

08

О чувствительности усиления обращенного акустического сигнала в условиях параметрического резонанса к малым изменениям длины волны

© П.А. Войнович

Санкт-Петербургский филиал учреждения Российской академии наук
Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН
E-mail: vpeter@scc.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 ноября 2009 г.

Результаты численного моделирования распространения ультразвуковой волны в упругом образце конечной длины в условиях параметрического резонанса, вызванного модуляцией скорости звука в магнестрикционном материале под влиянием переменного магнитного поля, дополняют полученные ранее аналитические решения для дискретных значений отношения длины образца к длине волны акустического сигнала и демонстрируют высокую чувствительность коэффициента усиления обращенного сигнала к малым изменениям этого отношения.

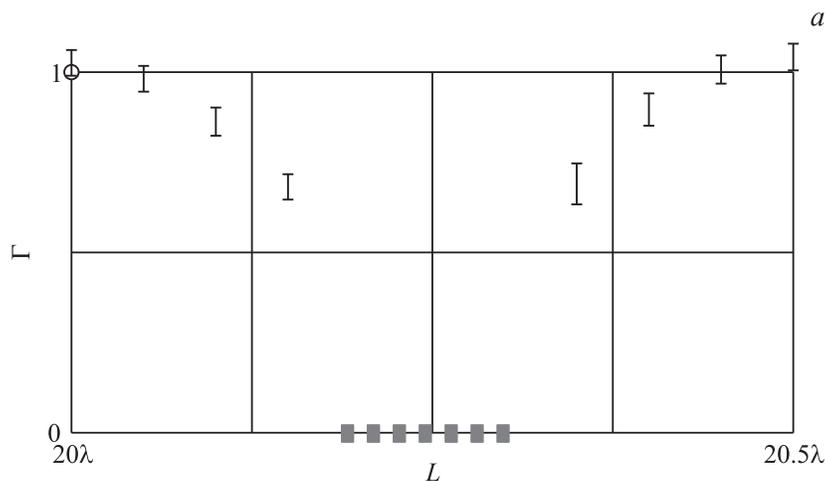
Современное состояние проблемы обращения волнового фронта в акустике и гигантского усиления ультразвукового сигнала в магнестрикционных материалах представлено в работах [1,2]. В [3] выполнен теоретический анализ формирования усиленной обращенной акустической волны при взаимодействии ультразвукового сигнала с образцом магнестрикционного материала конечной длины в условиях параметрического резонанса, вызванного воздействием переменного магнитного поля с частотой, вдвое превышающей частоту акустического сигнала. Изменение механических свойств материала выражается, в частности, в модуляции скорости звука: $c^2 = c_0^2[1 + m \cos(2\Omega t)]$, где m — глубина модуляции. Как показано в [4], в изотропном случае глубина модуляции скорости распространения для продольных и поперечных упругих волн различаться не может.

В одномерном приближении для постоянного значения глубины модуляции в [3] получены два семейства квазистационарных решений с

экспоненциально нарастающей амплитудой в образце активной среды с длиной L , кратной четверти длины акустической волны: $L/\lambda = 2n/4$ — четная мода, $L/\lambda = (2n - 1)/4$ — нечетная мода. Полученные аналитические решения позволяют определить пороговое значение глубины модуляции m , ниже которого усиления сигнала не происходит, и коэффициент усиления Γ амплитуды сигнала $w = Ae^{\Gamma t} \sin(\Omega t)$. При прочих равных условиях пороговое значение глубины модуляции для четной моды всегда ниже, чем для нечетной, а при одинаковых m коэффициент усиления для четной моды всегда выше, чем для нечетной. В рамках развитой в [3] теории получить решение для промежуточных значений длин волн не представляется возможным. Для этого была выполнена серия расчетов в рамках одномерной численной модели с использованием подходов и методов, развитых ранее [4].

Используемая модель динамики сплошной среды, обеспечивающая детальное разрешение упругих волновых процессов в пространстве и времени, основана на уравнениях импульса и обобщенного закона Гука, записанных в форме законов сохранения для элементарных объемов ячеек расчетной сетки. Коэффициент усиления Γ определяется путем автоматической обработки результатов расчета, моделирующего развитие упругих колебаний и распространение волн в сплошной среде под влиянием начальных данных, задающих параметры падающей акустической волны, а также параметров накачки активной среды, обеспечивающих условия параметрического резонанса. На приводимых ниже графиках коэффициент усиления Γ представлен в относительных единицах, нормированных на его теоретическое значение для ближайшей четной моды аналитического решения.

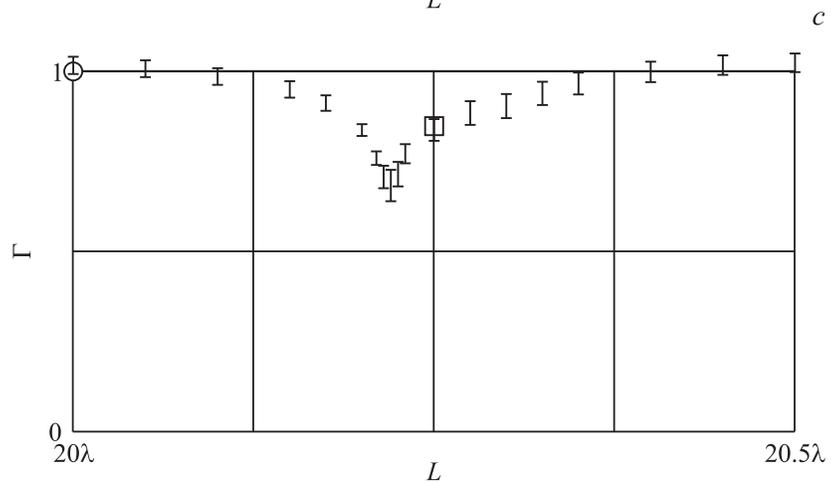
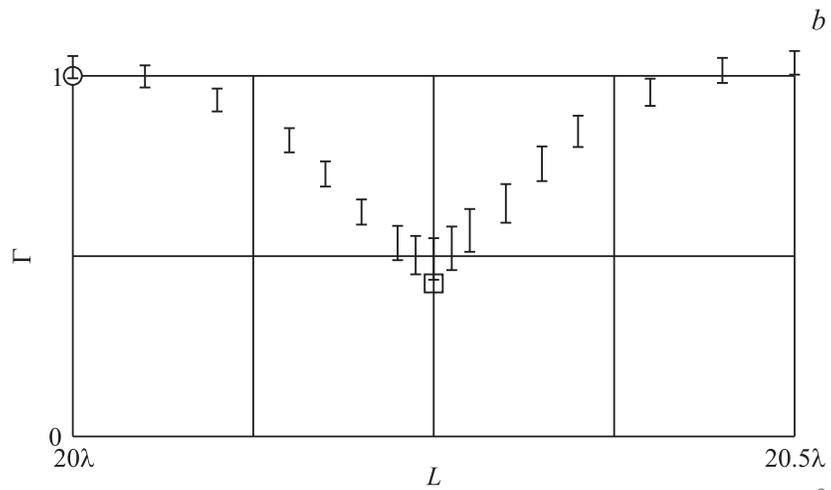
Предварительный анализ показал, что модуляция механических свойств среды должна быть учтена как в источниковых членах уравнений модели, так и в коэффициентах при пространственных производных. В серии методических расчетов была проверена сходимость численных решений при измельчении (увеличении числа ячеек) расчетной сетки. Помимо подтверждения сходимости, было обнаружено следующее: по значению коэффициента усиления численное решение с использованием полной модели, включающей эффект модуляции как в источниковых членах, так и в коэффициентах при пространственных производных, приближается к точному (аналитическому) сверху; результаты расчетов по неполной модели с включением модуляции только в источникивые члены, но при вдвое меньшем значении глубины модуляции, сходятся



Коэффициент усиления обращенного сигнала Γ в зависимости от отношения L/λ . Круги — аналитическое решение для четной моды, квадраты — для нечетной, a — $m = 0.04$ (серая штриховка вдоль оси L обозначает область отсутствия усиления), b — $m = 0.05$, c — $m = 0.08$.

к тому же решению, но снизу. Это свойство численной модели позволяет легко оценивать точность получаемых решений путем сравнения результатов, полученных для идентичных условий по полной модели, дающей верхнюю границу погрешности, и неполной модели со вдвое меньшим значением глубины модуляции, дающей нижнюю границу погрешности.

Примеры полученных расчетных результатов приведены на рисунке. Расчеты выполнялись на одинаковых сетках по полной и неполной моделям для различных значений глубины модуляции m . Отношение длины образца к длине волны акустического сигнала варьировалось в диапазоне $20 \leq L/\lambda \leq 20.5$. Можно отметить хорошее согласие численных результатов с аналитическими решениями для четной и нечетной мод. Во всех случаях сверхкритических значений m получено непрерывное изменение коэффициента усиления Γ для промежуточных значений параметра L/λ . На рисунке, a приведены результаты для значения $m = 0.04$, являющегося сверхкритическим для четной моды и докритическим для нечетной. При умеренных сверхкритических



Продолжение рисунка.

значениях глубины модуляции t максимальные значения коэффициента усиления Γ достигаются при условиях, соответствующих четной моде аналитического решения, а минимальные – нечетной моде (см. рисунок, *b*). С ростом t разница между максимальными и минимальными

значениями коэффициента усиления уменьшается. При дальнейшем увеличении t минимальные значения коэффициента усиления смещаются в сторону от условий нечетной моды решения, причем значения минимального коэффициента усиления оказываются существенно ниже аналитического результата для нечетной моды (см. рисунок, *c*).

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. Для практической оценки порогового значения глубины модуляции необходимо использовать его аналитическое значение для нечетной моды решения, так как в условиях превышения порогового значения только для четной моды, в значительной части диапазона параметра L/λ формирования усиленного обращенного сигнала не будет. При малых сверхкритических значениях глубины модуляции следует ожидать значительного разброса и неустойчивости экспериментальных результатов, так как небольшие отклонения L/λ будут приводить к существенным изменениям коэффициента усиления. Отдельно следует отметить возможные проблемы с фокусировкой обращенного усиленного сигнала, поскольку эффективное расстояние между отражающими поверхностями для криволинейного волнового фронта будет зависеть не только от длины образца активного материала, но и от пути распространения сигнала внутри образца. Переменность коэффициента усиления для различных направлений распространения сигнала может воспрепятствовать его эффективной ретрофокусировке.

Настоящая работа поддержана грантом РФФИ 08-02-92495-НЦНИЛ_а.

Список литературы

- [1] Брысев А.П., Крутянский Л.М., Преображенский В.Л. // УФН. 1998. Т. 168. № 8. С. 877–890.
- [2] Преображенский В.Л. // УФН. 2006. Т. 176. № 1. С. 108–112.
- [3] Merlen A., Qi Zhang, Voinovich P., Timofeev E. // Wave Motion. 2009. V. 46. N 4. P. 255–268.
- [4] Voinovich P., Merlen A. // J. Ac. Soc. of America. 2005. V. 118. N 6. P. 3491–3498.