



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

18-88-603

А.Ф.Писарев, С.А.Писарева

**СУПЕРГЕТЕРОДИННОЕ ТРЕХВОЛНОВОЕ
ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН**

Направлено в Оргкомитет III Школы
по автоматизации исследований в ядерной физике
и астрофизике, Нальчик, сентябрь 1988 г.

ВВЕДЕНИЕ

В силу исключительной малости константы гравитационного взаимодействия проблема излучения и приема гравитационных волн в лабораторных условиях относится сегодня к самым, пожалуй, трудным задачам экспериментальной физики. Одним из перспективных методов ее решения следует, видимо, считать способ взаимного преобразования волн вследствие нелинейных акустоэлектрических явлений в твердых телах^{/1-4/}. В своей основе этот метод представляет собой своеобразный гетеродинный процесс с пространственно-распределенным коэффициентом трансформации энергии волн. Так, в случае трехволнового процесса сильная волна накачки, т.е. гетеродинная волна частоты ω_1 , нелинейно взаимодействуя со слабой сигнальной волной частоты ω_2 , создает волну на промежуточной частоте $\omega_3 = \omega_1 \pm \omega_2$, которая, в свою очередь, взаимодействуя с гетеродинной волной, порождает сигнальную волну. Вновь созданные волны синфазно "складываются" с уже имеющимися в среде бегущими волнами, и на выходе из среды сигнальная волна и волна на промежуточной частоте будут усилены за счет энергии, отобранной от гетеродинной волны. Такой механизм пространственного нелинейного преобразования энергии присущ волнам любой физической природы - нелинейно смешанные в материальной среде они способны интенсивно обмениваться энергией, в том числе отдавая ее гравитационной волне.

Параметрический процесс преобразования волн наиболее интенсивно протекает при полном пространственно-волновом синхронизме, т.е. при условии $\Sigma \omega_i = 0$ и $\Sigma \vec{k}_i = 0$, где ω_i и \vec{k}_i - частоты и волновые векторы взаимодействующих полей. Но даже этот эффективный процесс с участием гравитационной волны характеризуется все же очень малым коэффициентом преобразования^{/5/}. При этом когерентная длина или когерентное время взаимодействия волн являются чрезмерно большой величиной, и их не удается пока "вписать" в разумные лабораторные масштабы эксперимента.

Ниже рассматривается возможность поднятия эффективности обмена энергией между волнами в параметрическом процессе с участием гравитационной волны путем введения в процесс дополнительного механизма - так называемого супергетеродинного усиления. Подобный процесс хорошо опробирован на нелинейном взаимодействии электромагнитных и акустических волн^{/6-10/}, маг-

нитостатических и гиперзвуковых волн^{/11/}. Сущность супергетеродинного процесса заключается в обеспечении избирательного, внешнего по отношению к процессу, сильного темпа прироста энергии одной, например, звуковой или несколькими из параметрически связанных волн. Посредством нелинейной связи волн "внешний" коэффициент усиления будет передаваться, например, от звуковой к слабой волне, в нашем случае - к гравитационной.

В случае применения внешнего избирательного усиления гиперзвуковой волны по закону e^{az} линейный инкремент роста a за счет акустозлектронного усиления может достигать значений $15 \div 20 \text{ см}^{-1} / 8 \cdot 10^7$. Имеются также предложения^{/12-14/}, направленные на повышение величины a до 10^3 см^{-1} . При внешнем усилении электромагнитной волны рассматриваемый нелинейный процесс можно реализовать, например, на основе кристалла рубина, в котором лазерное усиление характеризуется $a \sim 0,5^{/15/}$, а нелинейные оптические константы, необходимые для смешивания волн, достаточно велики.

В настоящей работе дается система уравнений для супергетеродинного параметрического смешивания трех волн: электромагнитной, гиперзвуковой и гравитационной. Показана возможность передачи коэффициента внешнего усиления от волны промежуточной частоты к волне гравитационной.

СВЯЗЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ, ГРАВИТАЦИОННОЙ И ГИПЕРЗВУКОВОЙ ВОЛН

Нелинейное взаимодействие указанных волн наиболее интенсивно может протекать в пьезоэлектрических монокристаллах или пленках типа ZnO, CdS, GaAs, LiNbO₃ и др. Рассмотрим чисто коллинеарный случай взаимодействия трех волн, распространяющихся вдоль одного направления, принимаемого за ось z .

В качестве исходной системы уравнений для связанных волн используем соответствующие волновые уравнения:

$$\frac{\partial^2 E_i}{\partial z^2} - \frac{\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 E_i}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P_{i \text{ нел.}}}{\partial t^2}; \quad /1/$$

$$\frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial t^2} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad /2/$$

$$\frac{\partial^2 U_i}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho v^2} \frac{\partial r_{ik}}{\partial x_k}, \quad /3/$$

где E_i , $h_{\mu\nu}$ и U_i - плоские поперечные электромагнитное, гравитационное и звуковое поля соответственно; c и v - скорость света в вакууме и скорость звука в данной среде; ϵ - диэлектрическая проницаемость среды; $T_{\mu\nu}$ - тензор энергии-импульса материи; r_{ik} - тензор механического натяжения вещества. Рассмотрим качественно эффект "переброса" пространственного усиления от одной волны к другой волне - гравитационной. Ниже принимаем $E_i = E_x = E$, $P_i = P_x = P$, $h_{\mu\nu} = h_{xx} = -h_{yy} = h$, $T_{\mu\nu} = T_{xx} = T$, $r_{ik} = r_{xx} = r$.

Нелинейная электрическая поляризация возникает за счет нелинейного пьезоэффекта в результате одновременной деформации вещества под действием гравитационной и гиперзвуковой волн и при этом равна^{/16/}:

$$P_{i \text{ нел.}} = \eta_{ijkl} S_{jk} S_{lm}, \quad /4/$$

где $S = S^{3B} + S^{GP}$ - тензор деформации; $S^{3B} = (\frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial z})$; $S^{GP} \approx h$; η - квадратичный пьезоэлектрический тензор; координатные индексы i, j, k, l, m принимают значения x, y, z . Допустим, что $|\eta_{xxxx}| = \eta > |\eta_{xyyz}|$, что всегда можно обеспечить выбором геометрии срезов в кристалле. Просуммировав члены в /4/ с учетом симметрии тензора η , получим

$$P = -2\eta \frac{\partial U}{\partial z}. \quad /5/$$

Аналогично определяются тензоры $T_{\mu\nu}$ и r_{ik} . Будем учитывать максимальные нелинейные компоненты, содержащие комбинационные частоты, т.е.

$$T = \eta E \cdot \frac{\partial U}{\partial z}, \quad /6/$$

$$r = 2\eta E h. \quad /7/$$

Взаимодействующие волны представим в виде

$$E = \frac{1}{2} E_0(z, t) e^{i(\omega_1 t - k_1 z)} + \text{к. с.}, \quad /8a/$$

$$h = \frac{1}{2} h_0(z, t) e^{i(\omega_2 t - k_2 z)} + \text{к. с.}, \quad /8б/$$

$$U = \frac{1}{2} U_0(z, t) e^{i(\omega_3 t - k_3 z)} + \text{к. с.}, \quad /8в/$$

где E_0 , h_0 , U_0 - медленно меняющиеся амплитуды.

В случае попутного распространения волн условия полного пространственно-волнового синхронизма будут

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \omega_2 + \omega_3, \\ \mathbf{k}_1 &= \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3, \\ \Delta \mathbf{k} &= \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 = 0.\end{aligned}$$

Подставляя выражение для полей и их источников /5/, /6/, /7/, /8/ в волновые уравнения /1/, /2/, /3/ и учитывая условия /9/, получим систему уравнений для связанных волн, которую сведем к системе укороченных уравнений:

$$\frac{\partial \mathbf{E}_0}{\partial t} + \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \frac{\partial \mathbf{E}_0}{\partial z} = \frac{2\eta\pi\omega_1\omega_2}{\epsilon v} h_0 U_0 e^{-i\Delta k z}; \quad /10/$$

$$\frac{\partial h_0}{\partial t} + c \frac{\partial h_0}{\partial z} = -\frac{4\pi G \eta \omega_3}{c^2 \omega_2 v} E_0 U_0^* e^{i\Delta k z}; \quad /11/$$

$$\frac{\partial U_0}{\partial t} + v \frac{\partial U_0}{\partial z} = -\frac{\eta}{2\rho v} E_0 h_0^* e^{i\Delta k z}. \quad /12/$$

Далее процесс обмена энергией будем считать установившимся, сильную электромагнитную волну накачки - заданной и неизменной: $E_0 = \text{const}$: затуханием гравитационной волны пренебрежем и сведем внешнее усиление с коэффициентом $\Gamma_3 < 0$ для звуковой волны. Окончательно система уравнений для связанных волн будет

$$\frac{\partial h_0}{\partial z} = -\frac{4\pi G \eta \omega_3}{c^3 v \omega_2} E_0 U_0^* \equiv a_{23} U_0^*; \quad /13/$$

$$\frac{\partial U_0^*}{\partial z} = \Gamma' U_0^* - \frac{\eta}{2\rho v^2} E_0^* h_0 \equiv a_{33} U_0^* + a_{32} h_0. \quad /14/$$

Решение имеет вид /17, с.445/

$$h_0 = h_0^{(0)} \frac{1 - m_1 m_2 e^{\Gamma' z}}{1 - m_1 m_2} - U_0^{(0)} \frac{e^{\Gamma' z} - 1}{1 - m_1 m_2} m_1; \quad /15/$$

$$U_0 = h_0^{(0)} \frac{1 - e^{\Gamma' z}}{1 - m_1 m_2} m_2 + U_0^{(0)} \frac{e^{\Gamma' z} - m_1 m_2}{1 - m_1 m_2};$$

где

$$a_{23} = -\frac{4\pi G \eta \omega_3}{c^3 v \omega_2} E_0; \quad a_{33} = \Gamma' = -\Gamma_3 > 0;$$

$$a_{32} = -\frac{\eta E_0}{2\rho v^2}; \quad m_1 = \frac{a_{23}}{\Gamma'}; \quad m_2 = \frac{a_{32}}{-\Gamma'}.$$

Перепишем решение /15/ в более наглядном виде:

$$h_0(z) = h_0^{(0)} (a + \beta e^{\Gamma' z}) + U_0^{(0)} (a' - \beta' e^{\Gamma' z}); \quad /16/$$

$$U_0(z) = h_0^{(0)} (\gamma - \beta e^{\Gamma' z}) + U_0^{(0)} (\gamma' + \delta' e^{\Gamma' z}),$$

где $h_0^{(0)} = h_0(z=0)$, $U_0^{(0)} = U_0(z=0)$ и константы $a, a', \beta, \beta', \gamma, \gamma', \delta, \delta' > 0$.

Из выражений /16/, в частности, видно, что при начальных условиях $h_0^{(0)} \neq 0$ и $U_0^{(0)} = 0$ гравитационная волна будет усиливаться по закону $e^{\Gamma' z}$, т.е. внешний коэффициент усиления звуковой волны "передается" гравитационной волне. Полезно отметить и второй важный момент в данном процессе: происходит рождение и усиление звуковой волны, которая после фильтрации по фазе и поляризации может служить источником информации о гравитационной волне.

ВЫВОДЫ

Супергетеродинный параметрический метод пространственного преобразования волн обладает гибкими возможностями передачи внешнего избирательного усиления от одних волн другим волнам. Участвующие в процессе параметрически связанные волны характеризуются строгими взаимными соотношениями для фаз, поляризаций, энергий и направлений распространения, и эти связи могут быть использованы для эффективной фильтрации слабых гармонических сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Резонансные взаимодействия света с веществом. /Под ред. В.С.Бутылкина/. М.: Наука, 1977.
2. Ярив А. Квантовая электроника. М.: Сов. радио, 1980, с.342.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИИ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

3. Крочик Г.М. - Квантовая электроника, 1979, 6, №2, 295.
4. Вакару С.И., Писарев А.Ф. - В сб.: Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн "Гравитационные волны", Д2,13-83-689. Дубна: ОИЯИ, 1983, с.75.
5. Акишин П.Г. и др. - В сб.: Труды рабочего совещания по созданию излучателя и детектора гравитационных волн "Гравитационные волны", Р2-85-667. Дубна: ОИЯИ, 1985, с.5.
6. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е. - ФТТ, 13, вып.4, 1971, с.955.
7. Калапуша А.Л., Коцаренко Н.Я. - Письма в ЖТФ, 1980, 6, вып.15, с.936.
8. Боровков О.В., Калапуша А.Л., Коцаренко Н.Я. - Письма в ЖТФ, 1982, 8, вып.11, с.661.
9. Калапуша А.Л., Коцаренко Н.Я. - Изв. вузов, радиоэлектроника, 1983, 26, №5, с.71.
10. Коцаренко Н.Я., Кошевая С.В., Бурлак Г.Н. - ФТТ, 1977, 19, вып.3, с.816.
11. Коцаренко Н.Я., Рапопорт Ю.Г. - Письма в ЖТФ, 1984, 10, вып.14, с.843.
12. Величина Т.С. и др. - ФТТ, 1984, 26, вып.4, с.1241.
13. Крючков С.В. - ФТТ, 1979, 21, вып.5, с.1595.
14. Крючков С.В., Яковлев В.А. - ФПП, 1977, 11, №3, с.590.
15. Варнавский О.П. и др. - П. в ЖЭТФ, 1985, 41, №1, с.9.
16. Luukkala M., Sugakka I. - J. Appl. Phys., 1972, 43, No.6, p.2610.
17. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981.

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Рукопись поступила в издательский отдел
5 августа 1988 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
D1.2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
D13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
D3.4.17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
—	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дуона, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
D1.2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
D9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
D7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
D2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
D4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
D2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
D14-87-799	Труды II Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987.	4 р. 20 к.
D17-88-95	Труды IV Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1987.	5 р. 20 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Писарев А.Ф., Писарева С.А.

18-88-603

Супергетеродинное трехволновое детектирование гравитационных волн.

Рассматривается супергетеродинный метод взаимной трансформации энергии волн в трехволновом нелинейном процессе, одна из которых – гравитационная волна. Показана гибкая возможность "переброса" большого коэффициента внешнего усиления от электромагнитной или звуковой волны к волне гравитационной, что может облегчить задачу генерации и детектирования этой волны.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации и Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод авторов

Pisarev A.F., Pisareva S.A.

18-88-603

Superheterodyning Three-Wave Detection of Gravitation Waves

A superheterodyning Method of mutual transformation of wave energies in the non-linear three-wave process involving a gravitation wave is considered. A flexible possibility of "Transferring" the great external gain coefficient from an electromagnetic or acoustic wave to the gravitation one is shown. It can facilitate generation and detection of this wave.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation and Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988