АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2007, том 53, № 2, с. 157–167

ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 534.222

КОМПРЕССИЯ И УСИЛЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ОДНОМЕРНОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ

© 2007 г. А. Е. Пономарев, С. И. Булатицкий, О. А. Сапожников

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119992 Москва, Ленинские горы
E-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru

Поступила в редакцию 06.02.06 г.

Исследована компрессия ультразвуковых импульсов при их отражении от слоистой структуры. Короткий импульс излучался в воду и направлялся на структуру, состоящую из плоских твердотельных пластинок, за которыми находился воздушный слой. Из-за переотражений в структуре сигнал существенно удлинялся. Отраженный сигнал принимался тем же преобразователем и оцифровывался. Далее производилось обращение волны во времени, ее повторное излучение на слоистую структуру и прием отраженного сигнала. Из-за инвариантности процессов относительно изменения знака времени в структуре происходила компрессия импульса: отраженный сигнал укорачивался и приобретал форму исходного сигнала. Экспериментально продемонстрирована возможность эффективной компрессии сигналов. Численное моделирование показало, что, используя более сложные структуры, можно существенно увеличить степень сжатия и получить короткие сигналы намного большей амплитуды, чем в волне, излучаемой преобразователем. Предложен алгоритм построения эффективных систем компрессии.

PACS: 43.60.Tj

ВВЕДЕНИЕ

В технологических и медицинских приложениях ультразвука часто требуется создать волны большой амплитуды. Поскольку максимально достижимое акустическое давление на поверхности реальных акустических источников ограничено, для получения высокоинтенсивных полей обычно используется пространственная фокусировка. При этом за счет вогнутой формы излучателя или путем применения акустических линз либо зеркал создаются такие условия, когда энергия ультразвука собирается с большой площади в небольшую (фокальную) область. При этом происходит усиление волны, в том смысле, что ее амплитуда заметно возрастает. Конечно же, полная энергия волны при этом не изменяется, происходит лишь ее перераспределение в пространстве. Фокусировка волн используется с древних времен и в акустике, и в оптике, и ее эффективность очевидна. Однако возможности (пассивного) усиления волны не ограничиваются пространственной фокусировкой. Чисто формально, четырехмерное пространство-время, в котором рассматривается волновой процесс, допускает фокусировку не только по пространственным компонентам, но и во времени. По аналогии с фокусировкой в пространстве, когда энергия волны собирается с большой области в малую, при фокусировке во времени энергия может собираться с длинного временно́го интервала в короткий. Иначе говоря, требуется каким-либо способом обеспечить временну́ю компрессию волнового сигнала. Работы в этом направлении начались относительно недавно. Наибольшее развитие такой подход получил в оптике, где укорочение лазерных импульсов достигается путем пропускания частотно-модулированных сигналов через среду с дисперсией, в качестве которой используется оптическое волокно или дифракционная решетка [1]. В акустике исследований в этом направлении пока немного. Заметим, что укорочение сигнала может быть использовано не только для его усиления, но и для того, чтобы улучшить разрешение диагностических систем.

Возможность временно́й компрессии акустических сигналов тесно связана с новым направлением в акустике – временны́м обращением волн (ВОВ) [2, 3, 4]. Прогресс в этом направлении достигнут, в основном, благодаря работам М. Финка с учениками, которые предложили и экспериментально реализовали "обращающее время зеркало" (time-reversal mirror) [2]. В качестве такого зеркала в настоящее время используется многоэлементная двумерная решетка широкополосных преобразователей, работающая в приемо-передающем режиме. Преобразователи управляются электронным блоком, который записывает полную временну́ю форму принимаемых преобразователями сигналов, обращает эти сигналы во времени и, после усиления, вновь подает на те же преобразователи для излучения. Как видно, такое обращающее время зеркало отражает волну с

определенной задержкой, связанной с необходимостью записи сигнала в течение определенного интервала времени. Электронный блок является важной компонентой систем обращения волн. Создать обращающее время зеркало на основе других принципов, например, посредством нелинейных волновых эффектов в материале зеркала, пока удалось только для синусоидальных волн [5], хотя ведутся исследования и по обращению во времени и негармонических волн [6]. В случае синусоидальных волн ВОВ тождественно обращению волнового фронта (ОВФ), подробно исследованному в оптике [7, 8].

Системы, работающие на принципе ВОВ, позволяют компенсировать искажения волны во времени и пространстве при ее прохождении через неоднородную среду без поглощения. Соответствующие приложения многочисленны: сюда входят задачи подводной акустики [9, 10], неразрушающего контроля [11], ультразвуковой хирургии [12, 13]. Однако нас здесь будет больше интересовать другой аспект ВОВ – возможность компрессии и усиления сигналов. Идея компрессии путем ВОВ достаточно проста. Пусть короткий акустический импульс проходит через слой неоднородной среды. Из-за многократного рассеяния он приобретает не только пространственные искажения, но и растягивается во времени. Если зарегистрировать получившийся длинный сигнал, обратить его во времени и излучить обратно в среду, то после прохождения через исходный неоднородный слой сигнал должен укоротиться и принять форму исходного импульса. Как видно, сжимающим устройством здесь является пассивный неоднородный слой. Заметим однако, что таким слоем сжимается не всякий сигнал, а лишь специальным образом подобранный. Интересная иллюстрация этого принципа приведена в работе [14], где описана "ультразвуковая базука" – устройство, позволяющее создать интенсивный фокусированный импульс в заданной точке путем пропускания излучения многоэлементного источника волны через трубу, от стенок которой происходит многократное рассеяние.

Использование произвольной неоднородной среды позволяет добиться укорочения сигнала, но такая система может оказаться неоптимальной. Эффективная система компрессии требует использования специально подобранной неоднородности. Настоящая работа посвящена исследованию этого аспекта систем с ВОВ.

ПЛОСКОСЛОИСТАЯ СРЕДА ДЛЯ ЗАДАЧ КОМПРЕССИИ ИМПУЛЬСОВ

Использование многоэлементных датчиков сильно усложняет и удорожает системы с ВОВ. В то же время многие эффекты, в том числе компрессия импульсов, могут быть реализованы на основе одного преобразователя, если обеспечить условие одномерного распространения волн. (Компрессия одним преобразователем, в принципе, возможна и в случае неодномерного распространения, однако такой подход труднореализуем.) Одномерные волны возникают при использовании плоского преобразователя больших волновых размеров. В прожекторной зоне преобразователя можно пренебречь дифракционными эффектами и считать излучаемую волну плоской. Чтобы волна оставалась плоской и при распространении в неоднородной среде, эта среда должна быть одномерной, т.е. плоскослоистой. В данной работе в качестве неоднородной среды используется структура, состоящая из одной или нескольких плоскопараллельных твердотельных пластин, размещенных в воде. Такая система характеризуется сильной дисперсией, которая приводит к искажению распространяющихся в ней сигналов. Благодаря малости коэффициента поглощения ультразвука в пластинах и воде, потери энергии волны в процессе ее отражения невелики.

Для обеспечения компрессии отражающая неоднородная среда должна состоять из пластин, каждая из которых, сама по себе, отражает слабо. Действительно, только при этом условии в процессе отражения от набора пластин из короткого падающего импульса получится длинный сигнал меньшей амплитуды и, после обращения знака времени, из длинного импульса – короткий импульс большой амплитуды. Пластины с малым отражением можно создавать двумя способами. Первый способ заключается в использовании тонких пластин, т.е. пластин, толщина которых намного меньше длины звуковой волны. Коэффициент отражения от тонкого слоя растет линейно с его толщиной, т.е. может быть каким угодно малым. Вторым способом является использование резонансных пластин – слоев, толщина которых кратна целому числу полуволн в материале пластины. Как известно, на резонансной частоте такие пластины полностью пропускают через себя волну, т.е. коэффициент отражения гармонического сигнала оказывается равным нулю. Отстройкой от резонанса или увеличением спектральной полосы сигнала можно добиться желаемого уровня коэффициента отражения.

В использованном в настоящей работе мегагерцовом диапазоне частот необходимая толщина тонких пластин равна сотым долям миллиметра, а диаметр пластин должен составлять несколько сантиметров. Это делает невозможным использование стекол, а при использовании металлических слоев (фольги) трудно обеспечить плоскостность и параллельность слоев. Ситуация с резонансными пластинами гораздо благоприятнее: толщина полуволновых пластин составляет порядка миллиметра. Единственным недостат-

ком резонансных пластин по сравнению с тонкими является тот факт, что малый коэффициент отражения достигается лишь при использовании узкополосных сигналов, т.е. радиоимпульсов. Для компрессии видеоимпульсов такие пластины не годятся. Исходя из этого, описанные ниже эксперименты проводились с радиоимпульсами, отражаемыми от наборов резонансных пластин.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Прием и излучение акустических импульсов производились одним и тем же круглым плоским преобразователем диаметра 25 мм (Panametrics V194). Преобразователь имел частотную полосу от 3 до 6 МГц. Электрическое напряжение подавалось на преобразователь от широкополосного генератора, способного синтезировать сигналы произвольной формы с использованием до 65536 точек в пределах используемого временнóго интервала (Agilent 33250A). Акустический сигнал, отраженный от неоднородного слоя, принимался преобразователем и подавался на цифровой осциллограф (Tektronix TDS 520A). Оцифрованный сигнал поступал далее по шине GPIB на компьютер и подвергался необходимой обработке, в частности, обращению во времени. Компьютер управлял также генератором сигналов.

В экспериментах использовались также относительно широкополосные сигналы, поэтому необходимо было учитывать частотную характеристику преобразователя. Для этого измерялась частотная зависимость амплитуды гармонической волны, отраженной от толстой алюминиевой пластины. Для измерения указанной характеристики на преобразователь подавался импульс с прямоугольной огибающей на заданной частоте. Длительность сигнала выбиралась такой, чтобы амплитуда сигнала успевала устанавливаться и, кроме того, чтобы излучение заканчивалось к моменту прихода отраженного сигнала. Измерялись амплитуды падающего и отраженного импульсов на участках с установившейся (постоянной) огибающей. Полученная частотная характеристика (излучение/прием) использовалась при расчетах и при сравнении исходного и дважды отраженного сигналов. Кроме частотно-зависимого влияния на амплитуду сигнала, электрическая цепь и акустический преобразователь вносили также частотно-зависимый фазовый сдвиг. Однако дополнительный набег фазы φ в экспериментах происходил дважды: при излучении/приеме исходного сигнала и при излучении/приеме инвертированного во времени отраженного сигнала. Поэтому фазовый набег φ, полученный исходным сигналом, после инвертирования сигнала во времени становился равным $-\varphi$ и полностью компенсировал второй фазовый набег. Таким образом, зависимость фазы от частоты никак не влияла на дважды отраженный сигнал.

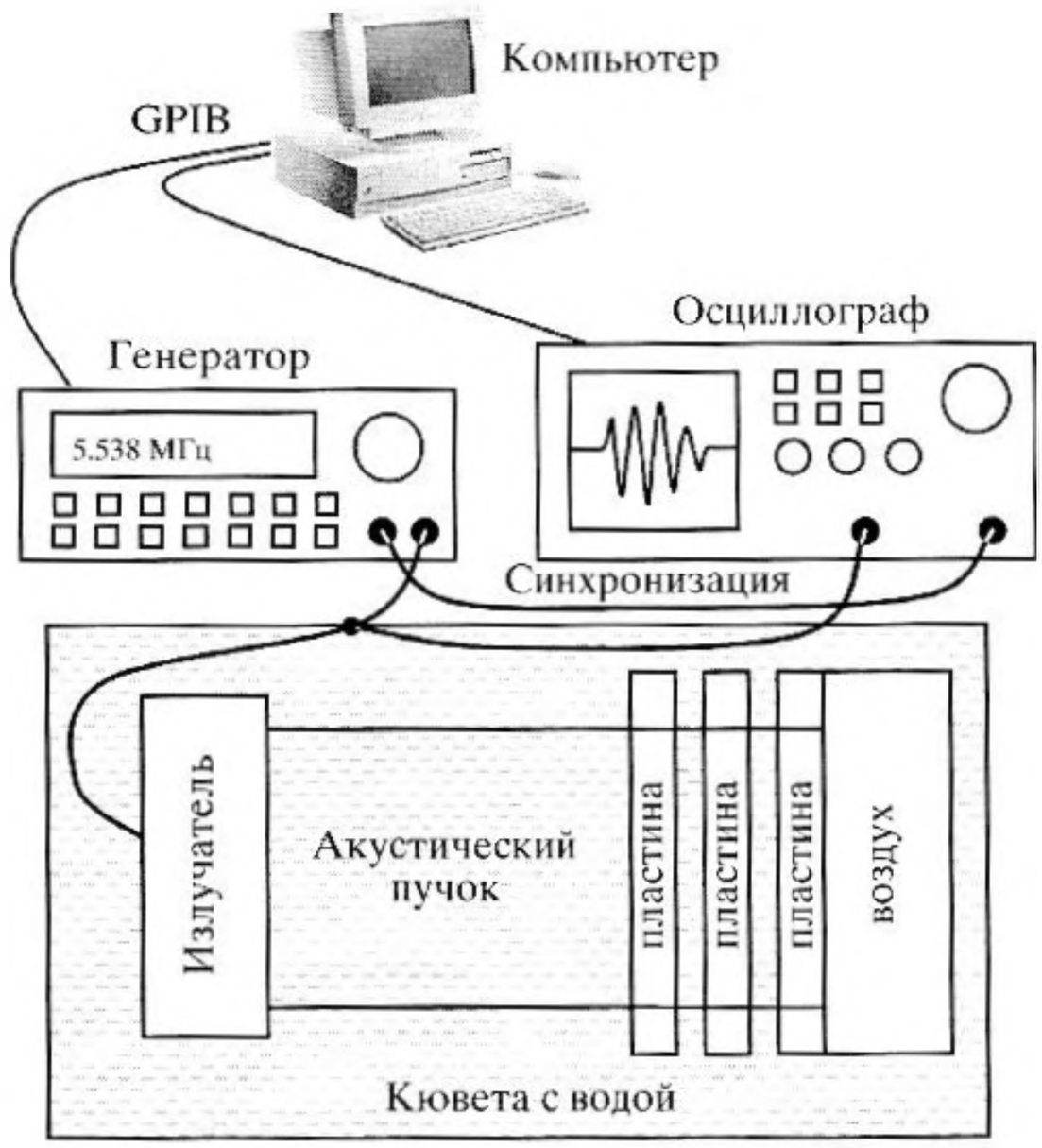

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Для изготовления отражающей структуры использовались пластинки из искусственного сапфира, в котором скорость продольных волн и плотность составляют, соответственно, $c = 11080$ м/с и $\rho = 3850$ кг/м^3. Отметим, что высокая скорость и акустический импеданс сапфира приводят к сужению того диапазона частот, в котором отражение от пластин мало, т.е. вынуждают работать со сравнительно узкополосными сигналами. Однако при использовании в экспериментах более подходящего в этом отношении алюминия ($c = 6320$ м/с, $\rho = 2700$ кг/м^3) оказалось, что отражающая структура не обладала свойством инвариантности к обращению времени. Причиной этого могли быть потери из-за рассеяния ультразвука на зернистой структуре алюминия или недостаточно высокая плоскостность и однородность пластин по толщине. Сапфировые пластины не обладали потерями и были с высокой точностью плоскопараллельными. Толщина пластин составляла около 1 мм. Для обеспечения полного отражения последняя пластина нагружалась на воздушный слой (рис. 1). Параллельность пластин и рабочей поверхности преобразователя достигалась изменением их взаимной ориентации с использованием специальных регулировочных винтов. Регулировка начиналась с дальней от преобразователя пластины, при этом в качестве критерия параллельности использовался максимум амплитуды отраженного

сигнала. В эксперименте использовались ультразвуковые сигналы с центральной частотой около 5.5 МГц, соответствующей условию полуволнового резонанса в используемых пластинах.

КОМПРЕССИЯ ИМПУЛЬСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОСЛОЙНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Инвариантность исследуемых в эксперименте процессов по отношению к операции обращения времени была сначала исследована с использованием отражателя, состоящего из одной пластины. В такой постановке в эксперименте можно было достигнуть малого уровня потерь, а в теории использовать простые формулы.

Рассмотрим сначала процесс отражения от одной пластины теоретически. Пусть волна падает из среды с акустическим импедансом z_0 на пластину толщины h с импедансом z, за которой находится третья среда с импедансом z_{load}. В нашем случае роль первой среды выполняет вода, в качестве второй выступает сапфир, а третьей средой является воздух. Коэффициент отражения гармонической волны от пластины выражается следующей формулой [15]:

$$R(\omega) = \tag{1}$$
$$= \left(R_0 + R_{load}\exp\left(2i\frac{\omega}{c}h\right)\right)\Big/\left(1 + R_0R_{load}\exp\left(2i\frac{\omega}{c}h\right)\right),$$

где $R_0 = (z - z_0)/(z + z_0)$ и $R_{load} = (z_{load} - z)/(z_{load} + z)$ – коэффициенты отражения от границ соответствующих полупространств. Для границы "вода–сапфир" коэффициент отражения близок к единице ($R_0 \approx 0.932$), поэтому для широкополосных коротких сигналов практически весь сигнал отражается от данной границы. Однако при использовании достаточно длинных радиоимпульсов амплитуда отраженной волны может быть уменьшена за счет интерференции переотраженных в пластине сигналов. Обозначим через $p_{inc}(t)$ и $p_{ref}(t)$ форму падающей и отраженной волн. Рассмотрим, для определенности, импульс с гауссовской огибающей:

$$p_{inc}(t) = A_{inc}\exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right)\sin(2\pi f_0 t). \tag{2}$$

Выберем центральную частоту сигнала такой, чтобы на ней пластинка была полуволновой: $f_0 = c/(2h)$. Введем обозначение

$$Q = f_0\tau, \tag{3}$$

имеющее смысл количества периодов, укладывающихся на половине длительности импульса. Рассмотрим практически важный случай, когда пластинка акустически нагружена на более мягкую среду (например, воздух или воду): $z_{load} \ll z$. В этом случае $R_{load} \approx -1$, и возможно получить приближенное аналитическое решение для формы отраженной волны:

$$p_{ref}(t) \approx A_{inc}\Bigg[R_0 e^{-\frac{t^2}{\tau^2}} -$$
$$-\frac{(1 - R_0^2)Q\sqrt{\pi}}{2R_0}\exp[(Q\ln(-R_0R_{load}))^2/4]\times$$
$$\times\left\{1 + \mathrm{erf}\left[\frac{t}{\tau} + \frac{Q\ln(-R_0R_{load})}{2}\right]\right\}\times \tag{4}$$
$$\times\exp\left[Q\ln(-R_0R_{load})\frac{t}{\tau}\right]\Bigg]\sin(2\pi f_0 t),$$

где $\mathrm{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^z e^{-\zeta^2}d\zeta$ – интеграл ошибок. Анализ выражения (4) показывает, что огибающая $|p_{ref}(t)|$ имеет вид функции с двумя "горбами" (максимумами), разделенными интервалом порядка 2τ, и длинным "хвостом", затухающим пропорционально $\exp\left[Q\ln(-R_0R_{load})\frac{t}{\tau}\right]$. Для целей оптимальной компрессии необходимо, чтобы амплитуды "горбов" были одинаковы. В случае воздушной нагрузки ($R_{load} = -1$) формула (4) дает следующее условие на требуемое количество циклов в исходном гауссовском импульсе: $Q \approx 3.9$. Для более точного подбора параметров сигнала был использован численный расчет на основе спектрального подхода (см. ниже), и получено уточненное значение $Q \approx 4.4$.

В эксперименте преобразователь излучал гауссовский импульс вида (2) со следующими параметрами: $f_0 = 5.5$ МГц, $\tau = 0.8$ мкс ($Q = 4.4$). Расстояние до отражателя составляло 14 см, при этом отраженный сигнал приходил на преобразователь после завершения процесса излучения. Результаты показаны на рис. 2. На рис. 2а изображен профиль исходного гауссовского импульса, а на рис. 2б – профиль отраженного импульса. Форма отраженной волны находится в хорошем соответствии с предсказаниями приближенной формулы (4). Как будет показано ниже, более точный расчет дает практически идеальное соответствие с экспериментом. Амплитуда отраженного сигнала уменьшается примерно в 1.6 раза по сравнению с амплитудой исходного импульса, а длительность увеличивается почти в 3 раза.

Принятый отраженный сигнал оцифровывался, обращался во времени, и его амплитуда увеличивалась до амплитуды исходного сигнала (рис. 2в). После этого полученный сигнал вновь излучался и, после повторного отражения от пла-

стины, принимался преобразователем. Результат, с учетом двукратного умножения на амплитудно-частотную характеристику системы, приведен на рис. 2г. Как видно, сигнал укоротился, и его форма оказалась идентичной форме исходного гауссовского импульса. Таким образом, удалось добиться как компрессии с полным восстановлением формы сигнала, так и увеличения пикового давления в сигнале в 1.6 раза. Следовательно, волновые процессы в используемой системе действительно были инвариантны относительно изменения знака времени.

Для независимой проверки результатов акустических измерений формы сигналов был проведен дополнительный эксперимент с использованием оптической визуализации исследуемых импульсов шлирен-методом (методом Теплера) [16]. Для уменьшения оптических аберраций формирование параллельного пучка света и его фокусировка осуществлялись с помощью широкоапертурных параболических зеркал. В качестве источника света использовался диодный лазер, который создавал короткие световые вспышки длительностью 10–100 нс синхронно с ультразвуковым сигналом. В течение такой короткой подсветки акустическая волна сдвигалась на расстояние, много меньшее длины волны, поэтому шлирен-изображение показывало "замороженную" картину ультразвукового поля. Соответствующее изображение наблюдалось с помощью цифровой видеокамеры. На рис. 3 показаны две таких картинки. На рис. 3а показано теневое изображение длинного двугорбого импульса, распространяющегося сверху вниз в направлении отражателя (снизу). Отчетливо видны не только область, занятая ультразвуковым сигналом, но и отдельные волновые фронты. Как и предполагалось, фронты имеют вид прямых участков, т.е. в пределах границ пучка волна является плоской. Рассчитанное распределение акустического давления в пространстве показано справа. На нижнем рисунке показан тот же самый сигнал, но уже после отражения от нагруженной на воздух сапфировой пластинки. Теперь он уже распространяется снизу вверх. Главным результатом является то, что отраженный импульс действительно укоротился, как и предсказывает расчет (форма волны справа). Таким образом, подтверждается факт компрессии сигналов при отражении от однослойной структуры.

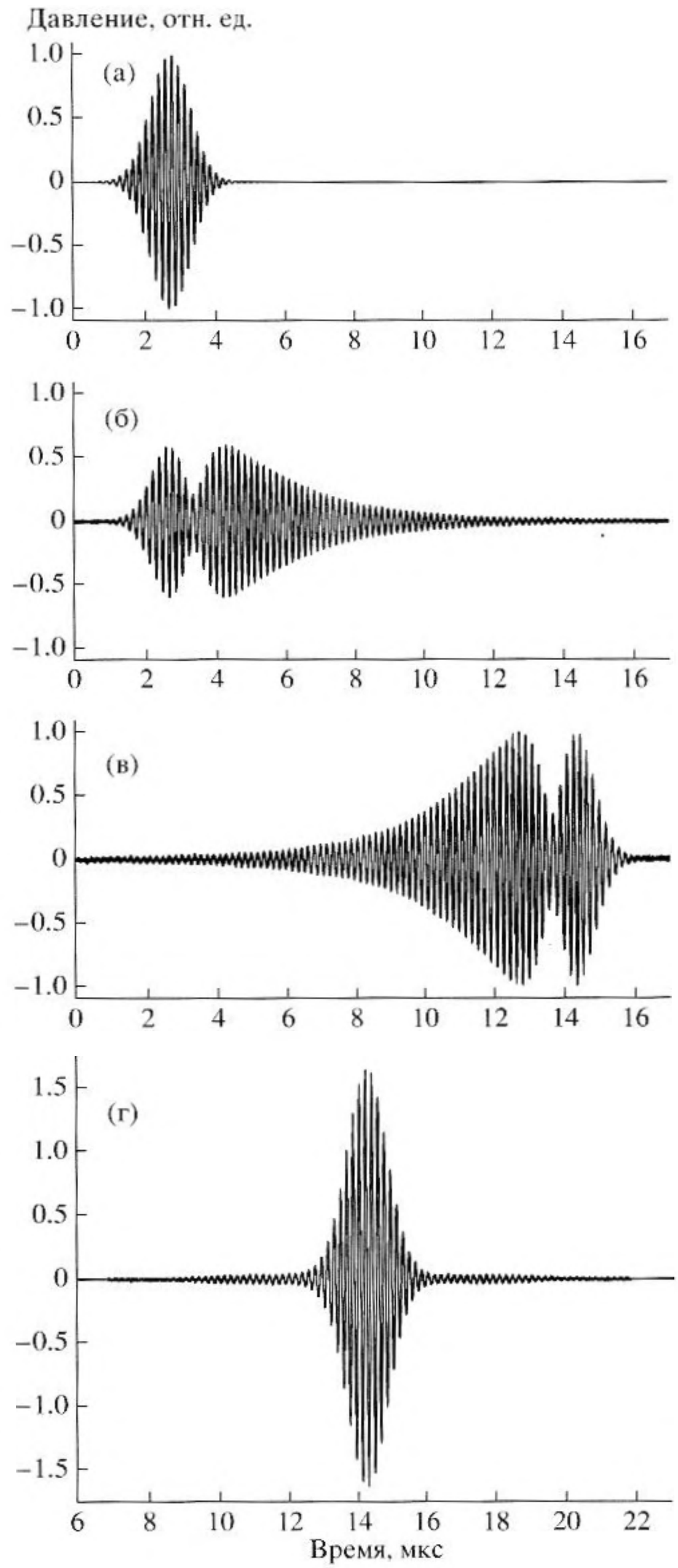

Рис. 2. Результаты эксперимента с однослойной структурой: (а) исходный импульс; (б) импульс, полученный в результате отражения импульса (а); (в) импульс, полученный из импульса (б) в после его обращения во времени и усиления до уровня исходного сигнала; (г) скомпрессированный импульс, полученный в результате отражения импульса (в).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТРАЖЕНИЯ ОТ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ

Приведенный выше анализ отражения от одной пластины показал, что даже в этом простом случае для нахождения формы отраженной волны требуется проводить суммирование бесконечных рядов, а представление с использованием

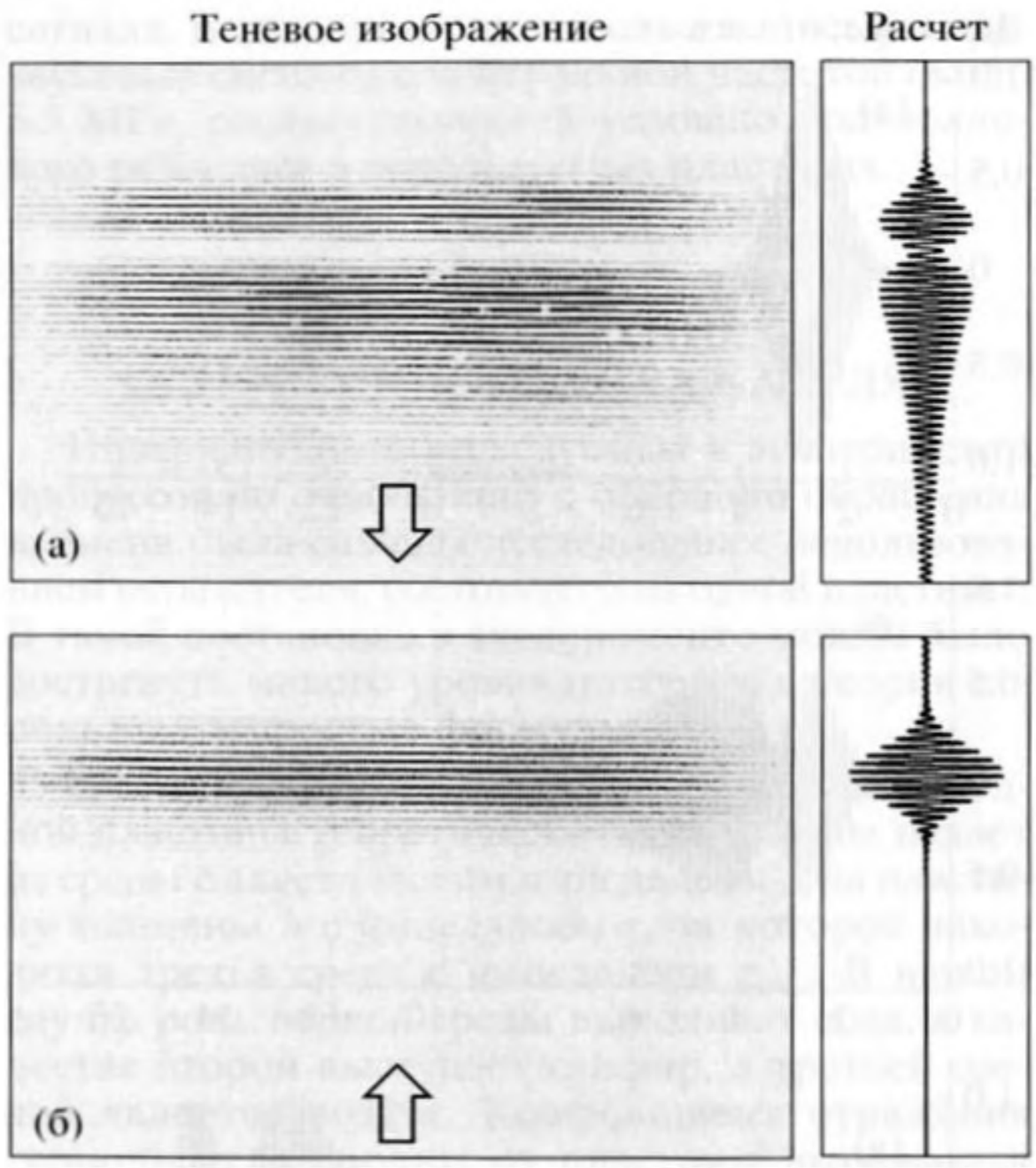

Рис. 3. Теневые изображения импульса в эксперименте по компрессии с использованием однослойной структуры: (а) до отражения, (б) после отражения. Стрелки показывают направление распространения импульса; отражатель находится снизу. На вставках справа для сравнения приведена теоретически рассчитанная форма соответствующих импульсов.

аналитических функций возможно лишь приближенно. В то же время спектральное описание оказывается более простым, поскольку в случае гармонических волн форма волны при ее распространении в слоистой структуре не меняется, и поэтому процесс отражения можно характеризовать коэффициентом отражения $R(\omega)$ для комплексной амплитуды. В случае одной пластины выражение для коэффициента отражения дается формулой (1). В случае большего количества слоев решение может быть построено с использованием метода переходных матриц [17]. Общая схема расчета формы отраженного сигнала строится стандартным образом: сначала рассчитывается спектр падающего сигнала, затем проводится расчет спектра отраженного сигнала с использованием известного $R(\omega)$ и, наконец, после обратного преобразования Фурье получается форма отраженной волны.

Следуя методу переходных матриц, рассмотрим процесс распространения гармонической волны в многослойной среде. Пусть n – номер слоя, а P_n^+ и P_n^- – комплексные амплитуды волн, распространяющихся вправо и влево, соответственно (рис. 4). Значения амплитуд задаются на

Рис. 4. Вид отражающей многослойной структуры и обозначения, использованные при численном моделировании.

правой границе слоя. Для амплитуд в двух соседних слоях запишем матричную связь:

$$\begin{pmatrix} P_{n-1}^+ \\ P_{n-1}^- \end{pmatrix} = \hat{M}_{n-1,n} \begin{pmatrix} P_n^+ \\ P_n^- \end{pmatrix},$$

$$\hat{M}_{n-1,n} = \tag{5}$$

$$= \begin{pmatrix} \dfrac{z_n + z_{n-1}}{2z_n}\exp(-ik_n h_n) & \dfrac{z_n - z_{n-1}}{2z_n}\exp(ik_n h_n) \\ \dfrac{z_n - z_{n-1}}{2z_n}\exp(-ik_n h_n) & \dfrac{z_n + z_{n-1}}{2z_n}\exp(ik_n h_n) \end{pmatrix},$$

где $\hat{M}_{n-1,n}$ – матрица перехода, зависящая от акустических импедансов z_n, скоростей звука c_n и толщин h_n слоев, $k_n = \omega/c_n$ – волновое число, ω – циклическая частота. Записав соотношения вида (5) для всех слоев, получаем, что падающая и отраженная волна в воде (P_0^+ и P_0^-) и падающая и отраженная волна за всеми пластинами (P_N^+ и P_N^-) связаны матричным соотношением:

$$\begin{pmatrix} P_0^+ \\ P_0^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_N^+ \\ P_N^- \end{pmatrix}, \tag{6}$$

где полная матрица перехода $\hat{M} = \|m_{ij}\|$ находится последовательным перемножением матриц перехода всех слоев: $\hat{M} = \hat{M}_{0,1}\hat{M}_{1,2}\ldots\hat{M}_{N-2,N-1}\hat{M}_{N-1,N}$. Заметим, что $N = 2N_*$ – четное число, где N_* – общее количество пластин. Пусть $R_{load} = P_N^-/P_N^+ = (z_{load} - z_N)/(z_{load} + z_N)$ – коэффициент отражения от последней границы раздела, z_{load} – акустический импеданс среды, находящейся справа от последнего слоя. Из соотношения (6) выражается искомый коэффициент отражения от слоистой

структуры: $R = P_0^-/P_0^+ = (m_{21} + R_{load}m_{22})/(m_{11} + R_{load}m_{12})$. В частности, в рассматриваемом нами случае воздушной нагрузки $z_{load} \approx 0$ получим $R_{load} = -1$, откуда $R = (m_{21} - m_{22})/(m_{11} - m_{12})$. При юстировке системы в эксперименте использовалось также нагружение последнего слоя на воду или на толстый металлический слой. В этом случае расчеты проводились с использованием соответствующего акустического импеданса z_{load}.

При численной реализации описанного выше алгоритма исследуемые сигналы задавались на конечном временно́м интервале, длина которого T была достаточно велика, чтобы переходные процессы успели завершиться, т.е. на границах интервала сигнал был близок к нулю. На указанном интервале непрерывный сигнал заменялся дискретным сигналом с шагом дискретизации Δt много меньшим периода самой высокой из используемых частот. При переходах от временны́х сигналов к спектрам и обратно использовалось быстрое преобразование Фурье. Типичные значения T и Δt составляли соответственно 500 мкс и 10 нс, количество исследуемых пластин достигало $N_* = 15$. Алгоритм и соответствующая программа, написанная на языке Delphi, позволяли на персональном компьютере Pentium 4 рассчитать один акт отражения за 1–2 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОМПРЕССИИ

Задача увеличения амплитуды отраженной волны за счет ее компрессии может быть поставлена следующим образом: пусть акустический источник посылает в среду сигнал $p_{inc}(t)$, пиковое значение давления в котором не превосходит некоторой величины A_{inc}, а длительность сигнала τ_{inc} может быть какой угодно большой. Требуется создать такой слоисто-неоднородный слой, при отражении от которого пиковое давление соответствующего сигнала $p_{ref}(t)$ увеличится до заданной величины A_{ref}, а длительность уменьшится до величины τ_{ref}. Принципиальное решение задачи находится просто, если исследуемая система инвариантна по отношению к операции изменения знака времени: искомый слоисто-неоднородный слой должен быть таким, чтобы при посылке на него короткого сигнала $p_{ref}(t)$ с пиковым давлением A_{ref} и длительностью τ_{ref} отраженный сигнал $p_{inc}(t)$ имел пиковое давление, не превосходящее A_{inc}. Чем меньше будет амплитуда отраженного сигнала, тем более высоким будет коэффициент усиления $K = A_{ref}/A_{inc}$ при посылке обращенного во времени сигнала. Длительность сигнала τ_{inc} при этом, как видно, роли не играет: главное, чтобы в пределах этой длительности сигнал мог быть зарегистрирован. Однако на практике изложенное выше простое решение при больших τ_{inc} перестает быть справедливым, поскольку значительным оказывается и расстояние $c\tau_{inc}$, проходимое волной в многослойной структуре в процессе ее отражения (c – скорость волны). С увеличением пройденного распространения неизбежно возникают потери энергии волны, и система перестает быть инвариантной к изменению знака времени. Следовательно, дополнительным требованием является достижение искомого коэффициента усиления K при как можно меньшем значении длительности τ_{inc}.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Описанная выше численная модель была использована для расчета слоистых структур, позволяющих достичь эффективной компрессии. В качестве сигнала, который требовалось получить в результате компрессии, рассматривался радиоимпульс с гауссовской огибающей вида (2). Длительность импульса характеризовалась количеством периодов основной частоты Q, укладывающихся в пределах характерной длительности импульса τ – см. формулу (3). Если величину Q считать заданной, то задача поиска необходимой для компрессии слоистой структуры сводится к нахождению максимально возможного коэффициента усиления по амплитуде и того количества пластин, которое требуется для достижения этого усиления. Параметрами отражающей структуры, которые подбирались при ее конструировании, являлись расстояния между пластинами и их толщина. Материал пластин считался заданным, так как плавное изменение соответствующих параметров трудно осуществить на практике.

Заметим, что структура отраженного сигнала такова, что начало сигнала формируется ближайшими к преобразователю слоями отражающей структуры, более удаленные слои дают вклад позже. Основываясь на этом, нами был выбран следующий алгоритм построения структуры. Подчеркнем, что описанные ниже шаги выполняются в рамках численной модели.

Сначала рассматривается отражение гауссовского сигнала амплитуды A_0 с желаемым количеством циклов Q от полуволновой пластины, нагруженной (справа) на воду. Отраженный сигнал при этом имеет меньшую амплитуду A_1 и большую длительность. Его форма имеет вид "двугорбого" сигнала и приближенно описывается формулой (4) при $R_{load} = (z_0 - z)/(z_0 + z) = -R_0$. На этом этапе делается вывод о максимально возможном коэффициенте усиления создаваемой структуры: он равен A_0/A_1. Неизвестным остается необходимое количество пластин и их параметры.

Далее пластина нагружается на воздух, и анализируется получившийся при этом сигнал. Если в этом сигнале не возникают "выбросы" с ампли-

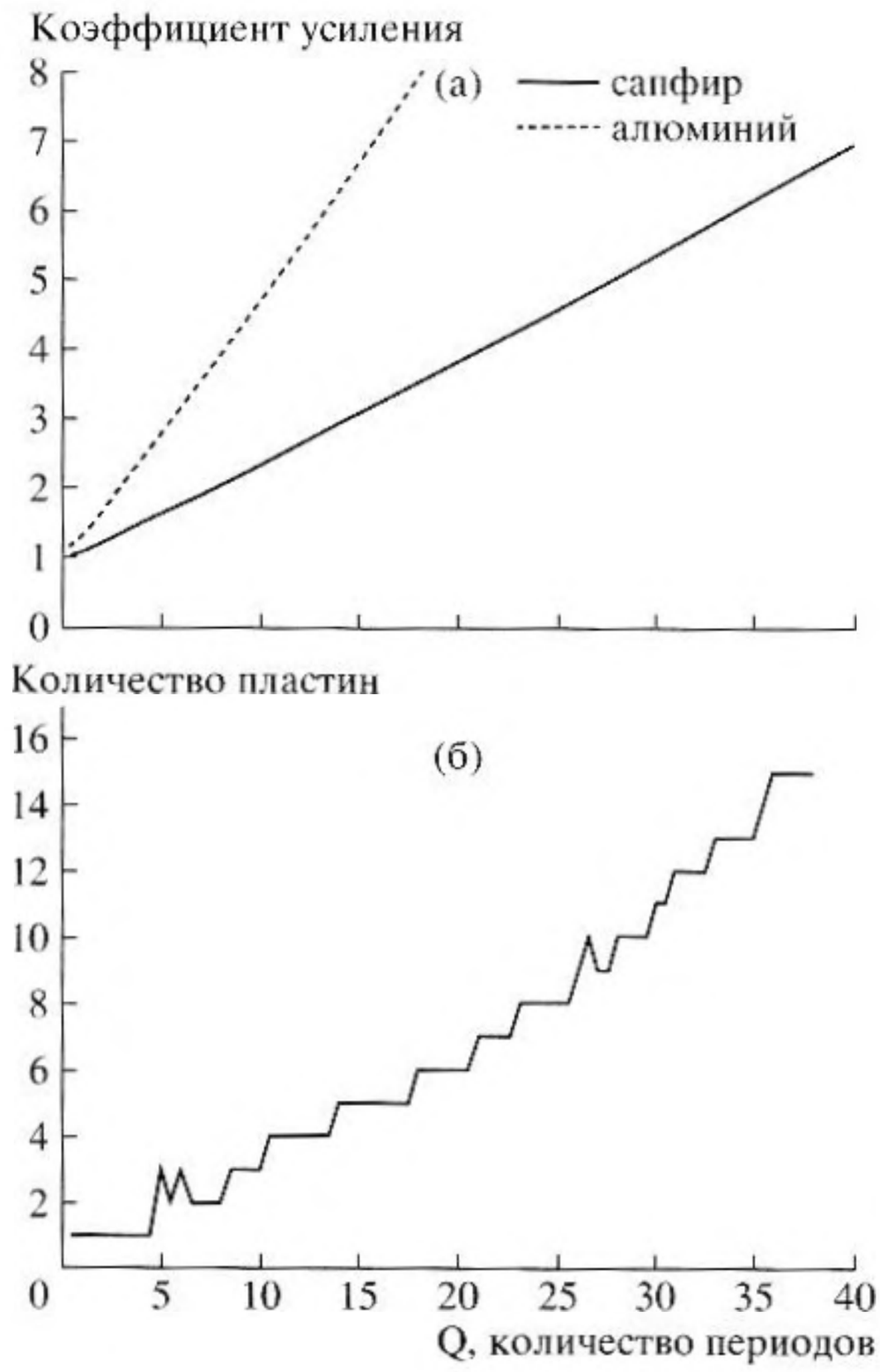

Рис. 5. (а) Зависимость коэффициента максимального усиления от длительности усиливаемого импульса (количества периодов N);

(б) зависимость необходимого количества пластин для достижения указанного усиления.

тудой больше A_1, то конструирование отражающей структуры на этом заканчивается, так как добавление новых пластин не даст улучшения усилительных свойств при отражении инвертированного во времени сигнала. Если же сильные выбросы имеются, то делается вывод о необходимости добавления второй пластины для их подавления. Вторая пластина выбирается равной по толщине первой пластине и располагается как можно ближе к ней, но на расстоянии, не меньшем длительности исходного импульса: только в этом случае отражение от второй пластины гарантированно не изменит амплитуду A_1 первого выброса. При введении второй пластины отраженный сигнал дополнительно исказится, но, поскольку частотная полоса ее пропускания совпадает с полосой первой пластины, возникающие выбросы будут иметь амплитуду A_2 меньше A_1 (если это не так, то пластина находится слишком близко к первой пластине, т.е. требуется увеличить соответствующий зазор). Затем при неизменном положении пластины ее толщина несколько изменяется, например, уменьшается. Тем самым пластина выводится из полуволнового резонанса и, как следствие, коэффициент отражения от нее увеличивается. Изменение толщины продолжается до тех пор, пока амплитуда выброса A_2 не вырастет до амплитуды первого выброса A_1. После этого вторая пластина нагружается на воздух. Если в соответствующем профиле волны вслед за пиком A_2 не появляются выбросы большей амплитуды, то конструирование системы заканчивается. В противном случае процедура продолжается аналогичным образом: добавляется третья пластина и т.д.

Отметим, что изложенный выше алгоритм позволяет регулярным образом подобрать параметры отражающей структуры, способной обеспечить заданное усиление амплитуды отраженной волны с использованием малого количества пластин. В принципе, при чуть более компактном расположении пластин можно добиться того же усиления с использованием несколько меньшего количества пластин. Однако при этом свойства структуры становятся очень чувствительными к расстоянию между пластинами, причем небольшое изменение расстояния или скорости звука может подавить усилительные свойства, чего стоит избегать на практике.

На рис. 5а показана зависимость коэффициента усиления, рассчитанного по описанному выше алгоритму, в зависимости от количества периодов Q в сигнале, который планируется получить в результате компрессии. Как видно, чем длиннее получаемый сигнал, тем большего усиления амплитуды можно добиться. Как уже отмечалось, эта особенность связана с резонансным характером отражения от полуволновых пластин: чем длиннее сигнал, тем у́же его частотная полоса и тем более слабым является отражение от отдельной пластины, т.е. тем более длинным может быть компрессируемый сигнал.

Рисунок 5б представляет результаты расчета количества пластин, требуемого для достижения усиления амплитуды, показанного на рис. 5а. Кривая не является плавной: это объясняется тем, что количество пластин может быть лишь целым числом. Выбросы в окрестности $Q = 5$ и $Q = 25$ обусловлены некоторой неоднозначностью в выборе количества пластин, однако соответствующее отклонение не превышает единицы.

КОМПРЕССИЯ ИМПУЛЬСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТРАЖАТЕЛЯ ИЗ ТРЕХ ПЛАСТИН

В экспериментах с одной пластиной удалось достичь усиления по амплитуде в 1.6 раза. Согласно расчетам, приведенным на рис. 5, с ростом количества пластин можно добиться большего усиления. В частности, при использовании трех

пластин амплитуда сигнала может быть увеличена более, чем в 2 раза.

Трехслойная структура создавалась из таких же сапфировых пластин, как и в эксперименте с одной пластиной. Толщины пластин составляли 0.98, 0.99 и 1.00 мм. Пластины отличались по толщине, что позволяло им отражать различные части спектра падающего сигнала. Расстояния между пластинами составляли 6.8 мм и 7.5 мм, т.е. общая толщина многослойной отражающей структуры составляла менее 2 см. Теоретически было рассчитано, что, используя структуру из таких пластин, можно получить усиление сигнала в 2.7 раза по амплитуде. Результаты эксперимента приведены на рис. 6. Видно, что после отражения короткого импульса от трехслойной структуры происходило его удлинение в 10 раз (по уровню e^{-1}). Уменьшение амплитуды в результате отражения было чуть больше, чем расчетное – в 2.8 раза, что показывает, что система ведет себя не так идеально, как в эксперименте с одной пластиной, и в ней существуют потери энергии. После обращения полученного сигнала во времени и увеличения его до уровня исходного сигнала были произведены его компрессия и усиление. В результате было получено усиление сигнала в 2.3 раза и хорошее восстановление его формы. Видно, что в компрессированном сигнале, помимо основного импульса большой амплитуды, присутствуют побочные импульсы малой амплитуды. Они связаны с тем, что потери в системе не позволяют в точности восстановить исходную форму сигнала. Как мы предполагаем, потери, в основном, связаны с некоторой непараллельностью всех пластин, которая приводит к значительному искажению регистрируемой амплитуды многократно переотраженных импульсов. Дополнительную погрешность вносит и дифракция, которая не была учтена при расчете.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные результаты сравнивались с результатами численного моделирования (рис. 7). Сравнение проводилось для отраженных сигналов от однослойной (рис. 7а) и трехслойной (рис. 7б) структуры. Это сравнение показывает, что экспериментальные результаты для однослойной структуры почти идеально согласуются с результатами расчета, полученными с помощью простейшей модели слоистой среды. Для трехслойной структуры согласование эксперимента и теории не столь хорошее: видно существенное уменьшение амплитуды измеренного сигнала по сравнению с теоретически рассчитанным. Особенно это заметно в области сигнала далее 30–40 мкс. Эта область соответствует многократно переотраженным импульсам, которые наиболее чувствительны к непараллельности границ и подвержены

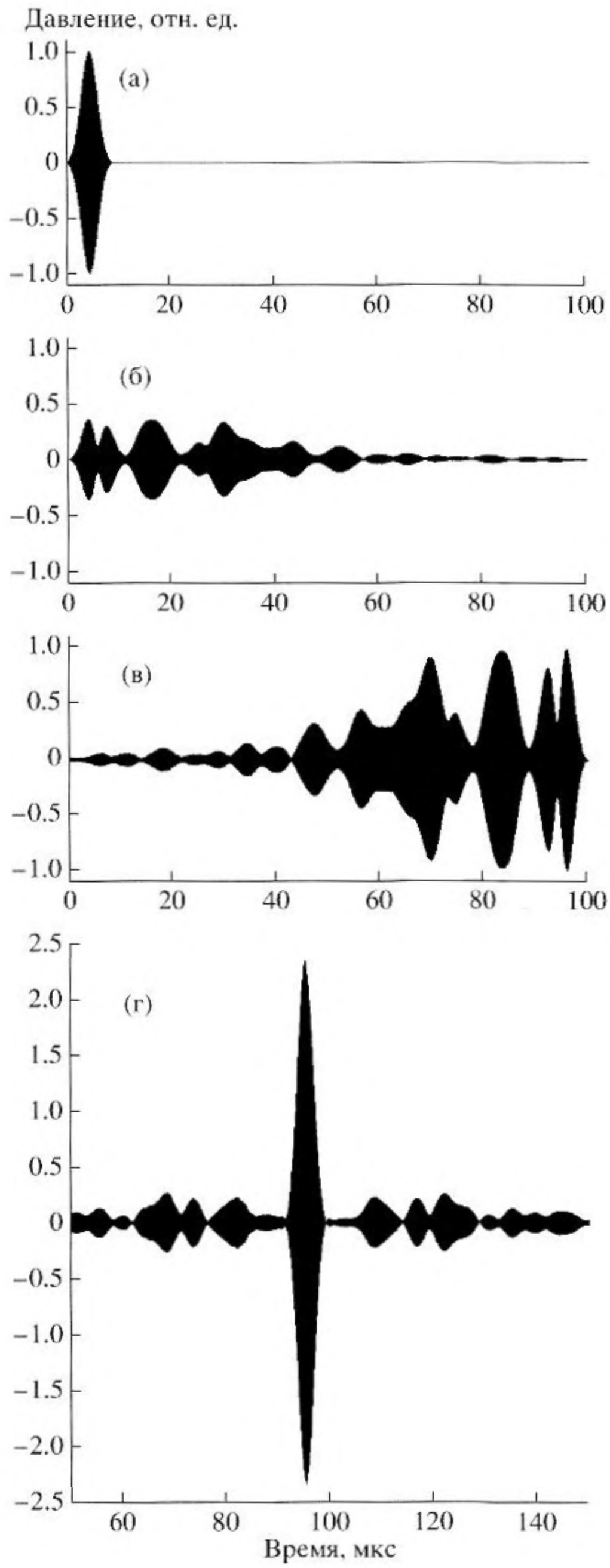

Рис. 6. Результаты эксперимента с трехслойной структурой. Изображены те же типы сигналов, что и на рис. 2: (а) исходный импульс; (б) отраженный импульс; (в) обращенный во времени отраженный импульс; (г) скомпрессированный импульс.

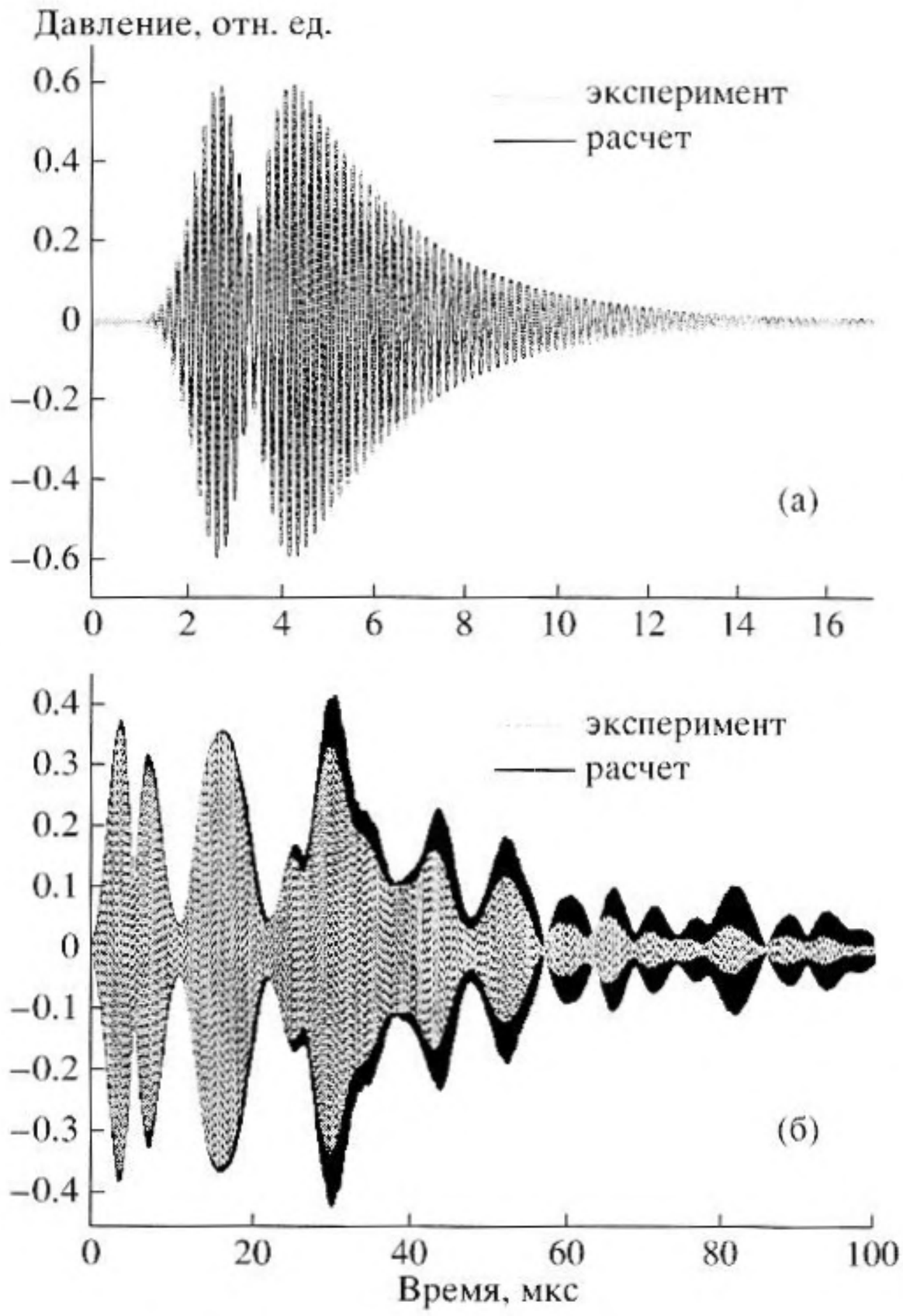

Рис. 7. Сравнение экспериментально измеренных и теоретически рассчитанных отраженных импульсов для однослойной (а) и трехслойной (б) структур.

дифракционным эффектам. На первый взгляд, если отражатель находится в прожекторной зоне преобразователя, то дифракция не должна заметно влиять на результаты. Однако на самом деле эффективное расстояние, проходимое волной, является несколько большим, чем удвоенное расстояние до отражающей структуры, поскольку сигнал в процессе многократных переотражений внутри структуры проходит дополнительный путь. Возникающий из-за этого дополнительный эффект дифракционной расходимости, наряду с влиянием непараллельности пластин, является также причиной того, что экспериментальные результаты для структуры из трех пластин оказались несколько отличающимися от предсказаний одномерной теоретической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что даже при использовании простейших одномерных многослойных структур можно добиться заметного усиления амплитуды волны за счет соответствующего укорочения сигнала. Для возможности компрессии временной профиль сигнала должен быть специально подобран под конкретную многослойную структуру. Экспериментальные компрессоры, состоящие из одной и трех твердотельных пластин, позволили достичь увеличения амплитуды соответственно в 1.6 и 2.3 раза. Предложен алгоритм построения эффективных систем компрессии. Особенностью таких систем является не только наличие неоднородных слоев, но и специальный вид пространственного распределения отражательных свойств этих слоев.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (05-02-16987), NSBRI (SMS00402) и NIH (DK43881). Авторы признательны В.А. Рожкову за помощь в изготовлении элементов экспериментальной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С.* Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988. 312 с.
2. *Fink M.* Time-reversed acoustics // Physics Today. 1997. V. 50. P. 34–40.
3. *Зверев В.А.* Избранные труды. 2004. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 432 с.
4. *Зверев В.А.* Принцип акустического обращения волн и голография // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 792–801.
5. *Брысев А.П., Крутянский Л.М., Преображенский В.Л.* Обращение волнового фронта ультразвуковых пучков // УФН. 1998. Т. 168. № 8. С. 877–890.
6. *Брысев А.П., Михалевич В.Г., Стрельцов В.Н.* Параметрическое обращение нелинейных акустических волн // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 75. № 11. С. 660–663.
7. *Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В.* Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985. 240 с.
8. *Рагульский В.В.* Обращение волного фронта при вынужденном рассеянии света. М.: Наука, 1990. 181 с.
9. *Song H.C., Kuperman W.A., Hodgkiss W.S.* A time-reversal mirror with variable range focusing // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103. P. 3234–3240.
10. *Jackson D.R., Dowling D.R.* Phase conjugation in underwater acoustics // J. Acoust. Soc. Amer. 1991. V. 89. P. 171–181.
11. *Chakroun N., Fink M., Wu F.* Time reversal processing in ultrasonic nondestructive testing // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. 1995. V. 42. № 6. P. 1087–1098.
12. *Pernot M., Aubry J.-F., Tanter M., Thomas J.-L., Fink M.* High power transcranial beam steering for ultrasonic brain therapy // Physics in Medicine and Biology. 2003. V. 48 (16). P. 2577–2589.

13. *Clement G.T., Sun J., Giesecke T., Hynynen K.* A hemisphere array for non invasive ultrasound surgery and therapy // Phys. Med. Biol. 2000. V. 45. P. 3707–3719.
14. *Montaldo G., Roux P., Derode A., Negreira C., Fink M.* Generation of very high-pressure pulse using time reversal in a solid waveguide: Application to lithotripsy // J. Acoust. Soc. Amer. 2001. V. 109. P. 2481.
15. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 576 с.
16. *Settles G.S.* Schlieren & Shadowgraph Techniques. Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. 376 p.
17. *Бриллюэн Л., Пароди М.* Распространение волн в периодических структурах. М., 1959. 457 с.

Compression and Amplification of an Ultrasonic Pulse Reflected from a One-Dimensional Layered Structure

A. E. Ponomarev, S. I. Bulatitskiĭ, and O. A. Sapozhnikov

Moscow State University, Vorob'evy gory, Moscow, 119992 Russia
e-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru

Abstract—Compression of ultrasonic pulses reflected from layered structures is studied. A short pulse is emitted into water towards a structure consisting of solid plates backed with an air layer. Due to multiple reflections in the structure, the signal is elongated. The reflected signal is received by the same transducer and digitized. After that, the wave is reversed in time and emitted towards the layered structure for the second time; then, the reflected signal is received. Due to the invariance of the processes under the time reversal, the pulse is compressed by the structure: the reflected signal becomes shorter and acquires the waveform of the initial pulse. The possibility of an efficient compression of signals is demonstrated experimentally. Numerical simulations show that the use of more complex structures can considerably increase the compression ratio and produce short signals of a much higher amplitude than that emitted by the transducer. An efficient compression algorithm is proposed.