

92

Триггеров

92

РАДИОТЕХНИКА

1987, № 1

четов показывают, что зависимости ΔF_y от N являются линейными, начиная с некоторого количества экземпляров средств, а асимптотой для зависимостей $\Delta F_{пл}$ от N является прямая линия $\Delta F_{пл} = 100(N-1)$, соответствующая случаю $\gamma \leq 1$.

На рис. 3, 4 для различных значений параметров p и γ приведены зависимости выигрыша $\mu = \Delta F_{пл}/\Delta F_y$ от N . Анализ полученных зависимостей показывает, что выигрыш μ в требуемой полосе частот за счет централизованного адаптивного управле-

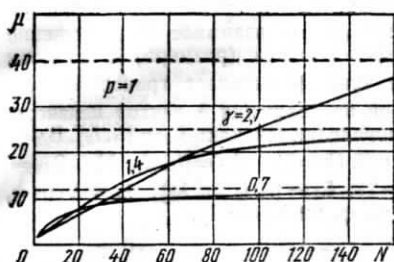


Рис. 3

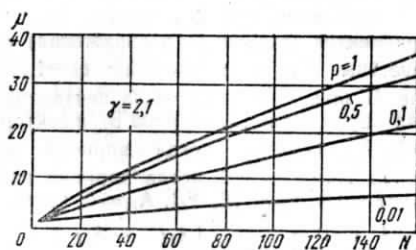


Рис. 4

ния частотами в изменяющейся радиообстановке возрастает с увеличением N , уменьшением радиуса взаимовлияния РЭС (с увеличением γ) и увеличением времени работы РЭС на излучение (p). Требуемая полоса при имеющих практический смысл значениях $N \approx 100$, $\gamma \approx 1...2$ и $p \approx 0,1...0,2$ снижается с 1...2 МГц до 100 кГц (получается выигрыш в 15...20 раз).

Предложенный алгоритм централизованного адаптивного управления использованием частот может быть применен для оценки потенциальных возможностей децентрализованного адаптивного управления частотами, которое с практической точки зрения наиболее целесообразно для пространственно-рассредоточенной группы РЭС.

Литература

1. Хэйл У. К. ТИИЭР, 1980, № 12.
2. Павлова В. А., Прусс Е. С., Рубинштейн Г. Р., Тигин Л. В. Труды НИИР, 1984, № 4.
3. Ермаков А. И., Соловьев В. В. Радиотехника, 1983, № 3.
4. Крамер Г. Математические методы статистики. — М.: Мир, 1975.

Поступила после доработки 26 июня 1986 г.

А. П. Трифонов, В. Б. Манелис

УДК 621.391

Квазиоптимальная оценка параметров сложного объекта по его изображению

Предложен квазиоптимальный алгоритм, реализация которого существенно проще, чем оптимального, показано, что с ростом отношения сигнал-шум для каждого фрагмента изображения точность квазиоптимальной оценки приближается к точности оптимальной.

Радиоизображения сложных объектов, формируемые системами с высоким разрешением, часто представляют собой совокупность относительно ярких неперекрывающихся участков (фрагментов) приблизительно одинаковой формы [1, 2 и др.]. В [3] рассмотрена задача оценки координат сложного изображения, состоящего из p одинаковых по форме неперекрывающихся фрагментов. Оптимальный алгоритм оценки, синтезированный в [3], требует длительного времени обработки и достаточно сложен для реализации. Действительно, при обработке изображения сложного объекта к трудностям осуществления значительного числа необходимых операций с входным двумерным массивом наблюдаемых данных [4], добавляются трудности, связанные с формированием в общем случае функции четырех переменных (две координаты, ракурс и масштаб) и определением положения ее абсолютного максимума.

Рассмотрим квазиоптимальный алгоритм оценки неизвестных параметров сложного изображения. Введем обозначения, аналогичные [3]: a_i — амплитуда (максимальная яркость) i -го фрагмента ($i = \overline{1, p}$); $f(x)$ — функция, описывающая распределение яркости одного фрагмента, причем $\max f(x) = 1$; $q_i = (q_{i1}, q_{i2})$ — вектор, опре-

деляющий местоположение i -го фрагмента в системе координат $x = (x_1, x_2)$, связанной с плоскостью регистрации. Аналогично [3] введем в рассмотрение декартову

систему координат $\xi = (\xi_1, \xi_2)$, начало которой расположено в точке $l = \sum_{i=1}^p q_i/p$.

В общем случае система координат ξ , жестко связанная с изображением, повернута на угол Φ (ракурс) относительно исходной системы координат в плоскости регистрации (рис. 1 в [3]).

Положим, что координаты (ξ_{1i}, ξ_{2i}) , характеризующие взаимное расположение фрагментов (структуру изображения) с точностью до масштаба (размера) λ , априори известны. При этом очевидно $q_i = L_h B_{ih}^+ + A_{ih}$, где знак $+$ означает транспонирование. В зависимости от числа неизвестных параметров изображения h вектор неизвестных параметров L_h , матрица B_{ih} и вектор-строка A_{ih} определяются как: $L_2 = [l_1, l_2]$, $B_{i2} = E$, $A_{i2} = \lambda \Phi + Y_i^+$ когда априори известны Φ и λ ($h=2$); $L_3 = [l_1, l_2, \lambda]$, $B_{i3} = [E, Y_i \Phi]$, $A_{i3} = 0$, когда априори известен Φ ($h=3$); $L_4 = [l_1, l_2, \lambda_c, \lambda_s]$, $A_{i4} = 0$, когда неизвестны ни Φ , ни λ ($h=4$), $\lambda_s = \lambda \sin \Phi$, $B_{i4} = [E, Y_i]$, $A_{i4} = 0$, когда неизвестны ни Φ , ни λ ($h=4$), $\lambda_c = \lambda \cos \Phi$.

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Y_i = \begin{bmatrix} \xi_{1i} & -\xi_{2i} \\ \xi_{2i} & \xi_{1i} \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} \cos \Phi \\ \sin \Phi \end{bmatrix}.$$

В рассматриваемом случае реализация наблюдаемых данных имеет вид $u(x) = \sum_{i=1}^p a_{i0} f(x - q_{i0}) + n(x)$, $x \in X$, где $n(x)$ — пространственный белый гауссовский шум с односторонней спектральной плотностью N_0 ; a_{i0} , q_{i0} — истинные значения параметров отдельных фрагментов изображения, X — область наблюдения.

Положим вначале, что амплитуды отдельных фрагментов априори известны. На первом этапе квазиоптимальная обработка реализации $u(x)$ аналогично косвенному методу в [3] сводится к формированию функции

$$M(q) = (2/N_0) \int_X u(x) f(x - q) dx \quad (1)$$

и определению положений q_{im} ее p наибольших максимумов. Величины q_{im} ($i = \overline{1, p}$) представляют собой оценки максимального правдоподобия (ОМП) координат отдельных фрагментов изображения сложного объекта.

Пусть отношение сигнал-шум для каждого фрагмента изображения достаточно велико, т. е.

$$z_i^2 = (a_{i0}^2/N_0) \int_X f^2(x) dx \gg 1, \quad i = \overline{1, p}. \quad (2)$$

Тогда, используя [5], получаем выражение для корреляционной матрицы оценок неизвестных координат i -го фрагмента $K_i(q_{im}) = z_i^{-2} I^{-1}$, где

$$I = [I_{kn}] = \left[\int_X \left[\partial f(x)/\partial x_k \right] \left[\partial f(x)/\partial x_n \right] dx / \int_X f^2(x) dx \right], \quad k, n = \overline{1, 2}.$$

Оценки q_{im} можно применять в качестве исходной дискретной асимптотически достаточной статистики для построения на ее основе ОМП $\hat{L}_h$ неизвестных параметров сложного объекта. При этом оптимальное использование оценок q_{im} , $i = \overline{1, p}$, сводится к вычислению функции правдоподобия $W(q_{im}, i = \overline{1, p} | L_h)$ и определению положения $\hat{L}_h$ ее абсолютного максимума [5]. Так как фрагменты изображения предполагаются неперекрывающимися, то оценки q_{im} статистически независимы. Кроме того, в силу (2) q_{im} — асимптотически гауссовские случайные величины. Поэтому, отбрасывая несущественные постоянные слагаемые, для логарифма функции правдоподобия можно записать

$$M(L_h) = - \sum_{i=1}^p z_i^2 Q_{ih}/2, \quad Q_{ih} = (q_{im} - A_{ih} - L_h B_{ih}^+) I (q_{im} - A_{ih} - L_h B_{ih}^+)^+. \quad (3)$$

Приравняв нулю производную (3) по вектор-строке L_h и решая полученную систему уравнений правдоподобия, находим явный вид ОМП неизвестных параметров сложного объекта

$$\hat{L}_h = \left[\sum_{i=1}^p z_i^2 (q_{im} - A_{ih}) B_{ih} \right] \left[\sum_{i=1}^p z_i^2 B_{ih}^+ B_{ih} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Полученные оценки $\hat{L}_h$ несмещенные и обладают корреляционной матрицей

$$K(\hat{L}_h) = \left(\sum_{i=1}^p z_i^2 B_{ih}^+ B_{ih} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Используя (5), нетрудно определить рассеяние оценки местоположения сложного объекта, которое при выполнении (2) совпадает с найденным в [3] рассеянием оптимальной оценки.

Положим теперь, что априори известен масштаб изображения λ , а ракурс φ неизвестен, так что $L = [l_1, l_2, \varphi]$. В этом случае система уравнений правдоподобия оказывается нелинейной, и использовать формулу (4) нельзя.

Запишем аналогично (3) логарифм функции правдоподобия и решим соответствующую нелинейную систему уравнений правдоподобия. Тогда получим оценки

$$\begin{aligned} \hat{l}_1 &= q_{1m} - \lambda (\eta_1 \cos \hat{\varphi} - \eta_2 \sin \hat{\varphi}), \quad \hat{l}_2 = q_{2m} - \lambda (\eta_1 \sin \hat{\varphi} + \\ &+ \eta_2 \cos \hat{\varphi}), \quad \hat{\varphi} = \arctg \frac{\tau_{11} - \eta_1 q_{2m} - \tau_{21} + \eta_2 q_{1m}}{\tau_{11} - \eta_1 q_{1m} + \tau_{22} - \eta_2 q_{2m}}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{где } \eta_k = \sum_{i=1}^p \tilde{z}_i^2 \xi_{ki}, \quad q_{km} = \sum_{i=1}^p \tilde{z}_i^2 q_{kim}, \quad \eta_{kn} = \sum_{i=1}^p \tilde{z}_i^2 \xi_{ki} \xi_{ni},$$

$$\tau_{kn} = \sum_{i=1}^p \tilde{z}_i^2 \xi_{ki} q_{nim} \quad (k, n = \overline{1, 2}), \quad \tilde{z}_i^2 = z_i^2 / z^2, \quad z^2 = \sum_{i=1}^p z_i^2.$$

При выполнении (2) рассеяние оценки (6) местоположения сложного объекта также совпадает с рассеянием оптимальной оценки, найденным в [3].

Таким образом, когда отношение сигнал-шум для каждого фрагмента изображения сложного объекта велико (2), квазиоптимальный алгоритм (1), (4), (6) обеспечивает потенциальную точность оценки координат сложного объекта. Однако если для части фрагментов изображения условие (2) не выполняется, то необходимо пользоваться более сложным с точки зрения практической реализации оптимальным алгоритмом оценки [3].

В ряде задач обработки изображений сложных объектов представляет интерес определение не только местоположения объекта, но также его масштаба λ и ракурса φ . При априори известном ракурсе оценка масштаба определяется из (4), где следует взять $h=3$. Если априори известен масштаб, то оценка ракурса находится из (6). Если неизвестны ни масштаб, ни ракурс изображения объекта, их оценки

имеют вид: $\hat{\lambda} = \sqrt{\hat{\lambda}_c^2 + \hat{\lambda}_s^2}$, $\hat{\varphi} = \arctg(\hat{\lambda}_s / \hat{\lambda}_c)$, где $\hat{\lambda}_c$ и $\hat{\lambda}_s$ определяются из (4) при $h=4$. Дисперсии оценок масштаба и ракурса можно найти из (5) и (6). Ограничимся рассмотрением изображения, состоящего из осесимметричных фрагментов [3, 6]. Тогда $l_{11} = l_{22} = l$, $l_{12} = 0$, а дисперсии совместных и отдельных оценок масштаба и ракурса совпадают и имеют вид $D(\hat{\lambda}) = [l z^2 (\eta_{11} + \eta_{22} - \eta_1^2 - \eta_2^2)]^{-1}$, $D(\hat{\varphi}) = [l z^2 \lambda_0^2 (\eta_{11} + \eta_{22} - \eta_1^2 - \eta_2^2)]^{-1}$. Таким образом, незнание масштаба не ухудшает точности оценки ракурса, а незнание ракурса не снижает точности оценки масштаба изображения сложного объекта.

Положим, что амплитуды отдельных фрагментов априори неизвестны. Тогда на первом этапе квазиоптимальной обработки необходимо определять как положения q_{im} , так и величины $M(q_{im})$ для p наибольших максимумов функции (1). При этом ОМП неизвестных амплитуд фрагментов получим в виде [5]: $a_{im} = M(q_{im}) / z_0^2$, $i = \overline{1, p}$, где z_0^2 — отношение сигнал-шум для фрагмента с единичной амплитудой. Оценки положений q_{im} и амплитуд a_{im} отдельных фрагментов используем в качестве исходной асимптотически достаточной статистики для построения

на ее основе ОМП $\tilde{L}_h$ неизвестных параметров сложного объекта. Для этого запишем функцию правдоподобия $W(q_{im}, a_{im} | L_h, a_i, i = \overline{1, p})$ и максимизируем ее по неинформативным параметрам a_i , $i = \overline{1, p}$ [5]. В результате искомая оценка $\tilde{L}_h$ будет определяться как положение абсолютного максимума функции

$$\tilde{M}(L_h) = \sum_{i=1}^p (z_{im}^2 T_{ih} + 4 \ln T_{ih}), \quad T_{ih} = \left[1 + \sqrt{1 + 8(Q_{ih} + 1) / z_{im}^2} \right] / 2(Q_{ih} + 1), \quad (7)$$

где

$$z_{im}^2 = z_0^2 a_{im}^2 = M^2(q_{im}) / z_0^2. \quad (8)$$

Используя (3), находим, что $\langle Q_{ih} \rangle = 2/z_i^2$, $\langle Q_{ih}^2 \rangle = 8/z_i^4$, при $L_h = L_{oh}$ — истинному значению неизвестных параметров объекта. Учитывая условие (2), можно считать,

что с вероятностью, близкой к единице, $Q_{ih} \ll 1$, а $z_{im}^2 \gg 1$. Беря эти неравенства, разложим (7) в ряд по степеням Q_{ih} . Отбрасывая затем члены, содержащие Q_{ih} в степени выше первой, приходим к формуле (3), в которой надо заменить истинные значения отношений сигнал-шум z_i^2 на их оценки z_{im}^2 (8). Следовательно, при априори неизвестных амплитудах отдельных фрагментов оценки $\tilde{L}_h$ параметров сложного объекта также определяются из (4), (6). Необходимо только в эти выражения вместо z_i^2 подставить z_{im}^2 (8).

Анализ точности оценок $\tilde{L}_h$ показал, что при выполнении условия (2) их характеристики совпадают с характеристиками оценок $\hat{L}_h$, а значит и с характеристиками оптимальных оценок [3].

Таким образом, предложенный квазиоптимальный алгоритм оценки неизвестных пространственных параметров сложного объекта при выполнении условия (2) обеспечивает потенциально достижимую точность оценивания при априори известных и неизвестных амплитудах отдельных фрагментов изображения. В этом случае необходимые оценки можно получить достаточно просто после определения положений и величин p наибольших максимумов функции двух переменных (1) по формулам (4), (6), (8). Применение же оптимального алгоритма [3] требует, кроме осуществления значительного числа операций с двумерным массивом входных данных, формирования функции h переменных и определения положения ее абсолютного максимума ($h=2, 3, 4$).

Литература

1. Черняк В. С. Радиотехника и электроника, 1979, т. 24, № 12.
2. Розенфельд А., Дейвис Л. С. ТИИЭР, 1979, т. 67, № 5.
3. Трифонов А. П., Манелис В. Б. Радиотехника, 1985, № 10.
4. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений.— М.: Сов. радио, 1979.
5. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех.— М.: Сов. радио, 1978.
6. Трифонов А. П., Зюльков А. В., Маршаков В. К. Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника, 1981, № 1.

Поступила 4 мая 1986 г.

А. М. Мовшович

УДК 621.391.83

Цифровая демодуляция ЧМ сигнала

Рассмотрен алгоритм частотной демодуляции, основанный на использовании дискретного преобразования Гильберта; даны рекомендации по оптимизации параметров частотного демодулятора.

Исследование путей построения частотных демодуляторов (ЧД), использующих методы цифровой обработки сигнала (ЦОС), является актуальным для многих конкретных приложений. Наибольший интерес представляет разработка алгоритма частотной демодуляции, позволяющего оптимизировать структуру ЧД при минимальном числе допущений. Поэтому важно обоснование выбора алгоритма частотной демодуляции сигнала при требуемой точности демодуляции и возможность его практической реализации в реальном масштабе времени.

Известно большое число технических решений, позволяющих осуществить частотную демодуляцию сигнала методами ЦОС [1—3]. Однако все они основываются на допущениях постоянства амплитуды, малой девиации частоты и т. п., и поэтому не могут эффективно использоваться на практике. Наиболее общий подход, позволяющий синтезировать алгоритм ЦОС лишь при условиях применимости теоремы Котельникова, заключается в использовании преобразования Гильберта [4].

Допустим, что на вход ЧД 1 (рис. 1) поступает аналоговый частотно-модулированный сигнал $s(t)$, который после преобразования во входном аналого-цифровом преобразователе 2 с периодом дискретизации T поступает на вход вычислителя 3 и далее в цифроаналоговый преобразователь 4.

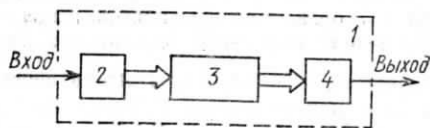


Рис. 1