

УДК 542.67

ДВУХКАСКАДНЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ РЕЖЕКТОРНЫЙ ФИЛЬТР

Г. Е. Қорбуков, Э. И. Крупицкий, В. В. Куликов

Описан новый двухкаскадный голографический фильтр для подавления известного заранее изображения при сохранении удовлетворительного качества остальных изображений, поступающих на вход системы обработки одновременно. Предложенный способ обработки сигнала более эффективен по сравнению с амплитудно-частотной фильтрацией или методом вычитания изображений, так как учитывает не только амплитудно-частотные, но и фазовые спектры подавляемых и выделяемых изображений.

В ряде технических задач возникает проблема выделения произвольных изображений на фоне известного мешающего фона. К подобной задаче относится, например, обнаружение дефектов фотошаблонов, качество которых существенно при изготовлении интегральных схем.

В настоящее время такие задачи решаются двумя способами: амплитудно-частотной фильтрацией [1, 2] и вычитанием изображений [3]. В тех случаях, когда амплитудно-частотные спектры выделяемого и подавляемого изображений перекрываются и возможны изменения помехи (сдвиги, повороты и т. д.), данные методы работают неэффективно.

Двухкаскадный режекторный голографический фильтр [4], учитывающий различие не только амплитудно-частотных, но и фазовых спектров изображений, позволяет расширить круг задач, решаемых методом пространственной фильтрации.

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ФИЛЬТРА

Рассматриваемый режекторный голографический фильтр состоит из двух каскадов фильтрации. Первый представляет собственно режекторный голографический фильтр, «настроенный» на подавляемое изображение и осуществляющий фильтрацию световых распределений, определяемых авто- и взаимно-корреляционными функциями. Второй корректирует искажения, вносимые первым каскадом в выделяемое изображение.

Эквивалентная схема устройства показана на рис. 1. Из рисунка видно, что оптическая система устройства является системой переноса изображений из плоскости P_1 в плоскость P_5 . При введении голограмм в частотные плоскости P_2 и P_4 это свойство сохраняется, так как изменения в спектре, вызываемые первой голограммой, компенсируются второй. Если транспарант $T_{с. ф}$ является голографической записью спектра подавляемого изображения, то в плоскости P_3 получим сжатое световое распределение, соответствующее функции автокорреляции этого изображения, и рассеянное распределение, соответствующее функции взаимной корреляции подавляемого и выделяемого изображений. Перекрытие непрозрачной пластиной первого распределения приводит к режекции подавляемого изображения, но мало влияет на качество выделяемого изображения.

Перейдем теперь к краткому теоретическому анализу. Пусть некоторое выделяемое изображение $s(x, y)$ и известное мешающее изображение $n(x, y)$ образуют аддитивную смесь $g(x, y) = s(x, y) + n(x, y)$, поступающую на вход устройства в виде транспаранта с коэффициентом передачи

$$T_{\text{вх.}}(x, y) = T_{01} + g(x, y),$$

установленного в плоскости P_1 (здесь и ниже для упрощения анализа несущественные постоянные множители опускаются). Будем далее полагать, что $n(x, y)$ представляет собой сложное широкополосное изображение. Амплитудные спектры изображений $s(x, y)$ и $n(x, y)$ могут частично или полностью перекрываться. Пусть в плоскости P_2 установлена фурье-голограмма подавляемого изображения $n(x, y)$ с коэффициентом передачи

$$T_{\text{с.ф}}(\xi, \eta) = T_{02} + N^*(\xi, \eta) e^{jk\xi \sin \theta} + N(\xi, \eta) e^{-lk\xi \sin \theta}, \quad (1)$$

где $N(\xi, \eta)$ — спектр Фурье изображения $n(x, y)$,

$$N(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{\infty} n(x, y) \exp \left[-j \frac{k}{F} (x\xi + y\eta) \right] dx dy, \quad (2)$$

θ — угол падения плоской опорной волны при изготовлении голограммы.

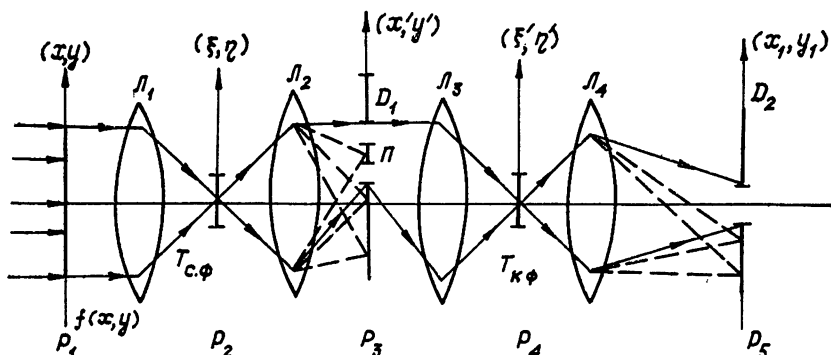


Рис. 1. Эквивалентная схема устройства:

L_1, L_2, L_3, L_4 — преобразующие линзы; D_1, D_2 — диафрагмы; P — затеняющий диск.

Учитывая преобразующее свойство линзы L_1 [5, 6] и выражение (1), на освещенной стороне диафрагмы D_1 в плоскости P_3 будем иметь следующее распределение амплитуды света:

$$E_1(x', y') = g(-x', -y') + R_n(x' - F \sin \theta, y') + \iint_{-\infty}^{\infty} N^*(\xi, \eta) \times \\ \times S(\xi, \eta) \exp \left\{ -j \frac{k}{F} [(x' - F \sin \theta)\xi + y'\eta] \right\} d\xi d\eta + \iint_{-\infty}^{\infty} [N(\xi, \eta) \times \\ \times S(\xi, \eta) + N^2(\xi, \eta)] \exp \left\{ -j \frac{k}{F} [(x' + F \sin \theta)\xi + y'\eta] \right\} d\xi d\eta, \quad (3)$$

где $S(\xi, \eta)$ — спектр Фурье выделяемого изображения.

Выражение (3) показывает, что распределение $E_1(x', y')$ содержит следующие четыре компоненты: обращенное входное изображение

$g(-x', -y')$, автокорреляцию подавляемого изображения $R_n(x' - F \sin \theta, y')$, имеющую острый максимум в точке $x' = F \sin \theta, y' = 0$, и две компоненты, одна из которых сосредоточена вблизи точки с координатами $x' = F \sin \theta, y' = 0$, а другая — вблизи точки с координатами $x' = -F \sin \theta, y' = 0$. Дифрагма D_1 , выполняющая функцию пространственного селектора, рассчитана на пропускание только третьей компоненты, при этом компонента $R_n(x' - F \sin \theta, y')$ будет сильно ослабляться непрозрачным диском, центр которого помещается в точке $x' = F \sin \theta, y' = 0$. Диаметр диска должен быть выбран так, чтобы подавлять главный максимум функции автокорреляции $R_n(x' - F \sin \theta, y')$, при этом он будет тем меньше, чем шире полоса частот помехи. Естественно, что диск одновременно задержит и часть полезного светового потока, соответствующего пропускаемой компоненте

$$\tilde{s}(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} N^*(\xi, \eta) S(\xi, \eta) \exp \left\{ -j \frac{k}{F} [(x' - F \sin \theta)\xi + y'\eta] \right\} d\xi d\eta. \quad (4)$$

Функция $\tilde{s}(x', y')$ описывает искаженное изображение. Рассмотрим действие корректирующей части устройства (линзы $L_3 - L_4$ и транспарант $T_{кр}$). Распределение поля на освещенной стороне транспаранта $T_{к.ф}$ (плоскость P_4) определяется выражением

$$\begin{aligned} E_2(\xi', \eta') &= N^*(-\xi', -\eta') S(-\xi', -\eta') e^{-jk\xi' \sin \theta} = \\ &= N(\xi', \eta') S(-\xi', -\eta') e^{-jk\xi' \sin \theta}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для компенсации искажений следовало бы использовать транспарант с комплексным коэффициентом передачи вида

$$T_{к.ф}(\xi', \eta') = T_{02} + \frac{e^{jk\xi' \sin \theta}}{N(\xi', \eta')}. \quad (6)$$

Такой транспарант в настоящее время практически создать нельзя. Однако голографическим способом можно получить транспарант с коэффициентом передачи, близким к следующему:

$$T_{к.ф}(\xi', \eta') = T_{02} + \frac{e^{jk\xi' \sin \theta}}{N(\xi', \eta')} + \frac{e^{-jk\xi' \sin \theta}}{N^*(\xi', \eta')}. \quad (7)$$

Передающую функцию такого вида можно реализовать с помощью двух транспарантов, один из которых является точной копией согласованного фильтра $T_{с.ф}$ с коэффициентом передачи (1), а второй — негативной записью спектра пространственных частот помехи $n(x, y)$ с коэффициентом передачи $[N^2(\xi', \eta')]^{-1}$. При точном совмещении транспарантов получаем требуемую передающую функцию (7). Распределение поля на выходе такого транспаранта будет

$$\begin{aligned} E_2(\xi', \eta') &= T_{02} N(\xi', \eta') S(-\xi', -\eta') e^{-jk\xi' \sin \theta} + S(-\xi', -\eta') + \\ &+ S(-\xi', -\eta') \exp[-j2k\xi' \sin \theta + j\varphi_N(\xi', \eta')], \end{aligned} \quad (8)$$

где $\varphi_N(\xi', \eta')$ — фазовый спектр изображения. В выходной плоскости P_5 будет при этом следующее распределение амплитуды света:

$$E_3(x_1, y_1) = T_{02} \tilde{s}(x_1 + F \sin \theta, y_1) + s(x_1, y_1) + \hat{s}(x_1 + 2F \sin \theta, y_1). \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что центр интересующего нас изображения находится на оптической оси, в то время как центры искаженных

изображений, обозначенных через \tilde{s} и s , находятся в точках $x_1 = -F \sin \theta$, $y_1 = 0$ и $x_1 = -2F \sin \theta$, $y_1 = 0$ соответственно. Поэтому для выделения искомого изображения достаточно установить в выходной плоскости системы диафрагму D_2 . Проведенный выше анализ показал, что на выходе устройства, использующего маски с коэффициентами передачи вида (1) и (7), действительно будет выделяться почти неискаженное изображение случайного объекта. Анализ не учитывал искажающего действия затеняющего диска Π и ряд других факторов, имеющих место в реальной системе.

Рассмотрим вопрос об эффективности работы двухкаскадного голографического режекторного фильтра. Данное устройство в отличие от амплитудно-частотной фильтрации использует различный характер световых распределений, описываемых автокорреляционной функцией помехи $R_n(x', y')$ и взаимной корреляционной функцией помехи и сигнала $R_{ns}(x', y')$. Эффективность работы режекторного фильтра зависит от степени перекрытия этих распределений, главным образом определяемой различием фазочастотных спектров сигнала и помехи. Таким образом, необходимым условием работы описываемого устройства является возможность осуществления пространственной селекции в плоскости P_3 световых полей, комплексные амплитуды которых соответствуют функциям $R_n(x', y')$ и $R_{ns}(x', y')$. Определим наиболее эффективные условия работы устройства в следующих двух характерных случаях: случай слабой взаимной корреляции помехи и сигнала при широкополосной помехе и случай сильной корреляции функций $n(x, y)$ и $s(x, y)$ при большом уровне боковых лепестков функции $R_{ns}(x', y')$.

В первом случае можно считать, что основная энергия светового распределения $R_n(x', y')$ сосредоточена в главном лепестке автокорреляционной функции, соответствующем площади S . При слабой степени взаимной корреляции помехи и сигнала можно считать, что изменение комплексной амплитуды светового поля, соответствующего функции $R_{ns}(x', y')$, по области $4s_{\text{вх}}$ будет незначительным. Для простоты предполагаем, что входная апертура имеет вид прямоугольника, а увеличение оптической системы равно единице. Режекторный фильтр будет работать эффективно при условии выполнения неравенства $s \ll 4s_{\text{вх}}$. Известно, что ширина основного пика автокорреляционной функции сложного сигнала обратно пропорциональна полосе его частот. Поэтому при условии $n(x, y) = n_1(x)n_2(y)$ необходимо выполнение следующего неравенства:

$$\Delta f_x \Delta f_y \gg \frac{1}{4s_{\text{вх}}}, \quad (10)$$

где Δf_x , Δf_y — полосы пространственных частот соответственно по координатам x и y . Таким образом, предлагаемый режекторный голографический фильтр будет работать эффективно при выполнении неравенства (10), т. е. при сложной помехе, имеющей большую базу*, и при слабой степени корреляции между помехой и сигналом. Характерным примером такой ситуации является выделение случайного объекта на фоне известного участка местности со сложным рельефом.

Наиболее трудной задачей во втором случае является выделение сигнала, амплитудно-частотный спектр которого полностью перекрывается спектром помехи, а фазочастотные спектры отличаются лишь линейным фазовым сдвигом. При этом фазу подынтегрального выражения (4), определяющего функцию взаимной корреляции для одномерного случая, можно представить следующим образом:

* Под базой изображения понимаем произведение полосы пространственных частот на его протяженность.

$$\begin{aligned}\varphi(\xi, x') &= \frac{k}{F} a_1 \xi - \frac{k}{F} a_2 \xi - \frac{k}{F} (x' - F \sin \theta) \xi = \\ &= \frac{k}{F} \xi (a_1 - a_2 - x' + F \sin \theta),\end{aligned}\quad (11)$$

где $\varphi_N(\xi) = \frac{k}{F} a_1 \xi$, $\varphi_s(\xi) = \frac{k}{F} a_2 \xi$. Как видно из выражения (11), в точке $x' = a_1 - a_2 + F \sin \theta$ происходит фазирование спектральных составляющих помехи и сигнала, т. е. при любых значениях ξ имеем $\exp [j\varphi(\xi, x')] = 1$. Таким образом, в точке x' формируется максимум взаимно корреляционной функции $R_{ns}(x', y')$ и для ее выделения необходимо отсутствие побочных максимумов в этой области у функции $R_n(x', y')$: Рассмотренное устройство несомненно расширяет возможности линейной фильтрации изображений. Однако в силу сложности реализации, его применение оправдано главным образом в том случае, когда амплитудно-частотные спектры помехи и сигнала перекрываются. При условии отсутствия перекрытия спектров функций $n(x, y)$ и $s(x, y)$ целесообразно использовать амплитудно-частотную фильтрацию ввиду ее более простой реализации.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для подтверждения изложенных выше теоретических выводов была собрана экспериментальная установка согласно эквивалентной схеме, приведенной на рис. 1. Исследовался фотошаблон микросхемы широкополосного усилителя (рис. 2). Дефекты фотошаблона имели вид трех

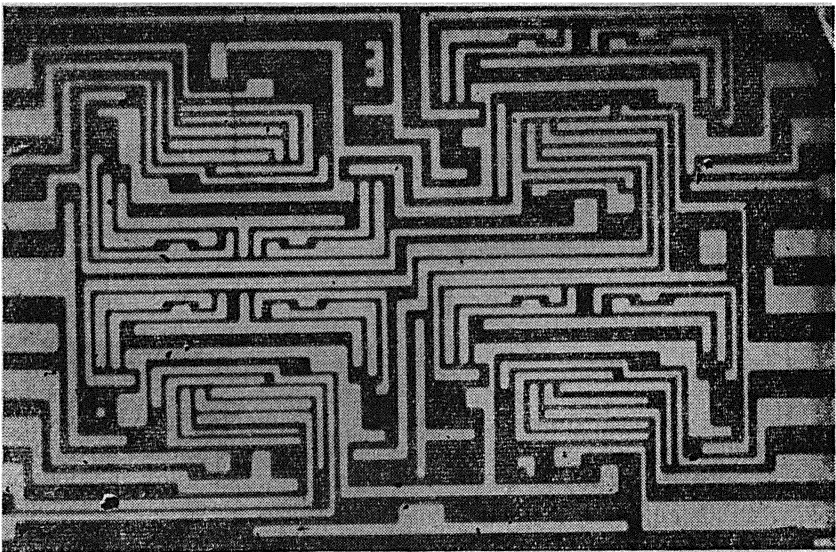


Рис. 2. Неискаженный фотошаблон.

линий и плоскостного объекта в виде стрелки (рис. 3). Установка была собрана с использованием стандартных оптических узлов, в качестве преобразующих линз применялись объективы И-37. Источником когерентного света служил гелий-неоновый лазер с мощностью в одномодовом режиме 20 мВт. Фотошаблоны были выполнены на фотопластинках Микрат ВРЛ.

Для устранения фазовых искажений за счет неравномерности толщины стекла фотошаблон помещался во входной плоскости в кювету с иммерсионной жидкостью. Были получены два идентичных согласованных фильтра на неискаженный фотошаблон и зарегистрирован спектр его пространственных частот. При записи фильтров использовалась известная схема Ван-дер-Люгта [7], причем время экспозиции и режим проявления фотопластинок с записью согласованных фильтров и пространственного спектра были одинаковы. Для выравнивания динамического диапазона записи использовалось «голодное проявление» и двухрастворный выравнивающий проявитель. Корректирующий фильтр состоял из двух транспарантов, первый из которых представлял собой фильтр, согласованный с помехой, а на другом был записан пространственный спектр помехи. Совмещение этих транспарантов осуществлялось с помощью микроскопа. В результате была получена требуемая передаточная функция корректирующего фильтра (7). Центр транспарантов с записью согласованных фильтров был непрозрачен, что исключало постоянную составляющую транспарантов.

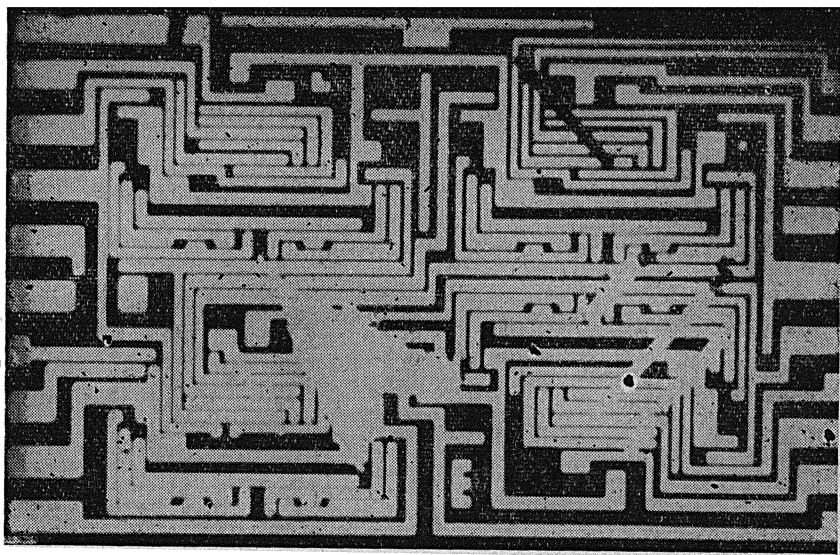


Рис. 3. Искаженный фотошаблон.

На вход устройства (плоскость P_1) подавался искаженный фотошаблон. В плоскостях P_2 и P_4 устанавливались соответственно фильтр, согласованный с помехой $n(x, y)$ (неискаженный фотошаблон) и корректирующий фильтр, изготовленный описанным выше способом. С помощью пространственной фильтрации, осуществленной в плоскости P_3 , на вход корректирующего фильтра пропускалась только вторая компонента светового поля $E_1(x', y')$. Третья компонента, характеризующая функцию автокорреляции изображения $n(x, y)$, ширина главного лепестка которой составляла порядка 80 мк, задерживалась с помощью непрозрачного диска, выполненного на качественно обработанном стекле. В выходной плоскости P_5 двухкаскадного режекторного фильтра наблюдались выделенные искажения фотошаблона рис. 4. Как видно из рисунка, выделенные изображения имеют контуры. Это связано с тем, что низкочастотные составляющие пространственного спектра сигнала $s(x, y)$ подавлялись согласованным фильтром. В зависимости от характера выделяемых изображений целесообразно конструировать фильтры

с определенной полосой пространственных частот. Так, например, для получения на выходе системы плоскостных объектов целесообразно работать с более широкополосными согласованными фильтрами.

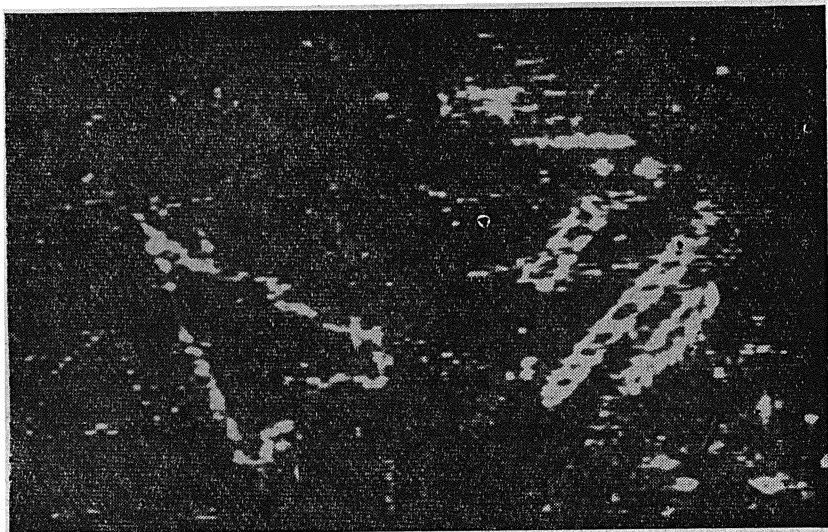


Рис. 4. Изображение дефектов, выделенных фильтром.

Проведенный теоретический анализ и предварительное экспериментальное исследование показали работоспособность предложенного двухкаскадного голографического фильтра. Данный фильтр будет работать наиболее эффективно при сложной помехе и слабой взаимной корреляции между помехой и сигналом. В том случае, когда амплитудно-частотные спектры подавляемого и выделяемого изображений перекрываются, данное устройство сможет осуществить фильтрацию при условии отличия фазочастотных спектров. При сильных смещениях подавляемого изображения фильтр легко подстроить путем смещения диафрагмы.

Авторы выражают глубокую благодарность Адамчикову В. И. за помощь в проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. S. Watkins, *Solid State Technology*, 12, № 9, 29 (1969).
2. P. M. Will, *Appl. Opt.*, 10, № 9, 2097 (1971).
3. Р. Аксельрод, *ТИИЭР*, 60, № 4 (1972).
4. Э. И. Крупицкий, Г. Х. Фридман, Авторское свидетельство № 380186.
5. Д. Ж. Гудман, *Введение в фурье-оптику*, изд. Мир, М., 1970
6. Л. М. Сороко, *Основы голографии и когерентной оптики*, изд. Наука, М., 1971.
7. Van der Lugt, *IEEE Trans.*, IT-10, № 2 (1964).

Ленинградский электротехнический институт связи

Поступила в редакцию

20 января 1975 г.,

после доработки 20 октября 1976 г.

TWO-STAGE HOLOGRAPHIC REJECTOR FILTER

G. E. Korbukov, E. I. Krupitsky, V. V. Kullkov

A new two-stage holographic filter is described to suppress the known before image with keeping a satisfactory quality of the rest of images, which arrive at the input of a processing system simultaneously. The suggested method of signal treatment is more effective than amplitude-frequency filtration or the image subtraction method because not only amplitude-frequency, but also phase spectra of suppressed and separated images are taken into consideration.