

УДК 534.88:004.3:621.039.05

ПРИНЦИПЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕТЯХ АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ (За матеріалами доповіді на конференції СЕМСТ-2)

В.А. Болтенков

Одесский национальный политехнический университет,
1, проспект Шевченко, Одесса, Украина, 65044
Тел/факс:+38 (0482) 344-308, E-mail: vaboltenkov@mail.ru

Аннотация

ПРИНЦИПЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕТЯХ АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

В. А. Болтенков

В статье изложены принципы обработки информации в сетях пространственно распределенных акустических сенсоров. Для преодоления избыточности информации предложен принцип цензурирования информации по Эджвоту-Парето. Показано, что предложенный принцип позволяет практически на порядок сократить вычислительные затраты с незначительной для практики потерей точности в оценивании координат звукового источника. Изложенный принцип применяется в пассивном течеискании в оборудовании АЭС.

Ключевые слова: акустические сенсорные сети, принцип Эджворта-Парето, цензурирование информации, течеискание на АЭС

Анотація

ПРИНЦИПИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ В ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНИХ МЕРЕЖАХ АКУСТИЧНИХ СЕНСОРІВ

В. О. Болтенков

В статті викладено принципи обробки інформації в мережах просторово розподілених акустичних сенсорів. Для подолання інформаційної надмірності запропоновано принцип цензурування інформації за Еджвортом-Парето. Показано, що запропонований принцип дозволяє практично на порядок скоротити обчислювальні витрати з незначною для практики втратою точності в оцінюванні координат звукового джерела. Викладений принцип застосовується в пасивному пошуку теч в обладнанні АЕС.

Ключові слова: акустичні сенсорні мережі, принцип Еджворта-Парето, цензурування інформації, пошук теч на АЕС.

Abstract

PRICIPLES OF INFORMATION PROCESSING IN SPATIALLY DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSOR NETWORKS

V. A. Boltentkov

The principles of information processing in the networks of spatially distributed acoustic sensors are expounded in the paper. The principle of information censoring under Edgeworth-Pareto has been proposed to overcome the superfluity of information. It is shown that proposed principle allows to reduce computational burden practically in order with negligible for practice accuracy losses in estimation of sound source coordinates. The expounded principle is applied in passive leak detection in NPP equipment.

Key words: acoustic sensor networks, Edgeworth-Pareto principle, information censoring, leak detection on NPP

Введение

Благодаря стремительному развитию микроэлектроники и микросенсорных технологий, средств телекоммуникаций и обработки сигналов популярность и широта применения пространственно распределенных сенсорных сетей выросли настолько, что их называют “инструментарием мира” 21-го века [1]. Анализ показывает, что причины широкого распространения сенсорных сетей таковы:

- пассивность и отсутствие какого бы то ни было влияния на объект, физическое поле которого регистрируется сенсорной сетью;
- возможность приближения сенсоров к объекту излучения, что позволяет значительно повысить отношение сигнал/шум;
- возможность размещения сенсоров в пространственных зонах, где исключена возможность пребывания человека с регистрирующей аппаратурой.

В последние годы среди различных видов сенсорных сетей широкое распространение получили сети акустических сенсоров. Акустические сенсорные сети стали главным средством пассивного обнаружения и оценивания координат источников звукового излучения. Области их применения весьма разнообразны. К ним можно отнести следующие:

- шумовой мониторинг окружающей среды;
- локализация грозовых очагов, взрывов и других естественных и техногенных источников мощного инфразвука;
- оценивание координат источника речевого сигнала в задачах автосопровождения говорящего (проблема весьма актуальна в организации автоматических видеоконференций,

современной робототехнике, проектах типа “умный дом”).

В настоящей статье рассматриваются принципы обработки информации, регистрируемой акустической сенсорной сетью в системе мониторинга протечек теплоносителя в оборудовании атомных электростанций (АЭС). В рамках общемировой практики повышения безопасной эксплуатации АЭС раннее обнаружение протечек теплоносителя является весьма серьезной научно-практической задачей. Однако без потери общности излагаемые результаты применимы для локализации широкополосных акустических источников в других практически важных задачах, перечисленных выше.

Основной проблемой передачи и обработки информации в акустических сенсорных сетях являются ее большие объемы. Это связано с высокой частотой дискретизации для широкополосных сигналов и относительно большим количеством сенсоров в сети, которое не всегда удается выбрать оптимальным априори. Передача больших объемов информации в центр ее накопления и последующая обработка связаны с большими материальными и вычислительными затратами. В тоже время хорошо известно, что акустически сенсорные системы, как правило, информационно избыточны. На практике при создании сенсорной сети сложно выбрать априори количество и размещение акустических сенсоров, поэтому количество сенсоров выбирается с серьезным “запасом”. С другой стороны, известен факт, что при современном уровне развития информационных технологий и цифровых процессо-

ров обработка одного байта информации на месте стоит примерно на порядок меньше, чем его передача на расстояние по проводному каналу или столько же, сколько его передача по радиоканалу. Поэтому проблема эффективных принципов распределенной обработки информации в акустических сенсорных сетях стоит достаточно остро. Особенно это относится к информационным системам и системам управления реального времени, в которых важно получить результат и принять решение с минимальной временной задержкой.

В статье предлагаются принципы обработки информации в значительной мере решающие эту проблему.

Принцип Эджворта-Парето

Обычно в сенсорных сетях информация обрабатывается иерархически, с повышением семантического содержания информации при переходе на каждый вышестоящий уровень иерархии. Предлагается передавать на вышестоящий уровень только информацию, удовлетворяющую определенным критериям качества. Такой отбор информации по критериям качества будем называть цензурованием. В основу цензурирования предлагается положить принцип Эджворта-Парето. Всю измерительную информацию можно представить в виде дискретного множества информационных объектов, подлежащих цензурованию: $Inf(\inf_1, \inf_2, \dots, \inf_m)$, где $m = Card(Inf)$ — мощность множества. Каждый элемент множества (информационный объект) можно охарактеризовать набором (вектором) критериев качества $Cr(Cr_1, Cr_2, \dots, Cr_n)$, где n — размерность вектора критериев качества информации. Для выбора из всего множества Inf выбор информационных объектов, удовлетворяющих требованиям качества, необходимо максимизировать вектор критериев качества $Cr \rightarrow \max$. В такой постановке задача цензурирования сводится к задаче многокритериальной оптимизации или многокритериального выбора. Одним из вариантов решения такой задачи является построение множества Эджворта-Парето. Множество Эджворта-Парето Par задается свойством его элементов

$$(\forall \inf \in Inf) (\exists \inf^* \in Par) (Cr(\inf^*) \geq Cr(\inf)).$$

Смысл последнего выражения состоит в том, что множество Эджворта-Парето включает только те элементы множества Inf , которые всегда более предпочтительны по выбранному вектору критериев Cr по сравнению с любым элементом множества $Inf \setminus Par$. Выражение $(Cr(\inf^*) \geq Cr(\inf))$ означает, что

$$Cr_1(\inf^*) \geq Cr_1(\inf), Cr_2(\inf^*) \geq Cr_2(\inf), \dots, \\ Cr_n(\inf^*) \geq Cr_n(\inf),$$

причем, хотя бы одно из неравенств является строгим. Таким образом, построение множества Эджворта-Парето сужает множество информационных объектов, передаваемых на следующий уровень иерархической обработки. Рассмотрим применение изложенного принципа цензурирования к конкретной задаче определения координат источника широкополосного сетью акустических сенсоров.

Принципы обработки информации в сети акустических сенсоров

Пусть широкополосный источник звука окружен сетью из N пространственно разнесенных акустических сенсоров (координаты сенсоров полагаются произвольными, но известными). Предлагается следующая многоуровневая схема обработки информации. Для каждой пары сенсоров (а таких пар при N сенсорах существует $N(N-2)/2$) оценивается обобщенная взаимно-корреляционная функция (ВКФ) по Кнеппу-Картеру $\hat{R}(\tau)$ [2]. Положение максимума ВКФ позволяет оценить разность времен прихода (РВП) $\hat{\tau}_{ij}$ на i -й и j -й сенсоры ($i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, i \neq j$):

$$\hat{\tau}_{ij} = \arg \max_{\tau \in T} \hat{R}_{ij}(\tau),$$

где T — интервал анализа. Типичный вид корреляционной функции для широкополосного сигнала, зарегистрированного в условиях шумов, приведен на рис.1.

Качество оценки РВП в условиях шумов определяется рядом факторов: 1) кривизной ВКФ в точке максимума $\frac{\partial^2 R(\hat{\tau}_{ij})}{\partial \tau^2}$, 2) форм-фактором ВКФ FF , под которым понимается отношение площади главного лепестка корреляционной функции к общей площади под кривой

ВКФ в окне анализа длительностью T , 3) площадью под кривой (интегралом) квадрата модуля функции когерентности $\gamma^2(f)$ в анализируемом диапазоне частот. Квадрат модуля функции когерентности описывает частотную зависимость коррелированности сигналов (при их полной коррелированности он не зависит от частоты и равен единице). Типичный вид квадрата модуля функции когерентности для сигнала, зарегистрированного на паре датчиков в реальных условиях, приведен на рис.2.

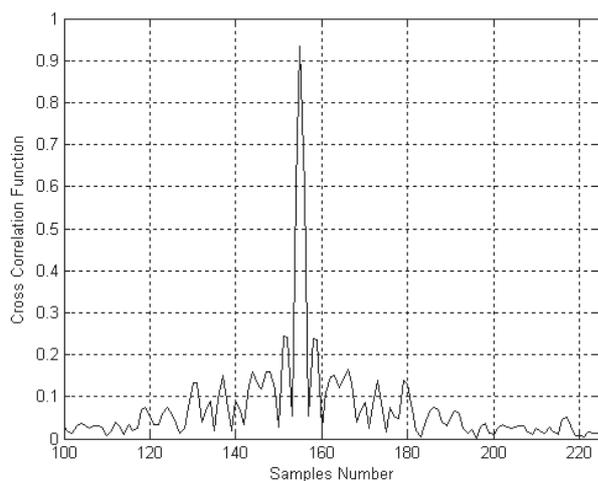


Рис.1. Типичная корреляционная функция широкополосного акустического сигнала.

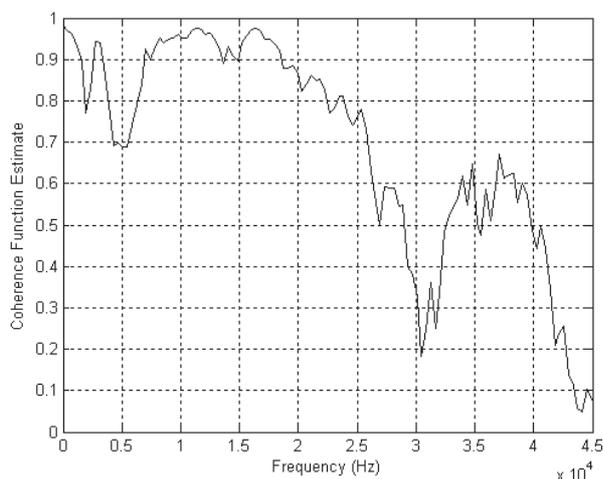


Рис.2. Типичный вид квадрата модуля функции когерентности для широкополосного акустического сигнала.

Эти три критерия — кривизна ВКФ в точке максимума, форм-фактор ВКФ и интеграл от квадрата модуля когерентности были выбраны в качестве вектора качества для цензурирования множества оценок \hat{t}_{ij} по Эджворту-Парето. Далее в целях устранения избыточности

информации на вышестоящий уровень обработки передаются не все оценки РВП, а наилучшие в смысле потенциальной точности. Для этого на всем множестве оценок \hat{t}_{ij} по изложенному принципу многокритериального выбора строится подмножество Эджворта-Парето оценок $Par(\hat{t}_{ij})$, оптимальных по Эджворту-Парето [3].

Алгоритмы вычисления множества Эджворта-Парето для дискретных множеств не сложны, носят комбинаторный характер и не требуют больших вычислительных затрат при правильной нормировке критериев [3].

На следующем уровне обработки для каждой четверки сенсоров из паретовского множества оценок РВП строится и решается система гиперболических уравнений:

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \\ & - \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} = c\hat{t}_{12}, \\ & \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \\ & - \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2} = c\hat{t}_{13}, \\ & \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \\ & - \sqrt{(x_0 - x_4)^2 + (y_0 - y_4)^2 + (z_0 - z_4)^2} = c\hat{t}_{14}, \end{aligned}$$

где (x_0, y_0, z_0) — координаты источника звука, (x_k, y_k, z_k) , $k=1, \dots, 4$ — координаты четырех сенсоров из множества Парето, \hat{t}_{ij} , $i=1, j=2,3,4$ — соответствующие оценки РВП, c — скорость звука для условий измерения. Приведенные выше уравнения описывают гиперboloиды вращения и являются поверхностями положения, т.к. на поверхностях гиперboloидов $\hat{t}_{ij} = const$. Решение системы уравнений дает оценку местоположения источника $(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0)_i$. Оценки координат источника передаются на следующий уровень обработки, где окончательная оценка местоположения источника определяется как средневзвешенное по всем оценкам, полученным на предыдущем уровне.

Результаты компьютерного моделирования

Предлагаемый многоуровневый принцип обработки информации с цензурированием был промоделирован на реальных акустичес-

ких сигналах. Сигналы от протечек регистрировались сетью из 24-х акустических сенсоров на имитационном теплофизическом стенде с температурой и давлением теплоносителя до 320°C и 16 МПа. Это соответствует рабочему режиму ядерного реактора ВВЭР-1000 на мощности. При протечке теплоносителя через искусственные дефекты в трубопроводе с размерами 7-30 мкм, соответствующими реальным, имеющим место в практике эксплуатации оборудования АЭС, генерируется широкополосный звуковой сигнал в диапазоне частот 2-40 кГц с общим уровнем 80-90 дБ относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Типичная оценка спектральной плотности мощности такого сигнала, полученная методом модифицированных периодограмм Уэлча, приведена на рис.3.

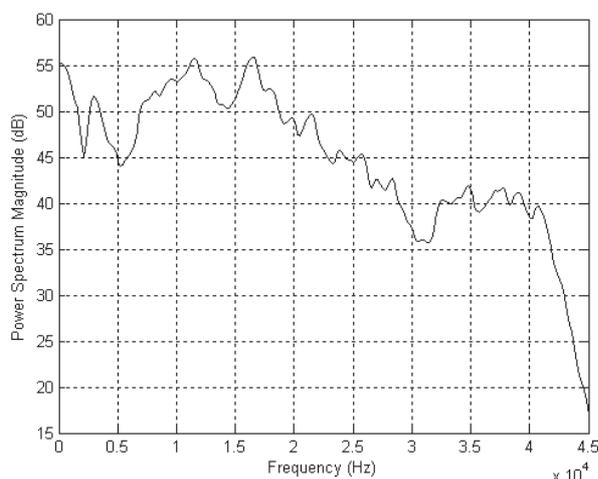


Рис.3. Спектральная плотность мощности акустического сигнала от течи.

В процессе компьютерного эксперимента на сигнал от каждого сенсора накладывался белый гауссовский шум, таким образом, что отношение сигнал/шум SNR, задавалось случайным образом в соответствии с равномерным распределением в диапазоне $SNR = [0, 10]$ дБ]. Для оценивания координат источника звука проводилась обработка всей измерительной информации (для всего множества оценок \hat{t}_{ij}) и обработка с описанным цензурированием по Эджворту-Парето.

В результате моделирования установлено следующее. Оценивание координат источника с полным перебором всех пар датчиков дает оценку координат протечки со среднеквадратичной ошибкой (СКО), лежащей в пределах (0,36...0,41) м. При цензурировании по пред-

ложенному принципу СКО составила (0,43...0,45) м. В то же время применение цензурирования позволяет сократить затраты по времени счета, как установлено моделированием, в 7-9 раз.

Таким образом, практически без существенных потерь в точности оценивания координат предложенный принцип позволяет сократить затраты по времени счета, как установлено моделированием, практически на порядок.

Интересно отметить следующий факт. При оценивании координат источника полным перебором доля оценок координат, лежащих за границей трех среднеквадратичных отклонений составила примерно (3...5)%. При применении цензурирования ни одна из оценок координат не вышла за пределы двух СКО. Таким образом, предложенный принцип позволяет уменьшить число аномальных оценок на высшем уровне иерархической обработки.

Выводы

Предложенные принципы обработки информации в распределенных сетях акустических сенсоров, основанные на принципе Эджворта-Парето, дают возможность существенно сократить избыточность информации, регистрируемой в сети, практически при той же точности результатов. Принципы могут быть применены в информационных системах реального времени, основанных на сенсорных сетях, для сокращения вычислительных и временных затрат. Дальнейшим развитием предложенных принципов является многоуровневое цензурирование на всех трех уровнях обработки информации, что позволит еще более сократить избыточность потоков информации в сенсорной сети.

Литература

1. Estrin D., Girod L., Pottie G., Srivastava M. Instrumenting the World with Wireless Sensor Networks // Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2001). — Salt Lake City, Utah. — 2001. — P.234-237.
2. Knapp C.H., Carter G.C. The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay // IEEE Trans. Acoust., Spech, Signal Process. — 1976. — Vol. 24, №4 — P.320-327.
3. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. — М.: Физматлит, 2002. — 144 с.