

И.В. Брякин, С.Т. Турдумаматов

Институт автоматизации и информационных технологий Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек

bivas2006@yandex.com, samat.turdumamatov@iaau.edu.kg

МЕТОД НЕЛИНЕЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ МАЛОГЛУБИННОЙ ГЕОФИЗИКИ

Рассматриваются особенности применения нелинейной и параметрической локации при решении задач малоглубинной геофизики. Обосновывается новый способ нелинейно-параметрической радиолокации, основанный на использовании в качестве зондирующего и возбуждающего воздействий соответственно переменного и постоянного электрических полей. Предлагается за счет резонансной генерации связанных магнитоупругих волн возбуждать дополнительно нелинейные волны различного вида, включая и периодические нелинейные волны.

Ключевые слова: композиционный материал, магнитное и электрическое поля, модулятор, магнитоэлектрический и электродинамический эффекты, способ возбуждения, спиновый конденсатор, феррит, феррозонд.

В настоящее время, в связи с необходимостью обеспечения экономической рентабельности последующей добычи минерального сырья в области геологического изучения недр, применяемые современные геологические исследования носят за некоторым небольшим исключением малоглубинный характер [1].

Одними из главных особенностей малых глубин являются разнообразие и быстрая изменчивость свойств геологической среды. К геофизическим исследованиям здесь предъявляются высокие требования по разрешающей способности и детальности наблюдений. Для того чтобы наиболее полно и качественно выполнить поставленные геологические задачи, необходимо повышать информативность геофизических исследований за счет разнообразия состава и увеличения объема работ.

Кроме того, во многих других областях деятельности человека, связанных с археологией, строительством и эксплуатацией подземных коммуникаций, борьбой с терроризмом, гуманитарным разминированием и т.п., возникает не менее острая необходимость поиска различных объектов в толще укрывающих сред [2]. При этом существующие средства поиска зачастую не способны обеспечить глубину поиска, соответствующую уровню заглупления объекта поиска, что непосредственно связано с существованием сравнительно больших удельных потерь при прохождении электромагнитных волн через различные слои укрывающей среды: грунты различного состава и влажности (поиск террористических тайников с оружием, террористических взрывных устройств); пресная и морская вода (поиск неразорвавшихся боеприпасов, железных контейнеров и бочек с химическими веществами); растительность (поиск холодного и огнестрельного оружия, например, в криминалистике); снег и лед; строительные материалы (кирпичи, бетон и т.д.).

Следует отметить, что интенсификация строительного освоения городской территории, уплотнение застройки в центральной части города, строительство зданий повышенной этажности, широкое использование подземного пространства, планируемое расширение и освоение городской территории также требует детального изучения состояния геологической среды, выявления опасных проявлений эндогенных и экзогенных геологических процессов.

Известно, что геологическая среда в подземной части территории города, имея

изначально сложную природную обстановку, подвергается интенсивному техногенному влиянию, при котором природные геохимические и геодинамические процессы резко ускоряются. Поэтому существует реальная угроза проявления непредсказуемых катастрофических процессов.

Исходя из этого, очевидно, что от достоверности геологической информации и категории сложности инженерно-геологических условий напрямую зависят степень благоприятности и сроки освоения территории, ее инвестиционная привлекательность, а также надежность эксплуатации как отдельного объекта капитального строительства, так и территории в целом. Существующие геофизические методы исследований характеризуются высокой производительностью и относительно низкой стоимостью, что дает основание прогнозировать в ближайшей перспективе устойчивое повышение спроса на них. Исходя из этого, можно предполагать и соответствующую востребованность малоуглубинных геофизических работ как в горно-геологической отрасли, так и в сфере инженерных изысканий.

Проведенный анализ существующей ситуации говорит, прежде всего, о необходимости обеспечения высокой оперативности получения достоверных данных различными методами исследований и соответствующей экономичности технического оборудования, что в итоге позволит избежать принятия неадекватных решений, связанных с антропогенной нагрузкой на геологическую среду, либо с чрезмерной защитой природной среды.

В связи с этим достаточно актуальным направлением является повышение эффективности малоуглубинных геофизических исследований за счет разработки недорогой универсальной измерительной аппаратуры, применения новых технологий обработки данных и использования оптимального комплекса геофизических методов.

В основе большинства известных методов малоуглубинных геофизических исследований лежит изучение электрических свойств (электрической проводимости σ , диэлектрической проницаемости ϵ и магнитной проницаемости μ) верхнего слоя земли (осадочных пород) осваиваемых территорий [3]. Особенностью верхнего слоя земли (осадочных пород) является слоистость, причем отдельные слои различаются по своим физическим свойствам.

Типичными осадочными породами являются: песок, глина, галечник, суглинок, известняк, мел и др. Эти породы пористы и в естественных условиях содержат определенное количество воды, которая просачивается вглубь земли особенно легко там, где поверхностные слои сложены из водонепроницаемых пород (песка, щебня, гальки и т.д.). Вода продвигается до первого водонепроницаемого слоя (глина, сланцы и т.п.). На границах этих слоев атмосферные воды задерживаются и, скапливаясь в пустотах верхних слоев, образуют грунтовые воды. Степень влажности осадочных пород является одним из факторов, существенно определяющих их электрические характеристики

Твердая фаза осадочных пород, представляющих собой гетерогенную полидисперсную систему, состоит из минеральных, органо-минеральных и органических частиц разного размера – от молекул до крупных механических элементов – ила, пыли, песка и камней (рис. 1).

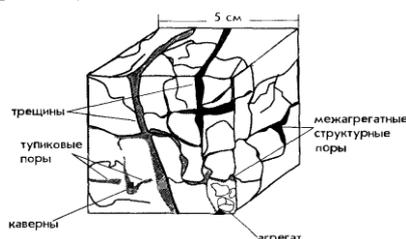


Рисунок 1. Структура гетерогенной полидисперсной системы

Особенности структуры и состава основных компонентов гетерогенной полидисперсной систем представлены на рис.2.

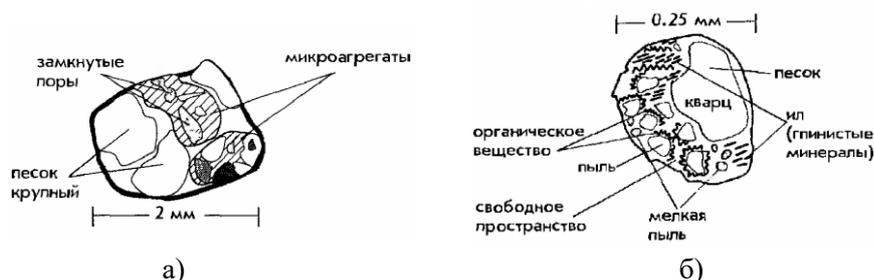


Рисунок 2. Структуры основных компонентов гетерогенной полидисперсной системы:
а – агрегат ($> 0,25\text{мм}$); б – микроагрегат ($< 0,25\text{мм}$)

Подобная геофизическая среда представляет собой гетерогенную многофазную систему с широким набором неоднородностей, взаимодействующую с зондирующим электромагнитным полем. В этом случае ее электрические свойства можно рассматривать с точки зрения взаимодействия данной среды и электромагнитных волн с использованием теории распространения радиоволн над импедансными структурами. Исходя из этого, в качестве модели такой среды можно взять модель физического объекта (ФО) с пространственно распределенными структурными элементами, функциональные связи между которыми реализуются на основе четырех групп физических эффектов (ФЭ): 1 – ФЭ-проводники; 2 – ФЭ-модификаторы; 3 – ФЭ-преобразователи энергии; 4 – ФЭ-преобразователи ФО [4].

Рассмотрим особенности каждой из перечисленных групп ФЭ применительно к рассматриваемой модели ФО:

- первая группа – ФЭ, связанные с проводимостью определенного вида энергии и используемые для обеспечения взаимосвязей между структурными элементами, на которых проявляются ФЭ-преобразователи. Эффекты проводимости могут проявляться на различных иерархических уровнях физических объектов, а эффекты проводимости с дополнительными воздействиями могут быть использованы для управления проявлением ФЭ-преобразователей и усиления преобразуемых воздействий (входных параметров ФО);

- вторая группа – ФЭ, связанные с модификацией результата воздействия по отношению к воздействию без преобразования одного вида энергии в другой и используемые для согласования результата воздействия и воздействия у двух взаимосвязанных ФЭ. При этом результат воздействия и само воздействие являются разновидностями одного физического поля и различаются лишь характеристиками. Кроме того, они могут использоваться для модификации характеристики результата воздействия у конечного ФЭ в цепочке преобразований или характеристики воздействия у первого ФЭ;

- третья группа – ФЭ, связанные с преобразованием одного вида энергии в другой. Следует отметить, что в природе не может быть физического поля, которое не имело бы взаимосвязей с другими полями посредством ФЭ. Несмотря на небольшое число известных в настоящее время видов энергии, данная группа ФЭ довольно многочисленна, что определяется большим количеством модификаций эффектов. Поэтому ФЭ этой группы являются наиболее сложными по своей физической структуре. Проявление ФЭ, обеспечивающих преобразование одних физических полей в другие, обуславливается наличием в составе физических объектов двух типов структурных элементов: структурных элементов, взаимодействующих с внешним воздействием, и структурных элементов, обладающих физическим полем, соответствующим результату воздействия. Преобразования как такового одного

физического поля в другое не происходит, а осуществляется лишь передача энергии одного физического поля через соответствующие структурные элементы другим структурным элементам-носителям другого физического поля, т.е. фактически происходят изменения во взаимосвязях между структурными элементами;

- четвертая группа – ФЭ, связанные с преобразованием ФО, которое может проявляться в следующем: 1 – изменение физических свойств (прозрачность, текучесть, температура, намагниченность и т. д.); 2 – изменение структуры (кристаллизация, переход от одной кристаллической структуры к другой, преобразование одних химических соединений в другие и т. п.); 3 – изменение агрегатного состояния (плавление, конденсация, сублимация, испарение и т. д.); 4 – изменение состава структурных элементов (деление и синтез молекул, атомов, ядер атомов и др.); 4 – изменение ФО может быть дискретным (замена одного ФО на другой) и непрерывным (изменение концентрации растворов, давления газов, состава газов и т. п.).

Следует отметить, что изменение свойств ФО влияет, в свою очередь, на проявление других ФЭ на этом же ФО.

Кроме того, известно, что модель любого ФЭ характеризует прежде всего зависимость результата воздействия (эффекта) от самого воздействия и должна удовлетворять следующим требованиям: 1 – отражать условия взаимосвязи ФЭ друг с другом; 2 – давать количественную характеристику проявления ФЭ; 3 – обеспечивать описание процесса проявления ФЭ во времени: переходные процессы (наложение воздействия, снятие воздействия) и установившийся процесс; 4 – быть пригодной для использования в инженерной практике, в частности при проектировании; 5 – обеспечивать определение результатов воздействий при заданных воздействиях, значениях варьируемых параметров физического объекта, временных характеристик [4].

Исходя из этого, в общем случае модель ФЭ можно представить в следующем виде:

$$c_i = F(A_{\text{осн}}, A_{\text{доп}}, \{b_1, b_2, \dots, b_n\}, t),$$

где $A_{\text{осн}}$, $A_{\text{доп}}$ – параметры основного и дополнительного воздействий; $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ – кортеж параметров физического объекта B ; c_i – параметры i -го результата воздействия; t – время, характеризующее проявление ФЭ.

В рассматриваемом случае под основным воздействием на ФО понимается такое воздействие, результат от которого представляет другое, отличное от воздействия, физическое поле, а под дополнительным воздействием – такое, которое приводит лишь к количественному изменению результата, получаемого от основного воздействия. Дополнительными воздействиями могут являться постоянно действующие воздействия, например гравитационное и тепловое поля, а также воздействия, оказываемые объектами окружающей среды.

Модель ФЭ позволяет представить обобщенную схему ФЭ (рис. 3).

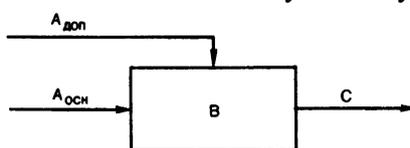


Рисунок 3. Обобщенная схема ФЭ

В настоящее время для многих ФЭ не известны строгие математические зависимости между воздействием и результатом воздействия. В этом случае следует использовать эмпирические зависимости, либо экспериментальные данные.

Для определения различных c_i необходимо использовать разные модели ФЭ. При этом изменяемыми параметрами модели будут кортежи варьируемых параметров объекта B .

Модель ФЭ может изменяться при переходе от одного класса объектов на другой. Изменение также будет связано с изменением кортежа $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$.

Из модели ФЭ следует, что результат воздействия c_i зависит от веществ и материалов, из которых состоит рассматриваемый ФО.

Как указывалось ранее, ФО в большинстве случаев представляют собой сложные иерархические системы, характеризующиеся множеством структурных элементов и связей между ними. Поэтому функционирование таких объектов основывается на проявлении множества взаимосвязанных ФЭ.

Существуют следующие условия взаимосвязи ФЭ [4]:

1. $C_n \cap A_{n+1}$, где $C_n = \{c_i\}_{i \in I}$ – множество результатов воздействия n -го ФЭ, I – число номеров наименований результатов воздействия n -го ФЭ; $A_{n+1} = \{a_j\}_{j \in J}$ – множество воздействий $(n+1)$ -го ФЭ, J – число номеров наименований воздействий $(n+1)$ -го ФЭ.

При этом должно выполняться следующее условие:

$$d_{c_i}^{\gamma_i} \cap d_{a_j}^{\lambda_j} \neq 0,$$

где $d_{c_i}^{\gamma_i}$ – значение результата воздействия c_i n -го ФЭ; $d_{a_j}^{\lambda_j}$ – значение воздействия a_j $(n+1)$ -го ФЭ; γ_i – множество номеров материалов, на которых проявляется c_i результатов воздействия; λ_j – множество номеров материалов, на которые оказывается воздействие a_j .

2. $\{b_1, b_2, \dots, b_k\}_{\Phi \mathcal{E}_n} \cap \{b_1, b_2, \dots, b_p\}_{\Phi \mathcal{E}_m}$, где $\{b_1, b_2, \dots, b_k\}$ – множество параметров объекта, на котором проявляется ФЭ $_n$; $\{b_1, b_2, \dots, b_p\}$ – множество параметров того же объекта, на котором проявляется ФЭ $_p$.

В этом случае изменение параметров, входящих в область пересечения, должно влиять на проявление хотя бы одного c_i для ФЭ $_n$ или ФЭ $_p$.

Ввиду различия моделей у ФЭ $_n$ и ФЭ $_p$ кортежи параметров, входящих в эти модели, будут различаться. Принимая во внимание, что ФЭ, как правило, имеют несколько c_i и могут зависеть от ряда $A_{\text{доп}}$ можно использовать соответствующие варианты построения сложных структур взаимосвязанных ФЭ, обеспечивающих реализацию ФО с несколькими входами и выходами, с обратными связями, с использованием комплексов ФЭ для реализации часто встречающихся функций. Совокупность таких ФЭ фактически является физической схемой объекта (ФСО), которая дает представление о том, какие заданные входные параметры ФО преобразуются в ожидаемые выходные параметры.

В связи с тем, что элементами ФСО являются структурные составляющие ФО, на которых проявляются ФЭ, то взаимосвязи между элементами ФСО будут характеризовать типы преобразований физических величин. При этом само преобразование заданного воздействия в ожидаемый конечный результат будет являться рабочей функцией ФО.

В этом случае под результатами воздействия понимаются те эффекты, которые проявляются на ФО или в окружающем их пространстве. Результатами воздействия являются те же физические поля, которые относятся к воздействиям, что, в конечном счете, и обуславливает взаимосвязь между ФЭ.

Одним из основных вопросов, который требует особого внимания, является учет основных четырех закономерностей проявления результатов воздействий: 1 – при одном воздействии на объект может проявляться несколько различных результатов воздействия одновременно, количество которых зависит от структуры физического объекта; 2 – величина результата воздействия может регулироваться; 3 – при постоянстве условий воздействия и свойств физического объекта проявляются одни и те же

результаты воздействия, одни и те же значения их параметров, что обуславливается стабильностью структуры ФО, на который оказывается воздействие, и стабильностью свойств элементов его структуры; 4 – инерция в появлении результата воздействия и в его проявлении, которая определяется невозможностью мгновенной передачи действия одного тела на другое (постулат Максвелла) и связана с теми процессами, которые происходят при энергообмене между структурными элементами ФО.

Известно, что разнообразие процессов и явлений, которые происходят в природе, обусловлено, по современным данным, четырьмя типами взаимодействий: всемирным тяготением, электромагнитными, ядерными и слабыми взаимодействиями. Причем каждому типу взаимодействия соответствуют определенные физические поля, каждое из которых, в свою очередь, имеет ряд модификаций или характеристик, обуславливающих особенности взаимодействия материальных объектов. Так, например, электрическое поле может быть статическим, переменным, вихревым и т. д. Все это в целом и создает необходимые условия для проявления большого количества разнообразных ФЭ.

Обобщая, можно констатировать, что в рассматриваемом типе ФО особое место занимают межэлементные контактные явления, которые проявляются сложными дополнительными контактными структурами (КС), обладающими омическими свойствами.

В КС картина переноса носителей заряда отличается повышенной сложностью. Известно, что проводимость контактирующих сред может быть: металлической, полупроводниковой (квазиметаллической), холодной эмиссии, термоэмиссии, газового разряда, электрохимической, термо-э.д.с. и др.

Все перечисленные виды проводимостей (в зависимости от внешних и внутренних условий) в той или иной степени участвуют в формировании свойств КС.

При этом подобные КС, как правило, не обладают свойствами линейности и заметно искажают переизлученный сигнал. Контролируя омические КС по уровню нелинейности, можно выявить и идентифицировать ряд пространственно распределенных структурных элементов ФО, связанных между собой большим числом дополнительных КС.

Сложная и многообразная картина физики контактных явлений может быть раскрыта путем измерений нелинейных искажений специальных испытательных сигналов, используемых в процессе сканирования ФО.

Сущность способа контроля нелинейности, применяемого для идентификации пространственно распределенных структурных пассивных элементов (СПЭ), основана на свойстве нелинейности передаточной характеристики условного ФО создавать, кроме основного сигнала, еще и побочные физические факторы [5].

Известно, что если статическая функция преобразования (СФП) выражается степенным рядом входного напряжения

$$U_{\text{вых}} = a_1 U_{\text{вх}} + a_2 U_{\text{вх}}^2 + a_3 U_{\text{вх}}^3 + \dots,$$

то, воздействуя на передаточную характеристику синусоидальным сигналом $U_{\text{вх}} = E \sin \omega t$, можно получить основной сигнал с частотой ω , гармоники 2ω , 3ω , ... и постоянную составляющую A_0 :

$$U_{\text{вых}} = A_0 + A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + A_3 \sin 3\omega t + \dots$$

Измеряя постоянную составляющую гармоник или суммарную мощность результатов искажения, можно получить представление о передаточной характеристике ФО.

В случае воздействия двухчастотным сигналом на передаточную характеристику ФО мы получим, кроме основных частот ω_1 и ω_2 дополнительные колебания, которые будут гармониками основных частот (комбинационными продуктами различных

порядков), а также постоянную составляющую:

$$U_{\text{вых}} = A_0 + A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t + A_3 \sin 2\omega_1 t + A_4 \sin 2\omega_2 t + A_5 \sin 3\omega_1 t + A_6 \sin 3\omega_2 t + \\ + A_7 \sin(\omega_1 - \omega_2)t + A_8 \sin(\omega_1 + \omega_2)t + A_9 \sin 2(\omega_1 - \omega_2)t + A_{10} \sin 2(\omega_1 + \omega_2)t + \dots$$

Можно также воздействовать на нелинейный ФО широкополосным «белым шумом». По измерениям в узкой полосе, свободной от зондирующего сигнала, мощности переизлученного сигнала определяют степень нелинейности передаточной характеристики ФО. Измерения, проводимые таким способом, будут наиболее достоверными, т.к. они отражают все свойства нелинейного ФО (амплитудно-частотные, фазовые и другие соотношения).

Иными словами, если через КС, обладающую нелинейной вольт-амперной характеристикой, условно пропускать синусоидальный ток (ток Фуко), то вторичное электромагнитное поле, которое переизлучится данной КС, будет содержать гармонические составляющие основной частоты. Можно рассматривать только одну из всех гармоник, поскольку каждая из них является мерой нелинейности. Предлагается использовать третью гармонику, поскольку она при симметричной вольт-амперной характеристике нелинейного КС имеет наибольшую величину. Если увеличивается ток, то соответственно увеличивается плотность тока через КС и напряжение третьей гармоники будет возрастать пропорционально размерам КС.

Измеряя селективно напряжение третьей гармоники, можно подсчитать уровень нелинейности вольт-амперной характеристики КС и тем самым идентифицировать структурные компоненты (СК) ФО.

Обобщая, можно констатировать, что, зная уровень нелинейности того или иного возможного КС ФО в момент сканирования, существует возможность определения наличия конкретных СК в исследуемом ФО. Для этого необходимо выбрать критический уровень нелинейности, характерный для данного класса СК, и на основании этого осуществлять их идентификацию в процессе реализации исследовательских работ.

Как уже отмечалось выше, идентификация СК ФО осуществляется по степени отклонения вольт-амперных характеристик соответствующих КС от омических. Поэтому целесообразно рассматривать преобразование спектра испытательного сигнала на КС и производить идентификацию СК по их нелинейным искажениям.

Считая, что КС в ФО обладают как бы свойствами нелинейного резистора, при анализе частотных спектров можно пренебречь переходными процессами на СК.

В этом случае вольт-амперную характеристику ФО с учетом КС в общем случае можно определить как

$$i_{\text{неп}}(t) = i[\psi(t)]. \quad (1)$$

В качестве примера рассмотрим воздействие гармонического сигнала вида

$$v(t) = v_0 \cos(\Omega t + \psi) \quad (2)$$

на линейную безынерционную цепь.

Для этой цели разложим $i[\psi(t)]$ по степеням $\psi(t)$ в точке $v=0$. В этом случае

$$i_{\text{неп}}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n v_n(t), \text{ где } b_n = \left. \frac{\partial^n i(t)}{\partial v^n(t)} \right|_{v(t)=0}. \quad (3)$$

Используя соотношение Эйлера, можем записать:

$$v(t) = \frac{1}{2} v_0 [e^{j(\Omega t + \psi)} + e^{-j(\Omega t + \psi)}].$$

Тогда выражение (3) может быть представлено в виде:

$$i_{неф}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \frac{1}{2^n} b_n v_0^n e^{j(\Omega t + \psi)(n-2k)} C_n^k, \text{ где } C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (4)$$

Положим $(n-2k)=\alpha$, тогда выражение (4) принимает вид:

$$i_{неф}(t) = \frac{1}{2} h_0 + \sum_{\alpha=1}^{\infty} h_{\alpha} \cos \alpha(\Omega t + \psi), \text{ где } h_{\alpha} = \sum_{n \geq \alpha} \frac{v_0^n}{2^{n-1}} b_n C_0^{\frac{n-\alpha}{2}} \cos^2 \left[\frac{\pi(n+\alpha)}{2} \right]. \quad (5)$$

При расчете коэффициентов h_m для вычислений $C_n^{\frac{n-\alpha}{2}}$ может быть использована формула Стирлинга

$$n! \approx n^{n-\frac{1}{2}} e^{-n} \sqrt{2\pi} \left(1 + \frac{1}{12n} + \frac{1}{288n^2} + \dots \right), \quad (6)$$

$$C_n^{\frac{n-\alpha}{2}} \approx \frac{\sqrt{2\pi} n^n \left(1 + \frac{1}{12n} \right) 2^{\frac{n-\alpha}{2}}}{\alpha^n (n-\alpha)^{\frac{n-\alpha}{2}} \left(1 + \frac{1}{12\alpha} + \frac{1}{6(n-\alpha)} \right)}. \quad (7)$$

Полученные выражения (5), (6) и (7) свидетельствуют о том, что при воздействии гармонического колебания на нелинейную безынерционную цепь выходной сигнал представляет собой неэлементарную периодическую функцию, составляющими которой являются ее гармоники, причем номер самой высокой гармоники совпадает с наибольшим показателем степени полинома.

Наблюдается следующая закономерность: все четные гармоники выходного сигнала обусловлены наличием в полиноме членов с четными степенями, а все нечетные – наличием членов полинома с нечетными степенями.

При малых значениях амплитуды v_0 испытательного сигнала можно пренебречь членами ряда, содержащих v_0 в степени m , тогда приближенное значение амплитуды гармоники с номером m равно:

$$h_m \approx \frac{1}{2^{m-1}} b_m v_0^m$$

Очевидно, что при этом амплитуда m -й гармоники пропорциональна m -й степени амплитуды испытательного сигнала.

При воздействии на КС испытательного сигнала в результате нелинейного преобразования кроме гармонических составляющих сигнала всегда появляются дополнительные спектральные составляющие, вследствие чего форма сигнала на выходе искажается. Для количественной оценки нелинейных искажений используют различные критерии-коэффициенты.

Иногда коэффициент нелинейных искажений определяют как отношение корня квадратного из суммы квадратов амплитуд всех паразитных гармоник преобразования к среднеквадратическому значению испытательного сигнала.

Частным случаем коэффициента нелинейных искажений является коэффициент гармоник:

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{v=0}^{\infty} h_v^2}}{h_0}. \quad (8)$$

Естественно, что критерий (8) применим только для случая чисто гармонического испытательного сигнала.

Нелинейные передаточные характеристики при гармоническом испытательном сигнале часто выражают через среднеквадратическое значение входного сигнала и

значение основной частоты на выходе:

$$\rho = \frac{\sqrt{2}\tilde{U}_1}{U_{0_1}}.$$

В общем случае входной испытательный сигнал формализуем в следующем виде:

$$U(t) = \sum_{i=0}^n U_{0_i} \cos(\Omega_i t + \psi_i).$$

Напряжение $U(t)$ на некотором участке испытываемой платы можно представить выражением:

$$U(t) = \sum_{j=0}^m \tilde{U}_{0_j} \cos(\Omega_j t + \psi_j).$$

Тогда для случая отсутствия явно выраженных КС в ФО будут верны соотношения:

$$n=m_3; U_{0_i} = U'_{0_i} k; K\psi_i = \psi'_i$$

При этом множества $\{i\}$ и $\{j\}$ являются совпадающими, т.е. $\{i\}/\{j\} \equiv 0$.

Например, выберем в качестве опорной реализации испытательный сигнал вида:

$$U'_n(t) = \sum_{i=0}^n U'_{0_i} k_i \cos(\Omega_i t + \psi_i).$$

В случае нелинейных искажений множества $\{i\}$ и $\{j\}$ уже не будут совпадать. В составе напряжения $U(t)$ появятся гармоники с номерами, отличными от номеров гармоник испытательного сигнала, т. е.

$$\{i\}/\{j\} \neq 0.$$

Естественно, что производить идентификация СК ФО при нелинейных искажениях необходимо по мерам гармоник, входящим в множество $\{\alpha\}$, где

$$\{\alpha\} = \{i\}/\{j\},$$

т.е. по тем номерам гармоник, которые отсутствуют в опорной реализации с большей вероятностью.

Исходя из вышеизложенного, в качестве адекватного критерия может быть рекомендован критерий, представленный в виде:

$$R = 10 \lg \frac{\sum_{j \in \{\alpha\}} U_{0_j}^2}{\sum_{i=0}^n U_{0_i}^2 k_i^2} = 10 \lg \frac{S}{\tilde{U}_n^2}. \quad (9)$$

Оценка нелинейных искажений по критерию (9) будет эквивалентна оценке по критерию коэффициента гармоник (8).

Обобщая, можно констатировать, что суть эффекта нелинейного рассеяния зондирующего электромагнитного излучения исследуемым контролируемым ФО заключается в том, что некоторые ФО или их структурные элементы при облучении электромагнитными волнами обладают способностью генерировать спектральные составляющие, отсутствующие в спектре падающего потока электромагнитного излучения.

В большинстве случаев рассматриваемый класс ФО проявляет незначительные нелинейные свойства, что существенно ограничивает возможности нелинейной радиолокации при решении задач малоглубинной геофизики.

В связи с этим особый интерес представляет собой вопрос учета нелинейности в условиях переменного намагничивания ферромагнитных тел, суть которого заключается в существовании следующего нелинейного эффекта: глубинный дефект в ферромагнитном

теле, не выявляющийся при намагничении последнего слабым переменным полем из-за сильно выраженного скин-эффекта и незначительной величины поля, начинает четко обнаруживаться индукционными датчиками, если дополнительно наложить на тело достаточно сильное постоянное магнитное поле.

На базе этого эффекта возможна реализация метода выявления скрытых дефектов, заключающегося в том, что скрытый дефект в ферромагнитном изделии может быть выявлен при помощи преобразователя переменного магнитного поля (электромагнитный преобразователь), если это изделие внести в достаточно сильное постоянное магнитное поле.

Из анализа данного эффекта следует вывод о том, что усиление нелинейных отражающих свойств гетерогенного ФО возможно за счет использования параметрических эффектов, вызванных различными возбуждающими физическими полями, в качестве которых целесообразно выбирать те, у которых удельные потери при прохождении через слой укрывающей среды минимальны.

Известно, что электрические цепи, в которых хотя бы один из параметров изменяется по какому-либо заданному закону, называются параметрическими. Рассеянное, например, объектом поиска электромагнитное поле может отличаться от падающего своими параметрами: амплитудой, фазой, частотой и поляризацией.

Такой активный метод обнаружения объектов, основанный на регистрации изменения параметров зондирующего поля за счет облучения этих объектов дополнительным возбуждающим полем (акустическим, СВЧ-электромагнитным, лазерным и др.), можно считать параметрической локацией.

Под воздействием дополнительного возбуждающего поля (акустического, лазерного и др.) эти параметры могут изменяться во времени и пространстве. Закон изменения этих параметров будет определяться, прежде всего, характеристиками возбуждающего поля (плотностью потока мощности, частотой и др.).

В параметрической локации возбуждающий сигнал “окрашивает” зондирующий сигнал при его отражении от объекта поиска искусственного происхождения. “Окраска” заключается в придании ему характерных амплитудных, частотно-временных и поляризационных признаков, которые могут затем быть выявлены в приемном устройстве поисковой системы

Необходимо отметить наличие значительного количества возможных сочетаний зондирующих и возбуждающих физических полей. Выбор той или иной комбинации должен осуществляться с учетом многих факторов: наличия априорной информации об особенностях устройства объектов поиска, характеристик окружающего фона, требуемой дальности обнаружения и др.

Возможные варианты сочетаний зондирующих и возбуждающих физических полей представлены на рис. 4.

Следует отметить, что многие из существующих вариантов параметрической локации основаны на физических эффектах, известных в технике как “вредные”. Например, механические вибрации цели (самолетов, танков и др.) вызывают “шум цели”, которые ухудшают поисковые характеристики РЛС, особенно когерентных; эффект кросс-модуляции рассматривается как “вредный”, создающий взаимные помехи между соседними каналами связи; возбуждение электронно-оптических приборов наблюдения и целеуказания лазерным излучением часто приводит к их “ослеплению” и т.п.

Управление всеми этими эффектами, прежде всего за счет выбора оптимальных параметров (энергетических, временных, частотных и др.) возбуждающего поля позволяет превратить их из “вредных” в “полезные” и использовать в целях локации подповерхностных объектов различного происхождения.

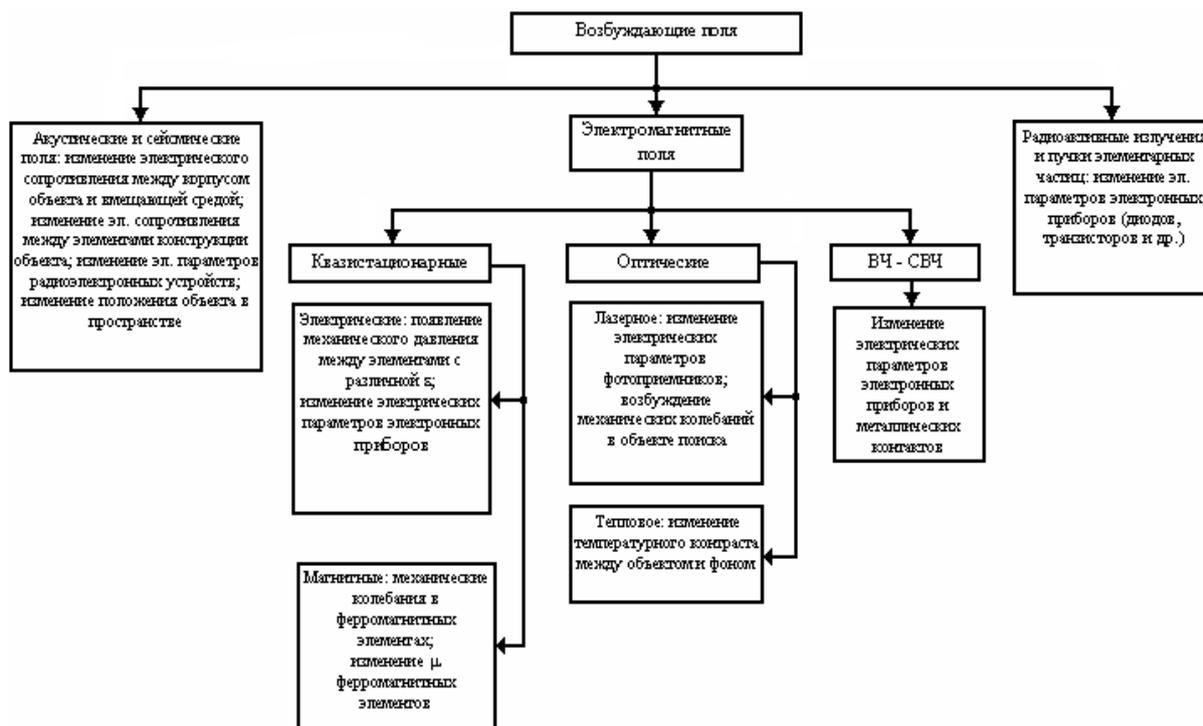


Рисунок 4. Варианты сочетаний зондирующих и возбуждающих физических полей

Сам параметрический процесс формирования вторичного сигнала может быть как линейным, так и нелинейным.

Первый случай имеет место, например, при рассеянии СВЧ-электромагнитного поля вибрирующим объектом поиска за счет дополнительного его облучения мощным акустическим полем, а второй – при рассеянии СВЧ-поля возбуждаемым нелинейным объектом на гармониках. Возбуждение нелинейных элементов объекта поиска может при этом осуществляться электромагнитным полем ДВ-, СВ-, КВ-диапазонов, что приводит к соответствующему изменению исходных характеристик всего ФО.

Анализ ситуации в области нелинейной и параметрической локализации полупроводящих сред применительно к решению задачи малоглубинной геофизики показывает, что ресурсы электромагнитного поля используются не в полной мере.

Очевидно, что использование параметрического возбуждающего поля наряду с основным зондирующим позволит заметно улучшить поисковые характеристики приборов нелинейной радиолокации.

Качественный скачок в исследованиях рассматриваемого класса ФО может быть достигнут путем использования нового нелинейно-параметрического метода, основанного на усилении нелинейных свойств ФО за счет дополнительного воздействия на ФО постоянным электрическим полем при его зондировании переменным электрическим полем, т.е. основанного по аналогии с вышерассмотренным эффектом (рис.5) [6].

В этом случае на несимметричный горизонтальный электрический диполь одновременно подается напряжение смещения U_0 и переменное напряжение U_ω , которые создают в окружающем пространстве соответственно зондирующее переменное электрическое поле определенной частоты E_ω и возбуждающее постоянное электрическое поле E_0 .

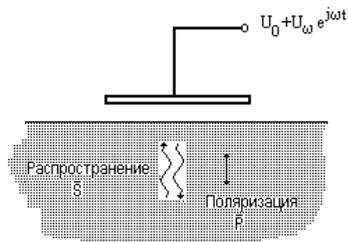


Рисунок 5. Метод нелинейно-параметрического метода локации

В результате воздействия этих двух физических полей на ФО (геофизическая среда) в нем возникает продольная ультразвуковая волна S , которая инициирует в ФО изменение его диэлектрических, электрооптических, упругих, пьезоэлектрических и/или магнитоупругих параметров.

Подобный нелинейно-параметрический метод, реализуемый посредством электростатического преобразователя, ориентирован на резонансные свойства ФО и с физической точки зрения объясняется в основном возникновением сложно-взаимосвязанных электро- и магнитоупругих эффектов на КС ФО, что, в свою очередь, обеспечивает усиление нелинейных свойств ФО.

В этом случае происходит образование связанных магнитоупругих волн, под действием которых рождается, по крайней мере локально, макроскопически большое число возбуждений, приводящих к образованию нелинейных волн различного вида, включая и периодические нелинейные волны.

Данная идея нелинейно-параметрической локации является логическим продолжением методов нелинейной и параметрической радиолокации, позволяющая существенно расширить круг обнаруживаемых объектов, и может быть положена в основу новых перспективных бесконтактных радиоволновых методов, не требующих прокладки кабелей, применения заглубленных специальных электродов и мощных генераторных установок.

Литература

1. Брякин, И.В. Концепция применения малоглубинной геофизики // Проблемы автоматизации и управления. – 2013. № 2 (25). – С. 91–101.
2. Брякин, И.В. Прикладные аспекты малоглубинной магниторазведки // Проблемы автоматизации и управления. – 2016. № 1 (30) С. 65 – 67.
3. Черняк, Г.Я., Мясковский, О.М. Радиоволновые методы исследований в гидрогеологии и инженерной геологии. – М.: Недра, 1973. 176 с.
4. Лукьянец, В.А., Алмазова, З.И. и др. Физические эффекты в машиностроении – М.: Машиностроение. 1993. – 224 с.
5. Петров, Б.М. Эффект нелинейного рассеяния. – Таганрог: ТРТУ, 1997. – 202 с.
6. Брякин, И.В. Комбинированный антенный блок для георадаров // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. № 2 (29). – С. 64–74.