

УДК 621.313:004.9

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

К. т. н. В. А. Болтенков

Одесский национальный политехнический университет

Украина, г. Одесса

vaboltentkov@mail.ru

Предложен метод контроля акустических сенсорных сетей. Метод основан на создании в пределах сети поля эталонного источника. Для обнаружения отказавшего сенсора применяется принцип замкнутости. В качестве тестового сигнала используется фазоманипулированный сигнал на основе M-последовательности.

Ключевые слова: акустическая сенсорная сеть, техническая диагностика, M-последовательность.

Акустические сенсорные сети (АСС) широко применяются в информационных, управляющих и диагностических системах различного применения. Их назначением является обнаружение и оценивание параметров акустических сигналов, сопровождающих различные процессы. В результате вторичной обработки сигналов в АСС в целом обычно стоит задача оценивания координат источника или источников звука и траектории его движения, если объект перемещается. Особенностью применения АСС является достаточно длительная их эксплуатация на большом удалении от центра обработки измерительной информации, при этом, как правило, температурные и климатические условия эксплуатации достаточно жесткие (помещения атомных электростанций во время работы ядерного реактора, наблюдение за районами особого внимания или боевых действий на местности и под водой и т. д.). В таких условиях неизбежны отказы сенсорных элементов сети. Если полный отказ сенсора обнаруживается легко по отсутствию выходного сигнала, то параметрический (или деградационный по терминологии ГОСТ 27.002-89) отказ обнаружить достаточно сложно. Такие отказы приводят к снижению показателей качества АСС, причем потребитель информации продолжает пользоваться ею в расчете на полностью исправное состояние системы. В этом плане весьма актуальна задача оперативного контроля АСС в процессе их эксплуатации с выявлением отказавших элементов и последующим их исключением из процесса обработки измерительной информации.

Нам известна только одна работа, в которой изложены подходы к оценке состояния микрофонной сети [1], применяемой для оценивания пеленга на источник речевого сигнала. Некоторые идеи этой работы положены в основу данного исследования.

Целью исследования является разработка принципа оперативного контроля АСС с целью обнаружения отказавшего элемента АСС и моделирование системы контроля.

Акустическая сенсорная сеть S_N представляет собой N пространственно разнесенных акустических датчиков, охватывающих определенную зону пространственного мониторинга. Пусть на АСС падает плоская акустическая волна от источника звукового сигнала. Вне зависимости от характера сигнала для любых трех датчиков сети с номерами i, j, k , образующих треугольник, выполняется условие замкнутости [2]:

$$\tau_{ij} + \tau_{jk} + \tau_{ki} = 0,$$

где $\tau_{ij}, \tau_{ik}, \tau_{ki}$ — разности времени прихода (РВП, англ. TDOA — time difference of arrival) полезного сигнала на соответствующие пары датчиков. Отметим, что в сети существует $C_N^2 = N(N-1)/2$ пар сенсоров и C_n^3 треугольников. Предположим, что вероятность одновременного отказа двух и более сенсоров пренебрежимо мала. Оценки РВП обычно находятся по максимуму взаимно-корреляционной функции (ВКФ), рассчитываемой для каждой пары датчиков [2]. Для фоновых шумов, принимаемых сенсорами, в силу их пространственной некоррелированности условие замкнутости не вы-

полняется. Для треугольника из сенсоров с номерами $\{i, j, k\}$ можно построить пороговую функцию

$$\Delta_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если } \tau_{ij} + \tau_{jk} + \tau_{ki} \leq Th, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где Th — некоторый порог.

В качестве пороговой статистики можно выбрать среднеквадратическое отклонение отношений замкнутости от нуля для всех треугольников, образуемых N датчиками сети S_N :

$$\begin{cases} Th = \sqrt{1 / C_n^3 \sum_{i>j>k} \tau_{ijk}^2}, \\ \tau_{ijk} = \tau_{ij} + \tau_{jk} + \tau_{ki}, \quad i, j, k \in R_n. \end{cases}$$

Теперь построим индикаторную функцию

$$Ind(i, j) = \sum_{k \in M - \{i, j\}} \Delta_{ijk},$$

где M — множество номеров всех сенсоров сети.

Сформируем множество индикаторных функций для каждого сенсора сети:

$$IND(i) = \{Ind(i, j), i \in M - \{i\}, j \in M - \{i\}\}.$$

Для отказавшего сенсора с номером l все РВП, оцененные с его участием, будут неверными и соответственно, будут иметь нулевую индикаторную функцию Ind . Таким образом, чтобы обнаружить отказавший сенсор, необходимо найти номер сенсора l , для которого подмножество $IND(l)$ содержит все нулевые элементы.

Методику оперативного контроля можно сформулировать так. Необходимо создать эталонное поле тестового акустического сигнала, при этом источник сигнала должен находиться на достаточном удалении от АСС, чтобы выполнялось условие плоской волны для любой пары сенсоров. Далее необходимо оценить РВП для каждой пары сенсоров и сформировать:

- пороговую функцию Δ_{ijk} для каждого треугольника сети;
- индикаторную функцию $Ind(i, j)$;
- множество индикаторных функций $IND(i)$.

Поиск по множеству индикаторных функций подмножества $IND(l)$ со всеми нулевыми элементами укажет номер отказавшего сенсора.

Поскольку АСС эксплуатируются при достаточно низких отношениях сигнал/шум (ОСШ) (как правило менее 5 дБ) достаточно серьезным вопросом является выбор типа тестового сигнала, создающего эталонное поле. Предлагается в качестве эталонного сигнала использовать кодовые последовательности, называемые кодами максимальной длины или М-последовательностями [3] и фазоманипулированные сигналы, формируемые на их основе:

$$s(t) = A \cos[2\pi f t + \pi / 2 \cdot M(t)].$$

Здесь A — амплитуда сигнала, f — несущая частота, $M(t)$ — модулирующая М-последовательность. Обычно применяется бинарная $M(t)$, принимающая значения $\{+1, -1\}$, длиной $n = 2^m - 1$ элементов (m — порядок последовательности). М-последовательность имеет узкий стрелообразный главный лепесток корреляционной функции (КФ) и максимальный уровень боковых лепестков, равный $1/\sqrt{n}$.

Для подтверждения работоспособности предложенной методики был поставлен модельный компьютерный эксперимент. В качестве моделируемой АСС была выбрана система микрофонов, предназначенная для акустической диагностики течей теплоносителя по шуму истечения на верхнем блоке ядерного реактора ВВЭР-1000. Конфигурация сети приведена на рис. 1. Оценим количественно условия формирования поля плоской волны на АСС. Можно показать, что при расположении источника звука на расстоянии r от приемной системы локально-плоская волна в пределах характерного размера приемной системы с фазовой погрешностью, не превышающей $\lambda/16$ (λ — длина волны), образуется при $r \geq 2d^2/\lambda$. Для показанной на рис. 1 АСС при условии расположения источника тестового сигнала на вертикальной оси системы и послыном контроле (последовательно по каждому

плоскому кольцу сенсоров) характерный размер d равен диаметру кольца (5,5 м). Полагая скорость звука в воздухе равной 340 м/с и частоту $f=40$ Гц, получаем, что для формирования локально-плоской волны должно выполняться условие $r>7$ м. Это вполне реально при расположении источника звука на траверсе верхнего блока реактора.

Автокорреляционная функция тестового сигнала и его спектр приведены на рис. 2.

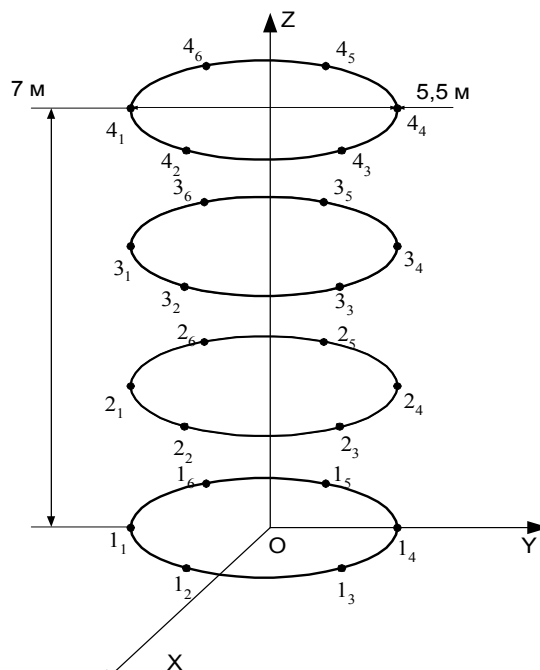


Рис. 1. Конфигурация АСС

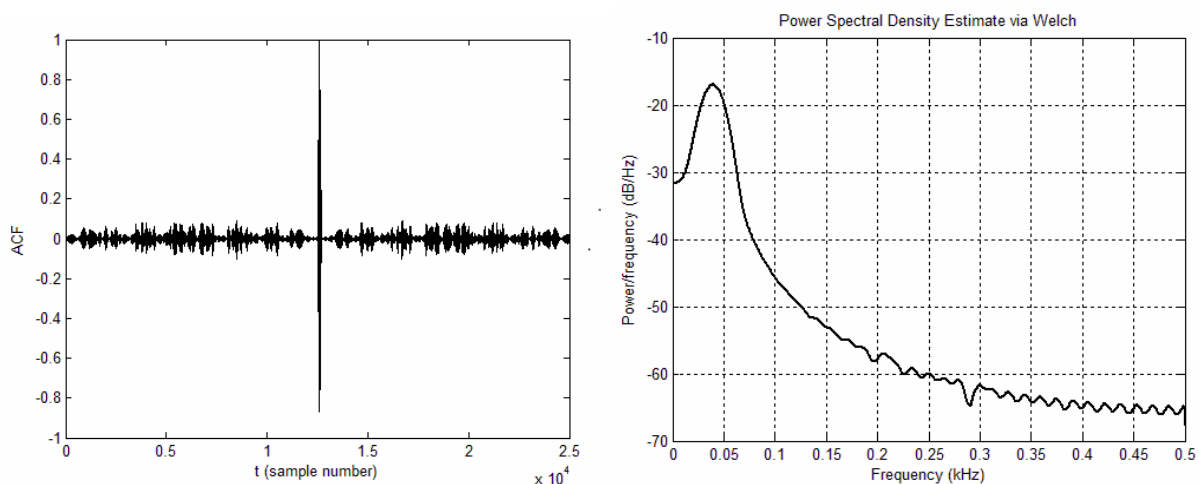


Рис. 2. Автокорреляционная функция (слева) и спектр (справа) тестового сигнала для $n = 127$.

В процессе эксперимента на тестовый сигнал накладывался аддитивный гауссов белый шум. Отказавший сенсор моделировался путем замены значения его истинной РВП в паре с остальными сенсорами на случайное значение задержки в диапазоне $[-\tau_{\max}, \tau_{\max}]$, где τ_{\max} — максимально возможное значение РВП для указанной геометрии задачи. Для каждого значения ОСШ в диапазоне 5—15 дБ и случайного расположения отказавшего сенсора описанная выше процедура контроля повторялась 150 раз с различными реализациями аддитивной смеси сигнал+шум. Эксперимент показал, что при низких ОСШ, когда структура фазоманипулированного сигнала практически скрыта шумом (рис. 3), максимум взаимно-корреляционной функции достаточно хорошо выделяется, что позволяет с достаточной точностью оценить требуемые РВП. Результаты эксперимента приведены в таблице.

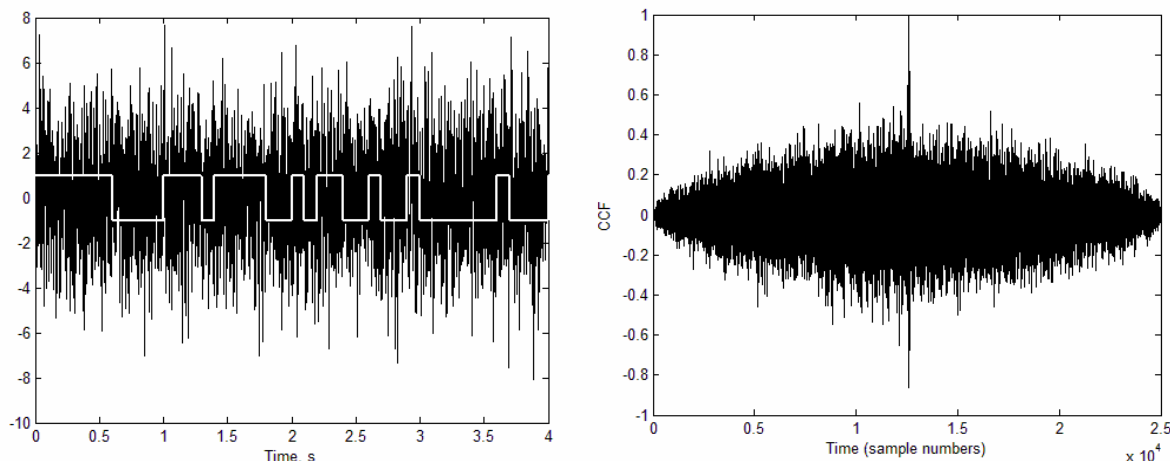


Рис. 3. Типичная реализация сигнала с шумом для низких ОСШ (слева) и ВКФ для пары сенсоров (ОСШ= -8 дБ, $n = 127$)

ОСШ, дБ	Количество правильно обнаруженных отказавших сенсоров, %
5	100
0	100
-3	100
-5	100
-10	92
-15	73

При отношении сигнал/шум ниже 10 дБ точность оценивания РВП резко падает для данного тестового сигнала, и достоверность контроля становится неудовлетворительной. Все описанные модельные эксперименты были выполнены для M-последовательностей длиной от $n = 31$ ($m = 5$) до $n = 2047$ ($m = 11$). Установлено, что начиная с $m = 7$ и более на данной несущей частоте длина последовательности практически не влияет на результативность контроля.

Изложенные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы. Предложенный метод оперативного контроля состояния АСС позволяет выявить одиночные параметрические отказы сенсоров с высокой достоверностью при малых отношениях сигнал/шум. Для ситуаций, когда ОСШ ниже -10 дБ, требуется дополнительный анализ метода с другими тестовыми сигналами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pirinen T. W., Yli-Hietanen J., Pertila P., Visa A. Detection and compensation of sensor malfunction in time delay based direction of arrival estimation // Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems «IS-CAS '2004».— Vancouver —004 — Vol.. P. 872—875.
2. Handbook of Signal Processing in Acoustics— N.Y.: Springer-Verlag, 2009.
3. Ipatov V. P. Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications.— N.Y.: John Willy & Sons, 2004.

V. A. Boltenkov

Operational control of acoustic sensor networks.

The proposed method for acoustic sensor networks control is based on formation of reference source field within the network. The insularity principle is applied to detect the failed sensor. The BFSK signal based on M-sequence is used as the testing signal.

Keywords: *acoustic sensor networks, technical diagnostics, M-sequence.*