

03;05;08;09;12

©1994 г.

## ДИСТАНЦИОННАЯ СВЧ РЕГИСТРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ДВУХСЛОЙНОЙ СРЕДЕ

*Ф.В.Бункин, Е.А.Виноградов, В.И.Голованов,  
Т.А.Ляхов, Н.В.Суязов, К.Ф.Шипилов*

Экспериментально зарегистрирован эффект резонансного отражения электромагнитной волны ( $\lambda \approx 8$  мм) от объемной ультразвуковой решетки, возбуждаемой из-под воды. Разработанная методика гетеродинирования позволила одновременно контролировать амплитуду и фазу отраженной волны в условиях как спокойной, так и взволнованной поверхности воды. Превышение полезного сигнала над уровнем шумов составляло  $\approx 10$  дБ при излучаемой мощности электромагнитной волны 30 мВт и давлении ультразвуковой волны в воздухе  $\approx 5$ –10 Па.

### Введение

Задача дистанционной регистрации локальных возмущений в средах с неоднородными свойствами имеет широкий круг приложений — от собственно физических (движение дефектов кристаллической решетки, например) до экологических (сдвиги слоев океанского дна, извержение подводных вулканов и т.п.). Приемная аппаратура для таких задач по необходимости помещается в среде с параметрами, резко отличными от параметров среды, в которую погружен источник возмущения, поэтому выбор физического механизма, эффективно передающего возмущение через границу раздела, является решающим. Для плотной проводящей среды (металлы, жидкие электролиты, морская вода) одним из оптимальных носителей информации о возмущении служит звук. Однако, распространяясь с малыми потерями в плотной среде, акустическая волна плохо проникает в воздушную среду, отражаясь от границы раздела, и сравнительно быстро затухает в воздухе, поэтому непосредственная регистрация ее на больших расстояниях от поверхности раздела практически невозможна.

В связи с этим для регистрации сигнала от погруженного в плотную среду акустического источника естественно предложить считывание его (например, лазерным пучком [1]) с границы раздела, колеблющейся с частотой  $f_{зв}$  под действием падающей из плотной среды

звуковой волны. Такое решение задачи, однако, может оказаться неудовлетворительным, поскольку амплитуда колебаний границы раздела весьма мала (для погруженного в воду источника, например, доли микрона), а в реальных условиях трудности считывания с нее усугубляются наличием нерегулярных колебаний (смещений) поверхности или ветровым волнением. При считывании лазерным пучком амплитуды указанных нерегулярных смещений часто оказываются значительно больше длины считывающей волны (например, в случае ветрового волнения), а соответствующее уширение спектра полезного сигнала намного больше величины его частотного сдвига ( $f_{зв}$ ) относительно "помехи" — излучения, отраженного от поверхности на несмещенной частоте (спектр "помехи" аналогично уширен). В результате спектры сигнала и значительно более мощной "помехи" полностью перекрываются, делая невозможным обычные методы выделения слабого сигнала. Вероятные пути решения подобной проблемы только намечаются и связаны с попыткой использования корреляционных моментов более высоких порядков [2]. При этом эффективность приложения лабораторных результатов и методов [2] к условиям морского волнения не очевидна: высота ветровых волн, как правило, больше длины волны звука, что вызывает появление соответствующего экспоненциально малого множителя, значительно снижающего эффективность метода, кроме того, уширение спектров в этих условиях примерно на два порядка больше. Считывание сигнала с поверхности можно осуществлять и СВЧ излучением [3]; здесь проблема перекрытия спектров сигнала и "помехи" снимается, хотя полезный сигнал по отношению к "помехе" значительно уменьшается. Более высокую эффективность в СВЧ диапазоне может обеспечить резонансный механизм считывания с объемной дифракционной решетки вариаций плотности, образованной акустической волной, прошедшей в воздух из плотной среды [4,5].

### 1. Оценка эффективности метода резонансного распределенного отражения

При фазовом согласовании акустической и электромагнитной волн

$$\lambda_{\text{эм}} - 2c_2 f_{\text{зв}}^{-1} \ll \lambda_{\text{эм}}^2 \cdot \max\{(4\pi)^{-1} \cdot \delta_2, (4H_2)^{-1}\} \quad (1)$$

небольшую величину коэффициента передачи звука в воздух (например, для воды по давлению  $T_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ ) компенсирует когерентное накопление отраженного сигнала на всей длине наведенной решетки,  $\approx \delta_2^{-1}$  или  $H_2$  (здесь  $\lambda_{\text{эм}}$  — длина считывающей радиоволны,  $c_2$  и  $\delta_2$  — скорость и коэффициент затухания звука в воздухе,  $H_2$  — удаление приемо-передающей СВЧ антенны от границы раздела). Без учета расходимости волновых пучков (в прожекторной зоне акустического источника и СВЧ излучателя) отношение мощности принятого СВЧ антенной полезного сигнала (на смещенной частоте  $f_{\text{эм}} + f_{\text{зв}}$ ) к излученной ею мощности (на частоте  $f_{\text{зв}}$ ) для резонансного механизма считывания равно

$$\mu = \left\{ \frac{\pi T_0 (\varepsilon - 1) \cdot [1 - \exp(-\delta_2 H_2)] P_{\text{зв}}}{2\delta_2 \lambda_{\text{эм}} P_{\text{атм}}} \right\}^2, \quad (2)$$

где  $P_{зв}$  — амплитуда давления в плотной среде вблизи границы раздела,  $P_{атм}$  — атмосферное давление,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость воздуха.

Теоретическая оценка эффективности двух механизмов считывания — с наведенной в воздухе решетки (резонансного) и непосредственно с границы раздела [4] показывает, что для сигнала от погруженного в воду акустического источника при  $\delta_2 H_2 \gg 1$  вклад резонансного механизма преобладает при  $\lambda_{эм} > 1$  см; если  $\lambda_{эм} \approx 4$  см ( $f_{зв} = 20$  кГц), то считывание с решетки на порядок эффективнее считывания с поверхности. Эта оценка остается справедливой с учетом расходимости волновых пучков и ветрового волнения, за исключением поправки на неполную когерентность решетки, обусловленную случайной модуляцией звука при прохождении через движущуюся поверхность [4]. Эта поправка, однако, может скомпенсировать резонансный выигрыш лишь при сильном ветровом волнении (скорость ветра  $> 10$  м/с). Кроме того, в отличие от поверхностного механизма считывание с решетки позволяет использовать “помеху” (излучение, отраженное от поверхности на несмещенной частоте) в качестве опорного сигнала (это особенно актуально в условиях волнения поверхности) при гетеродинном детектировании аналогично радиолокационным системам селекции движущихся целей с внешней когерентностью.

Предварительные результаты экспериментального исследования резонансного считывания с наведенной решетки [4,5] в модельной двухслойной среде подводным акустическим источником (амплитуда давления в воздухе 3–5 Па) продемонстрировали эффективность метода для дистанционной регистрации акустического возмущения. Ниже представлено экспериментальное исследование возможности считывания сигнала с решетки, создаваемой реальным акустическим источником, находящимся в толще плотной среды, в том числе и в условиях волнения границы раздела.

Оценка мощности принятого полезного сигнала для типичных условий эксперимента ( $\lambda_{эм} \approx 8$  мм,  $f_{зв} \approx 87$  кГц,  $\delta_2 \approx 2.7$  м,  $H_2 \approx 4$  м,  $P_{зв} \approx 10^5$  Па, апертуры акустической и электромагнитной антенн порядка 20 см) по формуле, обобщающей (1) на учет расходимости пучков [4], дает величину порядка 90 дБ по отношению к мощности, излучаемой антенной СВЧ. При мощности излучателя 30 мВт мощность полезного сигнала  $\approx 3 \cdot 10^{-14}$  Вт, что обеспечивало при использованном приемнике необходимый запас отношения сигнал/шум не менее 10 дБ и устойчивую регистрацию сигнала.

## 2. Экспериментальная схема

Установка, созданная для проведения эксперимента (рис. 1), состояла из трех основных частей: ультразвукового генератора, излучатель которого размещен в ванне с водой, генератора электромагнитного излучения миллиметровых волн и приемо-регистрирующей аппаратуры того же диапазона. Вспомогательная аппаратура включала вибратор для возбуждения волнения на водной поверхности, приемники-зонды ультразвука и детекторные головки для контроля уровня мощности генераторов и оценки пространственного распределения полей как в

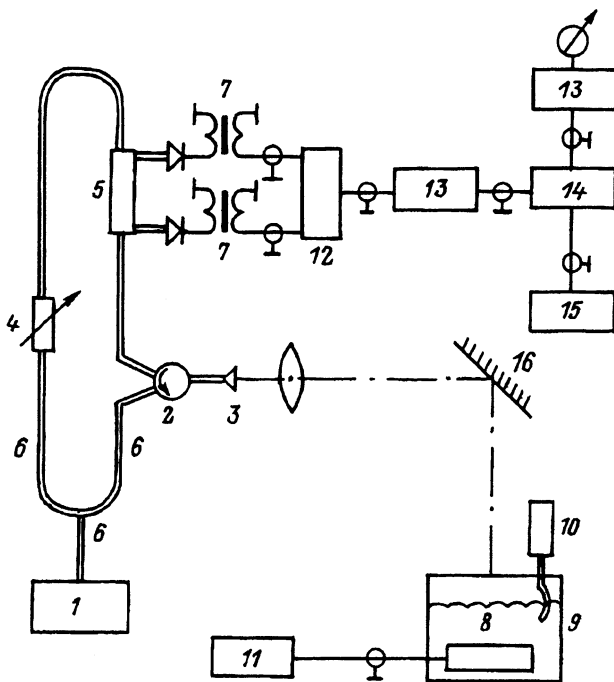


Рис. 1. Схема эксперимента по резонансному отражению электромагнитного излучения от бегущей ультразвуковой решетки.

1 — генератор СВЧ, 2 — циркулятор, 3 — рупорно-линзовая антенна, 4 — фазовращатель, 5 — двойной волноводный тройник, 6 — СВЧ волноводы, 7 — согласующие трансформаторы, 8 — УЗ излучатель, 9 — ванна с водой, 10 — вибратор волнения, 11 — генератор возбуждения УЗ излучателя с усилителями мощности, 12 — предварительный усилитель, 13 — селективные усилители, 14 — фазовый детектор, 15 — кварцованный гетеродин, 16 — зеркало.

раскрые излучателей, так и в области взаимодействия ультразвуковой решетки с электромагнитной волной (они же применялись и для юстировки приемо-передающего тракта в целом).

Ультразвуковой излучатель, погруженный в ванну с водой, возбуждал продольную волну, бегущую к поверхности; фронт волны совпадал с поверхностью воды. Вызванные ультразвуковой волной колебания поверхности в свою очередь возбуждали в воздухе убегающую от поверхности ультразвуковую волну, которая формировала решетку переменного давления (и плотности). Электромагнитная волна, излучаемая навстречу ультразвуковой, взаимодействовала с бегущей решеткой, частично отражаясь от нее, приобретала доплеровский сдвиг частоты на частоту ультразвука и возвращалась к приемо-регистрирующей системе. Туда же приходил сигнал, отраженный непосредственно от поверхности воды; колебания поверхности обеспечивали фазовую модуляцию как на ультразвуковой частоте, так и на частотах, соответствующих спектру волнения свободной поверхности раздела.

Для возбуждения из-под воды и формирования интенсивного акустического пучка в воздухе разработан и изготовлен двухслойный мозаичный ультразвуковой преобразователь с апертурой 185 мм. Ак-

тивный элемент преобразователя сформирован девятнадцатью шестигранными толщиной 8.5 мм пьезоэлементами из керамики ПТС-19, уложенными в виде мозаики. Он контактировал с частотно-понижающей металлической накладкой, которая служила также общим заземленным электродом. Все отобранные для мозаики пьезоэлементы имели близкие значения собственных частот и добротностей. Для лучшего электрического контакта с частотопонижающей пластиной каждый элемент притирался к ней; всю конструкцию заливали расплавленным салолом для улучшения акустического контакта между элементами. Резонансная частота преобразователя составляла  $\approx 88$  кГц, он эффективно работал в диапазоне 78–95 кГц.

Для возбуждения мозаичного преобразователя использован генератор ГЗ-119, сигнал с которого поступал на два усилителя мощности LV-103 (из комплекта акустического анализатора 01021 фирмы "Robotron", ГДР), работающие совместно по трансформаторной схеме сложения выходных сигналов. Усилитель LV-103 позволяет получить на нагрузке 3 Ом до 100 Вт мощности выходного сигнала в диапазоне 20–100 кГц. Выходной импеданс усилителя согласован с входным импедансом ультразвукового преобразователя с помощью трансформатора. Для предотвращения самовозбуждения усилителей последовательно с первичными обмотками трансформатора включены балластные ограничивающие сопротивления ( $R \approx 1 - 2$  Ом). Акустическое давление в воздухе измерялось широкополосным конденсаторным микрофоном MV-201 с чувствительностью 4.5 мВ/Па (вместе с предусилителем). Измерения давления в воде проведены с помощью пьезокерамического приемника с чувствительностью 1 мкВ/Па в воде.

Акустическое давление вблизи от излучающей поверхности преобразователя в воде составляло в центре пучка  $\approx 10^5$  Па. Для повышения мощности акустического излучения, выходящего из-под воды, толщину слоя воды над горизонтальной рабочей поверхностью излучателя подбирали кратной  $\lambda/4$ . В результате акустическое давление в воздухе на расстоянии 3 м от поверхности воды достигало в центре пучка  $\approx 10$  Па.

Электромагнитную волну излучала рупорно-линзовая антенна (с апертурой  $\approx 30$  см), запитываемая от генератора типа ГЧ-141 со средней мощностью 30 мВт, перестраиваемого в диапазоне 5.7–8 мм. Монохроматичность и дискретность перестройки длины волны была достаточна для разрешения ожидаемого резонансного эффекта обратного рассеяния и составляла  $\lambda/\Delta\lambda \geq 10^4$ . Генератор соединялся волноводным трактом с пирамидальным рупором через Y-циркулятор. Рассеянное излучение принимала та же антенна; часть излучения от генератора через фазовращатель непосредственно поступала на приемник в качестве местного гетеродинного сигнала.

Таким образом, совмещение функций приемной и передающей антенны в едином устройстве позволяло осуществить антиколлинеарное взаимодействие волновых векторов электромагнитного излучения и ультразвука. Входная часть приемника представляла собой диодный смеситель, собранный для подавления шумов гетеродина по балансной схеме на основе двойного волноводного тройника. Для согласования специально подобранной по характеристикам пары диодов с более высоким входным сопротивлением усилителя промежуточной

частоты применены экранированные трансформаторы. Селективный усилитель промежуточной частоты был настроен на частоту ультразвука ( $\approx 88$  кГц), поэтому выделялся полезный сигнал, соответствующий когерентному рассеянию (со сдвигом на частоту ультразвука) колеблющейся водной поверхностью и бегущей ультразвуковой решеткой. Доминировал, однако, паразитный сигнал, связанный с низкочастотным волнением поверхности воды, которое модулирует непосредственно отраженную от поверхности воды электромагнитную волну, поэтому непосредственная регистрация ультразвукового сигнала оказалась практически невозможной. Окончилась неудачей и попытка модуляции колебаний ультразвукового генератора с частотой порядка 1–10 Гц.

Высокая степень подавления паразитного сигнала на частоте волнения водной поверхности достигнута введением фазовой демодуляции сигнала на значительно более высоких частотах (выше на два порядка), которая осуществлена подачей на фазовый детектор от независимого кварцованного генератора сигнала, отстроенного на частоту 800 Гц относительно частоты ультразвукового сигнала. Подобная схема регистрации обладает еще одним преимуществом — позволяет осуществить одновременную регистрацию не только амплитуды, но и фазы принимаемого сигнала.

Разделить сигналы нерезонансного (от водной поверхности) и резонансного рассеяния (от бегущей ультразвуковой решетки) удалось перестройкой частоты электромагнитного сигнала и введением вблизи от водной поверхности экрана, эффективно поглощающего ультразвук и прозрачного для электромагнитного излучения.

Чувствительность системы регистрации была достаточной для регистрации колебаний поверхности излучателя (с амплитудой 0.1–1 мкм) и поверхности воды на расстоянии до 2.5 м от ультразвукового излучателя. Порог регистрации колебаний поверхности УЗ излучателя соответствовал амплитуде колебаний  $100 \text{ \AA}$ , что составляет основу для методики дистанционного бесконтактного измерения с помощью пучка электромагнитного излучения СВЧ диапазона периодических колебаний поверхности малой амплитуды.

### 3. Результаты экспериментов по СВЧ зондированию бегущей ультразвуковой решетки и их обсуждение

В результате измерений получена острорезонансная зависимость коэффициента резонансного отражения от частоты электромагнитного излучения (рис. 2). Ширина резонансной кривой на уровне половинной амплитуды  $\Delta f_{\text{эм}} \approx 50$  МГц, т.е.  $\Delta f_{\text{эм}}/f_{\text{эм}} \approx 10^{-3}$ , что с учетом неидеальности реализации акустоэлектромагнитного взаимодействия хорошо согласуется с оценкой добротности ( $Q \approx 10^3$ ) бегущей ультразвуковой решетки протяженностью  $\approx 3$  м, с которой взаимодействует электромагнитное излучение. Коэффициент резонансного отражения от объемной УЗ решетки составлял  $\approx 10^{-10}$  при давлении УЗ волны  $\approx 5$  Па в центре пучка на расстоянии  $\approx 4$  м от поверхности воды.

Положение резонанса зависело от температуры окружающей среды так же, как скорость УЗ в воздухе. Амплитуда отраженной волны и соответственно эффект резонансного отражения имели почти пороговую

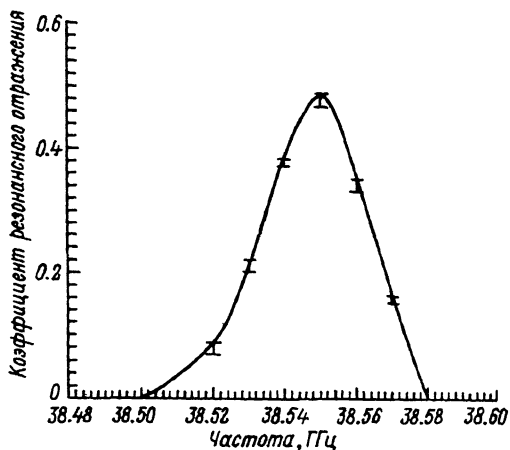


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента резонансного отражения.

зависимость от точности юстировки взаимодействующих пучков, коллинеарности их волновых векторов. Незначительная асимметрия кривой на рис. 2, по-видимому, связана с изменением волнового вектора СВЧ пучка приблизительно на 0.3 рад в результате перестройки частоты электромагнитного излучения. Реализованная в описанном эксперименте возможность наблюдения резонансного когерентного рассеяния электромагнитного излучения объемной акустической решеткой в газовой среде при возбуждении этой решетки через границу раздела с непрозрачной для электромагнитного излучения средой создает основу для понятных приложений. Это, во-первых, натурная дистанционная регистрация рассеянного электромагнитного излучения при возбуждении акустической волной в воздухе погруженным в воду звуковым источником. Таким образом, использование резонансного объемного рассеяния позволяет при этом повысить эффективность дистанционного метода регистрации акустических возмущений даже в условиях волнения границы раздела. Более того, в натуральных условиях реализация метода требует перехода в сантиметровый диапазон электромагнитного излучения, что, согласно оценкам раздела 1, должно привести к увеличению эффективности резонансного рассеяния на акустической решетке. При переходе к натурному эксперименту и, следовательно, к более низкочастотному диапазону, следует ожидать также увеличения коэффициента отражения и эффективной добротности его резонансной зависимости относительно полученных в лабораторном эксперименте значений  $10^{-10}$  и  $10^3$  соответственно.

Использование эффекта резонансного рассеяния позволило, во-вторых, разработать бесконтактный метод регистрации малых колебаний границы раздела двух сред. Применение метода селективного выделения из отраженного когерентного сигнала компоненты, рассеянной на бегущей ультразвуковой решетке, позволило довести минимальную измеряемую амплитуду колебаний до 100 Å.

### Список литературы

- [1] *Есипов И.Б., Наугольный К.А.* // Методы гидрофизических исследований. Горький, 1984. С. 229-245.
- [2] *Есипов И.Б., Пашин С.Ю.* // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 3. С. 433-439.
- [3] *Ушаков И.Е., Шишкин И.Ф.* // Изв. Таганрогского педагогического ин-та. 1980. № 4. С. 55-62.
- [4] *Ассман В.А., Бункин Ф.В., Виноградов Е.А.* и др. Препринт Института общей физики АН СССР. № 113. М., 1990. 29 с.
- [5] *Ассман В.А., Бункин Ф.В., Виноградов Е.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 5. С. 72-76.

Институт общей физики  
Москва

Поступило в Редакцию  
22 октября 1993 г.

---