

ОПТИМАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОНА—ИНДИКАТОРА ФАЗЫ

Э. С. БУРУНСУЗЯН, С. Г. ХАЛПАХЧЯН

Выявляется оптимальный режим работы параметрона—индикатора фазы слабого сигнала.

Как было впервые показано в работах Ахманова и др. [1—3], для обнаружения (индикации фазы) слабого сигнала, сильно замаскированного шумом, может быть использован многократно возбуждаемый двоичный параметрон. Входная смесь сигнала с шумом обуславливает одну из двух возможных противоположных фаз выходных импульсов параметрона. В их последовательности и содержится информация о сигнале, которая выявляется последующей статистической обработкой.

Дальнейшие исследования, как теоретические, так и экспериментальные (напр., [4—9]), в основном, направлены на выявление оптимальных режимов работы параметрона и методов статистической обработки, при которых его применение наиболее эффективно.

В настоящей работе выявляется режим работы параметрона, при котором частота появления выходных импульсов, несущих информацию о сигнале, максимальна. Исследование выполняется лишь при использовании закона распределения выявленного компонента входной смеси, возбуждающего параметрон. Ранее же [1—4, 6] использовался закон распределения фазы входной смеси.

Режим параметрона определяется добротностью его контура Q и интервалом квантования t_k , который удобно представить в безразмерных единицах $\tau_k = \omega t_k$ (ω — круговая частота сигнала). Интервал квантования состоит из длительности регенерации параметрона τ_p (длительности импульса накачки) и промежутка времени τ_r , необходимого для измерения значения фазы возбужденного колебания и его гашения, $\tau_k = \tau_p + \tau_r$. Промежуток τ_r , как показано в работе [8], оказывается соизмеримым с 2—3 периодами сигнальной частоты $f_c = \frac{\omega}{2\pi}$. Поскольку $\tau_r = 12 \div 18 = \text{const}$, выбор τ_k сводится к выбору τ_p . Выбор же τ_p связан с длительностью процесса возбуждения субгармоники.

Этот процесс описывается так называемыми укороченными дифференциальными уравнениями. Для последовательного колебательного контура с нелинейной емкостью $C = C_0 \sqrt{\varphi/\varphi + E}$ (E — смещение на диоде, φ — контактная разность потенциалов) запятого резкого p - n -перехода, настроенного на частоту сигнала $\omega = 1/\sqrt{LC}$, они имеют следующий вид (см. [9]):

$$\frac{da}{dt} = -a \frac{\omega X}{24} \left[\frac{12}{QX} + \cos(2v - v_n) \right], \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\omega X}{24} \left[\frac{3}{Q^2 X} + \frac{5}{2X} a^2 - \sin(2v - v_n) \right]. \quad (2)$$

В (1) и (2) использованы обозначения: $X = V/\varphi + E$, $a = q/2 C(\varphi + E)$, $q = 2 C_0 \sqrt{\varphi [V\varphi + E + u - V\varphi + E]}$, V и v_n — амплитуда и фаза напряжения накачки, включаемой в контур, u — переменное напряжение на нелинейной емкости, a и v — амплитуда и фаза возбуждаемой субгармоники.

Возбуждение параметрона обусловлено наличием во входном колебании составляющей с фазой $v_c = \frac{1}{2} [v_n + (2k+1)\pi]$, где $k=0, 1, \dots$, для которой скорость роста амплитуды максимальна (a' — тах, см. (1)), т. е. с фазой, наиболее благоприятной (оптимальной) для параметрического возбуждения. Для второй квадратурной составляющей с фазой, сдвинутой на $\frac{\pi}{2}$ относительно v_c , a' минимальна, поэтому она значительно ослабляется и в процессе параметрического возбуждения не участвует. Следовательно, далее ее можно не учитывать. Таким образом, начальной является амплитуда возбуждающего параметрон компонента. Фаза его v_c жестко связана с фазой накачки.

На рис. 1 приведены решения укороченных уравнений, полученные численным расчетом на ЦВМ Наир-2. По оси абсцисс отложено безразмерное время $\tau = \omega t$. Индекс 1 соответствует значению параметра $QX=60$, а индекс 2 — $QX=30$. Фазы накачки подобраны так, чтобы установив-

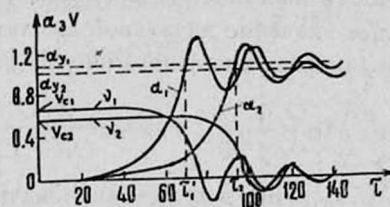


Рис. 1.

шиеся значения фазы субгармоник были бы равны нулю. Начальная амплитуда возбуждающего параметрон компонента для обоих случаев взята равной $a_n = 10^{-3}$.

Система уравнений (1) и (2) строго не решается, однако необходимое для дальнейшего анализа аналитическое выражение длительности возбуждения параметрона в хорошем приближении можно найти, используя особенности характера возбуждения. Из рис. 1 видно, что в интервале $0 \leq \tau \leq \tau'$ фаза субгармоники отклоняется незначительно от значения v_c , причем в течение последнего небольшого промежутка времени. Это обстоятельство позволяет приближенно считать фазу постоянной и равной v_c на всем интервале возбуждения до достижения амплитудой значения $a_k \leq a_y$. При $v = v_c = \text{const}$ уравнение (1) решается элементарно

$$a = a_n \exp \left[\frac{\omega X}{24} \left(1 - \frac{12}{QX} \right) t \right],$$

и, следовательно, длительность возбуждения определяется выражением

$$\tau_b = \frac{24 Q}{QX - 12} \ln \frac{a_k}{a_n}. \quad (3)$$

Справедливость формулы подтверждается тем, что по данным машинного расчета (рис. 1) $\tau'_1 \approx 71$ и $\tau'_2 \approx 96$, а по формуле (3) $\tau'_1 \approx 70,7$ и $\tau'_2 \approx 94$.

Начальная амплитуда a_n (амплитуда возбуждающего параметрон колебания) есть случайная величина и, следовательно, длительность возбуждения τ_b от импульса к импульсу меняется. Фаза возбужденного импульса может быть зарегистрирована только в случае $\tau_b < \tau_p$, так как только в этом случае амплитуда успевает дорасти до заранее установленного уровня a_k . Следовательно, увеличивая τ_p , мы будем получать все больший и больший процент регистрируемых импульсов, дающих информацию о сигнале, однако общее количество импульсов, несущих информацию, будет уменьшаться, так как при этом увеличивается интервал квантования.

В такой ситуации целесообразно обеспечение максимума частоты следования импульсов, несущих информацию о фазе, которая определяется выражением

$$Z(\tau_p) = \frac{p(\tau_b < \tau_p)}{\tau_p + \tau_r},$$

где $p(\tau_b < \tau_p)$ — вероятность выполнения неравенства $\tau_b < \tau_p$.

Поскольку минимальное значение начальной амплитуды, ограничивающее возможность регистрации фазы, на основании (3) равно

$$a_{n \min} = a_k \exp \left(-\frac{\tau_p}{k} \right), \quad k = \frac{24 Q}{QX - 12},$$

и поскольку события $\tau_b < \tau_p$ и $a_n > a_{n \min}$ равнозначны, выражение для $Z(\tau_p)$ может быть переписано в виде

$$Z(\tau_p) = \frac{p(a_n > a_{n \min})}{\tau_p + \tau_r}.$$

Необходимо отметить, что переменная a_n сверху не ограничена, так как при $a_n \geq a_k$ фаза возбуждающего колебания всегда регистрируется. Уместно сделать еще одно уточнение. Более логичным является увеличение частоты следования тех импульсов, которые несут правильную информацию о фазе сигнала. С этой целью в выражении для $Z(\tau_p)$ безусловную вероятность следует заменить на условную вероятность $p_n(a_n > a_{n \min})$, ограничивая индексом «n» рассмотрение лишь случаев правильного отображения фазы сигнала.

Дальнейший анализ сводится к нахождению длительности регенерации τ_p , максимизирующей функцию $Z_n(\tau_p)$. Если из действующей на входе аддитивной смеси нормального шума и сигнала $a_m \sin(\omega t + \varphi_m) +$

$+a_c \sin(\omega t + \varphi_c)$ выделить возбуждающий параметрон компонент $a_n \sin \omega t$ (отсчет фаз удобно вести от фазы v_c , благоприятной для параметрического возбуждения), то нетрудно убедиться, что

$$a_n = |a_m \cos \varphi_m + a_c \cos \varphi_c| = |x|,$$

причем правильное отображение фазы происходит тогда, когда

$$\text{sign } x = \text{sign } \cos \varphi_c.$$

Как известно, величина x распределена нормально с дисперсией σ^2 шумовой составляющей входной смеси и со средним, равным $a_c \cos \varphi_c$, причем $\cos \varphi_c$ с равной вероятностью может быть как положительным, так и отрицательным (фаза приходящего сигнала не имеет никакой связи с фазой накачки). В такой ситуации вероятность правильного отображения фазы совпадает с вероятностью события $x > 0$ при $\cos \varphi_c > 0$ и, следовательно,

$$p_n(a_n > a_{n \min}) = p_{x > 0}(|x| > a_{n \min}) = p_{\cos \varphi_c > 0}(x > a_{n \min}),$$

или, используя интегральную функцию распределения,

$$p_n(a_n > a_{n \min}) = 1 - F\left(\frac{a_{n \min} - a_c \cos \varphi_c}{\sigma}\right).$$

Значит

$$Z_n(\tau_p) = \frac{1 - \left[\frac{a_c}{\sigma} \cos \varphi_c - \frac{a_k}{\sigma} \exp\left(-\frac{\tau_p}{k}\right) \right]}{\tau_p + \tau_r}, \quad (\cos \varphi_c > 0).$$

Эта зависимость изображена на рис. 2 для случаев: $\frac{a_k}{\sigma} = 10^3$,

$Q=24$ — кривая 1; $\frac{a_k}{\sigma} = 10^2$, $Q=50$ —

кривая 2; $\frac{a_k}{\sigma} = 10$, $Q=24$ — кривая 3

(при принятых значениях $\tau_r = 15$, $X = X_{\max} = 2,5$ [9] и малых отношениях сигнал/шум). Кривые имеют ярко выраженный и не критичный к значениям τ_p вблизи $\tau_{p \text{ опт}}$ максимум.

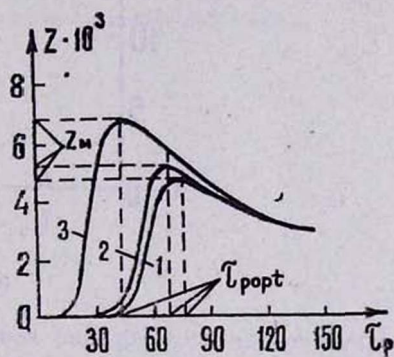


Рис. 2.

Интегральную функцию распределения при аргументе, меньшем 0,9, с точностью не хуже 5,4% можно представить двумя первыми членами степенного ряда. Тогда

$$Z_n(\tau_p) = \frac{1}{\tau_p + \tau_r} \left[\frac{1}{2} + \frac{a_c}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cos \varphi_c - \frac{a_k}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\tau_p}{k}\right) \right].$$

Максимуму этой функции для случая малых отношений сигнал/шум

$\left(\frac{a_c \cos \varphi_c}{\sigma} \ll 1, \frac{a_{i \min}}{\sigma} \ll 1\right)$ соответствуют значения τ_p , удовлетворяющие равенству

$$\frac{\tau_p + \tau_r}{k} \frac{a_k}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\tau_p}{k}\right) = \frac{1}{2}. \quad (4)$$

Для обеспечения статистической независимости фаз выходных смежных импульсов параметрона (см. [8]) его необходимо запускать через интервал, равный времени корреляции входного шума [10] $\tau_{\text{кор}} = \omega t_{\text{кор}} = 6 Q$.

Следовательно, оптимальное значение добротности контура определяется из равенства (4) при $\tau_p + \tau_r = \tau_{\text{кв}} = \tau_{\text{кор}} = 6 Q$. Эта зависимость представлена графически на рис. 3. При минимальном допустимом $\frac{a_k}{\sigma} = 10$, при котором еще имеет смысл работать, получаем $\tau_{\text{кв opt}} = 6 Q_{\text{opt}} \approx 80$.

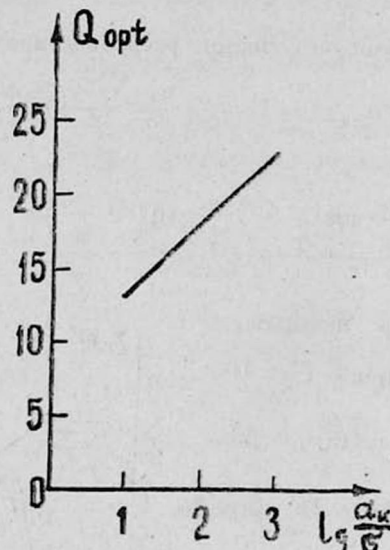


Рис. 3.

Проведенное исследование позволяет обоснованно выбрать и обеспечить режим работы параметрона—индикатора фазы слабого сигнала.

Ереванский политехнический
институт

Поступила 25.I.1975

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Ахманов. Изв. вузов, Радиофизика, 6, 769 (1961).
2. С. А. Ахманов, В. П. Комолов. Изв. вузов, Радиофизика, 5, 1175 (1962).
3. С. А. Ахманов, В. П. Комолов. Вестник МГУ, Физика и астрономия, 7, 96 (1966).
4. В. П. Комолов и др. Параметроны в цифровых устройствах, Библиография по автоматике, вып. 275, Изд. Энергия, М., 1968.

5. А. И. Вишневецкий, Г. М. Немецкий. Параметроны и их применение в устройствах связи, Изд. Связь, М., 1968.
6. В. Ю. Маслов. Кандидатская диссертация, МГУ, М., 1973.
7. К. Г. Кнорре, В. М. Тузов, Т. И. Шур. Фазовые и частотные информационные СВЧ-элементы, Изд. Советское радио, М., 1975.
8. Э. С. Бурунсузян, С. Г. Халпахчян. Электросвязь, № 6, 46 (1973).
9. С. Г. Халпахчян. Изв. АН АрмССР, Физика, 8, 451 (1973).
10. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники, Изд. Советское радио, М., 1969.

ՖԱԶԻԻ ԻՆԴԻԿԱՏՈՐ՝ ՊԱՐԱՄԵՏՐՈՆԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ

Է. Ս. ԲՈՐՈՆՍՅԱՆ, Ս. Գ. ԽԱԼՊԱԽՉՅԱՆ

Ստացված է բանաձև երկակի պարամետրոնում զրգուման պրոցեսի տեղորոշումը հաշվելու համար: Հաշվարկված է թույլ ազդանշանի և նորմալ աղմուկի ադիտիվ խառնուրդի ազդեցության տակ գտնվող պարամետրոնի աշխատանքային այն ռեժիմը, որի դեպքում պարամետրոնի ելքում ազդանշանի մասին ինֆորմացիա կրող իմպուլսների հայտնվելու հաճախականությունը մաքրված է:

THE OPTIMAL USE OF PARAMETRON — THE PHASE INDICATOR

E. S. BURUNSUZYAN, S. G. KHALPAKHCHYAN

The formula for the calculation of the duration of a transient process in double parametron is obtained. The optimal operation regime is determined.