

ОБ ОЦЕНКЕ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПОМЕХ В ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРИЕМНИКЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

А. Я. Северинский

Х а р ь к о в

В последнее время большое распространение получили пирозэлектрические приемники излучения (ППИ). Они имеют до-

статочны высокие коэффициенты преобразования [1, 2] и чувствительность [3], чрезвычайно малоинерционны [4, 5], довольно просты в изготовлении и эксплуатации. Благодаря малой инерционности ППИ, их используют при индикации импульсных излучений [4, 6, 7]. Для неискаженной передачи импульсов уменьшают сопротивление резистора, нагружающего выход пироэлектрического детектора. При этом уменьшается выходное напряжение, в результате чего возникает вопрос о предельной чувствительности ППИ.

Существующие работы [1, 2, 3, 6, 8, 9, 10] посвящены расчету предельной чувствительности пироэлектрических преобразователей при работе с гармонически модулированным излучением. На основании этих расчетов делаются выводы о преобладающих источниках шумов и рассматриваются методы их уменьшения; однако работы, в которых анализируется воздействие всех известных источников флуктуаций (шумов) применительно к ППИ, отсутствуют.

Ниже анализируются известные источники шумов и их соотношения при работе пироэлектрического детектора с излучением, модулированным импульсами разной длительности. Эти источники можно разбить на три основные группы: шумы внешней среды, шумы собственно ППИ и шумы индикатора, преобразующего изменение заряда пироактивного образца в удобную для регистрации величину.

Шум внешней среды обусловлен случайными или квазислучайными изменениями средней энергии ППИ: за счет дискретного характера излучения (так называемый фотонный или радиационный шум); за счет изменения средней температуры, обусловленного теплопроводностью и конвекцией.

Шум пироэлектрического детектора имеет разную природу:

- а) фотонный шум;
- б) тепловой шум сопротивления утечки пироактивного образца и сопротивления, эквивалентного диэлектрическим потерям;
- в) шум, эквивалентный шуму Баркгаузена.

Шум индикатора обычно представляет собой шум электронного усилителя, так как сигнал, возникающий на электродах ППИ, в большинстве случаев недостаточен для непосредственной индикации. Чтобы уменьшить шумы усилителя, применяют противозумовую коррекцию — методом Брауде или отрицательной обратной связью. Однако в первом случае возникает нелинейность амплитудной характеристики усилителя вследствие нелинейности емкости пироактивного материала, подключенной параллельно емкости интегратора. Кроме того, требуется большой динамический диапазон усилителя до дифференцирующей цепи. В связи с этим предпочитают второй способ кор-

рекции, однако и он не всегда целесообразен, что будет показано ниже.

В работах [11, 12, 13] проводится анализ общей схемы усилителя с противошумовой коррекцией резистивной обратной связью и показывается, что составными источниками шума являются дробовой шум тока, текущего через входной электрод; тепловой шум сопротивлений утечки и обратной связи входного каскада; шум электронного прибора.

Таким образом, рассмотрев известные источники флуктуаций ППИ, найдем величину флуктуаций путем интегрирования спектральной плотности шумов в рабочей полосе частот преобразователя.

Спектральная плотность мощности фотонного шума при облучении ППИ в телесном угле 4π стерадиан, что обычно выполняется, и с единичным коэффициентом поглощения равна [14, 15]

$$dP_{\phi 1}^2 = 16A k\sigma T_{\text{вн}}^5 df, \quad (1)$$

где $\alpha P_{\phi 1}^2$ — дифференциал среднего квадрата мощности фотонного шума;

A — общая площадь чувствительного элемента;

K — постоянная Больцмана;

σ — постоянная Стефана-Больцмана;

$T_{\text{вн}}$ — температура внешней среды;

df — дифференциал частоты.

Спектральная плотность мощности температурного шума при постоянстве теплоемкости преобразователя и теплового сопротивления между ним и внешней средой равна [16]

$$d\bar{P}_T^2 = 4k T_{\text{пр}}^2 \frac{H}{\tau_T} df. \quad (2)$$

Здесь $T_{\text{пр}}$ — температура приемника;

$$H = dC_T V, \quad (3)$$

где H — теплоемкость;

d — удельный вес пироактивного образца;

C_T — удельная теплоемкость образца;

V — объем образца;

τ_T — тепловая постоянная времени ППИ.

Спектральная плотность мощности фотонного шума приемника, по аналогии с (1), равна

$$dP_{\phi 2}^2 = 16A k\sigma T_{\text{пр}}^5 df. \quad (4)$$

Шумы, эквивалентные шуму Баркгаузена, вдали от точки Кюри не наблюдаются [3].

Для нахождения величин шума остальных источников, выражающихся через чисто электрические параметры, нужно определить коэффициент преобразования ППИ.

В случае импульсного режима шум этих источников удобнее всего выражать через плотность шумового тока. Поэтому чтобы связать шумовой ток с эквивалентной ему шумовой мощностью на входе приемника, требуется определить коэффициент преобразования, который связывает изменение тока в соединяющем электродах ППИ проводника с изменением мощности, поглощенной в нем.

Проведем чисто тепловой расчет обычно применяющегося равнотолщинного пирозлектрического преобразователя. В результате получим, что при одинаковой температуре электродов и длительности импульсов, много меньшей тепловой постоянной τ_T , коэффициент преобразования $K_{пр}$ будет равен

$$K_{пр} = \frac{\gamma}{dC_\tau t}, \quad (5)$$

где γ — пирозлектрический коэффициент;
 t — толщина пироактивного образца.

Спектральная плотность мощности шумов сопротивлений утечки и диэлектрических потерь образца равна

$$d\bar{P}_R^2 = \frac{4kT_{пр}}{K_{пр}^2} \left(\frac{1}{R_{ут1}} + \frac{1}{R_{днэл}} \right) df, \quad (6)$$

десь $R_{ут1}$ — сопротивление утечки ППИ; для образца с идеально чистой поверхностью между электродами

$$R_{ут1} = \rho t / S; \quad (7)$$

ρ — удельное сопротивление материала;

S — поверхность электрода;

$R_{днэл}$ — сопротивление, эквивалентное диэлектрическим потерям;

$$R_{днэл} = (2\pi f C \operatorname{tg} \delta)^{-1}, \quad (8)$$

где C — емкость образца;

$$C \approx \epsilon(f) \frac{S}{t}, \quad (9)$$

$\epsilon(f)$ — диэлектрическая проницаемость пироактивного материала;

$\delta(t)$ — угол диэлектрических потерь.

Спектральная плотность мощности шумов, обусловленных усилителем, равна

$$dP_{ус}^2 = \left[2e I_0 + 4k T_{ус} \left(\frac{1}{R_{ут2}} + \frac{1}{R_{ос}} \right) + 4k T_{ус} R_{ш} |Y_{ос} + Y_{вх}|^2 \right] \frac{df}{K_{пр}^2}. \quad (10)$$

Здесь e — заряд электрона;

I_0 — ток через входной электрод усилителя;

$T_{\text{ус}}$ — температура усилителя;

$R_{\text{ут}2}$ — сопротивление утечки на входе первого каскада;

$R_{\text{ос}}$ — сопротивление обратной связи; при простой обратной связи оно выбирается из условий необходимой полосы частот

$$\frac{2\pi f_{\text{max}} R_{\text{ос}} C_{\text{вх}}}{K_{\text{ус}}} = 1, \quad (11)$$

f_{max} — верхняя граничная частота;

$C_{\text{вх}}$ — суммарная входная емкость первого каскада;

$K_{\text{ус}}$ — коэффициент усиления усилителя без обратной связи;

$K_{\text{ш}}$ — приведенное ко входу шумовое сопротивление электронного прибора.

$Y_{\text{ос}}$ — полная проводимость цепи обратной связи; в схеме простой обратной связи в рабочей полосе частот

$$Y_{\text{ос}} = \frac{1}{R_{\text{ос}}}; \quad (12)$$

$Y_{\text{вх}}$ — полная проводимость входного сопротивления усилителя без обратной связи; как правило, это проводимость суммарной входной емкости первого каскада

$$Y_{\text{вх}} = 2\pi f (C_{\text{пр}} + C_0 + C), \quad (13)$$

где $C_{\text{пр}}$ — входная емкость электронного прибора;

C_0 — емкость монтажа.

Интегрирование выражений (1), (2), (4), (6), (10) проведем с учетом следующих условий:

верхняя граничная частота усилителя $f_{\text{в}}$ намного больше нижней, что соответствует импульсным усилителям;

$T_{\text{вн}} = T_{\text{пр}} = T_{\text{ус}} = 300^\circ\text{K}$, что выполняется для обычно применяемых ППИ, использующих триглицинсульфат (ТГС), титанат бария, танталат лития и т. п.;

функции $\varepsilon(f)$ и $\delta(f)$ заменяются константами $\varepsilon(t_{\text{в}})$ и $\delta(f_{\text{в}})$; при этом получим максимальную величину шумов, потому что сопротивление диэлектрических потерь увеличивается с уменьшением частоты, что подтверждается экспериментально [17];

$R_{\text{ут}2} \gg R_{\text{ос}}$, что всегда выполняется в широкополосных усилителях уже миллисекундного диапазона длительности импульса;

$Y_{\text{вх}} \gg Y_{\text{ос}}$, что является условием применения простой противозумовой коррекции;

$A \approx 2S$, что соблюдается в обычных ППИ, имеющих малую толщину по сравнению с размерами поверхности электродов.

Итак, получаем

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{ш}} \leq & 64k\sigma T_0^5 S f_n + 4kT_0^2 dC_{\tau} \frac{V}{\tau_{\tau}} f_n + 4kT_0 \frac{d^2 C_{\tau}^2 V}{\rho \gamma^2} f_n + \\ & + 2kT_0 d^2 C_{\tau}^2 V \frac{2\pi f_n^2 | \epsilon(f_n) | | \text{tg } \delta(f_n) |}{\gamma^2} + 2 \left(\frac{dC_{\tau}}{\gamma} \right)^2 e I_0 t^2 f_n^0 + \\ & + 4kT_0 \left(\frac{dC_{\tau} t}{\gamma} \right)^2 2\pi f_n^2 C_{\text{нх}} / k_{\text{yc}} + 4kT_0 \left(\frac{dC_{\tau} t}{\gamma} \right)^2 R_{\text{ш}} \frac{4\pi^2 f_n^3 C_{\text{вх}}^2}{3}. \quad (14) \end{aligned}$$

Анализ (14) дает условия выбора пироактивного материала, размеров образца, способов его крепления и параметров усилителя для получения требуемой чувствительности. Определим, как качественно должны меняться параметры ППИ в целом, чтобы получить максимальную чувствительность.

1. Выбор материала. Составив таблицу значений γd , C_{τ} , ϵ , $\rho \text{tg} \delta$ для наиболее чувствительных пироэлектриков, находим, что лучшим является ТГС.

2. Выбор размеров образца. Из (14) следует, что все размеры t , S , V должны быть малы, особенно толщина, т. е. образец должен быть малой тонкой пластиной.

3. Выбор способа крепления зависит от относительной величины тепловых шумов. Если они велики, нужно теплоизолировать пироактивный образец; при этом увеличивается тепловая постоянная времени, а тепловые шумы падают.

4. Выбор параметров усилителя. Должны быть малы входной ток, входная емкость и шумовое сопротивление при одновременно высоком коэффициенте усиления в цепи обратной связи.

Чтобы оценить влияние различных источников шумов импульсного ППИ, использующего в качестве материала преобразователя ТГС, зададим примерные размеры образца, тепловую постоянную и параметр усилителя.

1. Задание толщины. При импульсном режиме, как правило, мощность сигнала должна поглощаться непосредственно в материале образца; в противном случае общая инерционность ППИ включит в себя инерционность поглотителя мощности (защерненный электрод), которая сводит на нет безынерционные свойства пироэлектрика. В этом смысле увеличение толщины упрощает согласование ППИ, но коэффициент преобразования будет падать. Исходя из сказанного, выберем $t = 0,2$ мм.

2. Зададим площадь электродов, например, в 15 мм².

3. Задание тепловой постоянной. При закреплении пироактивного образца толщиной $0,2$ мм на массивной металлической пластине тепловая постоянная будет находиться в пределах $0,1$ сек. Примем $\tau_{\tau} = 0,1$ сек.

4. Задание параметров электронного прибора связано с выбором типа усилительного элемента, который должен быть несложным и малошумящим, а I_0 и $C_{пр}$ минимальными. Эти условия приводят к альтернативе полевой транзистор — электронная лампа. Первый имеет меньший входной ток, вторая — меньший собственный шум, который больше влияет на суммарный шум ППИ, чем I_0 , что будет видно в дальнейшем. По этой причине выбираем электронную лампу, т. е. малошумящий пентод для широкополосных усилителей 6Ж52П со следующими параметрами: $R_{ш} = 110 \text{ ом}$; $I_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ а}$; $C_{пр} = 15 \text{ пф}$. Емкость монтажа равна примерно 5 пф .

5. Задание коэффициента усиления в цепи обратной связи. При частотах, не превосходящих нескольких мегагерц, возможно построение многокаскадных усилителей, охваченных глубокой отрицательной обратной связью. Однако и в этом случае $K_{yc} \leq 10^4$. При более высоких частотах удается охватить обратной связью только один каскад и тогда $K_{yc} \approx 100$ и до 10 мггц и $K_{yc} \approx 20$ до 50 мггц .

Таким образом, определены все величины в (14) для расчета $\sqrt{P_{ш}^2}$. Результаты проведенного расчета сведены в таблицу, где величина $\sqrt{P_{ш}^2}$ выражена в $\text{вт}/\sqrt{\text{гц}}$.

Наименование источников шума	$f_{в}, \text{ мггц}$		
	1	10	50
Фотонный	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Тепловой	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$
Утечки	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$3,8 \cdot 10^{-10}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$
Тепловой $R_{ос}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Ламповый	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$
Дробовой	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$
Диэлектрических потерь	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$

Из таблицы видно, что шумы лампы и диэлектрических потерь пиропассивного материала являются преобладающими: первые — выше нескольких мегагерц, вторые — ниже. Тепловые шумы сопротивления обратной связи для приведенного примера настолько малы, что коррекция не нужна.

Способы уменьшения тепловых шумов активной части входного сопротивления усилителя рассмотрены ранее — противозумовая коррекция.

Способ уменьшения шумов электронного прибора — параллельное соединение ламп, подобранных по минимальному току

сетки. Проведенные эксперименты с лампой 6Ж11П ($S = 25 \text{ ma/b}$) показали, что 2 из 35 имеют на порядок меньший входной ток, чем номинальный.

Способ уменьшения тепловых шумов сопротивления, эквивалентного диэлектрическим потерям пироактивного образца, заключается в уменьшении габаритов образца и подаче большого поляризующего напряжения на образец, которое переводит материал образца на кривую насыщения петли гистерезиса, где ϵ и $\text{tg}\delta$ минимальны. Этот способ более эффективен на низких частотах, где нелинейность пироэлектриков наиболее заметна.

Итак, в результате анализа известных источников шумов ППИ, работающего в импульсном режиме, установлено, что преобладающими являются шумы диэлектрических потерь пироактивного материала и шумы усилителя, в основном электронного прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Astheimer, F. Schwarz. Appl. Opt., 1967.
2. Beerman. Am. Ceramic Soc. Bull., August, 1967, Pyroelectric Infrared Radiation Detector.
3. J. Cooper. Rev. Sci. Instr., 1962, 1, 92.
4. В. М. Кузьмичев и др. «Радиотехника и электроника», 1969, 10, 1843.
5. Б. Н. Морозов. Измерительная техника, 1967, 10, 7.
6. Л. С. Кременчугский. ПТЭ, 1968, 3, 165.
7. C. Wunsehe. Zt. ang. Phys., Heft 5, Band 22, 399.
8. A. Haolni. Le journal De Physique. 1965, 6, 345.
9. J. Ludlogy and other, J. Sci Instr., 1967, 9, 694.
10. Burdick, R. Arnold. J. appl. Phys., 1966, 8, 3223.
11. А. В. Паршин и др. ПТЭ, 1964, 3, 88.
12. Н. Н. Романова и др. ПТЭ, 1964, 3, 94.
13. А. В. Паршин, Л. Б. Устинова. ПТЭ, 1964, 3, 102.
14. Ж. Шаль и др. Приемники инфракрасного излучения. Изд-во «Мир», М., 1969.
15. М. Н. Марков. Приемники инфракрасного излучения. Изд-во «Наука», М., 1968.
16. Р. Смит и др. Обнаружение и измерение инфракрасного излучения. ИЛ, М., 1959.
17. Ю. М. Поплавко и Л. П. Соломонова. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1967, 11, 1771.