

УДК 004.73(042.3)

Пономаренко А.В., к.т.н., (Национальный авиационный университет)

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ

Пономаренко О.В. Алгоритм виявлення і вимірювання координат джерела акустичних шумів. Розглянута задача виявлення джерела акустичного шуму, що знаходиться у водному середовищі, на фоні завад від інших джерел і внутрішніх шумів. Розроблений алгоритм багатоканального виявлення-вимірювання і синтезовані пристрої зі стеженням за фазовими зсувами сигналів та багатоканальні пристрої з комбінуванням за максимумом відношення правдоподібності. Дані рекомендації по побудові пристроїв сумісної обробки сигналів.

Ключові слова: НАСКРІЗНИЙ ДЕФЕКТ, АКУСТИЧНИЙ ШУМ, СЕРЕДОВИЩЕЗ ВИПАДКОВИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ, ВІДНОШЕННЯ ПРАВДОПОДІБНОСТІ, СТЕЖАЧИЙ ПРИСТРІЙ ВИЯВЛЕННЯ, БАГАТОКАНАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЯВЛЕННЯ

Пономаренко А.В. Алгоритм обнаружения и измерения координат источника акустических шумов. Рассмотрена задача обнаружения источника акустического шума, находящегося в водной среде, на фоне мешающих сигналов от других источников и внутренних шумов. Разработан алгоритм многоканального обнаружения-измерения и синтезированы устройства следящего типа и неследящего устройства с комбинированием по максимуму отношения правдоподобия. Даны рекомендации по построению устройств совместной обработки сигналов.

Ключевые слова: СКВОЗНОЙ ДЕФЕКТ, АКУСТИЧЕСКИЙ ШУМ, СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНАЯ СРЕДА, ОТНОШЕНИЕ ПРАВДОПОДОБИЯ, СЛЕДЯЩИЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ, МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ

Ponomarenko O.V. The algorithm of detection and estimation of coordinates of the source of acoustic noise. The problem of detection of source of acoustic noise being in a water environment is considered, with a presence of interference from other sources and internal noises. The algorithm of multi channel detection and estimation is developed and synthesized device of searching type and non-searching device with combining on the maximum of likelihood ratio. The recommendations on construction of devices of joint treatment of signals are given.

Keywords: THROUGH DEFECT, ACOUSTIC NOISE, RANDOM INHOMOGENEOUS ENVIRONMENT, LIKELIHOOD RATIO, TRACKING DETECTOR, MULTICHANNEL DETECTOR

Введение. При мониторинге и поиске неисправностей в трубопроводах, проходящих по дну водоемов, необходимо решать задачу дистанционного обнаружения дефектов трубы, в первую очередь, сквозных дефектов. Эту задачу можно наиболее успешно решать с помощью систем датчиков (приемников) акустических шумов, которыми сопровождается истечение жидких или газовых сред через сквозные дефекты.

Поставленная задача осложняется наличием помех, шумов разного характера, неоднородностей среды распространения сигнала. По существу, это задача обнаружения случайного сигнала на фоне случайных помех и шумов.

Для синтеза системы обнаружения-измерения таких сигналов необходимо применять методы теории вероятностей и математической статистики. Математическое описание случайных сигналов и помех сводится к определению их статистических характеристик и обоснованному выбору вероятностных распределений, которыми наиболее адекватно описываются выборки данных на входах датчиков.

Модели полезных и мешающих сигналов. Постановка задачи. Рассматривается линейная система обнаружения, состоящая из M пассивных датчиков (приемников), на входы которых поступают полезный сигнал и L мешающих сигналов (рис. 1). Пусть датчики расположены вдоль оси X . В каждом датчике имеется приемная антенна с диаграммой направленности (ДН) $G(\phi, \theta)$. Обозначим ширину ДН на уровне половинной мощности по оси X через $\Delta\phi_{0,5}$, по оси Y через $\Delta\theta_{0,5}$. Предполагается, что диапазон $\phi_{\min} \dots \phi_{\max}$ углов прихода сигналов от источника на любой из датчиков лежит в пределах $\Delta\phi_{0,5}$. Также положим, что координата x_s излучающего источника лежит в пределах $[x_1, x_n]$, где $x_i, i = \overline{1, M}$ – координаты приемников.

Сигналы от каждого датчика поступают по линиям передачи данных в устройство совместной обработки. В датчиках и линиях передачи данных имеются внутренние шумы. Степень пространственной когерентности полезных и мешающих сигналов зависит как от характеристик источников, так и от геометрических соотношений в системе [1...3].

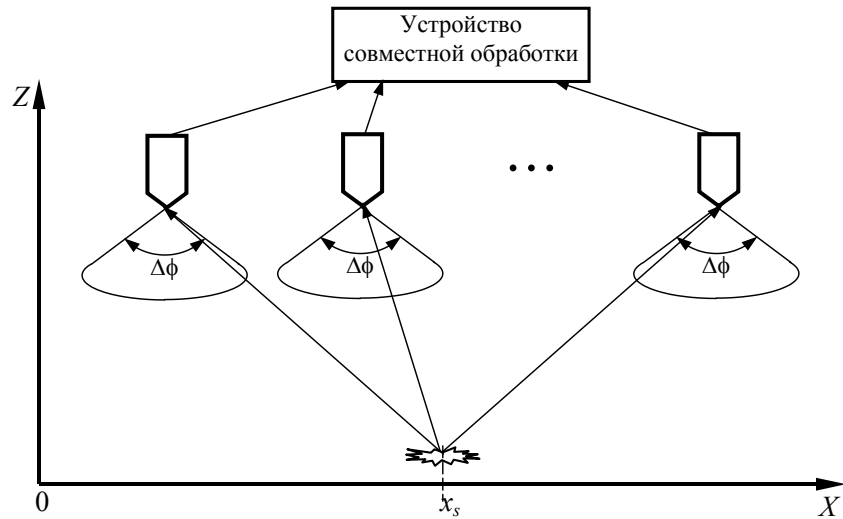


Рис. 1. Структурная схема системы обнаружения и измерения координат источника акустического шума (источники помех не изображены)

Оптимальный обнаружитель в общем случае представляет собой пространственно-временной

фильтр [4], в котором учитывается не только временная, но и пространственная корреляция сигналов. При централизованной обработке сигналы со всех датчиков без каких-либо преобразований передаются на устройство совместной обработки, где реализуется оптимальный алгоритм обнаружения.

Рассмотрим вектор входных сигналов в системе:

$$\bar{Y}(t) = \alpha_1 \bar{s}(t, \bar{\Phi}) + \alpha_2 \bar{s}_n(t, \bar{\Psi}) + \bar{N}(t), \quad (1)$$

где α_1, α_2 равны нулю в случае отсутствия сигнала (помехи) или единице в в случае их наличия; $\bar{s} = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ – вектор полезных сигналов, компоненты которого в общем

случае различны; $\bar{s}_n^T = \left\{ \sum_{l=1}^L s_{n1l}, \sum_{l=1}^L s_{n2l}, \dots, \sum_{l=1}^L s_{nMl} \right\}$ – вектор мешающих сигналов от L

источников помех с угловыми координатами, описываемыми вектором $\bar{\Psi} = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_L\}$;

$\bar{N}^T = \{n_1, n_2, \dots, n_M\}$ – вектор внутренних шумов приемников; T – символ транспонирования.

Аргументы для краткости опущены. Компоненты $\sum_{l=1}^L s_{nkl}, k = \overline{1, M}$ вектора мешающих

сигналов представляют собой векторные суммы сигналов от L источников помех в каждой из M приемных позиций.

Без потери общности будем считать, что мешающие сигналы присутствуют всегда и выдвинем следующие гипотезы:

$$\left. \begin{aligned} H_1: \alpha_1 = \alpha_2 = 1; \quad \bar{Y}(t) = \bar{s}(t, \bar{\Phi}) + \bar{s}_n(t, \bar{\Psi}) + \bar{N}(t); \\ H_0: \alpha_1 = 0; \alpha_2 = 1; \quad \bar{Y}(t) = \bar{s}_n(t, \bar{\Psi}) + \bar{N}(t). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Компоненты векторов $\bar{s}(t, \bar{\Phi})$ и $\bar{s}_n(t, \bar{\Psi})$ являются выборками-реализациями комплексных случайных процессов [5]. Статистические характеристики компонентов различны и зависят от параметров источников и конфигурации системы. Эти характеристики могут быть известны априори или оцениваются в процессе обнаружения-измерения.

При исследовании задач обнаружения сигналов в многоканальных системах, подобных той, что рассматривается в данной работе, необходимо учитывать характеристики среды

распространения. Когерентная обработка сигналов и компенсация помех возможны лишь при учете и компенсации этих искажений.

Задачи распространения волн в случайно-неоднородных средах рассмотрены достаточно подробно [1...3]. Установлено, что на пути распространения встречается большое число локальных неоднородностей показателя преломления. Поэтому в соответствии с центральной предельной теоремой справедливо допущение о гауссовости распределения флюктуаций фазы волны в каждой точке приема [4]. Кроме того, в упомянутых работах отмечается, что эти флюктуации сравнительно медленные. Их изменениями на интервале наблюдения можно пренебречь [4].

Введем вектор $\bar{\Theta} = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_M\}$ фазовых сдвигов сигналов в каждой приемной позиции, компоненты которого, в соответствии с вышеизложенным, можно считать гауссовскими случайными величинами на интервале наблюдения. Априорная плотность вероятности j -го компонента вектора $\bar{\Theta}_j, j = \bar{0}, \bar{1}$ имеет вид:

$$\left. \begin{array}{l} \text{– по гипотезе } H_1 \quad W_{H1}(\vartheta_1) = G : \hat{\vartheta}_{1i}, \sigma_{\vartheta_{1i}}^2 \\ \text{– по гипотезе } H_0 \quad W_{H0}(\vartheta_1) = G : \hat{\vartheta}_{0i}, \sigma_{\vartheta_{0i}}^2 \end{array} \right\}, \quad (3)$$

где $G : \hat{x}, y^2$ – гауссовское распределение с математическим ожиданием \hat{x} и дисперсией y^2 . Математические ожидания $\hat{\vartheta}_{1i}, \hat{\vartheta}_{0i}$ и дисперсии $\sigma_{\vartheta_{1i}}^2, \sigma_{\vartheta_{0i}}^2$ определяются конфигурацией измерительной системы, расположением источника сигнала и источников помех.

Вследствие взаимной статистической независимости векторов \bar{Y} и $\bar{\Theta}$ условные плотности вероятности

$$W_j(\bar{Y}, \bar{\Theta} | H_j) = W_j(\bar{Y} | \bar{\Theta}_j, H_j) W_j(\bar{\Theta}_j | H_j), \quad (4)$$

где $W_j(\bar{\Theta}_j | H_j) = \prod_{i=1}^M W(\vartheta_{ij}), j = \bar{0}, \bar{1}$.

В соответствии с формулой Байеса

$$W_j(\bar{\Theta}_j | \bar{Y}, H_j) = \frac{W_j(\bar{\Theta}_j | H_j) W_j(\bar{Y} | \bar{\Theta}_j, H_j)}{\int_{-\infty}^{\infty} W_j(\bar{\Theta}_j | H_j) W_j(\bar{Y} | \bar{\Theta}_j, H_j) d\bar{\Theta}}. \quad (5)$$

С учетом выражений (1 – 5) отношение правдоподобия (ОП) имеет вид

$$\Lambda(\bar{Y}, \bar{\Theta}) = \frac{W_1(\bar{Y} | \bar{\Theta}_1, H_1) \prod_{i=1}^M W_1(\vartheta_i)}{W_0(\bar{Y} | \bar{\Theta}_0, H_0) \prod_{i=1}^M W_0(\vartheta_i)}. \quad (6)$$

Теперь рассмотрим оптимальный алгоритм обнаружения-измерения.

Оптимальный алгоритм. Алгоритм оптимального обнаружения заключается в вычислении ОП и сравнении с порогом Λ_n . Однако величина $\Lambda(\bar{Y}, \bar{\Theta})$ зависит не только от энергии сигнала, помех и шумов, но и от точности компенсации фазовых сдвигов. Поэтому необходимо максимизировать ОП [выражение (6)] по всем ϑ_i . Максимум ОП достигается при условии:

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \bar{\Theta}} = \frac{W_1(\bar{Y} | \bar{\Theta}_1, H_1)}{W_0(\bar{Y} | \bar{\Theta}_0, H_0)} \frac{\partial}{\partial \bar{\Theta}} \left[\frac{\prod_{i=1}^M W_1(\vartheta_i)}{\prod_{i=1}^M W_0(\vartheta_i)} \right] = 0. \quad (7)$$

Для максимизации ОП можно использовать как следящие, так и неследящие устройства [6,7]. На рис. 2 изображена схема многоканального обнаружителя со следящим устройством и управляемыми фазовращателями. Процесс управления фазовращателями заканчивается в момент принятия решения о наличии или отсутствии полезного сигнала. Если решение еще не принято, а максимум ОП достигнут, поиск прекращается. Система переходит в режим слежения за максимумом ОП.

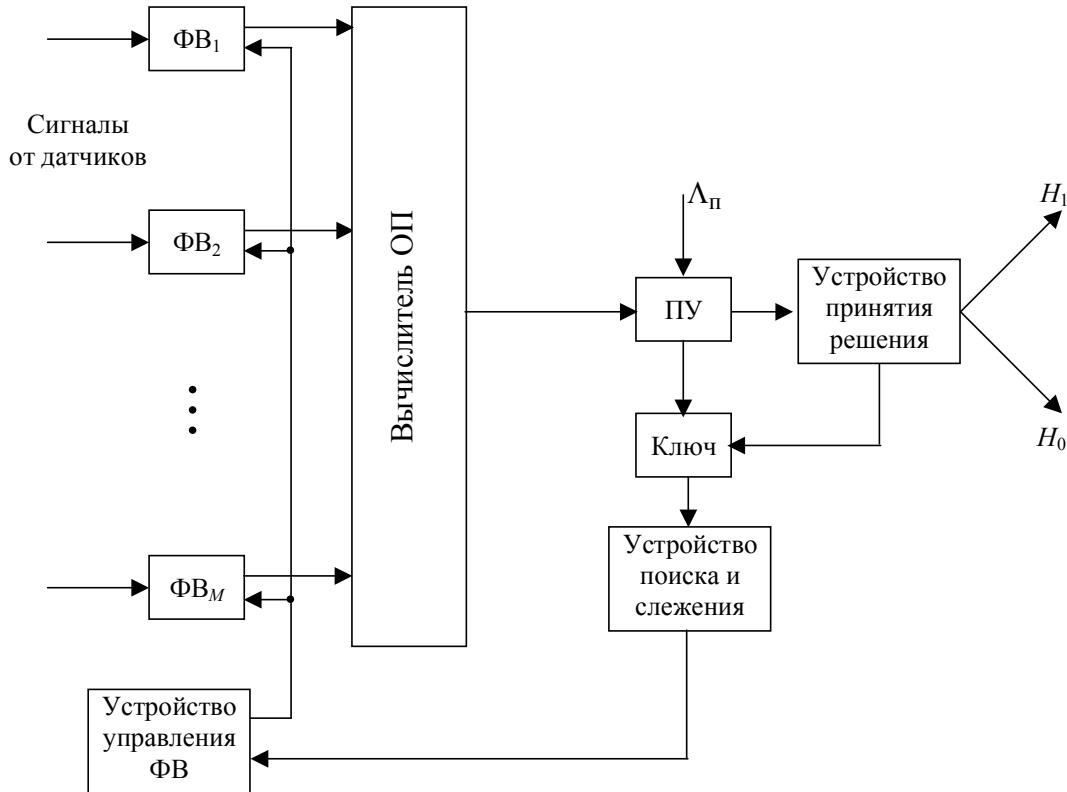


Рис. 2. Схема следящего обнаружителя-измерителя.
ФВ – фазовращатели; ПУ – пороговое устройство

Для нахождения вектора $\bar{\Theta}_{j\text{opt}} = \bar{\Theta}_j + \delta\bar{\Theta}_j$; $[\delta\bar{\Theta}_j = \{\delta\vartheta_{j1}, \delta\vartheta_{j2}, \dots, \delta\vartheta_{jM}\}]$, при котором достигается максимум $\Lambda(\bar{Y}|\bar{\Theta}_j, H_j)$, можно использовать различные методы оптимизации. Однако следящее устройство выравнивания фазовых сдвигов нецелесообразно применять по следующим соображениям.

1. Функционал $\Lambda(\bar{Y}|\bar{\Theta}_j, H_j)$ может иметь несколько локальных экстремумов в зависимости от степени разброса фазовых ошибок и числа приемных позиций. Для поиска глобального экстремума необходимо использовать сложные многошаговые методы.
2. Оптимальность обнаружения достигается только в момент нахождения экстремума. В процессе поиска может иметь место потеря качества обнаружения. Если же потребовать обеспечения оптимальности обнаружения на всем интервале наблюдения, необходимо записывать всю выборку наблюдаемых сигналов, после чего настраивать фазовращатели. Резко повышаются требования к быстродействию алгоритма самонастройки, к объему буферной памяти, скорости обмена данными между процессором и памятью, увеличивается время наблюдения.
3. Техническая реализация высокоскоростных перестраиваемых фазовращателей сопряжена с большими трудностями.

Поэтому целесообразно рассмотреть неследящее устройство выравнивания фаз типа многоканального анализатора с комбинирование по максимуму ОП [7]. Для выравнивания

всех фазовых сдвигов ϑ_{ij} необходимо изменять результирующий фазовый сдвиг ϑ_{rij} сигнала, принимаемого в каждой позиции, таким образом, чтобы в устройстве совместной обработки все эти сдвиги были одинаковы:

$$\vartheta_{rij} = \vartheta_{j1} + \delta\vartheta_{j1} = \vartheta_{j2} + \delta\vartheta_{j2} + \dots + \vartheta_{jm} + \delta\vartheta_{jm} = \vartheta_{rj}.$$

Поскольку все ϑ_{ij} случайны, корректирующие сдвиги $\delta\vartheta_{ij}$ определить невозможно. Следовательно, необходимо разбить диапазон $\{\delta\vartheta_{ij\min}, \delta\vartheta_{ij\max}\}$ возможных значений $\delta\vartheta_{ij}$ на k малых интервалов $\delta_k\vartheta_{ij}$, вычислять ОП для всех возможных комбинаций $\delta\vartheta_{ij}$ и выбирать максимальное ОП. Схема многоканального обнаружителя с централизованной обработкой и комбинированием по максимуму ОП изображена на рис. 3.

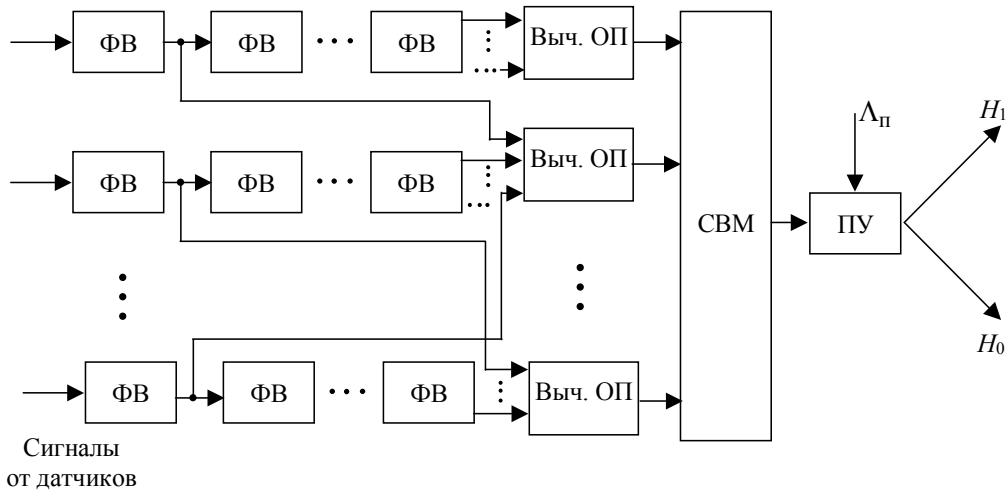


Рис. 3. Неследящий многоканальный обнаружитель-измеритель с комбинированием по максимуму отношения правдоподобия. СВМ – схема выбора максимума

Чтобы определить число комбинаций при выравнивании фаз, запишем каждую комбинацию в виде M -разрядного K -ичного числа $P(M, K) = b_1 b_2 \dots b_m \dots b_M$. Каждый разряд b_m может принимать K значений от 0 до $K-1$ и представляет собой номер фазовращателя, с которого снимается сигнал. Каждому конкретному значению $b_m = k$ соответствует корректирующий фазовый сдвиг $\delta\vartheta_{jm} = k\delta_k\vartheta_j$. Некоторый комбинации корректирующих фазовых сдвигов будут отличаться на одинаковые величины в одних и тех же каналах, например,

$$P_0(M, K) = 000\dots 0; \quad P_1(M, K) = 111\dots 1; \quad \text{или} \quad P_2(M, K) = 011\dots 1; \quad P_3(M, K) = 122\dots 2.$$

Такие комбинации описываются числами вида

$$P_\beta(M, K) = [b_1 + \beta][b_2 + \beta] \dots [b_m + \beta] \dots [b_M + \beta], \text{ где } b_m, \beta = 0, 1, 2, \dots, M-1, \text{ но } b_i + \beta \leq M-1.$$

Результаты обработки всех сигналов с такими комбинациями фазовых сдвигов будут одинаковыми. Следовательно, из всех таких комбинаций можно оставить только одну (например, простейшую – при $\beta = 0$). Расчеты показывают, что число неустранимых (минимальных) комбинаций $P_{\min} = K^M - (K-1)^M$.

Однако даже после минимизации числа комбинаций P обнаружитель остается довольно сложным и громоздким. Поэтому необходимо рассматривать возможности его упрощения.

Заключение. В данной работе рассмотрена задача обнаружения источников специфического шумового сигнала на фоне случайных помех и внутренних шумов приемников. Синтезированные обнаружители-измерители теоретически дают асимптотически оптимальное решение задачи, однако являются достаточно сложными.

Дальнейшие усилия в данном направлении целесообразно направить на упрощение структур обнаружителей-измерителей и синтеза квазиоптимальных устройств.

Литература

1. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. В 2 частях. Ч. II. Случайные поля / С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. – М.: Наука, 1978. – 464с.
2. Басс Ф.Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф.В. Басс, И.М. Фукс. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
3. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. В 2 томах. Том 2. Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование / А. Исимару ; пер. с англ.. – М.: Мир, 1981. – 317 с.
4. Пространственно-временная обработка сигналов / [И.Я. Кремер, А.И. Кремер, В.М. Петров и др.]: под ред. И.Я. Кремера. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
5. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Радио и связь, 1991. – 360 с.
6. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов /В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
7. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции / Ван Трис Г.; пер. с англ. под ред. проф. В.И. Тихонова. – М.: Советское радио, 1972. – 744 с.

УДК 621.396.61; 621.396.62

Мошенський А. О.

РОЛЬ ОПЕРАТОРА ІНФОРМАЦІЙНО-ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Мошенський А.О. Роль оператора інформаційно-експертної системи прогнозування поширення радіохвиль. Розглядається задача побудови інформаційно-експертної системи, в якій математичну обробку та візуалізацію виконує ЕОМ, а оператор приймає рішення щодо приналежності сигналу.

Ключові слова: РАДІОЗВ'ЯЗОК, ПРОГНОЗУВАННЯ, ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ, СТАТИСТИКА

Мошенский А.А. Роль оператора информационно-экспертной системы прогнозирования распространения радиоволн. Рассматривается задача построения информационно-экспертной системы, в которой математическую обработку и визуализацию выполняет ЭВМ, а оператор принимает решение о принадлежности сигнала.

Ключевые слова: РАДИОСВЯЗЬ,ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, СТАТИСТИКА

Moshenskyi A.O. The role of operator information and expert forecasting system propagation. The problem of information-expert system in which mathematical processing and visualization computer performs, and the operator decides on membership signal.

Keywords:RADIO, FORECASTING, PROPAGATION, STATISTICS

Досить велике коло задач вимагає для свого розв'язання аналізу та специфічної обробки багатомірного скалярного поля. Множина точок зазвичай є обмеженою, виходячи з умов постановки експериментального дослідження, можливостей вимірювального комплексу, динаміки процесів. Прикладом широко відомих задач подібного класу можна назвати прогноз погоди. Температура, будемо вважати для спрощення розуміння, є відомою для окремих точок – облаштованих необхідним устаткуванням метеостанцій, сніголавинних та ін. об'єктів. Отже кількість точок є апріорно обмеженою розташуванням зазначених об'єктів. Необхідно знайти імовірні значення параметру в точках з іншими координатами, де вимірювання не проводилось, або його взагалі провести неможливо.