

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра геофизики

Э.С. Шестаков

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

**Учебное пособие
для студентов геологических факультетов,
обучающихся по специальности 020 302 «Геофизика»**

Саратов
2013 г.

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	5
2. ОСНОВЫ ЧАСТОТНОЙ ТЕОРИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	10
3. ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	16
3.1. Коэффициент направленного действия и его свойства	16
3.2. Расчет КНД интерференционных систем	19
3.3. Анализ характеристик интерференционных систем по графикам КНД.....	22
4. РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	27
4.1 Группирование источников и приёмников упругих колебаний	27
4.2. Лабораторные интерференционные системы с постоянными во времени, линейными по пространственным координатам искусственными задержками. Метод регулируемого направленного приёма сейсмических колебаний.....	30
4.3 Лабораторные интерференционные системы с переменными во времени, нелинейными по пространственным координатам искусственными задержками. Способ общей средней точки	33

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что регистрируемая в сейсморазведке информация может быть условно (в соответствии с условиями конкретной задачи) разделена на полезную и помехи. Полезная информация представляет из себя запись регулярных волн, образовавшихся на исследуемых границах. Помехи в свою очередь могут быть как регулярными, так и нерегулярными (случайными). Понятие случайной волны также является условным. Под ними следует понимать регулярные волны, запаздывания одноименных фаз которых в соседних точках регистрации превышают радиус их корреляции.

Известно также, что полезная является лишь весьма небольшой частью общего объема информации, регистрируемой на сейсмограммах. Поэтому задача выделения и интерпретации ее является основной задачей сейсморазведки. Основой выделения полезной информации может служить ее регулярность, другими словами – априорное знание характера распределения полезных сигналов во времени - пространстве. Характер распределения описывается функциональной зависимостью вида $t = t(x, y, z)$, где x, y, z , -- пространственные координаты точки регистрации. Эта зависимость характеризует кинематические особенности (характеристики) волны.

Разделение полей полезных волн и волн-помех по V^* (т.е. выделение полезных и подавление помех) осуществляется так называемыми *интерференционными системами* (ИС), основанными, главным образом, на суммировании сейсмических колебаний, зарегистрированных в разных точках пространства, с учетом кинематических характеристик выделяемых и подавляемых волн. При этом обеспечивается синфазное сложение выделяемых колебаний и несинфазное – подавляемых.

Количественное описание свойств таких систем дается в рамках их теории. В настоящее время получили распространение частотная и энергетическая теории интерференционных систем. Первая рассматривает процесс суммирования сейсмических колебаний в пространственно-частотной области. Она весьма удобна для анализа свойств конкретных систем и позволяет; единообразно описывать многие процедуры регистрации и обработки сейсмической информации. Энергетическая теория описывает процесс суммирования в более привычной пространственно-временной области и несколько удобнее для синтеза интерференционных систем. Между обеими теориями в идеальном случае могут быть установлены количественные соотношения.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

Теория интерференционных систем описывает интерференции сейсмических волн при распространении их в среде или интерференцию сигналов, порожденных ими. Ввиду того, что реальные среды и определяемые ими волновые поля очень сложны, теория рассматривает поле идеально-регулярных волн.

Под идеально-регулярными волнами понимаются плоские волны, распространяющиеся в бесконечном полупространстве без затухания.

Сигналы, вызываемые ими в разных точках пространства, отличается лишь параметром времени. Однако при описании сложных интерференционных систем, примером которых может служить способ общей глубинной точки, возникает необходимость усложнения как модели среды, так и волнового поля: предполагается, что сферические волны распространяются в среде, аппроксимируемой среднескоростной моделью, без затухания. На форму же сигналов сейсмического импульса существенных ограничений не накладывается. Из всего сказанного выше видно, что этот подход является расширением лучевого представления волнового поля.

Под интерференционной системой будем понимать систему суммирующую некоторую совокупность сигналов, поступающую на ее входы.

Такой совокупностью может быть система сейсмических волн, подходящих к сейсмоприемнику, совокупность сигналов от нескольких сейсмоприемников, суммирующаяся на входе сейсмического усилителя, совокупность отсчетов с нескольких файлов записи, суммируемая интерференционной системой. В первом случае в качестве интерференционной системы может выступать и группа источников сейсмических колебаний в сочетании со средой их распространения, где волны, вызываемые каждым из источников, распространяются в соответствии с принципом суперпозиции.. Суммирующим элементом в этом случае является сейсмоприемник.

Интерференционные системы можно подразделить на *дискретные* - обладающие конечным количеством входов с чувствительностью μ_i , где i - номер входа, и *непрерывные*, имеющие бесконечное количество входов, с плотностью распределения чувствительности μ'_x , где x - координата входа системы. Непрерывные интерференционные системы были лишь полезной абстракцией до появления непрерывных источников колебаний типа линий детонирующего шнура.

Независимо от природы интерференционной системы, как правило, ее можно свести к совокупности входов (источников сигналов), располагающихся на плоскости наблюдения, каждый из которых может быть охарактеризован координатами, определенными на этой плоскости, и чувствительностью (интенсивностью). По характеру расположения входов на плоскости наблюдения интерференционные системы можно подразделить на *линейные*, где входы располагаются вдоль некоторой линии, и *площадные*.

В зависимости от характера распределения; чувствительности можно рассматривать *однородные* системы, где чувствительность не зависит от координат входа, и *неоднородные*.

В дискретных линейных интерференционных системах кроме того выделяют *равномерные*, где расстояние между соседними входами является величиной постоянной, и *неравномерные*.

Под *базой* интерференционной системы по некоторому направлению α на плоскости наблюдения (D_α) - см. рис. 1 - расстояние между максимально удаленными друг от друга проекциями входов интерференционной системы на это направление.

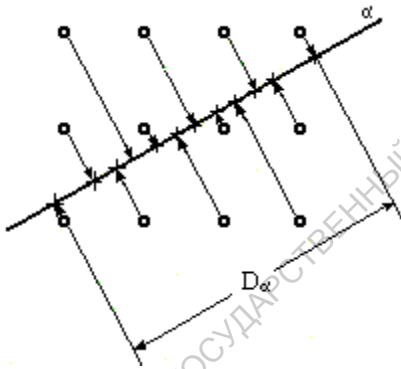


Рис.1 База интерференционной системы по направлению.

- α – направление на плоскости наблюдения ;
- – входы интерференционной системы;
- +
- проекции входов на направление α

В линейных интерференционных системах под базой группы обычно понимают расстояние между крайними входами этой системы (D). Для дискретных линейных систем справедливо равенство:

$$D = \sum_{i=1}^{n-1} d(i, i+1) \quad (1)$$

где $d(i, i+1)$ – расстояние между i – тым и $i+1$ входами системы, n - количество элементов в системе.

В линейных равномерных группах:

$$D = (n-1) \cdot d \quad (2)$$

Необходимая степень подавления волны-помехи, интерферирующей с полезными волнами, может быть выражена

$$B = a \frac{A_{\text{пом}}}{A_{\text{пол(мин)}}} \quad (3)$$

где B – необходимая степень ослабления волны-помехи;
 $A_{\text{пом}}$ – среднее значение амплитуды волны-помехи;
 $A_{\text{пол(мин)}}$ – среднее значение амплитуды самой слабой полезной волны, интерферирующей с рассматриваемой помехой;
 a – коэффициент, определяемый требуемым качеством ослабления волны-помехи (при $a=2 \div 3$ – ослабление удовлетворительное, при $a = 8 \div 10$ – хорошее).

В начале рассмотрения основ теории интерференционных систем ограничимся случаем распространения плоских волн в однородной среде типа "полупространство". Реальные волны могут, быть аппроксимированы подобным образом лишь на ограниченных участках областей их существования, а именно там, где квазисферические волновые фронты незначительно отклоняются от аппроксимирующих плоскостей. По мере усложнения задач, стоявших перед интерференционными системами, будем усложнять как волновое поле, так и рассматриваемые модели сред.

Предположим, что некоторая волна на плоскости наблюдения, описываемой уравнением $z=0$, в точке с координатами $(x=0, y=0)$ создает сигнал $f(t)$. Тогда в произвольной точке (x, y) сигнал можно представить как:

$$f_{x,y}(t) = f(t + \Delta t) \quad (4)$$

$$\text{где } \Delta t = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{V^*},$$

V^* – кажущаяся скорость этой волны ($V^* = \text{const}(x, y)$ в силу того, что фронт рассматриваемой волны - плоский).

Сигнал на выходе пространственной непрерывной системы определится равенством:

$$f_{\text{вых}}(t) = \int_G \mu'(x, y) f(t + \Delta t) dx dy \quad (5)$$

где G – площадь, занимаемая интерференционной системой на плоскости наблюдения;

$\mu'(x, y)$ – плотность распределения чувствительности внутри этой площади.

Для дискретной интерференционной системы выражение (5) преобразуется к виду:

$$f_{\text{вблх}}(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i f(t + \Delta t_i) \quad (6)$$

где $\Delta t_i = \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{V^*}$

μ_i – чувствительность i -того входа системы ($1 \leq i \leq n$, где n – количество входов).

Для линейных систем, ориентированных по оси абсцисс, выражения (5) и (6) запишутся так:

$$f_{\text{вблх}}(t) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \mu'(x) f(t + \frac{x}{V^*}) dx \quad (7)$$

где x_{\min} , x_{\max} – координаты концов линейной системы;

$\mu'(x)$ – плотность распределения чувствительности при $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$;

$$f_{\text{вблх}}(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i f(t + \frac{x_i}{V^*}) \quad (8)$$

Для линейных равномерных систем равенство (8) можно записать:

$$f_{\text{вблх}}(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i f(t + \frac{d \cdot (i-1)}{V^*}) \quad (9)$$

где d – расстояние между соседними входами.

Согласно определению энергия сигнала выражается равенством:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt \quad (10)$$

Рассмотрим теорию интерференционных систем только в приложении к дискретным системам. Возможность такого ограничения основана на том, что формулы, справедливые для дискретного случая с помощью предельного перехода достаточно просто трансформируются для непрерывных систем. Кроме того, сами непрерывные интерференционные системы в настоящее время обладают ограниченными возможностями и представлены лишь непрерывным- источником на базе линий детонирующего шнура. У таких систем можно изменять лишь два параметра: мощность и величину базы, выбор которых для дискретного и непрерывного источника осуществляется совершенно одинаково.

Контрольные вопросы:

1. Что понимается под полезными волнами и помехами в сейсморазведке?
2. Что служит основой для разделения полезных волн и волн-помех?
3. На чём основано действие интерференционных систем (ИС)?
4. Что понимается под идеально-регулярной волной?
5. Что понимается под интерференционной системой?
6. Что понимается под дискретной ИС?
7. Какие реализации дискретных ИС вам известны?
8. Что понимается под непрерывной ИС?
9. Какие реализации непрерывных ИС вам известны?
10. Как делятся ИС по характеру расположения входов на поверхности наблюдения?
11. Как делятся ИС по характеру распределения чувствительности?
12. Что понимается под базой ИС?
13. Что понимается под базой ИС?
14. Чему равна база произвольной дискретной линейной ИС?
15. Чему равна база равномерной дискретной линейной ИС?
16. Чему равняется необходимая степень ослабления волны-помехи?
17. Каким выражением определяется запаздывание волны на входах произвольной дискретной ИС?
18. Каким выражением определяется сигнал на выходе произвольной непрерывной ИС?
19. Каким выражением определяется сигнал на выходе произвольной дискретной ИС?
20. Каким выражением определяется сигнал на выходе произвольной линейной дискретной ИС?
21. Каким выражением определяется сигнал на выходе дискретной линейной равномерной ИС?
22. Чему равняется энергия сигнала?

2. ОСНОВЫ ЧАСТОТНОЙ ТЕОРИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ

Пространственно-временная область

Пусть однородной изотропной идеально упругой среде (типа полупространство) распространяется идеально-регулярная волна со скоростью V . Пусть фронт этой волны составляет с плоскостью наблюдения угол α , т.е. кажущаяся скорость волны будет: $V^* = V/\sin \alpha$.

Пусть имеется линейная дискретная равномерная интерференционная система с нечетным количеством элементов $N = 2n + 1$ (где n – целое число) и шагом между соседними элементами, равным d . Пусть чувствительность i -того элемента системы будет μ_i , (здесь $-n \leq i \leq n$).

Пусть распространяющаяся волна достигает центрального приёмника ИС в момент t_0 и создает в нем импульсный сигнал, описываемый функцией $f_0(t)$. Тогда момент прихода волны к i -тому элементу системы будет $t_i = t_0 + \tau_i$, где $\tau_i = i(d/V^*) = i(d \cdot \sin \alpha / V) = i \cdot \Delta t$ (здесь Δt – запаздывание волны на интервале d).

Тогда сигнал, создаваемый в i -том элементе можно записать как:

$$f_i(t) = \mu_i f_0(t_0 - \tau_i) \quad (12),$$

а сигнал на выходе ИС, в соответствии с (6):

$$f_{\text{вых}}(t) = \quad (13)$$

Пространственно-частотная область

Пусть сигналу идеально-регулярной волны соответствует комплексный спектр $(f_0(t) \Leftrightarrow S_0(\omega))$, а сигналу соответствует комплексный спектр. Последний можно выразить через спектр сигнала, используя теорему запаздываний:

$$= \quad = \quad (14)$$

где $= \quad = \quad (15)$

В выражениях (14) и (15) – функция распределения чувствительности в ИС, а – комплексная частотная характеристика направленности ИС. Обе зависимости связаны парой Фурье-преобразований и можно выразить через как:

$$= \quad (16)$$

где m – номер гармоники, а ω_m – круговая частота m -ной гармоники.

Специфическая особенность зависимости состоит в том, что её аргументом является не ω и не Δt в отдельности, а их произведение:

$$\omega \cdot \Delta t = \quad = \quad = \quad = \quad = \quad = \quad = k^* d \quad (17)$$

здесь k (в некоторых источниках k_x) – волновое число или пространственная частота: $k = 2\pi / \lambda$

$k^* = -k_x$ – видимая (кажущаяся) пространственная частота.

Выражение (15) с учётом (17) можно переписать как:

$$= \dots \quad (18)$$

называется комплексной волновой характеристикой направленности и из (18) следует, что ИС осуществляют фильтрацию волнового поля по видимым пространственным частотам (волновым числам)

В частотной теории ИС комплексные частотные и волновые характеристики полностью отображают свойства интерференционных систем и поэтому являются целевыми функциями.

Во временной области действие ИС описывается выражением (13), представляющим собой свёртку сигнала $f_0(t)$ с функцией распределения чувствительности.

Свойства интерференционных систем рассмотрим на примере линейной равномерной однородной ИС.

В однородных ИС чувствительности всех элементов одинаковы:

, т.е. чувствительность всех элементов можно условно считать равной 1. Тогда равенство (15) преобразуется:

$$= \dots = \dots \quad (19)$$

Заменяя значения экспоненциальных функций тригонометрическими (по формуле Эйлера) и упрощая полученные выражения

получим:
$$\dots \quad (20)$$

или, в соответствии с равенством (17):
$$\dots \quad (20')$$

Т.О. конкретизация характеристик ИС позволила преобразовать выражения (15) и (18) из комплексной в действительную форму.

На основании выражения (20) были рассчитаны частотные характеристики направленности для системы из 9 элементов ($N = 9$) при различных значениях величины запаздывания волн (рис. 2 а). На основании выражения (20') для систем с $N = 5$ и $N = 9$ рассчитаны волновые характеристики направленности (рис. 2 б). На рис. 2а. по вертикальной оси, также как и на рис. 2 б., отложено отношение амплитуды сигнала на выходе интерференционной системы к максимальной возможной амплитуде того же сигнала на выходе той же системы (A/A_{\max}).

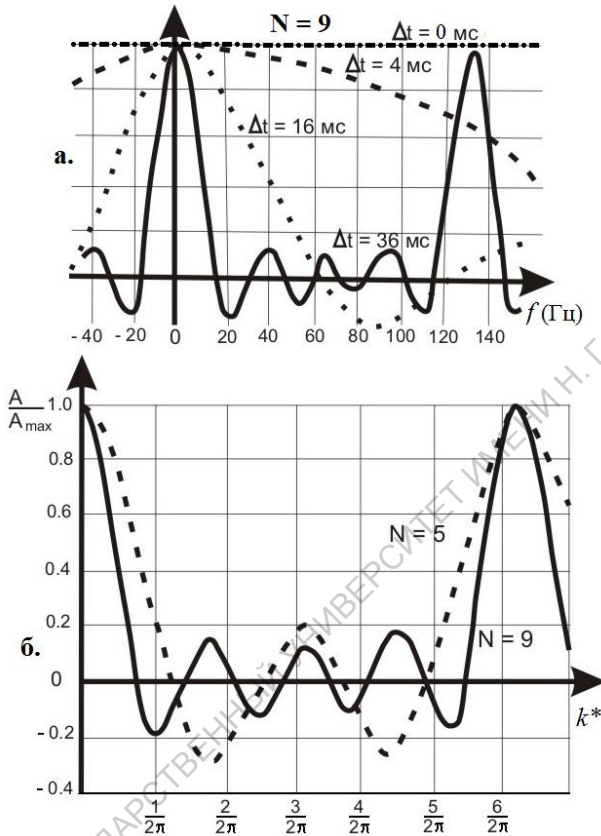


Рис. 2. Частотные (а.) и волновые (б.) характеристики направленности ИС.

Из анализа графиков на рис. 2 а. видно, что при $\Delta t = 0$ (такая ситуация возникает при параллельности фронта волны плоскости наблюдения ($V^* = \infty$) или когда все элементы системы находятся в одной точке) график представляет собой линию, параллельную оси абсцисс на уровне $A/A_{max} = \text{const}(f) = 1$ (штрих-пунктирная линия на рис. 2 а.). При возрастании запаздывания (уменьшение V^* и, соответственно, увеличение угла α) происходит сжатие графиков. При больших запаздываниях ($\Delta t = 36$ мс) видны два четко выраженных глобальных максимума приблизительно равной амплитуды (точное равенство будет иметь место при гармоническом входном сигнале). Это явление обусловлено дискретностью ИС и возникает при величине запаздывания Δt , кратной видимому периоду колебаний, т.е. побочные максимумы будут наблюдаться при $\Delta t = n \cdot T^*$ ($n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$).

Между глобальными максимумами имеет место область пониженных значений амплитуд выходного сигнала – полоса подавления (гашения, ПГ). Внутри ПГ наблюдаются побочные экстремумы функции. Количество локальных экстремумов в ПГ и их уровень зависят от количества элементов в системе (рис. 2 б. – чем больше N , тем больше число экстремумов и меньше их амплитуда)

Из сказанного выше следует, что для выбора параметров интерференционной системы с целью подавления регулярных волн-помех необходимо знать видимую частоту и кажущуюся скорость (для оценки Δt) волны-помехи и отношение амплитуд полезного сигнала и сигнала волны-помехи в зонах их интерференции (сигнал/помеха, $A_{\text{сигн}}/A_{\text{пом}}$, S/N) для определения необходимой степени ослабления помехи.

Соотношения (15) и (18) носят дифференциальный характер и позволяют оценить степень ослабления той или иной частотной компоненты сигнала. При выборе параметров интерференционных систем существенно большее значение имеет интегральная оценка ослабления (ослабление сигнала в целом). В частотной теории ИС в качестве интегральной оценки используется **коэффициент направленного действия (КНД)**:

Коэффициентом направленного действия (КНД) интерференционной системы будем называть отношение энергии сигнала некоторой волны на выходе интерференционной системы к максимально возможной энергии выходного сигнала той же волны в той же системе:

$$\text{КНД}(l) = \frac{E_l}{E_{l \max}} \quad (21)$$

Здесь E_l – энергия l -ной волны (с параметрами $f_{0,l}$ и V^*) на выходе некоторой интерференционной системы;

$E_{l \max}$ – максимальная энергия той же волны на выходе той же системы (определяется в предположении, что $V^* = \infty$).

Энергии волны E_l и $E_{l \max}$ можно вычислить на основании спектральных характеристик волны () и характеристик ИС (,) используя теорему Рэяли:

$$E_l = \quad (22)$$

$$E_{l \max} = \quad = E_{0l} \cdot \quad (23)$$

Здесь $E_{0l} =$ – энергия импульса сигнала l -ной волны.

КНД некоторой ИС, заданной параметрами (N ,) показывает во сколько раз ослабляется энергия волны, заданной характеристиками (, V^*) при прохождении её сигналов через данную систему.

Подавление случайных помех

Пусть полезная волна с энергией E наблюдается на фоне случайных колебаний, средняя энергия которых равна $E_{случ}$ и одинакова на всех входах ИС.

Тогда энергетическое отношение сигнал/помеха на входе ИС будет:

—

Максимальной энергия полезной волны на выходе ИС будет при синфазном сложении её сигналов (т.е. при $\Delta t = 0$). Тогда, в соответствии с (23):

$$E_{\text{вых}} = E_{\text{max}} = E_0 \cdot$$

Если случайные сигналы независимы и имеют близкие средние значения дисперсий (σ^2), то дисперсия суммарного сигнала ($\sigma_{\text{вых}}^2$) равна сумме дисперсий слагаемых:

Случайные сейсмические сигналы в подавляющем большинстве являются центрированными (среднее их значение = 0). Пусть имеет место центрированный случайный сигнал, представляющий собой последовательность значений $\{\alpha_k\}$ для которой среднее значение

— тождественна его энергии. Следовательно энергия таких сигналов на выходе ИС выражается значением дисперсии выходного сигнала

Тогда энергетическое отношение сигнал/помеха на выходе ИС можно записать как:

— —

Отношение — характеризует степень изменения энергетического отношения сигнал/помеха за счёт действия ИС:

—,

изменение амплитудного отношения сигнал/помеха за счёт действия ИС характеризуется величиной —, называемой *статистической характеристикой* ИС.

Для однородных ИС, где —, —, соответственно статистическая характеристика (степень подавления случайных волн) будет —. Показано, что это максимальная величина для любой ИС — неоднородные или неравномерные системы в меньшей степени ослабляют случайные волны-помехи.

Контрольные вопросы:

1. Что понимается под кажущейся скоростью распространения волны?
2. Каким выражением описывается сигнал идеально-регулярной волны в i -том элементе дискретной линейной равномерной ИС?
3. Каким выражением описывается сигнал идеально-регулярной волны на выходе дискретной линейной равномерной ИС?
4. Каким выражением описывается спектр сигнала идеально-регулярной волны на выходе дискретной линейной равномерной ИС?
5. Напишите выражение комплексной частотной характеристики дискретной линейной равномерной ИС.
6. Как связаны между собой функция распределения чувствительности и комплексная частотная характеристика ИС?
7. Что понимается под волновым числом и чем оно является по отношению к комплексной частотной характеристике ИС?
8. Что понимается под комплексной волновой характеристикой направленности?
9. Какого рода фильтрацию сигналов упругих волн осуществляет ИС?
10. Какие зависимости являются целевыми функциями в частотной теории ИС и почему?
11. Как записывается выражение комплексной частотной характеристики ИС для дискретной линейной равномерной однородной ИС?
12. Как зависит частотная характеристика направленности ИС от величины запаздывания сигнала между соседними элементами ИС?
13. Как зависит волновая характеристика направленности от числа элементов ИС?
14. Какие характеристики волны-помехи и волнового поля необходимо знать для определения параметров ИС?
15. Что позволяют оценить комплексная частотная характеристика и волновая характеристика направленности ИС?
16. Что понимается под КНД и каков смысл его использования в частотной теории ИС?
17. Напишите выражение КНД через спектральные характеристики сигнала.
18. Кто характеризует КНД интерференционной системы?
19. Чему равна степень ослабления случайных помех ИС с произвольным распределением чувствительности?
20. Чему равна степень ослабления случайных помех однородной ИС?

3. ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ

3.1. Коэффициент направленного действия и его свойства

В основу энергетической теории интерференционных систем положено рассмотрение свойств одномерных (линейных). В практике работ они используются наиболее часто. Получить представление о свойствах двумерных (площадных) систем можно, сводя их к одномерным системам.

Сигнал на выходе дискретной интерференционной системы, имеющей n входов с чувствительностью μ_i , зависящей от номера входа, может быть записан как (см. (6)):

$$f_{\text{вых}}(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i f(t + \Delta t_i) \quad (24)$$

где $f(t)$ – сигнал в точке с координатами $x=0, y=0$;

Δt_i – запаздывание сигнала в точке с координатами x_i, y_i по отношению к началу координат.

Энергия сигнала на выходе системы, согласно выражению (23), будет:

$$E_{\text{вых}} = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^n \mu_i f(t + \Delta t_i) dt \quad (25)$$

Нетрудно видеть, что для знакопеременного импульса, какими и являются сейсмические сигналы, максимальная энергия на выходе интерференционной системы реализуется при $\Delta t_i = \text{const}$, т. е. при синфазном сложении колебаний. Тогда:

$$E_{\text{вых}}^{\text{max}} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{i=1}^n \mu_i f(t) \right]^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{i=1}^n \mu_i \right]^2 f^2(t) dt$$

Или:

$$E_{\text{вых}}^{\text{max}} = \left[\sum_{i=1}^n \mu_i \right]^2 \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt \quad (26)$$

В энергетической теории ИС целевой функцией, описывающей свойства таких систем является в пространственно-частотной области, является **коэффициент направленного действия**. Как было сказано выше, КНД характеризует степень ослабления волны за счет действия интерференционной системы с входами, размещенными в разных точках плоскости наблюдения и обладающими чувствительностью μ_i . Максимально возможную энергию сигнала той же волны можно получить, собрав все входы этой системы в одну точку.

Рассмотрим более детально выражение для КНД:

$$\text{КНД} = \frac{E_{\text{ВЫХ}}}{E_{\text{ВЫХ}}^{\text{max}}} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{i=1}^n \mu_i f(t + \Delta t_i) \right]^2 dt}{\left[\sum_{i=1}^n \mu_i \right]^2 \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt} \quad (27)$$

Разложим квадрат суммы в числителе:

$$\text{КНД} = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^n \mu_i \right]^2 \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \mu_i^2 \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t + \Delta t_i) dt + \\ + 2 \sum_{\substack{l=1, r=1+1 \\ l \neq r}}^{(n-1), n} \mu_l \mu_r \int_{-\infty}^{+\infty} f(t + \Delta t_l) f(t + \Delta t_r) dt \end{array} \right\} \quad (28)$$

Первое слагаемое в фигурных скобках есть сумма квадратов сигналов с каждого входа, второе – удвоенная сумма их попарных произведений. Анализ полученного выражения (28) позволяет выявить свойства КНД.

1. Максимальное значение КНД достигается при синфазном суммировании сигналов $f(t)$, когда $\Delta t = 0$. При этом числитель становится равным знаменателю, а $\text{КНД}_{\text{max}} = 1$.
2. Можно показать, что для знакопеременного импульса и не знакопеременной чувствительности входов системы (знакопеременное распределение чувствительности в практике работ реализуется исключительно редко) первое слагаемое в фигурных скобках в выражении (28) всегда больше второго. Из этого следует, что $\text{КНД} > 0$ во всем диапазоне изменения его аргументов и что интерференционные системы не могут подавить помехи полностью.
3. Интеграл, стоящий под знаком удвоенной суммы, можно рассматривать как функцию автокорреляции импульса $f(t)$. Действительно, если произвести замену одной из переменных функции, например $t + \Delta t_l = \tau$, то $t = \tau - \Delta t_l$, а $d\tau = dt$

Тогда $t + \Delta t_r$ можно представить как $t + \Delta t_r = \tau - \Delta t_l + \Delta t_r$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t + \Delta t_l) f(t + \Delta t_r) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) f(\tau - (\Delta t_l - \Delta t_r)) d\tau$$

При значениях запаздывания сигналов на входах интерференционной системы, превышающих длительность импульса функция автокорреляции обращается в ноль. КНД становится величиной постоянной и равной:

$$\text{КНД} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i^2 \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t + \Delta t_i) dt}{\left[\sum_{i=1}^n \mu_i \right]^2 \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt} \quad (29)$$

При бесконечных пределах интегрирования интегралы в числителе и

знаменателе равны и
$$\text{КНД} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i^2}{\left[\sum_{i=1}^n \mu_i \right]^2} = \text{const} \quad (30)$$

В частном случае однородной интерференционной системы $\text{КНД} = 1/n$.

Из этого следует, что статистический выигрыш такой системы по энергии и

амплитуде соответственно равен $S_E = \frac{1}{\text{КНД}} = n$, $S_A = \frac{1}{\sqrt{\text{КНД}}} = \sqrt{n}$, (31)

что уже было показано в рамках частотной теории ИС.

В качестве аргумента функции КНД обычно используется безразмерное выражение $\Delta t / T$, где Δt – величина максимального запаздывания в пределах рассматриваемой интерференционной системы, т.е. $0 \leq \Delta t_i \leq \Delta t$, а T – величина преобладающего (видимого) периода импульса. Иногда в качестве аргумента рассматривается отношение D/λ , можно показать, что оно тождественно равно отношению $(\Delta t / T)$.

Так как на практике чаще всего используются равномерные интерференционные системы, то $\Delta t_i = (i \cdot \Delta t) / n$, где $i = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$

Иногда в качестве аргумента используется выражение D/λ^* , где D – база интерференционной системы, λ^* – кажущаяся-длина волны. Оба эти аргумента тождественны друг другу, что легко показать на примере равномерной системы:

$$D = (n-1) \times d, \quad \Delta t = \frac{D}{V^*} = \frac{(n-1)d}{V^*}, \quad \text{то есть} \quad \frac{\Delta t}{T} = \frac{d(n-1)}{TV^*} = \frac{D}{\lambda^*}$$

График КНД абстрактной интерференционной системы можно представить в виде кривой (см. рис. 3), имеющей глобальный максимум при $\Delta t/T=0$, ряд локальных минимумов и максимумов, причем любое минимальное значение КНД >0 . При $\Delta t/T > \tau_{\text{имп}}/T$ (здесь $\tau_{\text{имп}}$ - длительность импульса сигнала) кривая КНД стабилизируется на уровне, определяемом выражением (30).

Количество локальных минимумов и максимумов зависят от числа периодов в импульсе сигнала, глубина их – от распределения чувствительности.

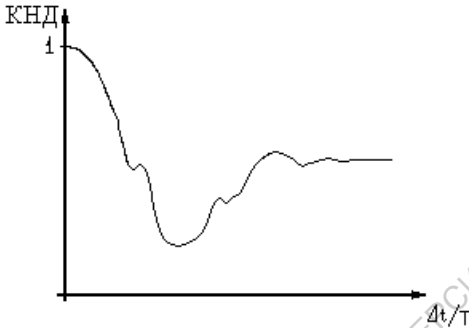


Рис. 3. Общий вид графика КНД

3.2. Расчет КНД интерференционных систем

Выражение (27) в общем случае можно считать достаточным для расчета значений КНД во всем исследуемом диапазоне $\Delta t/T$. Однако нам правило неизвестно аналитическое выражение формы сигнала. В этом случае для ориентировочной оценки свойств интерференционных систем целесообразно заменить функцию $f(t)$ каким-либо другим выражением, удовлетворительно аппроксимирующим ее. Чаще всего для этой цели используется импульс Пузырева:

$$f(t) = e^{k^2 t^2} \sin \omega(t + \psi) = e^{k^2 T^2 (t/T)^2} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{\psi}{T} \right), \quad (32)$$

где k – коэффициент затухания огибающей экспоненты;
 ω – круговая частота гармонической заполняющей;
 ψ – фазовый сдвиг.

Форма импульса для различных значений k и ψ представлена на рис.4. Легко видеть, что изменяя величину $\gamma = k^2 T^2$ и сдвиг ψ можно управлять формой сигнала и варьировать ею в широких пределах.

Достоинствами импульса Пузырева являются:

- близость формы импульса к форме сейсмических сигналов;

- сосредоточенность основной энергии импульса в ограниченном интервале времени, т.е. он достаточно быстро затухает;
- ограниченность его спектра вследствие того, что сам импульс не ограничен во времени;
- простота подбора параметров.

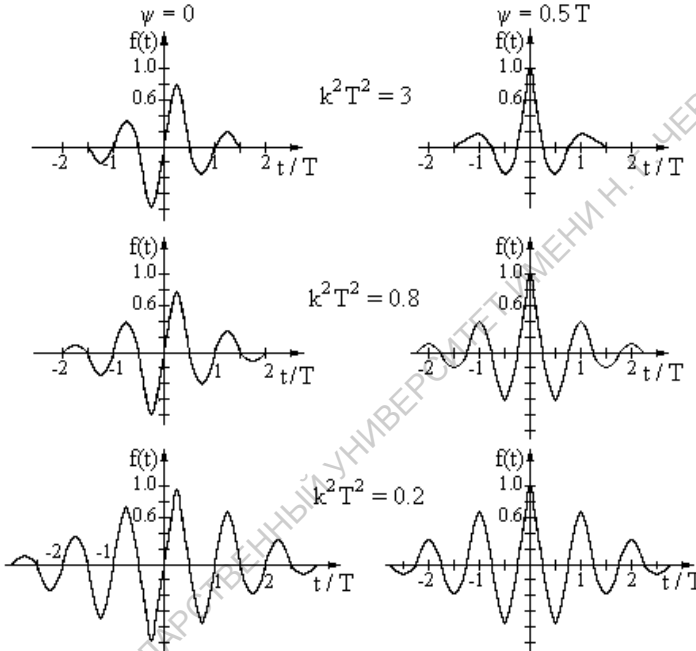


Рис. 4. Форма импульса Пузырева.

Подставив выражение (32) в формулу (28) получим явное выражение КНД и можно показать, что интегралы, полученные в результате подстановки будут иметь следующие значения:

$$\left. \begin{array}{l} \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t+\Delta t) \\ \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) \end{array} \right\} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{2} \cdot k} \left[1 - \cos 2\psi \cdot e^{\left(-\frac{2\pi^2}{k^2 T^2} \right)} \right]$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t+\Delta t_{\ell})f(t+\Delta t_r)dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{2} \times k} \times e^{-\left[(-k^2 T^2/2)\left(\frac{\Delta t_{\ell}-\Delta t_r}{T}\right)^2\right]} \times \left[\cos\left(2\pi \frac{\Delta t_{\ell}-\Delta t_r}{T}\right) - e^{-\left(\frac{2\pi^2}{k^2 T^2}\right)} \times \cos 2\psi \right]$$

Величина $e^{-\left(\frac{2\pi^2}{k^2 T^2}\right)}$ в реальном интервале $0.2 \leq k^2 T^2 \leq 3$ пренебрежительно мала (не превышает 0.001), следовательно мало и произведение ее на $\cos 2\psi$, поэтому вторыми слагаемыми в скобках можно пренебречь. Отсюда:

$$\text{КНД} \approx \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^n \mu_i\right]^2} \left[\sum_{i=1}^n \mu_i^2 + 2 \sum_{\substack{\ell=1, r=\ell+1 \\ \ell \neq r}}^{(n-1), n} e^{-\frac{k^2 T^2}{2} \left(\frac{\Delta t}{T}\right)^2 (\ell-r)^2} \times \cos 2\pi \left(\frac{\Delta t_{\ell}-\Delta t_r}{T}\right) \right] \quad (33)$$

Для частного случая однородной системы:

$$\text{КНД} \approx \frac{1}{n^2} \left[n+2 \sum_{\substack{\ell=1, r=\ell+1 \\ \ell \neq r}}^{(n-1), n} e^{-\frac{k^2 T^2}{2} \left(\frac{\Delta t}{T}\right)^2 (\ell-r)^2} \times \cos 2\pi \frac{\Delta t}{T} (\ell-r) \right] \quad (34)$$

Как видно из (33) и (34) расчет значений КНД в достаточно широком диапазоне значений аргумента $\Delta t/T$ может быть выполнен только с помощью ЭВМ. В этом случае для описания параметров интерференционных систем используется понятие амплитудно-временного аналога (АВА). АВА содержит распределение чувствительности и запаздываний некоторой идеально-регулярной волны на входах системы. На основании АВА может быть рассчитана одна и только одна точка на графике КНД исследуемой интерференционной системы. Для расчета всего графика требуется составление серии аналогов. Как правило, эта работа не является трудоемкой, поскольку на волновое поле в конкретных расчетах накладываются определенные ограничения (например – распространение плоских волн) и вычисление временных запаздываний происходит в процессе расчета КНД на ЭВМ. Легко видеть, что АВА не зависит от физической сущности интерференционной системы, а зависит только от параметров системы и волнового поля, т.е. отражает структуру интерференции. Однако АВА рассматривает лишь те характеристики

интерференции, которые наиболее существенны в рамках энергетической теории, опуская при этом, к примеру, спектральный состав колебаний (последний описывается лишь формой импульса и преобладающим периодом). В этом смысле говорят, что амплитудно-временной аналог отражает главную структуру интерференции.

Форма записи АВА:

$$\begin{array}{cccccc} \mu_i : & \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 & \mu_4 & \mu_5 \\ * & * & * & * & * & * \end{array}$$

$$\Delta t_i : \Delta t_1 \Delta t_2 \Delta t_3 \Delta t_4 \Delta t_5$$

Здесь * – условное обозначение элемента системы, где $\mu_i \neq 0$, а запаздывание i -той волны – Δt_i .

Таким образом, по заданным параметрам импульса (κ , T , ψ) и серии амплитудно-временных аналогов можно рассчитать график КНД, описывающий свойства конкретной интерференционной системы. Естественно, что разным параметрам импульса будут соответствовать и разные графики КНД. Обычно рассматриваются двухпериодные ($\gamma = \kappa^2 T^2 = 3$), трехпериодные ($\gamma = 0.8$) и реже – пятипериодные импульсы ($\gamma = 0.2$).

3.3. Анализ характеристик интерференционных систем по графикам КНД

Под характеристиками интерференционных систем в рамках энергетической теории принято понимать полосу пропускания /ПП/, полосу гашения /ПГ/, разрешающую способность, статистический эффект.

Рассмотрим график КНД произвольной интерференционной системы (см. рис. 5).

Под полосой пропускания интерференционной системы, понимается область значений аргумента от 0 до $\left(\frac{\Delta t}{T}\right)^{ПП}$, где КНД ≥ 0.5 . Если график строится в системе координат, где по оси ординат отгадывается \sqrt{KHD} , то в полосе пропускания $\sqrt{KHD} \geq 0.707$.

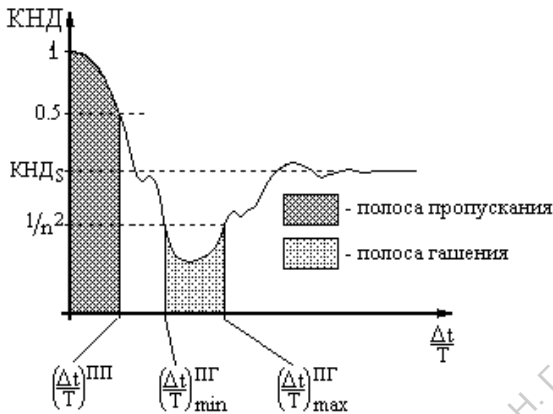


Рис. 5. Области пропускания и гашения интерференционной системы на графике КНД

Ширина полосы пропускания определяет диапазон значений параметра $\Delta t/T$ волн, которые система пропускает без заметных искажений. Тот факт, что область максимальных значений КНД (т.е. область пропускания) лежит в окрестности начала координат свидетельствует о том, что волны с высокими кажущимися скоростями ($V^* \rightarrow \infty$, соответственно $\Delta t \rightarrow 0$) ослабляются в меньшей степени. Чем шире полоса пропускания тем меньшие значения V^* попадают в нее:

$$V_{\min}^* = \frac{D}{T \cdot \left(\frac{\Delta t}{T}\right)_{\text{ПП}}}$$

Полоса гашения есть область минимальных значений КНД. Глубина минимума характеризует максимально возможное ослабление волны, кажущаяся скорость которой соответствует значению аргумента $\Delta t/T$ в точке минимума. Ширина области минимума определяет тот диапазон волн, который может быть ослаблен интерференционной системой. Для сравнения характеристик интерференционных систем выбирается некоторое максимальное значение КНД, допускаемое в полосе гашения, Для линейных интерференционных систем $\text{КНД}_{\min}^{\text{ПГ}} = 1/n^2$. Линия, соответствующая выбранному значению, отсекает на графике КНД область, где КНД меньше или равен максимально допустимому значению в ПГ. По точкам пересечения этой линии с

графиком определяются границы полосы гашения, т. е. $\left(\frac{\Delta t}{T}\right)_{\min}^{\text{ПГ}}, \left(\frac{\Delta t}{T}\right)_{\max}^{\text{ПГ}}$. Чем больше разница между этими значениями, тем больший диапазон волн (по параметру V^*) может быть подавлен не менее чем в $1/n^2$ (по энергии) или в $1/n$ раз (по амплитуде).

Разрешающая способность характеризует, насколько близкие по V^* могут быть разделены интерференционной системой:

- одна (с большим значением V^*) пропущена с ослаблением не более чем в 2 раза (по энергии);
- другая (с меньшим V^*) ослаблена по энергии не менее чем в n^2 раз.

Легко видеть, что разрешающая способность характеризует близость ПП и ПГ, что в свою очередь определяется крутизной графика КНД в промежуточной области между ПП и ПГ.

Следует обратить внимание на условность проведения границ. Эти границы используются только при сопоставлении интерференционных систем и никак не определяют выбор параметров систем для заданных характеристик волнового поля. При выборе параметров конкретной интерференционной системы руководствуются значениями требуемой степени ослабления волн-помех V_1 и V_2 , (см. (3)) определенными для волн - помех с соответственно максимальным (V^*_1) и минимальным значением (V^*_2) кажущейся скорости волны. Тогда:

$$\left(\frac{\Delta t}{T} = \frac{D}{V^*_1 T}\right)_{V_1} \quad \text{и} \quad KHD = \frac{1}{B_1^2}$$

$$\left(\frac{\Delta t}{T}\right)_{V_2} \quad \text{и} \quad KHD = \frac{1}{B_2^2}$$

что определяет значения абсциссы и ординаты на границах ПГ.

Статистический эффект интерференционной системы, как уже говорилось выше, определяется значением $KHD_s = \text{const}$ на графике КНД. Таким образом, рассмотрен аппарат, позволяющий оценить характеристики интерференционных систем, получены выражения, позволяющие рассчитать приближенные графики КНД для различных систем, определен способ расчета графиков КНД, установлены связи между графиками КНД и характеристиками интерференционных систем.

Таким образом, нами рассмотрен аппарат, позволяющий оценить характеристики интерференционных систем, получены выражения, позволяющие рассчитать приближенные графики КНД для различных интерференционных систем, определен способ расчета графиков КНД, установлены связи между графиками КНД и характеристиками интерференционных систем.

Для выбора параметров линейных интерференционных систем рассчитываются альбомы графиков КНД для большого набора ИС. Они объединяются в группы:

- ~ по длительности импульса (числу периодов в импульсе Пузырёва);
- ~ по виду графика распределения чувствительности ИС, чаще всего ограничиваются рассмотрением однородных ИС и систем с треугольным распределением μ с максимумом в центре системы (прямоугольное и треугольное распределения чувствительности).

Для выбора оптимальных параметров ИС в рамках энергетической теории необходимо знать:

- ~ минимальное значение V^* полезных волн;
- ~ число периодов и длительность видимого периода импульсов сигналов полезных волн;
- ~ значения V^* волн-помех;
- ~ число периодов и длительность видимого периода импульсов сигналов волн-помех;
- ~ отношения $A_{\text{пом}} / A_{\text{сигн}}$ в областях интерференции полезных волн и волн-помех для определения необходимой степени подавления помех в соответствии с выражением (3).

Выбор конкретных параметров линейных ИС в конечном итоге сводится к перебору графиков КНД и выбору такого, на котором полезные волны попадают в область пропускания, а волны-помехи – в область гашения, где обеспечивается их достаточное подавление. Параметры ИС, соответствующей выбранному графику, принимаются как параметры оптимальной интерференционной системы.

Что касается площадных ИС, то их КНД зависит от двух пространственных координат и, следовательно, график его может быть представлен только в трёхмерном пространстве в виде карт изолиний КНД. Для построения таких карт на плоскости наблюдения выбирается равномерный веер направлений распространения волн и элементы ИС проецируются на эти направления, подобно тому, как это показано на рис. 1. Таким образом трёхмерные системы сводятся к двумерным для которых рассчитываются графики КНД. Выбирается система сечений КНД = const. и определяются значения аргументов $\Delta t/T$, соответствующие этим сечениям. Карты изолиний КНД строятся в полярной системе координат. Для выбора оптимальных параметров площадных систем

наблюдений помимо перечисленных выше параметров волнового поля необходимо знать ещё и направления подхода волн.

Контрольные вопросы:

1. В какой области рассматривается действие ИС в энергетической теории?
2. Какая функция является целевой в энергетической теории ИС?
3. При каком условии достигается максимальное значение КНД и чему оно равно?
4. Возможно ли полное подавление помех интерференционной системой?
5. При каком условии величина КНД становится постоянной и чему она равна?
6. В чём смысл использования безразмерного аргумента КНД?
7. Напишите выражение для импульса Пузырёва.
8. Чем обусловлено использование импульса Пузырёва в энергетической теории ИС?
9. Что даёт замена абстрактного выражения формы импульса сигнала импульсом Пузырёва?
10. Что понимается по амплитудно-временным аналогом (АВА) ИС?
11. Что отображает АВА?
12. Чему соответствует АВА на графике КНД?
13. Что понимается под полосой пропускания на графике КНД?
14. Что характеризует полоса пропускания?
15. Какие волны попадают в полосу пропускания?
16. Что понимается под полосой гашения на графике КНД?
17. Из каких соображений выбирается верхняя граница полосы гашения?
18. Что характеризует разрешающая способность ИС?
19. Что понимается под статистическим эффектом ИС и чем он определяется?
20. С какой целью и как формируются альбомы графиков КНД?
21. Какие данные о волновом поле необходимы для выбора параметров линейных ИС?
22. Как определяется необходимая степень ослабления волн-помех?
23. Из каких соображений исходят при выборе параметров ИС с помощью альбома графиков КНД для конкретных условий?
24. Как может быть представлен график КНД площадной ИС?
25. Как формируются графики КНД площадных ИС?

4. РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассмотренный в разделах 2 и 3 математический аппарат достаточен для описания работы простейших ИС, в которых подавление помех осуществляется за счёт естественного запаздывания сигналов на входах системы. Такие системы носят общее название – *ИС без искусственных задержек сигналов*. Они позволяют выделять волны с высокими кажущимися скоростями и подавлять низкоскоростные – как правило поверхностные – волны-помехи широко применяются при проведении полевых работ методом отраженных волн в виде группирования сейсмоприёмников и группирования источников упругих колебаний.

ИС с искусственными задержками сигналов позволяют управлять характеристикой направленности – смещать максимум характеристики направленности ИС и выделять низкоскоростные волны на фоне высокоскоростных. Они очень редко используются в процессе регистрации волнового поля и широко применяются при лабораторной обработке сейсморазведочных материалов.

Такое перераспределение областей применения разных видов ИС опирается на принцип суперпозиции, присущий линейным системам. Оправдывает такой подход низкая технологичность ИС с искусственными задержками в полевой реализации:

- ~ для создания временных задержек при возбуждении упругих колебаний или их приёме применяются сложные устройства;
- ~ при необходимости использовать несколько законов задержки требуется регистрация нескольких сейсмограмм;

4.1 Группирование источников и приёмников упругих колебаний

Предположение о практической линейности процессов возбуждения и распространения упругих колебаний позволяет считать, что применительно к ним справедливы принцип суперпозиции и принцип взаимности. Из этого следует, что при соответствующем выборе параметров групп источников и приёмников упругих колебаний формируются равноценные ИС. Это позволяет на этапе выбора параметров ИС отказаться от конкретизации вида системы, рассматривая абстрактную полевую ИС. Для определённости будем считать её группой сейсмоприёмников.

В подавляющем большинстве случаев при проведении полевых сейсморазведочных работ используются линейные системы, элементы которых расположены на линии профиля. Если источник упругих колебаний также расположен на линии профиля, то формируется продольная ИС, если источник снесен с линии профиля (в этом случае говорят о *линии наблюдения* (ЛН)), то образуется неподольная ИС. Продольные ИС имеют лучшие характеристики

по сравнению с непродольными, потому, что запаздывания сигналов на элементах системы линейно зависят от местоположения элемента в группе. При проведении 2D сейсморазведочных работ стремятся использовать продольное профилирование и, соответственно, продольные полевые ИС.

Непродольные полевые ИС характерны для сейсморазведочных работ 3D. При их проведении целесообразным было бы применение площадных полевых ИС, для которых характерна меньшая изменчивость свойств в зависимости от направлений подхода волн. Однако использование площадных полевых ИС значительно усложняет технологию проведения наблюдений и сильно ограничивает их производительность, из-за чего в мировой практике 3D сейсмической разведки применяется главным образом линейное группирование.

При выборе параметров полевой ИС на основании априорных данных о волновом поле или анализа материалов опытных работ по его изучению определяются характеристики волн-помех:

- ~ интенсивность сигналов волн-помех $A_{\text{пом}}$ (как правило среднеквадратическая амплитуда);
- ~ число периодов сигналов волн-помех и их видимый период T^* (как правило среднее значение периода сигнала);
- ~ кажущиеся скорости волн-помех V^* ;
- ~ вычисляются видимые длины волн-помех $\lambda^* = T^* \cdot V^*$.

Поле полезных (отраженных) волн характеризуется:

- ~ интенсивностью сигналов ($A_{\text{сиг}}$) в зонах интерференции с волнами-помехами;
- ~ минимальным значением кажущейся скорости полезных волн V^*_{min} (определяется по асимптотической части годографа волны, отраженной от самой мелкой границы, подлежащей картированию);
- ~ видимым периодом сигнала волны, отраженной от самой мелкой границы, подлежащей картированию (T^*_m).

По этим данным для каждой из зон интерференции определяются значения отношений $A_{\text{пом}}/A_{\text{сиг}}$. В основу выбор параметров ИС кладётся волна-помеха, имеющая наихудшее (наибольшее) соотношение $A_{\text{пом}}/A_{\text{сиг}}$ и в дальнейших расчётах используются параметры этой волны. Для определенности рассмотрим схему выбора в рамках энергетической теории ИС.

В соответствии с (3) определяется требуемая степень ослабления помехи: $B = a (A_{\text{пом}}/A_{\text{сиг}})$. На начальной стадии расчёта требуемая степень превышения полезного сигнала над помехой выбирается равной $a = 8 \div 10$. Если в результате параметры выбранной ИС окажутся неудовлетворительными (нетехнологичными), то в требуемая степень превышения может быть уменьше-

на до $a = 2 \div 3$. По требуемой степени ослабления вычисляется значение КНД в полосе гашения: $\text{КНД}_{\text{ПГ}} = 1/B^2$.

В альбоме графиков КНД выбирается раздел, соответствующий прямоугольному распределению чувствительности (однородная ИС), в разделе – лист, соответствующий числу периодов в импульсе сигнала рассматриваемой волны-помехи. На листе представлены наборы графиков КНД (рис. 6), рассчитанные для разного числа элементов (n) интерференционной системы ($n_i < n_j < n_k$).

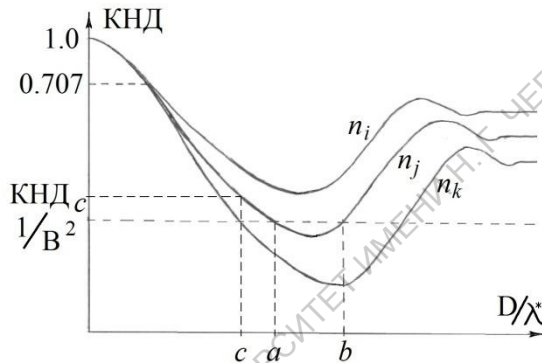


Рис. 6. Графики КНД (к выбору параметров ИС).

На графике проводится горизонтальная линия на уровне $1/B^2$ и находится первый из графиков (с минимальным числом элементов) который пересекает эта линия (в данном случае – n_j). Как видно из рис.6, для ИС с числом элементов n_j в интервале значений аргумента $D/\lambda^* = a \div b$ справедливо соотношение $\text{КНД} \leq 1/B^2$, следовательно ИС с базами $D = a\lambda^* \div b\lambda^*$ обеспечивают требуемое ослабление волны-помехи. Первоначальную расчетную базу выгодно выбрать минимальной, т.е. $D_{\text{расч}} = a\lambda^*$.

Следующим шагом в выборе параметров ИС является определение степени ослабления других волн-помех. Пусть в волновом поле присутствует ещё одна помеха с видимой длиной волны λ_j^* . По выбранной $D_{\text{расч}}$ и λ^* определяется соответствующее ей значение аргумента $c = D_{\text{расч}}/\lambda_j^*$ и с графика снимается значение КНД_c , которое пересчитывается в степень ослабления волны $B = \frac{1}{\text{КНД}_c}$. Если $B \geq 2 \div 3$, то ИС с $D_{\text{расч}}$ обеспечивает удовлетворительное ослабление рассматриваемой волны, если нет – то необходимо увеличить расчётную базу (например: $D_{\text{расч}} = b\lambda^*$ или принять для расчетов график для группы с большим числом элементов (n_k)) и проверить степень ослабления с новой базой.

Третьим шагом выбора параметров ИС является проверка попадания полезных (отраженных) волн в полосу пропускания ИС. Для этого определяется минимальная видимая длина полезной волны: $\lambda_{\text{пол. min}}^* = T_m^* \cdot V_{\text{min}}^*$. Услови-

ем попадания отраженных волн (во всём диапазоне изменения их кажущихся скоростей) в полосу пропускания является выполнение неравенства

$$D_{\text{расч}} \leq D_{\text{пред}}, \text{ где } D_{\text{пред}} = 0.5 \lambda^*_{\text{пол. min}}. \quad (35)$$

Если такое неравенство не выполняется, то ищется компромиссное решение (используются совместно работающие группы источников и приёмников, снижаются требования к степени подавления волн, выбирается распределение чувствительности по треугольному закону, принимается решение о допущении частичного ослабления полезных волн и т.п.).

Совместное использование группирования источников и приёмников получило широкое распространение с внедрением в практику сейсморазведочных работ относительно маломощных невзрывных (и взрывных) источников упругих колебаний. Увеличение абсолютной мощности излучаемого сигнала достигается путём одновременной синхронной работы нескольких источников. Размещение их на некоторой базе формирует ИС на возбуждении. Аналогичным образом достигается повышение чувствительности приёмного элемента и, соответственно, группы сейсмоприёмников также образуют ИС на приёме. Разделение интерференционных систем выгодно тем, что общая степень ослабления помех равна: $V_{\text{общ}} = V_{\text{возб}} \cdot V_{\text{приема}}$, а общая база $D_{\text{общ}} = D_{\text{возб}} + D_{\text{приема}}$.

4.2. Лабораторные интерференционные системы с постоянными во времени, линейными по пространственным координатам искусственными задержками. Метод регулируемого направленного приёма сейсмических колебаний

Лабораторные ИС основаны на суммировании записей сигналов, зарегистрированных в разных точках наблюдения. Принципиальным преимуществом лабораторных систем является то, возможен доступ к любой записи и любому элементу записи, возможна регулировка интенсивности сигналов по любому закону, в том числе и переменному во времени. Возможность произвольного доступа к элементам записей сигналов позволяет суммировать сигналы, зарегистрированные в разные моменты времени (несинхронное суммирование, суммирование с задержками).

Пусть имеется n точек регистрации и при возбуждении колебаний записывается n сейсмограмм. Сигнал некоторой волны f_0 приходит в i -тую точку, в которой установлен сейсмоприёмник (или группа сейсмоприёмников) с чувствительностью μ_i с запаздыванием Δt_i , т.е. $f_i(t) = \mu_i f_0(t + \Delta t_i)$.

Пусть при суммировании этих сейсмограмм в каждую из них можно вводит временную задержку сигнала τ_i , т.е. суммарный сигнал может быть записан как $f_{\Sigma} = \dots = \dots$ (36)

Из выражения (36) видно, что при $\Delta t_i =$ общая задержка сигнала на каждой из суммируемых трасс будет равна 0, т.е. сигналы попадают в полосу пропускания ИС, суммируются синфазно и суммарный сигнал принимает максимальное значение. Из этого следует, что введение регулируемых задержек при суммировании сейсмотрасс позволяет управлять характеристикой лабораторной ИС и выделять низкоскоростные волны на фоне высокоскоростных.

Впервые лабораторное суммирование сейсмических сигналов с вводом регулируемых задержек было реализовано в **методе регулируемого направленного приёма сейсмических колебаний (МРНП)**. Предложен в 1927 г. Ф. Рибером (США), но до промышленного применения доведён в СССР коллективом авторов под руководством профессора Л.А. Рябинкина в начале 50-х годов прошлого столетия. Математически МРНП сводится к разложению сложного волнового поля по плоским волнам (*преобразование Радона*), позволяет отдельно выделять волны в широком диапазоне кажущихся скоростей, но требует чтобы годографы выделяемых волн были линейными. Для отраженных волн это условие выполняется, если используются ограниченные базы наблюдения ($\approx 200 \div 400$ м).

Рассмотрим МРНП в применении к разделению двух интерферирующих волн с различными значениями V^* . Пусть на n -канальной сейсмограмме (рис. 7а) зарегистрированы волны 1 и 2 ($V^*_{1} > 0$ и $V^*_{2} < 0$).

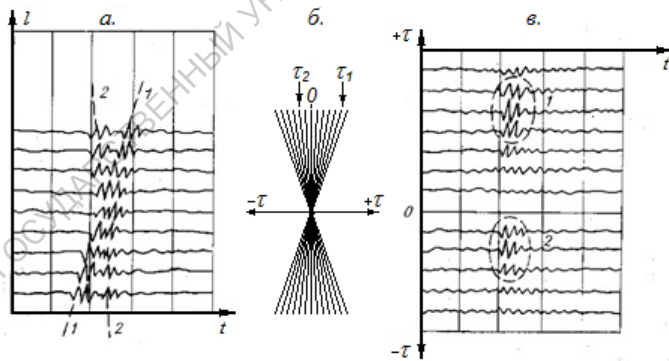


Рис. 7. Разделение интерферирующих регулярных волн по методу РНП. а. сейсмограмма, б. графики запаздываний, в. суммограмма РНП.

Если расстояния между пунктами приёма равны d , то смещения сигналов на соседних трассах будут равны $\delta t_1 = d / V^*_{1}$ и $\delta t_2 = d / V^*_{2}$. Полагая времена регистрации волн на первой трассе сейсмограммы равными t_{01} и t_{02} , соответственно, запаздывания сигналов на текущей (i -той) трассе будут: $\Delta t_{i1} = (i - 1) \cdot \delta t_1$ и $\Delta t_{i2} = (i - 1) \cdot \delta t_2$, где номер трассы i принимает значения от 1 до n .

В соответствии с выражением (36), при задании запаздываний $\tau_i = \Delta t_{i1}$ в лабораторной ИС синфазно будут суммироваться сигналы волны 1 и суммарный сигнал этой волны будет иметь максимальную величину, по сравнению с суммарными сигналами, полученными при любых других значениях запаздываний. Аналогично при задании запаздываний $\tau_i = \Delta t_{i2}$ максимальную величину будет иметь суммарный сигнал волны 2.

Так как кажущиеся скорости волн априорно неизвестны, то суммирование с различными законами изменения задержек позволяет их определить, что и составляет сущность МРНП. Для этого:

- ~ по сейсмограммам оценивается диапазон значений V^* ($V^*_{\min} \div V^*_{\max}$) и, соответственно, $\delta t_{\min} \div \delta t_{\max}$;
- ~ по значениям $\delta t_{\min} \div \delta t_{\max}$ определяется диапазон изменения запаздываний τ : $\tau_{\min} < (n - 1) \cdot \delta t_{\min}$, $\tau_{\max} > (n - 1) \cdot \delta t_{\max}$;
- ~ выбранный диапазон изменения запаздываний τ разбивается с некоторым достаточно дробным шагом $\Delta \tau$ на m законов изменения τ_i (направлений суммирования), веер направлений суммирования графически представлен на рис. 7 б;
- ~ выбирается первое направление веера и производится суммирование трасс сейсмограммы с вводом запаздываний по выбранному закону, результатом суммирования является суммотрасса;
- ~ суммирование повторяется с каждым из законов запаздывания, в результате чего формируется суммоленга РНП, состоящая из m суммотрасс (рис. 7 в), каждой из которых соответствует свой закон запаздывания (параметр суммотрассы).

В МРНП используются сейсмограммы с нечётным количеством трасс, а при формировании веера направлений суммирования центральной трассе соответствует нулевое значение запаздывания (как это показано рис. 7). Поэтому сигналы на суммотрассах привязаны ко времени их регистрации на центральной трассе сейсмограммы. В следствие того, что используются малые базы суммирования форма сигнала одной и той же волны от трассы к трассе меняется незначительно и при синфазном сложении этих сигналов (при $\tau_i = \Delta t_{i1}$ или $\tau_i = \Delta t_{i2}$) форма суммарного сигнала тождественна форме сигнала на трассах исходной сейсмограммы, т.е сохраняются динамические характеристики волн.

Как сказано выше, максимальная амплитуда суммарного сигнала на суммотрассах наблюдается на трассе, где закона запаздывания соответствует кажущейся скорости волны. Однако, если шаг $\Delta \tau$ достаточно мал, то при формировании соседних суммотрасс реализуется квазисинфазное суммирование сигналов и амплитуды суммарных сигналов будут достаточно велики, хотя и меньше максимальной. Таким образом, идеально регулярные волны на суммоленгах МРНП проявляются в виде разрастаний амплитуд суммарных сигналов на нескольких соседних суммотрассах (см. рис. 7 в). Интерфери-

рующие волны с разными кажущимися скоростями на суммолентах РНП оказываются разнесенными по значению параметра τ .

Возможность разделения волн с близкими кажущимися скоростями зависит от их кинематических и динамических характеристик. На суммолентах РНП две интерферирующие волны могут быть разделены, если амплитуда суммарных сигналов в интервале между двумя разрастаниями не будет превышать половину амплитуды в их максимумах.

МРНП как метод обработки сейсморазведочных материалов в настоящее время не применяется, но рассмотренный алгоритм лежит в основе программ веерной фильтрации. Алгоритм ориентирован на разложение интерференционного волнового поля по плоским волнам и, следовательно, является дифференциальным.

4.3 Лабораторные интерференционные системы с переменными во времени, нелинейными по пространственным координатам искусственными задержками. Способ общей средней точки

Если волновые поверхности интерферирующих волн являются существенно неплоскими (годографы таких волн являются нелинейными функциями пространственных координат), то МРНП и веерная фильтрация неэффективны. Классическим примером таких волновых полей являются поля отраженных (однократно и многократно) волн от границ в осадочном чехле.

Проблема интерференции однократно и многократно отраженных волн всегда была одной из самых сложных при работах МОВ. Последние формируются в верхних частях осадочного чехла, накладываются на отражения от глубоких границ и препятствуют их выделению и прослеживанию. При малой длине расстановки (500 – 1000 м) динамические и кинематические характеристики интерферирующих волн отличаются незначительно и, следовательно, отсутствуют надёжные критерии их разделения. При увеличении длин расстановок до 2000 – 3000 м начинает сказываться то, что многократные отражения в подавляющем большинстве случаев формируются в низкоскоростной части разреза, а в формировании отражений от глубоких принимают участие глубокие высокоскоростные отложения. Следствием этого является то, что годографы интерферирующих однократно многократно отраженных волн имеют разную кривизну – большую у многократных волн и меньшую у однократных.

Различие кривизн годографов интерферирующих волн используется как критерий для их разделения **лабораторными интерференционными системами с задержками, нелинейными по пространственным координатам.**

Поскольку кривизна годографов отраженных волн уменьшается с увеличением глубины отражающей границы (увеличением времени регистрации волны), то временные задержки должны быть переменными по времени регистрации (уменьшаться с увеличением времени). Алгоритм работы такой системы подобен алгоритму (36), с той разницей, что Δt и τ являются функциями пространственных координат и времени:

$$f_{\Sigma}(x, y, t) = \quad = \quad (37)$$

Рассмотрим работу лабораторной интерференционной системы с задержками, нелинейными по пространственным координатам и переменными по времени на примере суммирования по способу ОСТ (ОГТ) в 2D варианте. Роль переменных по удалениям (l) и по времени (t_0) задержек выполняют кинематические поправки (КП) – поправки, приводящие время $t_{набл}(l)$ ко времени t_0 в точке отражения (*время пробега волны по пути, нормальному к отражающей границе в точке отражения*).

Полевые сейсмограммы, зарегистрированные по методике многократных перекрытий и скомпонованные по принципу общего пункта возбуждения (ОПВ), перекомпоновываются по принципу общей средней точки (ОСТ). Количество трасс в такой сейсмограмме равно кратности перекрытий системы наблюдения (m). При небольших углах наклона отражающих границ сейсмограмма ОСТ практически эквивалентна сейсмограмме общей точки отражения (ОТО) и, следовательно, каждой из трасс такой сейсмограммы соответствует одно и то же значение t_0

Рассмотрим обработку одной из скомпонованных сейсмограмм:

- ~ На основании априорно заданной скоростной модели среды для всех трасс сейсмограммы ОСТ рассчитываются КП по полному однократно отраженным волн (рис. 8 а, сплошные кривые).
- ~ В силу того, что годографы многократно отраженных волн имеют бо́льшие кривизны, чем интерферирующие с ними однократно отраженные волны, значения кинематических поправок на трассах с равными удалениями источник-приёмник при одинаковом времени t_0 должны иметь бо́льшие величины (рис. 8 а, пунктирные кривые).

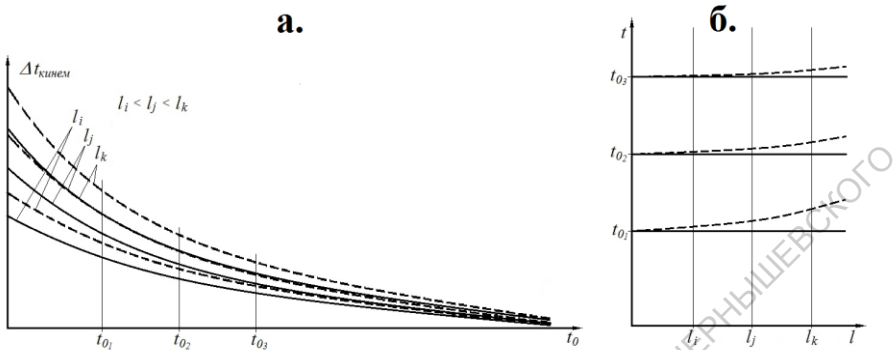


Рис. 8. Графики кинематических поправок (а.) и остаточные годографы ОСТ (б.). Сплошные кривые – однократно отраженные волны, пунктирные кривые – многократно отраженные волны.

- ~ Кинематические поправки, рассчитанные по полю однократно отраженных волн, вводятся в трассы обрабатываемой сейсмограммы ОСТ – формируется трансформированная сейсмограмма ОСТ. Сигналы одноименных однократно отраженных волн на всех трассах смещаются ко времени t_{01} , t_{02} , и t_{03} , соответственно (рис 8 б, сплошные прямые $t_0 = const(l)$). Сигналы многократно отраженных волн на линии $t_0 = const(l)$ не смещаются, а распределяются вдоль криволинейных остаточных годографов (рис. 8 б, пунктирные кривые).
- ~ Трассы трансформированной сейсмограммы синхронно суммируются, в результате чего происходит синфазное сложение сигналов однократно отраженных волн. Амплитуда суммарного сигнала будет $\approx mA(t)$, где $A(t)$ – амплитуда сигнала на трасса исходной сейсмограммы, времена соответствуют времени t_0 отраженной волны. Сигналы многократно отраженных волн суммируются несинфазно и при соответствующем подборе расстояний между ПП ослабляются (падают в полосу гашения ИС). В результате сейсмограмма ОСТ преобразуется в суммотрассу ОСТ на которой усилены сигналы однократно отраженных волн и ослаблены многократные отражения.
- ~ Описанным выше способом обрабатываются все зарегистрированные сейсмограммы, композиция суммотрасс ОСТ образует сейсмический временной разрез.

Контрольные вопросы

1. На выделение каких волн рассчитаны ИС без искусственных задержек?

2. Что даёт введение в ИС искусственных задержек сигналов?
3. Почему ИС с искусственными задержками применяются главным образом в лабораторном варианте?
4. Чем обусловлена эквивалентность ИС на приёме и на возбуждении упругих колебаний?
5. Как классифицируются ИС по геометрическим характеристикам?
6. Какие характеристики волнового поля необходимы для выбора параметров ИС в рамках энергетической теории?
7. Из каких соображений выбирается необходимая степень ослабления волн помех?
8. Как определяется число элементов в ИС?
9. Из каких соображений выбирается база ИС?
10. Как оценивается степень ослабления полезных волн ИС?
11. Какова цель совместного применения группирования источников и приёмников упругих колебаний?
12. В чём состоит принципиальное преимущество лабораторных ИС?
13. Что даёт использование временных задержек в лабораторных ИС?
14. Что представляет собой МРНП с математической точки зрения?
15. Какое условие накладывается на волновое поле при применении МРНП?
16. Как реализуется в МРНП выделение волн по значениям V^* , если они априорно неизвестны?
17. Как организовано введение задержек в МРНП?
18. В какой форме проявляются регулярные волны на суммоленге РНП?
19. Каким образом разделяются на суммоленгах РНП интерферирующие регулярные волны с разными значениями V^* ?
20. В каком виде реализуется алгоритм разложения по плоским волнам в современных комплексах обрабатывающих программ?
21. Почему многократно отраженные волны являются помехами?
22. Чем обусловлена сложность разделения интерферирующих однократно и многократно отраженных волн?
23. По какому критерию разделяются интерферирующие однократно и многократно отраженные волны?
24. В чём состоит особенность временных задержек, используемых в ИС при разделении интерферирующих однократно и многократно отраженных волн?
25. Что выполняет роль временных задержек в способе ОСТ?
26. Какая используется методика проведения полевых наблюдений для последующей обработки сейсмических материалов по способу ОСТ?
27. Какая компоновка сейсотрасс используется при обработке по способу ОСТ?

28. К какой форме стремятся привести годографы полезных (однократно отраженных) волн при обработке сейсмических материалов по способу ОСТ?
29. Как преобразуются годографы многократно отраженных волн, интерферирующих однократно отраженными, при обработке по способу ОСТ?
30. Чем обусловлено ослабление многократно отраженных волн при обработке по способу ОСТ?
31. В какой форме представляются результативные материалы при обработке сейсморазведочной информации по способу ОСТ?