

УДК 615.47

Е.С. Дрозденко, С.А. Найда, канд. техн. наук

## О влиянии детектирования шума на точность измерения температуры акустотермометром

**Рассмотрены основные виды детектирования амплитудно-модулированных сигналов. Проведен анализ зависимости точности измерения внутренней температуры биологических объектов нулевым модуляционным методом от типа детектора, используемого в схеме акустотермометра.**

**The principal views of peak-modulated signals detecting are considered. The analysis of biological objects internal temperature measurement accuracy dependence by means of zero modulating method from the detector type used in the scheme is carried out.**

**Ключевые слова:** внутренняя температура, акустотермометр, нулевой модуляционный метод, точность измерения температуры, детектор, относительная флюктуация.

### Введение

При использовании в медицине различных видов термического воздействия на ткани биологических объектов (проведение криоопераций, физиотерапевтических процедур, гипертермических процедур в онкологии и т. д.) необходимо контролировать температуру области воздействия [1, 2]. Этую процедуру целесообразно выполнять неинвазивно – проводить измерения на поверхности тела и по полученным результатам восстанавливать пространственно-временное распределение глубинной температуры.

Последние два десятилетия в литературе активно рассматривалась возможность получения распределения внутренней температуры биологического объекта в мегагерцовом диапазоне частот [3–11]. Однако на сегодняшний день так и не удалось измерить глубинную температуру тела с необходимой точностью в режиме реального времени из-за высокой шумовой температуры акустотермометра (АТ), применяемого для приема и регистрации теплового акустического излучения.

В работах [5, 6, 9] проведен анализ схемы АТ, реализующей нулевой модуляционный метод, а в работе [9] сформулированы требования, предъявляемые к ее блокам, выполнение которых позволит увеличить точность определения температуры.

В работах [10, 11] повышение точности измерения внутренней температуры биологиче-

ского объекта до значения пороговой предлагалось достичь путем применения фокусирующего АТ с плосковогнутой эллиптической линзой и четвертьвольновыми согласующими слоями, позволяющего проводить измерения абсолютной температуры одночастотным одноканальным методом. Причем в отличие от многоспектрального метода [3, 7, 8], требующего широкой полосы частот и априорного знания частотно-зависимого коэффициента поглощения, частоту нужно выбирать как можно более низкую для обеспечения большой глубины проникновения акустического излучения в ткани. Следует также отметить, что применение фокусирующего пьезопреобразователя (ПП) значительно увеличивает интенсивность шумового сигнала на выходе усилителя высоких частот, что позволяет превысить собственные шумы усилителя.

Целью данной работы является анализ зависимости точности измерения внутренней температуры биологического объекта от вида детектирования шума и обоснование выбора типа детектора, реализуемого в схеме АТ.

### Постановка задачи

Причиной акустического излучения биологических объектов является тепловое хаотическое движение их атомов и молекул. Для нахождения температуры используют выражение для квадрата акустического давления  $p^2$ , соответствующее тепловым колебаниям безграничной вязкоупругой среды с температурой  $T$ , полученное на основании закона излучения безграничной среды Рэлея-Джинса:

$$p^2 = \frac{4\pi f^2}{v} \rho k T \Delta f,$$

где  $f$  – частота;  $v$  – скорость звука;  $\rho$  – плотность среды;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $\Delta f \ll f$  – полоса частот, выделяемая приемником или усилителем высокой частоты (УВЧ) из спектра шума.

Параметры акустического излучения биологического объекта измеряют нулевым модуляционным методом, позволяющим выделять слабые шумовые сигналы на фоне собственных шумов приемника. Указанный метод реализует АТ [10], структурная схема которого представлена на рис. 1.

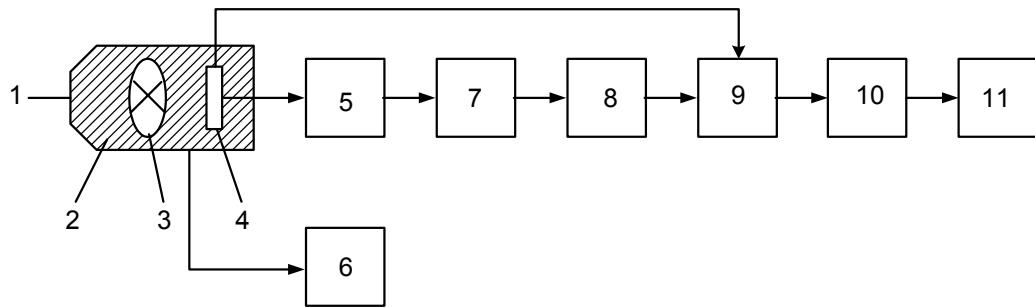


Рис. 1. Структурная схема АТ

АТ через блок модулятора 2, заполненный водой, с акустически прозрачным окном 1 вводится в соприкосновение с объектом, например, с кожей пациента. Шумовой акустический сигнал, излучаемый телом пациента, модулируется обтюратором 3 и поступает на ПП 4. Обтюратор периодически перекрывает тепловое акустическое излучение от объекта. Когда модулятор, вращаемый электродвигателем, открыт, на ПП поступает излучение от исследуемого объекта, когда закрыт – идет шумовой акустический сигнал из воды, заполняющей модулятор (этот сигнал является эталонным). С выхода ПП сигнал через согласующий трансформатор 5 подается на широкополосный УВЧ 7, детектируется квадратичным детектором (КД) 8 и выделяется с помощью синхронного детектора 9, на который поступает опорное напряжение с модулятора. Напряжение с выхода синхронного детектора, пропорциональное разности абсолютных температур тела и модулятора, усредняется с помощью фильтра низких частот (ФНЧ) 10 и поступает на регистрирующее устройство 11. Температуру модулятора измеряет схема 6.

Детектирование колебаний, выполняемое блоком 8, по сути, является процессом, обратным к модуляции, и заключается в выделении информационного сигнала, который содержится в модулированном высокочастотном колебании. Осуществить детектирование можно путем воздействия амплитудно-модулированным колебанием на безынерционный нелинейный элемент с последующей фильтрацией низкочастотных составляющих спектра.

Проанализируем, как точность измерения внутренней температуры биологического объекта зависит от вида детектирования, реализуемого в блоке 8 схемы АТ, принимая во внимание тот факт, что такая точность определяется относительной флуктуацией [12], равной отношению среднего квадратического отклонения к среднему значению процесса на выходе детектора.

## Основная часть

Детектированием называется процесс выделения модулирующего сигнала из модулированного высокочастотного колебания. Схемы, с помощью которых осуществляется детектирование, применяются и в тех случаях, когда высокочастотные колебания не являются модулированными. Поэтому часто под детектированием понимают процесс выделения тех или иных параметров высокочастотного колебания.

Используя принцип детектирования, можно определить амплитуду, частоту, фазу, длительность отрезка высокочастотного колебания или время его прихода, а также выявить изменения этих величин, если они происходят [13].

Из детекторов, применяемых при аппаратном определении характеристик случайных процессов, наиболее простыми и не требующими дополнительных источников питания, являются диодные. В зависимости от вида детектирования, реализуемого в таких детекторах, их можно классифицировать на квадратичные, линейные и амплитудные.

## Квадратичный детектор

Для детектирования используется начальный участок вольт-амперной характеристики выпрямительного диода, либо обратная ветвь характеристики обращенного диода. При ничтожно малых (десятки милливольт) напряжениях обратные токи во втором случае больше, чем в первом, и значительно превосходят прямые в этой области напряжений. Пример осуществления квадратичного детектирования на обращенном диоде для выделения детерминированного сигнала с частотой 10 МГц (правда, с ошибкой, большей на три порядка в сторону величины сопротивления нагрузки) приведен в работе [8]. Величина нагрузки должна быть значительно меньше сопротивления диода, т. е. такой, чтобы на ней выделялась малая часть подводимого к детектору напряжения. Поэтому

коэффициент преобразования диодных КД мал. Однако, с другой стороны, благодаря этому, наличие ФНЧ непосредственно на выходе детектора не влияет на процесс детектирования.

Двухполупериодный квадратичный детектор позволяет измерять среднюю мощность (среднее значение квадрата напряжения) эргодического случайного процесса в соответствии с выражением [14]:

$$\bar{y} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^L y(t) dt, \quad (1)$$

где  $L$  – период случайного процесса;  $y(t) = x^2(t)$  – процесс на выходе квадратичного детектора, а  $x(t)$  – на входе.

Мощность шумового процесса пропорциональна абсолютной температуре объекта, поэтому точность оценки среднего значения мощности, определяемая относительной флуктуацией  $\frac{\sigma_y}{y}$  [12], будет равна точности измерения внутренней температуры.

Дисперсия  $D_y$  процесса на выходе квадратичного детектора равна:

$$D_y \equiv \sigma_y^2 = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^L [y(t) - \bar{y}]^2 dt = \bar{y}^2 - (\bar{y})^2, \quad (2)$$

где

$$\bar{y} = \overline{x^2(t)}, \quad \overline{y^2} = \overline{x^4(t)}. \quad (3)$$

Если случайный процесс на входе квадратичного детектора представляет собой белый шум, то относительная флуктуация будет равна [12]:

$$\frac{\sigma_y}{y} = \sqrt{2}. \quad (4)$$

При наличии на выходе детектора ФНЧ с постоянной времени  $\tau = \frac{1}{\Delta\omega}$  (для RC-фильтра  $\tau = RC$ ) точность оценки среднего значения мощности белого шума с полосой  $\Delta\omega$  ( $\Delta\omega\tau \geq 1$ ) возрастает, а, следовательно, и точность определения температуры, увеличивается и равна [12]:

$$\frac{\sigma_y}{y} = \sqrt{\frac{2}{\Delta\omega \cdot \tau}}.$$

Используя соотношения (1)–(3), найдем значение относительной флуктуации  $\frac{\sigma_y}{y}$  для детерминированного процесса  $x(t) = \sin t$ :

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^L x^2(t) dt = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L x^2(t) dt = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 t \cdot dt = \frac{1}{2}, \end{aligned}$$

$$\overline{y^2} = \overline{x^4(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^4 t \cdot dt = \frac{3}{8},$$

$$\sigma_y^2 = \overline{y^2} - (\bar{y})^2 = \frac{1}{8},$$

$$\frac{\sigma_y}{y} = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad (5)$$

т. е. точность в два раза выше, чем для белого шума.

Рассмотрим, как изменится значение относительной флуктуации при использовании однополупериодного квадратичного детектора (в данном случае интегрирование в выражениях (5) ведется в пределах от 0 до  $\pi$ ). Средняя мощность, квадрат средней мощности, дисперсия, среднее квадратическое отклонение и относительная флуктуация будут соответственно равны:

$$\bar{y} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sin^2 t \cdot dt = \frac{1}{4},$$

$$\overline{y^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sin^4 t \cdot dt = \frac{3}{16},$$

$$\sigma_y^2 = \overline{y^2} - (\bar{y})^2 = \frac{1}{8},$$

$$\frac{\sigma_y}{y} = \sqrt{2}. \quad (6)$$

Полученный результат говорит о том, что при однополупериодном квадратичном детектировании значение относительной флуктуации  $\frac{\sigma_y}{y}$ , определяющее точность оценки среднего значения мощности, в два раза больше, чем в случае двухполупериодного детектирования, следовательно, точность определения температуры в два раза меньше. Данный вывод является справедливым и для шумового сигнала. Следует также отметить, что дисперсия не зависит от того, осуществляется одно- или двухполупериодное детектирование.

При наличии ФНЧ на выходе однополупериодного квадратичного детектора, выражения (5) и (6) умножаются на  $\frac{1}{\omega\tau}$  и относительная флуктуация становится равна [12]:

$$\frac{\sigma_y}{y} = \frac{\sqrt{2}}{\omega\tau}.$$

Для случая, когда  $\Delta\omega \approx \omega$ , коэффициент сглаживания шумовых флюктуаций (отношение относительной флюктуации на выходе детектора к относительной флюктуации на выходе ФНЧ), равный  $\sqrt{\Delta\omega}$ , намного меньше коэффициента сглаживания пульсаций детерминированного сигнала, равного  $\omega\tau$ .

### Линейный детектор (выпрямитель)

Данный тип детектора широко используется для работы с сигналами большого уровня. Такой детектор образуется последовательным соединением диода и параллельной RC-цепью, которая выполняет роль частотного фильтра. Для нормальной работы детектора необходимо, чтобы сопротивление резистора нагрузки значительно превышало сопротивление диода в прямом направлении, но было значительно меньше, чем в обратном. Поэтому коэффициент передачи такой схемы по напряжению близок к единице и средний уровень выходного напряжения примерно совпадает с амплитудой входного сигнала.

В большинстве задач измерение среднего выпрямленного значения случайного процесса  $x(t)$  позволяет измерять среднее квадратическое отклонение  $\sigma_x$ , не прибегая к квадратичному детектированию [14].

Среднее значение положительных ординат центрированного случайного процесса математически может быть представлено следующим образом [12]:

$$B = M \left[ \overset{\circ}{x}(t) \right] = \int_0^{\infty} x w(x) dx = \beta \sigma_x,$$

где  $\beta$  – коэффициент, зависящий от характера распределения вероятностей. Для нормального (гауссовского), равномерного (ограниченного по частоте белого шума) или случайного процесса, распределенного по закону арксинуса,  $\beta = 0,425$  при однопериодном, и  $\beta = 0,85$  при двухполупериодном выпрямлении [14]. В последнем случае с учетом того, что  $\sigma_y = \sigma_x^2$ , а  $\bar{y} = \overline{x^2(t)}$ , а также соотношения (4), получим:

$$\frac{\sqrt{\left( \overline{x^2} \right)}}{\sigma_x} = \sqrt{\left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right)} = 0,84,$$

т.е. среднее квадратическое значение приблизительно равно среднему выпрямленному значению:

$$\frac{B}{\sigma_x} = 0,85.$$

Для акустотермометра среднее значение положительных ординат центрированного случайного процесса равно [3, 10, 11, 15]:

$$B = \sqrt{\left( \overline{x^2} \right)} = \sqrt{\left( \left( \frac{z_2}{A_0} \right) k T K_{\text{по}}^2 \cdot \Delta f \right)}, \quad (7)$$

где  $z_2 = 1,5 \cdot 10^6$  Па·с/м – удельный акустический импеданс, одинаковый для биологического объекта и воды;  $A_0$  – площадь пьезоприемника;  $T$  – температура тела или воды в градусах Кельвина;  $K_{\text{по}}$  – коэффициент преобразования давление-напряжение в плоской волне с фронтом, параллельным плоскости пьезоприемника, на частоте его механического резонанса (антирезонанса);  $\Delta f$  – ширина полосы частот пьезоприемника.

Модулированная составляющая при  $\Delta T \ll T$ , как следует из выражения (7), равна:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T}, \text{ или } \frac{\Delta T}{T} = 2 \frac{\Delta B}{B}.$$

Тогда выражение, определяющее точность измерения температуры, примет вид:

$$\frac{\theta}{T} = 2 \frac{\sigma_x}{B}. \quad (8)$$

Из выражения (8) можно сделать вывод, что в случае линейного детектора точность в два раза ниже, чем при использовании квадратичного детектора. При однополупериодном детектировании – в четыре раза ниже.

### Амплитудный детектор

Это линейный детектор с параллельной емкостью, который широко используется в радиотехнике для выделения огибающей модулированного высокочастотного сигнала [16].

Найдем значение относительной флюктуации  $\frac{\sigma_y}{y}$  на выходе амплитудного детектора при воздействии детерминированного процесса  $x(t) = \sin t$ .

Работу данного устройства можно продемонстрировать с помощью графиков (временных диаграмм) напряжения на выходе детектора или тока в нагрузке (рис. 2) [13].

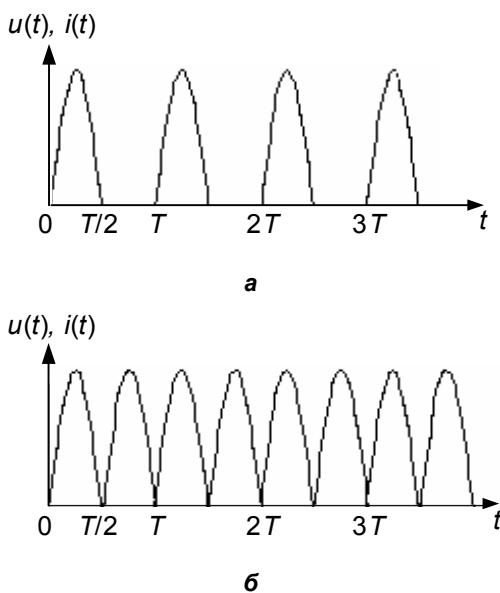


Рис. 2. Графики выпрямленного напряжения или тока: а – при однополупериодном выпрямлении; б – при двухполупериодном выпрямлении

Из графиков видно, что выпрямленное напряжение, оставаясь постоянным по знаку, периодически изменяется во времени, т. е. пульсирует. Разложение в ряд Фурье напряжения пульсаций по периоду дает следующие выражения [17], соответственно, для одно- и двухполупериодного детектирования:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{\pi} \left( \frac{\cos 2\omega t}{1 \cdot 3} + \frac{\cos 4\omega t}{3 \cdot 5} + \frac{\cos 6\omega t}{5 \cdot 7} + \dots \right), \quad (9)$$

$$y(t) = \frac{2}{\pi} - \frac{4}{\pi} \left( \frac{\cos 2\omega t}{1 \cdot 3} + \frac{\cos 4\omega t}{3 \cdot 5} + \frac{\cos 6\omega t}{5 \cdot 7} + \dots \right). \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) следует, что процесс на выходе амплитудного детектора равен сумме постоянной составляющей, переменного напряжения с основной частотой и высших гармоник.

При двухполупериодном детектировании постоянная составляющая в два раза больше чем постоянная составляющая при однополупериодном детектировании и первая гармоника отсутствует. Это является главным преимуществом двухтактного выпрямления.

Используя соотношения (1)–(3) и принимая во внимание вышеизложенное, получим:

– для однополупериодного выпрямления

$$\bar{y} = \frac{1}{\pi},$$

$$\bar{y^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi x^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sin^2 t dt = \frac{1}{4},$$

$$\sigma_y^2 = \bar{y^2} - (\bar{y})^2 = 0,15,$$

$$\frac{\sigma_y}{y} = 1,22;$$

– для двухполупериодного выпрямления

$$\bar{y} = \frac{2}{\pi},$$

$$\bar{y^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 t dt = \frac{1}{2},$$

$$\sigma_y^2 = \bar{y^2} - (\bar{y})^2 = 0,09,$$

$$\frac{\sigma_y}{y} = 0,47.$$

Наличие в схеме амплитудного детектора параллельной емкости не только ослабляет пульсации, но и увеличивает постоянную составляющую продетектированного напряжения. При  $\omega \gg 100$  коэффициент пульсаций не превышает значения  $2 \cdot 10^{-2}$  при однополупериодном детектировании и, соответственно,  $4 \cdot 10^{-3}$  – при двухполупериодном детектировании [15]. Большее значение отношения коэффициентов пульсаций ( $\approx 5$ ) при указанном детектировании по сравнению с соответствующим отношением для полосового шума ( $\approx 2,5$ ) объясняется тем, что спектр шума не зависит от числа детектируемых периодов, в отличие от спектра пульсаций детерминированного сигнала.

Из вышеизложенного следует, что для получения точности определения температуры в два раза выше, чем с квадратичным двухполупериодным детектором, необходимо и амплитудный детектор выбирать двухполупериодным.

## Выводы

Проведенный анализ зависимости точности измерения внутренней температуры акустотермометром, реализующим нулевой модуляционный метод от вида детектирования шумового сигнала показал, что наименьшее значение относительной флюктуации  $\frac{\sigma_y}{y}$ , а, следователь-

но, и наилучшая точность, наблюдается в случае применения двухполупериодного амплитудного детектирования.

Таким образом, в качестве устройства детектирования (блок 8) рассмотренной структур-

ной схемы АТ предпочтительно использование такого же амплитудного детектора.

В дальнейшем целесообразно исследовать зависимость точности измерения температуры от особенностей реализации последующих блоков схемы АТ, в частности синхронного детектора.

### Литература

1. Александров Н.Н., Савченко Н.Е., Фрадкин С.З., Жаврид Э.А. Применение гипертермии и гипергликемии при лечении злокачественных опухолей. – М.: Медицина, 1980. – 256 с.
2. Осинский С.П. Гипертермия в клинической онкологии: современное состояние проблемы (по итогам 20-й ежегодной конференции Европейского общества гипертермической онкологии (ESHO)) // Онкология. – 2002. – Т.4, № 4. – С. 288–292.
3. О возможностях акустической термографии биологических объектов / Ю.В. Гуляев, Э.Э. Годик, В.В. Дементиенко и др. // Докл. АН СССР. – 1985. – Т. 183, № 6. – С. 1495–1499.
4. Пасечник В.И. Акустическая термография биологических объектов // Радиотехника. – 1991. – № 8. – С. 77–80.
5. Пасечник В.И. Оценка пороговой чувствительности акустотермометров // Акустический журнал. – 1993. – Т. 39, № 1. – С.140–143.
6. Аносов А.А., Пасечник В.И. Сравнение чувствительности акустотермометров различных типов // Акустический журнал. – 1993. – Т. 39, № 2. – С. 207–212.
7. Аносов А.А., Бограчев К.М., Пасечник В.И. Измерение теплового акустического излучения из кисти руки человека // Акустический журнал. – 1998. – Т. 44, № 3. – С. 299–306.
8. Аносов А.А., Бограчев К.М., Пасечник В.И. Пассивная термоакустическая томография кисти руки человека // Акустический журнал. – 1998. – Т. 44, № 6. – С.725–730.
9. Дицковский В.С., Найда С.А. Нулевой модуляционный метод измерения теплового акустического излучения биологических объектов // Электроника и связь. – 2000. – Т.2, № 8. – С. 253–256.
10. Найда С.А. Акустотермометрия жидких объектов с помощью пьезоприемников мегагерцевого диапазона // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. – № 3. – С. 41–48.
11. Найда С.А. Пьезоприемники теплового акустического излучения для зондирования внутренней температуры объектов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 1. – С. 25–29.
12. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику: В 2-х ч. – Ч.1. Случайные процессы. – М.: Наука, 1976. – 496 с.
13. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
14. Мирский Т.Я. Аппаратное определение характеристик случайных процессов. – М.: Энергия, 1972. – 456 с.
15. Найда С.А. О возможности одноканальной динамической пассивной акустотермометрии головного мозга и улитки внутреннего уха новорожденных с помощью фокусированного ультразвука // Электроника и связь. – 2003. – № 18. – С. 9–10.
16. Гринфилд Дж. Транзисторы и линейные ИС. Руководство по анализу и расчету. – М.: Мир, 1992. – 560 с.
17. Бронштейн И.Н., Семеняев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1981. – 720 с.