

08:12
©1995 г.

О ВОЗМОЖНОСТИ ДОСТИЖЕНИЯ БЛИЗКИХ К ПРЕДЕЛЬНЫМ ПАРАМЕТРОВ АКУСТОТЕРМОМЕТРОВ

В.В.Герасимов, В.И.Миргородский, С.В.Пешин

Институт радиотехники и электроники РАН,
141120, Фрязино, Московская область, Россия
(Поступило в Редакцию 3 августа 1994 г.
В окончательной редакции 17 января 1995 г.)

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований возможностей реализации теоретически предельно достижимых параметров акустотермометров. Показана возможность и предложены методы обеспечения эффективного электрического согласования преобразователя и усилителя с потерями менее 0.1 дБ и акустического согласования с суммарными потерями менее 4 дБ. На основе флуктуационно-диссипационной теоремы из зависимости показаний акустотермометра от температуры преобразователя предложен и экспериментально проверен метод определения суммарных потерь акустического преобразователя и согласующей системы.

В работе [1] сообщалось о возможности реализации принципа [2] дистанционного измерения температуры путем регистрации величины тепловых акустических шумов. В частотном диапазоне около 1 МГц была достигнута флуктуационная чувствительность, отличающаяся менее чем в 10 раз от предельно достижимой чувствительности, определяемой в соответствии с известным выражением

$$\Delta T = T_0 / \sqrt{\tau \Delta f}, \quad (1)$$

где T_0 — абсолютная величина измеряемой температуры; τ — постоянная времени интегрирования; Δf — величина полосы частот принимаемых акустических тепловых шумов.

Подстановка в это выражение достижимого на практике значения $\Delta f = 800$ кГц, значения $\tau = 5$ с при комнатной температуре T_0 приводит к $\Delta T = 0.15^\circ \text{C}$, что находится вблизи предела чувствительности, приемлемой для целей медицинской диагностики. Это обстоятельство свидетельствует о том, что для возможности использования акустотермометров в области медицинской диагностики необходимы такие конструкции приборов, которые обладали бы близкими к предельно достижимым параметрами.

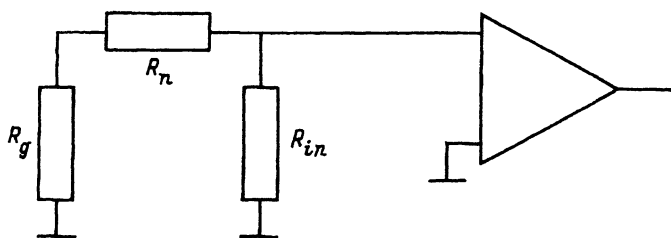


Рис. 1.

Предлагаемая работа посвящена одному из наиболее важных физических аспектов, определяющих параметры акустотермометров, — их согласованию с исследуемыми объектами. Это связано с тем, что при отсутствии надлежащих согласований будет неизбежно происходить невосполнимая потеря принимаемого от исследуемого объекта сигнала, что в конечном итоге не позволит осуществлять акустотермометрические измерения с приемлемой для практических нужд точностью. Изложение будет основываться на примере экспериментального образца акустотермометра, на котором была реализована чувствительность в два раза хуже теоретического предела.

Рассмотрение целесообразно начать с анализа электрического согласования пьезопреобразователя с усилителем электрического сигнала. Основные требования к согласованию состоят в обеспечении условий, при которых бы слабый электрический сигнал, возникающий на пьезопреобразователе, принимающем тепловые акустические колебания, мог бы наилучшим образом регистрироваться, т.е. с минимально возможным вкладом собственных шумов усилителя и других помех. Поскольку в соответствии с (1) чувствительность акустотермометра увеличивается с увеличением полосы принимаемых частот, то согласование должно быть широкополосным.

Будем исходить из наиболее простых, однако отражающих основную физическую суть моделей усилителя и пьезопреобразователя. Усилитель в соответствии с этим обладает собственными шумами, представляемыми джонсоновскими шумами сопротивления R_n , включенного последовательно с пьезопреобразователем, и идеального (т.е. не обладающего собственными шумами) усилителя с входным сопротивлением $R_{вх}$, как то показано на рис. 1.

Из радиотехники известно, что наилучшее отношение сигнал-шум реализуется при выборе сопротивления источника сигнала, удовлетворяющего соотношению

$$R_g = \sqrt{R_{in} R_o}, \quad (2)$$

смысл которого при $R_{in} \gg R_n$ состоит в том, что при таком значении R_g обеспечивается как превышение джонсоновских шумов сопротивления источника сигнала R_g над собственными шумами усилителя, представленными R_n , так и не происходит шунтирования (а следовательно, и уменьшения сигнала) на входном сопротивлении усилителя. Знание величины R_g позволяет выбрать материал пьезопреобразователя на основе следующих соображений.

В настоящее время наилучшими из известных усилителей мегагерцового диапазона являются усилители на основе использования полевых транзисторов, действительная часть входного сопротивления ко-

торых в указанном частотном диапазоне составляет более 1 МОм, а шумовое сопротивление может быть менее 200 Ом. Подстановка этих значений в (2) приводит к величине R_g около 14 кОм. Несложно оценить параметры пьезоэлектрика, из которого можно сделать такой преобразователь. Считая, что значение константы электромеханической связи для обеспечения максимально возможной полосы частот должно быть также максимально возможным, т.е. около 0.7, несложно определить оптимальное значение диэлектрической проницаемости пьезоматериала преобразователя. Несложный расчет приводит к следующему выражению: $\epsilon = (4v_t \Delta\Theta^2) / (\pi k^2 R_g v_c^2)$, где $\Delta\Theta$ — угловая ширина диаграммы направленности преобразователя, v_t и v_c — скорости звука в материале преобразователя и исследуемой среде. Величина $\Delta\Theta$ определяется потребностью и, вообще говоря, может быть от 1 (что соответствует сферической диаграмме направленности) до весьма малых значений, соответствующих остронаправленной диаграмме. Подстановка среднего значения ширины диаграммы направленности около 0.1 приводит к $\epsilon = 60$.

Анализ параметров известных пьезоэлектрических материалов показывает, что указанному требованию удовлетворяют два материала: ниобат и танталат лития. Следует отметить, что в свете вышеизложенного применение для изготовления преобразователей акустотермометров пьезокерамик, обладающих, как правило, весьма высокими значениями диэлектрической проницаемости (более 1000), за исключением, может быть, случая, когда необходима диаграмма направленности, близкая к сферической, из-за трудностей электрического согласования нецелесообразно.

Несложно оценить ухудшение чувствительности акустотермометра, связанное с электрическим согласованием, выполненным в соответствии с условием (2) $[R_{in}(R_g + R_n)] / [R_g(R_{in} + R_g + R_n)]$, поскольку подставка приведенных выше реальных параметров приводит к значению менее 0.001 дБ, что вне сомнений, является приемлемым.

Не менее важным фактором, определяющим предельно достижимые параметры акустотермометров, является акустическое согласование. Важность акустического согласования следует из большой разницы импедансов материала преобразователя (около 3 500 000 г см/с) и (около 150 000 г см/с) для биообъектов, при которой без согласования возникает существенное отражение — около 90%, приводящее к потерям (10 дБ), для компенсации которых необходимо увеличение времени интегрирования в 100 раз, что по-видимому, неприемлемо для большинства применений. В действительности же потери чувствительности будут еще большими из-за существенного уменьшения эффективной полосы частот принимаемых сигналов. Различные аспекты акустического согласования пьезопреобразователей разрабатывались в целом ряде работ [3–5], среди которых можно выделить работу [5], где исследованы системы согласования, состоящие из одного или двух согласующих слоев. В наших исследованиях при согласовании акустотермометров, как правило, использовались два слоя, поскольку таким образом удается обеспечить большую, чем с одним слоем, широкополосность. На рис. 2 представлены зависимости спектральной плотности шума, полученные в нагруженном (на объект с импедансом 150 000 г см/с) режиме, а на рис. 3 — в ненагруженном. Сплошные линии с маркерами представляют экспериментальные зависимости, а штриховые — результа-

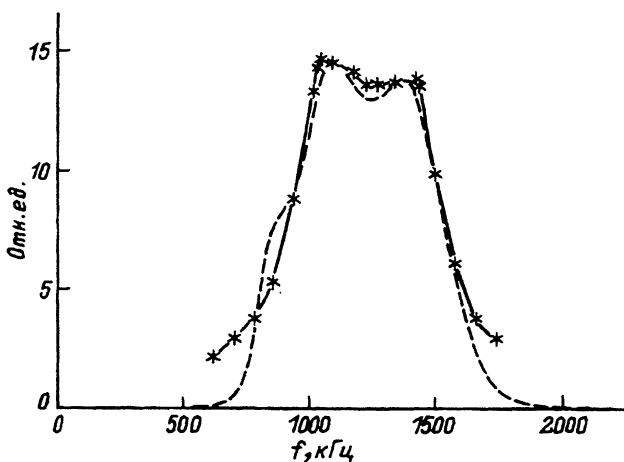


Рис. 2.

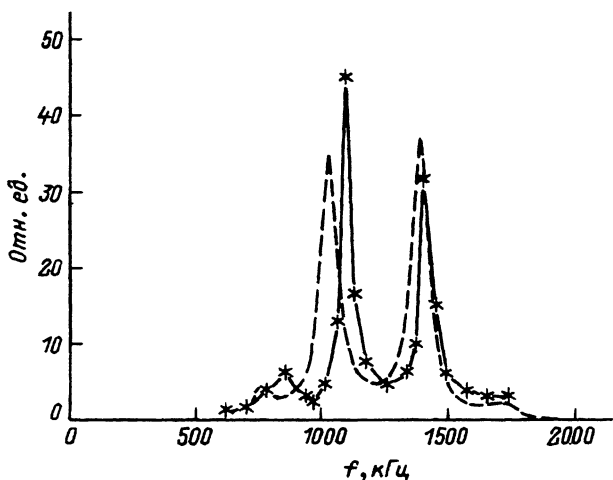


Рис. 3.

ты теоретических расчетов по методу, изложенному в [5]. Как видно, и для нагруженного, и для ненагруженного режимов наблюдается неплохое согласование экспериментальных и теоретических результатов, что свидетельствует о применимости методов, развитых в [5], для описания данной системы. При этом эксперименты и численный анализ показали, что для обеспечения удовлетворительного согласования достаточны не слишком большие точности изготовления толщин согласующих слоев — около 10%.

Из зависимостей, полученных в нагруженном состоянии (рис. 2), следует, что эффективная полоса принимаемых частот для данного экземпляра акустотермометра составляет около 800 кГц. Подстановка этого значения в вышеприведенное выражение флуктуационной чувствительности (1) при постоянной времени интегрирования 5 с приводит, как уже отмечалось, к значению $\Delta T = 0.15^\circ \text{C}$. Сравнение этой

величины с реализуемым в эксперименте значением флуктуационной чувствительности $\Delta T = 0.3^\circ \text{C}$ показывает, что последняя превышает теоретический предел в два раза; это указывает на наличие в акустотермометре потерь, составляющих в сумме около 3 дБ.

То обстоятельство, что исследуется пьезопреобразователь акустотермометра, позволяет провести измерения потерь преобразования особым, специфическим для акустотермометра, образом. Идея измерения основана на следствии флуктуационно-диссипационной теоремы, по которой потери преобразования должны приводить к появлению дополнительного шума, который должен регистрироваться акустотермометром. Поскольку наиболее вероятным местом локализации потерь является пьезопреобразователь с согласующей системой, то должна наблюдаться прямо пропорциональная зависимость показаний акустотермометра от температуры преобразователя с согласующей системой, по величине которой и можно судить о величине потерь. Для проверки такой возможности были выполнены эксперименты, результаты которых представлены на рис. 4 и 5. На рис. 4 приведены зависимости от времени показаний акустотермометра T_a (шумовая кривая 1)

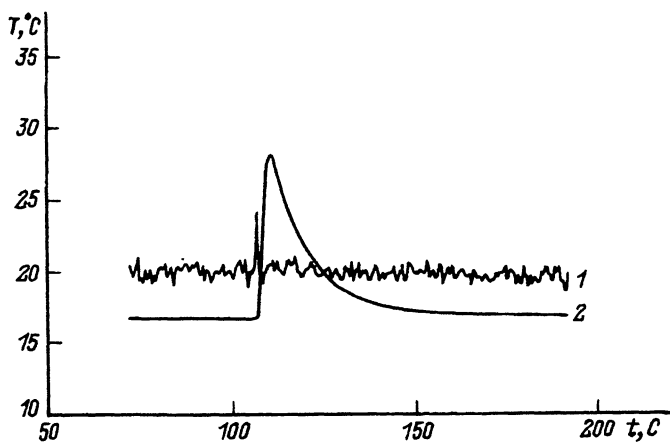


Рис. 4.

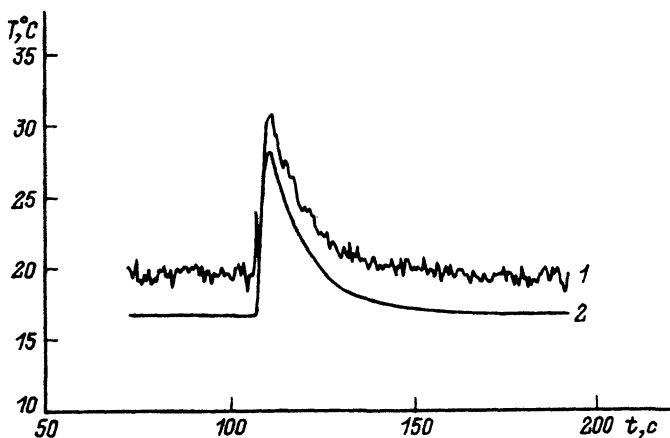


Рис. 5.

и температуры преобразователя с согласующей системой T_2 (кривая 2). Во время проведения эксперимента в поле зрения преобразователя акустотермометра располагалось "черное" в акустическом смысле тело с постоянной температурой. Как видно из представленных зависимостей, при увеличении температуры преобразователя с согласующей системой наблюдается похожее увеличение показаний акустотермометра. Степень подобия представленных зависимостей иллюстрируется зависимостями, представленными на рис. 5, на котором приведены зависимости от времени температуры преобразователя с согласующей системой (кривая 2) и разность $T_a - kT_n$ (кривая 1), где k — коэффициент, подбираемый по методу наименьшего среднеквадратичного отклонения полученной зависимости от среднего значения. Как видно, на разностной кривой зависимости от температуры преобразователя не наблюдается, значение коэффициента k для данной реализации составляет 0.9. Анализ довольно большого количества аналогичных экспериментов показывает, что компенсация влияния температуры преобразователя и согласующей системы наблюдается при значениях k , заключенных в пределах от 0.6 до 1.2, в зависимости от экземпляра акустотермометра. Из значения параметра k несложно вычислить потери преобразования. Для этого рассмотрим выражение для температуры, регистрируемой акустотермометром [2]. Используем выражение для одномерного случая, что, как несложно показать, не приводит в данном случае к ограничению общности,

$$T_a = \int_0^{\infty} T(x)\alpha(x) \exp[-x\alpha(x)] dx, \quad (3)$$

где $T(x)$ и $\alpha(x)$ — температура и акустическое затухание в среде, находящейся в поле зрения акустотермометра.

Пусть преобразователь с согласующей системой занимает область пространства от 0 до L_n . Тогда интеграл (3) можно разделить на две части

$$\int_0^{L_n} T(x)\alpha(x) \exp[-x\alpha(x)] dx + \int_{L_n}^{\infty} T(x)\alpha(x) \exp[-x\alpha(x)] dx. \quad (4)$$

Первая часть — это вклад в T_a температуры преобразователя и согласующей системы ΔT_n , а вторая — всего остального пространства, расположенного в поле зрения преобразователя акустотермометра.

При данном рассмотрении температуры преобразователя и согласующей системы могут приниматься одинаковыми, так как эти элементы находятся в плотном тепловом контакте и масштаб времени достаточно велик для установления в этой системе единой температуры (характерные времена наблюдаемых процессов составляют > 10 с, что существенно превышает время установления теплового равновесия, определяемое известным выражением $\tau = L^2/\chi < 1$ с, где L — размер системы, составляющий около 3 мм, а χ — температуропроводность материалов ее составляющих), тогда

$$\Delta T_n = T_n \int_0^{L_n} \alpha(x) \exp[-x\alpha(x)] dx, \quad (5)$$

что может быть представлено в виде $\Delta T_n = T_n \bar{\alpha} L_n$, где $\bar{\alpha}$ — среднее по размеру преобразователя с согласующей системой L_n затухание звука.

Поскольку суммарные потери преобразователя и согласующей системы равны $-\exp(-\bar{\alpha} L_n)$, а производная $\partial T_a / \partial T_n = \bar{\alpha} L_n = k$, то окончательно получаем, что искомые потери равны $\exp(-k)$. Подстановка значения $k = 0.9$ приводит к значению 3.9 дБ, что близко к оценке потерь, полученных ранее (3 дБ) из сравнения достигнутой чувствительности с предельно достижимой. Это показывает возможность измерения качества пьезопреобразователей путем регистрации чувствительности показаний акустотермометра к температуре преобразователя с согласующей системой.

Анализ величины полученных таким образом потерь преобразования, выполненный на основе теоретических расчетов [5], с учетом взятых из литературы значений акустических затуханий в согласующих слоях не позволил, однако, объяснить всей величины наблюдаемых потерь, что приводит к выводу о наличии в системе каких-то неучтенных механизмов потерь, например связанных с трансформацией воли на неоднородностях акустических склеек и т.д.

Возможность компенсации влияния на показания акустотермометра изменений температуры преобразователя, которая показана на рис. 4 и 5, позволяет, как подтвердили специальные исследования, проводить измерения при достаточно сильных изменениях температуры преобразователя (до 10° С), что особенно важно при исследованиях биообъектов.

В заключение сформулируем основные полученные результаты.

1) На основе анализа электрического согласования показано, что наиболее подходящим материалом для пьезопреобразователей акустотермометров являются ниобат и танталат лития.

2) Экспериментально показана возможность эффективного акустического согласования пьезопреобразователя акустотермометра с биообъектами с суммарными потерями менее 4 дБ в полосе частот, составляющей 60–70% от несущей. Это позволило реализовать флуктуационную чувствительность около 0.3° С при времени интегрирования 5 с.

3) На основе исследования чувствительности показаний акустотермометра к температуре преобразователя предложен способ измерения суммарных потерь пьезопреобразователя и согласующей системы.

Список литературы

- [1] Миргородский В.И., Пасечник В.И., Пешин С.В. и др. // ДАН СССР. 1987. Т. 297. № 6. С. 1370–1372.
- [2] Бабий В.И. // Морские гидрофизические исследования. Севастополь, 1974. № 2 (65). С. 189–192.
- [3] Sittig E.K. // IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics. 1969. Vol. SU-16. N. 1. P. 2–10.
- [4] Kossoff G. // IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics. 1966. Vol. SU-13. N. 1. P. 20–30.
- [5] Goll J.H. // IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics. 1979. Vol. SU-26. N. 6. P. 385–393.