

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

Радиоэлектроника

ТОМ XII
10
1969

ИЗДАНИЕ
КИЕВСКОГО ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ИМЕНИ 50-ЛЕТИЯ ВЕЛИКОЙ
ОКТЯБРЬСКОЙ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ

2. Цыпкин Я. З., Критерии абсолютной устойчивости импульсных автоматических систем с монотонными характеристиками нелинейного элемента, Изв. АН СССР, 1964, 155, № 5, 1029.

3. Немировский М. С., Помехоустойчивость радиосвязи, Госэнергиздат, 1966.

4. Волков В. М., Логарифмические усилители, Изд-во «Советское радио», 1962.

Поступило в редакцию
25 III 1968 г.,
после переработки
8 XII 1968 г.

УДК 621.391.8

А. П. ТРИФОНОВ

ОБ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРА СИГНАЛА С ФЛЮКТУИРУЮЩЕЙ АМПЛИТУДОЙ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ПРИЕМЕ В НОРМАЛЬНОМ ШУМЕ

Пусть на вход оптимального приемного устройства в течение интервала времени $[0; T]$ поступает смесь сигнала и помех

$$y(t) = n(t) + m(t)s(t, l_0), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (1)$$

Здесь $n(t)$ — стационарный нормальный шум с нулевым средним значением и функцией корреляции $K(t_1, t_2)$; $s(t, l_0)$ — полезный сигнал, содержащий неизвестный параметр l_0 , подлежащий оценке; $m(t)$ — множитель, описывающий флюктуации амплитуды сигнала и являющийся стационарным нормальным случайным процессом, среднее значение которого равно a , а функция корреляции — $Q(t_1, t_2)$, причем

$$a^2 \gg Q(t, t), \quad (2)$$

т. е. значения $m(t) < 0$ маловероятны. Предполагается, что $n(t)$ и $m(t)$ независимы.

Из известных методов оценки параметров сигнала с практической и теоретической точек зрения наибольший интерес представляет оценка по методу максимума функции правдоподобия $L(l)$. При этом за истинное значение оцениваемого параметра принимается то его значение l_m , которое обращает функцию $L(l)$ в максимум. Обычно более удобным оказывается рассматривать вместо $L(l)$ член логарифма функции правдоподобия, зависящий от параметра l

$$M(l) = \ln L(l).$$

Следовательно, задача получения оценки оптимальной по методу максимума функции правдоподобия сводится к определению структуры оптимального приемного устройства, т. е. к определению выражения для $M(l)$ в явном виде и к определению качества оценки, а именно: среднего смещения и дисперсии оценки.

Поскольку входной сигнал (1) является нестационарным нормальным случайным процессом с функцией корреляции

$$B(t_1, t_2, l) = K(t_1, t_2) + s(t_1, l)s(t_2, l)Q(t_1, t_2) \quad (3)$$

и средним значением

$$A(t) = as(t, l), \quad (4)$$

можем записать выражение для n -мерной плотности распределения вероятностей процесса $y(t)$

$$W_n[y(t_1) \dots y(t_i) \dots y(t_n)] = [(2\pi)^n \det \|B\|]^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \|y - A\|^T \|B\|^{-1} \|y - A\| \right\}, \quad (5)$$

где, например, $\|B\|$ означает матрицу с элементами

$$B_{lk} = B(t_l, t_k, l),$$

а знак T означает транспонированную матрицу. Переходя в (5) к пределу при $t_{i+1} - t_i \rightarrow 0$ и $n \rightarrow \infty$ согласно [1], получаем функцию правдоподобия параметра l

$$L(l) = k \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T [y(t_1) - as(t_1, l)] [y(t_2) - as(t_2, l)] \Theta(t_1, t_2, l) dt_1 dt_2 - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T \int_0^l \frac{\partial B(t_1, t_2, l)}{\partial l} \cdot \Theta(t_1, t_2, l) dl dt_1 dt_2 \right\}, \quad (6)$$

где k — постоянная, независимая от параметра l , а $\Theta(t_1, t_2, l)$ решение уравнения

$$\int_0^T B(t_1, t, l) \Theta(t, t_2, l) dt = \delta(t_1 - t_2). \quad (7)$$

Теперь нетрудно получить выражение, определяющее структуру оптимального приемного устройства

$$M(l) = -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T [y(t_1) - as(t_1, l)] [y(t_2) - as(t_2, l)] \Theta(t_1, t_2, l) dt_1 dt_2 - \\ - \frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T \int_0^l \frac{\partial B(t_1, t_2, l)}{\partial l} \cdot \Theta(t_1, t_2, l) dl dt_1 dt_2. \quad (8)$$

Известно [2], что надежная оценка параметра сигнала методом функции правдоподобия может быть получена лишь при достаточно большом отношении сигнал/шум, т. е., когда максимум функции правдоподобия лежит вблизи истинного значения параметра. Предполагая в дальнейшем, что отношение сигнал/шум достаточно велико, определим среднее смещение

$$\langle \Delta l \rangle = \langle (l_m - l_0) \rangle, \quad (9)$$

и дисперсию оценки

$$\sigma^2(l) = \langle \Delta l^2 \rangle - [\langle \Delta l \rangle]^2, \quad (10)$$

угловые скобки означают усреднение по всевозможным реализациям $n(t)$ и $m(t)$.

Оценка, оптимальная по методу максимума функции правдоподобия определяется как решение уравнения

$$\left| \frac{\partial M(l)}{\partial l} \right|_{l_m} = 0. \quad (11)$$

Следовательно, разложив $M(l)$ в ряд Тейлора в окрестностях l_0 , получим

$$\left| \frac{\partial M(l)}{\partial l} \right|_{l_m} = \left| \frac{\partial M(l)}{\partial l} \right|_{l_0} + \left[\frac{\partial^2 M(l)}{\partial l^2} \right]_{l_0} (l_m - l_0) + \dots = 0. \quad (12)$$

Погрешность, возникающая за счет отбрасывания старших производных, приблизительно имеет величину, обратную квадрату отношения сигнал/шум. Из (12) имеем

$$\Delta l = - \frac{\left[\frac{\partial M(l)}{\partial l} \right]_{l_0}}{\left[\frac{\partial^2 M(l)}{\partial l^2} \right]_{l_0}} \quad (13)$$

и, следовательно,

$$\langle \Delta l \rangle = - \left\langle \frac{\left[\frac{\partial M(l)}{\partial l} \right]_{l_0}}{\left[\frac{\partial^2 M(l)}{\partial l^2} \right]_{l_0}} \right\rangle. \quad (14)$$

Рассмотрим подробнее величину, стоящую в знаменателе (14). Подставляя в (8) значения $y(t_1)$ и $y(t_2)$ из (1) и определяя затем дисперсии слагаемых в знаменателе (14), получаем, что мощность «сигнальной» составляющей

$$\left\{ a^2 \int_0^T \int_0^T \left[\frac{\partial s(t_1, l)}{\partial l} \cdot \frac{\partial s(t_2, l)}{\partial l} \cdot \Theta(t_1, t_2, l) \right]_{l_0} dt_1 dt_2 \right\}^2$$

будет значительно больше дисперсии остальных слагаемых в знаменателе (14), это следует из (2) и сделанного выше предположения о величине отношения сигнал/шум. Значит можем переписать (14) как

$$\langle \Delta l \rangle = - \frac{\left\langle \left[\frac{\partial M(l)}{\partial l} \right]_{l_0} \right\rangle}{a^2 \int_0^T \int_0^T \left[\frac{\partial s(t_1, l)}{\partial l} \cdot \frac{\partial s(t_2, l)}{\partial l} \cdot \Theta(t_1, t_2, l) \right]_{l_0} dt_1 dt_2}, \quad (15)$$

но

$$\left\langle \left[\frac{\partial M(l)}{\partial l} \right]_{l_0} \right\rangle = - \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial l} \int_0^T \int_0^T B(t_1, t_2, l) \cdot \Theta(t_1, t_2, l) dt_1 dt_2 \right]_{l_0}, \quad (16)$$

где $B(t_1, t_2, l)$ определяется из (3), а $\Theta(t_1, t_2, l)$ — из (7). Согласно (3), $B(t_1, t_2, l) = B(t_2, t_1, l)$ и значит, учитывая (7), имеем

$$\left\langle \left[\frac{\partial M(l)}{\partial l} \right]_{l_0} \right\rangle = - \frac{1}{2} \int_0^T \left[\frac{\partial}{\partial l} \int_0^T B(t_2, t_1, l) \Theta(t_1, t_2, l) dt_1 \right]_{l_0} dt_2 = 0. \quad (17)$$

Таким образом, оптимальная оценка параметра в первом приближении будет несмещенной

$$\langle \Delta l \rangle = 0. \quad (18)$$

Для определения дисперсии оценки необходимо вычислить второй момент (14). Однако из-за громоздкости выкладок ограничимся нахождением первого приближения дисперсии оценки. Как известно [2], в этом случае можно пользоваться формулой для дисперсии эффективной оценки, так как оценка по методу максимума функции правдоподобия является асимптотически эффективной.

Дисперсия эффективной оценки определяется формулой [3]

$$\sigma^2(l) = - \frac{1}{\left\langle \left[\frac{\partial^2 M(l)}{\partial l^2} \right]_{l_0} \right\rangle}, \quad (19)$$

учитывая (2), а так же, что рассматривается только случай больших отношений сигнал/шум, имеем

$$\sigma^2(l) = \frac{1}{a^2 \int_0^T \int_0^T \left[\frac{\partial s(t_1, l)}{\partial l} \cdot \frac{\partial s(t_2, l)}{\partial l} \cdot \Theta(t_1, t_2, l) \right]_{l_0} dt_1 dt_2}. \quad (20)$$

Полученные первые приближения для смещения (18) и дисперсии оценки (20) справедливы с точностью до величины, обратной отношению сигнал/шум.

Если $Q(t_1, t_2) = 0$, т. е. амплитуда сигнала постоянная, то, положив $a=1$, и считая, что энергия сигнала не зависит от конкретного значения параметра l , можем записать

$$\sigma^2(l) = - \frac{1}{\left[\frac{d^2 G(l)}{dl^2} \right]_{l_0}} \quad (21)$$

где

$$G(l) = \int_0^T s(t, l_0) V(t, l) dt,$$

а $V(t, l)$ решение уравнения

$$\int_0^T K(t_1, t_2) V(t_2, l) dt_2 = s(t_1, l), \quad 0 \leq t_1 \leq T.$$

Выражение (21) полностью совпадает с формулой для первого приближения дисперсии оценки неэнергетического параметра при приеме известного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакут П. А., Большаков И. А., Герасимов Б. М., Куриша А. А., Ребин В. Г., Тартаковский Г. П., Широков В. В., Вопросы статистической теории радиолокации, Изд-во «Советское радио» 1963, 1.

2. Куликов Е. И., Предельная точность оценки параметра сигнала при приеме в нормальном шуме, Радиотехника, 1962, 17, № 7, 3.

3. Крамер Г., Математические методы статистики, Изд-во ин. лит-ры, 1948.

Поступило в редакцию
5 IV 1968 г.

УДК 621.373.5

А. А. АЛЕКСАНИН, Ю. В. БАКИН, М. А. СИВЕРС

ТИРИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Высокие к.п.д. тиристорных генераторов [1, 2, 3] объясняются хорошими ключевыми свойствами тиристорных, малым внутренним сопротивлением в открытом состоянии и малой продолжительностью переходных процессов при переключении. При повышении частоты генераторов ключевые свойства тиристорных ухудшаются из-за того, что длительность переходных процессов при включении и выключении становится сравнимой со временем, в течение которого тиристоры находятся в открытом состоянии. Это приводит к увеличению коммутационных потерь и уменьшению к.п.д. генераторов.

Коммутационные потери при выключении определяются величиной обратного тока через тиристоры, длительность которого обычно не превышает нескольких микросекунд, и величиной обратного напряжения на тиристорах после окончания тока через них.

С целью уменьшения величины обратного тока тиристорных в генераторе последовательно с ними включаются высокочастотные диоды (рис. 1), имеющие время восстановления значительно меньшее времени восстановления тиристорных. При этом диоды пропускают прямой ток тиристорных и не пропускают обратный (рис. 2, а и б). Однако резкое уменьшение обратного тока приводит к увеличению времени восстановления