

## 4. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ В ОПТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Принцип голографической записи стационарных волновых полей был рассмотрен в конспекте по теме 2, там показана возможность голографической записи полной информации об оптическом сигнале и её последующего восстановления. Продемонстрировано применение голографической записи в когерентных оптических корреляторах.

В оптико-информационных системах часто требуется осуществлять голографическую запись электрических сигналов, которая имеет свои особенности из-за движения пространственной реплики сигнала в акустооптическом модуляторе (АОМ) во время записи голограммы, поскольку для ввода сигналов в оптические системы обычно используются именно АОМ. Рассмотрим работу такого устройства ввода.

### 4.1. Акустооптический модулятор

Если освещать акустооптический модулятор плоским волновым фронтом, то такой модулятор формирует оптический сигнал в виде движущейся пространственной реплики входного электрического сигнала. Покажем это, рис. 4.1.

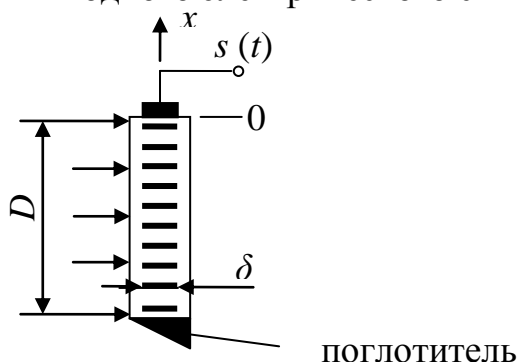


Рис. 4.1. Акустооптический модулятор света

С помощью пьезопреобразователя входной электрический сигнал возбуждает в прозрачном звукопроводе длиной  $D$  бегущие со скоростью  $V$  ультразвуковые волны, которые затем поглощаются поглотителем. Рассмотрим приближение тонкого модулятора, когда фаза проходящей через модулятор световой волны  $\psi(x)$  пропорциональна изменениям показателя преломления внутри звукопровода  $n(x)$ :

$$\psi(x) = \frac{2\pi\delta}{\lambda} n(x), \quad (4.1)$$

где  $\lambda$  - длина световой волны.

Показатель преломления модулируется бегущей ультразвуковой волной в соответствии с возбуждающим сигналом:

$$n(x,t) = n_0 + K_1 s\left(t + \frac{x}{V}\right). \quad (4.2)$$

Из (4.1), (4.2), с учетом ограниченности световой апертуры акустооптического модулятора (АОМ) можно записать следующее выражение для оптического сигнала непосредственно за модулятором при его освещении плоской световой волной:

$$u_{АОМ}(x,t) \approx P_D(x) e^{iK_2 s\left(t + \frac{x}{V}\right)},$$

где 
$$P_D(x) = \begin{cases} 1, & -D < x < 0 \\ 0 & \end{cases}.$$

Разлагая экспоненту в ряд, получим следующее выражение для оптического сигнала после АОМ:

$$u_{АОМ}(x,t) \approx P_D(x) \left[ 1 + iK_2 s\left(t + \frac{x}{V}\right) + H.O. \right]. \quad (4.3)$$

При малом индексе фазовой модуляции ( $K_2 \ll 2\pi$ ), членами высшего порядка малости  $H.O.$  можно пренебречь. В этом случае оптический сигнал после АОМ, наряду с постоянной величиной, содержит слагаемое, пропорциональное бегущей пространственной реплике входного электрического сигнала:

$$u_{АОМ}(x,t) \square P_D(x) \left[ 1 + i \frac{K_2}{2} \tilde{s} \left( t + \frac{x}{V} \right) + i \frac{K_2}{2} \tilde{s}^* \left( t + \frac{x}{V} \right) \right], \quad (4.4)$$

где  $\tilde{s}(t)$  - экспоненциальное представление входного сигнала.

Из выражения (4.4) следует, что в приближении тонкого модулятора, на его выходе формируется сумма двух (не считая слагаемых высшего порядка малости) одинаковых по интенсивности пространственных сигналов, а именно пространственной реплики экспоненциального представления входного сигнала и ее комплексно-сопряженной величины.

Приближение тонкого модулятора соответствует режиму дифракции света на ультразвуке Рамана-Ната, который реализуется на сравнительно низких частотах. В общем случае, когда приближение тонкого модулятора не справедливо, строгое (и сравнительно сложное) решение задачи дает выражение, аналогичное (4.4), но с разными коэффициентами перед вторым и третьим слагаемыми:

$$u_{АОМ}(x,t) \square P_D(x) \left[ 1 + K_3 \tilde{s} \left( t + \frac{x}{V} \right) + K_4 \tilde{s}^* \left( t + \frac{x}{V} \right) \right]. \quad (4.5)$$

В случае, когда частота сигнала достаточно велика, а звукопровод установлен к падающей световой волне под углом Брэгга, на выходе остается только одно из информативных слагаемых, т. е.  $K_3 = 0$  или  $K_4 = 0$ . Такой режим называется дифракцией Брэгга.

Обычно в акустооптических устройствах используется только одно из экспоненциальных представлений сигнала, поскольку оно несет всю информацию о сигнале и достаточно для его обработки, второе слагаемое нетрудно отфильтровать в оптической системе.

Таким образом, независимо от типа дифракции, можно при расчетах и проектировании устройств, считать, что акустооптический модулятор осуществляет ввод в оптическую систему пространственной реплики экспоненциального представления входного сигнала или его комплексно сопряженной величины (в зависимости от используемого слагаемого).

Достоинством акустооптического модулятора, как устройства ввода сигналов, является его широкополосность. Достигнуты полосы пропускания в несколько гигагерц. Кроме одноканальных, разработаны многоканальные модуляторы с числом каналов более 100.

Акустооптический модулятор позволяет получить оптический сигнал в виде движущейся со скоростью ультразвука пространственной реплики обычного временного сигнала. Для голографической записи удобно записывать не сам сигнал, а его спектр, поскольку согласно теореме сдвига преобразования Фурье, модуль пространственного спектра не изменяется при движении сигнала. Если голографически записать полный (комплексный) спектр сигнала, то из него с помощью обратного преобразования Фурье можно восстановить и сам сигнал. В оптической системе спектр формируется с помощью интегрирующей линзы. В определенном масштабе этот спектр пропорционален временному спектру сигнала, подаваемого на вход акустооптического модулятора. Масштабное соотношение между временной и пространственной частотой определяется соотношением между временем и пространственной координатой в акустооптическом модуляторе.

Из-за движения входного пространственного сигнала со скоростью распространения звуковой волны в формируемом спектре сигнала появляется дополнительный временной множитель. Полагая, что входной сигнал полностью помещается в апертуре акустооптического модулятора, выражение для информативного оптического сигнала после модулятора пропорционально экспоненциальному представлению бегущей пространственной реплики входного электрического сигнала:

$$u_{in}(t, x) \propto \tilde{s}\left(t + \frac{x}{V}\right).$$

Линза осуществляет преобразование Фурье этого оптического сигнала по координате  $x$  (с точностью до несущественного квадратичного фазового

множителя, зависящего от расстояния между АОМ и линзой):

$$u_{out}(t, x_1) \square \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{s}\left(t + \frac{x}{V}\right) e^{-j2\pi f_x x} dx, \quad \text{где } f_x = \frac{x_1}{\lambda f}.$$

Проведя замену переменной, получим выражение для сигнала в фокальной плоскости интегрирующей линзы:

$$u_{out}(t, x_1) \square e^{j2\pi f_x V t} \tilde{S}(V f_x). \quad (4.6)$$

Высокая плотность голографической записи, а также возможность ввода в оптическую систему с помощью АОМ высокоинформативных широкополосных радиосигналов позволяет создавать голографические запоминающие устройства с большой скоростью записи и воспроизведения информации. Способность голограмм регистрировать как амплитудную, так и фазовую информацию позволяет осуществлять в оптических системах запись электрических сигналов, фазовая модуляция в которых часто несет существенную информацию, а также записывать голографические согласованные фильтры для опознавания сигналов, регистрировать фазовые задержки в системах обработки импульсно-доплеровских РЛС и т. д. Рассмотрим работу некоторых из этих систем.

## 4.2. Голографическая запись и воспроизведение цифровой информации

Одна из схем высокоскоростной голографической системы записи цифровой информации показана на рис. 4.2. Система работает следующим образом.

Поток цифровых данных со скоростью  $\sim 1$  Гбит/с поступает на демультиплексор, который распараллеливает входной сигнал на несколько менее широкополосных каналов, скорость потока информации в которых в  $N$  раз меньше входной. С помощью импульсного лазера входные данные с АОМ постранично записываются в плоскости пространственных частот на голограмму. Переход от одной голограммы к другой осуществляется дефлектором и с помощью

лентопротяжного механизма. Восстановление записанной информации осуществляется при освещении голограмм опорным пучком. Страницы записанной в данной голограмме информации изображаются при этом на

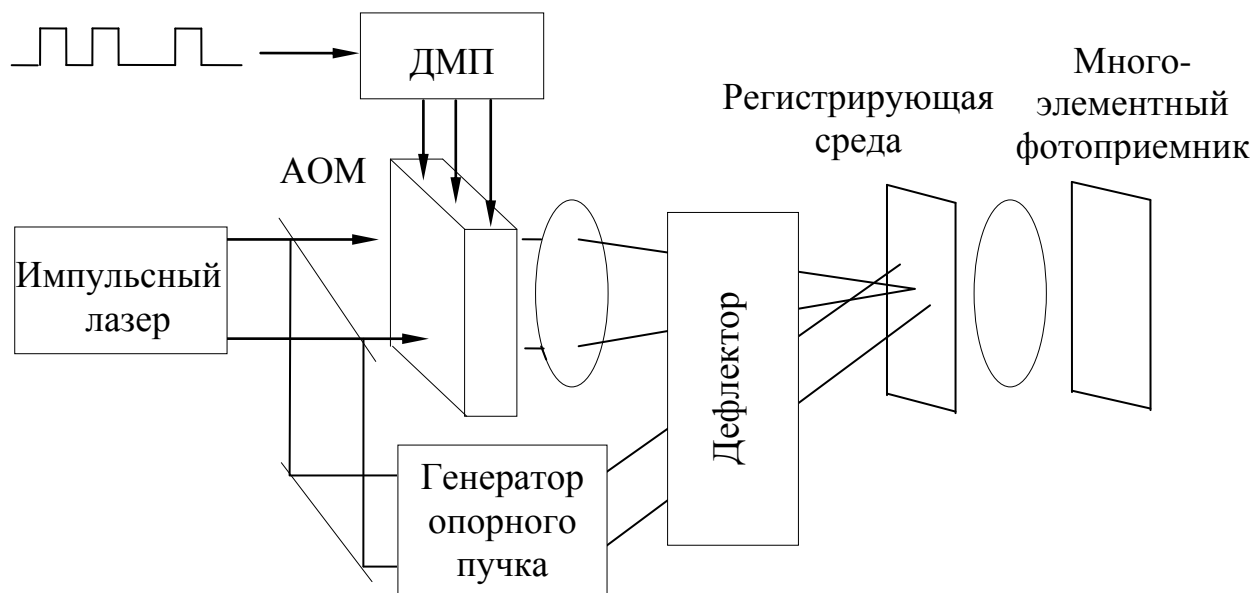


Рис. 4.2. Схема высокоскоростного голографического самописца

матричном фотоприемнике, с каналов которого информация считывается параллельными потоками в мультиплексор, который их объединяет. Полученная скорость записи и восстановления информации  $\sim 1$  Гбит/с, при практически неограниченном объеме памяти.

#### 4.2. Голографическая запись согласованных фильтров

В задачах распознавания сигналов могут использоваться голографические корреляторы с акустооптическим вводом входного сигнала. Схема такого коррелятора показана на рис. 4.3.

Запись голографического фильтра осуществляется с сигнала, движущегося в АОМ. На стадии обработки спектр распознаваемого сигнала освещает голографический фильтр. Если спектр комплексно сопряжен с записанным на

голограмме, то восстанавливается опорный пучок, имеющий обычно плоский или сферический волновой фронт, который фокусируется в яркую точку с помощью линзы Л2. В общем случае в выходной плоскости голографического коррелятора формируется корреляционная функция входного и опорного сигналов.

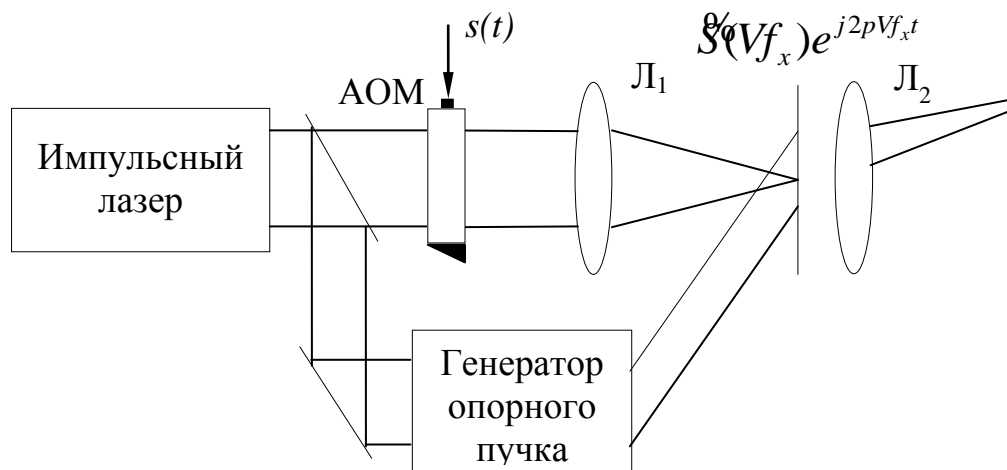


Рис. 4.3. Схема голографического коррелятора с акустооптическим вводом

### 4.3. Особенности голографической записи в акустооптических устройствах

Особенностью голографической записи (как для систем памяти, так и для корреляторов) является движение входного сигнала в апертуре АОМ. Из-за этого, как было показано при рассмотрении работы АОМ, в фокальной плоскости линзы преобразования Фурье формируется спектр пространственной реплики экспоненциального представления входного сигнала, помноженный на множитель  $e^{jVf_x t}$ , который сдвигает частоту света в выходном распределении.

$$\tilde{s}(t) \xrightarrow{F} \tilde{S}(Vf_x) \cdot e^{j2\pi Vf_x t}$$

Входной сигнал	$F$	Статическая компонента спектра сигнала	Компонента, зависящая от времени
----------------	-----	--	----------------------------------

Если не принять мер, интерференционная картина, регистрируемая на голографической регистрирующей среде, будет смазана из-за сдвига частоты в предметном пучке. Компенсация этого сдвига в схемах записи голограмм в АО устройствах осуществляется с помощью специально генерируемого опорного пучка. Различают два метода компенсации.

### 1. Метод полной компенсации

Если в качестве генератора опорного пучка использовать такую же схему с АОМ на который подается сигнал с равномерной амплитудой спектра, то компонента, зависящая от времени в опорном пучке будет такой же, как и в предметном, и она будет скомпенсирована, т.к. полезный член в коэффициенте пропускания голограммы  $I_H$  пропорционален произведению  $S * G$ , где  $S$ ,  $G$  - распределение сигнального и опорного пучков в плоскости голограммы во время записи. Действительно:

$I_H \sim \tilde{S} * (Vf_x) e^{-j2\pi Vf_x t} \tilde{G}(Vf_x) e^{j2\pi Vf_x t} \sim \tilde{S} * (Vf_x)$ , т.к. считаем, что  $\tilde{G}(Vf_x) \approx const$  на частотах спектра сигнала.

Примерно равномерным спектром обладают сигналы с огибающей типа  $\delta$  - функции и ЛЧМ сигналы, показанные на рис. 4.4. Схема другого варианта генератора опорного пучка показана на рис. 4.5 [9].

Можно показать, что в плоскости, параллельной фокальной, в первом порядке дифракции с постоянной скоростью сканирует сфокусированное пятно. Вторая линза осуществляет обратное преобразование Фурье этого пятна. На выходе получается вращающийся плоский волновой фронт с однородным распределением. Если правильно подобрать коэффициенты увеличения линз и параметры ЛЧМ сигнала, то вращение волнового фронта полностью скомпенсирует множитель  $e^{-j2\pi Vf_x t}$ .



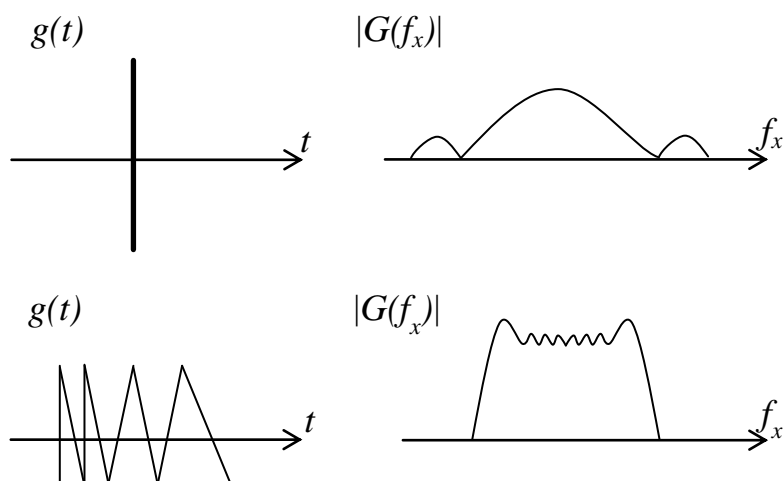


Рис. 4.4. Сигналы с постоянной (на ограниченном участке) амплитудой спектра

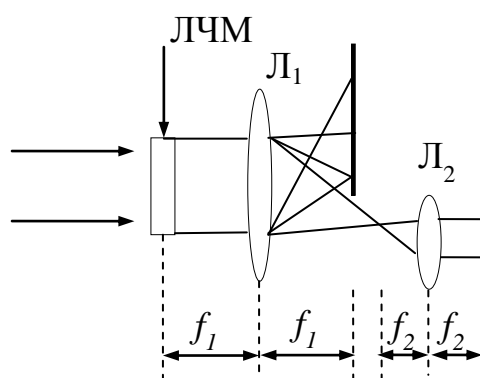


Рис. 4.5. Схема формирования вращающегося волнового фронта

## 2. Метод частичной компенсации

Если в опорном канале пропустить световой пучок через АОМ, на вход которого подан гармонический сигнал, то частота опорного пучка просто сдвигается на частоту модуляции. Выбирают частоту модуляции равной средней частоте сигнала, а пространственное распределение опорного пучка делают равномерным в области регистрации спектра входного сигнала:

$$G = e^{j2\pi V f_0 t}$$

Схема для формирования такого пучка может быть аналогична приведенной на рис. 4.5, но без выноса дифрагированного пятна из фокуса. При входном гармоническом сигнале сканирования этого пятна не происходит. В результате записи голограммы интересующее нас слагаемое в коэффициенте ее пропускания приобретает следующий вид:

$$S * G \sim \tilde{S}(V f_x) e^{j2\pi V t (f_x - f_0)}$$

Наличие временного множителя  $e^{j2\pi V t (f_x - f_0)}$  приведет к уменьшению этого

коэффициента пропускания пропорционально функции  $\frac{\sin[\frac{\Delta\tau}{2} 2\pi(f_0 - f_x)V]}{\frac{\Delta\tau}{2} 2\pi(f_0 - f_x)V}$  за

время экспозиции  $\Delta\tau$ . Для того чтобы искажения были незначительными выбирают

время экспозиции достаточно малым, чтобы на краю полосы т.е. при  $V(f_x - f_0) = \frac{\Delta f}{2}$

выполнялось:  $2\pi \cdot \Delta\tau \frac{\Delta f}{2} \ll \pi$ , откуда получим ограничение на время экспозиции

при методе частичной компенсации:  $\Delta\tau \ll \frac{1}{\Delta f}$ .

Голографическая запись сигналов при методе частичной компенсации требуют применения импульсных лазеров, генерирующих короткие импульсы большой амплитуды, достаточно коротких, чтобы избежать смаза интерференционной картины и достаточно мощных, чтобы за короткое время обеспечить энергию экспозиции необходимую для записи голограммы.

#### 4.4. Оптическая обработка сигналов импульсно-доплеровской РЛС

Одним из примеров использования голографии в системах обработки информации является обработка сигналов импульсно-доплеровской РЛС. Радиолокатор такого типа излучает последовательность когерентных импульсов для

одновременного измерения дальности и скорости нескольких целей [10]. При этом разрешение по дальности определяется длительностью импульсов  $\tau$  или полосой сигнала, а разрешение по доплеровской частоте - общей длительностью  $NT$  пачки из  $N$  импульсов. Обработка сигналов проводится следующим образом, рис. 4.6.

Станция посылает зондирующий сигнал с периодом  $T$ . Отраженные сигналы от  $M$  целей принимаются с запаздыванием, по которому определяется дальность. Для определения скорости цели, последовательности из  $N$  импульсов отраженные от цели, находящейся на дальности  $l$  подвергаются спектральному анализу, рис. 4.7. Для обработки сигналов от всех целей требуется многоканальный спектральный анализ (на каждой дальности).

Благодаря своей двумерности, оптическая система позволяет осуществлять спектральный анализ на всех дальностях одновременно. Схема такой оптической системы строится следующим образом.

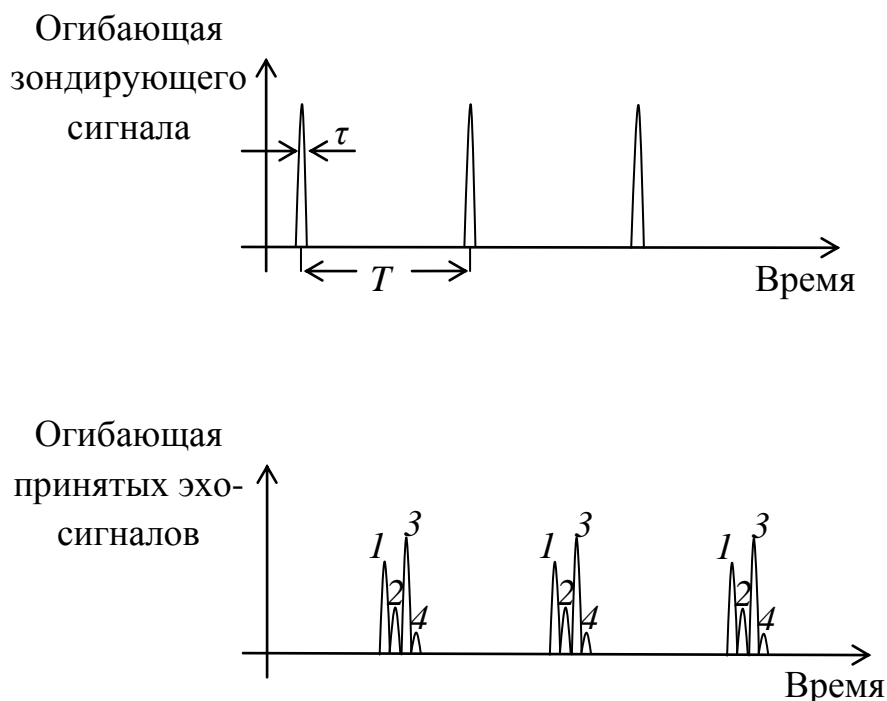


Рис. 4.6. К принципу работы импульсно-доплеровской РЛС

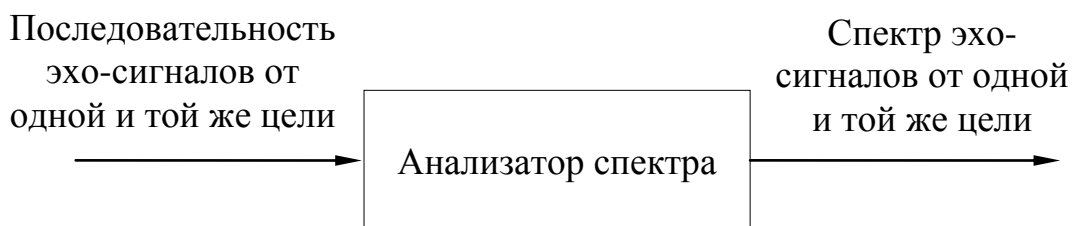


Рис. 4.7. Обработка сигналов импульсно-доплеровской РЛС

Отраженные от целей сигналы вводятся в одноканальный акустооптический модулятор и записываются на голограмму. Голограмма содержит запись всех отраженных сигналов от одного из  $N$  зондирующих импульсов цуга. Для каждого из  $N$  импульсов цуга записывается своя голограмма и голограммы располагаются рядом на регистрирующей среде, например, с помощью дефлектора.

Затем регистрирующая среда с  $N$  голограммами освещается когерентной плоской волной, и на выходе многоканального оптического анализатора спектра формируется изображение распределения целей в координатах дальность-частота.

Чтобы лучше понять принцип действия такой схемы можно сравнить ее с устройством обработки сигналов антенной решеткой. Запись эхо-сигналов одной цели представляет собой  $N$  голограмм спектра сигнала, расположенных рядом и отличающихся одна от другой только линейным сдвигом интерференционных полос, соответствующим линейному набегу фаз в отраженных импульсах цуга. Чем больше доплеровский сдвиг частоты, тем круче линейный фазовый набег. Если рядом расположенные голограммы подвергаются преобразованию Фурье, то, как и в системе обработки сигналов линейной АР с многоканальным модулятором, линейный фазовый набег голограммы переносится на световой пучок, что приводит к повороту волнового фронта, а в фокальной плоскости линзы к перемещению сфокусированного пятна.

По ортогональной координате с помощью Фурье преобразования мы переходим от спектра сигнала к его изображению, т.е. к изображению импульса в модуляторе в момент записи голограммы. По положению импульса на изображении можно определить дальность.

Если в момент записи присутствовало несколько отраженных сигналов на разных дальностях, то на выходе получим несколько пятен по числу целей. Положение пятен будет определяться по одной координате их дальностями, а по второй - доплеровской частотой или скоростью.

Система эффективно работает, если использовать реверсивную голографическую среду.

Перечисленные примеры не исчерпывают всех применений голографии для обработки сигналов. Предложены, например, метод компенсации фазовых неоднородностей в раскрывах зеркальных антенн, система обработки сигналов круговых антенных решеток с применением голографического фильтра и другие системы обработки сигналов. В рассмотренных примерах отражены основные особенности использования голографии в таких системах. Характерным для голографических устройств является полная запись сигнала, включая фазовую информацию, которая затем либо восстанавливается, либо используется как опорный сигнал для сравнения, в зависимости от того, опорный или предметный пучок оптической системы применен при восстановлении.