

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 535.317.1

А. А. ЛАПИДЕС, В. Э. МЕЛАМУД

(Москва)

ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Оптические методы находят все более широкое применение, особенно в случаях, требующих обработки сложных изображений в реальном времени. Эти же методы полезны при обработке сигналов, записанных на промежуточный носитель, когда требуется устранить искажения, например, вносимые в процессе записи.

Идейная основа оптических методов родилась на стыке теории дифракции и теории интегралов Фурье [1—3]. Эта принципиальная связь имеет фундаментальное значение и приводит к чрезвычайной близости методов и идей радиолокации, теории поля и голографии [4—8].

Так как дифракционные процессы лежат в основе действия многих радиооптических систем обработки сигналов и изображений, неудивительно широкое использование в них дифракционных решеток (и аналогичных периодических структур).

В первом разделе представленного обзора рассмотрены методы модуляции фазы оптической волны с помощью оптических транспарантов на основе дифракционных решеток, во втором — методы кодирования изображений дифракционными решетками, третий раздел посвящен описанию методов спектрального анализа сигналов, использующих их представление в виде периодических структур. В последнем разделе дан обзор различных методов подавления периодических помех на изображении.

1. Фазовая модуляция оптических полей при помощи нерегулярных дифракционных решеток: метод дегур-фазы. Как известно, одно из принципиальных отличий голографии от фотографии состоит в том, что голографический метод регистрации и восстановления волновых полей позволяет записать в среде, чувствительной только к интенсивности волны, полную информацию об ее амплитуде и фазе [6—8]. Голограмму можно считать закодированной записью амплитуды и фазы волны, исходящей от объекта. Эта запись возникает в результате интерференции объектной волны и когерентной с ней опорной волны. Интерференционная картина записывается в фоточувствительной среде; при этом в каждой малой локальной области среды амплитуда записываемой (объектной) волны модулирует контраст интерференционной картины, а ее фаза — фазу интерференционной картины. При изменении фазы записываемой волны происходит соответствующий сдвиг интерференционной картины.

Для восстановления записанной волны голограмму освещают опорной волной, которая дифрагирует на голограмме так, что волновое поле в первом дифракционном порядке является точной копией записанного

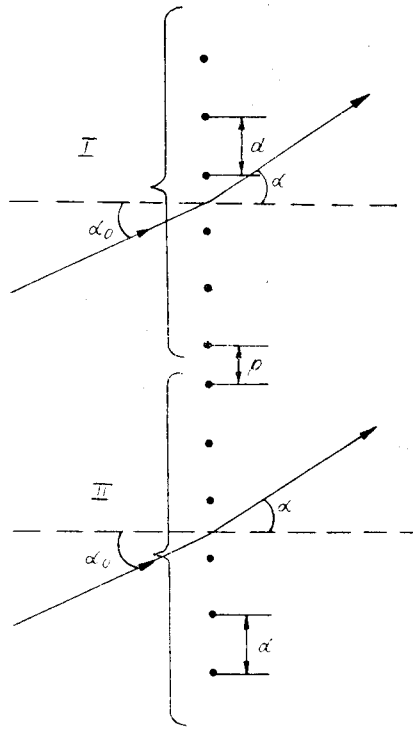


Рис. 1

продифрагировавший в областях *I* и *II*, имеет относительную фазовую задержку $(\sin \alpha - \sin \alpha_0)(d + p)$, где α — угол, соответствующий продифрагировавшему, а α_0 — опорному пучкам. Заменяя $(\sin \alpha - \sin \alpha_0)$ углом дифракции λ/d , получаем, что фазовая задержка с точностью до 2π равна $2\pi p/d$, т. е. соответствует фазе записанной волны.

Таким образом, восстановление фазы происходит вследствие того, что свет, продифрагировавший на решетке, распространяясь в $+1$ -й порядок, приобретает дополнительный набег фазы из-за увеличения оптического пути, обусловленного смещением решетки в поперечном направлении. На этом явлении, по существу, основана голография. При записи и восстановлении волновых полей, более сложных, чем на рис. 1, можно рассматривать голограмму как нерегулярную решетку с контрастом и поперечным сдвигом, плавно изменяющимися от штриха к штриху.

В оптической голографии синтез голограммы происходит чисто оптическим путем. В цифровой голографии [9—13] рассчитывают на ЭВМ интерференционную картину, соответствующую голографируемому объекту (который сам по себе может и не существовать), а затем при помощи специальных устройств вывода записывают ее в виде оптического транспаранта. На таком транспаранте размер прозрачного участка реализует модуляцию по амплитуде, а фаза фиксируется положением этого участка внутри выделенной малой площадки [9]. Совокупность размеров и положений прозрачных участков формирует сложную решетку — голограмму. Структура решетки задается соотношением

$$X/T + \Phi(x, y)/2\pi = n,$$

где T — средний период; $\Phi(x, y)$ — фаза записываемого волнового фронта; x, y — координаты n -й по порядку полосы решетки [11].

При освещении решетки считывающей волной происходит модуляция оптического поля этой волны так, что в первом дифракционном порядке формируется световое поле, амплитуда которого соответствует размерам прозрачных участков транспаранта, а фаза — их смещениям.

волнового поля. Тем самым осуществляется демодуляция закодированной информации.

Амплитуда света, распространяющегося в 1 -й дифракционный порядок, пропорциональна контрасту интерференционной картины, а следовательно, и амплитуде записанной волны. Механизм восстановления фазы ясен из примера, приведенного на рис. 1, изображающего простую интерференционную картину в виде параллельных эквидистанционных полос со сбоем. При использовании в качестве опорного пучка плоской волны такая запись получается в результате интерференции опорного пучка с плоской волной, фаза которой имеет сбой: в каждой из областей *I* и *II* фаза постоянна, а на границе областей имеется фазовый сдвиг ϕ , которому соответствует сдвиг (сбой) интерференционной картины на величину P . При этом выполняется очевидное соотношение между ϕ , P и периодом d : $\phi = 2\pi P/d$. При восстановлении записанного изображения опорный пучок дифрагирует в направлении записанной волны. При этом свет,

Таким образом, фаза в цифровой голографии записывается так же, как и в оптической: она модулирует поперечное смещение периодической структуры. Амплитуда в цифровой голографии записывается в бинарной форме, а в оптической — в полутоновой форме. При этом амплитудные искажения возникают в высших дифракционных порядках, но так как в голографии восстановленное поле локализовано в первом порядке дифракции, то амплитудными искажениями можно пренебречь.

Метод, описывающий механизм модуляции фазы в восстановленном поле, предложен в [14] и называется методом детур-фазы (мнимой фазы). Название метода отражает его суть: величина фазы, записанная на транспаранте, восстанавливается косвенно, она модулирует длину оптического пути (фазовую задержку) световой волны.

Рассмотренные в [14] применения метода для синтеза комплексных пространственных фильтров иллюстрируют его эффективность в задачах оптической обработки, в частности, для создания шлирен-систем, фазового контраста, оптического дифференцирования и инверсной фильтрации. Во всех этих случаях фильтр рассчитывался на ЭВМ и записывался в бинарной форме при помощи графопостроителя, а затем уменьшался оптическим методом. Фильтр устанавливался в плоскости пространственных частот. В [14] приведены фотографии фильтров и соответствующие обработанные изображения.

Так как отфильтрованное изображение формируется в первом дифракционном порядке, его положение зависит от длины волны λ источника. Поэтому при использовании широкополосного источника изображение оказывается окрашенным. Для коррекции этих искажений в [14] предложено повторно подвергнуть восстановленное изображение когерентно-оптической обработке с помощью второго двухлинзового фурье-процессора. Оба процессора идентичны, а выходная плоскость первого является входной плоскостью второго. В частотной плоскости второго процессора установлена дифракционная решетка с пространственной частотой, равной несущей частоте пространственного фильтра, используемого в первом процессоре. Если в первой системе выделяется $+1$ -й дифракционный порядок, то во второй — -1 -й. Таким образом, рассматриваются лучи, распространяющиеся после дифракционной решетки (второго пространственного фильтра) вдоль оптической оси (независимо от длины волны λ). Этот метод называется методом λ -компенсации. Он позволяет восстанавливать изображение при помощи широкополосного источника света.

В случаях, когда комплексный пространственный фильтр имеет области только с фазами нуль или π , его синтез необязательно выполнять на ЭВМ. Подобная ситуация возникает при коррекции расфокусировки, смаза, в задачах дифференцирования, гильберт-оптики. В этих случаях области с фазой нуль и π промодулированы несущей решеткой, фаза которой в разных областях отличается на π . Визуально на границе этих областей наблюдается сбой.

В этих ситуациях возможно синтезировать фильтр, действующий по методу детур-фазы, иным способом. Например, в [15—17] предложены и исследованы фильтры, изготовленные на установке электронно-лучевой записи в вакууме. Траектория луча управляется ЭВМ, так что предложенное устройство можно рассматривать как блок вывода изображения, синтезированного на ЭВМ. Экспериментальные результаты иллюстрируют эффективность методики.

В [18] рассмотрен метод, основанный на фотографировании при помощи двукратной экспозиции изображения, имеющего вид чередующихся черных и белых полос (меандр). При первой экспозиции закрывают непрозрачной маской те части изображения, которые соответствуют областям с фазой нуль, а при второй экспозиции — областям с фазой π , причем фотографируемое изображение сдвигают в поперечном направлении на половину периода несущей.

Близкий метод синтеза фазового фильтра представлен в [19]. В [18, 19] сообщается об успешном применении этих фильтров для коррекции смаза.

Преобразование Гильберта [20] осуществляется в когерентно-оптической системе обработки при помощи пространственного фильтра с пропусканием $\text{sign } fx$. Этот фильтр оставляет без изменения фазу составляющих спектра с положительными частотами и вносит задержку, равную π , в составляющие спектра с отрицательными частотами. Дифракционная решетка со сбоем на полпериода формирует в первом дифракционном порядке гильберт-образ объекта. Ее действие легко объяснить при помощи метода детур-фазы: свет, продифрагировавший в первый порядок от одной из областей фильтра, проходит оптический путь, отличающийся на $\lambda/2$ от пути, проходимого светом, продифрагировавшим на другой области фильтра.

В [20] представлены результаты теоретического и экспериментального исследований методов гильберт-оптики, рассмотрены различные приложения и методы изготовления решеток.

Аналогично в когерентно-оптических спектроанализаторах [21] совмещение дифракционной решетки со сбоем с изображением сигнала в силуэтной форме позволяет моделировать области изображений, соответствующие отрицательным сигналам.

В методах мультиплицирования изображений [22, 23] устанавливают в частотной плоскости фильтры в виде дифракционных решеток. Достоинством этих методов является то, что в них используются чисто фазовые оптические элементы, не приводящие к потерям света.

Методы вычитания и дифференцирования изображений [14, 24—26] также основаны на применении пространственного фильтра в виде дифракционной решетки 1, установленной в плоскости пространственных частот (рис. 2). Частота решетки выбрана такой, что угол дифракции λ/Y_p равен угловому смещению $\text{arctg}(a/2F)$ вычитаемых изображений 4 и 5. Поэтому +1- и -1-й порядки вычитаемых изображений распространяются вдоль одного направления (вдоль оптической оси). Вычитание соответствующих изображений обусловлено тем, что смещение решетки в поперечном направлении вносит соответствующий фазовый сдвиг в дифракционные пучки (ср. с методом детур-фазы), причем для +1- и -1-го порядка этот сдвиг берется с разным знаком. Недостатком метода [23] является то, что необходимо юстировать решетку с высокой степенью точности. Метод [25] значительно ослабляет требования к точности юстировки этой решетки вследствие использования двух других решеток 2 и 3, совмещенных с изображениями 4 и 5. Фазовая задержка обусловлена совместной юстировкой всех трех решеток, причем в [25] показано, что требования к точности юстировок решеток, совмещенных с изображениями, значительно понижены.

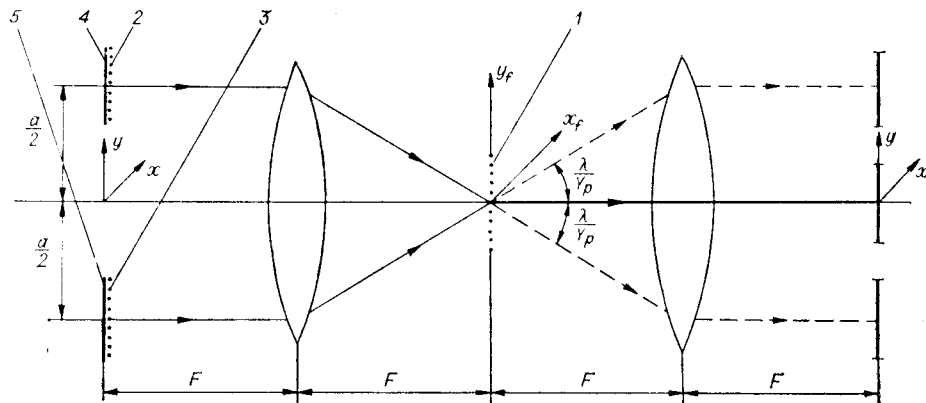


Рис. 2

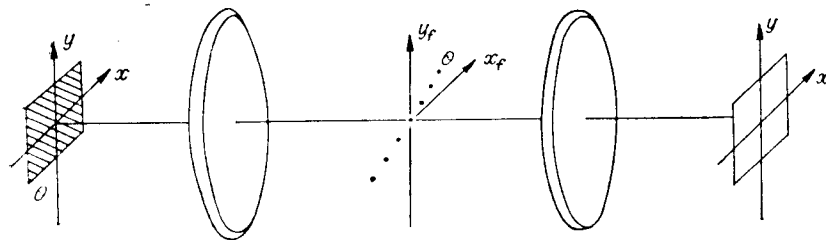


Рис. 3

В [27] показано, что совмещение дифракционной решетки с обрабатываемым изображением позволяет увеличить динамический диапазон синтезируемого фильтра. Это достигается тем, что в области вблизи каждого дифракционного порядка удается в оптимальных условиях записать свой микрофильм.

Завершая обзор методов оптической фильтрации, использующих фазовые фильтры на основе дифракционных решеток, отметим, что применение таких фильтров позволяет расширить функциональные возможности методов и упростить их реализацию, что определяет перспективность этого направления.

2. Методы кодирования изображений при помощи дифракционных решеток. Совмещение дифракционной решетки с обрабатываемым изображением, использованное в [24, 26, 27], является одним из универсальных методов кодирования. Наложение полезного изображения на несущую периодическую структуру аналогично методам кодирования в радиотехнике, где полезный сигнал модулирует параметры (амплитуда, частота) несущего сигнала. Важное отличие обусловлено двумерным характером оптических сигналов (изображений), что дает дополнительную «степень свободы» — физическую величину, которую возможно модулировать. Такой величиной является угловая ориентация дифракционной решетки.

Метод Θ -модуляции [28] основан на модуляции изображений (или их фрагментов) при помощи решеток, повернутых на угол Θ (отсюда название метода). На рис. 3 представлена когерентно-оптическая система с дифракционной решеткой во входной плоскости. Ее спектр в плоскости частот расположен вдоль прямой, также ориентированной под углом Θ . Метод Θ -модуляции позволяет выполнить ряд преобразований, в том числе и нелинейных. Если закодировать одни фрагменты изображения (например, соответствующие определенному уровню яркости) дифракционными решетками, ориентированными под фиксированным углом Θ , а другие фрагменты — под другим углом Θ' , то при освещении полученного транспаранта в фурье-плоскости произойдет пространственное разделение соответствующих спектров: свет, протифрагировавший на первой решетке, собирается вокруг точки, характеризуемой углом Θ , а протифрагировавший на второй — Θ' . Используя специальную диафрагму в частотной плоскости, можно, например, пропустить спектр только первого фрагмента, в этом случае в выходном изображении восстановится только этот фрагмент.

Аналогично возможно осуществить печать на одну черно-белую пленку трех монохроматических изображений из разных областей спектра, совмещенных с тремя ориентированными под различными углами дифракционными решетками [29—33]. Восстановление цветного изображения осуществляется в когерентно-оптической системе с точечным источником белого света. В плоскости частот специальная диафрагма пропускает только первые дифракционные порядки соответствующих спектров. При этом с каждым из этих порядков совмещается соответствующий светофильтр.

Метод Θ -модуляции позволяет осуществить запись на одном носителе многих изображений [28, 34, 35]. При записи каждое изображение

совмещается с решеткой, наклоненной на соответствующий угол Θ .

В [36] исследован метод, позволяющий записать на один кадр стереопару. При восстановлении в области, соответствующей первым дифракционным порядкам, устанавливаются скрещенные поляроиды.

В [37] предложено осуществлять сложение и вычитание изображений на основе колориметрических измерений. На один кадр записываются три (или два) обрабатываемых черно-белых изображения, и при восстановлении осуществляется их окрашивание при помощи светофильтров, расположенных в частотной плоскости.

В [38] рассмотрена гибридная оптическая система для выполнения логических преобразований. Показано, что операция И может быть выполнена на основе Θ -модуляции. Предложен метод записи Θ -модулированных сигналов. Суть метода состоит в следующем. Кодированное изображение снимается телевизионной камерой. Затем последовательно на экране ЭЛТ высвечиваются области одинаковой яркости (электронная обработка) и экран фотографируется через дифракционную решетку, которая синхронно с изменением яркости (кодированных элементов) поворачивается на соответствующий угол $\Delta\Theta$.

В [39] предложен коррелятор, инвариантный к повороту входного изображения. Инвариантность достигается тем, что вследствие вращения дифракционной решетки спектр входного изображения вращается по окружности в плоскости частот. На этой окружности последовательно расположены согласованные фильтры, соответствующие различным угловым ориентациям входного объекта. Так как методы согласованной фильтрации нечувствительны к повороту входного объекта только в пределах узкого диапазона углов $\Delta\Theta$ (на практике $\Delta\Theta$ составляет величину порядка 3°), то использование $N \sim 100$ фильтров позволяет осуществить последовательный обзор всех возможных положений объекта. Принцип Θ -модуляции используется здесь для создания сканирования. Сообщается об экспериментальной проверке метода для $N = 16$.

В [40] принцип Θ -модуляции применен для увеличения числа параллельных каналов в системе распознавания образов: каждому каналу соответствует определенная ориентация дифракционной решетки, а в [41] этот принцип применяют для идентификации фрагментов изображения.

Нелинейная фильтрация на основе Θ -модуляции базируется на кодировании яркости одного элемента изображения дифракционной решеткой, заполняющей тот же элемент площади [28]. Угол Θ решетки связан монотонной функцией $f(i)$ с яркостью i элемента. При декодировании спектральные составляющие в частотной плоскости, расположенные под углом Θ , будут соответствовать элементам одинаковой яркости. Пространственный фильтр, пропускание которого по амплитуде есть $\varphi(\Theta)$, реализует нелинейное преобразование $\varphi(f(i))$. Если, например, фильтр представляет собой узкую секторную диафрагму, то в выходном изображении яркими будут только элементы с одинаковым уровнем яркости. При использовании многосекторной диафрагмы на выходном изображении формируются изоденсы. В [7] сообщается о разработке практической системы, реализующей этот метод. Дифракционные решетки записываются интерференционным методом.

Методы наложения дифракционных решеток на обрабатываемое изображение, наряду с селекцией пространственных частот по направлениям, осуществляют также разнесение спектров различных фундаментальных цветов [42—44]. Этот физический факт лежит в основе методов восстановления смазанных изображений (как черно-белых [45], так и цветных [46]), вычитания изображений [47, 48], кодирования изображений в псевдоцветах [49—51].

Идея методов Юу иллюстрируется рис. 4. Точечный источник 1 белого света освещает обрабатываемое изображение 2, совмещенное с решеткой 3, имеющей пространственную частоту ρ_0 . В плоскости частот в первом порядке формируется радужный спектр. Размытие спектра

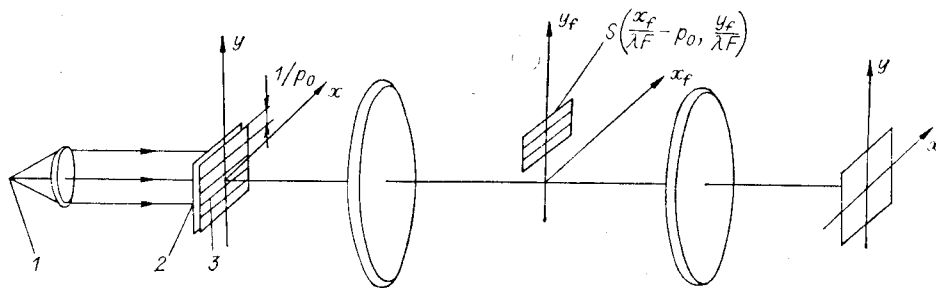


Рис. 4

обусловлено зависимостью угла дифракции от длины волны излучения. Математически спектр в первом порядке описывается формулой $S(f_x - p_0, f_y)$. Учитывая связь между координатами в частотной плоскости и пространственными частотами [1], спектр, сформированный светом с длиной волны λ , есть $S((x_f/\lambda F) - p_0, y_f/\lambda F)$. В [44] показано, что при достаточно большой несущей частоте p_0 по сравнению с полосой частот Δp изображения ($p_0 \gg \Delta p$) полный спектр в плоскости частот, образованный светом всех длин волн источника, представляет собой набор отдельных квазимонохроматических спектров переменного масштаба, расположенных вдоль оси f_x . При этом ширина $\Delta\lambda$ спектральной полосы каждого из этих квазимонохроматических спектров дается соотношением $\Delta\lambda = 4\Delta p\lambda/p_0$. Каждый из этих спектров фильтруется параллельно своим фильтром, согласованным по масштабу с длиной волны. Вместо набора пространственных фильтров, можно использовать и единый фильтр [46]. Важным достоинством метода является то, что отфильтрованные каждым фильтром сигналы взаимно некогерентны, что приводит к подавлению на восстановленном изображении когерентных шумов. Интенсивность I выходного сигнала описывается соотношением

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^N \Delta\lambda_i |S(x, y) * h_i(x, y)|^2,$$

где N — эквивалентное число отдельных квазимонохроматических каналов; $h_i(x, y)$ — импульсный отклик, соответствующий пространственному фильтру в i -м канале; $\Delta\lambda_i$ — спектральная полоса частот, соответствующая i -му каналу.

Физический смысл методов Юу состоит, таким образом, в параллельной обработке одного изображения в разных цветах, что достигается разнесением в пространстве их спектров при помощи несущей дифракционной решетки.

В [52—54] теоретически и экспериментально исследованы зависимости интенсивности шумов от пространственной и временной когерентности источника и показано, что совмещение с обрабатываемым изображением решетки позволяет за счет уменьшения когерентности источника снизить шумы.

В [55] указаны определенные ограничения методики Юу: 1) невысокое разрешение обрабатываемых изображений (по теореме Котельникова верхняя пространственная частота должна быть меньше половины частоты несущей решетки, т. е. на практике величины порядка 5 лин/мм); 2) большие потери света, обусловленные низкой дифракционной эффективностью решетки; 3) наличие большого числа рассеивающих поверхностей оптических элементов; 4) дороговизна системы, обусловленная тем, что апертура линзы Фурье должна быть много больше размеров кадра. В [55] предложена техника, основанная на использовании голографического оптического элемента, свободная от этих недостатков.

В [56—58] предложены и исследованы методы записи и восстановления фотографических фонограмм с дифракционными решетками. Ди-

Фракционные решетки впечатаны в изображение фонограммы. Исследована помехозащищенность подобной фонограммы.

Завершая обзор методов и систем, в которых дифракционная решетка совмещается с изображением, необходимо упомянуть об использовании дифракционных решеток в качестве фокусирующих и сканирующих элементов [59—62, 10, 39] и в качестве оптических схем гетеродинирования [63, 64]. Достоинства устройств дифракционного сканирования состоят в том, что по сравнению с аналогичными отклоняющими элементами они имеют значительно меньшую массу и малочувствительны к бениям подложки и вала электродвигателя. По этим же причинам перспективно использовать дифракционные решетки для смещения оптических волн разных частот.

Следует упомянуть также о методе [65] вычитания изображений, в котором на одном носителе записываются два обработанных изображения в виде системы чередующихся полос. Такая запись получается при перефотографировании обрабатываемых изображений в две экспозиции через дифракционную решетку, смещаемую между экспозициями на полпериода (ср. с [18, 19]).

3. Методы спектрального анализа сигналов с использованием периодических структур. Пространственный спектр периодического изображения содержит ряд дифракционных максимумов. В когерентном оптическом процессоре картина спектра легко визуализируется и отдельные составляющие спектра могут быть измерены. На этом принципе основаны методы спектрального анализа сигналов, зарегистрированных на оптическом носителе.

В том случае, когда анализируется одномерный сигнал, существенным является способ его записи на носитель. Сигнал может быть записан либо в плотностной форме (модулируемый параметр — плотность носителя [1, 66]), либо в бинарной (модулируемый параметр — площадь [67—71] или форма кривой [72]).

Эффективность метода иллюстрируется фотографиями спектров. В [73, 74] исследована точность метода. Однако этот метод не использует возможностей, открываемых двумерным характером оптического сигнала. Поэтому произведение длительности анализируемых сигналов на ширину их полосы относительно невелико.

Для оценки спектров широкополосных сигналов предложен метод [75], основанный на последовательной записи одномерного сигнала на N параллельных дорожек. Тем самым полнее используется площадь оптического носителя. Модуляция периодической структурой анализируемого сигнала имеет несколько необычный вид, поэтому картина в плоскости Фурье достаточно сложна: она содержит дифракционные максимумы, обусловленные частотными составляющими сигнала и строчного раstra. В [75] показано, что с помощью специальной маски в плоскости частот можно отделить один сигнал от другого и полностью определить спектр сигнала. Недостаток метода состоит в том, что анализируемый сигнал записывается в плотностной форме, что приводит к нелинейным искажениям. В [76] метод модифицирован для использования бинарной (силуэтной) записи.

Силуэтную запись целесообразно применять и при обработке радиолокационных сигналов с помощью голограмм, синтезированных на ЭВМ [77].

Другой путь использования двумерной природы оптического сигнала состоит в применении параллельной записи N одномерных сигналов на N параллельных дорожек и в их одновременном фурье-анализе [1].

В [78] предложен когерентно-оптический метод анализа направленности акустических полей, также основанный на анализе фурье-спектров. Линейка N микрофонов (акустическая антенна) с расстоянием между микрофонами Δ принимает исследуемое поле (рис. 5). Сигналы антенны микрофонов I в специальном блоке 2 записываются на перемещающуюся со скоростью V киноплёнку 3 на N параллельных дорожек.

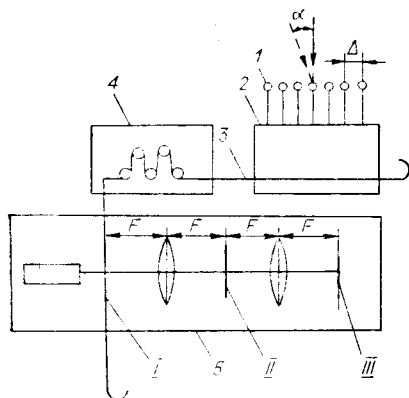


Рис. 5

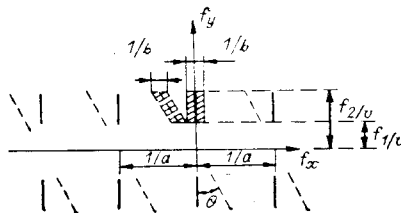


Рис. 6

В [78] рассмотрена запись в плотностной форме, а в [79] — в силуэтной форме. На каждой из дорожек записывается сигнал $f(y/V)$ с задержкой $n(\Delta/c)\sin\alpha$, где n — номер микрофона; α — угол, под которым на антенну падает анализируемая волна; c — скорость звука. После проявления носитель перемещается во входную плоскость *I* и в плоскости *II* наблюдается спектр сигнала. Спектр состоит из отдельных дифракционных порядков, обусловленных растром, соответствующим N каналам. На рис. 6 сплошные линии соответствуют нормально падающей акустической волне ($\alpha = 0$), а штриховые — наклонному падению. Звуковой спектр волны заключен в диапазоне частот (f_1, f_2) . Угол Θ обусловлен указанной задержкой и связан с α соотношением $\text{tg } \Theta = (V\Delta/cQ)\sin\alpha$, где Q — расстояние на носителе между строками.

В плоскости Фурье *II* устанавливается узкая секторная диафрагма с углом раскрытия $\Delta\Theta$, которая может вращаться вокруг оптической оси системы. При приеме акустического поля, содержащего волны, падающие на антенну под всевозможными углами в диапазоне $(-\alpha_0, \alpha_0)$, диафрагма, повернутая на угол Θ , пропускает сигнал, приходящий из некоторого направления, образующего угол α с антенной. В выходной плоскости *III* формируется отфильтрованное изображение звуковых дорожек. Для определения сигнала, приходящего под углом α , необходимо считывать сигнал одной из дорожек.

Методы анализа пространственного спектра периодических структур позволяют в ряде случаев установить зоны, соответствующие дефектам на изображении, или определить параметры структуры. Эти методы полезны при анализе параметров резьбы [80], размерном анализе промышленных изделий [81—83], анализе одномерной квазипериодической структуры, используемой в электровакуумных приборах для управления электронными пучками [84], в системах контроля качества теневых масок цветных кинескопов [85], для визуализации дефектов раstra [86]. В [87, 88] предложена оригинальная техника для определения показателя преломления стекла, из которого сделан объектив. Методика основана на совмещении с объективом дифракционной решетки и измерении ее спектра. Метод не зависит от апертуры объектива, ошибок фокусировки и аберраций линзы.

Метод обработки аэрофотоснимков сельскохозяйственных объектов основан на применении гибридных оптико-цифровых методов [89]. Сложная процедура формирования спектра выполняется оптически, и по виду спектра оператор принимает решение о необходимости дальнейшей детальной обработки, выполняемой на ЭВМ. Применимость метода основана на том, что изображения полей промодулированы периодической структурой — изображениями грядок, что определяет характерный вид спектра.

4. Подавление периодических структур на изображении. Подавление периодических структур достигается, как отмечено выше, простран-

ственной фильтрацией одного из дифракционных порядков спектра. Первое сообщение о пространственной фильтрации раstra [90, 91] было сделано еще в долазерную эпоху.

Позднее в ряде работ эта проблема вновь попала в поле зрения исследователей. В [92, 93] показано, что фильтрация может быть выполнена в некогерентной оптической системе с помощью бинарного фазового фильтра, а в [94] — с помощью цифровых методов. В [95] предложено использовать подавление телевизионного раstra при печати кинофильмов, полученных с использованием методов видеотехники (например, путем пересъемки изображения с экрана кинескопа). В [96] предложено использовать для этой цели щелевой источник света, ориентированный параллельно строкам. Замена точечного источника щелевым вызывает размытие пространственного спектра вдоль направления, параллельного строкам. Это обусловлено тем, что смещение точечного источника света от оптической оси приводит к наклону волны, освещающей корректируемое изображение. Поэтому соответствующий спектр в частотной плоскости смещается от оптической оси: его центр находится в побочном фокусе. Щелевой пространственный фильтр выделяет центральный порядок каждого из спектров. При этом наклон освещающих волн не влияет на положение восстановленного изображения: в приближении геометрической оптики наклон волны не играет роли. Использование щелевого источника позволяет подавить когерентные шумы на восстановленном изображении.

Снижение когерентных шумов может быть обеспечено также движением в процессе экспозиции источника вдоль прямой, параллельной строкам [97]. Это достигается с помощью качающегося зеркала, на которое падает лазерное излучение.

В [98, 99] исследованы требования к пространственной когерентности источника. Показано, что фильтрация телевизионного строчного раstra на низкочастотном изображении может быть выполнена при помощи протяженного источника белого света. Это объясняется тем, что щелевой фильтр, помимо выполнения своей основной функции — селекции пространственных частот, обеспечивает также и требуемую пространственную когерентность. Действительно, протяженный источник можно представить состоящим из набора параллельных щелевых источников. Фильтрация раstra каждым из щелевых источников, расположенных вблизи оптической оси, рассмотрена выше. Напротив, свет щелевых источников, достаточно сильно смещенных от оси, задерживается щелевым фильтром.

Одним из авторов проведены эксперименты по фильтрации раstra цветного изображения методами, описанными в [96, 98, 99]. Предложены два метода. Первый из них основан на совмещении со щелевым источником белого света набора светофильтров фундаментальных цветов или единого радужного светофильтра. Тогда в плоскости пространственных частот формируются пространственные спектры корректируемого изображения в соответствующих цветах. Эти спектры сдвигаются друг от друга вдоль оси, параллельной щелевому источнику, и различаются только масштабом в перпендикулярном направлении. Метод аналогичен приведенному в работах [100, 101], в которых используется набор лазеров фундаментальных цветов.

Фильтрация растровых искажений цветного изображения аналогично [99] может быть выполнена с помощью протяженного источника света. В качестве растровой помехи рассматривались чересстрочный и мозаичный растры на изображениях, получаемых пересъемкой с экрана кинескопа. Показано, что размеры источника должны быть ограничены. Однако при фильтрации низкочастотных изображений это необязательно: аналогично черно-белым изображениям эффективное подавление растров цветного изображения в когерентно-оптической системе фильтрации оказывается возможным при использовании протяженного источника белого света.

В заключение следует сделать вывод, что модуляция при помощи периодических структур позволяет расширить функциональные возможности когерентно-оптических методов обработки и упростить их аппаратную реализацию, полнее использовать преимущества, обусловленные двумерным характером изображений. Это увеличивает область потенциальных применений методов. Недостатком методов является более низкая точность по сравнению с обеспечиваемой методами обработки изображений на ЭВМ (общий недостаток, присущий аналоговым методам). Кроме того, в настоящее время многие методы (особенно, описанные во втором и третьем разделах обзора) не применимы в реальном времени, что не позволяет использовать основное достоинство методов — быстродействие — и сдерживает их применение. Преодоление этого недостатка возможно за счет создания высокоэффективных пространственных модуляторов света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику.— М.: Мир, 1970.
2. Гуревич С. Б., Константинов В. Б., Соколов В. К. и др. Передача и обработка информации голографическими методами.— М.: Сов. радио, 1978.
3. Василенко Г. И. Голографическое опознавание образов.— М.: Сов. радио, 1977.
4. Бахрах Л. Д., Курочкин А. П. Голография в микроволновой технике.— М.: Сов. радио, 1977.
5. Зверев В. А. Радиооптика.— М.: Сов. радио, 1977.
6. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография.— М.: Мир, 1973.
7. Оптическая голография/Под ред. Г. Колфилда.— М.: Мир, 1982.
8. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики.— М.: Наука, 1971.
9. Lohmann A. W., Paris D. P. Binary Fraunhofer holograms, generated by computer // *Appl. Opt.*— 1967.— 6, N 10.— P. 1739.
10. Гришаев А. И., Де С. Т., Денежкин С. Н. Цифровая обработка голографических интерферограмм на основе муаровых эффектов // *Автометрия.*— 1987.— № 4.
11. Брингдал О. Оптические преобразования // *Автометрия.*— 1983.— № 2.
12. Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С. Методы цифровой голографии.— М.: Наука, 1977.
13. Даллас У. Синтез голограмм на ЭВМ // *Компьютеры в оптических исследованиях.*— М.: Мир, 1983.
14. Lohmann A. W., Paris D. P. Computer generated spatial filters for coherent optical data processing // *Appl. Opt.*— 1968.— 7, N 4.— P. 651.
15. Minemoto T., Suemoto Y., Fujita S. A simple method for making a holographic deblurring filter // *Jap. J. of Appl. Phys.*— 1975.— 14, N 11.— P. 151.
16. Minemoto T., Suemoto Y., Fujita S. Holographic deblurring filter made with flying spot seamer exposure device // *Jap. J. of Appl. Phys.*— 1975.— 13, N 6.— P. 975.
17. Minemoto T. Holographic image-deblurring filter // *J. of Appl. Photograph. Eng.*— 1981.— 7, N 6.— P. 151.
18. Лейт Э. Н. Комплексные пространственные фильтры для коррекции изображений // *ТИИЭР.*— 1977.— 65, № 1.
19. Vasu R. M., Rogers G. L. Construction of a phase-inverting grating and its use in a deblurring filter // *Appl. Opt.*— 1980.— 19, N 3.— P. 469.
20. Сороко Л. М. Гильберт-оптика.— М.: Наука, 1981.
21. Бережной А. А., Гуревич В. З., Морозов С. В. и др. Оперативный ввод электрических сигналов в силуэтной форме в оптический анализатор частот // *Опт.-мех. пром-сть.*— 1983.— № 5.
22. Kalestynski A., Smolinska B. Spatial frequency by phase modulation as a method of generating multiple images // *Appl. Opt.*— 1977.— 16, N 8.— P. 2261.
23. Mashida H., Nitta J., Seko A. e. a. High-efficiency fiber grating for producing multiple beams of uniform intensity // *Appl. Opt.*— 1984.— 23, N 2.— P. 330.
24. Lee S. H., Yao S. K., Milnes A. C. Optical image synthesis (complex amplitude addition and subtraction) in real time by a diffraction-grating interferometric method // *JOSA.*— 1970.— 60, N 8.— P. 1037.
25. Yao S. K., Lee S. H. Spatial differentiation and integration by coherent optical-correlation method // *JOSA.*— 1971.— 61, N 4.— P. 474.
26. Lapidés A. A., Zhabotinski M. E. Image subtraction by the spatial filtration technique // *Optica Acta.*— 1985.— 32, N 3.— P. 329.
27. Goodman J. W., Strubin H. B. Increasing the dynamic of coherent optical filters by means of modulating gratings // *JOSA.*— 1973.— 63, N 1.— P. 50.
28. Armitage J. D., Lohmann A. W. Theta modulation in optics // *Appl. Opt.*— 1965.— 4, N 4.— P. 399.
29. Mueller P. F. Color image retrieval from monochrome transparencies // *Appl. Opt.*— 1969.— 8, N 10.— P. 2051.

30. Пат. 3.609.010 США. Spectral zonal filter [Technical Operations Inc.]/P. F. Huel-ler.— Заявл. 30.01.69; Опубл. 28.09.71.
31. Macovski A. Encoding and decoding of color information // Appl. Opt.— 1969.— 8, N 2.— P. 267.
32. Yu F. T. S., Chao T. H., Zhuang S. L. Polychromatic processing technique for color image transparencies // Appl. Opt.— 1980.— 19, N 12.— P. 1887.
33. Yu F. T. S. White-light processing technique for archival storage of color films // Appl. Opt.— 1980.— 19, N 14.— P. 2457.
34. Mueller P. F. Linear multiple image storage // Appl. Opt.— 1969.— 8, N 2.— P. 267.
35. Yu F. T. S., Dymek M. S. Optical information parallel processing: a technique // Appl. Opt.— 1981.— 20, N 8.— P. 1450.
36. Mu G. G., Chiang C. K., Liu H. K. White-light stereoprojection through Fourier spectrum polarization // Opt. Lett.— 1981.— 6, N 6.— P. 263.
37. Mu G. G., Chiang C. K., Liu H. K. White-light image addition and subtraction by colorimetric measurement // Opt. Lett.— 1981.— 6, N 8.— P. 389.
38. Bartelt H., Lohmann A. W. Hybrid logic processing in parallel // Appl. Opt.— 1983.— 22, N 17.— P. 2519.
39. Yu F. T. S., Lu X. J. Real-time optical scanning correlator // Appl. Opt.— 1984.— 23, N 18.— P. 3109.
40. Armitage J. D., Lohmann A. W. Character recognition by incoherent spatial filtering // Appl. Opt.— 1965.— 4, N 4.— P. 461.
41. Уилл. Пеннингтон. Кодирование с использованием решетчатых структур — новый метод обработки изображений // ТИИЭР.— 1972.— 60, № 6.— С. 22.
42. Yu F. T. S. A new technique of incoherent complex signal detection // Opt. Commun.— 1978.— 27, N 1.— P. 23.
43. Yu F. T. S. Restoration of smeared photographic image by incoherent optical processing // Appl. Opt.— 1978.— 17, N 22.— P. 3571.
44. Yu F. T. S., Horner J. L. Optical processing of photographic image // Opt. Eng.— 1981.— 20, N 5.— P. 666.
45. Zhuang S. L., Chao T. H., Yu F. T. S. Smeared-photographic-image deblurring utilizing white-light-processing technique // Opt. Lett.— 1981.— 6, N 2.— P. 102.
46. Chao T. H., Zhuang S. L., Mao S. Z. e. a. Broad spectral band color image deblurring // Appl. Opt.— 1983.— 22, N 10.— P. 1439.
47. Yu F. T. S., Tai A. Incoherent image addition and subtraction: a technique // Appl. Opt.— 1979.— 18, N 15.— P. 2705.
48. Wu S. T., Yu F. T. S. Image subtraction with an encoded extended incoherent source // Appl. Opt.— 1981.— 20, N 23.— P. 4082.
49. Yu F. T. S., Zhuang S. L., Chao T. H. Real-time white-light spatial frequency and density pseudocolor encoder // Appl. Opt.— 1980.— 19, N 17.— P. 2986.
50. Chao T. H., Zhuang S. L., Yu F. T. S. White-light pseudocolor density encoding through contrast reversal // Opt. Lett.— 1980.— 5, N 6.— P. 230.
51. Yu F. T. S., Chao T. H., Dymek M. S. Multislit spatial filtered pseudocolor holographic imaging // Opt. Commun.— 1980.— 32, N 2.— P. 225.
52. Zhuang S. L., Yu F. T. S. Coherence requirements for partially coherent optical processing // Appl. Opt.— 1982.— 21, N 14.— P. 2387.
53. Yu F. T. S., Hsu F. K., Chao T. H. Coherence measurement of a grating-based white-light optical signal processor // Appl. Opt.— 1984.— 23, N 2.— P. 333.
54. Yu F. T. S., Zheng L. N., Hsu F. K. Measurement of noise performance for a white-light optical signal processor // Appl. Opt.— 1985.— 24, N 2.— P. 173.
55. Jiang Y. G. Simplified color image-processing system using a dichromated gelatin holographic element // Appl. Opt.— 1982.— 21, N 17.— P. 3138.
56. Колобродов Г. Н., Налимов И. П. Запись бегущей интерференционной картины разночастотных световых полей от двух фиксированных точечных источников // Квантовая электрон.— 1976.— 3, № 9.
57. Клименко Г. К., Марсов С. В., Розинкина Т. Ю. Новое в технологии звукового оформления кинофильмов // Техника кино и телевидения.— 1978.— № 8.
58. Розинкина Т. Ю. Анализ технологических процессов звукозаписи кинофильмов // Техника кино и телевидения.— 1975.— № 8.
59. Ведерников В. М., Вьюхин В. Н., Кирьянов В. П. и др. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов // Автометрия.— 1981.— № 3.
60. Щербаченко А. М., Юрлов Ю. И. Программное обеспечение лазерного фотопостроителя дифракционных оптических элементов // Автометрия.— 1983.— № 2.
61. Киселев Н. Г. Использование голографической дифракционной решетки для отклонения лазерного пучка // Оптика и спектроскопия.— 1982.— 53, № 1.
62. Пейсахсон И. В. Голографические дифракционные решетки, фокусирующие параллельные пучки лучей // Опт.-мех. пром-сть.— 1979.— № 6.
63. Новиков Е. И. Динамический режим работы дифракционных схем оптического гетеродинамирования // Опт.-мех. пром-сть.— 1983.— № 8.
64. Новиков Е. И. Оптическое гетеродинамирование в схемах с дифракционным оптическим смесителем // Опт.-мех. пром-сть.— 1984.— № 10.
65. Pennington K. S., Will K., Shelton G. L. Grid coding a technique for extraction of differences from scenes // Opt. Commun.— 1970.— 2, N 3.— P. 113.
66. Бургов В. А. Основы записи и воспроизведения звука.— М.: Искусство, 1959.

67. Гибин П. С., Козачок А. Г., Нежевенко Е. С. и др. Анализ спектров одномерных сигналов оптическими методами // Автометрия.— 1971.— № 1.
68. Дяченко А. А., Персиков Н. В., Шушпалов О. Е. Применение теневых графиков для спектрального анализа функций методами когерентной оптики // Оптика и спектроскопия.— 1971.— 31, № 3.
69. Felstead E. B. Optical Fourier transformation of area-modulated spatial functions // Appl. Opt.— 1971.— 10, N 11.— P. 2468.
70. Zhabotinski M. E., Lapidès A. A., Spuntov A. I. Optical spectral analysis of signals recorded on a pure phase medium // Opt. Lett.— 1983.— 8, N 1.— P. 42.
71. Zhabotinski M. E., Lapidès A. A., Spuntov A. I. Coherent-optic suppression of scratch noise on optical sound records // Appl. Opt.— 1983.— 22, N 24.— P. 4020.
72. Felstead E. B., Hill K. O., Tenne-Sens A. U. One-dimensional optical Fourier transforms of line tracings // Optica Acta.— 1974.— 21, N 2.— P. 85.
76. Тай А., Юу Ф. Широкополосный спектральный анализ сигналов с использованием сплюснутой записи (модуляции) // Автометрия.— 1981.— № 1.
77. Белов Ю. И., Зуйкова Э. М., Пасманик Л. А., Турчин В. И. Об одном способе записи голограмм неоптических полей // Изв. вузов. Радиофизика.— 1978.— 21, № 2.
78. Ланидес А. А., Фурдуев А. В., Шпунтов А. И. Исследование когерентно-оптического метода анализа акустических полей // Радиотехника.— 1983.— № 12.
79. Ланидес А. А. Когерентно-оптический метод анализа направленности акустических полей с использованием записи сигнала в форме теневых графиков // Автометрия.— 1986.— № 1.
80. Бычков Р. М., Коронкевич В. П., Чугуй Ю. В. Измерение параметров резьбы методами когерентной оптики // Опт.-мех. пром-сть.— 1977.— № 11.
81. Сахно С. П., Тымчик Г. С. Дифракционный метод контроля диаметра цилиндрических деталей // Опт.-мех. пром-сть.— 1987.— № 6.
82. Вертопрахов В. В., Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Оптическое преобразование изображения в оптико-цифровой системе промышленного контроля // Автометрия.— 1983.— № 4.
83. Бычков Р. И., Кривенков Б. Е., Чугуй Ю. В. Повышение точности дифракционных методов размерного контроля // Автометрия.— 1984.— № 3.
84. Колобродов В. Г., Тымчик Г. С. Исследование геометрических параметров пространственных квазипериодических структур с помощью когерентного оптического спектроанализатора // Опт.-мех. пром-сть.— 1982.— № 2.
85. Iwamoto A., Sekizawa H. Periodic aperture size measurement with submicron accuracy: application to nonuniform detection in color CRT shadow masks // Appl. Opt.— 1981.— 20, N 13.— P. 2257.
86. Iwamoto A., Sekizawa H. Defect-type discriminating optical system // Appl. Opt.— 1981.— 20, N 9.— P. 1724.
87. Kasana R. S., Boseck S., Rosenbruch K.-J. Use of a grating in a coherent optical-processing configuration for evaluating the refractive index of a lens // Appl. Opt.— 1984.— 23, N 5.— P. 757.
88. Anders P., Barriero J. C. Use of a grating in a coherent optical-processing configuration for evaluating the refractive index of a lens: comments // Appl. Opt.— 1984.— 23, N 5.— P. 3514.
89. Методы автоматизированной обработки материалов аэрокосмической съемки в задачах дистанционного зондирования сельскохозяйственных ресурсов/Под ред. Г. И. Бельчанского и Г. И. Василенко.— М.: ВНИИП — ГИК, 1981.
90. Marquet M. Determage de clichés par filtrage optique // Optica Acta.— 1959.— 6, N 4.— P. 404.
91. Marquet M., Tsujiuchi J. Interpretation des aspects particuliers des images obtenues dans une expérience de detourage // Optica Acta.— 1961.— 8, N 3.— P. 267.
92. Gonsalves R. A., Considine P. S. Spot shaping and incoherent optical smoothing for raster scanned imagery // Opt. Eng.— 1976.— 15, N 1.— P. 64.
93. Консайдин П. С., Гонсалес Р. А. Оптическая обработка информации/ Под ред. Д. Кейссента.— М.: Мир, 1980.
94. Cannon M., Lehar A., Preston F. Background pattern removal by power spectral filtering // Appl. Opt.— 1983.— 22, N 6.— P. 777.
95. Ланидес А. А., Шпунтов А. И. Улучшение качества ТВ-изображения методом оптической фильтрации // Техника кино и телевидения.— 1981.— № 7.
96. Ланидес А. А. Метод когерентной пространственной фильтрации одномерных искажений изображений с использованием источника белого света // Радиотехника и электроника.— 1983.— 28, № 6.
97. Ланидес А. А. Подавление когерентных шумов при одномерной пространственной фильтрации изображений // Квантовая электрон.— 1984.— 11, № 2.

98. Липидес А. А. Фильтрация ТВ-растра с помощью протяженного источника белого света // Техника кино и телевидения.— 1984.— № 8.
99. Липидес А. А. Использование некогерентных источников для фильтрации раstra в когерентно-оптической системе // Радиотехника и электроника.— 1985.— 30, № 7.
100. Zhabotinski M. B., Lapidés A. A. Spatial coherent optical filtering of color images // Opt. Lett.— 1982.— 7, N 3.— P. 142.
101. Липидес А. А. Оптическая коррекция одномерных периодических искажений в кинокопировальном аппарате // Техника кино и телевидения.— 1987.— № 4.

Поступила в редакцию 30 января 1989 г.

УДК 519.219 : 519.237.5

О. А. СТЕПАНОВ

(Ленинград)

ПРЕДЕЛЬНО ДОСТИЖИМАЯ ТОЧНОСТЬ СОВМЕЩЕНИЯ ГАУССОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Введение. Сущность задачи совмещения изображений, представляющих собой реализации случайных полей, заключается в определении смещения одного изображения относительно другого. Точность совмещения исследуется в ряде работ [1—5]. При этом, как правило, анализируется точность, соответствующая конкретным субоптимальным алгоритмам оценивания, используемым при решении задачи совмещения. Так, в [4] предполагается, что оценивание осуществляется на основе максимизации взаимной корреляционной функции совмещаемых изображений. В [1—3] исследуется точность, соответствующая обычному методу наименьших квадратов, не учитывающему в своем критерии коррелированность ошибок измерения.

Существенно также, что при проведении анализа точности в рамках упомянутых работ предполагаются известными значения градиентов поля [1, 4], либо считается, что градиенты восстанавливаются по точным значениям поля [2]. Очевидно, что это не соответствует реальным условиям, при которых имеют место лишь зашумленные измерения поля.

Данные предположения, а также использование субоптимальных алгоритмов при проведении анализа точности не позволяют в общем случае определять предельно достижимые точности совмещения изображений. В связи с этим представляется целесообразным провести анализ предельно достижимых точностей, свободный от отмеченных недостатков.

В настоящей работе, опираясь на неравенство Рао — Крамера, проводится такой анализ точности для частного случая задачи совмещения дискретных гауссовых изображений.

Оптимальная постановка задачи совмещения изображений. Пусть имеются изображения, представляющие собой два набора зашумленных измерений случайного поля ψ , выполненных в узлах прямоугольной равномерной сетки координат с общим числом узлов N . Введем индекс i , соответствующий порядковому номеру узла, отсчитываемому от начальных точек изображения (например, левый верхний угол) при последовательном переходе от одной строчки к другой. Представим измерения в виде

$$z_i^l = \psi_i^l + v_i^l, \quad i = \overline{1, N}, \quad l = I, II, \quad (1)$$

где $\psi_i^l = \psi(x_i^l)$ — значения поля в точках $x_i^l = (x_i^l(1), x_i^l(2))^T$, задающих узлы прямоугольной сетки; v_i^l — ошибки измерения. Пусть координаты, соответствующие одному из наборов измерений (опорному изобра-