

УДК 534.2

К ИСТОРИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН

© 2025 г. Л. А. Островский^{a,b,c,*}

^aИнститут прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

^bUniversity of Colorado, Boulder, USA

^cUniversity of North Carolina, Chapel Hill, USA

*e-mail: lev.ostrovsky@gmail.com

Поступила в редакцию 02.09.2024 г.

После доработки 02.09.2024 г.

Принята к публикации 24.12.2024 г.

Кратко обсуждаются нетривиальные моменты, связанные с изобретением, теорией и применениями излучающих и приемных “параметрических” акустических антенн в СССР и США.

Ключевые слова: параметрические антенны, нелинейная акустика

DOI: 10.31857/S0320791925010044, EDN: BQYQXK

1. ВВЕДЕНИЕ

Сразу же подчеркну, что эта заметка далека от установления каких-либо приоритетов. Несомненно, что изобретение параметрических акустических антенн (ПА) произошло независимо в США и СССР примерно в одно и то же время, и не в один день, а в результате серии исследований нелинейного взаимодействия акустических волн. Интересно и поучительно, однако, сравнить, как это происходило в разных странах, в то время разделенных на “лагери” и взаимодействующих с многими ограничениями. Отчасти эта краткая статья написана в неформальном стиле, что кажется оправданным в номере, посвященном памяти Виталия Анатольевича Зверева, с которым автор был знаком, сотрудничал и был дружен в течение многих лет.

Не так уж редко открытия и изобретения делаются почти одновременно в разных точках планеты. Случай так называемых акустических ПА необычен не этим, а теми обстоятельствами, при которых они появились в США и в СССР. Отмечу некоторые из них.

1. Прежде всего, если в США это изобретение вскоре получило широкое признание, то в СССР оно было немедленно засекречено и в течение почти двух десятилетий о нем знали только те посвященные, кто сотрудничал с Военно-морским флотом, а другие — из тех же американских публикаций.

2. К тому времени было известно, что при взаимодействии двух плоских волн, распространяющихся под углом друг к другу, во втором приближении по амплитуде (или первом по нелинейности)

вообще ничего не возникает, а при взаимодействии волновых пучков конечной ширины излучение из области взаимодействия очень слабое. Мне даже попадались доклады под названием “О нерассеянии звука звуком”. Скажу сразу, что сейчас эта проблема уже не актуальна, поскольку при малых углах между пучками (малость определяется нелинейностью) и особенно для параллельных пучков взаимодействие становится резонансным, и волна на разностной частоте может эффективно генерироваться [1, 2].

3. А если и этого недостаточно, добавлю, что название “параметрическая антенна”, предложенное П. Вестервельтом, вообще физически неверно: такие системы основаны просто на генерации поля низкой разностной частоты за счет нелинейного взаимодействия двух высокочастотных волн или путем модуляции нелинейной высокочастотной волны. Ничего похожего на, скажем, параметрический резонанс, когда модулируются параметры среды, по которой распространяется волна, здесь нет. Тем не менее термин, предложенный Вестервельтом, закрепился и используется до сих пор. В ответ на критику Вестервельт предлагал придумать лучшее название, но никто не решился, хотя мне казалось, что лучше было бы просто говорить о нелинейных антеннах. Но теперь, конечно, нет смысла что-то менять — все давно привыкли. Замечу только, что “истинная” параметрическая генерация в трехмодовой диспергирующей системе — волноводном резонаторе — была получена с участием автора в 1972 г. [3], хотя преобразование частоты вниз в многомодовых акустических резонаторах наблюдалось и ранее.

Принцип действия ПА

Кратко напомним принцип действия параметрических антенн, хотя сейчас он хорошо известен. В одном из простых вариантов предполагается, что имеются два узконаправленных волновых пучка с равными амплитудами и немного отличающимися частотами. Ввиду нелинейности среды в ней возникают волны суммарной и разностной частот, и в отсутствие дисперсии они синхронно нарастают, насколько позволяет диссипация, обусловленная вязкостью и теплопроводностью среды. Если протяженность первичных пучков до их затухания L_a многократно превышает длину низкочастотной волны Λ , последняя излучается с узкой диаграммой направленности, даже если диаметр первичных пучков меньше Λ . Более того, эта диаграмма практически не содержит боковых лепестков, неизбежных при направленном излучении с большой поперечной апертуры. Этот пример иллюстрирует идею параметрической антенны: направленность достигается за счет излучения “виртуальной антенны бегущей волны” с характерной длиной L_a . При этом затуханием излучаемой низкочастотной волны в пределах самой антенны обычно можно пренебречь, поскольку в таких средах, как вода и воздух, на низких частотах длина затухания растет с уменьшением частоты.

Аналогично, если на гармонический волновой пучок падает под малым углом слабая низкочастотная волна, то она порождает направленную волну на разностной (высокой) частоте, чем достигается направленный прием звуковых сигналов.

Здесь возможны два основных режима работы ПА, определяемых соотношением длины затухания L_a и дифракционной длины L_d , на которой первичный пучок начинает расходиться и превращается в расходящуюся сферическую (точнее, коническую) волну, работающую как виртуальная рупорная антенна для низкочастотного излучения.

1. Если $L_a \ll L_d$, то поле первичной волны затухает уже в ближней (прожекторной) зоне и излучает расходящуюся низкочастотную волну. Этот случай был рассмотрен Вестервельтом [4]. В этом случае угловая ширина диаграммы направленности на разностной частоте Ω имеет порядок $(k_\Omega L_a)^{-1/2}$, где k_Ω — волновое число на частоте Ω .

2. Другой крайний случай — $L_a \gg L_d$ — означает, что первичный пучок превращается в расходящуюся коническую волну, работающую как виртуальная рупорная антенна для низкочастотного излучения. Угол диаграммы направленности первичной волны с волновым числом k_0 теперь имеет порядок $(k_0 a)^{-1}$, где a — радиус первичного пучка, а направленность низкочастотной волны — порядка $(k_0 a)^{-2}$, так что она остается в пределах первичного излучения. Этот случай был рассмотрен Берктеем и Лихи [5].

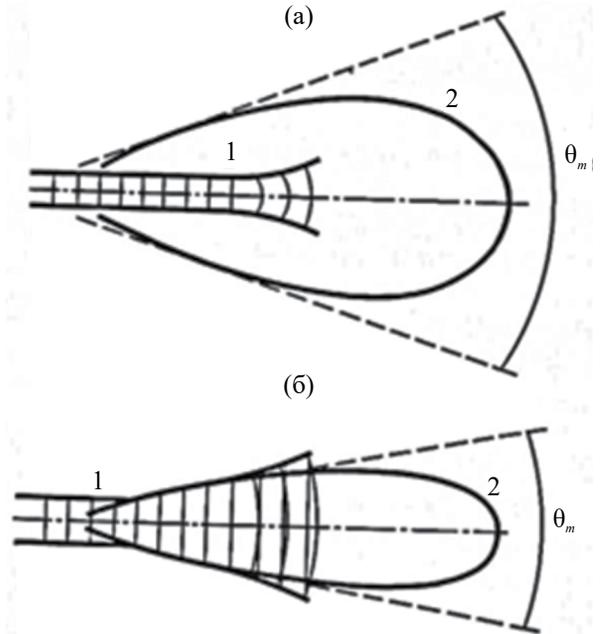


Рис. 1. Схема двух режимов работы параметрической антенны [6]: (а) — взаимодействие в ближней зоне первичного пучка; (б) — взаимодействие в его дальней зоне. Здесь 1 — первичный (высокочастотный) пучок, 2 — диаграмма направленности низкочастотного излучения. θ_m — угловая ширина излучения.

Рис. 1 иллюстрирует эти два случая.

Возможны и более сложные варианты, например, когда высокочастотная волна имеет вид импульса. Тогда нелинейность “детектирует” импульс, излучая видеопульс с формой, отличной от огибающей первичного; более того, эта форма может зависеть от направления. Все такие варианты многократно описаны в литературе.

Основное достоинство таких устройств — высокая направленность излучения на относительно низких частотах. Кроме того, поскольку диаграмма направленности формируется “виртуальным” источником, в ней отсутствуют значительные боковые лепестки, которые могут давать дополнительные, нежелательные отражения помимо основного направления. Наконец, в них легко достигается широкополосность путем небольших изменений частоты первичных волн. Их основной недостаток — низкая эффективность: лишь небольшая часть энергии первичного пучка преобразуется в низкочастотное излучение. Поскольку амплитуда низкочастотного излучения пропорциональна квадрату амплитуды первичной волны, эффективность излучателя возрастает с увеличением интенсивности первичного источника, однако она ограничена нелинейностью: мощный первичный пучок претерпевает нелинейные искажения вплоть до образования ударных волн, после чего волна быстро затухает.

Можно показать, что максимальная энергетическая эффективность, достигаемая в нелинейном режиме, имеет порядок $(\Omega/\omega)^2 \ll 1$, где Ω и ω — низкая и высокая частоты [7]. Тем не менее, параметрические антенны нашли серьезные применения; некоторые из них кратко описаны ниже. Но прежде упомянем несколько исторических фактов.

2. АМЕРИКАНСКАЯ ИСТОРИЯ

Начну с Википедии на английском языке. Там сказано: “Priority for discovery and explanation of the parametric array owes to Peter J. Westervelt, winner of the Lord Rayleigh Medal, although important experimental work was contemporaneously underway in the former Soviet Union.”

Последняя ссылка на советские работы относится к книге [8], где действительно обсуждаются эксперименты с ПА, проведенные, в частности, в Таганроге — хотя такое противопоставление “открытия и объяснения” параллельной “важной экспериментальной работе” выглядит несколько странно. Сравнительно подробное (впрочем, только на двух с небольшим страницах журнала JASA) теоретическое изложение своей идеи П. Вестервельта опубликовал в 1963 г. [4], хотя он высказывал аналогичную идею и ранее на сессии Американского Акустического общества [9] (рис. 2). Первые эксперименты в США были проведены в эти же годы [10]. С этого времени число работ, посвященных ПА, начало экспоненциально расти, и подавляющее число ссылок было на работу Вестервельта. Добавлю, что в 2009 г. мне довелось участвовать в специальной сессии Американского Акустического общества, посвященной 90-летию П. Вестервельта, в его присутствии. Я представил доклад [11], где попробовал кратко описать советскую часть истории, выделив роль В.А. Зверева и А.И. Калачева. Кажется, это несколько стимулировало интерес к их работам на Западе.



Рис. 2. Международный симпозиум по нелинейной акустике (ISNA 1969, Austin, Texas, USA). Слева — П. Вестервельт, справа — Р.В. Хохлов.

3. СОВЕТСКАЯ ИСТОРИЯ

Эта часть истории ПА известна из первых рук: в 1999 г. В.А. Зверев опубликовал об этом статью в “Акустическом журнале” [12]. Он отмечает важную роль в зарождении идеи ПА, которую сыграли два выдающихся физика — Г.С. Горелик и М.А. Исакович. Выше уже было упомянуто, что теоретическая база для создания ПА была заложена работами по взаимодействию акустических волн. Из них, как мне представляется, непосредственной предтечей была статья А.Г. Горелика и В.А. Зверева 1955 г. [13], направленная на измерение слабой дисперсии ультразвука (см. также [14]). В ней экспериментально наблюдались боковые частоты модуляции, возникающие при взаимодействии волн высокой и низкой частоты. В 1959 г. В.А. Зверев и А.И. Калачев начали в НИРФИ эксперименты, непосредственно приведшие к разработке параметрических (без этого термина, конечно) излучателя и приемника, и были поданы две заявки на изобретение того и другого. В результате авторское свидетельство на приемник было выдано с приоритетом 1961 г. [15], а в таком на излучатель было отказано ввиду его “невозможности” (!). Поскольку работы велись под эгидой ВМФ, все это, включая авторское свидетельство, было засекречено. Не удивительно поэтому, что долгое время исследование и применение ПА в мире были основаны только на работах Вестервельта. Только с конца 1960-х гг. стали появляться открытые публикации Зверева и Калачева [16, 17], но без какого-либо упоминания о разработанных ими конкретных устройствах — только о теории взаимодействия акустических пучков и лабораторных экспериментах на эту тему. Отмечу также краткий обзор [18], где перечислены и более поздние исследования по ПА и другим проблемам нелинейной акустики, проведенные в Горьком — Нижнем Новгороде. Группа исследователей в этой области, включая горьковчан (рис. 3), была удостоена Государственной премии СССР в области науки и техники.

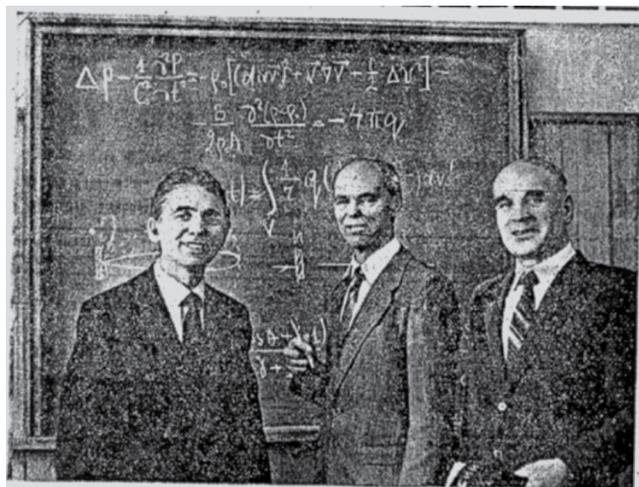


Рис. 3. Лауреаты Государственной премии СССР 1985 г. за работы по нелинейной акустике (фото из газеты). Слева направо: А.И. Калачев, В.А. Зверев, Л.А. Островский.

В последующих 1970-х — 1980-х гг. исследования параметрических акустических систем стали бурно развиваться, вплоть до публикации книг [6, 8, 19]. В это же время развивался и взаимный международный обмен, в частности, на международных конференциях, и разделение на “западные” и “восточные” достижения потеряло всякий смысл.

4. О ПРИМЕНЕНИЯХ ПА

В ранние годы прикладные исследования ПА велись только в связи с гидроакустикой, в основном в интересах ВМФ. Были попытки создать ПА, обладающие преимуществами при дальнейшем распространении звука в океане за счет их направленности, компенсирующей малую эффективность преобразования (напр. [8]). В работе И.Б. Есипова и др. [20] сигнал параметрического излучателя принимался на расстояниях до 1000 км в Северо-Западной части Тихого океана. Мощный ПА был также сконструирован в США [21]. Мне неизвестны конкретные применения ПА для акустической океанографии на больших расстояниях, зато параметрические сонары, особенно для исследования морского дна и нахождения мин, производятся в индустрии и, очевидно, имеют спрос. Так, в работе [22] приводятся параметры ПА прибора для профилирования дна, способного работать до глубины 2 км, с проникновением в дно до 70 м и разрешением до 1 см по глубине. Перечислены и другие промышленно изготавливаемые приборы такого рода.

Значительный интерес представляет работа ПА в воздухе. Они используются как направленные громкоговорители, что важно, например, для мюзеев, выставок и других общественных мест. Они также производятся промышленностью. Недавно в Остине, столице штата Техас, мне показывали такой прибор в виде небольшой пластины длиной около 25 см, которая производила негромкий звук (музыку), слышимый только в направлении, близком к нормали к пластине. Более того, параметрический режим также используется в мощных звуковых излучателях, используемых для связи и как звуковое оружие, например, для разгона полицией незаконных демонстраций и даже для борьбы с морскими пиратами. Таковы системы LRAD (Long Range Acoustic Device), выпускаемые промышленностью. Например, LRAD 450XL, согласно спецификациям, имеет дальность до 1700 м, а в стандартном непрерывном режиме — до 500 м, уровень его сигнала превышает 88 дБ по отношению к шуму (на расстоянии 1 м — 145 дБ), а LRAD950XT работает до 3 км [23]. Популярный обзор К. Вудфорда по разнообразным параметрическим громкоговорителям доступен в интернете [24], см. также [25]. Однако все эти приборы выпускаются на Западе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Недавно я прочел статью моего однофамильца Д.Б. Островского “История развития отечественных параметрических систем”, датированную 1998 г., где он, упоминая передовые теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в СССР начиная с отмеченных выше работ Зверева и Калачева, подробно описывает сотрудничество в этой области многих институтов, таких как ИПФ, АКИН, МГУ, ТРТИ, с ВМФ. Участвовали в этих разработках и ведущие промышленные институты, включая “Морфизприбор” (в настоящее время — концерн “Океанприбор”). Это в основном относится к периоду 1980-х — началу 1990-х гг. В рамках различных НИР, а позднее и ОКР, разрабатывались макеты приборов, которые испытывались в реальных условиях. Как и ожидалось, параметрические излучатели в разы превосходили сопоставимые гидроакустические антенны по уровню реверберационной помехи (как отмечалось, благодаря хорошей направленности и отсутствию боковых лепестков диаграммы). Казалось, можно “внедрять”. Но всегда что-то мешало: погода, неисправности, разгильдяйство... Не пересказывая всю статью (она доступна в интернете [26]), упомяну лишь ее конец. Сказав, что “За границей системы с параметрическими антеннами давно перестали быть экзотикой” и упомянув производство на Западе приборов миноискания, параметрических эхолотов, профилографов и т.д., автор заканчивает: “России пока предложить нечего...” С тех пор минуло более четверти века, но мне неизвестно, есть ли теперь что-либо “предложить”. Возможно, сейчас ситуация изменилась, и предприятия российского бизнеса начали выпускать направленные параметрические излучатели или приемники, например, для морской сейсмоакустики высокого разрешения. Но это только предположение...

Так или иначе, ПА — это уже сегодняшние реалии. В завершение отмечу, что изобретение, теория и разработка ПА, начавшиеся более полувека тому назад, оставили важный след в акустике и ее приложениях, а их история по праву может считаться одной из самых нетривиальных и поучительных в области акустики и, возможно, не только в ней.

Я весьма признателен А.И. Малеханову, сделавшему много конструктивных замечаний. Я также благодарен А.М. Сутину за полезные обсуждения применений ПА, и М.Ф. Гамильтону, предоставившему фотографию П. Дж. Вестервелта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Здесь приводятся только работы, упомянутые выше в тексте. Многочисленные другие ссылки можно найти, например, в книгах [6, 8, 19] и других упомянутых здесь статьях и обзорах.

1. *Westervelt P.J.* Scattering of sound by sound // *J. Acoust. Soc. Am.* 1957. V. 29. № 2. P. 199–203; V. 29. № 8. P. 934–935.
2. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, Физматгиз, 1973. Гл. XIII.
3. *Островский Л.А., Папилова И.А., Сутин А.М.* Параметрический генератор ультразвука // *Письма в ЖЭТФ.* 1972. Т. 15. № 8. С. 456–458.
4. *Westervelt P.J.* Parametric acoustic array // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1963. V. 35. № 4. P. 535–537.
5. *Berklay H.J., Leahy D.J.* Farfield performance of parametric transmitters // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1974. V. 55. № 3. P. 539–546.
6. *Наугольных К.А., Островский Л.А.* Нелинейные волновые процессы в акустике. М.: Наука, 1998.
7. *Сутин А.М.* О предельном режиме работы параметрического излучателя ультразвука // *Акуст. журн.* 1978. Т. 24. № 1. С. 104–107.
8. *Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981.
9. *Westervelt P.J.* Parametric end-fire array // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1960. V. 32. P. 934–935.
10. *Bellin J.L.S., Beyer R.T.* Experimental investigation of an end-fire array // *J. Acoust. Soc. Am.* 1962. V. 34. P. 1051–1054.
11. *Ostrovsky L.A.* Research on parametric arrays in Russia: Historical perspective // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2009. V. 125. № 4. P. 2688.
12. *Зверев В.А.* Как зарождалась идея параметрической акустической антенны // *Акуст. журн.* 1999. Т. 45. № 5. С. 685–692.
13. *Горелик А.Г., Зверев В.А.* К вопросу о взаимодействии акустических волн // *Акуст. журн.* 1955. Т. 1. № 4. С. 339–342.
14. *Зверев В.А., Калачев А.И.* Измерение взаимодействия звуковых волн в жидкости // *Акуст. журн.* 1958. Т. 4. № 4. С. 321–324.
15. *Зверев В.А., Калачев А.И.* Устройство для приема инфразвуковых колебаний // Авт. свид. № 422197 по заявке № 710535 с приоритетом от 31 марта 1961 г.
16. *Зверев В.А., Калачев А.И.* Измерение рассеяния звука звуком при наложении параллельных пучков // *Акуст. журн.* 1968. Т. 14. № 2. С. 214–220.
17. *Зверев В.А., Калачев А.И.* Излучение звука из области пересечения двух звуковых пучков // *Акуст. журн.* 1969. Т. 15. № 3. С. 369–376.
18. *Островский Л.А., Гурбатов С.Н., Диденкулов И.Н.* Нелинейная акустика в Нижнем Новгороде (обзор) // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 2. С. 150–166.
19. *Beyer R.T.* Nonlinear acoustics. Naval Ship Syst. Command, USA, 1974.
20. *Есипов И.Б., Калачев А.И., Соколов А.Д., Сутин А.М., Шаронов Г.А.* Исследования дальнего распространения сигналов мощного параметрического излучателя // *Акуст. журн.* 1994. Т. 40. № 1. С. 71–75.
21. *Мьюир Т.Г., Томпсон Л.А., Кокс Л.Р., Фрей Х.Г.* Низкочастотная параметрическая система для исследований по акустике океана // *Акустика дна Океана.* М.: Мир, 1984. С. 287–289. (Перевод с английского сборника 1980).
22. *Zhou H., Huang S.H., Wei Li.* Parametric acoustic array and its application in underwater acoustic engineering // *Sensors.* 2020. V. 20. № 7. P. 2148–2167. См. также www.mdpi.com/journal/sensors
23. LRAD by Genasys, Long range acoustic devices. <https://genasys.com/lrad-products/>
24. *Woodford C.* Directional loudspeakers. <https://www.explainthatstuff.com/directional-loudspeakers.html>
25. *Wilson T.V.* How LRAD works. <https://science.howstuffworks.com/lrad.htm>
26. *Островский Д.Б.* История развития отечественных параметрических систем. <https://old.hydroacoustics.ru/engineering/parametric-system-hystory-1998/>

Toward the History of Parametric Acoustic Arrays

L. A. Ostrovsky

^a*A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

^b*University of Colorado, Boulder, USA*

^c*University of North Carolina, Chapel Hill, USA*

^{*}*e-mail: lev.ostrovsky@gmail.com*

Non-trivial points related to the invention, theory and applications of radiating and receiving “parametric” acoustic arrays are briefly discussed.

Keywords: parametric arrays, nonlinear acoustics