



ПОРТФЕЛЬ РЕДАКЦИИ

БИТ

О. С. Варламов

ВОЗДУШНЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ В ЗАДАЧАХ ЗАЩИТЫ АКУСТИЧЕСКОЙ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

В настоящее время системы параметрических антенн используются в приложениях, где требуется создать узконаправленное звуковое поле высокой интенсивности, — это, в первую очередь, выставки и экспозиции. Однако область применения может быть расширена и на системы обеспечения безопасности. Прогресс в области защищенности скрытых диктофонов и других записывающих устройств сделал практически бесполезным применение традиционных подавителей диктофонов, основанных на генерации высокочастотных сигналов. Как правило, дальность их действия не превышает нескольких метров.

Параметрическая акустическая система воздействует не на приемный тракт диктофона, а на микрофон, делая невозможным съем информации.

Рассмотрим подробнее принцип действия и историю развития параметрических антенн.

Параметрической антенной решеткой называют направленную антенну, состоящую из совокупности отдельных слабонаправленных излучающих элементов, расположенных в пространстве особым образом, и использующую нелинейное взаимодействие акустических волн.

Акустические колебания и волны представляют собой распространяющиеся колебательные движения любой материальной среды (газообразной, жидкой или твердой). Звук — это распространяющиеся сжатия и разрежения. Но из-за действия сил отталкивания между частицами сжать среду труднее, чем растянуть. Тогда полупериоды сжатия и разрежения не одинаковы (серая пунктирная линия на рис. 1).

В этом феномене суть (не единственная) нелинейности в акустике. Отсюда проистекают многие нелинейные явления.

Из-за нелинейности состояния и движения возникает самовоздействие синусоидальной волны с рождением в среде гармоник. Их иногда именуют вторичными источниками. По сути, вся акустика нелинейна, как, впрочем, и радиоэлектроника.

Теперь представим, что в среду посылаются не одна, а две волны с разными частотами. Тогда вторая волна движется в среде с изменяющимися параметрами, и она же, в свою очередь, меняет параметры среды для первой волны. Так возникает взаимное действие в пространстве и во времени одной волны на другую. Это и есть взаимодействие волн конечной амплитуды, играющее основную роль в нелинейной акустике. При нелинейном взаимодействии меняется спектральный состав исходных волн.

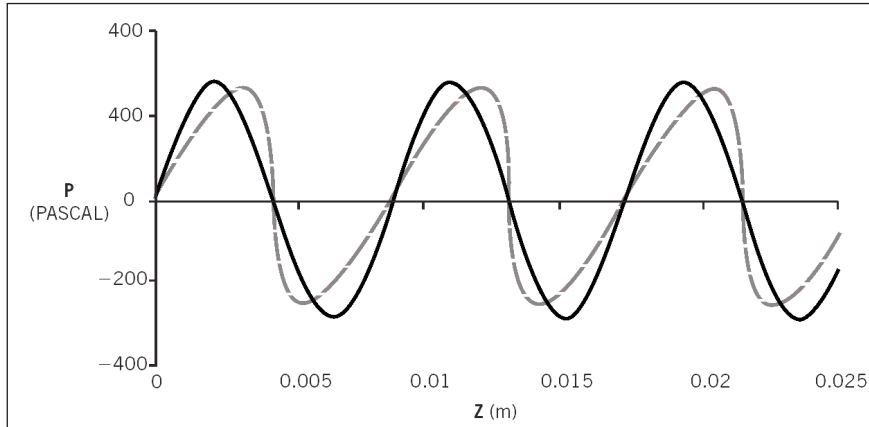


Рис. 1. Вид идеального синусоидального сигнала и вид синусоидального сигнала в среде

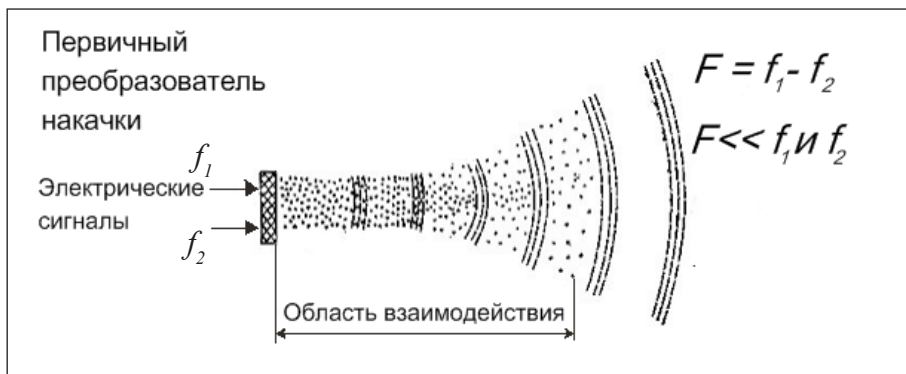


Рис. 2. Параметрическая антенна

На первичный излучатель, называемый излучателем накачки, подаются два синусоидальных электрических сигнала с частотами f_1 и f_2 . Они преобразуются в ультразвуковые и появляются в среде в виде пучка волн с теми же частотами f_1 и f_2 . От нелинейности в каждой точке среды появляются сигналы с частотами $2f_1$, $2f_2$, $(f_1 + f_2)$ и, главное, возникает сигнал низкой частоты $F = (f_2 - f_1)$, называемый разностной частотой. Например: пусть волна накачки имеет $f_1 = 50$ кГц, а $f_2 = 51$ кГц. Тогда разностная частота $F = 1$ кГц (рис. 3). Мы можем взять $f_2 = 52, 53, 54$ кГц и т. д. Тогда параметрическая антенна будет излучать соответственно частоты 2, 3, 4 кГц и т. д.



Рис. 3. Частоты накачки и разностная частота

В 1962 г. профессор физики из Университета Брауна Питер Вестервельт в статье «Параметрическая акустическая решетка» [1] рассмотрел основные сигналы, взаимодействующие в пределах объема, и вычислил область взаимодействия волн, вызванную нелинейностью в пределах небольшой части этого объема. Он описал генерацию сигнала разностной частоты коллимированного луча сигнала с двумя частотами. При описании модели допущено несколько

упрощений: отсутствие затухания разностной частоты относительно коллимировавшего луча частот накачки, сигналы накачки затухают одинаково и т. д.

В 1965 г. Берктей опубликовал статью, в которой дал точное теоретическое обоснование параметрического эффекта: «Возможная эксплуатация нелинейной акустики в подводных передающих устройствах» [2]. Его исследование было более общим и полным. Он рассматривает случаи, где сигналы с частотами накачки расширяются цилиндрически или сферически, так же как коллимировавший случай плоской волны. Он не ограничивал исследование двухчастотным сигналом. Для описания преобразований сигналов он использует понятие «огibaющая». Параметрический громкоговоритель обычно не ограничивается созданием одного сигнала. Исследование огibaющей позволяет рассмотреть любой спектр первичного сигнала. Оказывается, что демодулируемые сигналы зависят от этой функции огibaющей. Берктей приводит расчет, в результате которого оказывается, что демодулируемый сигнал в области параметрического преобразования является членом пропорции к производной второго порядка огibaющей, в квадрате.

Это называют «решением дальнего поля Берктея», так как он предполагает, что приемное устройство располагается достаточно далеко от источника, чтобы проигнорировать присутствие любого ультразвука. Решение допустимо для ближнего поля, но ультразвуковые волны накачки сосуществуют с демодулируемыми сигналами. Это фундаментальное выражение для расчета области параметрического преобразования.

Все вышеупомянутые исследователи основное внимание и усилия направляли на параметрические решетки для подводного применения, поскольку в то время считалось, что они не будут работать в воздухе.

Однако в 1975 г. Мэри Бет и доктор Блэксток в статье «Параметрический эффект в воздухе» [3] представили результаты экспериментов. Они доказали, что параметрический эффект наблюдается и в воздушной среде. Ученые использовали масляный гидрофон с выходными режимами в 18,6 и 23,6 кГц (для разностной частоты 5 кГц).

После этого открытия многие исследователи занялись изучением данного вопроса. Много научно-исследовательских работ было опубликовано по данной теме. Большинство исследователей, нацеленных на создание практического устройства, — японцы. Самыми известными авторами этих работ являются Ёнеяма, Камакура, Кумamoto, Аоки и Икегая.

В своей статье, опубликованной в «Журнале акустического общества США» в мае 1983 г. [4], Ёнеяма с коллегами предпринимает попытку создать антенную решетку со стандартными компонентами. Авторы собрали шестиугольную антенну из 547 преобразователей, которые работают в пределах 40 кГц. Чтобы преодолеть наклон частотной характеристики на 12 дБ/октава, они предлагают компенсировать сигнал прежде, чем модулировать частоты накачки. Это дает требуемую частотную характеристику (по ограниченному диапазону), уменьшая коэффициент модуляции для более высоких звуковых частот. Для случая двухполосной модуляции боковой полосы с одним модулируемым сигналом демодулируемая амплитуда аудиосигнала будет пропорциональна коэффициенту модуляции. Вторая гармоника пропорциональна квадрату коэффициента модуляции. Чтобы достигнуть низкого искажения при амплитудной модуляции, коэффициент модуляции должен быть как можно меньше, что отрицательно влияет на эффективность. Это делается, чтобы минимизировать «перекрестное взаимодействие» между верхними и нижними боковыми полосами. Так как 12 дБ/октава является серьезным наклоном и диапазон звуковых частот широк, высокий коэффициент модуляции используется для более низких звуковых частот, что позволяет избежать большого количества искажений. В практическом эксперименте исследователи просто используют пик частотной характеристики излучателей, чтобы компенсировать аудиосигнал. Они достигают равномерности характеристики от 1,5 до 7 кГц и узкой характеристики направленности для всех



звуковых частот. Однако их эксперименты показывают, что направленность уменьшается для более низких звуковых частот. В конце статьи авторы утверждают, что такая система могла бы использоваться в музее без звуковых барьеров между экспозициями.

Следующая статья была опубликована в 1984 г. и представлена на 10-м Международном симпозиуме по нелинейной акустике. Она называлась «Разработка параметрического громкоговорителя для практического применения» [5]. Авторы озвучили в ней три проблемы: оптимальная несущая частота, минимизация искажений и изоляция слушателя от ультразвука. Они утверждают, что несущая частота должна быть настолько низкой, насколько возможно, но не вызывать распространение ультразвука, и рекомендуют выбирать частоту между 30 и 70 кГц. Чтобы справиться с искажениями, они используют SRAM (square-rooting amplitude modulation) модуляцию, применение которой основано на решении дальнего поля Берктея, но вскоре обнаруживают, что это потребует дополнительной пропускной способности. Их экспериментальное устройство состоит из 581 излучателя. Ученые смогли показать, что для нескольких случаев вторая гармоника может быть значительно уменьшена. Наконец, чтобы минимизировать распространение ультразвука, они предлагают расположить акустический фильтр на некотором произвольном расстоянии от антенны.

В работе «Исследование для реализации параметрического громкоговорителя» [6] авторы снова рассматривают несколько проблем. Во-первых, низкая скорость преобразования. Они повторно поднимают вопрос минимизации искажений и вопросы безопасности. Чтобы улучшить эффективность, предлагается использовать более низкую несущую частоту, но при этом увеличивается область преобразования. Авторы предлагают 30 кГц в качестве хорошего компромисса между длиной области преобразования и безопасностью. Они анализируют, как увеличение апертурного размера антенны может компенсировать более низкий уровень звукового давления.

Уменьшение искажений рассматривается на примере одночастотного сигнала. Есть два способа уменьшить искажения. Первый — SRAM-модуляция, которая приводит к возникновению боковых полос. Другой — амплитудная модуляция с одной боковой полосой, таким образом, «взаимодействие двух боковых полос» устраняется. Для более комплексных сигналов исследователи признают, что искажение однополосной модуляции следует «из нелинейного взаимодействия боковой полосы». Это означает, что для комплексных сигналов применима только двухполосная модуляция при ухудшении пропускной способности.

Наконец, ученые используют акустический материал, чтобы снизить влияние ультразвука на человека. К сожалению, это также уменьшает уровень слышимого звука.

Следующая работа, которую опубликовали эти исследователи, появилась в журнале акустического общества США в 1991 г. и называлась «Исследование видов модуляции для параметрического громкоговорителя» [7]. Это маленькая статья, посвященная уменьшению мощности излучения. Исследователи уменьшают уровень несущей, когда нет никакого сигнала или его уровень достаточно низок. Это может сэкономить много электроэнергии, но представляет дополнительную нелинейность. Для эксперимента применяется решетка из 2000 излучателей с частотой резонанса 28 кГц. Используя для тестов аудиосигнал (84 секунды новостей) без ухудшения демодулируемого сигнала, ученые смогли уменьшить потребление энергии более чем на 64 %.

В статье «Характеристики параметрического громкоговорителя и подходящая модуляция ультразвука» [8] авторы используют решетку диаметром 0,5 м, которая содержит 1410 преобразователей, работающих в 27 и 30 кГц, чтобы создать сигнал на частоте 3 кГц. Основной целью этой работы было утверждение (основанное на более ранней работе Мерклингера [9]), что для небольших уровней сигнала демодулируемый сигнал пропорционален квадрату огибающей. С высокими амплитудами уровень сигнала становится пропорционален огибающей. Экспериментально была установлена величина в 130 дБ.



Статья «Использование прямоугольной антенны для параметрической системы» [10] посвящена результатам эксперимента с антенной решеткой 24 x 44 см, генерирующей частоты 25 и 30 кГц. Для расчета поля было применено уравнение Хохлова—Заболоцкой—Кузнецова. Уравнение ХЭК учитывает нелинейность, рассеяние и дифракцию в лучах. Это последовательный метод приближения, который описывает генерацию гармоник от однотональных частот накачки. Решение уравнения ХЭК дало тот же результат, что и эксперимент с круглыми излучателями. Авторы эксперимента пришли к заключению, что в дальнем поле прямоугольный источник дал примерно те же результаты, что и круглый источник той же площади. Для эксперимента они использовали 1102 маленьких пьезоизлучателя. Исходное давление составляло 116 дБ. Однако они действительно получали сигнал 79 дБ, 5 кГц на расстоянии 3,5 м (оптимальное расстояние для этой антенны). Когда подняли давление до 128 дБ, они получили больше чем 100 дБ, 5 кГц на расстоянии 3,5 м. Уровень гармонических искажений, рассчитанный для прямоугольного источника, оказался ниже, чем у круглого источника. В заключение статьи авторы пожаловались на огромный объем вычислений, который потребовалось провести.

В статье японских исследователей «Примеры применения параметрических громкоговорителей» [11], опубликованной в 1994 г., описаны испытания некоторых моделей параметрических антенн, чтобы определить, где технология может использоваться успешно. Авторы также проводят некоторую теоретическую работу, используя модифицированное уравнение расчета области преобразования. Они пытаются сделать компактную антенную решетку (но при этом увеличивается область преобразования), причем сравнивают сигналы, сгенерированные частотами накачки 30 и 25 кГц, с сигналами, сгенерированными на 55 и 50 кГц. При более низких частотах накачки в гармонические искажения меньше. Исследователи утверждают, что оптимальная несущая частота составляет приблизительно 35 кГц, но более высокочастотные излучатели могут быть более безопасными для людей. Авторы создают массив 91 пьезоэлементов (1 см в диаметре каждый). Полный размер антенной решетки составил 11 см в диаметре. Частоты резонансов составили 38,5 и 41,5 кГц для генерации сигнала 3 кГц. Уровень на излучателе составил 134,5 дБ, разностная частота имела уровень 90 дБ приблизительно в 0,5 м. Наконец, они исследовали решетку в 2208 маленьких пьезоэлементов. Целью эксперимента было установить разборчивость речи. Динамик был размещен в конце тоннеля длиной 1777 м, фоновый шум 52 дБ. Словесная разборчивость параметрического излучателя оказалась выше, чем у обычного.

Как уже отмечалось, большая часть исследований проводилась в Японии, но были исследователи и в других странах. Нельзя не отметить статью Джозефа Помпеи [12] о своих экспериментах, в результате которых ему удалось получить систему с низким коэффициентом гармонических колебаний. Это придало развитию параметрических систем новый толчок и вывело их из области науки в область коммерческого применения.

Защищенность акустической речевой информации определяется наличием «опасного» сигнала в местах возможной установки средств негласного съема акустической информации либо в направлениях возможного непреднамеренного прослушивания.

Зачастую пределы защищаемого помещения одновременно являются и границей контролируемой зоны, и использование существующих систем активного шумления неизбежно создает определенный уровень дискомфорта для людей, работающих как непосредственно в защищаемом помещении, так и в смежных.

Применение в составе систем постановки акустических помех воздушных параметрических антенн позволит одновременно обеспечить требуемое отношение сигнал/шум на границе помещения и вместе с тем добиться максимального комфорта при минимальном удалении от последней за счет отсутствия паразитных акустических шумов.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Westervelt P. J. Parametric acoustic array // J. Acoust. Soc. Am. 1963. Vol. 35. № 4. P. 535–537.
2. Berklay H. O. Possible exploitation of nonlinear acoustics in underwater transmitting applications // J. Sound Vib. 1965. Vol. 2. № 4. P. 435–461.
3. Bennett M. B. and Blackstock D. T. Parametric array in air // J. Acoust. Soc. Am. 1975. Vol. 57. № 3. P. 562–568.
4. Yoneyama M., Fujimoto J.-I., Kawamo Y. and Sasabe S. The audio spotlight: an application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design // J. Acoust. Soc. Am. 1983. Vol. 73. № 5. P. 1532–1536.
5. Kamakura T., Yoneyama M., Ikegaya K. Developments of parametric loudspeaker for practical use // 10th Int. Symp. Nonlinear Acoustics. 1984. P. 147–150.
6. Kamakura T. et al. A study for the realization of a parametric loudspeaker // J. Acoust. Soc. Japan, June 1985.
7. Kamakura T., Aoki K. and Kumamoto Y. Suitable modulation of the carrier ultrasound for a parametric loudspeaker // Acustica. 1991. Vol. 73. P. 215–217.
8. Aoki K., Kamakura T., Kumamoto Y. Parametric loudspeaker – characteristics of acoustic field and suitable modulation of carrier ultrasound // Electronics and Communications in Japan. Part 3. 1991. Vol. 74. № 9. P. 76–80.
9. Merklinger H. M. Improved efficiency in the parametric transmitting array // J. Acoust. Soc. Amer. 1975. Vol. 58. № 4. P. 784–787.
10. Kamakura T., Tani M., Kumamoto Y. Parametric sound radiation from a rectangular aperture source // Acustica. 1994. Vol. 80. P. 332–338.
11. Aoki K. et al. A parametric loudspeaker applied examples // Electronics & Communications in Japan. Part 3. 1994. Vol. 77. № 1. P. 64–73.
12. Pompei F. J. The use of airborne ultrasonics for generating audible sound beams // Proceedings of the 105th Audio Engineering Society Convention. San Francisco, CA, 1998. JAES. Vol. 47. Issue 9. September 1999. P. 726–731.
13. Горелик Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику / Под ред. С. М. Рьгова. 3-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

