

Г. Д. ФЕФИЛОВ

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ БИНАРНЫЙ ФИЛЬТР С ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТИПА

Представлена методика оптимальной пространственно-временной фильтрации сигнала при лазерной дифрактометрии микрообъектов. Принцип работы пространственно-временного фильтра с перестраиваемыми параметрами основан на методе кусочно-линейной аппроксимации виртуальной модели фильтра. Приведены результаты экспериментальной проверки работы фильтра.

***Ключевые слова:** пространственно-временная фильтрация сигнала, лазерная дифрактометрия микрообъектов.*

В лазерной дифрактометрии одной из основных операций преобразования измерительного сигнала является оптимальная фильтрация, с помощью которой осуществляется функциональное преобразование осциллирующего сигнала с неравномерной амплитудой, описывающего распределение интенсивности в регистрируемой дифракционной картине, в периодический сигнал с равномерной амплитудой.

Фильтрация сигнала осуществляется, как правило, с помощью либо оптических амплитудных пространственных фильтров с переменной плотностью, либо бинарных фильтров, конструктивно согласованных со сканирующим устройством и фотоэлектрическим преобразователем лазерного дифрактометра. Амплитудные пространственные фильтры с переменной плотностью изготавливаются в основном из темного стекла [1], или с использованием фотоматериалов [2], или по технологии градиентных тонкослойных покрытий, толщина которых меняется по заданному закону [3]. Бинарные фильтры, в свою очередь, выполняют функцию апертурной диафрагмы фотоприемника. Как правило, область пропускания бинарного фильтра

обладает осью симметрии, а его размер в поперечном направлении определяется распределением интенсивности в дифракционной картине [4]. Основным недостатком оптических фильтров является неизменность функции их пропускания. Вследствие влияния параметров лазерного излучения, дефектов контролируемого объекта и несовершенства узлов дифрактометра характеристики дифракционной картины отклоняются от идеальных значений, на которые рассчитан фильтр. Кроме того, амплитудные и бинарные пространственные фильтры трудоемки в изготовлении и усложняют конструкцию дифрактометра. Таким образом, для достижения оптимального преобразования сигнала необходимо корректировать параметры фильтра.

Математическое моделирование процессов формирования измерительного сигнала и его преобразование в узлах дифрактометра осуществляются с помощью выражений, описывающих распределение интенсивности $I(\rho)$, где ρ — пространственная координата, в дифракционной картине объектов, таких как отверстия прямоугольной или круглой формы и дополняющие их экраны. Дифракционная картина отверстия круглой формы представляет собой светлый диск, окруженный concentрическими светлыми и темными кольцами, интенсивность которых уменьшается с увеличением радиуса. 84 % полной мощности дифракционной картины сосредоточено в ее центральном максимуме I_0 [5], а интенсивность боковых лепестков стремительно уменьшается по мере удаления их от центра картины. Различие значений интенсивности между первым и пятым дифракционными лепестками составляет ~3000 раз.

Для регистрации дифракционной картины объекта круглой формы целесообразно использовать передающую телевизионную камеру. В этом случае бинарная пространственно-временная фильтрация измерительного сигнала основана на дискретизации дифракционной картины в виде построчного разложения по линейной траектории, выделении из каждой строки разложения требуемого фрагмента видеосигнала, его интегрировании и запоминании

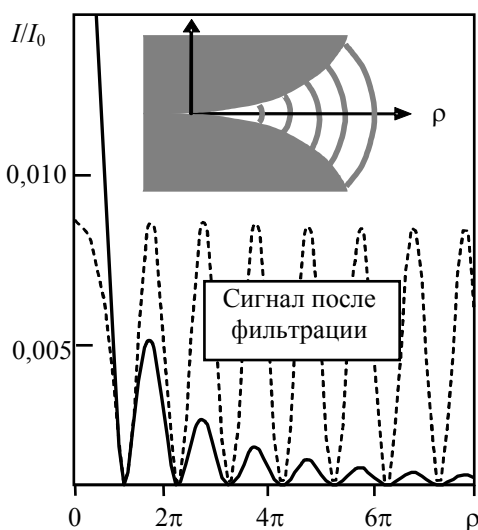


Рис. 1

результатов интегрирования [6]. Длительность фрагментов видеосигнала, подлежащих интегрированию, симметрично возрастает от строки к строке на величину $\pm\Delta t$ по заданному закону начиная со строки разложения, проходящей через центр дифракционной картины. Огибающая ступенчато изменяющейся последовательности результатов интегрирования выделенных фрагментов, за период построчного разложения дифракционной картины, представляет собой сигнал $U(\xi) = 4\xi J_1^2(\xi)$, где J_1 — функция Бесселя I рода. При этом происходит выравнивание амплитуды переменной составляющей сигнала на выходе фильтра за счет увеличения амплитуды периодов, соответствующих периферийным максимумам интенсивности дифракционной картины (рис. 1).

С точностью до постоянного множителя операцию бинарной пространственно-временной фильтрации при линейной дискретизации дифракционной картины можно представить выражением

$$U(\xi) = \left| \int_{-f(\xi)}^{f(\xi)} \frac{J_1(\sqrt{\xi^2 + \eta^2})}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} d\eta \right|^2,$$

где $f(\xi)$ — функция изменения от строки к строке длительности интегрируемых фрагментов разложения дифракционной картины (видеосигнала); ξ, η — координаты прямолинейной траектории интегрирования фрагментов разложения дифракционной картины.

С использованием данного выражения получена функция $f(\xi) = 0,5 \cdot 10^{-3} \xi^4$ изменения длительности интегрируемых фрагментов видеосигнала при линейной дискретизации дифракционной картины. При этом неравномерность амплитуды переменной составляющей полученного измерительного сигнала составила не более 3 % для периода, соответствующего центральному дифракционному максимуму, а для последующих периодов — не более 0,2 %. Коэффициент при переменной ξ^4 рассчитывался исходя из величины допустимой погрешности выравнивания амплитуды переменной составляющей сигнала. При уменьшении коэффициента, стоящего перед ξ^4 , уменьшается длительность интегрируемых фрагментов видеосигнала и неравномерность переменной составляющей, однако при этом уменьшается и амплитуда полезного сигнала. С другой стороны, с увеличением длительности интегрируемых фрагментов видеосигнала амплитуда полезного сигнала возрастает, но возрастают также искажения сигнала, вызванные в первую очередь тем, что интегрирование „круговой“ функции осуществляется по хорде. Это приводит к появлению нелинейной постоянной составляющей, смещению экстремумов и увеличению неравномерности амплитуды переменной составляющей сигнала, которая с удалением от центра дифракционной картины уменьшается.

Для функционирования бинарного пространственно-временного фильтра необходим генератор последовательности стробирующих прямоугольных импульсов, длительность каждого из которых симметрично изменяется (возрастает) от строки к строке разложения на величину $\pm \Delta t$ по заданному закону. В основу работы генератора последовательности импульсов положено создание сигнала специальной формы (форма которого подобна окну прозрачности фильтра). Тогда требуемая последовательность импульсов формируется на выходе компаратора как результат сравнения согласованных по амплитуде сигнала специальной формы и постоянного напряжения, значение которого обратно пропорционально номеру соответствующей строки разложения. Привязка последовательности импульсов к регистрируемой дифракционной картине в пространственно-временной области осуществляется с помощью синхроимпульсов строчной и кадровой разверток передающей телевизионной камеры.

В пространственно-временной области сигнал специальной формы, определяющий форму окна прозрачности фильтра, должен быть ориентирован относительно раstra и дифракционной картины таким образом, чтобы его вершина была совмещена с первой строкой разложения в плоскости изображения и оптической осью (центром дифракционной картины), а ось симметрии импульса была перпендикулярна направлению строчной развертки. Изображение регистрируемой дифракционной картины и контура окна прозрачности пространственно-временного фильтра приведено на рис. 2

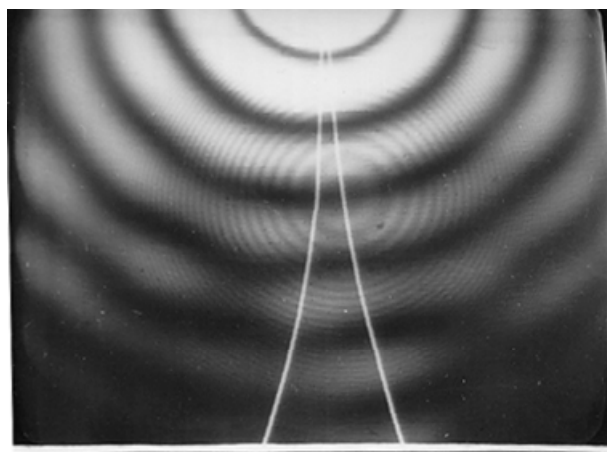


Рис. 2

В основу синтеза сигнала специальной формы положен метод кусочно-линейной аппроксимации. Для реализации этого метода воспроизводимая функция $f(\xi)$ на всем интервале разбивается на N участков длиной $l_i = X_{i+1} - X_i$ и на каждом из них заменяется прямой линией. Число участков разбиения и их координаты определяются заданной погрешностью аппроксимации δ [7]. Данный способ синтеза сигнала специальной формы позволяет видоизменять форму окна „прозрачности“ пространственно-временного фильтра посредством изменения параметров сигнала специальной формы на всех или отдельных участках разбиения, в том числе и автоматически. В таблице приведены результаты расчета числа участков N для

функции $f(\xi) = 0,5 \cdot 10^{-3} \xi^4$ в зависимости от методов разбиения области задания аргумента и точности кусочно-линейной аппроксимации (КЛА):

КЛА-1 — равные участки;

КЛА-2 — неравные участки, длины которых кратны, например, целой степени числа 2;

КЛА-3 — неравные участки, максимально возможная длина которых обеспечивает минимальную (чебышевскую) аппроксимацию.

Функция	Тип КЛА	N при δ , %					
		5	2	1	0,5	0,2	0,1
$0,5 \cdot 10^{-3} \xi^4$	КЛА-1	6	8	13	18	27	36
	КЛА-2	4	6	8	11	16	21
	КЛА-3	4	6	7	10	12	15

Сравнительный анализ приведенных в таблице данных показывает, что при заданной погрешности аппроксимации $\delta = 5 \dots 1$ % число участков разбиения функции для трех рассматриваемых методов отличается незначительно. При уменьшении погрешности количество участков возрастает, особенно для метода, в котором осуществляется разбиение на равные участки (КЛА-1). Метод КЛА-2 обладает несложным схемным решением и по количеству участков разбиения практически равноценен методу Чебышева.

Проверка работы бинарного пространственно-временного фильтра с различной формой окна выполнялась на экспериментальной установке, функциональная схема которой приведена на рис. 3, где 1 — He—Ne-лазер, 2 — контролируемый объект, 3 — линза, 4 — телевизионная камера, 5 — монитор, 6 — электронный блок, 7 — осциллограф С9-8, 8 — анализатор спектра сигнала СК4-57, 9 — преобразователь сигнала.

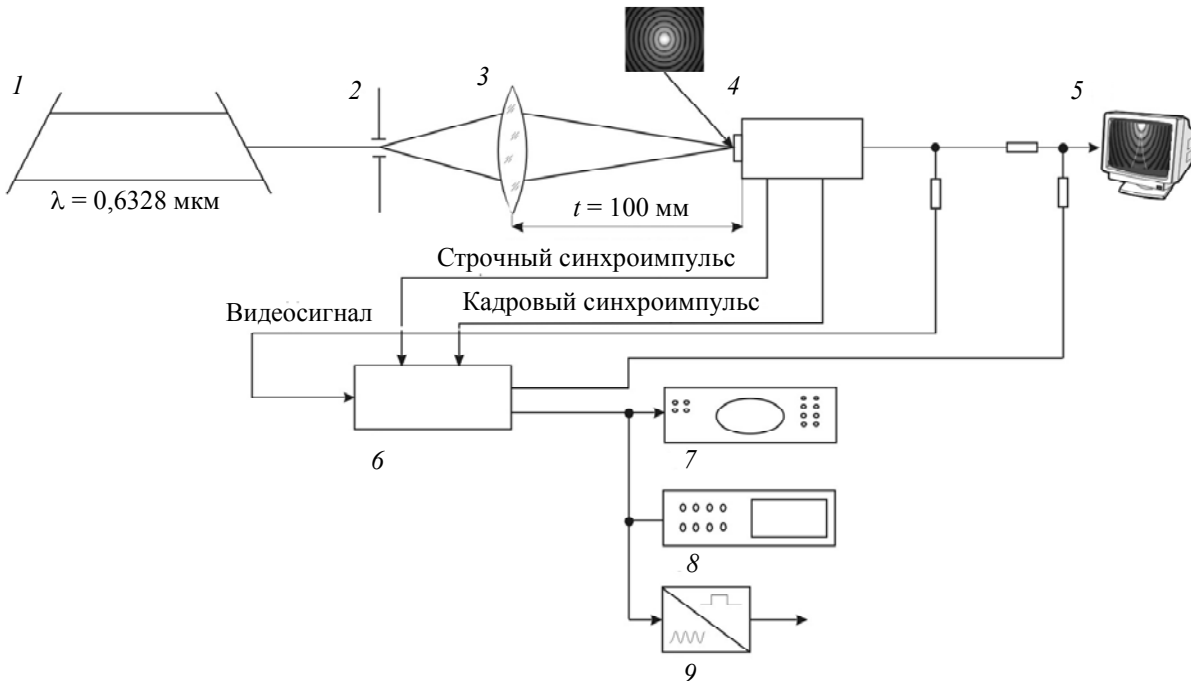


Рис. 3

Генерирование сигнала специальной формы осуществляется с помощью интегратора с непрерывным сбросом, выполняемого на основе операционного усилителя, во входную цепь которого на протяжении интервала времени, соответствующего каждому участку аппроксимации, подается постоянный ток, пропорциональный крутизне изменения напряжения на воспроизводимом участке. Крутизна изменения напряжения сигнала определяется N -стабильной ($R_1 \dots R_N$) RC цепью интегратора, где $R_1 \dots R_N$ — резисторы, количество которых равно количеству участков разбиения, C — конденсатор интегратора. Источник тока через коммутируемые

электронные ключи поочередно через резисторы $R_1 — R_N$ подключается к входу операционного усилителя, в цепи обратной связи которого содержатся высокоточный конденсатор C и управляемый электронный ключ для обнуления интегратора. При таком включении операционный усилитель работает в режиме интегратора с непрерывным сбросом, что обеспечивает разряд до нуля конденсатора после каждого цикла формирования сигнала специальной формы. С момента начала формирования сигнала управляемые электронные ключи поочередно через соответствующие резисторы $R_1 — R_N$ подключают источник тока положительной полярности к входу интегратора. За это время на выходе интегратора формируется одна половина сигнала специальной формы. Затем полярность источника тока меняется и управляемые электронные ключи в обратном порядке через резисторы $R_N — R_1$ подключают источник тока к входу интегратора, где формируется другая половина сигнала специальной формы.

Синхроимпульсы кадровой развертки после формирования кадра поступают на установочный вход реверсивного счетчика, где записывается число, равное количеству строк. Синхроимпульсы строчной развертки задают ритм формирования сигнала специальной формы и также поступают на вход счетчика. Из записанного в памяти счетчика числа вычитается по единице, и формируется код, обратно пропорциональный номеру строки. С помощью цифроаналогового преобразователя этот код преобразуется в постоянное напряжение, обратно пропорциональное номеру строки.

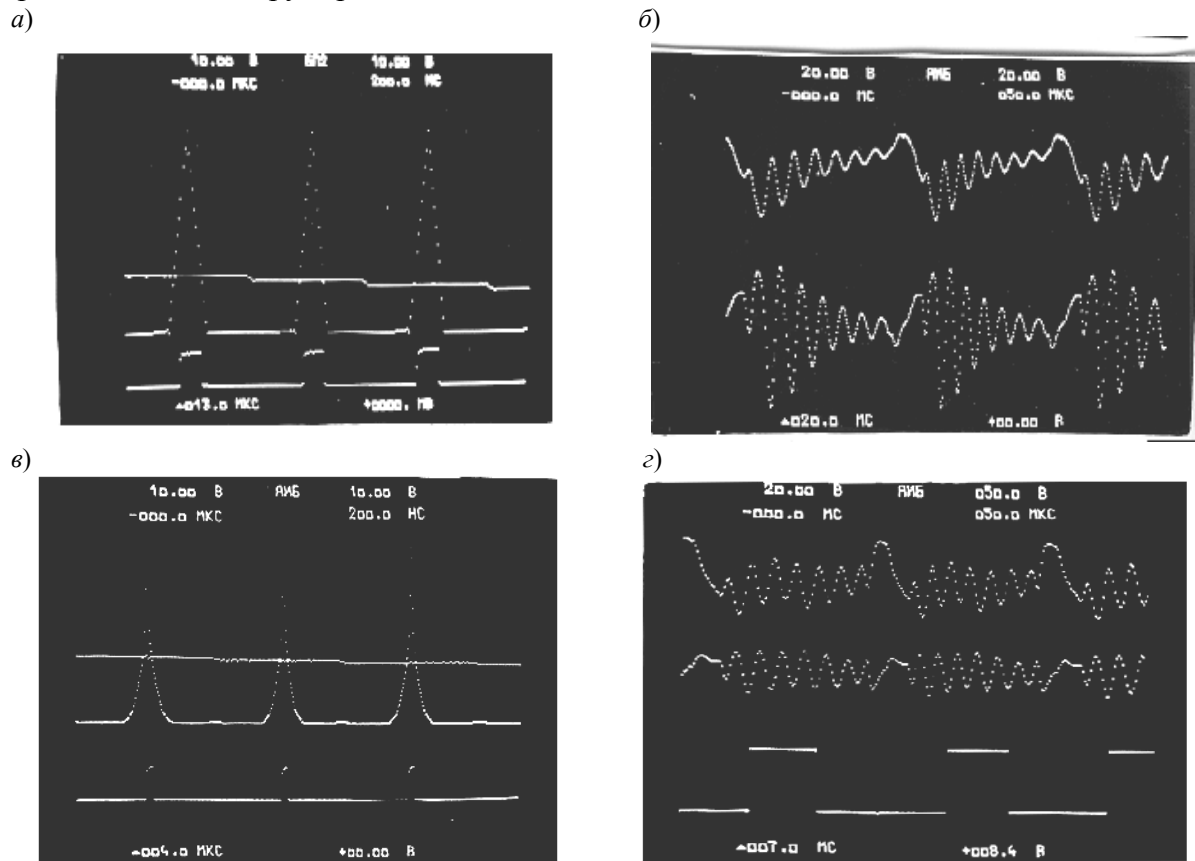


Рис. 4

На рис. 4 представлены фотоизображения с экрана осциллографа, поясняющие работу бинарного пространственно-временного фильтра: *а* и *в* — осциллограммы сигналов специальной формы (треугольной — *а*, оптимальной — *в*) и сигналов ступенчато изменяющегося напряжения, поступающих на вход компаратора, на выходе которого формируется последовательность стробирующих импульсов с симметрично изменяющейся длительностью; *б* и *г* — соответственно осциллограмма сигнала на выходе бинарного пространственно-временного фильтра и производная полученного сигнала.

Экспериментальные исследования подтвердили правильность проведенных теоретических исследований, а именно: бинарный пространственно-временной фильтр осуществляет функциональное преобразование осциллирующего сигнала с неравномерной амплитудой, описывающего распределение интенсивности в регистрируемой дифракционной картине, в периодический сигнал с равномерной амплитудой.

К основным достоинствам метода бинарной пространственно-временной фильтрации относятся простота реализации и возможность изменения параметров фильтра в процессе эксперимента, в том числе и автоматически. Реализация бинарных пространственно-временных фильтров, построенных на основе рассмотренного метода, осуществляется программно или аппаратно, с использованием серийно производимых электронных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уоткинс А. С. Управление процессом изготовления оптических волокон // ТИИЭР. 1982. Т. 70, № 6. С. 123—131.
2. Юу Ф. Т. С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию / Пер. с англ.; Под ред. В. К. Соколова. М.: Сов. радио, 1979. 304 с.
3. Губанова Л. А., Путилин Э. С. Оттенители и фильтры с переменной плотностью на поверхности сферических деталей // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1990. Вып. 1. С. 98—103.
4. А.с. 1312385, СССР. Устройство для измерения размера изделия / А. С. Митрофанов, В. А. Тарлыков, Г. Д. Фефилов // Б.И. 1987. № 19.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
6. А.с. № 1379623, СССР. Устройство для измерения геометрических параметров изделий / В. И. Соколов, Г. Д. Фефилов // Б.И. 1988. № 9.
7. Смоллов В. Б. Функциональные преобразователи информации. Л.: Энергоиздат, 1981. 248 с.

Сведения об авторе

Георгий Дмитриевич Фефилов

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: fg1319@mail.ru

Рекомендована кафедрой лазерной техники и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию
26.04.13 г.