
**ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРИБОРЫ, МОДЕЛИ
И МЕТОДЫ АНАЛИЗА**

УДК 681.883: 621.391.13

© И. В. Плешаков, Я. А. Фофанов

ОБ ЭФФЕКТЕ УСИЛЕНИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ И РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЭХО-СИГНАЛОВ

Обсуждается формирование параметрических эхо-сигналов при воздействии на физическую систему радиоимпульсов на резонансной и удвоенной по отношению к резонансной несущим частотам. Показано, что в отличие от обычного эхо-сигнала параметрическое эхо всегда может рассматриваться как усиленный отклик системы. В импульсной последовательности, состоящей из одного резонансного и двух параметрических импульсов, на образцах бората железа экспериментально получено дополнительное усиление эхо-сигнала вторым параметрическим импульсом, равное четырем. Данный эффект может быть использован для повышения чувствительности импульсных методик при аналитических исследованиях различных физических систем и материалов, а также при создании устройств обработки информации на основе явления эха.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена эффекту усиления, присущему т. н. параметрическому эхо-сигналу — нестационарному отклику физической системы на внешнее возбуждение двумя радиочастотными импульсами, когда второй (параметрический) импульс подается на несущей частоте 2ω , удвоенной по отношению к несущей частоте ω первого (резонансного) импульса. Будучи во многом сходным с обычным откликом в последовательности ω — ω [1], параметрическое эхо обладает рядом особенностей, благоприятствующих его использованию в устройствах обработки информации [2, 3].

Данное явление наблюдается в разных объектах (в системах ядерных спинов [4], на акустических модах [5]), но основные свойства сигнала всюду одинаковы. Далее для определенности мы будем рассматривать эхо на собственных магнитоупругих колебаниях монокристаллических пластин бората железа — материала, в котором при комнатной температуре регистрируется интенсивный отклик с относительно большими временами релаксации [6, 7].

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ЭХО-СИГНАЛОВ

Временная диаграмма импульсной последовательности и возбуждаемых ею откликов физической системы приведена на рис. 1. Резонансный импульс (импульс 1 на рис. 1, а) возбуждает в образце магнитоупругие колебания с частотами, расположенными вблизи ω в диапазоне $\sim 1/\tau_\omega$. В момент его окончания начинается расфазировка отдельных мод, и, после того как их фазы распреде-

ляются в интервале $(0, 2\pi)$, исчезает сигнал индукции (кривая 3 на рис. 1, а). Эволюция отдельных собственных колебаний при этом однако не прекращается, и они продолжают спадать, как показывает кривая 1 на рис. 1, б, с характерным временем затухания звука τ_s .

Во время действия параметрического импульса (импульс 2 на рис. 1, а) за счет модуляции скорости звука развивается параметрический процесс. В зависимости от фазы собственное колебание, имеющее к моменту прихода параметрического импульса амплитуду m , может быть усилено или ослаблено, причем усиление пропорционально $\exp(\lambda\tau_{2\omega})$, а ослабление — $\exp(-\lambda\tau_{2\omega})$ (λ — параметр, зависящий от свойств вещества и интенсивности параметрического импульса) [2, 7].

Раскладывая произвольную гармонику с фазой φ на ослабляемую и усиливаемую компоненты, для ее амплитуды после окончания действия параметрического импульса нетрудно получить $m' = m\sqrt{\exp(2\lambda\tau_{2\omega})\cos^2\varphi + \exp(-2\lambda\tau_{2\omega})\sin^2\varphi}$ (система координат выбрана так, чтобы усиливалась x -составляющая). Поскольку условием усиления является $m'/m > 1$, усилятся будут моды, на фазы которых наложено ограничение $\cos^2\varphi > (k+1)^{-1}$, где $k = \exp(2\lambda\tau_{2\omega})$. Для реальных условий (по данным работ [6, 7]) оценка λ составляет $\sim 10^6 \text{ с}^{-1}$. Легко видеть, что даже при небольшой длительности второго импульса $\tau_{2\omega} \approx 1 \text{ мкс}$ из всей совокупности гармоник усиливается уже около 70%.

Увеличение амплитуды или длительности параметрического воздействия приводит к быстрому нарастанию количества усиливаемых мод, большей также становится величина m'/m в отдельной моде.

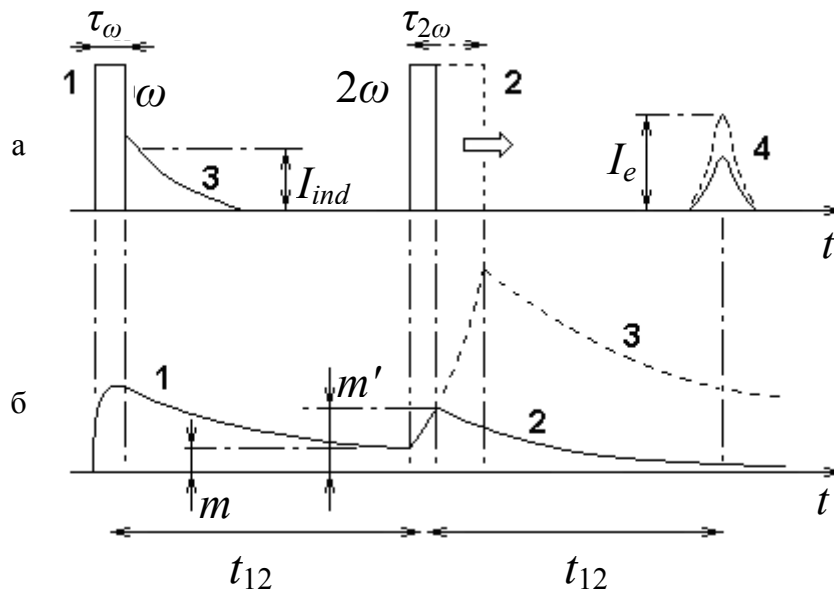


Рис. 1. Импульсная последовательность и реакция физической системы на ее воздействие.

а — временная диаграмма поступающих импульсов: 1 — резонансный импульс на частоте ω , 2 — параметрический импульс на частоте 2ω и регистрируемых откликов: 3 — сигнал индукции, 4 — сигнал эха. Стрелкой показано увеличение длительности параметрического импульса.

б — поведение отдельной моды, принимающей участие в образовании откликов: 1 — спад магнитоупругих колебаний после резонансного импульса; 2 — спад магнитоупругих колебаний, усиленных коротким параметрическим импульсом; 3 — спад магнитоупругих колебаний, усиленных длинным параметрическим импульсом

Последнее обстоятельство отражено на рис. 1, б, где показано, как при увеличении $\tau_{2\omega}$ растет m' . Таким образом, можно утверждать, что уже на этапе возбуждения нестационарных откликов (то есть во время действия импульсной последовательности) в параметрической системе проявляется усилительный механизм.

Сигнал эха является результатом сложения всех мод, фазы которых так преобразуются параметрическим импульсом, что по прошествии времени $2t_{12}$ после резонансного импульса происходит их "фокусировка" [2]. Следовательно, по своей природе параметрическое эхо является сигналом усиленным. Это однако не означает, что оно всегда превосходит входной сигнал, т. к. релаксация уменьшает амплитуды участвующих в формировании эха гармоник (рис. 1, б).

Будем считать, что возбуждение магнитоупругих колебаний линейно по резонансному воздействию, как это предполагается моделью, рассмотренной в [7]. Тогда обратное воздействие отклика

наводит в приемной системе напряжение, находящееся в таком же отношении с напряжением, наведенным сразу после резонансного импульса, в каком амплитуда суммарных магнитоупругих колебаний в момент формирования эха находится с амплитудой магнитоупругих колебаний в момент окончания резонансного импульса. Это означает, что отношение сигнала эха I_e к сигналу I_0 , наводимому начальными колебаниями, может быть принято в качестве некоторого коэффициента преобразования входного сигнала, отражающего соответствующее соотношение для магнитоупругих колебаний. В том случае, если оно превышает единицу, данный коэффициент естественно назвать усилением. Отметим, что, строго говоря, I_0 не является амплитудой сигнала индукции I_{ind} , т. к. по условиям эксперимента I_{ind} всегда измеряется с некоторой задержкой относительно окончания резонансного импульса.

Воспользовавшись строгим выражением для сигнала эха [7], запишем коэффициент полного

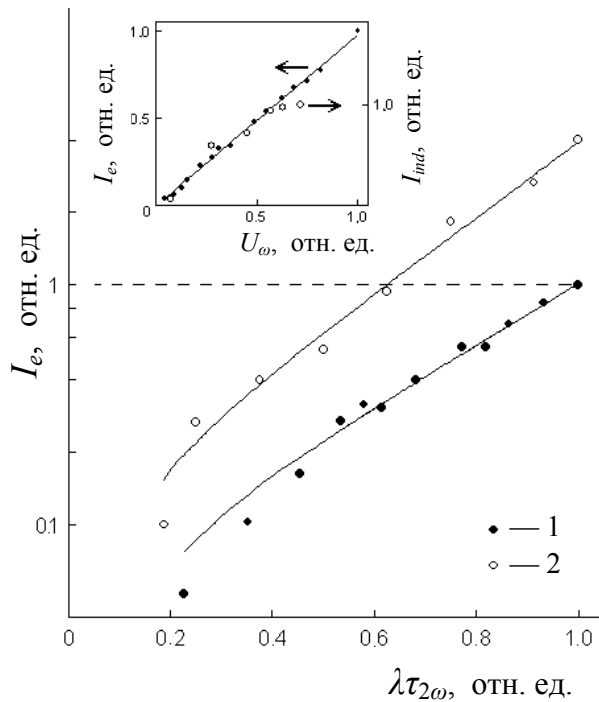


Рис. 2. Зависимости относительной амплитуды эхо-сигналов от интенсивности/длительности параметрических импульсов.

1 — последовательность $\omega-2\omega$, 2 — последовательность $\omega-2\omega-2\omega$: зависимость амплитуды дополнительного эха от второго параметрического импульса при относительной интенсивности/длительности первого параметрического импульса $\lambda\tau_{2\omega}=1$. Горизонтальным пунктиром обозначена линия, на которой амплитуды первого и дополнительного эхо-сигналов становятся равными.

На вставке — зависимости амплитуд эха (I_e) и индукции (I_{ind}) от амплитуды резонансного импульса

преобразования:
$$K_p = I_e/I_0 = \exp\left(-\frac{2t_{12}}{\tau_s}\right) \text{sh}(\lambda\tau_{2\omega}).$$

Два множителя в этом выражении описывают два основных фактора, определяющих амплитуду эха: экспоненциальное затухание каждой отдельной моды магнитоупругих колебаний (первый множитель) и собственно параметрическое усиление (второй множитель). Видно, что для принятой выше оценки λ , характерного значения $\tau_s \approx 20$ мкс и $\tau_{2\omega} \approx 1-2$ мкс эхо является усиленным, т. е. превосходит по амплитуде начальные колебания при $t_{12} \approx 1-10$ мкс.

На практике трудно наблюдать сигнал при столь малых задержках между импульсами в силу существования "мертвого времени" приемной системы и достаточно большой длительности индукции, но ясно, что в принципе на этапе регистрации может быть обнаружен усиленный отклик. Увеличение $\tau_{2\omega}$ по ряду причин часто бывает не вполне удобно, но если оно допустимо, интервал приема эха с $K_p > 1$ расширяется.

Дополнительную возможность усиления дает многократное параметрическое воздействие. Подавая, например, еще один импульс на удвоенной частоте спустя короткое время после формирования эхо-сигнала (последовательность $\omega-2\omega-2\omega$), можно получить второе эхо, большее по амплитуде, чем первое. При использовании данной методики маскирующие сигналы уже отсутствуют, и задержку можно сделать достаточно малой. Начальным сигналом здесь является первое эхо, амплитуду которого легко измерить и, следовательно, вычислить K_p . Очевидно, что если на образец поступит серия из N одинаковых дополнительных параметрических импульсов с одинаковыми интервалами, общее усиление эхо-сигнала достигнет K_p^N .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперимент выполнялся на установке, схема которой приведена в [2]. Длительность импульсов составляла порядка нескольких микросекунд, задержки — порядка десятков микросекунд, $\omega/2\pi \approx 70$ МГц. Результаты эксперимента приведены на рис. 2. В двухимпульсной последовательности получено быстрое нарастание амплитуды эхо-сигнала с увеличением относительной "площади" параметрического импульса $\lambda\tau_{2\omega}$.

Последовательность типа $\omega-2\omega-2\omega$ дает второй (дополнительный) сигнал эха, возрастающий с увеличением "площади" второго параметрического импульса. Обе кривые на рис. 2 описываются гиперболическим синусом (сплошные линии) с близким соответствием подгоночного параметра сделанным выше оценкам.

Очевидно, что в последовательности типа $\omega-2\omega-2\omega$ зависимость амплитуды дополнительного эхо-сигнала от "площади" начинается, как и в двухимпульсной последовательности, от нуля и в некотором интервале значений $\lambda\tau_{2\omega}$ не превышает амплитуды эха первичного. Лишь с определенного момента (при $\lambda\tau_{2\omega} \approx 0.6$, рис. 2) наблюдается превышение амплитуды второго сигнала над первым, когда дополнительное эхо, собственно, и должно считаться усиленным. Из рис. 2 видно также, что

максимальное достигнутое K_p , равное отношению амплитуд дополнительного и первого эха, приблизительно равно четырем.

На вставке рис. 2 демонстрируется линейность откликов по резонансному воздействию, указывающая на допустимость использования развитого выше подхода. Таким образом, эксперимент подтверждает представление о параметрическом эхо-сигнале как об отклике, природа которого принципиально связана с усилением.

ВЫВОДЫ

В работе установлено, что нестационарные отклики физической системы, формирующиеся по параметрическому механизму, должны рассматриваться как усиленные. Показано, что в ряде случаев за счет поступления в систему энергии из параметрических импульсов они могут превосходить входной сигнал, возбужденный импульсом резонансным. На эксперименте достигнуто значительное (в несколько раз) увеличение эхо-сигнала. Данное свойство может быть использовано в эхо-процессорах — устройствах обработки импульсной информации на основе нестационарных откликов, для которых остро стоит проблема поднятия чувствительности.

Учет изученных в работе эффектов также может оказаться полезным при аналитических исследованиях различных физических систем (ядерных спинов, акустических мод и т. д.) и материалов с помощью импульсных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корпел А., Чаттерджи М. Нелинейное эхо, фазовое сопряжение, обращение времени и

электронная голография // ТИИЭР. 1981. Т. 69, № 12. С. 22–43.

2. Нестеров М.М., Плешаков И.В., Фофанов Я.А. Амплитудные и частотные свойства параметрического эхо-сигнала в информационных системах // Научное приборостроение. 2006. Т. 16, № 1. С. 64–71.
3. Нестеров М.М., Плешаков И.В., Фофанов Я.А. Информационно-физические свойства нестационарных откликов в системах обработки импульсных сигналов // Научное приборостроение. 2006. Т. 16, № 2. С. 3–21.
4. Буньков Ю.М. Параметрическое ядерное спиновое эхо // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 23, № 5. С. 271–276.
5. Юшин Н.К., Леманов В.В., Агшиев Б.А. Фоновое эхо в кристаллах ниобата лития // ФТТ. 1974. Т. 16, № 9. С. 2789–2791.
6. Петров М.П., Паугурт А.П., Плешаков И.В., Иванов А.В. Магнитоупругие волны и параметрическое эхо в тонких пластинах бората железа // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11, № 19. С. 1204–1207.
7. Паугурт А.П., Плешаков И.В., Иванов А.В. Импульсное возбуждение магнитоупругих колебаний и акустическое эхо в борате железа // ФТТ. 1987. Т. 29, № 10. С. 2959–2965.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург (Плешаков И.В.)

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Фофанов Я.А.)

Материал поступил в редакцию 13.03.2007.

ON THE ENHANCEMENT EFFECT IN THE PROCESS OF PARAMETRIC ECHO SIGNAL EXCITATION AND REGISTRATION

I. V. Pleshakov, Ya. A. Fofanov*

A.F. Ioffe Physical-Technical Institute RAS, Saint-Petersburg

**Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

The paper discusses generation of parametric echo signals in a physical system under the action of radio pulses with the resonance and double-resonance carrying frequencies. It is shown that, contrary to conventional echo signals, the parametric echo can be regarded as an enhanced response of the system. Using samples of ferum borate, additional four-fold signal enhancement by the second parametric pulse was obtained experimentally in the pulse sequence of one resonance and two parametric pulses. This effect may be used to increase the sensitivity of pulsed methods in the analytic investigations of various physical systems and materials, and also to create data processors based on the echo effect.