

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Под ред. Т. С. Хуанга. М.: Радио и связь, 1984. 224 с.
2. Андреев А. Л., Тоткайло С. В. Комплексная модель оптико-электронной системы наблюдения за точечными объектами // Сб. тр. VII Междунар. конф. „Прикладная оптика-2006“. Т. 1. Оптическое приборостроение. СПб, 2006. С. 48—52.
3. Андреев А. Л., Лбова Т. П. Разработка структуры комплексной модели оптико-электронной системы наблюдения за точечными объектами // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2009. № 5(63). С. 10—15.

Сведения об авторах

- Андрей Леонидович Андреев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: and-andr@yandex.ru
- Валерий Викторович Коротаев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; заведующий кафедрой; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Дмитрий Матвеевич Пашковский** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: natr1x@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
28.11.11 г.

УДК 621.391.161

Б. И. ШКУРСКИЙ

ОБНАРУЖЕНИЕ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕЛЕНГАТОРАХ

Рассмотрена процедура обнаружения сигнала в оптико-электронных пеленгаторах с тремя типами фотоприемных устройств. Выявлены условия эффективности оптимальных по отношению сигнал/(помеха+шум) линейных фильтров. Представлен эвристический алгоритм обнаружения цифрового сигнала в пеленгаторах с матричными фотоприемными устройствами.

Ключевые слова: оптико-электронный пеленгатор, оптимальный фильтр, отношение сигнал/(помеха+шум), эвристический алгоритм.

Цифровая обработка электрических сигналов в настоящее время широко применяется в оптико-электронных системах, в частности, в оптико-электронных пеленгаторах (ОЭП). Под выделением сигнала понимается выделение его из шумов фотодиэлектриков и помех, обнаружение и оценка его параметров (отношение сигнал/шум, угловые координаты и т.д.). Цифровой обработке сигналов посвящено достаточно много специальной литературы (см., например, [1]), облегчающей конструирование цифровых фильтров любых типов. Однако в ней, как правило, не затрагиваются некоторые вопросы, принципиальные для обработки сигналов в ОЭП:

- какие фильтры могут быть отнесены к оптимальным;
- как наилучшим образом выбрать параметры сигналов, подлежащих обработке;
- какие дополнительные процедуры обработки сигналов требуются.

В современных ОЭП могут применяться фотодетекторы трех типов:

1) одно-, многоэлементные фотоэлектрические приемники (ФЭП) или фотоприемные устройства (ФПУ) с предварительными усилителями для каждого фоточувствительного элемента (ФЧЭ) в сканирующих ОЭП (например, ФПУ производства ОАО „Сапфир“, Россия [2]);

2) многоэлементные ФЭП, экспонирующие излучение сцены в процессе ее сканирования и периодически „сбрасывающие“ результат, могут выполнять процедуру ВЗН („выборка—задержка—накопление“), сканирующие ОЭП (например, ФЭП Mercury фирмы Sofradir, Франция), ВЗН не используется;

3) многоэлементные „смотрящие“ (экспонирующие излучение сцены без сканирования) матрицы (например, матрица Mars фирмы Sofradir, Франция).

Приведем решение для оптимального по максимуму отношения сигнал/шум (μ) линейного фильтра для аддитивного (белого) шума: на обработку поступила последовательность отсчетов u_i ($1 \leq i \leq I$) реализации, в которой, возможно, содержится выборка s_k ($1 \leq k \leq K < I$) сигнала $s(t)$. Необходимо отыскать весовую функцию h_n ($1 \leq n \leq N$) линейного цифрового фильтра, выделяющего максимум μ .

Выходная реализация линейного фильтра:

$$U_m = \sum_{n=1}^N h_n u_{m-n+1}; \quad 1 \leq m \leq I - N + 1, \quad (1)$$

выходной сигнал в отсутствие шумов:

$$S_m = \sum_{n=1}^N h_n s_{m-n+1}. \quad (2)$$

Среднеквадратичный уровень шумов на выходе фильтра (в отсутствие сигнала):

$$D^2 = \left\langle \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N h_n h_l u_{m-n+1} u_{m-l+1} \right\rangle = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N h_n h_l M_{n-l}, \quad (3)$$

где M_{n-l} — симметричная матрица начальных моментов шума, как случайной функции времени (угловые скобки означают процедуру отыскания математического ожидания):

$$\mu = \left| \sum_{n=1}^N h_n s_{m-n} \right|^2 / \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N h_n h_l M_{n-l}. \quad (4)$$

Для случая белого шума с нулевой постоянной составляющей, когда $M_{n-l} = M_0 \delta_{n-l,0}$ ($\delta_{i,i'} = 1$ при $i = i'$, $\delta_{i,i'} = 0$ — иначе — символ Кронекера), формула для дисперсии шумов упрощается:

$$\sigma^2 = M_0 \sum_{n=1}^N h_n^2.$$

Для этого случая, опираясь на неравенство Шварца [3], получим весовую функцию \hat{h} оптимального фильтра и максимальное значение $\hat{\mu}$:

$$\hat{h}_n = s_{-n}, \quad \hat{\mu}_{\max} = \sum_{n=1}^N |s_n|^2 / \sigma^2. \quad (5)$$

Таким образом, приходим к обычному согласованному фильтру и $\mu_{\max} = 0$, так как $M_0 = \infty$. Этот парадокс имеет место при белом шуме и объясняется тем, что усреднение проведено по конечному числу отсчетов K , при этом полученное значение μ меньше, чем для любого аналогового полосового фильтра. Сигнал в рассматриваемом случае не всегда один и тот же, т. е. $s_n \neq s(n\tau)$, τ — шаг квантования реализации шумов, возможно, в смеси с сигналами.

лом, а $s_n = s(n\tau + \Delta t)$, $\Delta t \in \{\pm\tau/2\}$, распределение равномерное. Следует принимать во внимание случайный характер сигнала, а также учитывать параметры ФЭП или ФПУ, применяемых в ОЭП.

Случай 1. Применена линейка „несмотрящих“ ФЧЭ с индивидуальными предварительными усилителями и устройствами оцифровки выходных смесей шумов, помехи и, возможно, сигнала. Сканирование выполняется поперек линейки. Этот случай можно отнести к простейшим: постоянная составляющая фотоэлектрического сигнала, обязанная своим возникновением напряжению питания ФЧЭ, равномерному фону и излучению защитного окна, как и белый шум, во входной цифровой смеси отсутствуют, если предварительные усилители имеют полосовые фильтры. В этом случае оптимальный фильтр можно найти традиционным методом. При начальных центральных моментах с помощью автокорреляционной функции (АКФ) R_n шумов аналогично (4) получим:

$$\mu = \left| \sum_{n=1}^N h_n s_{m-n} \right|^2 / \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N h_n h_l R_{n-l}. \quad (6)$$

Значение μ_{\max} достигается при условии, вытекающем из неравенства Шварца:

$$s_{m-n} = \sum_{l=1}^N h_l R_{n-l}. \quad (7)$$

Из этой системы линейных уравнений находим весовую функцию \hat{h}_l оптимального цифрового фильтра, отсюда при некоторой задержке $m\tau$ входного сигнала

$$\hat{\mu} = \left| \sum_{n=1}^N \hat{h}_n s_{m-n} \right|_{\max\{m\}}. \quad (8)$$

Постоянная времени T инерционных звеньев выбирается с помощью моделирования. В результате выбора постоянной времени T инерционного звена и фиксации сдвига Δt выборки реализации относительно сигнала АКФ шумов становится функцией времени, а сигнал, весовая функция оптимального фильтра и μ — функцией T и Δt с критерием

$$\mu = [\hat{\mu}(T, \Delta t)]_{\min\{\Delta t\}} = \max\{T\}. \quad (9)$$

При многократном анализе сцены допустимы пропуски сигнала, чтобы область поиска минимума можно было ограничить, например, 90 % наиболее удачными (по $\hat{\mu}$) участками области изменения Δt и T .

Как правило, помехи определяют совокупные шумы ОЭП. Оптимальный цифровой фильтр рассчитывается с помощью системы уравнений (7) по расчетной АКФ фоновых помех и шумов.

Рассмотрим зависимость μ от шага выборки: чем выборка гуще, тем лучше. При уменьшении Δt и T происходит приближение к идеальному аналоговому фильтру.

Сказанное справедливо для объектов фиксированных размеров. При обнаружении объектов разного размера требуется несколько фильтров, позволяющих выбрать лучший по отношению сигнал/(помеха+шум) μ_n .

Случай 2. То же, что и случай 1, но ФЧЭ экспонирует сцену в процессе сканирования с периодическим „сбросом“ результата, возможно, с реализованной процедурой ВЗН. Главное отличие от случая 1 — дополнительная фильтрация невозможна (индивидуальных предварительных усилителей нет).

Фильтр с весовой функцией (см. (7)) и в этом случае оптимален.

Если шумовые компоненты отсчетов некоррелированы, применяется упрощенная процедура: пары соседних отсчетов взвешиваются со своими модулями, результаты суммируются.

В отличие от оптимального такой фильтр вместо самого сигнала использует его оценку и потому уступает оптимальному. Таким образом, в этом случае при отсутствии фоновых помех рекомендуется применять предельно короткие импульсы и следующую эвристическую процедуру их обработки:

$$U_m = (u_{m-1}|u_{m-1}| + u_m|u_m|) / (|u_{m-1}| + |u_m|). \quad (10)$$

Для защиты от фоновых помех, темновых и коммутационных шумов целесообразно применять алгоритмы, эквивалентные одно-двукратному дифференцированию:

$$U_{m+1} = \frac{(u_{m-1} - u_{m-2})|u_{m-1} - u_{m-2}| + (u_m - u_{m+1})|u_m - u_{m+1}|}{|u_{m-1} - u_{m-2}| + |u_m - u_{m+1}|}, \quad (11)$$

$$U_{m+1} = \{[u_{m-1} - (u_{m-2} + u_{m+1})/2]|u_{m-1} - (u_{m-2} + u_{m+1})/2| + [u_m - (u_{m-2} + u_{m+1})/2]|u_m - (u_{m-2} + u_{m+1})/2|\} / W; \quad (12)$$

$$W = |u_{m-1} - (u_{m-2} + u_{m+1})/2| + |u_m - (u_{m-2} + u_{m+1})/2|$$

другие подобные процедуры. Фильтры (11), (12) устраняют постоянную составляющую смеси фотоэлектрического сигнала, помех и шумов, поскольку среднее значение их весовых функций равно нулю.

Случай 3. Сигналы „смотрящей“ матрицы в значительной мере аналогичны сигналам в случае 2, но ужесточены требования к подавлению геометрических шумов. В работе [4] рекомендовано применять цифровой эквивалент череспериодных растров вдоль и поперек строк. Однако этот метод является неточным. Поскольку распределение энергии в изображении сигнала неизвестно, процедура выделения сигнала ограничивается определением разности отсчета и среднего значения отсчетов по фону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер, 2003. 604 с.
2. Московский завод „Сапфир“ [Электронный ресурс]: <www.mzsaphir.ru/viewpage.php?page.id=12>.
3. Корн Г. Д., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970. 720 с.
4. Якименко И. В., Гурченков Д. А. Пространственная фильтрация тепловых объектов с череспериодной компенсацией фона // Журнал радиоэлектроники. 2009. № 4.

Сведения об авторе

Борис Иванович Шкурский

— д-р техн. наук, профессор; „Урал-Геофизика“ ОАО «ПО „УОМЗ“», Москва; главный специалист; E-mail: lynx.s@bk.ru

Рекомендована кафедрой
ОАО «ПО „УОМЗ“»

Поступила в редакцию
24.01.11 г.