

УДК 533.92; 553.982.2

МЕТОД НЕЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПОЛЕЙ С НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАМИ ДЛЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

¹Запывалов Н.П., ²Беднаржевский С.С., ²Смирнов Г.И., ²Жосан Д.А.

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск, e-mail: sbed@mail.ru;*

²*Сибирское отделение Международного института нелинейных исследований Российской
академии наук, Новосибирск, e-mail: smigi46@mail.ru*

Исследованы возможности использования лазерно-параметрического метода измерения сейсмоакустических колебаний для повышения эффективности сейсморазведки нефтегазовых месторождений. Перспективы решения основных задач лазерно-параметрической диагностики измерения сейсмоакустических колебаний при сейсморазведке нефтегазовых месторождений базируются на детальном анализе быстро меняющейся интерференционной картины, формируемой рассеянными волновыми полями, при варьировании различных параметров сложных зондирующих сигналов – частоты, фазы, интенсивности, поляризации и направления распространения излучения. Резонансно-параметрический метод регистрации колебаний облучаемых сред позволяет осуществлять их классификацию посредством измерений спектра вибраций при различных ракурсах облучения и восстанавливать детали рассеивающего объекта с разрешением порядка длины волны и менее. Измерение частотной характеристики рассеивающих объектов дает новое информационное качество локационным средствам и расширяет область использования лазерно-параметрических локаторов для сейсморазведки нефтегазовых месторождений.

Ключевые слова: нефтегазовые месторождения, сейсморазведка, лазеры, параметрические резонансы

METHOD OF NONLINEAR RESONANT-PARAMETRIC INTERACTION OF LASER FIELDS WITH NANOHETEROSTRUCTURES FOR SEISMIC EXPLORATION OF PETROLEUM DEPOSITS

¹Zapivalov N.P., ²Bednarzhevskiy S.S., ²Smirnov G.I., ²Zhosan D.A.

¹*Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, e-mail: sbed@mail.ru;*

²*Siberian Department of International Institute for Nonlinear Sciences,
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, e-mail: smigi46@mail.ru*

Possibilities of a laser-parametric method of measurement of seismoacoustic vibrations for increase of efficiency of seismic exploration of petroleum fields are investigated. Prospects of the solution of the main objectives of laser-parametric diagnostics of measurement of seismoacoustic vibrations at seismic exploration of petroleum fields are based on the detailed analysis of quickly changing interference picture formed by scattered wave fields, at a variation of various parameters of difficult probing signals—frequency, phases, intensity, polarization and the direction of distribution of radiation. The resonant-parametric method of registration of vibrations of irradiated media allows to carry out their classification by means of measurements of a spectrum of vibrations at various foreshortenings of irradiation and to restore details of scattering object with the resolution of an order or less of length of a wave. New information gives measurements of the frequency characteristic of disseminating objects to locational means and expands area of use of laser and parametrical locators for seismic exploration of petroleum fields.

Keywords: petroleum fields, seismic exploration, lasers, parametric resonance

Среди инновационных технологий разведки и разработки нефтегазовых месторождений можно выделить пока не реализованные идеи и проекты. В последнее время активно пропагандируется революционный технологический рывок в изучении недр, геологических исследованиях, добыче нефти и газа. Предполагается, что лазерная технология в перспективе позволит разведывать и добывать почти всю нефть на месторождении и избежать загрязнения окружающей среды.

Новые возможности решения основных задач лазерно-параметрической диагностики измерения сейсмоакустических колебаний при сейсморазведке нефтегазовых

месторождений базируются на детальном анализе быстро меняющейся интерференционной картины, формируемой рассеянными волновыми полями, при варьировании различных параметров сложных зондирующих сигналов – частоты, фазы, интенсивности, поляризации и направления распространения излучения. Эти возможности связаны с использованием современных достижений физики нелинейно-волновых параметрических процессов, теории обратных задач рассеяния.

Средства лазерного облучения при сверхразрешении обеспечивают взаимодействие лазерных импульсов с объектами, меньшими длины волны излучения, для

чего предложено использовать эффекты параметрического взаимодействия волн. Так, резонансно-параметрический метод регистрации колебаний облучаемых сред позволяет осуществлять их классификацию посредством измерений спектра вибраций при различных ракурсах облучения и восстанавливать детали рассеивателя с разрешением порядка длины волны и менее. Данный метод аналогичен лазерно-параметрическому методу регистрации плазменных колебаний [6].

Вопросам диагностики слабых колебаний объектов различными методами посвящено множество работ (см., например, [1–6]). Была достигнута рекордная чувствительность при регистрации вибрации поверхности зеркала лазерного резонатора [1]: измерены смещения поверхности с амплитудой 10^{-16} м на частоте 15 кГц с помощью двухмодового лазера, были зарегистрированы колебания отражательной пластины с амплитудой $10^{-3} \lambda$ (λ – длина волны излучения) на расстоянии около 5 м с использованием внутрирезонаторного приема отраженного излучения.

Цель исследования – использование лазерно-параметрического метода измерения сейсмоакустических колебаний для повышения эффективности сейсморазведки нефтегазовых месторождений.

Материал и методы исследования

Рассмотрим возможность взаимодействия слабых вибраций облучаемого объекта с помощью двухчастотного лазера. Методы анализа аналогичны изложенным в [6].

Моделирование процесса локационного зондирования основано на решении обратной задачи рассеяния излучения на объектах локации, постановка которой состоит в том, чтобы по характеристикам рассеянного волнового поля определить вид и параметры рассеивателей.

Информация о локационном изображении объектов содержится в принимаемом сигнале неявно, и для ее получения необходимо решать задачу вос-

становления локационных изображений по результатам измерений характеристик принятого сигнала. Отраженный сигнал в дальней зоне является обычно суперпозицией отражений от отдельных точек объекта. Поэтому при фиксированном ракурсе объекта принимаемый сигнал можно рассматривать как интегральное представление (проекцию) искомого изображения. Задача формирования локационных изображений объекта сводится при этом к их восстановлению по проекциям.

Эффективность решения задач локации резко повышается при использовании резонансных параметрических моделей рассеяния и антенн (модель неустойчивого резонатора, модель резонатора с дополнительным отражателем).

Исследованные параметрические явления нелинейного взаимодействия волн позволяют реализовать резонансные параметрические приемные и излучающие антенны, резко увеличивающие информационное содержание локационных изображений, создавать на базе параметрических антенн прецизионные средства локации сверхвысокого разрешения.

На основе использования геометрических и топологических методов решения обратных задач рассеяния моделируется процесс локационного зондирования, определены условия единственности и устойчивости решения обратных задач рассеяния излучения. Широкополосность параметрических антенн дает возможность излучать очень короткие импульсы со сложным спектром, что существенно увеличивает объем информации об объекте локации.

Результаты исследования и их обсуждение

Излучение на одной из частот ω служит в качестве опорного сигнала, а на другой ω_μ – в качестве зондирующего. Зондирующая волна отражается от объекта и приобретает доплеровское смещение по частоте вследствие колебаний поверхности. Аппроксимируем вибрацию объекта Δl набором синусоидальных колебаний:

$$\Delta l(t) = \sum_m l_m \sin(\Omega_m t + \phi_m), \quad (1)$$

где Ω_m, l_m, ϕ_m – частоты амплитуды и начальные фазы колебаний. С учетом эффекта Доплера частота отраженной волны имеет вид

$$\omega_\mu^s = \left[1 - \sum_m l_m \Omega_m c^{-1} \cos(\Omega_m t + \phi_m) \right] \omega_\mu. \quad (2)$$

В результате смещения отраженной волны с амплитудой электрического поля E_μ^s и опорного сигнала с амплитудой E возникают биения, регистрируемые высокочастотным анализатором спектра и содержащие составляющую

$$u \propto EE_\mu^s \cos[\varepsilon t + k\Delta l(t) + \tilde{\varphi}], \quad (3)$$

где $\varepsilon = \omega_\mu - \omega$; $\tilde{\varphi}$ – флуктуационное слагаемое, учитывающее шумы преобразования и флуктуации частоты биений.

Если амплитуда вибраций меньше длины волны излучения ($k\Delta l \ll 1$), то выражение (3) можно привести к виду

$$u \propto EE_\mu^s [\cos(\varepsilon t + \tilde{\varphi}) - k\Delta l(t) \sin(\varepsilon t + \tilde{\varphi})]. \quad (4)$$

При учете (2) отсюда следует, что вибрации поверхности с частотой Ω_m и амплитудой $\Delta l_m(t) = l_m \sin(\Omega_m t + \varphi_m)$ сопровожда-

ются появлением в спектре сигнала биений наряду с колебанием на частоте ε колебаний на комбинационных частотах $\varepsilon \pm \Omega_m$, т.е. в этом случае имеем

$$u \propto EE_\mu^s \left\{ \cos(\varepsilon t + \tilde{\varphi}) + \frac{kl_m}{2} \left[\cos[(\varepsilon + \Omega_m)t + \varphi_m + \tilde{\varphi}] - \cos[(\varepsilon - \Omega_m)t + \varphi_m + \tilde{\varphi}] \right] \right\}. \quad (5)$$

Параметрические линии-спутники на частотах $\omega_\mu = \omega \pm \Omega_m$ возникают вследствие двухфотонного рассеяния на колебаниях с частотой Ω_m . При этом отношение амплитуд параметрических сигналов к амплитуде биений на разностной частоте ε , регистрируемое высокочастотным анализатором спектра, составляет $l_m/2\lambda$. Параметрические линии-спутники при лазерном облучении можно использовать для воздействия на колебания, амплитуды которых гораздо меньше длины волны излучения.

Одной из наиболее важных задач высокоинформативной лазерной диагностики неоднородных сред для повышения эффективности сейсморазведки нефтегазовых месторождений является формирование локационного изображения объектов, под которыми понимают пространственное распределение физических характеристик этих объектов, получаемое в результате анализа рассеянного ими электромагнитного поля. Информация о локационном изображении содержится в локальном сигнале неявно.

Современный этап развития лазерной локации для повышения эффективности сейсморазведки нефтегазовых месторождений характеризуется стремлением получить максимум информации из данных локационного зондирования, которые полностью определяются частотными, амплитудно-фазовыми, поляризационными и угловыми характеристиками отражённого сигнала.

Основными особенностями применения лазерных полей для сейсморазведки нефтегазовых залежей являются следующие.

Во-первых, модели локационного изображения отличаются от моделей, используемых в традиционном для томографии рентгеновском диапазоне. Последние описывают поглощение поля при просвечивании объекта, а содержанием локационного изображения, как правило, являются характеристики рассеяния и (или) геометрическая форма объекта.

Во-вторых, для лазерно-параметрической диагностики характерно ограничение сектора, числа ракурсов наблюдения объекта и ширины спектра зондирующего сигнала, а также воздействие на процесс

формирования локационного изображения различными помехами. Поэтому особое значение имеет разработка и использование томографических методов формирования локационного изображения, учитывающих эти факторы.

Необходимы также эффективные способы высокоточного сопровождения объекта по дальности при формировании его локационного изображения для повышения эффективности сейсморазведки нефтегазовых месторождений. Создание таких методов должно основываться на достижениях как квантовой электроники, так и квантовой статистики. Значительный объём вычислений и большие массивы данных предъявляют жёсткие требования к устройствам обработки сигналов и приводят к необходимости разработки эффективных вычислительных алгоритмов.

В настоящее время для нахождения проекций локационного изображения по измеренным сигналам используется обычно приближение геометрической оптики, которое по существу является приближением первого порядка. Оно не учитывает квантовых эффектов и, строго говоря, применимо к ограниченному классу объектов. Это приводит к определённым потерям качества локационного изображения для повышения эффективности сейсморазведки нефтегазовых месторождений.

Заключение

Таким образом, для повышения эффективности разведки нефтегазовых месторождений целесообразно создание средств сейсмоакустической локации сверхвысокого разрешения, обеспечивающих возможность отображения у объектов локации деталей с размерами, меньшими длины волны зондирования, следует использовать эффекты нелинейного параметрического взаимодействия волновых полей.

Требования к техническим характеристикам параметрических источников лазерного излучения существенно ослабляются при использовании разностных методов регистрации различных параметров волновых полей, позволяющих расчленивать сложную

картину нелинейно-волнового взаимодействия на отдельные детали и анализировать их структуру. Специфика указанных методов регистрации состоит в измерении разности частот, фаз, амплитуд и поляризаций различных компонент лазерного излучения. Формально эти методы аналогичны разностным методам анализа нелинейных резонансов в лазерной спектроскопии [4].

Дополнительным информационным каналом могут служить эффекты поляризационно-угловой анизотропии рассеяния волновых полей на макрообъектах. Частотно независимая диаграмма направленности в сочетании с широкополосностью параметрических устройств может быть использована для определения характеристик материала отражающей поверхности и частотной характеристики объекта локации. Возможность измерения частотной характеристики рассеивателей дает новое информационное качество локационным средствам и расширяет область использования лазерно-параметрических локаторов для сейсморазведки нефтегазовых месторождений.

Список литературы

1. Багаев С.Н., Дычков А.С., Чеботаев В.П. Применение узких оптических резонансов для измерения малых смещений и для создания детекторов гравитационных волн // Журнал экспериментальной и теоретической физики. Письма в редакцию. – 1981. – Т.33, № 2. – С. 85–88.
2. Беднаржевский С.С., Запывалов Н.П., Смирнов Г.И., Шевченко Н.Г., Ешимов Г.К. Эксплуатационная скважина на месторождении нефти и газа // Патент на полезную модель RUS № 105358. 30.09.2009.
3. Запывалов Н.П., Смирнов Г.И., Харитонов В.И. Фракталы и наноструктуры в нефтегазовой геологии и геофизике. – Новосибирск: Гео, 2009. – 131 с.

4. Раутиан С.Г., Смирнов Г.И., Шалагин А.М. Нелинейные резонансы в спектрах атомов и молекул. – Новосибирск: Наука, 1979. – 312 с.

5. Смирнов Г.И., Беднаржевский С.С., Жосан Д.А. Лазерное индуцирование фотоэлектрических и субатомных процессов в изотопах водорода и гелия // Перспективы науки. – 2013. – № 7. – С. 60–62.

6. Antsiferov V.V., Smirnov G.I. Coherent radiation processes in plasma, Cambridge: CISP, 1998. – 236 p.

References

1. Bagaev S.N., Dychkov A.S., Chebotaev V.P. *Zhurnal jeksperimental'noj i teoreticheskoj fiziki. Pis'ma v redakciju*, 1981, no. 2, pp. 85–88.
2. Bednarzhevskiy S.S., Zapivalov N.P., Smirnov G.I., Shevchenko N.G., Eshimov G.K. *Jekspluatatsionnaja skvazhina na mestorozhdenii nefiti i gaza*. Patent RUS no. 105358. 30.09.2009.
3. Zapivalov N.P., Smirnov G.I., Kharitonov V.I. *Fraktaly i nanostruktury v neftegazovoj geologii i geofizike*, Novosibirsk: Geo, 2009. 131 p.
4. Rautian S.G., Smirnov G.I., Shalagin A.M. *Nelinejnye rezonansy v spektrah atomov i molekul*, Novosibirsk: Nauka, 1979. 312 p.
5. Smirnov G.I., Bednarzhevskiy S.S., Zhosan D.A. *Perspektivy nauki*, 2013, no. 7, pp. 60–62.
6. Antsiferov V.V., Smirnov G.I. Coherent radiation processes in plasma, Cambridge: CISP, 1998. 236 p.

Рецензенты:

Голубятников В.П., д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск;

Шевченко Н.Г., д.б.н., профессор, главный научный сотрудник ООО «Бриз», г. Сургут.

Работа поступила в редакцию 21.05.2014.