

О ВЫДЕЛЕНИИ И ОБНАРУЖЕНИИ СИГНАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ НЕАДДИТИВНЫХ ПОМЕХ

И. С. Барбанель

Рассмотрены алгоритмы аналоговой обработки изображений, позволяющие проводить обнаружение и выделение сигнала при наличии некоторых классов неаддитивных помех. Необходимые нелинейные преобразования при реализации описанных алгоритмов за счет нелинейностей характеристик фотопроцесса, что чрезвычайно упрощает обработку, хотя и препятствует ее реализации в реальном масштабе времени. Несмотря на некоторые недостатки предлагаемых способов они очень удобны, так как позволяют производить непрерывную (по пространству) обработку; несравненно более простые, чем аналогичные методы цифровой обработки, описанные в [3], и позволяют создать замкнутую (с точностью до фотографического процесса) систему оптимальной обработки изображений.

Задача оптимальной обработки сигналов, заключающаяся в обнаружении или выделении сигналов, подверженных воздействию помех, широко известна в теории связи [1]. Достаточно хорошо разработаны оптические и радиотехнические устройства, производящие оптимальную обработку сигналов, если комбинация сигнал—помеха аддитивна. Почти все эти устройства являются линейными.

При наличии неаддитивной смеси сигнал—помеха оптимальная обработка встречает серьезные трудности, и в этом случае нелинейная обработка может оказаться более эффективной.

Данная статья посвящена рассмотрению процедуры нелинейной обработки изображений с целью выделения или обнаружения полезного изображения, когда комбинация последнего и помехи представляют собой произведение или свертку. Помехи такого рода часто встречаются при обработке изображений, поскольку сам процесс формирования изображения является преимущественно мультипликативным, так как яркость естественной сцены образуется в результате мультипликативной комбинации освещенностей объектов и их коэффициентов отражения [2]. Кроме того, при распространении сигнала в каналах связи, при наличии ревербирующих сред, на него воздействуют мультипликативные помехи и помехи в виде свертки. Если дальнейшая обработка искаженного сигнала производится оптическим способом, то предлагаемая процедура нелинейной обработки может быть достаточно эффективно реализована в оптических устройствах.

Цель нелинейной обработки изображений с неаддитивной помехой сводится к преобразованию неаддитивной комбинации полезного изображения и помехи в аддитивную, которая далее может быть эффективно обработана линейным устройством. Суть нелинейной обработки состоит в следующем: рассмотренные типы помех могут быть сведены к аддитивным с помощью логарифмирования (мультипликативные — непосредственным логарифмированием; помехи в виде свертки — преобразованием по Фурье и последующим логарифмированием).

Пусть комбинация сигнал—помеха записывается в виде (т. е. представляет собой мультипликативную комбинацию)

$$f(x; y) = S(x; y) N(x; y), \quad (1)$$

где $S(x; y)$ — полезное изображение, $N(x; y)$ — шумовое (помеха) изображение. После логарифмирования получим

$$\log f(x; y) = \log S(x; y) + \log N(x; y), \quad (2)$$

т. е. линейную комбинацию сигнала и шума. Аддитивная помеха $N_1 = \log N$ может быть ослаблена с помощью последующего линейного преобразования. Если функции $S(x; y)$ и $N(x; y)$ положительны и не имеют разрывов, то преобразование (2) взаимнооднозначно.

Линейная обработка аддитивной смеси (2) может преследовать различные цели: а) обнаружение сигнала, б) выделение сигнала. Устройства для линейной обработки аддитивной смеси сигнал—помеха детально разработаны в литературе [1], поэтому в данной статье они не рассматриваются.

Если ставится задача о выделении сигнала из мультипликативной комбинации сигнал—шум, то алгоритм преобразований усложняется. После нелинейного преобразования мультипликативной комбинации (1) в аддитивную (2) осуществляется линейная обработка, в процессе которой производится полное или частичное подавление шумовой компоненты $\log N(x; y)$, после чего над сигнальной компонентой производится преобразование, обратное логарифмированию

$$S(x; y) = \exp[S_1(x; y)]. \quad (3)$$

В результате описанных преобразований производится выделение сигнала из мультипликативной смеси сигнал—шум. Алгоритм преобразования смеси сигнал—шум в виде свертки в аддитивную комбинацию для цифровой дискретной обработки приведен в [3]. Для аналоговой обработки алгоритм преобразования сводится к следующему. Пусть обрабатываемое изображение $f(x; y)$ содержит комбинацию полезного изображения $S(x; y)$ и шума $N(x; y)$ в виде свертки

$$f(x; y) = \iint S(x - \xi; y - \eta) N(\xi; \eta) d\xi d\eta. \quad (4)$$

Применив к (4) преобразование Фурье, получим

$$F[f(x; y)] = F[S(x; y)] F[N(x; y)]. \quad (5)$$

После логарифмирования будем иметь

$$\log F[f(x; y)] = \log F[S(x; y)] + \log F[N(x; y)]. \quad (6)$$

Поскольку функции $F[S]$ и $F[N]$ в общем случае являются комплекснозначными, преобразование (6) в оптике реализовать не удастся, и вместо (6) приходится выполнять следующую операцию:

$$\log |F[f]| = \log |F[S]| + \log |F[N]|, \quad (7)$$

которая просто реализуется в оптических устройствах и приводит к преобразованию смеси сигнал—помеха в виде свертки (4) в аддитивную смесь (7).

При реализации операции (7) происходит потеря информации, заключенной в фазовых спектрах функций $S(x; y)$ и $N(x; y)$, однако многие экспериментальные работы показывают, что в ряде случаев для эффективной обработки изображений достаточно наличие лишь амплитудных спектров. Дальнейшая линейная обработка аддитивной комбинации (7) может вестись так же, как и в случае мультипликативной помехи. Рассмотрим теперь способ реализации описанных выше алгоритмов.

Пусть изображения, подлежащие обработке, представляют собой комбинацию сигнала и шума в виде произведения или свертки. Это означает, что коэффициенты пропускания соответствующих фототранспарантов изменяются по закону (1) или (4). Поскольку коэффициент амплитудного пропускания транспаранта T_a изменяется в промежутке (0,1), то всегда имеем условие $f(x; y) > 0$.

Как было показано, алгоритм преобразования включает использование логарифмической операции. Эту операцию можно реализовать с помощью нелинейных характеристик фотопроцесса.

По характеристическим кривым фотопроцесса [4] можно построить кривые зависимостей коэффициента амплитудного пропускания фотоносителя от логарифма экспозиции — $T_a(\log H)$. Эти кривые для различных фотоносителей приведены на рисунке.

На кривых зависимостей $T_a(\log H)$ присутствуют прямолинейные участки. Если обрабатывать изображение, имеющее вид (1), в пределах этих прямолинейных участков, то фотопленка будет непосредственно реализовывать соотношение

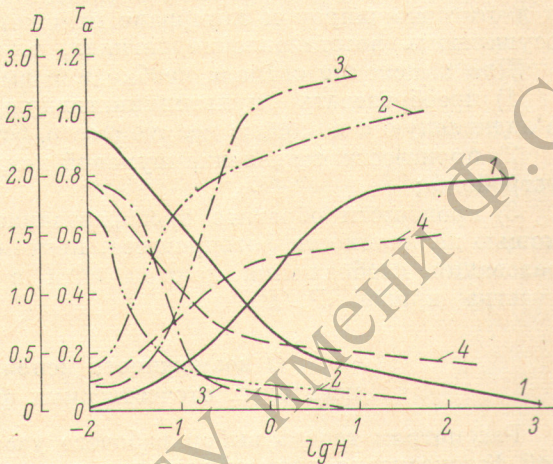
$$\log |f(x; y)| = \log |S(x; y)| + \log |N(x; y)|. \quad (8)$$

Поскольку $f(x; y) > 0$, то (8) тождественно равно (2) для всех $(x; y)$, т. е. фотопленка реализует преобразование мультипликативной комбинации сигнал—шум в аддитивную.

Если помеха и сигнал связаны в виде свертки (4), то необходимо выполнить следующие операции для реализации алгоритма преобразования. Получив с помощью сферической линзы в когерентном свете двухмерный Фурье-спектр распределения прозрачности вида (4), проведем процесс регистрации этого спектра на фотоносителе, согласно линейному участку кривой $T_a(\log H)$. Коэффициент амплитудного пропускания обработанного фотоносителя будет удовлетворять соотношению (7), т. е. предлагаемый алгоритм обработки комбинации сигнала и шума в виде свертки будет выполняться.

Проведение фотопроцесса на линейном участке кривой $T_a(\log H)$ означает следующее: если есть стандартно обработанный фотографический материал, то его надо переснять, причем при пересъемке требуется использовать дополнительное «световое смещение», т. е. необходимо предварительно частично засветить фотоматериал, а потом производить пересъемку. При этом, правда, происходит сужение динамического диапазона полезных экспозиций, так как большие интенсивности окажутся в области насыщения фотоносителя.

Приведенные рассуждения предполагают использование когерентного света (поскольку рассматриваются коэффициенты амплитудного пропускания), однако для случая мультипликативной помехи процесс пересъемки можно производить и в некогерентном свете, поскольку фотоноситель реагирует лишь на интенсивность падающего света.



Характеристические кривые и соответствующие им зависимости $T_a(\log H)$ для некоторых отечественных фотоносителей.

1 — фото-65 — время проявления 4 мин., 2 — фото-65Т — время проявления 2¼ мин., 3 — аэрофото — время проявления 8 мин., 4 — фото-250 — время проявления 4 мин.

Линейная часть системы обнаружения изображения также просто реализуется в оптике [5], так как представляет собой передаточную функцию фильтра, согласованного с сигналом.

Этот фильтр отличается от фильтра Люгта [5] лишь тем, что он согласован с сигналом $S_1(x; y) = \log S(x; y)$, а не сигналом $S(x; y)$. Процесс изготовления голографической маски для этого фильтра разделяется на два этапа:

а) изготовление амплитудного транспаранта с пропусканием $T_a = \log S(x; y)$ по вышеописанному методу;

б) изготовление голографической маски для согласованного с сигналом $S_1(x; y)$ фильтра по известной методике изготовления согласованных фильтров [5].

С помощью нелинейности фотопроцесса можно также реализовать алгоритм выделения сигнала $S(x; y)$ из мультипликативной помехи. Зависимость $T_a(H)$ хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией в достаточно широком интервале изменения экспозиций, что позволяет осуществить восстановление сигнала, т. е. реализовать операцию (3).

Для выделения сигнала необходимо выполнить следующие операции:

1) преобразовать мультипликативную комбинацию сигнал—шум в аддитивную с помощью нелинейности фотоносителя;

2) произвести подавление шумовой компоненты с помощью линейного устройства;

3) произвести обратное преобразование полезной компоненты с помощью нелинейности фотопроцесса, причем на этом этапе процесс преобразования изображения должен идти в пределах экспоненциального участка кривой $T_a(H)$.

О возможности использования некоторых отечественных фотоматериалов

Рассмотрим теперь выбор рабочего участка характеристической кривой фотоносителя для осуществления логарифмических преобразований.

На графиках зависимостей $T_a(\log H)$ (см. рисунок) есть линейные участки в областях больших и малых коэффициентов пропускания. Целесообразно работать на нижних участках этих кривых, так как при этом используется больший интервал изменения экспозиций. Следует отдельно выделить фотоноситель ФОТО-65. Из графика 1 видно, что для ФОТО-65 кривая $T_a(\log H)$ имеет протяженные линейные участки одинаковой длины для больших и малых коэффициентов пропускания. Используя такой фотоноситель, целесообразно использовать верхний участок кривой $T_a(\log H)$. При этом реализуется больший диапазон изменения коэффициентов пропускания и уменьшаются потери световой энергии при обработке. Недостатком данного фотоносителя, ограничивающим его применение, является крупное зерно его эмульсии, что приводит к увеличению уровня шумов в процессе обработки.

Шум зерен эмульсии является важным, но не определяющим фактором, влияющим на работу системы, ибо из формулы Гудмэна¹ [6] для шумов зерен фотоносителя следует, что при зернах с диаметром порядка $10 \div 15$ нм (что и достигается в голографических носителях) мощность полезного сигнала превышает мощность шума на несколько порядков.

Как видно из графиков, диапазон изменения экспозиций лежит в пределах от 1 до 600, т. е. размах амплитуды может меняться в $20 \div 25$ раз. При работе на нижних участках характеристик $T_a(\log H)$ проявляются нежелательные факторы:

1) малая величина коэффициента амплитудного пропускания,

2) малый динамический диапазон T_a .

Первый отрицательный фактор ведет к большим потерям света на линейном этапе обработки, однако он не является определяющим, поскольку

¹ Следует отметить, что формула Гудмэна выведена для случая квазиточечного объекта.

потери света порядка 96% ($T_a \approx 4\%$) являются допустимыми даже по нормам профессиональной фотографии.

Второй фактор — малый динамический диапазон T_a (от 20 до 4%) является крайне нежелательным. Уменьшение динамического диапазона T_a приводит (см. [3]) к искажению изображений, замыканию краев обрабатываемых изображений и т. п. Для компенсации этого нежелательного явления можно передаточную функцию линейной части устройства обработки сделать частотно зависимой, как это и рекомендовано в [3]. Строгое теоретическое обоснование этого вопроса станет предметом дальнейших исследований.

В заключение считаю своим долгом выразить благодарность Э. И. Кружицкому за полезные указания.

Литература

- [1] Р. Хелстром. Статистическая теория обнаружения сигналов. ИЛ, М., 1963.
- [2] I. Neblett. Photography, its materials and processes. N. Y., 1962.
- [3] А. Оппенгейм, Р. Шафер, Т. Стокман. ТИИЭР, № 8, 1968.
- [4] Ю. Н. Гороховский, В. П. Баранова. Свойство черно-белых фото-пленок. Изд. «Наука», М., 1970.
- [5] A. V. Lugt. IEEE Trans., IT-10, 139, 1964.
- [6] I. W. Goodman. J. Opt. Soc. Am., 57, 493, 1967.

Поступило в Редакцию 23 марта 1971 г.