 1, с. 98—102.

Поступила в редакцию 08.12.83