

Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С Ф С Р

---

Ордена Трудового Красного Знамени  
Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

Препринт № 73

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ  
И УСИЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН  
В ВОЛНОВОДНЫХ РЕЗОНАТОРАХ

Л.А.Островский, И.А.Соустов,  
А.М.Сутин.

Горький - 1975 г.

В настоящее время едва ли ни единственным эффектом нелинейной акустики, который серьезно обсуждается с точки зрения приложений в гидроакустике, является возбуждение низкочастотной волны в результате взаимодействия двух высокочастотных волн. "Параметрические"<sup>†)</sup> излучатели, основанные на этом эффекте, хотя и способны создавать узкую диаграмму направленности при малых размерах, но все же имеют, по-видимому, ограниченную область применения, ввиду принципиально низкой энергетической эффективности—основная часть энергии расходуется на затухание мощной высокочастотной волны.

Вместе с тем, возможности применения нелинейных акустических взаимодействий в гидроакустике представляются более разнообразными. Одно из перспективных, на наш взгляд, направлений связано с использованием резонансного взаимодействия акустических волн в волноводе—резонаторных системах. С одной стороны взаимодействие различных волноводных мод позволяет реализовать условия синхронизма только для волн нужных частот, избегая потерь за счет перекачки энергии в высшие гармоники, что неизбежно для волн в свободном пространстве. Теория взаимодействия волн в акустических волноводах изложена в [1]. С другой стороны, ввиду малости акустической нелинейности, эффективное параметрическое преобразование

†) Название "параметрические", по нашему мнению, является неудачным поскольку в данном случае возбуждение разностной частоты при наличии двух высокочастотных волн происходит вынужденным образом, а не путем параметрического самовозбуждения, а поэтому такие системы правильнее было бы назвать нелинейными излучателями.

спектра волн в диапазоне частот, обычно применяемых в гидроакустике, может быть практически достигнут лишь при использовании многократных преломлений в ограниченных системах-резонаторах<sup>+</sup>. При этом размеры резонаторов в акустике чаще всего таковы, что возможны колебания на нескольких, а иногда и на многих резонансных частотах. Экспериментальные исследования подобных систем в настоящее время немногочисленны, но на наш взгляд, уже достаточно убедительны. Параметрическая генерация в резонаторе с водой впервые наблюдалась Корпелом и Адлером [3], где при возбуждении резонатора волной накачки на частоте 4,68 мгц была обнаружена субгармоника на частоте 2,34 мгц (вырожденная генерация), а также парные комбинации компонент, суммарные частоты которых равны частоте накачки (невырожденная генерация). В работе [4] мы сообщали о параметрической генерации на существенно более низких, уже "гидроакустических", частотах, где наблюдалось возбуждение субгармоники (42 кгц) : накачки (84 кгц) в резонаторе, образованном заполненном жидкостью прямоугольным волноводом, торцы которого ограничены жесткими стенками. Для выполнения условий синхронизма использовались волноводные моды разной структуры. В результате генерация происходила весьма эффективно, так что после превышения ее порога амплитуда поля накачки в системе резко ограничивалась. При уровне накачки ниже порогового наблюдалось параметрическое усиление сигнала на частоте субгармоники. Это усиление достигало 20 дб и зависело от фазы принимаемого сигнала, что характерно для "вырожденного случая".

2. Определенными преимуществами обладают системы на твердом теле. До недавнего времени существенные параметрические эффекты в твердом теле наблюдались только на высоких частотах [5,6] (исключение составляет электро-механическая система, описанная в [7]). Нами были исследованы параметрические и нелинейные явления

---

+) Параметрическое усиление бегущих волн в воде, даже на сравнительно высокой частоте (200 кгц) не превышает 3 дб [2].

в твердом теле на частотах 3-200 кгц. Для этого использовались кольцевые резонаторы из металла (никель, алюминий, медь) в зазор которых был вклеен пьезокерамический излучатель.

Вначале, эксперименты проводились в резонаторе выполненном из алюминиевого стержня диаметром 12 мм и длиной 635 мм, акустическое поле в котором регистрировалось миниатюрными пьезоэлементами, наклеенными на боковую поверхность стержня. Позднее использовался также резонатор из никелевой проволоки диаметром 3 мм, возбуждаемый плоскими пьезокерамическими излучателями диаметром 20 мм, которые были согласованы с проволокой двумя коническими концентраторами, что позволило усилить акустическое поле в проволоке и тем самым повысить нелинейные эффекты. Общая длина кольца составляла 700 мм, но применялись и кольца другой длины. Регистрация акустического поля производилась за счет использования магнитострикционных свойств никеля - фиксировалась ЭДС, наведенная в небольшой индукционной катушке, надетой на проволоку.

Уже в первых экспериментах с такими резонаторами [9] была получена эффективная перекачка энергии акустических волн как вверх, так и вниз по спектру за счет упругой нелинейности металла. При этом могли возбуждаться колебания на разных собственных частотах резонатора, отвечающих продольным волнам.

В частности, при возбуждении гармонической накачкой, частота которой лежала в ультразвуковом диапазоне (21 кгц), в спектре колебаний резонатора возникают и слышимые частоты 7 кгц и 14 кгц, излучение которых сопровождалось довольно громким звуком, т.е. происходила прямая трансформация ультразвука в звук за счет регенеративного параметрического возбуждения.

+ ) Для подобных кольцевых систем не возникает трудностей, связанных с поворотом на  $\pi$  фазы волны напряжения при отражении от свободной границы твердого тела. Для резонаторов в виде прямых стержней устранение этих трудностей требует специального включения акустических импедансов на концах резонатора [8].

При амплитуде накачки ниже порога генерации снова было получено существенные параметрические усиления (до 24 дБ для сигнала с частотой 14 кгц).

В дальнейшем в подобных системах удалось наблюдать и другие эффекты, связанные с взаимодействием акустических волн. Так, при подаче гармонической накачки относительно высокой частоты ( $f_H = 50 - 200$  кгц) на одной из собственных мод резонатора наблюдалась автомодуляция колебаний. На рис. 1 приведены осциллограммы в резонаторе при различной глубине модуляции, которая определялась величиной возбуждающего напряжения. Эффект носил пороговый характер, причем, в зависимости от значения расстройки между  $f_H$  и ближайшей собственной частотой резонатора можно было наблюдать как мягкое, так и жесткое (гистерезисное) возбуждение модуляции и ограничение амплитуды накачки (аналогично невырожденной параметрической генерации [9]). Зависимость амплитуды колебаний в резонаторе на частоте накачки  $A_H$  и одной из боковых частот  $A_B$  от напряжения на излучателе показана на рис. 2.

Эффект нелинейной самомодуляции волн изучался ранее в задачах нелинейной оптики и радиофизики (см., например, [10]), где он, однако, был связан в основном с наличием кубичной нелинейности в среде; за счет четырехволновых процессов  $2f_H = f_1 + f_2$  возбуждались волны боковых частот  $f_1$  и  $f_2$ . В данном случае нелинейность квадратичная (кубичные же члены пренебрежимо малы), и сам эффект носит несколько иной характер. Он возникает в результате двухступенчатого процесса — сначала идет параметрическая генерация на двух низких частотах  $f_1$  и  $f_2$ , так что  $f_1 + f_2 = f_H$ , причем в данном случае  $f_1$  существенно меньше, чем  $f_2$ , и отвечает первой собственной частоте резонатора; затем в результате суммирования частот  $f_1$  и  $f_H$  возникают колебания с частотой  $f_3 = f_1 + f_H$ . Таким образом возникает модулированная волна с компонентами  $f_2, f_3, f_H$  и низкочастотный сигнал с частотой  $f_1$ . Это подтверждается и спектрограммой процесса (фиг. 3).

Заслуживает внимания возможность внешней моду-

ляции высокочастотного сигнала в такой системе. При уменьшении амплитуды накачки ниже пороговой автомодуляция исчезает, но подача сигнала на частоте  $f_1$  приводит к модуляции накачки этой частотой. При этом для получения боковой с амплитудой порядка 50% от несущей в таком модуляторе достаточно было сигнала на 20 дБ меньшего, чем амплитуда модулируемой волны.

Кроме параметрического возбуждения продольных волн наблюдалось возбуждение и других типов колебаний. Так, при интенсивном возбуждении резонатора на частоте 6,7 кгц, что отвечает первому продольному резонансу, наблюдалась генерация частот 2,6 кгц и 4,1 кгц. На этих частотах колебания резонатора соответствовали, по-видимому, изгибным волнам, возбуждение которых обычными способами связано с определенными трудностями. Подобная параметрическая генерация могла приводить и к возбуждению на более низкой частоте (около 1,1 кгц).

При погашении интенсивности возбуждения на относительно низких частотах колебания в резонаторе приобретают нерегулярный характер. Осциллограмма и спектр такого колебания в диапазоне 0 - 20 кгц приведены соответственно на рис. 4,5. Можно предполагать, что это явление обусловлено нелинейной стохастизацией, известной в теории нелинейных волн [11]. Однако механизмы этого процесса пока не вполне ясны. Возможно, что для его объяснения следует привлечь нелинейные эффекты, обусловленные пластичностью, и учесть взаимодействие различных типов колебаний стержня.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л.А.Островский, И.А.Папилова, Акуст.ж., 1973, 29, № 1, 67.
2. В.И.Псавко, С.С.Снесарев, В.И.Тимошенко. Прикладная акустика, Труды ТРТИ, вып.25,1971, 47.
3. A.KorpeI, R.Adler, Appl.Phys.Lett., 1965, 7, 106.
4. Л.А.Островский, И.А.Папилова, А.М.Сутин, Письма в ЖЭТФ, 1972, 15, 456.
5. А.В.Пуговкин, С.М.Шандаров. ФТТ, 1970, 14, 250.
6. P.J.King, M.Liukkala, J.Phys.D: Appl. Phys., 1973, 6, 1047.
7. T.Metzuk, J.Acoust.Soc.Am., 1970, 40, n.I, 2I
8. Л.К.Зарембо, О.Ю.Сердобольская, И.П.Чернобай. Акуст. ж., 1972, 18, № 3, 397.
9. Л.А.Островский, И.А.Папилова, А.М.Сутин. ЖТФ, 1973, 43, № 10, 2213.
10. Л.А.Островский, Л.В.Соустов. Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1972, 15, № 2, 242.
11. Г.М.Заславский. Статистическая необратимость в нелинейных системах. "Наука", М., 1970.

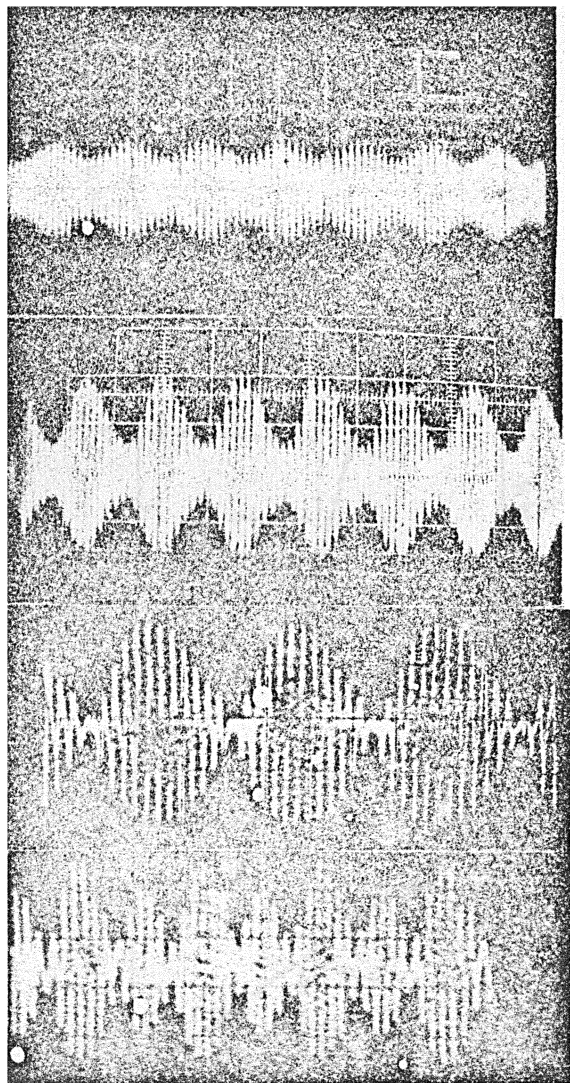


Рис. 1



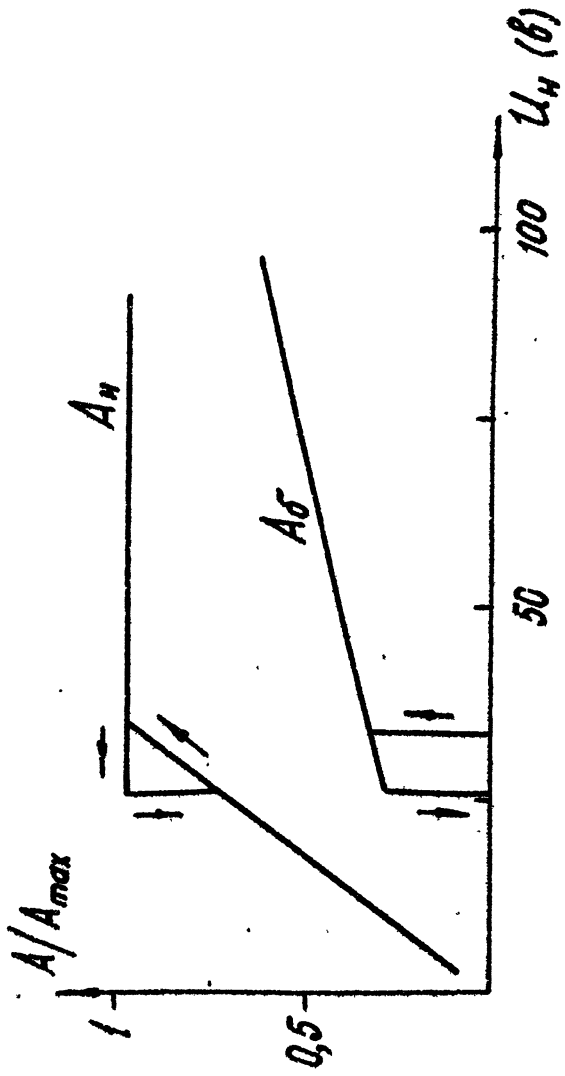


Рис. 2

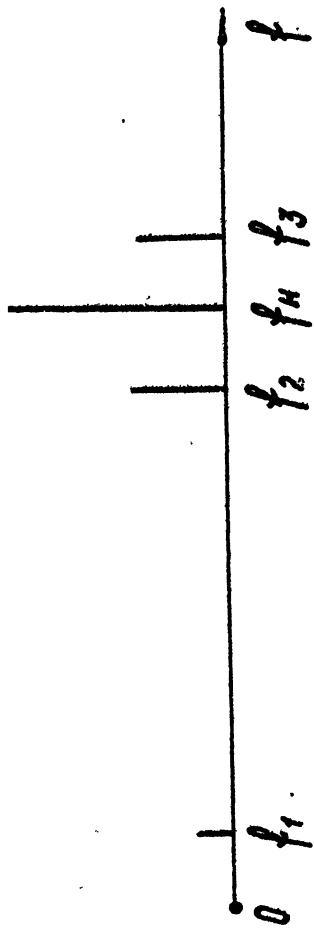


Рис. 3

12c.

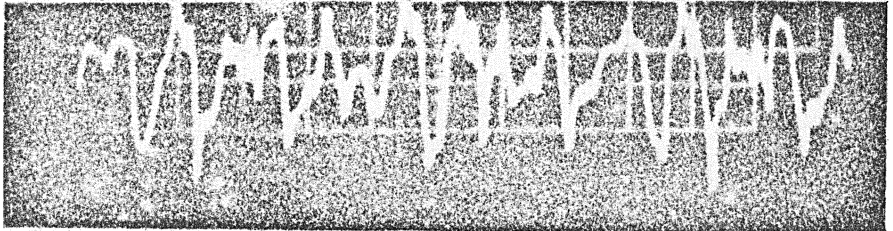


Рис. 4

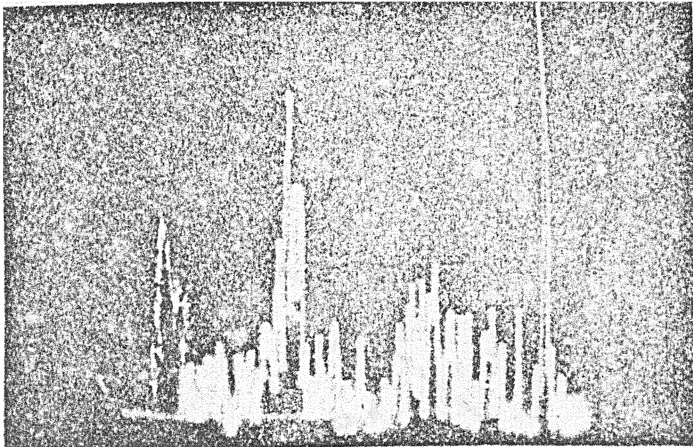


Рис. 5