

12

©1993 г.

О ФИЗИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ МАТЕРИАЛОВ И СРЕД К ВОЛНОВЫМ ПРОЦЕССАМ

А.А.Кальнин, Г.Шаббаз

Новое содержание обретают опыты с фигурами Хладни, если элементы этих фигур рассматривать как адаптивные неоднородности, обладающие активностью. Эта активность проявляется в увеличении колебательной добротности среды именно для той моды, под влиянием которой неоднородности возникли. Эффект памяти колебательной моды имеет значение для создания преобразовательных устройств с адаптивным управлением, в том числе с обучением.

Введение

Это исследование вновь обращает нас к старым опытам Хладни, демонстрирующим поразительное разнообразие фигур, возникающих вследствие перераспределения частиц на поверхности колеблющейся горизонтальной пластины [1]. В зависимости от мест прижима пластины, по которой проводит экспериментатор скрипичным смычком, а также от места наложения смычка возбуждается та или иная мода колебаний, которую фигуры визуализируют. Подобный метод визуализации колебательной моды не потерял значения и в наши дни. Заметим, однако, что фигуры Хладни, выполняя столь полезную функцию, остаются все же пассивными в колебательной динамике, так как изначально масса частиц, создающих фигуры, незначительна и не искажает колебательный спектр.

В последующем изложении введен новый элемент в опыты с фигурами Хладни: фигуры рассмотрены как специфические адаптивные неоднородности, возникающие в средах с колебательным движением. В чем состоит активность неоднородностей и есть предмет настоящего изучения.

Это уже третий случай обращения к старым опытам, которые оказали неопенимую услугу введению в физику открытых систем с иерархической эволюционной динамикой. Ранее [2,3] была продемонстрирована активность фигур, которые возникали под влиянием конвективных течений Рэлея-Бенара. Фигуры могли возникнуть, например, вследствие перераспределения твердых частиц на дне сосуда, а активация их перемещения могла быть вызвана с помощью механической вибрации. В такой открытой системе, имеющей оперативную (потoki жидкости) и консервативную (потoki частиц) подсистемы, был продемонстрирован эффект

восстановления моды коллективных движений под влиянием адаптивных неоднородностей. Таким образом, “отпечаток” манеры движения жидкости в консервативной подсистеме действует как эффективное средство отбора во множестве вариантов коллективного движения. Фактически мы имеем дело с возникновением аттракторов эволюционных траекторий, а регулирование их весов открывает возможность создания систем с невычислительным (эмпирическим) принципом обучения [4].

Другую возможность создания открытой системы, в которой возникают долгоживущие адаптивные неоднородности, подсказал когерер — прибор, сыгравший ключевую роль в изобретении радиотелеграфа [5]. Как выяснилось при детальном исследовании [6], в электрокогезионных средах (в простейшем случае это множества неплотно прилегающих проводящих частиц) при пропускании электрического тока между электродами, опущенными в среду, возникает и медленно эволюционирует сложная ветвящаяся система электрокогезионных коммуникаций. Эти хорошо геометрически оформленные неоднородности в макроскопически однородных средах являются памятью токопрохождения и создают избирательное отношение системы к внешним сигнальным воздействиям. Необратимая эволюция системы электрокогезионных коммуникаций при упорядоченных токовых воздействиях на электродах позволяет добиться условной ответной реакции системы на токовые стимулы. Таким образом, возникает возможность создания нейроподобной информационной сети с обучением, в которой оптимизация информационной структуры происходит путем ее естественной физической эволюции.

Как и в предыдущем примере, в системе с электрическим сцеплением проводящих частиц имеются оперативная (поток зарядов) и консервативная (структурные изменения материала в области контактирования) подсистемы. В более общем случае предметом изучения становится открытая система с иерархической эволюционной динамикой, именуемая рефлексивной [3]. Самоорганизация физической структуры и самооптимизация информационной структуры являются атрибутами подобных систем. Процессы в оперативной подсистеме запечатлеваются в консервативной подсистеме, которая выполняет функцию “конструкции”. Поскольку полезный процесс является творцом “конструкции”, то возникает необычный в инженерной практике эффект самозалечивания повреждений этой конструкции, если они не превышают критических. Такой своеобразный “иммунитет” является результатом перехода к идее адаптивных отношений полезный процесс — элементы конструкции в создании преобразовательных сред.

В настоящей работе ставится задача исследования физической адаптации материалов (сред) к волновым процессам. Здесь, однако, возникают трудности: необходима система, в которой действие какого-либо нелинейного механизма приводило бы к направленным потокам масс (зарядов), создающим адаптивные неоднородности. Иными словами, необходим механизм приведения в действие медленной (консервативной) эволюционной подсистемы. В опытах Хладни таким механизмом является перетекание твердых частиц с областей пучностей волн к узловым областям под влиянием гравитации. Поскольку появление фигур является следствием физической адаптации открытой системы к акустическим воздействиям, то следует ожидать преимущества существования именно

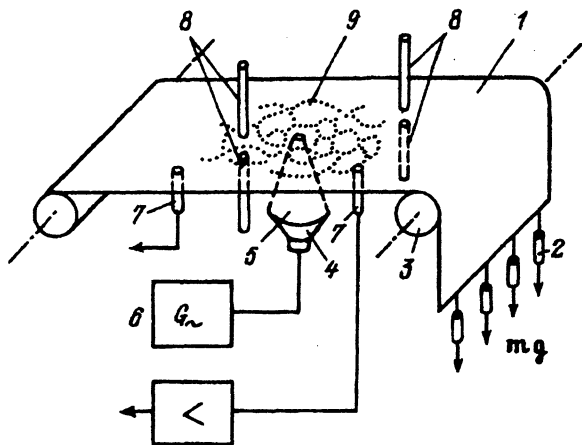


Рис. 1. Схема установки для наблюдения образования адаптивных неоднородностей под влиянием акустических колебаний и изучения их преобразовательной активности.

той колебательной моды, которая побудила возникновение фигур. Эта эволюционная гипотеза обратимости действия в общем виде сформулирована в [3]. Таким образом, целью настоящей работы является предоставление экспериментальных свидетельств, подтверждающих эту гипотезу.

Конструкция установки и результаты наблюдений

Для обнаружения активности фигур Хладни необходимо было обеспечить соразмерность колеблющихся масс быстрой и медленной эволюционных подсистем. В связи с этим в установке, схема которой приведена на рис. 1, в качестве звуконосителя использована тонкая мембрана 1 — бумажная диаграммная лента, перекинутая через валик 2 и однородно натянутая с помощью грузов 3. На поверхность мембраны однородно рассеивался речной песок со средним диаметром частиц 0.2 мм. Формат образованной таким образом мембраны составлял 25 × 18 см; сила ее натяжения 20 Н/см, удельный вес бумажной ленты и песчаного покрытия 0.005 и 0.008 мг/см² соответственно.

Возбуждение мембраны производилось с помощью динамической головки 4, снабженной коническим компрессором 5 с суженным отверстием диаметром 5 мм, расположенным со стороны нижней поверхности мембраны на расстоянии 1 мм от нее. Это позволяло производить неконтактное локальное возбуждение мембраны. Исследования показали также возможность контактного возбуждения мембраны, что позволяло применять динамические головки меньшей мощности. Питание динамических головок осуществлялось от генератора гармонических колебаний G_{\sim} 6.

Акустическим приемником 7 являлась конструкция, подобная конденсаторному микрофону. Приемник соединен с усилителем 8, снабженным прибором, регистрирующим интенсивность колебаний. Точки возбуждения и съема колебаний могли произвольно варьироваться. Были применены специальные тонкие эластичные зажимы 9, позволяющие изменять граничные условия.

На созданной установке были проведены три серии опытов, позволяющие вскрыть основные черты эволюции двухуровневой открытой волновой системы: исследование образования адаптивных неоднородностей и

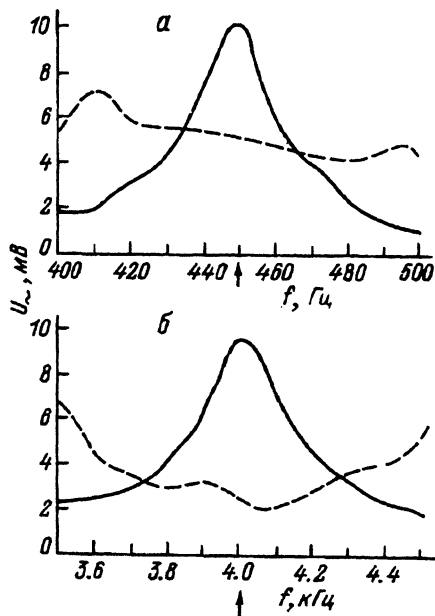


Рис. 2. Колебательные спектры до (пунктир) и после образования (сплошная линия) адаптивных неоднородностей. Частоты возбуждения при создании неоднородностей отмечены стрелкой.

их влияния на колебательный спектр мембраны; изучение ассоциативной преобразовательной реакции, получаемой в системе путем предварительной демонстрации частотных сигналов; изучение элементарных реакций системы, которые возникают вследствие акта обучения и могут рассматриваться как условный ответ.

В первой серии последовательность действий состояла в следующем. Производили однородный рассев твердых частиц на поверхности мембраны. Задавали позиции источника и приемника акустических колебаний. Затем производили анализ частотной характеристики передачи сигналов от источника к приемнику в режиме малого сигнала, т.е. не приводящего к заметному перераспределению частиц. Выбирали диапазон частот, в котором отсутствовали резко выраженные экстремумы на частотной характеристике: В пределах этого диапазона устанавливали фиксированную частоту генератора, затем замещали приемник колебаний на второй источник колебаний в той же позиции и создавали режим большого сигнала на источниках колебаний, который приводил к перераспределению массы частиц, т.е. образованию адаптивных неоднородностей. После их образования вновь в прежнюю позицию вместо источника ставили приемник, производили анализ частотной и фазовой характеристик передачи в режиме малого сигнала и осуществляли фотографирование соответствующих адаптивных фигур.

Результаты исследования представлены на рис. 2. Сопоставление малосигнальных спектров до (пунктир) и после (сплошные линии) образования неоднородностей показывает, что возникает адаптация системы к волновому сигналу. Адаптация проявляется в том, что после возникновения адаптивных неоднородностей на частотной характеристике передачи сигнала возникает пик, создающий свойство избирательности именно на той частоте, на которой неоднородности были созданы. На рис. 2, а, б этот эффект показан для двух значительно различающихся частот возбужде-

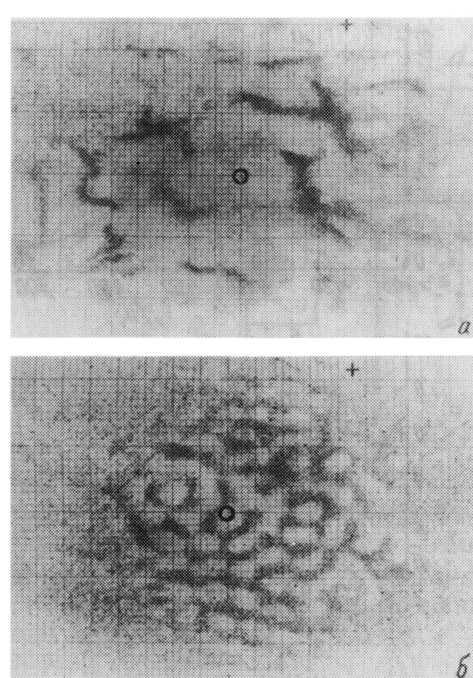


Рис. 3. Адаптивные неоднородности, возникающие при волновом возбуждении мембраны на частотах 450 Гц (а) и 4 кГц (б).

Позиции возбуждения и приема колебаний отмечены соответственно кружком и крестиком.

ния, а на рис. 3 приведены соответствующие им адаптивные конфигурации.

Если в позицию приемника при создании адаптивных фигур поставлен зажим, то на частотной характеристике передачи наблюдается минимум амплитуды на частоте возбуждения, создавший неоднородности.

Фазовый анализ выявляет воспроизведение фазы колебаний в точке приема колебаний, если опорной считать фазу источника колебаний.

Повторные эксперименты показывают возникновение альтернативных конфигураций в одних и тех же частотных и граничных условиях, что, видимо, обусловлено влиянием начальных неоднородностей распределения твердых частиц на мембране.

Во второй серии опытов было исследовано возникновение частотно-преобразовательной реакции системы. При этом преобразовательная структура возникала при одновременном воздействии на мембрану сигналами двукратных частот. Последовательность действий в этом случае была такова. Как и ранее, производили однородный рассев частиц, снимали малосигнальный спектр для произвольно заданных позиций источника и приемника и выбирали диапазоны частот без резких экстремумов. В выбранном низкочастотном диапазоне производили малосигнальное возбуждение мембраны на частоте f_1 и при этом производили анализ спектра сигнала приемника. Спектр содержал сигнал основной частоты f_1 и небольшое присутствие сигналов 2-й, 3-й и высших гармоник (рис. 4,а).

После этого приемник замещали вторым источником и производили последовательно возбуждение мембраны с помощью первого источника на выбранной частоте f_1 до возникновения заметных перераспределений масс. затем на кратной частоте nf_1 ($n = 2, 3, \dots$) производили возбуждение мембраны в позиции второго источника. Эти действия повторяли не-

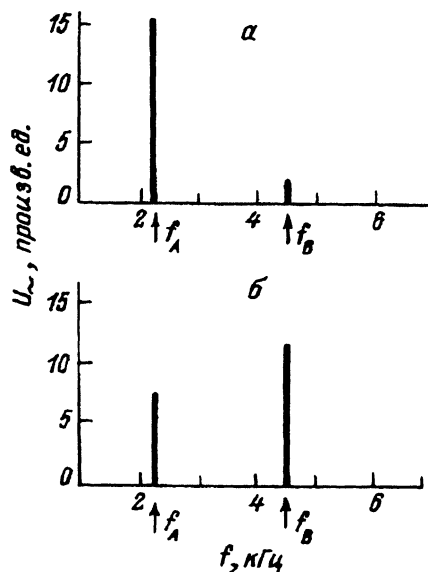


Рис. 4. Частотно-преобразовательная функция адаптивных неоднородностей, возникших под влиянием сигналов двух частот $f_A = 2.2$ кГц и $f_B = 4.4$ кГц, действовавших последовательно в двух различных областях мембраны A и B .

a — составляющие спектра, воспринимаемые в области B до возникновения неоднородностей; b — то же после их образования. Опрос (возбуждение в области A) производился на частоте f_A .

сколько раз до образования неопредельной адаптивной конфигурации из твердых частиц. Затем снова возвращали приемник в прежнюю позицию вместо второго источника. Создавали возбуждение мембраны на частоте f_1 с помощью первого источника, сохраняя прежний малосигнальный уровень и производили анализ спектра сигнала приемника.

Сравнение спектров до и после образования адаптивных фигур на одинаковом уровне возбуждения мембраны (рис. 4) показывает существенное обогащение спектра 2-й гармоникой, что может рассматриваться как частотно-преобразовательная реакция, навязанная системе путем демонстрации сигнала.

В третьей серии опытов на простом примере была продемонстрирована возможность обучения системы условной ответной реакции. При этом полагается обучение более чем одному ассоциативному сочетанию. Возможны различные варианты постановки опыта, например переадресация сигнала при изменении граничных условий. Для этого выбирали две позиции приемника колебаний I и II на периферической части мембраны и позицию источника, которые были фиксированы в опытах. Затем ставили два прижима в произвольно назначенные позиции между источником и приемниками колебаний, что создавало граничные условия A . Отмечали в этой ситуации уровни сигналов на приемниках в условиях однородного рассева частиц на выбранной частоте возбуждения $f_0 = 1.38$ кГц. Затем ставили зажимы в другие позиции (граничные условия B) и вновь отмечали уровни сигнала на приемниках. Уровни этих сигналов до обучения системы отмечены ниже в таблице.

Обучение условной переадресации сигнала производилось последовательно несколькими демонстрациями граничных условий и ответных реакций. Для этого создавались граничные условия A , в позицию приемника I ставили дополнительный источник, а в позицию II — зажим (режим молчания). Производили возбуждение мембраны в этих условиях. Затем создавали граничные условия B и ставили дополнительный источник в позицию II, а в позицию I — зажим. На этой же частоте произво-

Граничные условия	Сигнал отклика в позициях I, II, произв.ед.			
	до обучения		после обучения	
	I	II	I	II
A	7	5	10	3
B	8	7	4	12

дили возбуждение, частично изменявшее адаптивную конфигурацию из твердых частиц. Демонстрации последовательно повторяли несколько раз. Затем вновь в позиции I и II ставили приемники и производили анализ передачи малого сигнала при различных A и B граничных условиях. Результаты анализа приведены в таблице, из которых видно, что имеет место условная реакция адресации, т.е. преимущественного отклика приемников, переданного системе путем обучения.

Таким образом, неопредельная адаптивная конфигурация выполняет функцию условной адресации. Очевидно, что возможно обучение системы более сложному условному ответу, при использовании в процедуре обучения адресных, амплитудно-фазовых и частотных предьявлений. Отличительным свойством волновой системы с двойной динамикой является зависимость неопредельных адаптивных конфигураций от предыстории. Кроме того, по-видимому, возможна потеря устойчивости консервативной подсистемы (в нашем случае однородного распределения твердых частиц) в условиях изначального отсутствия отраженной волны, если имеется соответствующий автокаталитический механизм.

Заключение

Опыты с двухуровневой акустической системой безусловно демонстрируют лишь частный пример открытой системы с волновой иерархической эволюционной динамикой. Еще кажется проблематичным прикладное значение подобных систем. Впрочем, само утверждение, что материал может помнить звук, не кажется тривиальным. Однако более глубокое понимание процессов в волновых рефлексивных системах позволяет надеяться на интересные продолжения исследований. Аналогом акустической могли бы оказаться системы на магнитных или электромагнитных волнах, в том числе оптического диапазона. Волновой процесс, приводящий к возникновению адаптивных неоднородностей, может быть замещен на автоволновой [7].

Авторы выражают благодарность директору Центра микротехнологии и диагностики В.В.Лучинину за поддержку исследований по физике самоорганизующихся сред, а также глубокую признательность А.М.Давыдову, чье экспериментаторское мастерство способствовало успешному проведению исследования.

Список литературы

- [1] Стрет Дж.В. (Лорд Рэлей). Теория звука. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. 386 с.
- [2] Kalnin A.A. // Selbstorganisation und stimulierte Organisation kooperativer Nichtgleichgewichtssysteme. 1985. Heft 8. P. 93-96.
- [3] Кальнин А.А. // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы / Под ред. А.А.Васенкова и Я.А.Федотова. № 10. М.: Радио и связь, 1984. С. 95-110.
- [4] Kohonen T. Self-organisation and Associative Memory. Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer Verlag, 1984. 255 p.
- [5] Branly E. Variations de conductibilité sous diverses influence électriques at Fils. Imprimeurs-Libraires. Vol. CXI (CXII), 21. Paris: GanthierVillars, 1890.
- [6] Кальнин А.А., Кьяндская-Попова Е.Г., Фандеева Р.М. Радиоэлектроника и связь. 1993. № 1. С. 5-12.
- [7] Васильев В.А., Романовский Ю.М., Ятно В.Г. Автоволновые процессы / Под ред. Д.С.Чернавского. М.: Наука, 1987. 240 с.

С.-Петербургский государственный
электротехнический университет

Поступило в Редакцию
6 июля 1992 г.