Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

И. Есипов, Физика звука, *Квант*, 2018, номер 12, 8–15

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20181202>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 44.207.124.84

26 апреля 2023 г., 14:38:18

Физика звука

И.ЕСИПОВ

АКУСТИКА – ЭТО РАЗДЕЛ ФИЗИКИ, ИЗУЧАЮЩИЙ ВОЗБУЖДЕНИЕ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ПРИЕМ ЗВУКОВЫХ ВОЛН, А ТАКЖЕ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СО СРЕДОЙ. Особенностью звуковых волн, отличающих их от электромагнитных или гравитационных, является то, что они могут распространяться только в сплошной упругой среде. Звук окружает нас повсюду: в атмосфере, под водой, под землей, в биологических средах и материалах и даже в космосе. Только звук может распространяться в земных структурах и под водой без существенного затухания, поэтому он широко используется в исследованиях природных сред.

Обычно мы называем звуком то, что мы слышим. Принято считать, что диапазон частот слышимого нами звука лежит в пределах от 20 Гц до 20 кГц. Это соответствует 20–20000 колебаний в секунду. Звуковые волны, частота колебаний которых выходит за этот диапазон, получили свои специальные названия.

Ультразвуком называют звуковые волны, частота колебаний которых выше 20 кГц. Технологически развитый диапазон применения ультразвука лежит в пределах от 20 кГц до 100 МГц. Более высокочастотная область ультразвука получила название *гиперзвук*. Звуковые волны гиперзвуковых частот могут распространяться только в кристаллах с малым поглощением звука, таких, как монокристаллы кварца, сапфира, ниобата лития, железо-иттриевого граната и др. Гиперзвук используется при обработке больших массивов информации, в том числе оптических изображений, и исследовании строения твердых тел. Этим занимается наука акустоэлектроника. Диапазон, в котором гиперзвук возбуждается искусственным, контролируемым образом, ограничивает-

ся частотами порядка 10 ГГц, что связано с высоким затуханием. При столь высоких частотах длина волны такого звука будет уже соизмеримой с межатомным расстоянием в кристалле. В таком случае мы уже не можем считать кристалл сплошной средой.

Звуковые волны, частота которых ниже 20 Гц, называют *инфразвуком*. Затухание инфразвука невелико, и поэтому инфразвуковые волны активно используются для исследования океана и структуры земли. Звуки взрывов вулканов могут обогнуть весь земной шар, низкочастотный подводный звук распространяется через океаны на тысячи километров.

Далее мы обсудим современные идеи и новые акустические технологии исследования и освоения окружающего мира. Часто акустические методы не имеют альтернативы и поэтому оказываются наиболее эффективными для решения той или иной важной задачи.

Звук и инфразвук в исследовании природы

Исследование океана. Звуковые волны распространяются в природе – в атмосфере, океане, под землей – по своеобразным каналам. Открытие подводного звукового канала было сделано в нашей стране в 1946 году, когда ученые вместе с военными моряками испытывали в Японском море акустическую аппаратуру для проведения измерений подводного звука от взрыва американской атомной бомбы на атолле Бикини. В процессе испытаний регистрировался уровень акустического сигнала от взрывов глубинных бомб в зависимости от расстояния. Неожиданно выяснилось, что для дистанций больше 50 км уровень зарегистрированных сигналов стал очень слабо меняться с расстоянием и звуки взрывов глубинных бомб были хорошо

слышны и на дистанции 600 км, когда опыт был прекращен. Ожидалось, что для большого океана далеко от берега акустический сигнал должен распространяться по сферическому закону от точечного источника, каким можно было считать глубинную бомбу. В таком случае интенсивность звука должна быть обратно пропорциональной площади сферы, охватывающей источник, т.е. должна была уменьшаться обратно пропорционально квадрату расстояния, пройденного звуком.

Объяснение этому интересному эффекту дал Л.М. Бреховских – впоследствии академик и лауреат Государственной премии СССР. Он обратил внимание на то, что температура воды быстро падает до глубины 100–200 м, а затем принимает постоянное значение около 4 °С. Падение температуры приводит к уменьшению ско-

рости распространения звука, а рост давления с глубиной приводит к увеличению этой скорости. Таким образом, в зависимости скорости распространения звука от глубины оказывается минимум, в котором и концентрируется акустическая энергия. На рисунке 1 видно, что если поместить излучатель на уровень минимума скорости звука, то звуковые лучи, выходящие из излучателя, в результате рефракции будут удерживаться вблизи этого минимума. В итоге часть звуковых лучей, вышедших из источника под не очень крутыми углами, остаются при распространении в слое толщиной в несколько сот метров. Такой слой представляет собой подводный акустический волновод, или подводный звуковой канал.

Стоит отметить, что эффект акустического волновода использовался средневеко-

Рис. 1. Схематическое изображение распространения сигнала в подводном звуковом канале. Слева – профиль скорости звука в зависимости от глубины. Источник и приемник звука расположены на оси канала, соответствующей минимальной скорости звука. Лучи в результате рефракции звука совершают циклические осцилляции. Цифры над лучами указывают угол выхода луча из источника. В нижней части рисунка показаны две серии осциллограмм зарегистрированных сигналов, отличающихся температурными условиями в приповерхностной части канала

выми мастерами при создании «шепчущих» галерей. Такие галереи имеют кривые или замкнутые стены. Если вы вблизи такой стены говорите шепотом, то звуковые лучи концентрируются около нее и на расстоянии в несколько десятков метров можно отчетливо слышать ваш шепот, находясь также около стены. Такие шепчущие галереи есть в соборах Святого Павла в Лондоне и Святого Петра в Риме, в Храме Неба под Пекином и, возможно, где-то еще.

Характер распространения звука в акустическом волноводе аналогичен распространению лазерного излучения в оптическом волноводе. В настоящее время особенности распространения звука в подводном акустическом волноводе используются для термометрии океана.

Океан можно рассматривать как гигантский, занимающий огромную площадь термометр. Следя за изменениями температуры глубинных слоев океана, можно следить за потеплением климата. Дело в том, что масштабные климатические изменения надежно определить чрезвычайно трудно из-за больших флуктуаций во времени и пространстве. Огромные массы воды в океане усредняют эти флуктуации. Определить среднюю температуру глубинных слоев океана на масштабах в несколько тысяч километров можно только акустическими методами, электромагнитные волны в морской воде не распространяются на заметное расстояние.

Скорость распространения звука увеличивается с ростом температуры. На рисунке 1 внизу показаны две серии зарегистрированных акустических импульсов, отличающихся тем, что во второй серии верхние слои океана имели несколько более высокую температуру, чем в первой. Как видно, сигналы, распространяющиеся по красному лучу, который максимально близко подходит к нагретой поверхности океана, приходят несколько раньше, чем сигналы, распространяющиеся по другим лучам. Для дистанции 250 км эти изменения во времени распространения могут составлять доли секунды. По другим лучам изменений во времени распространения нет. Таким образом, из такого опыта можно

узнать, на сколько градусов и на какую глубину прогрелась вода в океане. Ясно, что чем больше дистанция распространения звука, тем выше чувствительность этого метода. Звук пробегает 250 км в океане за 167 с, что соответствует скорости распространения около 1500 м/с. Заметим, что первыми приходят наиболее быстрые сигналы, распространяющиеся по наиболее крутым лучам, лежащим в слоях океана с большей скоростью распространения. А наиболее интенсивные сигналы приходят последними по пологим лучам, находящимся в окрестности оси подводного звукового канала, где скорость распространения минимальна.

Такая особенность распространения звука используется для дистанционного мониторинга теплопереноса в океане, что важно для прогнозирования климата. Океан формирует погоду на земле. Северный Ледовитый океан является кухней погоды для Европы и существенной части Азии. Распределенная по всему океану система излучателей и приемников звука может решать самые разнообразные задачи. Среди них можно выделить измерение времени распространения сигналов на протяженных трассах для определения содержания тепла и циркуляции океанических вод как на масштабах всего океана, так и в отдельных его частях; обеспечение подводного позиционирования и навигации подо льдом; мониторинг динамики льда, землетрясений и перемещения морских животных при пассивном прослушивании акватории океана. Все эти процедуры система может выполнять в реальном времени.

Исследование атмосферы. Распространение звука в атмосфере подчиняется тем же самым законам, что и распространение звука в океане, с той разницей, что скорость распространения звука в воздухе в нормальных условиях у поверхности земли составляет 340 м/с. Это существенно меньше скорости звука в воде.

На рисунке 2 представлена схема звуковых лучей, выходящих из источника звука в атмосфере. Как видно, в присутствии ветра лучи по-разному ведут себя в зависимости от направления распространения.

Рис. 2. Схема звуковых лучей, выходящих из источника звука в атмосфере в присутствии ветра

Поток воздуха увеличивает скорость распространения звука по ветру и несколько снижает ее в противоположном направлении. Как правило, приземный поток воздуха или ветер увеличивает свою скорость с высотой. Скорость распространения звука по ветру на большой высоте больше, чем у земли, поэтому фронт звуковой волны при подъеме вверх заворачивается и волна направляется вниз, где скорость меньше. Возникает рефракция звука. Благодаря этому в приповерхностном слое атмосферы образуется звуковой волновод, в котором концентрируется звук, и на поверхности земли можно регистрировать акустические сигналы, которые распространялись на высоте в несколько десятков километров. Эффект рефракции при распространении против ветра приводит к тому, что звук быстро уходит на большую высоту (десятки километров). Поэтому мы плохо слышим против ветра и хорошо по ветру.

Приземный звуковой волновод может образоваться не только в результате ветра. В тихий безветренный морозный день где-то за городом можно далеко слышать лай собак или шум машины. В такую погоду в приземной атмосфере возможна так называемая температурная инверсия. Обычно температура воздуха понижается с высотой, но в морозный день температура у поверхности земли, особенно в низине, может быть ниже, чем на некоторой высоте. Минимальная температура в приземном слое воздуха соответствует минимуму

скорости распространения звука. Таким образом, температурная инверсия обеспечивает волноводное распространение звука у поверхности земли.

На рисунке 3 показано распределение температуры с высотой в атмосфере. Как видно, эта характеристика, как и в океане, имеет слоистую структуру. В областях нижней границы стратосферы (тропопауза) и нижней границы термосферы (мезопауза) температура, а следовательно, и скорость распространения звука достигают минимума. Здесь выполняются усло-

Рис. 3. Стратификация температуры в атмосфере. Изменение давления показано в гектапаскалях (1 ГПа = 100 Па). В областях тропопаузы и мезопаузы температура, а следовательно, и скорость распространения звука достигают минимума. Здесь находятся атмосферные звуковые каналы

вия для существования атмосферных звуковых каналов. Звуковые волны от извержений вулканов или наземных взрывов распространяются по этим каналам на огромные расстояния и даже могут обогнуть Земной шар. Поэтому средняя атмосфера (от 20 до 120 км высоты) является хорошим проводником инфразвука. Это свойство атмосферы позволило ученым разработать методику инфразвукового зондирования атмосферы, базирующейся на явлении рассеяния акустических импульсов на слоистых неоднородностях скорости ветра и температуры атмосферы вплоть до высот нижней термосферы порядка 140 км. С помощью такой методики можно определить флуктуации скорости ветра в диапазоне высот от верхней стратосферы до нижней термосферы (90–140 км).

Сейсмические волны в земле. Аналогичным образом распространяются сейсмические волны в земле. Они могут быть как естественного происхождения, так и искусственные. В качестве естественных источников сейсмических волн мы можем назвать землетрясения, извержения вулканов, горные обвалы. Искусственным образом сейсмические волны возбуждаются наиболее эффективно взрывом или специальными многотонными вибраторами. Если в океане и атмосфере распространяются только продольные звуковые волны (в жидкостях и газах отсутствует сдвиговая упругость), то сейсмические волны могут быть как продольные, так и поперечные. Поперечные волны, в зависимости от плоскости колебаний, могут иметь разную поляризацию. Скорость распространения поперечных волн, как правило, в 2–3 раза меньше скорости распространения продольных. Наличие сейсмических волн двух типов расширяет возможности сейсмического зондирования в сравнении с зондированием океана или атмосферы.

Центральной задачей сейсмического зондирования является исследование структуры земли и поиск полезных ископаемых. Обе эти задачи требуют выполнения противоречивых подходов. С одной стороны, интересно заглянуть как можно глубже под поверхность земли. Этого можно

достичь, понижая частоту сейсмического излучения. С понижением частоты снижаются потери, связанные с затуханием, и звуковые волны распространяются дальше. С другой стороны, уменьшение частоты ведет к росту длины излучаемой волны, а это снижает разрешающую способность дистанционного метода зондирования. Всё возрастающие требования к качеству разведки полезных ископаемых заставляют искать способы повышения разрешающей способности, а следовательно, и точности сейсморазведки.

Разрешить возникшее противоречие удалось за счет развития методов приема сейсмических сигналов. Известно, что чем больше приемная антенна, тем выше ее пространственное разрешение. Если принимать сигналы большим количеством приемников, объединенных в единую сеть, то можно повысить пространственную точность дистанционного зондирования. Но для этого требуется сложная обработка сигналов от многих сотен или даже тысяч приемников. Современная сейсморазведка обеспечивает достаточную точность зондирования, чтобы определить продуктивные залежи полезных ископаемых, например нефти или газа, на глубинах более 10 км. Современные технологии обеспечивают прохождение скважины горизонтально вдоль пласта, чтобы повысить эффективность добычи нефти. Толщина пласта составляет порядка 10 м на глубине несколько километров. При этом длина скважины может быть более 10 км. Точность прокладки скважины соизмерима с точностью выведения ракеты на траекторию к межпланетному полету.

Для зондирования структур земли используют естественные низкочастотные сейсмические сигналы от землетрясений или даже приливных волн, вызванных движением Луны. На рисунке 4 показан пример результатов такого зондирования на глубину более 50 км. Он свидетельствует о том, что в структуре земли есть не только горизонтальные слои, но и крупные вертикальные разломы, которые могут доходить до мантии.

Знание особенностей распространения

Рис. 4. Вертикальный сейсмический разрез строения верхних слоев земли

низкочастотного звука в океане, атмосфере и земле позволило разработать и создать эффективную международную систему контроля за выполнением договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний. Существует специальная схема расположения станций на земле и в океане, осуществляющих постоянный мониторинг и регистрирующих сейсмические, гидроакустические и инфразвуковые сигналы в атмосфере. Эти станции объединены в общую сеть и поэтому могут определить место и время события, приведшего к появлению того или иного сигнала.

Примером такой эффективности является обнаружение взрыва метеороида в небе над Челябинском 15 февраля 2013 года. Метеороид вошел в атмосферу под углом 20° со скоростью 18 км/с . По мере полета в атмосфере скорость метеороида уменьшалась и происходил его нагрев. Перед ним возникла ударная волна, в которой воздух был сильно сжат и разогрет. Метеороид разрушился, когда разность давлений на фронте ударной волны и на противоположной его стороне превысила

предел прочности метеороида. Это разрушение (взрыв) сопровождалось вспышкой яркости излучения в течение пяти секунд. Максимум яркости наблюдался на высоте $23,3 \text{ км}$ южнее Челябинска. Примерный эффективный диаметр метеороида равен 18 м , а его масса 11000 тонн . Семнадцать станций зарегистрировали ударную волну этого взрыва. Последующий анализ позволил оценить эквивалент мощности взрыва в $2\text{--}3 \text{ кт}$ тринитротолуола.

Современные проблемы применения медицинского ультразвука

Ультразвук мегагерцового диапазона частот достаточно хорошо распространяется в биологических тканях. Как известно, живые организмы почти на 90% состоят из воды. Поэтому скорость распространения звука в таких условиях близка к 1500 м/с , что соответствует скорости распространения звука в воде. Длина волны ультразвука на частоте 1 МГц равна при этом $1,5 \text{ мм}$, что обеспечивает достаточно высокое пространственное разрешение ультразвуковых методов.

Хорошо известно применение ультразвука в медицине для диагностики и исследования внутренних органов и суставов (УЗИ). Менее известны успехи в области ультразвуковой хирургии, хотя и здесь есть существенные результаты. Прежде всего это дробление и удаление камней из почек с помощью фокусированного воздействия ударными волнами – так называемая литотрипсия. Начиная с 1980-х годов литотрипсия является наиболее распространенной процедурой для удаления камней из почек. Другим быстро развивающимся направлением исследований является терапевтическое направление применения ультразвука, основное преимущество которого – лечебное воздействие внутри тела без повреждения окружающей ткани. Широкие возможности различных видов ультразвуковой терапии были продемонстрированы экспериментально, а некоторые из них уже нашли применение в клинической практике. Одним из примеров является интенсивный фокусированный ультразвук.

Рисунок 5 иллюстрирует основную идею применения фокусированного ультразвука. Акустическая интенсивность вблизи излучающего преобразователя достаточно низка, так что ткани не повреждаются. В

Рис. 5. Схема ультразвукового воздействия на биологические ткани. Пучок интенсивного фокусированного ультразвука используется для локализованного разрушения опухоли или остановки внутреннего кровотечения без повреждения окружающей ткани. Акустическая энергия, излучаемая ультразвуковым преобразователем, концентрируется в объем, примерно равный объему рисового зерна

фокальной области интенсивность заметно возрастает, и нагрев за счет поглощения волны достаточен для теплового разрушения белков ткани. Это позволяет неинвазивно «прижечь» место внутреннего кровотечения или вызвать некроз опухолевых тканей в глубоко расположенных областях человеческого тела. Наиболее перспективными, с точки зрения расширения применения ультразвуковых методов в медицине, являются гемостазис (остановка кровотечения), хирургия и стимуляция иммунного отклика. Можно также упомянуть ультразвуковой контроль и интенсификацию транспорта лекарств. Экспериментально было показано, что ультразвук может улучшать транспорт лекарств и генов через биологические барьеры: клетки, ткани и тромбы.

Укажем на некоторые основные проблемы, которые нуждаются в решении для успешного применения интенсивного ультразвука в практике.

Одной из важных задач является получение больших значений амплитуды акустической волны в фокусе с учетом струк-

туры человеческого тела. Усиление ультразвуковой волны при фокусировке необходимо для обеспечения высокой интенсивности в небольшой фокальной области, чтобы не повредить остальные участки ткани на пути распространения ультразвука. Ультразвуковой ожог кожи является одним из характерных побочных эффектов при применении интенсивного ультразвука, поскольку в коже коэффициент поглощения ультразвука в несколько раз выше, чем в ткани. Поэтому на этом участке акустическая интенсивность должна быть как можно более низкой. Такую процедуру возможно реализовать, применяя многоэлементные ультразвуковые антенны, излучение которых будет согласовано со структурой тела, по которой должно пройти излучение.

Важными также являются технические разработки по созданию хорошего акустического согласования ультразвукового излучателя с телом. Дело в том, что ультразвуковые излучатели делаются, как правило, из пьезоэлектрической керамики. И для того чтобы обеспечить наилучшую передачу звуковой энергии в человеческое тело, нужно согласовать условия прохождения звука от твердой пьезокерамики к мягким биологическим тканям. Для этого применяют специальные контактные смазки или жидкости. Например, по сравнению с вогнутыми источниками плоские УЗ преобразователи гораздо труднее сделать фокусирующими, но зато для них легче

Рис. 6. Схема ультразвукового транскраниального воздействия на мозг

обеспечить согласование при непосредственном контакте с кожей. Поглощение в костях еще сильнее, вот почему важно минимизировать попадание на них ультразвука. Соответствующая технология предполагает использование многоэлементных фазированных антенн для осуществления электронной фокусировки. На рисунке 6 показано схематическое изображение такой антенны для фокусировки ультразвукового излучения в мозг через кости черепа.

Мозг является тем органом, где применение терапии с использованием фокусированного ультразвука имеет свои особенности. Принципиальной трудностью здесь является тот факт, что ультразвуковые волны плохо проходят сквозь черепную коробку из-за поглощения в кости и отражения на ее границах. Кроме того, кости черепа неоднородны по толщине и характеризуются более высокой (по сравнению с расположенными за ними мягкими тканями) скоростью звука, что приводит к трудно предсказуемым эффектам рефракции. Решение проблемы ультразвукового воздействия и визуализации через толстые кости черепа возможно при использовании разработанных в последнее время методов волновой физики, связанных с компенсацией потерь и аберраций при распространении волн в неоднородной среде. В основе лежит голографический принцип, согласно которому распределение характеристик волнового поля на некоторой поверхности в этом поле содержит информацию о всей трехмерной структуре поля, а также принцип обратимости недиссипативных волновых процессов во времени и связанный с этим метод обращения волнового фронта.

Метод обращения волнового фронта, применяемый в радиолокации и при исследовании структуры подводных акустических каналов в океане, предполагает использование пробной волны, которая, проходя по неоднородной среде, регистрируется многоэлементной антенной. Зарегистрированный сигнал имеет сложную пространственную и временную структуру, что отражает многолучевое распространение через неоднородную среду. Если на

антенне обратить во времени фазовые задержки зарегистрированного сигнала и излучить сигнал с такой сложной пространственно-временной фазовой модуляцией, то излученный сигнал, проходя в обратном порядке через те же самые неоднородности среды, соберется, т.е. сфокусируется в точку излучения пробного сигнала. Для реализации такого подхода необходимо использовать многоэлементные приемно-излучающие антенны, управляемые мощными вычислительными процессорами, обеспечивающими в реальном времени сложную многоканальную обработку сигналов.

Обратим внимание на еще одну особенность, требующую учета при применении интенсивного фокусированного ультразвука, – это акустическая нелинейность. Дело в том, что в уже использующихся в практике системах ультразвуковой хирургии уровни акустической интенсивности в области фокуса достигают $10000\text{--}30000\text{ Вт/см}^2$. При таких интенсивностях волна ведет себя нелинейным образом. Скорость распространения звуковой волны становится зависящей от ее фазы: волна в области сжатия имеет большую скорость распространения, чем в области разрежения. Поэтому в синусоидальной волне фаза сжатия догоняет фазу разрежения – в волне образуются разрывы и волна превращается в пилообразную, что в спектральном представлении соответствует обогащению монохроматического ультразвукового излучения высшими гармониками. Обогащение спектра излученного сигнала сказывается и на процессе дифракции. Дифракция и, соответственно, фокусировка ультразвукового излучения становятся нелинейными, т.е. амплитудно-зависимыми процессами. Расстояние, на котором образуется разрыв в плоской гармонической волне с характерной для медицинских приложений частотой $1,5\text{ МГц}$, составляет всего $3\text{--}5\text{ мм}$. Этот масштаб соизмерим с размерами фокальной области ультразвукового пучка, поэтому при описании акустических полей таких систем безусловно необходимо учитывать нелинейные эффекты.