АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2008, том 54, № 6, с. 998–1002

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.8:519.6

КОРРЕЛЯЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ СУММАРНЫХ ЗАДЕРЖКАХ

© 2008 г. В. И. Миргородский, В. В. Герасимов, С. В. Пешин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
141190 г. Фрязино Московской области, пл. академика Введенского 1
E-mail: vim288@ms.ire.rssi.ru Тел. +7 496 5652686

Поступила в редакцию 18.06.08 г.

Выполнен анализ корреляции акустических сигналов, принимаемых из одной области пространства, разнесенными в пространстве датчиками излучения. С помощью дополнительных экспериментов показано, что причиной возникновения корреляции сигналов на суммарных задержках являются интерференционные эффекты в тепловом акустическом шуме в пространстве между акустическими датчиками.

PACS: 43.35.Wa, 43.60.Pt, 43.80.Qf

Относительно недавно, в процессе исследований корреляционных свойств тепловых акустических шумов в работе [1] обнаружилось, что акустические сигналы, принимаемые от исследуемых объектов разнесенными в пространстве датчиками, имеют выраженные корреляции на суммарных задержках, соответствующих сумме расстояний от исследуемого объекта до приемников. Было высказано предположение, что явление связано с тепловыми шумами преобразователя и собственными шумами входного усилителя. В последующей [2] работе это явление объяснялось аналогично – на основе учета собственного теплового излучения пьезопреобразователей. Данное сообщение посвящено прояснению природы этого явления. Ниже схематически представлена экспериментальная конфигурация, в которой наблюдалось данное явление.

Как показано на рис. 1, два акустических приемника направлены на исследуемый объект, на границе которого с окружающим пространством, из-за разницы акустических импедансов, имеется частичное отражение акустического излучения, так что излучение из одного приемника попадает в другой и, соответственно, обратно. Сигналы с выходов усилителей подаются на коррелятор.

Пример корреляционной функции, полученной в такой конфигурации, при расстояниях от исследуемого объекта до приемников равных 12 см и 24 см, представлен ниже. Приемные преобразователи имели диаметр, составляющий 0.9 см, рабочую частоту около 1.8 МГц. Полоса принимаемых частот составляла около 50 КГц.

Как видно, на рис. 2 наблюдаются три пика, один из которых расположен вблизи нулевой задержки, а два других расположены симметрично относительно начала координат на задержках ±36 ед. Расчет показал, что с учетом темпа сбора данных, равного 1.45×10^5 Гц (предварительно производилось снижение частоты сигнала), задержки ±36 ед., на которых расположены пики, соответствуют сумме расстояний от приемников до объекта.

Для выяснения природы этого эффекта, на первом этапе работы было исследовано соотношение тепловых шумов на входе усилителя, тепловых шумов преобразователя и собственных, приведенных к входу, шумов усилителя. В результате прямых измерений (анализатором импедансов HP-4194A) действительной части электрического импеданса преобразователя, подключенного к входу усилителя, было получено, что в полосе регистрируемых частот действительная часть импеданса пьезопреобразователя, нагруженного на воду, составляла значение около 4 КОм. Таким об-

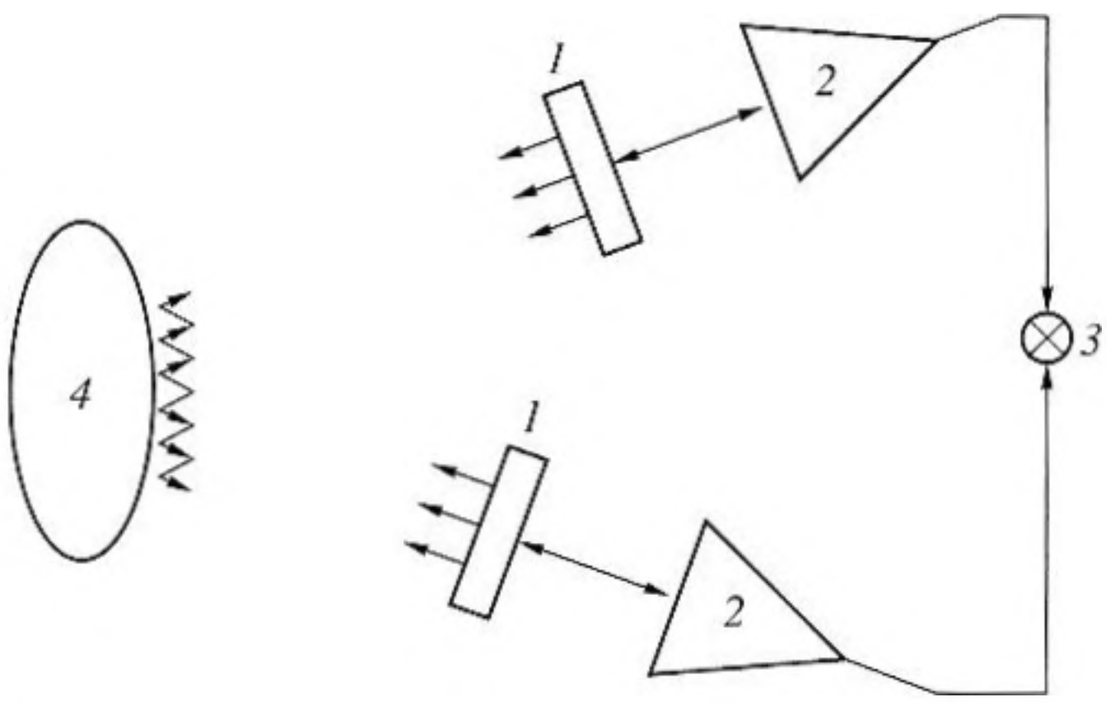

Рис. 1. Схематическое изображение геометрии эксперимента. *1* – пьезопреобразователи, *2* – усилители, *3* – коррелятор, *4* – исследуемый объект.

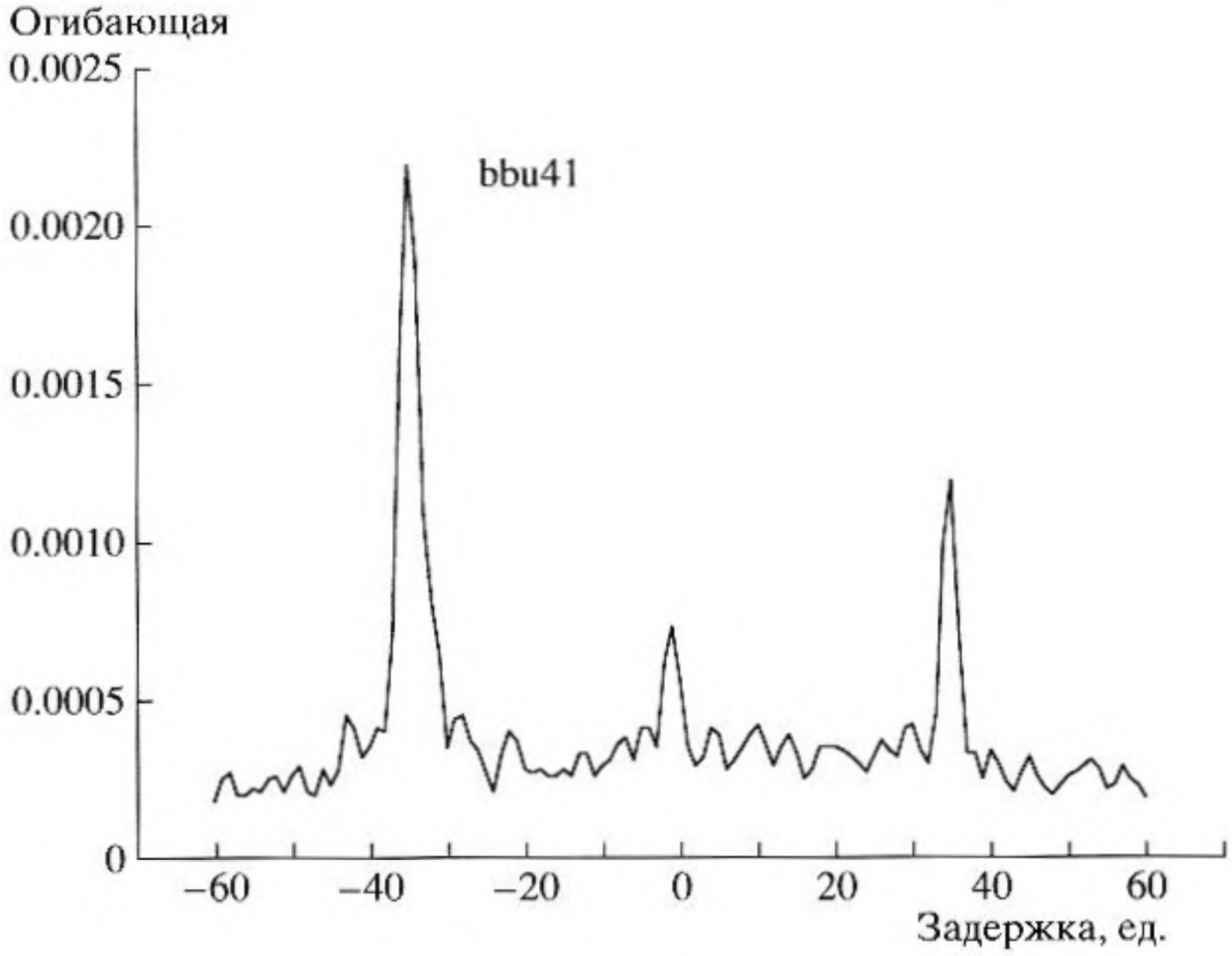

Рис. 2. Пример огибающей нормированной корреляционной функции, полученной в экспериментальной конфигурации, представленной на рис. 1. С учетом темпа сбора данных 1.45×10^5 Гц и скорости звука в воде 1.5×10^3 м/с, 1 ед. задержки соответствует ≃1 см. Полоса регистрируемых частот около 50 КГц, время накопления сигналов – 200 сек.

разом, величина спектральной плотности теплового шума (джонсоновского) на входе усилителя равная, как известно, $4kTR$ (где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, R – действительная часть импеданса) составляет около 8 нВ/$\sqrt{\text{Гц}}$. В то же время собственный шум пьезопреобразователя, связанный с диссипативными потерями преобразования, был оценен по величине активной части импеданса преобразователя на воздухе, т.е. в состоянии, не нагруженном на воду. Так как преобразователь имел на фронтальной поверхности четвертьволновую согласующую пластинку, то в ненагруженном состоянии действительная часть импеданса преобразователя, в идеале, должна быть равна нулю. Однако измерения показали, что в рабочей полосе частот величина действительной части импеданса ненагруженного преобразователя составляет около 400 Ом, это соответствует спектральной плотности шума 2.5 нВ/$\sqrt{\text{Гц}}$, которая и может быть, по нашему мнению, оценкой собственных шумов преобразователя. После этого были измерены собственные шумы усилителя. В результате измерений оказалось, что спектральная плотность этого шума составила около 2 нВ/$\sqrt{\text{Гц}}$. Так как джонсоновский шум, шум диссипативных потерь преобразователя, а также и входной шум усилителя статистически независимы, то они суммируются как квадраты величин их напряжений. Поэтому можно утверждать, что шум на входе вызван, в основном, принимаемым тепловым акустическим излучением, так как вклад шума диссипативных потерь пьезопреобразователя и собственного шума усилителя в суммарную амплитуду шума составляет всего около 7%.

Рассмотрим теперь тепловой акустический шум в области между приемниками и исследуемым объектом. Поскольку тепловой акустический шум изотропен, то найдется такая его компонента, которая, отражаясь от входной поверхности первого приемника, далее отражается от исследуемого объекта и попадает на входную поверхность второго приемника, где происходит отражение, и сигнал распространяется обратно, к первому приемнику. Получается своего рода резонатор, и возникающая в результате интерференции мода акустических колебаний, включающая в себя стоячие волны, принимается обоими приемниками, сигнал от которых после усиления подается на коррелятор. Поскольку это колебание является частично общим для системы первый преобразователь – исследуемый объект – второй преобразователь, то наличие корреляции в сигналах, принимаемых первым и вторым приемниками не удивительно.

Если верно это предположение о природе наблюдаемого эффекта, то эффект должен иметь место и при исключении из системы, представленной на рис. 1 исследуемого объекта, так что приемники направлены своими чувствительными площадками друг на друга. Такой эксперимент был выполнен, и в результате после обработки сигналов были получены корреляционные функ-

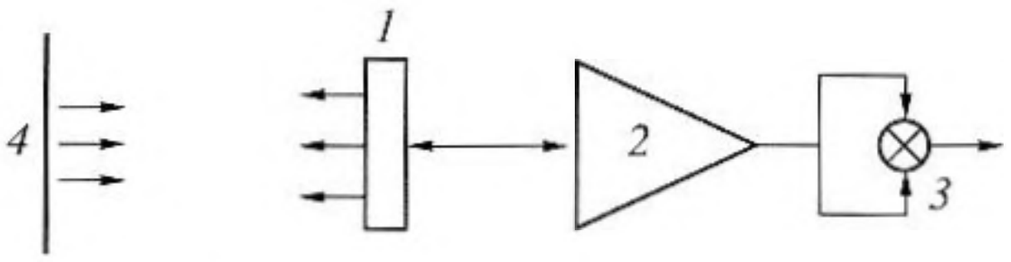

Рис. 3. Схема эксперимента с одним приемником. *1* – пьезопреобразователь, 2 – усилитель, *3* – автокоррелятор, *4* – отражатель.

ции такого же типа, как представленные на рис. 2. Задержки, на которых наблюдались корреляционные пики, также соответствовали расстоянию между приемниками, однако величины корреляционных пиков были существенно большими – до 0.06. Последнее обстоятельство не удивительно, так как в пространстве между параллельными входными поверхностями приемников добротность акустического резонатора может быть выше, чем в исходной системе "приемники – исследуемый объект", представленной на рис. 1.

Возможен и другой подход к прояснению происходящих процессов. Он основан на модельном эксперименте, в котором используется только один приемник акустического излучения в геометрии, в которой на некотором расстоянии от приемника расположено акустическое зеркало. Схема эксперимента представлена на рис. 3. Получающийся в этой конфигурации акустический сигнал преобразовывался пьезопреобразователем в электрический сигнал, который затем подвергался автокорреляционной обработке.

В результате эксперимента, проведенного в этой конфигурации при расстоянии до отражателя около 3.7 см, была получена автокорреляционная функция следующего вида:

Как видно, на графике рис. 4 наблюдается центральный пик величиной около 1 при нулевом сдвиге и симметрично расположенные, практически эквидистантные пики ±250 ед., ±500 ед. и т.д. С учетом темпа сбора данных, а также того, что звук проходит путь от пьезопреобразователя до отражателя дважды, получаем значение этого расстояния около 3.75 см, что близко к тому, что и было установлено.

Центральный пик, как показывает анализ, связан в основном с приемом фонового излучения, имеющего в данном случае тепловую природу.

Как видно на рис. 4, наблюдается картина, похожая на ту, что наблюдалась с двумя приемниками (рис. 2): так же наблюдаются корреляции на суммарных задержках, в данном случае соответствующих времени распространения звука от преобразователя до отражателя и обратно.

При анализе ситуации с одним приемником оказалось плодотворным использовать анализ частотного спектра принимаемого сигнала. На рис. 5 представлена частотная зависимость действительной части импеданса пьезопреобразователя, измеренная на пьезопреобразователе, аналогичном тому, что использовался в экспериментах. Преобразователь был расположен в воде, на расстоянии 2.4 см от акустического отражателя, подобно изображенному на рис. 3.

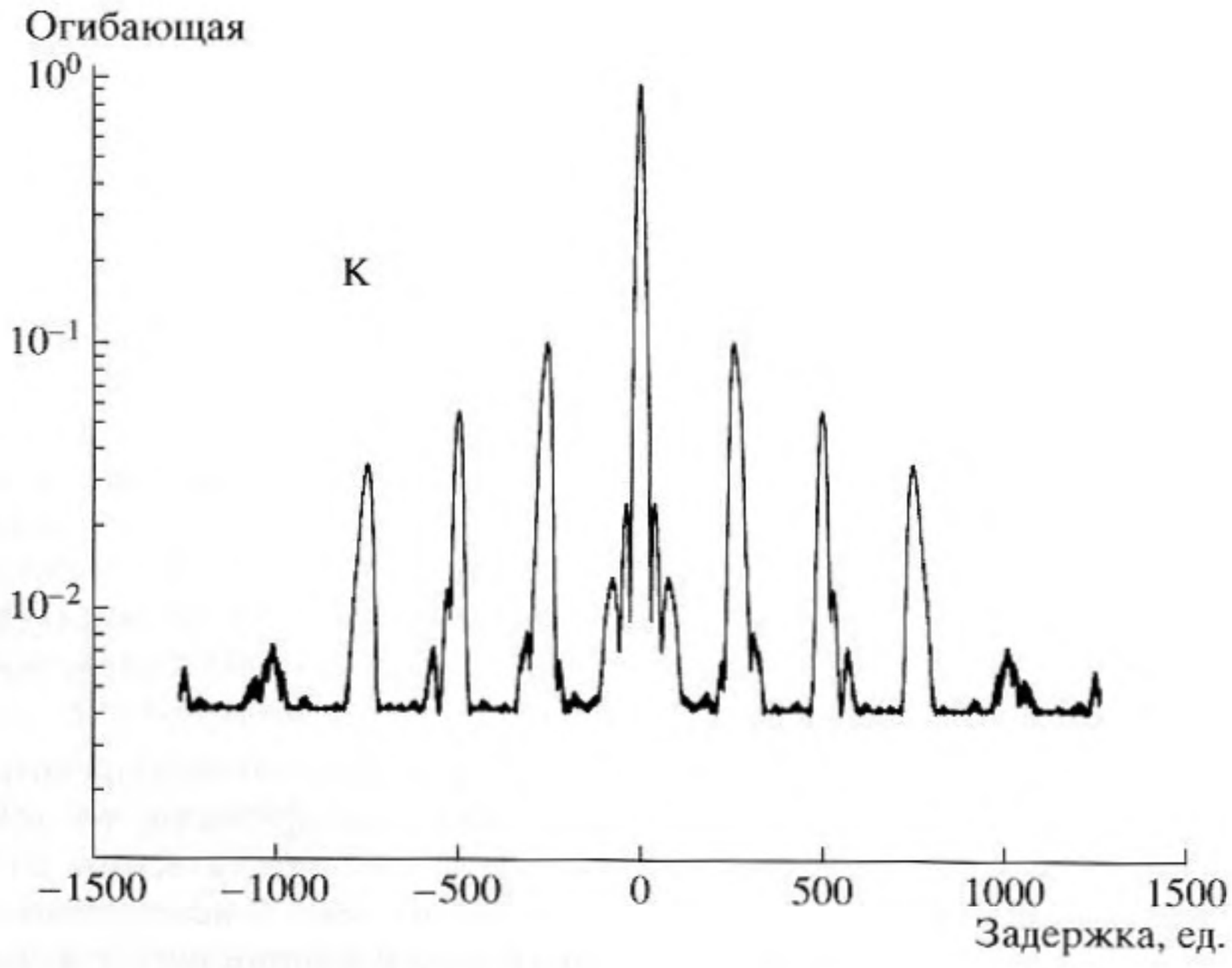

Рис. 4. Пример огибающей нормированной автокорреляционной функции, полученной в экспериментальной конфигурации, представленной на рис. 3. С учетом темпа сбора данных 5 МГц, 1 ед. задержки соответствует ≈0.03 см. Полоса регистрируемых частот около 50 КГц, время накопления сигналов – 4 сек.

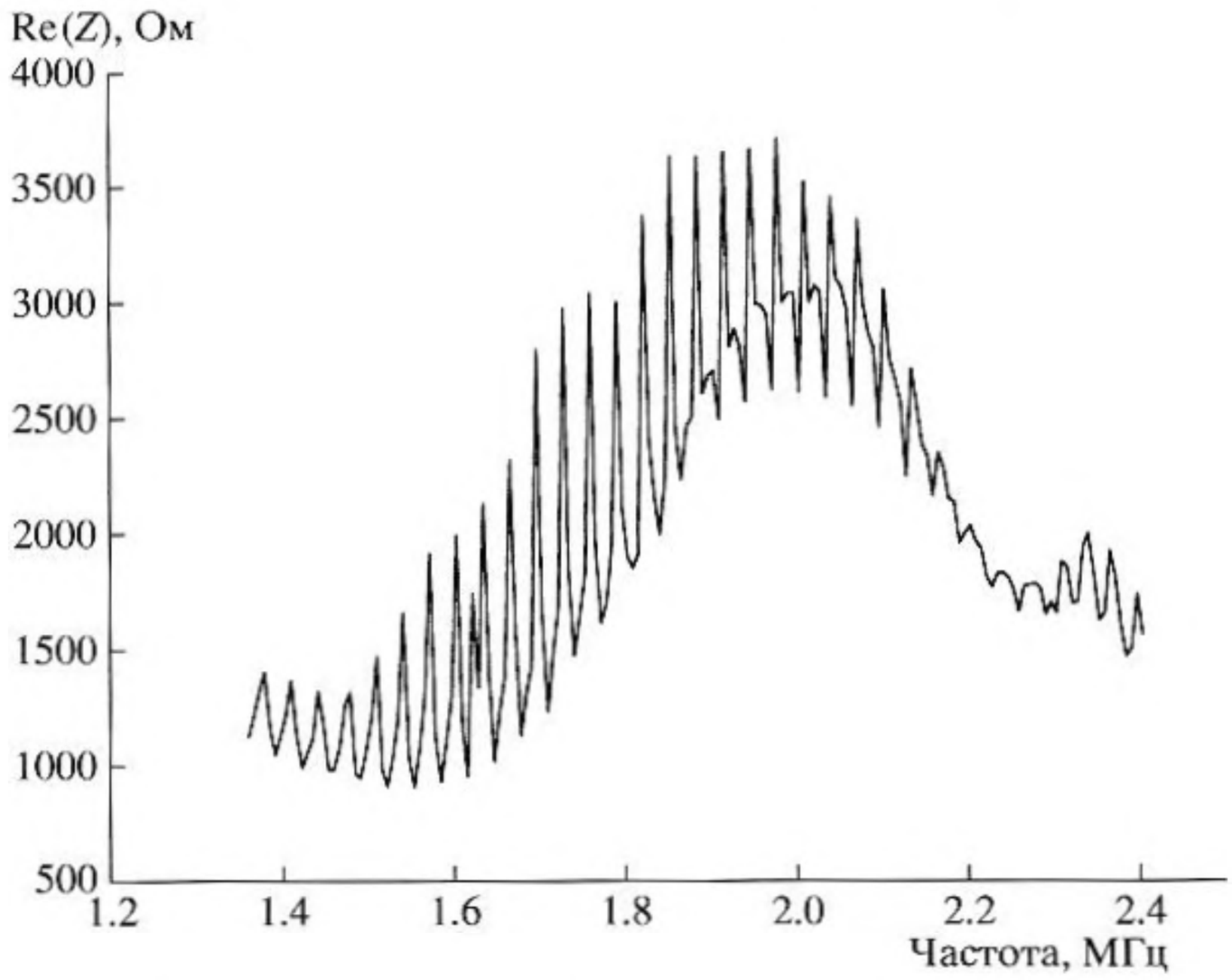

Рис. 5. Действительная часть импеданса преобразователя, в 2.4 см от которого расположен акустический отражатель.

Как видно, на частотной зависимости импеданса наблюдается относительно плавный пик, соответствующий основному резонансу пьезопреобразователя с осцилляциями, период которых составляет около 31 КГц.

Понятно, что если частотная зависимость действительной части импеданса преобразователя имеет осциллирующий вид, то похожий характер имеет и джонсоновский шум на входе усилителя – величина его спектральной плотности, как известно, пропорциональна квадратному корню из величины действительной части импеданса. Так как автокорреляционная функция сигнала получается с помощью обратного Фурье преобразования от спектра его мощности, то вид этой функции будет содержать пики, соответствующие частотам осцилляций спектра. Такое преобразование было сделано, в результате была получена корреляционная функция, представленная на рисунке ниже.

Как видно на рис. 6, наблюдается не плохое подобие полученной зависимости результатам эксперимента, приведенным на рис. 4, что, по нашему мнению, подтверждает сделанное предположение о природе наблюдаемого эффекта.

Таким образом, показано, что для проявления эффекта корреляции сигналов на суммарных задержках достаточно, чтобы имелись осцилляции в спектральной зависимости действительной части импеданса приемного преобразователя или, что то же самое, интерференция (переотражения) акустических сигналов между приемными поверхностями преобразователя и какими-либо объектами в окружающем пространстве.

Следует отметить, что эксперимент с одним приемником, направленным в сторону отражателя, как показано на рис. 3, делался и при больших расстояниях от приемника до отражателя. В частности, в эксперименте, выполненном при расстоянии 87 см, наблюдался относительно слабый корреляционный пик с относительной величиной около 8×10^{-6}. Относительная величина осцилляций в спектре принимаемого звука в этом случае составляла около 4%. Столь малая величина осцилляций (и, соответственно, корреляции), по-видимому, связана со значительными потерями акустического сигнала (вероятнее всего, дифракционными) в промежутке от приемника до отражателя. Это свидетельствует о малой добротности резонатора, реализующегося в данной конфигурации, что позволяет сделать вывод, что эффект корреляции сигналов на суммарных задержках наблюдается даже при весьма слабых отражениях акустических сигналов между приемниками и окружающей их средой. Чем меньше уровень отраженных акустических сигналов, тем большее время накопления необходимо для обнаружения корреляций в принимаемых сигналах.

Кратко сформулируем суть механизма возникновения корреляций между сигналами на суммарных задержках: он основан на проявлении спектральных и временных особенностей в тепловом акустическом шуме, возникающих из-за переотражений и интерференции тепловых акустических волн в пространстве между приемниками и их окружением.

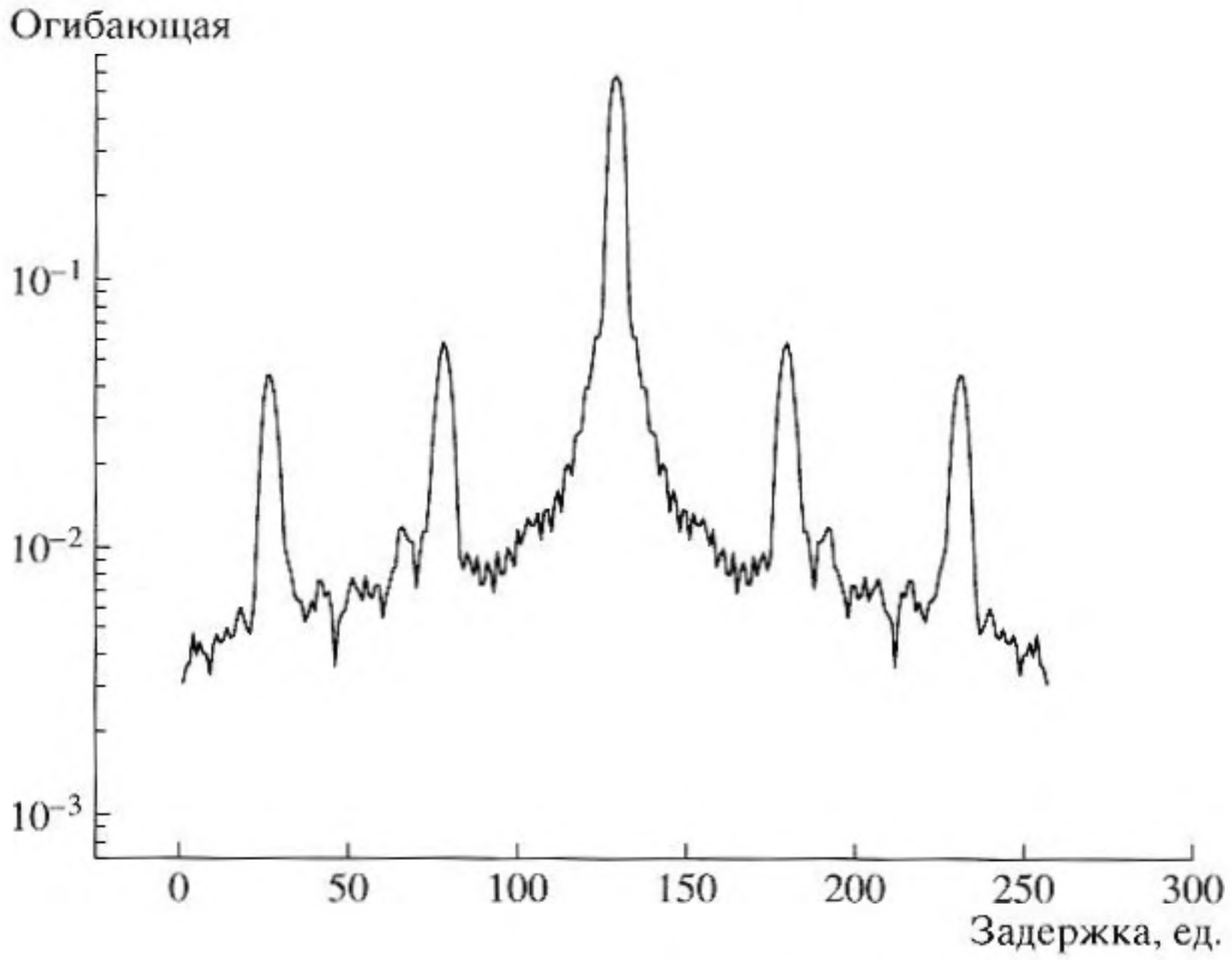

Рис. 6. Огибающая нормированной корреляционной функции, полученная из спектра, представленного на рис. 5, 1 ед. задержки соответствует 1 см.

В заключение отметим, что эффект корреляции сигналов на суммарных задержках, как представляется, не должен осложнять процессов корреляционной томографии, так как величины задержек сигналов в этом случае существенно превышают величины разностных задержек, используемых при корреляционной томографии. Отметим так же, что эффект корреляции сигналов на суммарных задержках может иметь и прикладное значение, в частности, для определения расстояний от приемников до объектов в ситуациях, когда излучение зондирующих сигналов не желательно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Буров В.А., Дариалашвили П.И., Евтухов С.Н., Румянцева О.Д.* Экспериментальное моделирование процессов активно-пассивной термоакустической томографии // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 3. С. 298–310.

2. *Миргородский В.И., Герасимов В.В., Пешин С.В.* Экспериментальные исследования особенностей пассивной корреляционной томографии источников некогерентного акустического излучения мегагерцового диапазона // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 5. С. 710–715.

Correlation of Acoustic Signals at Total Delays

V. I. Mirgorodskii, V. V. Gerasimov, and S. V. Peshin

Institute of Radio Engineering and Electronics, Fryazino Branch, Russian Academy of Sciences, pl. Vvedenskogo 1, Fryazino, Moscow oblast, 141190 Russia

e-mail: vim288@ms.ire.rssi.ru

Abstract—Correlation of acoustic signals received by spatially separated transducers from a single spatial region is analyzed. By additional experiments, it is shown that the origin of signal correlation at total delays lies in the interference effects that occur in thermal acoustic noise in the space between the acoustic transducers.