где оценка выходного продукта адаптивной фильтрации $y(k) = W^{\text{т}}(k)\, X(k)$; $LMN \times LMN$ матрицы

$$P = \left[I - \frac{N}{N-1} C (C^{\text{т}}C)^{-1} C^{\text{т}} - \frac{L}{L-1} D (D^{\text{т}}D)^{-1} D^{\text{т}} \right],$$

$$Z = \left[\frac{N}{N-1} C (C^{\text{т}}C)^{-1} C^{\text{т}} D (D^{\text{т}}D)^{-1} D^{\text{т}} + \frac{L}{L-1} D \times \right.$$
$$\left. \times (D^{\text{т}}D)^{-1} D^{\text{т}} C (C^{\text{т}}C)^{-1} C^{\text{т}} \right];$$

LMN-мерные векторы $S = \frac{N}{N-1} C (C^{\text{т}}C)^{-1} F$; $T = \frac{L}{L-1} D (D^{\text{т}}D)^{-1} H$.

1. *Фрост III.* Алгоритм линейно ограниченной обработки сигналов в адаптивной решетке.— ТИИЭР, 1972, т. 60, с. 5—16.

Поступила в редколлегию 28.09.82

УДК 621.384.326

Ю. Н. БОНДАРЕНКО, ст. науч. сотр.

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Пироэлектрические преобразователи (ПЭП) в радиочастотном диапазоне используются для измерения импульсной мощности [2] и описываются вольт-ваттной передаточной функцией [1]

$$G(p) = \frac{p\tau_{\text{т}} K}{(1 + p\tau_{\text{т}})(1 + p\tau_l)(1 + \sqrt{pH}},$$

где $K = \gamma R_{\text{н}} \mid c_{\text{кр}} \rho_{\text{кр}} d_{\text{кр}}$ — коэффициент преобразования по напряжению; γ — пироэлектрический коэффициент; $R_{\text{н}}$, $c_{\text{кр}}$, $\rho_{\text{кр}}$, $d_{\text{кр}}$ — сопротивление нагрузки, удельная теплоемкость, плотность, толщина пироактивного кристалла; $\tau_{\text{т}}$, τ_e — тепловая и электрическая постоянные времени; $H = c_{\text{н}} \rho_{\text{н}} d_{\text{н}}^2 / \lambda_{\text{кр}}$ — фактор тепловой инерционности; $c_{\text{н}}$, $\rho_{\text{н}}$, $d_{\text{н}}$ — удельная теплоемкость, плотность, толщина нагревателя; $\lambda_{\text{кр}}$ — коэффициент теплопроводности пироэлектрика.

При использовании ПЭП в качестве измерительного преобразователя импульсной мощности измеряемой величиной является значение выходного напряжения в момент $t_{\text{изм}}$, который определяется требуемой точностью воспроизведения амплитудного значения.

Рассмотрим характер установления выходного напряжения при поглощении чувствительным элементом преобразователя мощности в виде единичной функции. Для этого определим переходную характеристику пироэлектрического преобразователя как $h(t) = L^{-1}\left[\frac{G(p)}{p}\right] = L^{-1}[H(p)]$. Представим $H(p)$ в виде простых дробей $H(p) = \frac{C_1}{\left(p + \frac{1}{\tau_{\text{т}}}\right)(1 + \sqrt{pH})} - \frac{C_2}{\left(p + \frac{1}{\tau_l}\right)(1 + \sqrt{pH})}$ и определим обратное преобразование Лапласа для выражения

$$\frac{C}{\left(p+\frac{1}{\tau}\right)(1+\sqrt{pH})} \doteq \frac{C}{1+\frac{H}{\tau}}\left[e^{-t/\tau}+\sqrt{\frac{H}{\tau}}f\left(\frac{t}{\tau}\right)-g\left(\frac{t}{H}\right)\right], \quad (1)$$

где $f(x) = e^{-x}Erfi(\sqrt{x})$ и $g(x) = e^{x}Erfe(\sqrt{x})$ — табулированные функции [3].

Учитывая выражение (1) и выполнение условия $\tau_т \gg H$, имеющего место в реальных конструкциях, после несложных алгебраических преобразований получим выражение переходной характеристики для ПЭП с резистивным покрытием (нагревателем) на поверхности чувствительного элемента

$$h(t) = \frac{K\tau_т}{\tau_т-\tau_e}\left\{e^{-t/\tau_т} - \frac{1}{1+\frac{H}{\tau_e}}\left[e^{-t/\tau_e}+\sqrt{\frac{H}{\tau_e}}f\left(\frac{t}{\tau_e}\right)- \right.\right.$$

$$\left.\left.-\frac{1}{1+\frac{\tau_e}{H}}g\left(\frac{t}{H}\right)\right]\right\} \quad (2)$$

Из равенства (2) следует, что форма установления выходного напряжения определяется как значениями величин τ_e и H, так и их соотношением. При условии, когда электрическая постоянная времени τ_e намного меньше фактора тепловой инерционности H, т. е. $H/\tau_e \gg 1$, выражение (2) упрощается

$$h(t) = \frac{K\tau_т}{\tau_т-\tau_e}[e^{-t/\tau_т} - e^{-t/\tau_e}].$$

В этом случае переходная характеристика ПЭП описывается разностью двух экспонент. При $\tau_т \gg \tau_e$ время установления, определяемое по уровню 0,9 h_{max}, равно $t_y = 2{,}3\tau_e$, а максимальное значение достигается при $t_{max} = -\tau_e \ln(\tau_e/\tau_т)$. После достижения максимума функция $h(t)$ спадает по экспоненте, определяемой постоянной времени $\tau_т$. При условии $H/\tau_e \gg 1$ выражение (2) принимает вид

$$h(t) = \frac{KT_т}{\tau_т-\tau_e}\left[e^{-t/\tau_т} - g\left(\frac{t}{H}\right)\right].$$

Так как выполняются условия $\tau_т \gg H$, то время установления в этом случае $t_y = 30\ H$. Если за отсчетный уровень принять значение 0,99 h_{max}, то время, за которое достигается это значение, — $t\ 0{,}99 = H \cdot 10^3$ с.

Оценим предельно достижимое быстродействие ПЭП, использующего металлические пленки как нагревательные элементы. Электрическая постоянная τ_e принципиально может быть получена сколь угодно малой. Фактор тепловой инерционности H пропорционален квадрату толщины нагревателя и обратно пропорционален коэффициенту теплопроводности пироэлектрика, значение которого для лучших материалов составляет $4 \div 5$ [$Вт \cdot м^{-1} \cdot K^{-1}$]. Толщина нагревателя ограничена технологией получения тонких резистивных пленок и составляет $d_н \approx 4 \cdot 10^{-9}$ м, что обусловливает минимальное достижимое значение $H = 1 \div 2 \cdot 10^{-9}$ с.

Таким образом, проведенные теоретические исследования показали, что минимальная длительность импульсов, которая может быть воспроизведена ПЭП с точностью $1 \div 5$ %, составляет $1 \div 0,2$ мкс.

1. *Бондаренко Ю. Н., Берегов А. С.* Анализ функционального элемента на основе пироэлектрического эффекта в сегнетоэлектриках. — Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, 1979, XXII, № 7, с. 37. 2. *Ключник И. И.* Пироэлектрический преобразователь пиковой мощности СВЧ. — Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, 1981, XXIV, № 1, с. 81—82. 3. *Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф.* Специальные функции. М.: Наука, 1977. 342 с.

Поступила в редколлегию 02.09.82

УДК 621.396.677

В. Е. БОЧАРОВ, асп.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРА СХОДИМОСТИ АЛГОРИТМА С ЛИНЕЙНЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ

Сравним условия выбора параметра сходимости алгоритмов адаптивной фильтрации широкополосных процессов по критерию минимума среднего квадрата ошибки во временной области — Гриффитса и с линейным ограничением (ЛО) [1, 3]. Оба алгоритма, используя метод наискорейшего спуска, при прочих равных условиях могут обеспечить одинаковые асимптотические оценки результатов фильтрации, и для реализации нуждаются в примерно равных аппаратно-вычислительных затратах.

Одним из определяющих отличий алгоритма с ЛО [3] является инвариантность частотной характеристики фильтра в заданном направлении при изменении помеховой обстановки.

Выходной продукт фильтрации y в этих алгоритмах определяется зависимостью $y(n) = W^{т}(n)X(n)$, а итеративная процедура вычисления вектора весовых коэффициентов W на $n+1$ итерации определяется в алгоритме [1]

$$W(n+1) = W(n) + \mu [N - RW(n)], \tag{1}$$

в алгоритме с ЛО [3]

$$W(n+1) = P[W(n) - \mu RW(n)] + F, \tag{2}$$

где $X(n)$ — вектор отсчетов входного процесса; R — ковариационная матрица входного процесса в узлах трансверсального фильтра; N — вектор взаимной корреляционной функции входного и опорного сигналов; P — матрица, проектирующая градиент выходной мощности по весовым коэффициентам на подпространство ограничений [3]; F — вектор линейных ограничений; μ — параметр сходимости; т — знак транспонирования.

Для алгоритма с ЛО, учитывая то, что матрица P идемпотентна (т. е. $P^2 — P$) и тождество $PF \equiv 0$, можно представить итеративную процедуру определения весовых коэффициентов (2) зависимостью

$$W(n+1) = W(n) - \mu [PRF + PRPW(n)]. \tag{3}$$