

УДК 004.75

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ С ПРИОРИТЕТАМИ НА ОСНОВЕ АГРЕГИРОВАНИЯ ПРЕДПОЧТЕНИЙ

С.В. Муравьев, Е.В. Тараканов

Томский политехнический университет

E-mail: tark@tpu.ru

Предложен способ управления передачей данных в беспроводной сенсорной сети, основанный на использовании отношений консенсуса для назначения приоритетов передаваемым данным. Описана статистическая аналитическая модель для анализа поведения предложенного протокола передачи в условиях ограниченной пропускной способности сети, позволяющая обеспечить на необходимом уровне качество передачи измерительных данных.

Ключевые слова:*Беспроводная сенсорная сеть, перегрузка сети, агрегирование предпочтений, отношение консенсуса.***Key words:***Wireless sensor network, network congestion, preference aggregation, consensus relation.***Введение**

Беспроводные сенсорные сети (*wireless sensor networks*, WSN) все чаще используются для организации различных видов мониторинга: параметров окружающей среды [1], состояния конструкций, зданий и сооружений [2], в системах безопасности (пожарной, сейсмической, экологической и др.) [3], для отслеживания целей в процессе ведения боевых действий [4] и т. п. В таких системах разнородные данные собираются мультисенсорами, входящими в состав узлов, расположенных в подлежащих мониторингу точках определенной географической области, и передаются по беспроводной сети в центральный узел (*sink*) для обработки и принятия решений. Обычно сеть имеет иерархическую (древовидную) структуру, в которой на каждом уровне данные могут передаваться от узлов-источников к одному или нескольким узлам-приемникам.

При передаче данных в беспроводных сенсорных сетях возникают существенные проблемы, связанные с ограниченной полосой пропускания (*bandwidth*) используемых в качестве линий связи радиоканалов. В частности, в ситуациях, когда много узлов-источников одновременно инициируют передачу данных, может возникнуть перегрузка или даже коллапс сети, в результате чего ее пропускная способность (*throughput*), выражаемая в количестве проходящих от источника к центральному узлу пакетов данных в единицу времени, падает практически до нуля. Кроме того, отдельные сенсорные узлы могут как добавляться в сеть, так и, по разным причинам, выходить из состава сети. Изменение в конфигурации сети, как правило, приводит к необходимости изменять маршруты пакетов данных, что также снижает пропускную способность сети [5].

Одним из возможных подходов к решению проблемы является назначение приоритетов передаваемым по сети пакетам и организация первоочередной доставки пакетов с более высоким приорите-

том. Этот подход согласуется с концепцией качества обслуживания (*Quality of Service*, QoS), являющейся общепринятой для сенсорных сетей, основанных на обнаружении событий. Основными показателями QoS являются малая задержка передачи данных от источника к центральному узлу и низкие потери данных о событиях [6].

Для обеспечения бесперебойной работы сенсорной сети требуются специальные методы передачи данных, позволяющие решать проблему перегрузки сети и гарантировать доставку пакетов данных до центрального узла. Для этой цели в [7] предложен способ организации передачи пакетов в WSN путем назначения интервала ожидания на основе динамического вычисления соотношения текущей и максимальной пропускной способности сети. В этом способе каждый узел сообщает требуемый ему интервал ожидания центральному узлу, после чего центральный узел назначает интервалы ожидания узлу пропорционально затребованному. Назначенные интервалы ожидания передают узлам WSN с помощью пакетов обратной связи. При переполнении очереди передачи вновь поступающие пакеты отбрасываются. Недостатком этого способа является необходимость принятия каждым узлом решения о требуемом ему интервале ожидания.

В данной статье предлагается способ назначения приоритетов узлам беспроводной сенсорной сети с использованием некоторого бинарного отношения консенсуса, получаемого в результате процедуры агрегирования предпочтений. Предпочтения в форме m ранжирований n узлов формируются на основе показаний мультисенсоров. Впервые предлагаемый подход описан в [8]. Он позволяет динамически назначать приоритеты узлам сети (и, следовательно, передаваемым ими пакетам), формировать очередь передачи пакетов и распределять пропускную способность сети в зависимости от содержания (семантики) передаваемых данных.

Агрегирование предпочтений и отношение консенсуса

Пусть $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ — множество n узлов сенсорной сети, расположенных в заданных точках распределенного сложного контролируемого объекта. Будем рассматривать в качестве примера систему пожарной сигнализации некоторого здания. Пусть в каждом помещении этого здания расположен узел, содержащий сенсоры, контролирующие m разнородных свойств: температуру воздуха, скорость изменения температуры, задымленность, уровень СО, срабатывание датчика пламени и присутствие персонала (таблица). По данным измерений этих свойств можно получить m ранжирований n узлов. Каждое из m ранжирований $\lambda=\{a_1 \succ a_2 \succ \dots \sim a_s \sim a_r \succ \dots \sim a_n\}$ может включать как строгое отношение предпочтения $\succ$, так и отношение безразличия $\sim$. Множество полученных таким образом бинарных отношений $\Lambda=\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ будем называть *профилем предпочтения* для данных m свойств и n узлов.

Например, для представленных в таблице результатов измерений шести свойств, полученных с семи узлов, профиль предпочтения имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \lambda_1: a_5 &\succ a_2 \succ a_3 \succ a_6 \sim a_7 \succ a_4 \succ a_1; \\ \lambda_2: a_5 &\succ a_3 \succ a_2 \succ a_4 \succ a_6 \succ a_1 \succ a_7; \\ \lambda_3: a_3 &\succ a_6 \succ a_5 \succ a_2 \succ a_7 \succ a_4 \succ a_1; \\ \lambda_4: a_5 &\succ a_2 \succ a_3 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7; \\ \lambda_5: a_2 &\sim a_3 \sim a_4 \sim a_6 \succ a_1 \sim a_5 \sim a_7; \\ \lambda_6: a_3 &\sim a_6 \succ a_1 \sim a_2 \sim a_4 \sim a_5 \sim a_7. \end{aligned} \quad (1)$$

Задача *агрегирования предпочтений* заданного профиля Λ , состоящего из m ранжирований n альтернатив, заключается в нахождении единственного строгого ранжирования — *отношения консенсуса*.

Следуя [9], ранжирование λ представим $(n \times n)$ матрицей отношения $R=[r_{ij}]$, строки и столбцы которой соответствуют узлам a_i и $r_{ij}=1$ если $a_i \succ a_j$; $r_{ij}=0$ если $a_i \sim a_j$; $r_{ij}=-1$ если $a_i \prec a_j$. Тогда *расстояние Кемени* $d(\lambda_k, \lambda_l)$ между двумя ранжированиями λ_k и λ_l определяется формулой

$$d(\lambda_k, \lambda_l) = \sum_{i < j} |r_{ij}^k - r_{ij}^l|. \quad (2)$$

и может рассматриваться как число различий между двумя ранжированиями. В формуле (2) суммируются только элементы верхней треугольной подматрицы r_{ij} , $i < j$, матрицы R .

Расстояние между произвольным ранжированием λ и профилем Λ можно теперь определить следующим образом:

$$D(\lambda, \Lambda) = \sum_{k=1}^m d(\lambda, \lambda_k) = \sum_{i < j} \sum_{k=1}^m |r_{ij}^k - r_{ij}| = \sum_{i < j} \sum_{k=1}^m d_{ij}^k.$$

Из (2), с учетом $r_{ij}=1$ для всех $i < j$, что соответствует естественному линейному порядку $a_1 \succ a_2 \succ \dots \succ a_n$, следует, что для любого $k=1, \dots, m$ имеем: $d_{ij}^k=|1-1|=0$ если $a_i \succ a_j^k$; $d_{ij}^k=|0-1|=1$ если $a_i \sim a_j^k$ и $d_{ij}^k=|-1-1|=2$ если $a_i \prec a_j^k$.

Таблица. Данные с узлов системы пожарной сигнализации (модельный пример)

Узел	Результаты измерений					
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
Температура, °C						
Скорость изменения температуры, °C/с						
Задымленность, ДБ/м						
Уровень СО, мг/м³						
Срабатывание датчика пламени						
Наличие людей						
a_1	42	8	0,03	0,31	—	—
a_2	270	15	0,08	0,86	+	—
a_3	80	35	0,13	0,83	+	+
a_4	50	12	0,03	0,58	+	—
a_5	300	38	0,10	0,90	—	—
a_6	62	10	0,11	0,70	+	+
a_7	62	7	0,04	0,18	—	—

Тогда можно определить $(n \times n)$ матрицу профиля $P=[p_{ij}]$, где

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^m d_{ij}^k, \quad i, j = 1, \dots, n$$

и отношение консенсуса β определяется как такое ранжирование узлов из A , что расстояние $D(\beta, \Lambda)$ от β до профиля Λ минимально, то есть

$$\beta = \arg \min_{\lambda \in \Pi} D(\lambda, \Lambda) = \arg \min_{\lambda \in \Pi} \sum_{i < j} p_{ij}, \quad (3)$$

где Π — множество всех $n!$ строгих предпочтений $\succ$ на A . Каждая перестановка объектов из A соответствует перестановке соответствующих строк и столбцов матрицы. Поэтому задача (5) заключается в нахождении такой перестановки строк и столбцов матрицы профиля, что сумма элементов ее верхней треугольной подматрицы минимальна.

Заметим, что агрегирование предпочтений в других терминах представляет собой проблему *голосования* или *группового решения*, где A — это множество n альтернатив или кандидатов, которые ранжируются группой из m индивидуумов (избирателей, экспертов и т. д.). В рамках этой проблематики, Ж.-А. Кондорсе еще в 1785 г. [10], предложил естественное правило нахождения отношения консенсуса для профиля Λ , описываемого матрицей P : в каждом сравнении альтернатив предпочтительной является альтернатива, предпочитаемая большинством избирателей, т. е. $a_i \succ a_j$ если и только если $p_{ij} > p_{ji}$. Однако, ранжирование Кондорсе не обязательно транзитивно, т. е. может быть, что $a_i \succ a_j$ и $a_j \succ a_k$, тогда как $a_k \succ a_i$. Единственным корректным способом преодоления указанной трудности является нахождение отношения консенсуса по правилу Кемени (3) [11].

Для профиля (1) ранжирование консенсуса имеет следующий вид:

$$\beta_1 = \{a_3 \succ a_2 \succ a_5 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7\}.$$

Оно позволяет выстроить n узлов в порядке важности измеряемых ими проявлений свойств. Этот порядок может служить основанием для назначения приоритетов передаваемых узлами пакетов, так как ранжирования исходного профиля

формируются исходя из актуальных данных измерений, характеризующих обстановку в окружении каждого конкретного сенсорного узла.

Далее будет рассмотрен механизм поддержания производительности WSN с использованием ранжирования консенсуса.

Механизм обеспечения QoS сенсорной сети

WSN, как правило, имеет древовидную топологию (рис. 1), в которой только определенные узлы (будем называть их *узлами-предками*) могут взаимодействовать с другими узлами (*потомками*). *Кластером* будем называть узел-предок со всеми его ближайшими потомками.

Пусть каждый узел использует для передачи сообщений буфер в виде очереди. Если сеть перегружена или ее пропускная способность не позволяет отправить поступившее сообщение немедленно, то пакет отправляется в очередь сообщений. По достижении максимального размера очереди поступление нового пакета приводит к необходимости либо удалить уже существующий пакет из очереди, либо отбросить поступивший пакет. Назначение приоритетов узлам сети внутри кластера в соответствии с ранжированием консенсуса позволяет создавать очередь передачи пакетов с сортировкой по убыванию важности узла-источника пакета. Так, приведенное в конце предыдущего раздела ранжирование обеспечивает наивысший приоритет пакету, отправляемому узлом 3, а наименьший – пакету узла 7.

Приоритет узла-источника входящего пакета сравнивается с приоритетами узлов-источников уже находящихся в очереди пакетов, начиная с первого пакета. После обнаружения пакета, узел-источник которого имеет меньший приоритет, чем приоритет узла-источника входящего пакета, будет произведена вставка поступившего пакета перед пакетом с менее приоритетного узла. Если же окажется что узел-источник входящего пакет имеет приоритет меньший, чем приоритет узлов-источников всех пакетов в очереди, то поступивший пакет будет отброшен.

Предположим, некоторый узел-предок собирает информацию с n узлов-потомков. При этом пропускная способность сети позволяет передать не все n , а только $(n-k)$ пакетов за один такт, то есть узел-предок должен на каждом такте отбросить k пакетов. Ясно, что отбрасывание пакетов будет приводить к потере определенной части измерительных данных.

Ниже будет введена статистическая аналитическая модель, которая позволит выбирать и оценивать значения n и k с учетом изменения уровня согласованности приоритетов при отбрасывании пакетов.

Определение относительной несогласованности приоритетов при удалении пакетов

Для решения проблемы воспользуемся основным на статистических соображениях коэффициентом ранговой корреляции Кендалла τ [12], который принимает значения в диапазоне от -1 (абсолютно несовместимые ранжирования) до $+1$ (полное совпадение ранжирований). Совместимость двух ранжирований β_1 и β_2 определяется по формуле:

$$\tau = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i < j} r_{ij}^1 r_{ij}^2, \quad (4)$$

где r_{ij}^1 и r_{ij}^2 – элементы матрицы отношений для отнoшения β_1 и β_2 соответственно.

Как коэффициент ранговой корреляции Кендалла (4), так и расстояние Кемени (2) являются мерами совместимости ранжирований. Как показано в [13], между ними существует связь:

$$\tau(\beta_1, \beta_2) = 1 - \frac{d(\beta_1, \beta_2)}{n(n-1)},$$

которая позволяет установить связь между параметрами n и k .

Действительно, рассмотрим два ранжирования β_1 и β_2 для n узлов некоторого кластера. Естественным требованием для них является то, что они должны быть согласованы между собой. Соответствующий уровень согласованности обозначим че-

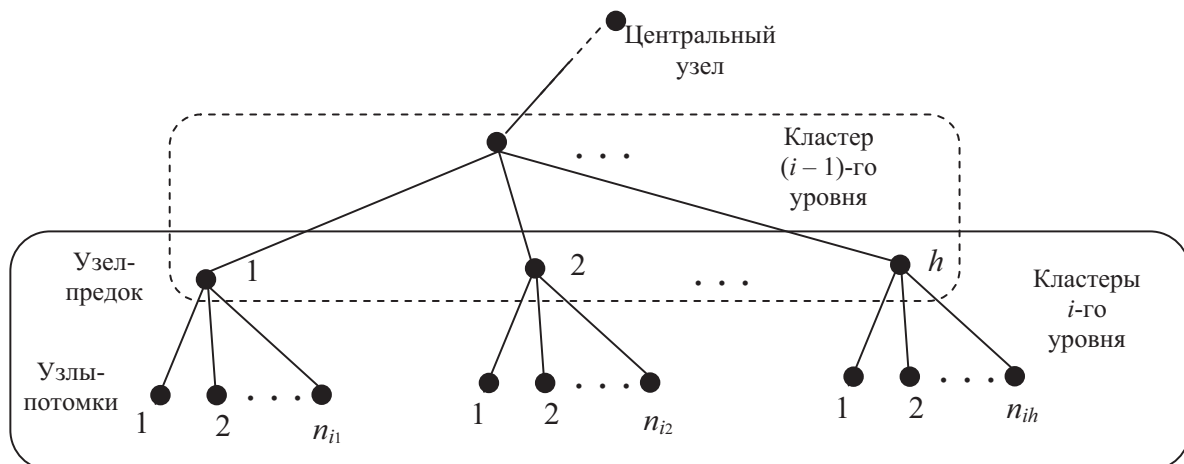


Рис. 1. Топология древовидной сети

рез τ_1 . Для $n-k$ узлов, где k – число отброшенных пакетов, получаются два других отношения консенсуса β_1' и β_2' , с уровнем согласованности τ_2 . Стремясь сохранять согласованность при любом k , примем, что $\tau_2 = \tau_1$.

Обозначив $d_1 = d(\beta_1, \beta_2)$ для случая n узлов и $d_2 = d(\beta_1', \beta_2')$ для случая $n-k$ узлов, получаем выражения для соответствующих коэффициентов ранговой корреляции:

$$\tau_1 = 1 - \frac{d_1}{n(n-1)} \quad \text{и} \quad \tau_2 = 1 - \frac{d_2}{(n-k)(n-k-1)}.$$

Тогда $\frac{d_1}{n(n-k)} = \frac{d_2}{(n-k)(n-k-1)}$, откуда

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{(n-k)(n-k-1)}{n(n-k)}. \quad (5)$$

Введем параметр $\theta(n, k)$ как *относительную несогласованность приоритетов* при удалении k из n пакетов:

$$\theta(n, k) = \frac{d_1 - d_2}{d_1} = 1 - \frac{d_2}{d_1}.$$

Тогда, с учетом (5), получаем

$$\theta(n, k) = 1 - \frac{(n-k)(n-k-1)}{n(n-1)}. \quad (6)$$

Ясно, что $0 \leq \theta(n, k) \leq 1$. Задаваясь значением параметра $\theta(n, k)$, можно выбирать обоснованное количество k отбрасываемых пакетов для известных значений n кластера (рис. 2). Например, при $n=30$ удаление четырех пакетов соответствует относительной несогласованности 0,25, а удаление восьми пакетов увеличивает несогласованность до 0,47.

Рассмотрим применение параметра θ для обоснования выбора параметров n и k .

Обоснование выбора количества кластеров в сенсорной сети

Предположим, на некотором уровне i сенсорной сети существует h узлов-предков, каждый из которых получает данные с n_i узлов-потомков (см. рис. 1). Полагая, что кластеры содержат одинаковое число узлов, определим среднее число n_i узлов-потомков в каждом кластере на этом уровне:

$$n_i = \frac{n}{h}, \quad (7)$$

где n – общее число узлов i -го уровня.

Аналогичным образом можно определить среднее число отбрасываемых пакетов k_i в каждом узле-предке на этом уровне:

$$k_i = \frac{k}{h}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в выражение (6), получаем зависимость θ от количества кластеров и количества отбрасываемых пакетов на i -м уровне сети:

$$\theta(h, k_i) = 1 - \frac{(n - k_i h)(n - k_i h - 1)}{n(n-1)}. \quad (9)$$

При организации некоторого уровня сенсорной сети можно для фиксированного количества узлов n выбирать количество кластеров (узлов-предков) h и количество отбрасываемых пакетов k_i . Например, на рис. 3 для $n=30$ приведен график зависимости θ от h и k_i .

Из графика видно, что для заданных n и θ существует множество вариантов выбора h и k_i . Очевидно, что при выборе конкретной пары значений h и k_i следует стремиться к обеспечению максимальной пропускной способности сети.

Сформулируем *условие обеспечения максимальной пропускной способности сети*: среднее число пакетов $n_i - 1$, получаемых центральным узлом от h кластеров, должно быть равно среднему числу

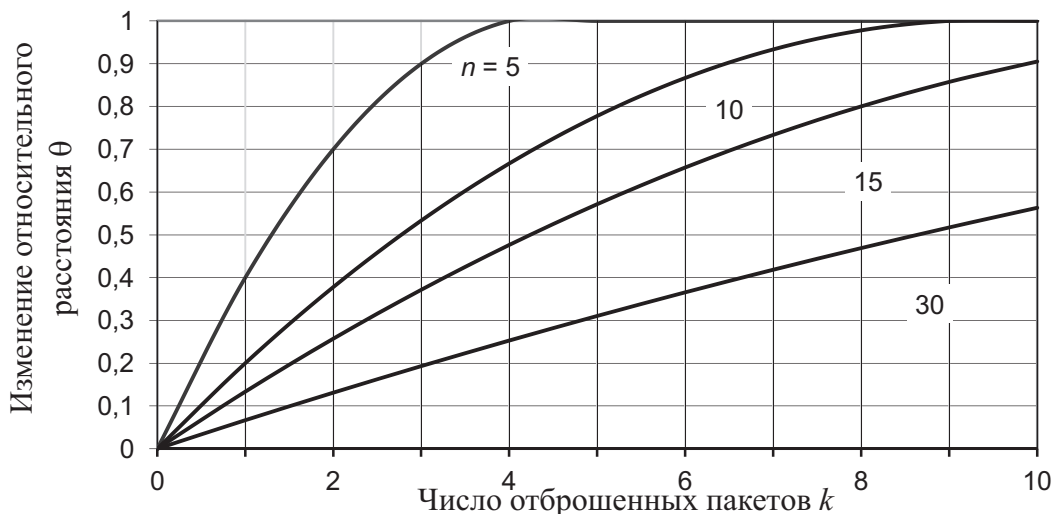


Рис. 2. Зависимость параметра θ от n и k



Рис. 3. Изменение θ в зависимости от h и k_i при $n=30$

$h(n_i - k_i)$ пакетов, переданных узлами-потомками, то есть

$$n_i - 1 = h(n_i - k_i).$$

С учетом (7), получаем:

$$\frac{n}{h} - 1 = n - k_i h. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что число отбрасываемых на каждом уровне пакетов может быть выражено через общее число узлов n и число кластеров h рассматриваемого уровня сети:

$$k_i = \frac{nh + h - n}{h^2}. \quad (11)$$

Используя (7) и (11), можно переписать выражение (14) для параметра θ как функцию от n и h :

$$\begin{aligned} \theta(n, h) &= 1 - \frac{\left(n - \frac{nh + h - n}{h}\right) \left(n - \frac{nh + h - n}{h} - 1\right)}{n(n-1)} = \\ &= 1 - \frac{(n-h)(n-2h)}{nh(n-1)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Зная число узлов сети и задавая параметр $\theta(n, h)$, можно, используя выражение (12), выбирать число кластеров h . Зная n , h и пропускную способность сети V , можно вычислить n_i , k_i и $\theta(n, h)$:

$$n_i = V + 1, \quad k_i = \frac{n - V}{h}, \quad \theta(n, h) = 1 - \frac{V(n-2h)}{n(n-1)}.$$

Например, для сети из $n=30$ узлов, обладающей и пропускной способностью $V=9$ пакетов за такт, при заданном $\theta=0,8$ получаем $n_i=10$, $h=3$, $k_i=7$.

Заключение

В статье описан механизм использования агрегирования предпочтений для организации переда-

чи данных в беспроводной сенсорной сети, позволяющий решить проблему ограниченной пропускной способности радиоканалов и обеспечивающий минимальную задержку при передаче пакетов данных, несущих информацию о событиях.

Предложенный подход был использован при совместной с Сингапурским национальным университетом разработке протокола Pritrans [14], реализующего динамическое назначение приоритетов узлов с использованием отношений консенсуса, формирование очереди передачи сообщений и распределение пропускной способности сети с учетом приоритетов. Полученные результаты показали эффективность разработанного протокола при превышении максимальной нагрузки на сеть, что позволило повысить надежность доставки приоритетных пакетов данных.

Следует отметить, при практическом применении отношения консенсуса следует принимать во внимание особенности правила Кемени. Во-первых, задача поиска отношения консенсуса по правилу Кемени является NP -полной [11] и, в общем случае, требует значительного времени для поиска решения (следовательно, требует значительных затрат вычислительных ресурсов узла, что приводит к снижению времени его автономной работы). Во-вторых, ранжирование Кемени далеко не всегда единственно, и мощность множества ранжирований Кемени может быть весьма большой [15]. Поэтому для проектирования протоколов передачи данных в реальном времени лучше использовать отношение консенсуса, найденное по правилу Борда [16]. Последнее представляет собой приближенное решение задачи Кемени и, как показывают эксперименты, в большом количестве практических случаев может служить хорошей заменой ранжирования Кемени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hart J., Martinez K. Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? // *Earth-Science Reviews* – 2006. – № 78. – P. 177–191.
2. Ададуров С.Е., Шабельников В.А. Интеллектуальная система мониторинга искусственных сооружений // *Мир транспорта*. – 2009 – № 3 – С. 32–37.
3. Szwedczyk R., Mainwaring A., Polastre J., Anderson J., Culler D. An analysis of a large scale habitat monitoring application // *Proc. 2nd Intern. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. – Baltimore, MD, USA, 2004. – P. 214–226.
4. Parker J.R. Multiple sensors, voting methods and target value analysis // *Proc. VI SPIE Conf. on Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition*. – Orlando, Florida, USA, 1999. – P. 305–335.
5. Hull B., Jamieson K., Balakrishnan H. Mitigating Congestions in Wireless Sensor Networks // *Proc. 2nd Intern. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. – Baltimore, MD, USA, 2004. – P. 134–147.
6. Chen D., Varshney P.K. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey // *Proc. Intern. Conf. on Wireless Sensor Networks*. – Las Vegas, Nevada, USA, 2004. – P. 227–233.
7. Paek J., Govindan R. RCRT: Rate-controlled reliable transport for wireless sensor network // *Proce. ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. – Sydney, Australia, 2007. – P. 305–319.
8. Muravyov S., Chan M.C., Khomyakova M. Prioritizing sensed data transmission by consensus relation in wireless sensor network // *Proc. 12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symp. on Man Science & Measurement*. – Annecy, France, 2008. – P. 277–282.
9. Кемени Дж., Снелл Дж. Кибнетическое моделирование. – М.: Советское радио, 1972. – 192 с.
10. Muravyov S.V. Rankings as ordinal scale measurement results // *Metrology and Measurement Systems*. – 2007. – V. 13. – № 1. – P. 9–24.
11. Muravyov S.V., Savolainen V. Special interpretation of formal measurement scales for the case of multiple heterogeneous properties // *Measurement*. – 2001. – V. 29. – P. 209–223.
12. Кендэл М. Ранговые корреляции. – М.: Статистика, 1975. – 216 с.
13. Кузьмин В.Б., Овчинников С.В. Об измерениях в порядковых шкалах // *Автоматика и телемеханика*. – 1974. – № 11. – С. 106–112.
14. Shao Tao, Chan M.C., Muravyov S.V., Tarakanov E.V. Pritrans: A Prioritized Converge-cast Scheme using Consensus Ranking in Wireless Sensor Networks // *Proc. of SAS-2010*. – Limerick, Ireland, 2010. – P. 251–256.
15. Muravyov S.V., Tarakanov E.V. Multiple solutions of an exact algorithm for determination of all Kemeny rankings: preliminary experimental results // *Proc. of ICMCS*. – Hong Kong, 2011. – V. 1. – N.Y.: ASME Press, 2012. – P. 17–20.
16. Литвак Б.Г. Экспертная информация: Методы получения и анализа. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.

Поступила 23.03.2012 г.

УДК 621.398.725:621.317.727.1

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА

А.И. Заревич, С.В. Муравьев, Е.В. Бедарева, О.Н. Величко*

Томский политехнический университет

E-mail: antonzarevich@ngs.ru

*ГП «Укрметртестстандарт», г. Киев, Украина

Предложен метод определения амплитудно- и фазочастотных характеристик линейных преобразователей тока, основанный на совместной цифровой обработке входного короткого импульсного воздействия и отклика на него. Частотная зависимость коэффициента передачи преобразователя рассчитывается с помощью компонентов комплексных спектральных преобразований напряжений с выходов исследуемого и эталонного преобразователей тока. Предложены пути повышения точности метода, основанные на усреднении по ансамблю спектральных составляющих сигналов.

Ключевые слова:

Цифровая обработка сигналов, преобразование Фурье, функция когерентности, токовый преобразователь, динамические характеристики.

Key words:

Digital signal processing, Fourier transform, coherence function, current transducer, dynamic behaviour.

Введение

Для преобразователей импульсных токов большой амплитуды (например, токовых шунтов) [1, 2] актуальна задача определения динамических метрологических характеристик, которая традиционно требует для своего решения наличия дорогостоящих источников гармонического или импульсного тока большой амплитуды и трудно реализуемых методов измерения малых импедансов. Альтернативой этим подходам являются методы определения амплитудно- и фазочастотной характеристики преобразователей, основанные на формировании короткого импульсного воздействия на исследуемый преобразователь и последующей цифровой обработки его входных и выходных сигналов [3].

Целью статьи является описание алгоритма цифровой обработки импульсных сигналов, получае-