

Ю. И. НЕФЕДОВ, канд. техн. наук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ. СООБЩЕНИЕ 3¹

Одной из главных задач, возникающих при разработке эффективных оптико-электронных систем пеленгации, является выделение полезного сигнала от искомого изучающего объекта на фоне неоднородных, нестационарных помех. К помехам (или шуму) можно отнести поступающие на вход системы оптические сигналы, отличающиеся от объекта пеленгации (цели) пространственно-временными, яркостными или частотными характеристиками. Возможности выделения объекта пеленгации на мешающем фоне за счет различий в распределении изучения по оптической частоте (длине волны) или интенсивности легче поддаются оценке в силу одномерности задач и поэтому они более изучены [1—4].

Выявить возможности селекции полезного сигнала по его пространственно-временным характеристикам значительно сложнее. Сложность этой задачи обусловлена большим разнообразием пространственно-временных характеристик объекта пеленгации и помех. Чтобы облегчить поиск структурно-функциональных особенностей пространственно-временных фильтров, многие исследователи стали заимствовать принципы организации нейронных структур зрительной системы тех животных, для которых задачи слежения и селекции цели являются жизненно необходимыми.

Особый интерес вызвали нейронные образования сетчатки глаза, получившие название детекторов направления движения (или детекторов направленного движения). Эти нейронные структуры выделяют объекты, движущиеся в определенном направлении, и, по мнению нейрофизиологов, являются датчиками координат в глазодвигательной системе слежения за целью [5]. Важными особенностями биологических пространственно-временных фильтров является их хорошая помехозащищенность, большое быстродействие и надежность. Высокое качество фильтрации обеспечивает жизнедеятельность животных (погоня за добычей, избавление от преследования) и, следовательно, их выживание в окружающей среде. Структуры биологических фильтров зрительной системы сформировались в процессе длительной эволюции животных и поэтому хорошо согласованы с пространственно-временными характеристиками цели и помех

¹ Сообщение 1, 2 см. «Проблемы бионики», вып. 14, 15.

Одним из основных факторов, препятствующих созданию эффективных нейроподобных пространственно-временных фильтров изображений, является недостаточная изученность нейронных структур зрительной системы методами математического моделирования. Математические методы исследования сложных систем, какими являются нейронные слоистые структуры зрительного анализатора, только начинают проникать в сферу биологии. В настоящее время методами математического моделирования исследованы лишь простейшие нейронные пространственно-временные фильтры. Предпринимались попытки математического описания отдельных нейронных структур, детектирующих движение и направление движения. Созданы разнообразные телевизионные модели таких структур. Рассмотрим, как решена задача обнаружения и выделения движущихся объектов.

Изотропное пространственно-временное дифференцирование. Нейронные структуры, названные детекторами движения (или детекторами движущегося края), осуществляют изотропное пространственно-временное дифференцирование изображений, и поэтому выделяют любые динамические изменения на изображениях. Идеализированную весовую функцию такого фильтра можно записать в виде соотношения

$$Q(x-x_0, y-y_0, t-t_0) = \delta(x-x_0, y-y_0) \delta'(t-t_0), \quad (1)$$

в котором пространственная компонента весовой функции $Q(x-x_0, y-y_0) = \delta(x-x_0, y-y_0)$ указывает на отсутствие пространственных связей между фоторецепторами, а временная компонента

$$Q(t-t_0) = \delta'(t-t_0), \quad (2)$$

равная первой производной δ -функции, обеспечивает выделение резких изменений освещенности во времени. Такие изменения могут возникать как при включении и выключении света, так и при перемещении световой границы.

Временной компонентой весовой функции детектора движения может быть не только первая производная δ -функции (2). Любая функция $Q^*(t-t_0)$, аппроксимирующая функцию (2), удовлетворяет условию $\int_{-\infty}^t Q^*(t-t_0) dt = 0$ при $t \rightarrow \infty$, которое обеспечивает выделение движущихся границ света на фоне неподвижных. Степень приближения функции, аппроксимирующей $\delta'(t-t_0)$, влияет на величину реакции и на длительность переходного процесса. В качестве примера аппроксимирующей функции можно привести весовую функцию модели детектора движения сетчатки лягушки [8]:

$$Q(x-x_0, y-y_0, t-t_0) = \delta(x-x_0, y-y_0) (\tau_2 - \tau_1)^{-2} \times \left\{ \tau_2^{-1} \exp \left[-\frac{t-t_0}{\tau_2(\tau_2 - \tau_1)} \right] - \tau_1^{-1} \exp \left[-\frac{t-t_0}{\tau_1(\tau_2 - \tau_1)} \right] \right\}. \quad (3)$$

В этом выражении τ_1 и τ_2 — постоянные времени инерции, соответствующие процессам возбуждения и торможения. Проведенные исследования реакций модели, определяемых из соотношения для пороговой операции свертки (см. сообщение 1), на различные возмущения показали, что величина реакции изменяется в зависимости от скорости движения границ света. При этом значения постоянных времени τ_1 и τ_2 и порога c определяют нижнюю и верхнюю границы скоростей движения возмущения, при которых реакция модели будет еще отлична от нуля. Следовательно, можно найти конкретные значения τ_1 , τ_2 , c , соответствующие заданному диапазону скоростей. Фильтр будет выделять лишь объекты, движущиеся с определенными скоростями, т. е. будет детектором скорости.

Построена телевизионная модель детектора движения с весовой функцией (3) [9]. Модель реагирует либо на включение света (если $\tau_2 > \tau_1$), либо на его выключение (если $\tau_2 < \tau_1$). Это обеспечивает селекцию движущихся объектов. В другой подобной телевизионной модели детектора движения [10] моделируются структуры сетчатки, реагирующие на включение-выключение света (*on-off*-реакции). Упрощенная блок-схема этой телевизионной системы приведена на рис. 1. Данная модель отличается от модели, рассмотренной в работе [9], лишь тем, что для воспроизведения *on-off*-реакций используется не один, а два сумматора и элемент, выполняющий логическую операцию «ИЛИ».

Свет, поступающий в двухвидиконную камеру (рис. 1), поровну распределяется между инерционным и безынерционным видеоканалами ($\tau_2 > \tau_1$). С выхода каждого видеоканала на входы сумматоров подаются сигналы разной полярности. В результате на выходе первого сумматора формируется сигнал, вызванный включением света при

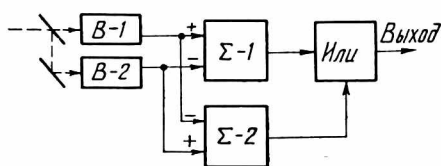


Рис. 1.

движении наблюдаемого объекта (*off*-реакция), а на выходе второго сумматора — сигнал, вызванный включением света (*on*-реакция). Элемент «ИЛИ» формирует из выходных сигналов сумматоров сигнал включения выключения света (*on-off*-реакцию). Подобную систему предполагают использовать в качестве датчиков на космических кораблях для сокращения избыточности визуальных сообщений, передаваемых из космоса, при мягкой посадке на Марс [10]. Сложность технической реализации рассмотренных телевизионных систем [9, 10] состоит в необходимости идентичного сопряжения изображений на мишенях двух видеоканалов и в использовании видеоканалов с одинаковыми характеристиками свет—сигнал, но с разными инерционностями.

Телевизионная модель детектора движения, рассмотренная в работе [11], лишена указанных выше недостатков. В модели применяется одна передающая трубка. Однако модель имеет ограниченное применение, так как предназначена для работы лишь с двупрадационными изображениями.

В работах [12, 18] рассмотрены методы выделения динамических изменений на изображении, основанные на получении межкадровой разности видеосигналов. Недостатком таких методов является необходимость запоминания телевизионного кадра, что приводит к заметному усложнению системы селекции.

Функции детектора движения может также выполнять дифференцирующая передающая телевизионная трубка [13]. Видеосигнал, полученный с помощью этой трубки, является функцией изменения яркости исходного изображения $u=f(B', B'')$, где B' , B'' — первая и вторая производные яркости элементарных участков изображения во времени. Следовательно, трубка воспроизводит только динамическую картину и не передает неподвижных и не изменяющих яркости участков изображений.

Предложен также способ детектирования движения на основе переключения световых и электрических режимов работы мишени специальной передающей телевизионной трубки [14]. Используемая трубка имеет сильно выраженный максимум функции, описывающей зависимость выходного сигнала u от освещенности E (рис. 2). Работа детектора движения включает три этапа. На первом этапе на мишени трубки создается потенциальный рельеф, соответствующий негативному изображению. При этом средняя освещенность определяется значением $E_1 > E_{\max}$ (см. рис. 2). Затем средняя освещенность дискретно изменяется до значения $E_2 < E_{\max}$. Экспозиция при среднем уровне освещенности E_2 создает на мишени потенциальный рельеф, соответствующий позитивному изображению. После этого происходит полное затемнение мишени на время одного кадра развертки. В течение этого времени происходит считывание накопленного за две экспозиции потенциального рельефа.

Если крутизна нарастающей и спадающей ветвей характеристики (рис. 2) одинакова по абсолютной величине, то считанный видеосигнал будет содержать информацию лишь о динамических изменениях, происшедших за время между двумя экспозициями. В реальных телевизионных трубках не выполняется условие равенства абсолютных значений крутизны нарастающей и спадающей ветвей характеристики $u=f(E)$. Поэтому на выходном изображении будут видны и неподвижные объекты. Это и является основным недостатком данного способа детектирования движения.

Простое телевизионное устройство, выделяющее движущиеся объекты, рассмотрено в работе [15]. Детектирование движения осуществляется в этом устройстве на мишени видикона. При накоплении потенциального рельефа к мишени видикона пооче-

редно прикладываются равные по величине, но противоположные по знаку постоянные напряжения. Поэтому каждый освещенный элемент мишени заряжается сначала положительно, а затем отрицательно. Если за все время накопления потенциального рельефа освещенность элементарного участка мишени не изменилась, то средний уровень потенциала данного участка будет равен нулю. В противном случае, когда происходит какое-либо изменение освещенности, уровень потенциала мишени будет отличаться от нуля. Следовательно, при разряде потенциального рельефа сканирующим электронным лучом видеосигнал будет возникать лишь во время коммутации участков мишени на которых изменилась освещенность. Если изменение освещенности вызвано перемещающимся относительно мишени видиконизлучающим объектом, то на экране приемной электронно-лучевой трубки появится изображение перемещающегося объекта.

В заключение следует указать, что в настоящее время разрабатываются радиолокационные и передающие телевизионные трубки, специально предназначенные для селекции подвижных объектов [16, 17].

Пространственно-временные интегрально-дифференциальные операции. Предпринимались попытки решения задачи выделения объектов, движущихся в определенном прямолинейном направлении. Нейронные структуры зрительной системы, выполняющие подобные функции, получили название детекторов направления движения (или направленного движения). У разных животных детекторы направления движения имеют специфические структурные и функциональные особенности. Этим и объясняется разнообразие существующих моделей детекторов. Рассмотрим, как решена задача селекции направления движения.

В работе [8] описаны математическая и телевизионные модели детектора направленного движения, обнаруженного в сетчатке суслика. Весовая функция моделей отражает пространственно-временные характеристики рецептивного поля с асимметричным расположением областей возбуждения и торможения (рис. 3) и записывается в виде соотношения

$$Q(x - x_0, y - y_0, t - t_0) = \tau_1^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) 1(r - |x - x_0|) \times \\ \times 1(r - |y - y_0|) - \tau_2^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) 1[(x - x_0) + r_1] 1[R - \\ - (x - x_0)] 1(R - |y - y_0|). \quad (4)$$

В этом выражении τ_1 и τ_2 — постоянные времени инерции возбуждения и торможения ($\tau_2 > \tau_1$); значения r , r_1 , R показаны на рис. 3, где знаком $+$ отмечена область возбуждения, а знаком $-$ — область торможения моделируемого рецептивного поля. С помощью пороговой операции свертки исследовались реакции модели на точечное возмущение, движущееся с постоянной скоростью

направлении, указанном стрелкой на рис. 5. На другие направления движения и на неподвижные объекты система не реагирует.

Другая телевизионная модель детектора направления движения рассмотрена в работе [22]. В этой модели осуществляется суммирование видеосигналов двух передающих трубок, имеющих разную инерционность. Работу системы можно пояснить

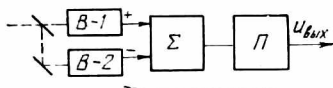


Рис. 4.

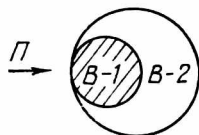


Рис. 5.

с помощью рисунков. Здесь показаны пятна (1 и 2) лучей двух видеоканалов и выходные сигналы сумматора видеосигналов и порогового устройства $u_{\text{вых}}$, формирующиеся при движении пятна света в направлениях, указанных стрелками. Как видно из приведенных рисунков, сигнал, превышающий уровень порога, возникает только при движении пятна света в «предпочтительном» направлении. Однако данная телевизионная система в отличие от рассмотренной ранее (рис. 4), будет реагировать на неподвижные объекты. В этом основной недостаток данной системы. Общие технические недостатки двух рассмотренных выше телевизионных систем такие же, как у двухвидиконных систем, детектирующих движение.

Селекцию направления движения можно осуществить другим методом, рассмотренным в работе [8]. Для этого необходимо запомнить траекторию движения пятна света на небольшом промежутке времени и просуммировать полученные сигналы в направлении перемещения. Интегральный сигнал, соответствующий данному направлению, может быть выделен при помощи порогового устройства. Идеализированную весовую функцию такого пространственно-временного фильтра можно записать в виде произведения δ -функции, заданной на отрезке прямой (или кривой) линии, и инерционного звена:

$$Q(x - x_0, y - y_0, t - t_0) = \tau^{-1} \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \delta[(x - x_0) \sin \alpha + (y - y_0) \cos \alpha] \cdot \left[\frac{a}{2} - |(x - x_0) \cos \alpha - (y - y_0) \sin \alpha| \right].$$

Здесь a — длина отрезка прямой; α — угол наклона прямой к оси абсцисс; τ — постоянная времени. Фильтр с данной весовой функцией реагирует на движение точечного возмущения в направлениях под углом α и углом $\alpha + \pi$. Способность одновременно детектирования двух противоположно направленных движений является главным функциональным отличием данной

фильтра от ранее рассмотренных. Другой важной особенностью подобных фильтров является возможность выделения объектов, движущихся по криволинейной траектории с заданной кривизной. Для этого следует изменить область пространственного интегрирования (т. е. изменить область задания δ -функции) в соотношении (6). Временная компонента весовой функции (6) не обеспечивает нечувствительности к неподвижным объектам. Если временную компоненту представить в виде разности двух инерционных звеньев

$$Q(t - t_0) = \tau_2^{-1} \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_2}\right) - \tau_1^{-1} \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_1}\right), \quad (7)$$

где $\tau_2 > \tau_1$, то такой пространственно-временной фильтр не будет реагировать на неподвижные объекты. Остальные функции фильтра не изменяются.

Методы технической реализации таких фильтров основаны на использовании инерционных телевизионных трубок и высокочастотных локальных микроразверток, обеспечивающих пространственное интегрирование, в сочетании с обычными строчно-кадровыми развертками [8, 19—21].

Пространственно-временной фильтр с весовой функцией (7) обладает невысокой угловой разрешающей способностью по направлениям движения. Такой фильтр будет реагировать не только на два противоположные направления движения, но и на движения в направлениях, близких к указанным. Угловую разрешающую способность фильтра можно значительно повысить, если использовать операцию двойного дифференцирования возмущения в направлении, ортогональном пространственному интегрированию [20, 21]:

$$Q(x - x_0, y - y_0, t - t_0) = \delta''[(x - x_0) \sin \alpha + (y - y_0) \cos \alpha] \times \\ \times 1 \left[\frac{a}{2} - |(x - x_0) \cos \alpha - (y - y_0) \sin \alpha| \right] \delta'(t - t_0). \quad (8)$$

Свертка данной весовой функции с возмущением обеспечивает двойное пространственное дифференцирование возмущения в направлении под углом α , пространственное интегрирование в ортогональном направлении и дифференцирование во времени. Фильтр с весовой функцией (8) выделяет небольшие пятна света, движущиеся в любом из двух противоположных направлений, обладает высокой угловой разрешающей способностью и не реагирует на неподвижные объекты. Данный фильтр может быть синтезирован из пространственного фильтра, детектирующего контуры прямолинейных световых границ определенной ориентации и детектора движения [8].

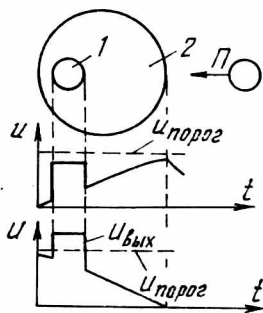


Рис. 6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криксунов Л. З., Усольцев И. Ф. Инфракрасные системы обнаружения, пеленгации и автоматического сопровождения движущихся объектов. М., «Сов. радио», 1968. 320 с.
2. Левшин В. Л. Пространственная фильтрация в оптических системах пеленгации. М., «Сов. радио», 1971. 200 с.
3. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М., «Сов. радио», 1967. 348 с.
4. Якушенко Ю. Г. Основы теории и расчета оптико-электронных приборов. М., «Сов. радио», 1971. 336 с.
5. Oyster C. W., Barlow H. B. Direction—selective units in rabbit retina: distribution of preferred directions. — «Sciens», 1971, vol. 155, № 3764, p. 841—842.
6. Детектирование движения в сетчатке глаза лягушки. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 5, Харьков. 1971, с. 30—37. Авт.: Ю. И. Зозуля, Ю. И. Нефедов, В. Г. Червов и др.
7. Морено-Диас Р. Математическая модель детектора насекомых в ганглиозной клетке сетчатки лягушки. — В кн.: Кибернетические проблемы бионики. Т. 1, М., «Мир», 1971, с. 201—227.
8. Нефедов Ю. И. Исследование принципов переработки информации в зрительной системе и их использование при построении телевизионных пространственно-временных фильтров изображений. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Харьков. 1971. 26 с.
9. Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Абдула В. Г. Телевизионная модель детектора движения. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 7. Харьков, 1971, с. 85—89.
10. Сутро Л. Л. Электронные модели глаза лягушки. — В кн.: Кибернетические проблемы бионики. Т. 2, М., «Мир», 1972, с. 291—298.
11. Кацалап С. Ф. Телевизионная модель детектора движения. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 12, Харьков, 1974, с. 129—136.
12. Полоник В. С. Телевизионные автоматические устройства. М., «Связь», 1974. 216 с.
13. Ахутин И. В. Преобразование оптических изображений дифференцирующей передающей телевизионной трубкой. — «Оптико-механическая промышленность», 1969, № 4, с. 18.
14. Катъс Г. П., Здор С. Е. Поисковое устройство. «Изобретения. промышленные образцы, товарные знаки». Авт. свид. № 312240, 1971, № 25.
15. Foote R. H. Moving target discriminator. Пат. США, № 3507992, 1970.
16. Masovskii A. Elektron. motion detector. Пат. США, № 3336585, 1967.
17. Jaggy L. S. Moving target indicator tube having rectifying barrier target electrode. Пат. США, № 3218505, 1965.
18. Eberhart E. H. Radar storage tube for indicating moving objects. Пат. США, № 3174071, 1965.
19. Нефедов Ю. И. Использование телевизионных систем для пространственно-временной фильтрации изображений. Сообщение 1. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 14, Харьков, 1975, с. 82—89.
20. Нефедов Ю. И. Использование телевизионных систем для пространственно-временной фильтрации изображений. Сообщение 2. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 15, Харьков, 1975, с. 130—140.
21. Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Исследование возможности анизотропного выделения контуров изображений в телевизионной передающей системе. — В кн.: Радиотехника. Вып. 11, Харьков, 1969, с. 170—176.
22. Коут А. Машинная интерпретация изображений на экране радиолокатора. — В кн.: Проблемы бионики. М., «Мир», 1965, с. 385—404.

Поступила 25 ноября 1975 г.