

**Национальная академия наук Украины  
Институт геофизики им. С. И. Субботина**

**На правах рукописи**

**ОСАДЧУК Аскольд Евгеньевич**

**СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ  
КРУПНЫХ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

**Специальность 01.04.12 — геофизика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Киев**

**Институт кибернетики имени В. М. Глушкова НАН Украины  
1995**

АВ 33.606

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Институте геофизики  
имени С. И. Субботина НАН Украины.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
МОСТОВОЙ С. В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
ВОРОНИН А. Н.,

доктор физико-математических наук  
ДЯДЮРА В. А.

Ведущая организация: Киевский государственный  
университет им. Т. Г. Шевченко.

Защита состоится «17» сентября 1995 г.  
в «14» ч. на заседании специализированного ученого совета  
Д 01.95.01 при Институте геофизики имени С. И. Субботина  
НАН Украины по адресу:

252680 Киев-142, проспект Палладина, 32.

ЛНБ ім. В. Стефанишина  
АН України

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «14» ноября 1995 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета

ГЕЙКО В. С.

ЛНБ України ім. В. Стефанишина



00754944 (X)

## Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Существует класс задач предсказания состояния объекта, изменение которого может привести к катастрофическим последствиям. От успешного решения таких задач зависит уровень риска, связанного с эксплуатацией этих объектов, или степень надежности построения таких объектов в экологически опасных зонах. Примером таких объектов могут служить плотины, шахты, атомные электростанции, заводы, производящие экологически опасную продукцию, сейсмически опасные зоны Земного шара и т.д. Очевидно, что для достаточно сложных объектов невозможно построить точный прогноз их поведения, основываясь лишь на теоретическом моделировании их структуры и свойств. Необходимо учитывать неадекватность модели собственно объекту и сложный характер взаимосвязи объекта с окружающей средой. Для того, чтобы учесть это, необходимо осуществлять мониторинг объекта наблюдения. Отсутствие мониторинга приводит к утрате связи между деятельностью и ее результатами, что в конечном итоге неизбежно приводит к возникновению чрезвычайных ситуаций.

Цель и задачи исследований Цель диссертационной работы состоит в разработке концепции сейсмоакустического мониторинга: рупных природно-технических систем, создание математической модели мониторинга, базирующейся на выбранной концепции, и воплощение полученной модели в действующей системе.

Конкретные задачи выполненной работы предусматривали:

- разработать концепцию сейсмоакустического мониторинга природно-технических систем, базирующуюся на основе комплексного подхода к изучаемой проблеме и объединяющую в себе ряд различных традиционных и нетрадиционных подходов;
- разработать математические модели и математическое обеспечение интерактивной системы мониторинга согласно с принципами выбранной концепции;
- создать систему мониторинга, включая алгоритмические, программные и физические средства, базирующуюся на выбранном подходе;
- провести модельные испытания системы и создать действующую систему контроля состояния строительных конструкций объекта "Укрытие".

Научная новизна. Предлагается комплексная концепция мониторинга, основанная на ряде нетрадиционных методов, таких как преобразование стационарного случайного процесса в точечный поток событий

обеспечивающих возможность обработки и предварительного анализа данных в реальном масштабе времени. На основе концепции созданы оригинальные математические модели и алгоритмы, воплощенные в системе мониторинга.

Практическая ценность и реализация работы. Разработанная концепция, математические модели и алгоритмы были заложены в основу построения уникальной системы контроля состояния строительных конструкций объекта "Укрытие". Первый вариант системы был установлен на объекте "Укрытие" в 1991 г. Накоплен ряд данных, позволяющих оценивать состояние объекта.

Степень личного участия автора в выполненных работах. Автор непосредственно участвовал в построении концепции сейсмоакустического мониторинга (совместно с С.В.Мостовым), разработке математических моделей и методов (совместно с С.В.Мостовым, В.С.Мостовым), алгоритмического и программного обеспечения (совместно с В.С.Мостовым и А.Торяничом). Проводился анализ модельных и натурных данных, полученных в результате мониторинга (данные НИИСК).

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на III семинаре "Нетрадиционные методы изучения неоднородностей Земной коры" (г. Москва, 1993г.), на VI семинаре "Нетрадиционные методы изучения неоднородностей Земли коры" (г. Москва, 1994г.), на рабочих совещаниях по проблемам безопасности объекта "Укрытие" (г. Чербыль, 1993г., 1994г.), на семинаре в НИИСК (г. Киев, 1995г.), 2nd Workshop on "Application of artificial intelligence techniques in seismology and engineering seismology" (Walferdange, Luxembourg, 4 - 6 October 1995).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 работы (всего 6), в печати находится 3 статьи.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, общим объемом 117 страниц, в том числе 35 рисунков, 8 страниц списка литературы, включающего 96 наименований.

Работа выполнена в отделе математического моделирования геофизических полей Института геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины под руководством доктора физико-математических наук С.В.Мостового.

Автор глубоко благодарен С.В.Мостовому и В.С.Мостовому за постоянное участие в подготовке и обсуждении работы, А.Е.Гай, А.И.Венгеру, С.П.Несину, А.Соломину, А.Торянику, чье сотрудничество

на всех стадиях подготовки, апробации и выполнении работы определило ее результативность.

### Содержание работы.

Введение. Приводится постановка проблемы мониторинга и текущее состояние исследований в данном направлении. Формулируются цели и конкретные задачи работы.

Глава 1. Концепция сейсмоакустического мониторинга крупных природно-технических систем.

Полное решение такой задачи мониторинга распадается на решение шести частных задач.

Во-первых, возникает необходимость исследования (не связанных с предвестниками) нестационарных и стационарных помех, сопутствующих измерению каждого из прогностических параметров, и в реальном масштабе времени оптимально осуществлять процедуру фильтрации всех прогностических параметров с учетом статистических свойств помех. Для этого на этапе обучения модели фильтрации нестационарных помех необходима параллельная их регистрация и построение оптимальных оценок параметров модели связи помехи и прогностического параметра для построения оптимальных оценок параметров фильтра.

Формально эта задача имеет вид:

$$y(t) - \hat{L}[z(t)] = s(t), \quad (1)$$

где  $z(t)$  нестационарная, регистрируемая помеха,  $y(t)$  - процесс, на фоне которого наблюдается редкий сигнал, интересующий исследователя,  $\hat{L}$  - оценка оператора связи между нестационарной помехой и случайным стационарным процессом  $s(t)$ . В линейном приближении эта задача выглядит так:

$$L[z(t)] = \int_0^T h(\tau) z(t - \tau) d\tau, \quad t \in (0, T)$$

здесь  $T$  - область наблюдения, интегральный оператор с ядром  $h(t)$  осуществляет связь нестационарной помехи с наблюдаемым процессом. Предполагается, что оператор физически осуществим, т.е.  $h(t)$  имеет конечную энергию, сосредоточенную на интервале длиной  $T$ , и удовлетворяет условиям причинности. Задача сводится к оценке по достаточно длинной предыстории  $T$  ядра  $h(t)$ . Схема наблюдения в дальнейшем сводится к регистрации  $z(t)$ ,  $y(t)$  и обработке по формуле (1).

Во-вторых, на этапе обучения для совокупности простотических параметров, отфильтрованных от нестационарных помех (например, по критерию минимума дисперсий на выходе фильтра), исследовать форму и интенсивность потока сигналов в связи с происходящими событиями. Модель в этом случае имеет вид

$$y(t) = S(t, \bar{\alpha}) + \varepsilon(t), \quad (2)$$

Здесь  $S(t)$  - полезный сигнал, зависящий от множества параметров  $\bar{\alpha}$ ;  $\varepsilon(t)$  - стационарный случайный процесс с известными статистическими характеристиками. Задача заключается в оптимальной оценке вектора параметров  $\bar{\alpha}$ .

В-третьих, построить в реальном масштабе времени процедуры формального принятия решения о прогнозе, основанные на предыстории зарегистрированного векторного случайного процесса и результатах, полученных на этапе обучения, когда устанавливается связь между параметрами сигнала-предвестника и будущего события.

Формально эта задача выглядит как оценка оператора  $\hat{L}$ , связывающего вектор параметров  $\bar{\alpha}$  в модели (2) с вектором параметров  $\bar{p}$  будущего события. Оценка оператора осуществляется по выбранному критерию, например, максимуму правдоподобия либо максимуму апостериорной вероятности, на множестве  $S_k(t, \bar{\alpha})$  и  $u_k(\bar{p})$ ,  $k \in K$  зарегистрированных сигналов-предвестников и сейсмических событий  $u_k(\bar{p})$ , здесь  $K$  - множество событий.

В-четвертых, выделить из множества выбранных целей прогноза параметров информативные, т.е. те из них, которые дают устойчивую статистическую связь с последующими событиями.

Эта задача сводится к оптимальной оценке оператора  $L$ , связывающего  $\bar{\alpha}$  из модели (2) и  $\bar{p}$ , но только таких, что невязка не превышает в выбранной метрике порога  $h$ , т.е.

$$\|\hat{L}(\bar{\alpha}) - \bar{p}\| \leq h,$$

Пятым важным моментом является анализ огромных объемов самой разной информации в реальном масштабе времени. Это порождает две проблемы. Первая - выделение фрагментов непрерывно поступающей информации, которая в дальнейшем рассматривается как сигнал (задача неидентифицированного обнаружения). Вторая - измерение параметров сигнала.

Шестым, и последним пунктом, отметим собственно построение оператора прогноза, отображающего предысторию потока сигнала в вектор параметров будущего события.

Перечисленные шесть типов задач, рассматриваемые в единой совокупности, будем называть математической моделью мониторинга.

Глава 2. Математические модели и методы преобразования информации.

Возникают два типа задач: обнаружение и измерение потока сигналов и задача оценки параметров формы отдельных сигналов либо две задачи совместно. Первая из перечисленных задач сводится, в конечном итоге, к оценке апостериорной интенсивности потока сигналов, вторая, при условии стационарности поступления сигналов на регистрирующую аппаратуру, - к оценке спектральных характеристик регистрируемых процессов. В обоих случаях важным является определить выход объекта из стационарного состояния, его разладку. В дальнейшем разладку будем называть сигналом. Эти сигналы нужно разбить на классы, связанные и несвязанные с будущим событием и, если он окажется из класса предвестников, то параметры его отобразить на параметры будущего события.

Здесь мы рассмотрим аспекты работы системы, связанные с задачей оценки моментов вступления отдельных сигналов по апостериорной интенсивности потока.

### 2.1. Постановка задачи.

Для математического моделирования эмиссии сигналов, связанных с процессом образования дефектов, воспользуемся моделью волнового поля (3).

При формировании модели поля нужно учитывать, что оно представляет собой суперпозицию физически осуществимых сигналов. В каждой точке наблюдения множество сигналов может быть упорядочено во времени в поток. Модель сейсмического поля  $y(t, x)$ , основанная на потоковом представлении процесса его формирования, может быть представлена в виде

$$y(t, x) = Sp[C^T(t, A\varphi(x))] + n(t, x), \quad (3)$$

Здесь  $C$  - матрица параметров, описывающих формы отдельных волн;  $A$  - матрица параметров, описывающих фронты отдельных волн.

Если для каждой волны возможна аппроксимация вида

$$s(t, \tau(x)) = \sum_{i \in M} c_i \psi_i(t, \tau(x)) = C^T \psi(t, \tau(x)),$$

то вектор параметров  $C$  определяет форму  $i$ -й волны при выбранном наборе функций  $\psi_i(t, \tau(x))$ ,  $i \in M$ , где  $\tau(x)$  - момент вступления данной

волны. В частности, множество функций  $\psi(t, \tau(x))$  может быть подмножеством ортогонального базиса на некотором интервале  $(\tau', \tau(x) + T)$ . Например, если волна аппроксимируется  $2m+1$  членами ряда Фурье, то

$$s(t, \tau(x)) = \sum_{i=-m}^m c_i \chi(t, \tau(x)) e^{i\omega(\tau(x))},$$

Функция  $\chi(t, \tau(x))$  - характеристическая функция интервала  $(\tau(x), \tau(x) + T)$ , т.е. равная 1 на этом интервале и 0 - вне его. Множество  $M$  содержит целые числа от  $-m$  до  $m$ . Зависимость момента вступления волны  $\tau(x)$  от координаты  $x$  предполагаем в виде

$$\tau(x) = \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(x) = \mathbf{a}^T \boldsymbol{\varphi}(x),$$

где  $\boldsymbol{\varphi}(x)$  - набор функций, аппроксимирующих зависимость момента вступления волны от координаты  $x$ ;  $n$  - размерность вектора параметров  $\mathbf{a}$  и вектора функций  $\boldsymbol{\varphi}(x)$ . Если свести вектор строки  $\mathbf{a}_i^T$  для всех волн, предварительно упорядочив их по одной из компонент вектора параметров моментов вступления в прямоугольную матрицу  $\mathbf{A}$  размерностью  $q \times n$ , где  $q$  - количество волн, попавших в область наблюдения, то зависимости моментов вступления всех волн в виде функций  $\boldsymbol{\tau}(x) = \{\tau_i(x)\}_{i=1, \dots, q}$  получим следующим образом:

$$\mathbf{A} \boldsymbol{\varphi}(x) = \boldsymbol{\tau}(x)$$

В матрицу  $\Psi$  сведем все функции, аппроксимирующие формы вступивших в область наблюдения волн, так что

$$\Psi = \{\psi_{ij}\}_{i=1, \dots, q, j \in M}.$$

В выражении (5)  $n(t, x)$  - аддитивная помеха;  $Sp$  - оператор вычисления следа матрицы.

Параметры, определяющие форму каждой волны, входят в модель (3) линейно. Для них построим оптимальные оценки в предположении нормального распределения  $n(t, x)$  при условии заданной матрицы  $\mathbf{A}$  и априори нормального распределения матрицы параметров  $\mathbf{C}$ . Критерием оптимальности выбираем максимум апостериорной вероятности. Нужно отметить, что реальная система наблюдений позволяет регистрировать поле  $y(t, x)$  лишь в конечном множестве точек  $x_1, \dots, x_L$ . В таком случае поле представляется векторным случайным процессом  $y(t) = \{y_i(t, x_i)\}_{i=1, \dots, L}$ .

В зависимости от целей интерпретации оцениваются либо динамические параметры модели - это матрица параметров  $\mathbf{C}$ , либо

кинематические - это матрица параметров  $A$ . В обоих случаях введение дополнительной информации об оцениваемых параметрах необходимо, так как в противном случае задача неразрешима, потому что в результате постановки эксперимента в распоряжении исследователя имеется лишь зарегистрированное в  $L$  точках пространства поле.

Представление интерпретатора о потоке волн можно ввести в виде априорного распределения матрицы кинематических параметров  $A$ . Упорядочение строки проведено по первому в строке элементу, тогда первый столбец в матрице  $A$  будет поток точек в обычном смысле. Остальные элементы строки примем нормально распределенным вектором. Это будет означать, что форма годографа, т.е. моментов вступления волны в точки наблюдения, будет определяться элементами строки матрицы  $A$  начиная со второго, а его положение - первым элементом.

2.2. Обнаружение сигнала. В автоматическом режиме система осуществляет оценку естественного фона как стационарного случайного процесса, обнаружение сигналов на этом фоне - как разладку этого процесса.

Простейшим является алгоритм оценки нормы процесса  $y(t)$  в метрике  $L_1(T)$  и  $L_2(T)$ , здесь  $T$  длительность скользящего окна. Решение о разладке принимается при условии  $\|y(t)\|_{L_1(i,T)} - \|y(t)\|_{L_1(0,T)} \leq H$ , где  $i$  может принимать значения 1 и 2;  $H$  - выбираемый уровень значимости.

$$\|y(t)\|_{L_1(i,T)} = \frac{1}{T} \int_0^T |y(t)| dt, \quad \|y(t)\|_{L_2(i,T)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt}.$$

Следующим по сложности является алгоритм оценки интенсивно и пуассоновского потока пересечений уровня  $u$  случайным процессом  $y(t)$ .

Предположение о стационарности микросейсмического фона позволяет надеяться на хорошее согласие распределения количества пересечений высокого уровня за фиксированный отрезок времени с распределением Пуассона. Это приводит к простым выражениям для функции правдоподобия и простому алгоритму неидентифицированного обнаружения сигналов.

Предлагается следующая модель. Стационарный микросейсмический фон для уровня  $u$  дает пуассоновский поток пересечений с интенсивностью  $\lambda$ , которая определяется через нулевой и второй спектральные моменты фона  $\lambda_0$  и  $\lambda_2$  по формуле (4), как среднее число пересечений уровня  $u$  за время  $T$ , отнесенной к  $T$ .

$$E[C_2(T)] = \frac{T}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} \exp\left(-\frac{\pi^2}{2\lambda}\right), \quad (4)$$

Появление сигнала вносит разладку в стационарный процесс и меняет интенсивность на  $\gamma$ .

Функцию правдоподобия сигнала, приводящего к изменению интенсивности потока на  $\gamma$ , если наблюдалось за время  $T$   $n$  точек пересечений, определим как отношение вероятности  $n$  пересечений уровня  $u$  при условии, что  $\gamma$  из них связаны с сигналом, к вероятности того, что все  $n$  пересечений связаны со стационарным потоком микросейсм

$$\Lambda(n, \gamma) = \frac{P_{n-\gamma}(T)}{P_n(T)} = \frac{(\lambda T)^{n-\gamma} n! e^{-\lambda T}}{(n-\gamma)! (\lambda T)^n e^{-\lambda T}} = \frac{n!}{(n-\gamma)! (\lambda T)^\gamma}$$

Здесь  $P_n(T)$  - вероятность  $n$  событий в пуассоновском потоке за время  $T$ ,  $\Lambda(n, \gamma)$  - функция правдоподобия.

Эта функция имеет седловую точку, координаты которой на горизонтальной плоскости  $\gamma = 0, n = \lambda T$ , а значение  $\Lambda$  в этой точке равно 1.  $\ln \Lambda(n, \gamma) = \ln \Gamma(n+1) - \ln \Gamma(n-\gamma+1) - \gamma \ln \lambda T$ , здесь  $\Gamma(n)$  - гамма функция.

В задаче обнаружения нас могут интересовать два случая:

1. При полученном в результате измерения в скользющем окне  $T$   $n$  пересечений, правдоподобия разладки стационарного случайного процесса, т.е. речь идет об неидентифицированном обнаружении сигнала.

2. При известном сигнале, т.е. известном значении  $\gamma$ , нужно определить те значения  $n$ , при которых его можно обнаружить, т.е. правдоподобие присутствия сигнала превосходит заданный порог  $H$ .

Все вышесказанное определяет алгоритм обнаружения сигнала как разладку стационарного случайного процесса микросейсмического фона. Для выбранного уровня  $u$  микросейсмический фон проектируется на пуассоновский поток пересечения этого уровня, интенсивность которого определяется по формуле (4). Для заданного уровня значимости правдоподобия  $H$  определяется область  $S$  значений  $n$  и  $\gamma$ , для  $\Lambda(n, \gamma) \geq H$ . Решающее правило заключается в том, что если для оценки интенсивности  $\hat{n}$  найдется  $(n, \gamma) \in S$ , то принимается решение, что в области наблюдения  $T$  микросейсмического фона присутствует сигнал, в противном случае считаем, что разладка случайного процесса не произошла и сигнала нет.

### 2.3. Спектральные преобразования.

Ограничение модуля спектра. Пусть есть функция  $f(t)$  и ее спектральное представление  $F(\lambda)$ , т.е. функции  $f(t)$  и  $F(\lambda)$  связаны прямым  $F(\lambda) = \int_{\mathbb{R}^1} e^{-i(\lambda t)} f(t) dt$  и обратным  $f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}^1} e^{i(\lambda t)} F(\lambda) d\lambda$  преобразованием Фурье.

Нелинейное преобразование спектра в одномерном случае заключается в том, что модуль  $|F(\lambda)|$  ограничивается значением  $u$ . Для модуля вводим новую функцию  $\hat{F}(\lambda)$ , и  $\hat{f}(t)$  ее обратное преобразование Фурье, такую, что

$$\hat{F}(\lambda) = \begin{cases} F(\lambda), & \lambda: |F(\lambda)| < u, \lambda \in \mathbb{R}^1 / \Omega \\ ue^{i \arg F(\lambda)}, & \lambda: |F(\lambda)| \geq u, \lambda \in \Omega \end{cases}$$

Это означает, что функция  $\hat{F}(\lambda)$  совпадает с  $F(\lambda)$  на множестве значений аргумента, для которых  $|F(\lambda)|$  не превышает  $u$  и равно  $ue^{i \arg F(\lambda)}$  для  $\lambda$ , на которых модуль  $|F(\lambda)|$  превышает уровень  $u$ .

По теореме Планшереля для функций  $f(t)$  и  $g(t)$  со спектральными функциями  $F(\lambda)$  и  $G(\lambda)$  для скалярного произведения, которое обозначаем круглыми скобками, справедливо равенство  $(f(t), g(t)) = (G(\lambda), F(\lambda))$ .

Пусть  $\Omega$  множество значений  $\lambda$ , на котором  $|F(\lambda)|$  превышает или равно  $u$ , тогда во временной области эти изменения дадут

$$|f(t) - \hat{f}(t)| = \left| \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega} (|F(\lambda)| - u) e^{i \arg(F(\lambda) - u)} d\lambda \right|.$$

Из последнего выражения следует, что изменения, вносимые таким преобразованием, зависят от множества  $\Omega$ , на котором осуществляется ограничение спектра, и от значения уровня  $u$ .

Полосовая фильтрация. В этом случае формальное описание такого преобразования имеет вид

$$\hat{F}(\lambda) = \begin{cases} F(\lambda), & \lambda \in \mathbb{R}^1 / \Omega, \\ 0, & \lambda \in \Omega. \end{cases}$$

Степень вмешательства оператора в интерактивном режиме определим по норме в метрике

$$L_2 \cdot \|F(\lambda) - \hat{F}(\lambda)\|^2 = \int_{\mathbb{R}^1 / \Omega} (F(\lambda) - \hat{F}(\lambda)) \overline{(F(\lambda) - \hat{F}(\lambda))} d\lambda + \int_{\Omega} F(\lambda) \overline{\hat{F}(\lambda)} d\lambda = \|F(\lambda)\|_{\Omega}^2.$$

Квадрат нормы разности  $f(t) - \hat{f}(t)$  будет

$$\int_{\Omega} F(\lambda) \overline{F(\lambda)} d\lambda = \int_{\Omega} |F(\lambda)|^2 d\lambda = \|f(t) - \hat{f}(t)\|^2.$$

Коррекция формы сигнала. В интерактивном режиме возможно изменение формы сигнала уменьшением модуля спектра на фиксированный уровень  $u$ .

$$\hat{F}(\lambda) = \begin{cases} (|F(\lambda)| - u) e^{i \arg F(\lambda)}, & |F(\lambda)| > u, \lambda \in R^1 / \Omega, \\ 0, & \lambda \in \Omega. \end{cases}$$

Оценим квадрат нормы разности  $F(\lambda)$  и  $\hat{F}(\lambda)$  в метрике  $L_2$ :

$$\begin{aligned} \|F(\lambda) - \hat{F}(\lambda)\|^2 &= \iint_{R^1 / \Omega} [(|F(\lambda)| - u) e^{i \arg F(\lambda)} - F(\lambda)] [(|F(\lambda)| - u) e^{-i \arg F(\lambda)} - \overline{F(\lambda)}] d\lambda + \\ &+ \int_{\Omega} |F(\lambda)|^2 d\lambda = \int_{R^1 / \Omega} u^2 d\lambda + \int_{\Omega} |F(\lambda)|^2 d\lambda \leq u^2 \text{mes}(R^1) \end{aligned}$$

Мы получили, что  $\|f(t) - \hat{f}(t)\|^2 \leq u^2 \text{mes}(R^1)$ .

Нужно отметить, что  $|F(\lambda)|$  финитная функция и  $\text{mes}(R^1)$  равно длине носителя этой функции.

#### 2.4. Корреляционный анализ.

Оценка задержек прихода сигналов на различные датчики. Для оценки разности моментов прихода сигнала на датчики сети наблюдения использовался критерий максимума корреляционной функции. Для  $i$ -го датчика принимаем следующую модель процесса регистрации сигнала:

$$y_i(t) = s(t - \tau_i) + n_i(t) \quad \text{где} \quad s(t - \tau_i) = \begin{cases} s(t - \tau_i), & t > \tau_i, t \in \mathfrak{D}, \\ 0, & t \leq \tau_i \end{cases}$$

и  $n_i(t)$  - стационарный эргодичный случайный процесс, для которого возможно принять следующие допущения:

$$E(n_i(t), n_j(t)) = 0, E(n_i(t)) = 0, E(n_i(t), n_j(t + \tau)) = R_{ij}^n(\tau),$$

$\mathfrak{D}$  - область наблюдения,  $E$  - символ математического ожидания. Для выбранной модели процесса корреляционная функция

$$\begin{aligned} K(\tau) &= \frac{1}{\mathfrak{D}} \int_{\mathfrak{D}} y_i(t) y_j(t + \tau) dt = \\ &= \frac{1}{\mathfrak{D}} \int_{\mathfrak{D}} [s(t - \tau_i) s(t - \tau_j + \tau) + s(t - \tau_i) n_j(t + \tau) + \\ &+ s(t - \tau_j + \tau) n_i(t) + n_i(t) n_j(t + \tau)] dt = \\ &= R^s(\tau) + \frac{1}{\mathfrak{D}} \int_{\mathfrak{D}} s(t - \tau_i) n_j(t) dt + \frac{1}{\mathfrak{D}} \int_{\mathfrak{D}} s(t - \tau_j + \tau) n_i(t) dt = R^s(\tau), \end{aligned}$$

так как для эргодического процесса при больших  $\mathfrak{Z}$  второй и последний интегралы равны  $E(n_i(t), n_j(t)) = E(n_i(t))$ ; при  $\tau = \tau_j - \tau_i$ , первый интеграл равен квадрату нормы сигнала  $s(t)$  и  $K(\tau)$  при таком значении  $\tau$  имеет глобальный экстремум. Отсюда следует алгоритм определения значения  $\tau_j - \tau_i$ . Вычисляется корреляционная функция  $K(\tau)$ , отыскивается ее глобальный экстремум и точка  $\tau$ , в которой  $K(\tau)$  имеет глобальный экстремум, - это значение  $\tau_j - \tau_i = \Delta_{ij}$ , разности времен прихода сигнала на  $i$ -й и  $j$ -й приемники.

Коррекция матрицы разностей моментов вступления отдельных сигналов. При вычислении  $\Delta_{ij}$  мы не учитывали, что  $\mathfrak{Z}$  не всегда достаточно для получения оценок  $E(n_i(t))$ ,  $E(n_i(t), n_j(t + \tau))$  и оценка  $\Delta_{ij}$  может оказаться отличной от  $\Delta_{ij}$  из-за этого обстоятельства и из-за эффектов, связанных с неидентичностью функций в областях достаточно коротких, но существенно влияющих на значение оценок  $\Delta_{ij}$  вблизи концов интервалов  $(0, \mathfrak{Z})$ . Поэтому, в случае неравенства  $\Delta_{ij}$  и  $\Delta_{ij}$  применяем анализ на это равенство и в случае  $\Delta_{ij} \neq \Delta_{ij}$  эти значения для анализа в дальнейшем не используются.

### Глава 3. Описание системы сейсмоакустического мониторинга

#### 3.1. Назначение и общая схема системы.

Система контроля состояния строительных конструкций представляет собой комплекс аппаратных и программных средств обработки сейсмоакустических наблюдений от блоков датчиков, вмурованных в тело объекта. Система предназначена для

- автоматизации обработки всех сейсмоакустических наблюдений с целью анализа механического состояния несущих конструктивных элементов объекта в условиях сейсмических и производственных (антропогенных) шумов, включая пеленгацию и оценку параметров источников сейсмоакустических полей объекта на фоне нестационарных помех; идентификацию и локализацию сигнала-предвестника возможных разрушений объекта, осуществляемые путем пространственно-временной обработки сейсмоакустической информации на ЭВМ в реальном масштабе времени; интегральную оценку состояния объекта;

- выдачи на экран дисплея легко и быстро интерпретируемой (оперативной) информации о текущем состоянии объекта и его

конструктивных элементов, на основе вышеупомянутой обработки наблюдений;

- проведения детального анализа выделенных сигналов и фрагментов формы (включая корреляционный, спектральный, статистический анализ и т.д.) с целью определения тенденций изменения состояния объекта и прогноза его поведения.

Система включает в себя две основных подсистемы:

- 1) подсистему сбора и предварительной аналоговой обработки;
- 2) стенд цифровой обработки сейсмоакустических полей (СЦОСП).

3.2. Стенд цифровой обработки. СЦОСП включает в себя ПЭВМ и Устройство сканирования и ввода (УСВ) с приборным интерфейсом и предназначен для цифрового преобразования многомерных аналоговых сигналов, поступающих с СНСР, и для ввода полученных данных в буферное ОЗУ ПЭВМ с целью дальнейшей обработки информации согласно применяемому пакету программ, а также для выборочной регистрации и сохранения записей сигналов, содержащих важные события.

Рассмотрим состав системы и назначение отдельных функциональных узлов подсистемы.

Каналы телеметрии предназначены для формирования входного многомерного сигнального процесса от сейсмоакустических датчиков, его усиления, фильтрации и передачи в Центр обработки.

Коммутатор каналов предназначен для скоростного переключения каналов телеметрии на один быстродействующий АЦП и выработки импульсов тактирования и импульсов дискретизации сигнального процесса в соответствии с частотой Найквиста.

Приборный интерфейс предназначен для цифрового преобразования аналогового сигнального процесса, приведения полученных цифровых данных к стандарту системной шины ПЭВМ и передаче этих данных в ОЗУ компьютера в реальном времени.

ПЭВМ предназначена для регистрации и обработки вводимых данных в реальном времени и выдачи на монитор информации, легко интерпретируемой оператором.

3.3. Программное обеспечение системы. Программная часть системы ориентирована на совместную работу с модулем УСВ на ПЭВМ IBM PC AT (с сопроцессором) под управлением MS DOS версии 3.0 и выше.

Функционально система может быть представлена в виде трех модулей: сбор информации - основной режим работы системы, в котором производится выделение и регистрация событий; анализ информации -

предназначен для просмотра информации о последних зарегистрированных событиях; настройка системы - предназначена для изменения параметров алгоритмов обнаружения, режимов аппаратных и программных средств.

Программно система была реализована на языке Си и состоит из функций различного уровня: функции низкого уровня; сервисные функции; математические функции обработки информации.

К функциям низкого уровня относятся функции, обеспечивающие связь между ПЭВМ и устройством сканирования и ввода (УСВ).

Так функции ввода данных предназначены для инициализации УСВ на ввод с циклическим опросом каналов, заполнением выборкой буфера данных и установки в 1 флага - признака поступления новой порции данных в буфер (глобальная переменная). Кроме того, функция анализирует состояние текущего времени и активизирует системную функцию прерывания по таймеру с частотой системных часов.

Сервисные функции предназначены для обеспечения удобства работы оператора при настройке системы и интерпретации получаемых данных. К ним относятся функции выбора из меню, редактирования параметров настройки, представления записей базы данных, функций графического представления информации и т.д.

Математические функции обработки информации предназначены для осуществления в системе математических преобразований, осуществляемых в соответствии с используемой концепцией мониторинга. К ним относятся:

- функции обнаружения разладки пуассоновского потока;
- функции прямого и обратного преобразования Фурье;
- кросс- и автокорреляционные функции;
- функции нелинейных преобразований спектра;
- функции параметризации спектра;
- статистические функции.

Все функции реализованы в дискретном варианте, для входных данных с заданным постоянным шагом дискретизации.

#### Глава 4. Контроль состояния строительных конструкций объекта "Укрытие"

В настоящее время единственно возможным способом контроля, не доступных для человека (по причине высокого уровня радиации) частей объекта "Укрытие", является "прослушивание" с помощью специальным образом организованной антенной решеткой, составленной из датчиков акустического диапазона частот. В Институте геофизики НАН Украины на объекте "Укрытие" такая система создана на базе замурованных в

объект в 1986 году семи 3-х компонентных сейсмоакустических приемников (СВ-5, СГ-10), регистрирующих сигналы в диапазоне частот от 3 до 300 Гц. Система в реальном масштабе времени обнаруживает акустические сигналы и идентифицирует ближайший к источнику сигнала датчик. Значимость работы вытекает из необходимости прогнозировать возможные разрушения Саркофага, под которым захоронена большая часть высокоактивных отходов аварийного реактора.

Для подтверждения возможности использования разработанной концепции отделом математического моделирования геофизических полей института геофизики им. С.И. Субботина Н. А. НУ совместно с НИИСК был проведен ряд экспериментов по уточнению методики контроля обрушений строительных конструкций объекта "Укрытие". Эксперименты проводились на панели перекрытия. В серии экспериментов панель подвергалась различным внешним воздействиям: ударные воздействия в различных частях панели; ударные воздействия возле опор панели; вибрационное воздействие от работающего оборудования; свободная панель. По результатам эксперимента делается заключение о возможности автоматического контроля обрушений строительных конструкций посредством спектрального анализа, регистрируемых в сейсмоакустическом частотном диапазоне, событий и параметризации анализируемых спектров.

Аппаратно-программные средства Системы могут быть использованы для анализа в реальном масштабе времени любых процессов в акустическом диапазоне частот.

#### Основные результаты работы.

1. Разработана концепция сейсмоакустического мониторинга крупных природно-технических систем, базирующаяся на основе комплексного подхода к изучаемой проблеме и объединяющая в себе ряд различных традиционных и нетрадиционных подходов.

2. Согласно принципам выбранной концепции разработаны математические модели и математическое обеспечение интерактивной системы мониторинга. Непосредственно автором разрабатывались методы обнаружения сигналов, параметризации регистрируемых фрагментов волнового поля и классификации. Созданные методы обнаружения рассчитаны для работы с данными в масштабе реального времени и базируются на преобразовании стационарного случайного процесса в поток событий.

3. Создана система мониторинга, включая алгоритмические, программные и физические средства.

4. Разработанная система внедрена на объекте "Укрытие". Аппаратно-программные средства Системы могут быть использованы для анализа в реальном масштабе времени любых процессов в сейсмоакустическом диапазоне частот.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Мостовой С.В., Мостовой В.С., Осадчук А.Е. Интерактивная система мониторинга сооружений // Кибернетика и вычислительная техника. - 1993. - Вып.100. - С.64-69.

2. Mostovoy S.V., Mostovoy V.S., Osadchuk A.E.. The mathematical model of forecasting seismic events // 19 General Assembly of EGS, Grenoble 25-29 April. - 1994.

3. Мостовой С.В., Мостовой В.С., Осадчук А.Е.. Мониторинг сейсмоопасных зон и экологически опасных объектов с целью прогноза риска. // Геофизический журнал. - 1995. - N2. - С.60-64.

Осадчук А.Е. Сейсмоакустичний моніторинг великих природно-технічних систем.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.12 - геофізика. Інститут геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України, Київ, 1995.

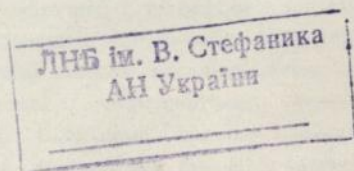
Захищається рукопис на базі 3 наукових праць, які включають результати побудови концепції сейсмоакустичного моніторингу великих природно-технічних систем. Запропоновано математичні моделі та алгоритми чисельної обробки, які реалізують вибрану концепцію. Особливу увагу приділяється алгоритмам обробки даних у реальному часі.

Osadchuk A.E. Seismoacoustic monitoring of complex nature-technical systems.

Candidate of Phis. & Math. Sci. thesis, speciality 01.04.12 - geophysics. Institute of geophysics, NAS of Ukraine, Kiev, 1995.

Defended is the manuscript based on 3 scientific papers containing the results of the developing seismoacoustic monitoring of complex nature-technical systems conception. Given mathematical models and algorithms of numerical data procession that realize builded conception. The main attention is given to real time algorithms of the data procession.

Ключові слова: моніторинг, сейсмічні методи, виявлення сигналів.



Подп. в печ. 10.11.95. Формат 60×84/16. Бум. для множ. аппарат.  
Оф. печ. Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,05. Уч.-изд. л. 1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ 835.

---

Редакционно-издательский отдел с полиграфическим участком  
Института кибернетики имени В. М. Глушкова НАН Украины  
252022 Киев 22, проспект Академика Глушкова, 40

AB 33606

AB 33.606

Abstract of a paper presented at the ...

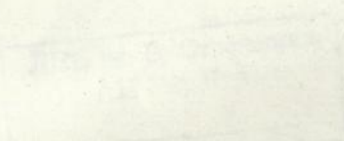
Abstract of a paper presented at the ...

Abstract of a paper presented at the ...

Abstract of a paper presented at the ...

Abstract of a paper presented at the ...

Abstract of a paper presented at the ...



From a report 10.11.55 ...

Received from the ...