

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОПУЩЕННЫХ ОТСЧЕТОВ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫМ КАНАЛАМ СВЯЗИ В ПРИЛОЖЕНИЯХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Прохорова Екатерина Вячеславовна,
Сургутский государственный университет" (СурГУ),
г. Сургут, Ханты-Мансийского автономного округа –
Югры, Россия, prohorova_ev@surgu.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-11-10-17

Manuscript received 10 June 2021;
Accepted 26 July 2021

Рыжаков Виталий Владимирович,
Сургутский государственный университет" (СурГУ),
г. Сургут, Ханты-Мансийского автономного округа –
Югры, Россия, ryzhakov_vv@surgu.ru

Ключевые слова: интернет вещей, цифровая фильтрация, адаптивная обработка сигналов, дискретные сигналы, каналы связи, передача данных

Рассматривается метод восстановления пропущенных отсчетов аналогового сигнала при их передаче по каналам связи в приложениях интернета вещей. Целью работы является вывод математического описания процедуры восстановления значений отсчетов сигнала с выхода аналогового датчика на приемной стороне, которые не были переданы с целью уменьшения нагрузки на каналы передачи данных. В основу процедуры заложены известные принципы адаптивной обработки сигналов, основанные на динамическом определении параметров цифровых фильтров на основе оценки среднеквадратичного отклонения сигнала, проходящего через фильтр, от некоторого эталонного сигнала, полученного тем или иным способом. Особенностью предложенного метода является решение обратной задачи восстановления отсчетов исходного сигнала при известных параметрах фильтра и эталонного сигнала. В работе осуществлена постановка задачи пропуска и восстановления отсчетов дискретного сигнала, получено выражение для целевой функции метода восстановления пропущенных дискретных отсчетов, а также выражение для итерационного восстановления по методу Ньютона значений отсчетов исходного аналогового сигнала на приемной стороне, которые не были переданы по каналу передачи данных. Установлены условия применимости метода, заключающиеся в априори известных параметрах эталонного сигнала и цифрового фильтра, которые определяются заранее по известным характеристикам исходного сигнала. В качестве задачи, для решения которых применим предложенный метод, рассматривается фильтрация и передача по каналам связи сигналов электрокардиограммы, для которой в качестве эталонной формы может быть получена электрокардиограмма, как норма для здоровых пациентов. Практическая значимость предложенного метода заключается в организации распределенных вычислений для систем интернета вещей, для которых критически важным является обеспечение экономии энергии автономного источника питания датчиков и снижение нагрузки на каналы передачи данных.

Информация об авторах:

Прохорова Екатерина Вячеславовна, Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры "Сургутский государственный университет" (СурГУ), аспирант, преподаватель кафедры радиоэлектроники и электроэнергетики, г. Сургут, Ханты-Мансийского автономного округа - Югры, Россия

Рыжаков Виталий Владимирович, Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры "Сургутский государственный университет" (СурГУ), заведующий кафедрой радиоэлектроники и электроэнергетики, к.ф.-м.н., г. Сургут, Ханты-Мансийского автономного округа - Югры, Россия

Для цитирования:

Прохорова Е.В., Рыжаков В.В. Восстановление пропущенных отсчетов дискретных сигналов при передаче цифровой информации по инфокоммуникационным каналам связи в приложениях интернета вещей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №11. С. 10-17.

For citation:

Prohorova E.V., Ryzhakov V.V. (2021) Regeneration of discrete signals missing samples in the internet of things applications at digital information transmitting via infocommunication channels. *T-Comm*, vol. 15, no.11, pp. 10-17. (in Russian)

Введение

Рассматриваемая в работе проблема относится к классу задач адаптивной обработки сигналов. Типовыми задачами этого класса являются задачи идентификации неизвестной нелинейной системы, компенсация эхо-сигналов, выравнивание характеристики электрических каналов связи, построение адаптивных систем управления, построение адаптивных антенных решеток, шумочистка сигналов, линейное предсказание сигналов [1-3].

Основная идея адаптивной обработки сигналов заключается в подборе и динамической перестройке параметров цифровых фильтров, выполняемых по схемам, как КИХ-, так и БИХ-фильтров, а также их комбинаций, называемых решетчатыми структурами. Перестройка параметров цифровых фильтров осуществляется на основе оценки отклонения сигнала, проходящего через фильтр, от некоторого эталонного сигнала, полученного тем или иным способом.

В типовой архитектуре приложений интернета вещей [4], представленной на рисунке 1, при использовании аналоговых датчиков, устанавливаемых на различные контролируемые объекты, возникают задачи фильтрации снимаемых датчиком сигналов.



Рис. 1. Общая структурная схема организации распределенных вычислений в системах интернета вещей

Фильтрация сигнала с датчика может осуществляться применением аналоговых схем, устанавливаемых до дискретизатора, или использованием методов цифровой фильтрации после получения дискретных отсчетов в дискретизаторе. Дискретный сигнал с дискретизатора передается в микроконтроллер датчика, основная задача которого заключается в организации передачи данных с датчика по беспроводному каналу связи в контроллер сбора данных, который, в свою очередь, обеспечивает передачу сигнала датчика на центральный сервер обработки данных через сеть Интернет. При этом датчик, дискретизатор сигнала датчика и микроконтроллер датчика устанавливаются на общую плату с автономным источником питания на основе химического источника тока – батареи или аккумулятора. Активная работа платы датчика приводит к расходу энергии источника тока и ограничивает время работы всей системы, что является существенной проблемой приложений интернета вещей [4].

Существуют также приложения интернета вещей, в которых функции микроконтроллера датчика и микроконтроллера сбора данных объединяются. В этом случае подключение к сети Интернет осуществляется непосредственно микроконтроллером датчика по беспроводному каналу, например, по протоколу NB-IoT [4], что повышает расход энергии батарей платы датчика, поскольку в этом случае требуется реализация более сложных алгоритмов передачи данных по сети Интернет протоколов верхних уровней модели OSI.

Главным недостатком применения аналоговых фильтров является повышенные габариты датчика, особенно в ситуации, когда спектр полезного сигнала оказывается в низкочастотной области. Поэтому в последнее время исследователи стали уделять все больше внимания вопросам фильтрации сигналов с аналоговых датчиков в приложениях интернета вещей методами цифровой фильтрации [5-18].

Использование методов цифровой фильтрации приводит к необходимости разработки сложных алгоритмов цифровой обработки сигналов, требующих значительных вычислительных затрат. Практическая реализация сложных алгоритмов обработки приводит к необходимости установки на плату датчика микроконтроллера с более высокими вычислительными возможностями, что приводит к повышенному энергопотреблению.

Одни из подходов для решения этой проблемы заключается в использовании программируемых пользователем вентильных матриц FPGA с низким энергопотреблением [19-28], устанавливаемых перед микроконтроллером датчика, что несколько снижает расход энергии батареи датчика, но не решает проблемы габаритов платы датчика.

Другим подходом для решения проблемы снижения расхода энергии и уменьшения габаритов платы датчика является использование распределенных вычислений, когда большая часть вычислительных операций перекладывается на контроллер сбора данных или на центральный сервер обработки данных [29-37]. При этом, как, например, показано в [37], увеличиваются объемы трафика данных в каналах связи, что является критичным фактором в беспроводных каналах передачи данных, поскольку при увеличении числа датчиков интернета вещей нагрузка на эти каналы, ресурс которых ограничен, возрастает.

В данной работе рассматривается подход, при котором фильтрация сигналов с аналогового датчика полностью перекладывается на центральный сервер обработки данных, а проблема снижения потоков данных в каналах связи решается за счет использования метода восстановления пропущенных отсчетов аналогового сигнала при их передаче по каналам связи.

Суть метода заключается в модификации метода линейного предсказания в системах адаптивной обработки сигналов, заключающейся в том, что в канал передачи данных передаются не все отсчеты дискретного сигнала с аналогового датчика, а пропущенные отсчеты восстанавливаются на приемной стороне. Как и в методах линейного предсказания сигналов в предложенном методе используется заранее определенный эталонный сигнал.

Однако, в отличие от линейного предсказания, этот сигнал является детерминированным и не меняется со временем. Кроме этого, в предложенном методе решается, в некотором смысле, обратная линейному предсказанию задача, когда в результате минимизации целевой функции определяются не коэффициенты цифрового фильтра, а оцениваются значения пропущенных отсчетов сигнала. Сами же коэффициенты определяются заранее, исходя из свойств сигнала с аналогового датчика, что, несомненно, ограничивает применимость предложенного метода приложениями интернета вещей, для которых данные условия могут выполнены.

1. Постановка задачи пропуска и восстановления отсчетов дискретного сигнала

Операция цифровой фильтрации для нерекурсивной дискретной цепи представляет собой процедуру описываемую в общем виде следующим выражением:

$$y(n \cdot T) = \sum_{m=0}^M b_m \cdot x(n \cdot T - m \cdot T), \quad (1)$$

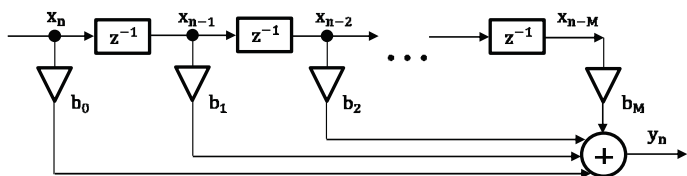
Дискретизатор аналогового сигнала датчика осуществляет получение дискретных отсчетов с аналогового выхода измерительного датчика и передает их в микроконтроллер датчика, который осуществляет выполнение части математических операций, согласно выражения (1). Далее дискретные отсчеты промежуточных операций по каналу передачи данных передаются на микроконтроллер сбора данных, который завершает выполнение вычислительных операций.

Как было указано в [37], после проведения цифровой фильтрации входных отсчетов x_i , появляется возможность провести прореживание выходных отсчетов y_i для сокращения объемов передаваемых по каналу связи данных. Однако, реализация этих операций непосредственно на микроконтроллере датчика приводит к его повышенной вычислительной загруженности и увеличивает расход энергии автономного источника питания.

При организации распределенных вычислений необходимо решить вопрос о том, какая часть представленного выражения (1) будет выполняться на стороне автономного измерительного датчика, а какая на стороне стационарного микроконтроллера сбора данных. При этом необходимо найти наилучшее распределение вычислительных операций, оптимальное по критериям уменьшения нагрузки на микроконтроллер датчика, а также минимизации объема трафика, циркулирующего в канале передачи данных.

Рассмотрим цифровой фильтр, построенный по схеме нерекурсивной дискретной цепи (рис. 2).

Рис. 2. Структурная схема нерекурсивного цифрового фильтра



На схеме рис. 2 x_i – это i -е отсчеты исходного аналогового сигнала, которые используются для определения y_n – n -го отсчета выходного сигнала цифрового фильтра.

Предположим, что исходный аналоговый сигнал $x(t)$ является стационарным стохастическим процессом в широком смысле, т.е. его среднее значение и корреляционная функция не меняются при переносе начала отсчета времени. При этом выходной сигнал представим в виде:

$$y(t) = d(t) - \varepsilon(t),$$

где $d(t)$ – некий эталонный детерминированный сигнал, а $\varepsilon(t)$ – сигнал ошибки или отклонение сигнала $y(t)$ от $d(t)$.

Для схемы (рис. 2) входные отсчеты сигнала $x(t)$, начиная с n -го отсчета, можно представить в виде вектора:

$$\mathbf{X}_n = [x_n, \dots, x_{n-M}]^T,$$

где T – означает операцию транспонирования.

Отсчеты выходного сигнала можно представить, соответственно, в виде скалярного произведения векторов входного сигнала и весовых коэффициентов $\mathbf{B}_M = [b_0, \dots, b_M]^T$:

$$y_n = \mathbf{X}_n^T \cdot \mathbf{B}_M = \mathbf{B}_M^T \cdot \mathbf{X}_n. \quad (2)$$

Рассмотрим ситуацию, когда весовые коэффициенты фильтра \mathbf{B}_M определены заранее исходя из свойств эталонного сигнала $d(t)$ и исходного сигнал $x(t)$. При этом изучим влияние на качество фильтрации пропусков отсчетов сигналов \mathbf{X}_n при условии, что верхняя частота спектра сигнала $d(t)$ намного меньше частоты дискретизации аналогового сигнала $x(t)$. Данная ситуация аналогична полному переносу вычислений на сторону микроконтроллера сбора данных и уменьшению плотности потока передачи в канале данных (рис. 1).

Сформулируем задачу в виде восстановления на приемной стороне пропущенных отсчетов последовательности \mathbf{X}_n так, чтобы выходной сигнал y_n как можно меньше отличался от эталонного сигнала d_n , т.е. чтобы сигнал y_n имел наилучшее приближение к сигналу d_n . Для этого выходной сигнал y_n будем сравнивать с эталонным сигналом d_n , и в результате сравнения определять сигнал ошибки ε_n , равный [2]:

$$\varepsilon_n = d_n - y_n.$$

Далее, изменяя по определенному алгоритму те значения отсчетов \mathbf{X}_n , которые не были переданы, будем минимизировать среднеквадратическое значение ошибки ε_n :

$$\xi = E[\varepsilon_n^2],$$

называемое целевой функцией.

2. Целевая функция метода восстановления пропущенных дискретных отсчетов

Для вывода целевой функции воспользуемся выражением сигнала ошибки:

$$\varepsilon_n = d_n - y_n = d_n - \mathbf{X}_n^T \cdot \mathbf{B}_M = d_n - \mathbf{B}_M^T \cdot \mathbf{X}_n.$$

Возведем в квадрат сигнал ошибки и найдем математическое ожидание полученного выражения, усредняя по n , считая, что ε_n , y_n и \mathbf{X}_n стационарные в широком смысле величины [2]:

$$\xi = E[\varepsilon_n^2] = E[d_n^2] + \mathbf{B}_M^T \cdot E[\mathbf{X}_n \cdot \mathbf{X}_n^T] \cdot \mathbf{B}_M - 2 \cdot E[d_n \cdot \mathbf{X}_n^T] \cdot \mathbf{B}_M \quad (3)$$

Выражение получено исходя из условия, что математическое ожидание суммы равно сумме математических ожиданий, сигналы x_n и d_n не являются независимыми, следовательно математическое ожидание произведения не равно произведению математических ожиданий, а также учтено то, что коэффициенты \mathbf{B}_M вычислены заранее и не зависят от n .

Введем обозначения:

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}_n \cdot \mathbf{X}_n^T] = \begin{bmatrix} x_n^2 & x_n \cdot x_{n-1} & \dots & x_n \cdot x_{n-M} \\ x_{n-1} \cdot x_n & x_{n-1}^2 & \dots & x_{n-1} \cdot x_{n-M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n-M} \cdot x_n & x_{n-M} \cdot x_{n-1} & \dots & x_{n-M}^2 \end{bmatrix}.$$

Матрица \mathbf{R} представляет собой корреляционную матрицу входного сигнала. Ее диагональные элементы равны средне-

квадратичным значениям входных компонентов, а остальные элементы – значениям взаимокорреляционной функции входных компонентов. Каждый элемент матрицы \mathbf{R} при ограниченном числе отсчетов сигналов M вычисляется по формуле:

$$\bar{r}_{ij} = E[x_i \cdot x_j] = \frac{1}{M-|n-\min(i,j)|+1} \cdot \sum_{k=0}^{M-|n-\min(i,j)|} x_{i-k} \cdot x_{j-k}, \quad (4)$$

$$i = (n, \dots, n - M), j = (n, \dots, n - M),$$

то есть представляет собой оценку корреляционной функции случайного дискретного сигнала и вычисляется как среднее значение от произведения сдвинутых друг относительно друга ограниченных последовательностей отсчетов входных сигналов размерности M .

$$\mathbf{P} = E[d_n \cdot \mathbf{X}_n^T] = E[d_n \cdot x_n, d_n \cdot x_{n-1}, \dots, d_n \cdot x_{n-M}]^T.$$

Вектор \mathbf{P} представляет собой множество значений взаимокорреляционной функции отсчетов эталонного сигнала и отсчетов входного сигнала. Каждый элемент вектора \mathbf{P} вычисляется по формуле:

$$p_i = E[d_n \cdot x_i] = \frac{1}{M-|n-i|} \sum_{k=0}^{M-|n-i|} d_{n-k} \cdot x_{i-k}, \quad i = (n, \dots, n - M), \quad (5)$$

то есть представляет собой среднее значение по n от произведения сигналов d_n и сдвинутого относительно него сигнала x_n .

Перепишем выражение (3) с учетом введенных обозначений:

$$\xi = E[\varepsilon_n^2] = E[d_n^2] + \mathbf{B}_M^T \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{B}_M - 2 \cdot \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{B}_M. \quad (6)$$

Поиск минимума целевой функции (6) будем осуществлять градиентным методом, т.е. будем искать такое значение ξ , при котором его градиент по отсчетам входного сигнала, которые не были переданы, будет равен нулю:

$$\nabla = \frac{\partial \xi}{\partial \tilde{\mathbf{X}}_G} = \frac{\partial (\mathbf{B}_M^T \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{B}_M)}{\partial \tilde{\mathbf{X}}_G} - 2 \cdot \frac{\partial (\mathbf{P}^T \cdot \mathbf{B}_M)}{\partial \tilde{\mathbf{X}}_G} = \mathbf{0}, \quad (7)$$

где $\tilde{\mathbf{X}}_G = [\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_t, \dots, \tilde{x}_G]^T$ – вектор размерностью G , который содержит только те t элементов вектора \mathbf{X}_n , которые не были переданы по системе связи и, следовательно, являются подлежащими оценке значения переменными, при этом $G < M$ – число таких переменных; $\mathbf{0} = [0, \dots, 0]^T$ – вектор столбец размерностью G . Градиент (7) будет равен нулю, а целевая функция примет минимальное значение, если будет найдено оптимальное значение вектора $\tilde{\mathbf{X}}_G = \tilde{\mathbf{X}}_G^*$.

3. Метод восстановления пропущенных отсчетов дискретного сигнала

Таким образом, задача состоит в том, чтобы найти такие значения переменных вектора $\tilde{\mathbf{X}}_G^*$, которые минимизируют целевую функцию ξ . Для решения этой задачи может быть применен [2] итерационный метод Ньютона нахождения корней уравнения, т.е. метод поиска таких значений переменных $\tilde{\mathbf{X}}_G$, которые обращают уравнение (7) в тождество с некоторой заданной погрешностью δ .

В рассматриваемом случае метод может быть описан выражением вида:

$$\tilde{\mathbf{X}}_G^{m+1} = \tilde{\mathbf{X}}_G^m - \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi(\tilde{\mathbf{X}}_G^m)}{\partial \tilde{x}_1} \\ \frac{\partial \xi(\tilde{\mathbf{X}}_G^m)}{\partial \tilde{x}_t} \\ \frac{\partial \xi(\tilde{\mathbf{X}}_G^m)}{\partial \tilde{x}_G} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mu_1 \cdot \frac{\partial \xi(\tilde{\mathbf{X}}_G^m)}{(\partial \tilde{x}_1)^2} \\ \mu_t \cdot \frac{\partial \xi(\tilde{\mathbf{X}}_G^m)}{(\partial \tilde{x}_t)^2} \\ \mu_G \cdot \frac{\partial \xi(\tilde{\mathbf{X}}_G^m)}{(\partial \tilde{x}_G)^2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

здесь m – номер итерации, $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \dots, \mu_G]$ – безразмерные коэффициенты, определяющие шаг итерации для всех переменных вектора $\tilde{\mathbf{X}}_G$; последовательное вычисление векторов $\tilde{\mathbf{X}}_G^{m+1}$ необходимо вести до тех пор, пока не будет выполнено $\max(|\tilde{x}_1^{m+1} - \tilde{x}_1^m|, \dots, |\tilde{x}_G^{m+1} - \tilde{x}_G^m|) < \delta$. После этого принимается, что $\tilde{\mathbf{X}}_G^* = \tilde{\mathbf{X}}_G^{m+1}$. В процессе поиска решения коэффициенты $\boldsymbol{\mu}$ могут изменяться и принимать разные значения для разных переменных $\tilde{\mathbf{X}}_G$ в диапазоне $0 < \mu_i \leq 1$. При первой итерации вектор $\tilde{\mathbf{X}}_G^0$ устанавливается произвольно.

Рассмотрим производную:

$$\frac{\partial (\mathbf{B}_M^T \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{B}_M)}{\partial \tilde{x}_t} = \frac{\partial (b_0^2 \cdot \bar{r}_{(n)(n)} + \dots + b_0 \cdot b_M \cdot \bar{r}_{(n-M)(n)} + b_0 \cdot b_1 \cdot \bar{r}_{(n)(n-1)} + \dots)}{\partial \tilde{x}_t} + \frac{\partial (\dots + b_1 \cdot b_M \cdot \bar{r}_{(n-M)(n-1)} + \dots \bar{r}_{(n-M)(n-M)})}{\partial \tilde{x}_t} \quad (9)$$

В выражении (9) ненулевыми могут быть только те слагаемые, которые содержат переменные вектора $\tilde{\mathbf{X}}_G$, входящие в выражения (4) для \bar{r}_{ij} . Рассмотрим такое слагаемое выражения (9), которое содержит переменную \tilde{x}_t вектора $\tilde{\mathbf{X}}_G$, включая все возможные варианты вхождения этой переменной в выражение для \bar{r}_{ij} :

$$\frac{b_s \cdot b_c}{M-|n-\min(i,j)|+1} \cdot \frac{\partial (\sum_{z,t,v \neq t} x_z \cdot x_v)}{\partial \tilde{x}_t} = \frac{b_s \cdot b_c}{M-|n-\min(i,j)|+1} \cdot \left(\frac{\partial (\sum_{z \neq t, v \neq t} x_z \cdot x_v)}{\partial \tilde{x}_t} + \frac{\partial (\sum_{z=t, v \neq t} x_z \cdot x_v)}{\partial \tilde{x}_t} + \frac{\partial (\sum_{z \neq t, v=t} x_z \cdot x_v)}{\partial \tilde{x}_t} \right) = \frac{b_s \cdot b_c}{M-|n-\min(i,j)|+1} \cdot (\sum_{t,v} x_v + \sum_{z,t} x_z + 2 \cdot \sum_t \tilde{x}_t). \quad (10)$$

Таким образом, варьируемые переменные \tilde{x}_t , ($t = 1 \dots G$), входят в выражение метода Ньютона (8) в первой степени. Элементы x_v и x_z представляют отсчеты, которые были переданы по каналу связи системы рис.1 и, следовательно, известны при итерационных вычислениях по формуле (8). При этом, в выражение (10) входят только те элементы x_v и x_z , которые в произведениях сумм выражения (4) умножаются на переменные \tilde{x}_t .

Рассмотрим производную:

$$\frac{\partial (\mathbf{P}^T \cdot \mathbf{B}_M)}{\partial \tilde{x}_t} = \frac{\partial (b_0 \cdot p_n + b_1 \cdot p_{n-1} + \dots + b_M \cdot p_{n-M})}{\partial \tilde{x}_t}. \quad (11)$$

В выражении (11) ненулевыми могут быть только те слагаемые, которые содержат переменные вектора $\tilde{\mathbf{X}}_G$, входящие в выражения (5) для p_i . Рассмотрим такое слагаемое выражения (11), которое содержит переменную \tilde{x}_t вектора $\tilde{\mathbf{X}}_G$, включая все возможные варианты вхождения этой переменной в выражение для p_i :

$$\frac{b_s}{M-|n-i|} \cdot \frac{\partial (\sum_{z,t} d_z \cdot x_v)}{\partial \tilde{x}_t} = \frac{b_s}{M-|n-i|} \cdot \left(\frac{\partial (\sum_{v \neq t} d_z \cdot x_v)}{\partial \tilde{x}_t} + \frac{\partial (\sum_{v=t} d_z \cdot x_v)}{\partial \tilde{x}_t} \right) = \frac{b_s}{M-|n-i|} \cdot (\sum_t d_z).$$

Таким образом, производные от слагаемых $\mathbf{P}^T \cdot \mathbf{B}_M$ градиента (7) представляют собой константы.

Тогда получаем:

$$\frac{\partial \xi(\bar{X}_G^m)}{\partial \bar{x}_t} = \sum_{M \times M, t} \left(\frac{b_s \cdot b_c}{M - |n - \min(i, j)| + 1} \cdot (\sum_{t, v} x_v + \sum_{z, t} x_z + 2 \cdot \sum_t \bar{x}_t) \right) - 2 \cdot \sum_{M, t} \left(\frac{b_s}{M - |n - i|} \cdot (\sum_t d_z) \right). \quad (12)$$

Вторая производная целевой функции ξ по \bar{x}_t будет равна:

$$\frac{\partial^2 \xi(\bar{X}_G^m)}{(\partial \bar{x}_t)^2} = \sum_{M \times M, t} \left(\frac{2 \cdot b_s \cdot b_c}{M - |n - \min(i, j)| + 1} \right), \quad (13)$$

то есть представляет собой константу.

Подстановка (12) и (13) в выражение (8) позволяет окончательно получить выражение для итерационного восстановления значений отсчетов сигнала $x(t)$ на приемной стороне, которые не были переданы по каналу передачи данных, по методу Ньютона:

$$\begin{matrix} \bar{X}_G^{m+1} = \\ \bar{X}_G^m - \end{matrix} \begin{bmatrix} \mu_1 \cdot \frac{\sum_{M \times M, 1} \left(\frac{b_s \cdot b_c}{M - |n - \min(i, j)| + 1} (\sum_{1, v} x_v + \sum_{z, 1} x_z + 2 \cdot \sum_1 \bar{x}_1) \right) - 2 \cdot \sum_{M, 1} \left(\frac{b_s}{M - |n - i|} (\sum_1 d_z) \right)}{\sum_{M \times M, 1} \left(\frac{2 \cdot b_s \cdot b_c}{M - |n - \min(i, j)| + 1} \right)} \\ \dots \\ \mu_t \cdot \frac{\sum_{M \times M, t} \left(\frac{b_s \cdot b_c}{M - |n - \min(i, j)| + 1} (\sum_{t, v} x_v + \sum_{z, t} x_z + 2 \cdot \sum_t \bar{x}_t) \right) - 2 \cdot \sum_{M, t} \left(\frac{b_s}{M - |n - i|} (\sum_t d_z) \right)}{\sum_{M \times M, t} \left(\frac{2 \cdot b_s \cdot b_c}{M - |n - \min(i, j)| + 1} \right)} \\ \dots \\ \mu_G \cdot \frac{\sum_{M \times M, G} \left(\frac{b_s \cdot b_c}{M - |n - \min(i, j)| + 1} (\sum_{G, v} x_v + \sum_{z, G} x_z + 2 \cdot \sum_G \bar{x}_G) \right) - 2 \cdot \sum_{M, G} \left(\frac{b_s}{M - |n - i|} (\sum_G d_z) \right)}{\sum_{M \times M, G} \left(\frac{2 \cdot b_s \cdot b_c}{M - |n - \min(i, j)| + 1} \right)} \end{bmatrix}$$

После восстановления последовательности входных отсчетов сигнала X_n выходные отсчеты фильтра (рис. 2) могут быть получены по выражению (2).

Заключение

Предложенный метод относится к классу адаптивных систем цифровой обработки сигналов и может использоваться при условии, если эталонный сигнал $d(t)$ точно известен, а параметры цифрового фильтра V_M определены заранее по известным характеристикам сигналов $d(t)$ и $x(t)$.

Примером такой ситуации может являться задача фильтрации и передачи по каналам связи сигналов электрокардиограммы, поскольку в этом случае значение имеет фиксация отклонений кардиограммы пациента от некоторой эталонной формы, которая может быть выделена, как норма для здоровых пациентов.

Это позволяет обеспечить оба условия применимости метода. При этом обеспечивается экономия полосы пропускания каналов связи и перенос вычислительной нагрузки с контроллера датчика электрокардиограммы на контроллер сбора данных или на центральный сервер.

Практическая значимость предложенного метода заключается в организации распределенных вычислений для систем интернета вещей, для которых критически важным является обеспечение экономии энергии автономного источника питания датчиков и снижение нагрузки на каналы передачи данных.

Литература

1. S. Haykin and B. Widrow (2003), Least-Mean-Square Adaptive Filters, Hoboken, NJ: Wiley – Interscience. 502 p.
2. Уидроу Б., Стурнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
3. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.
4. Ли П. Архитектура интернета вещей. М.: ДМК Пресс, 2019. 454 с.
5. Паришин А.Ю., Паришин Ю.Н. Экспериментальное исследование адаптивной обработки сигналов на фоне фликкер-шума // Радиотехника. Том 84. № 11(21). 2020. С. 72-81.
6. Терентьев М. Н. Показатели работы дискретных беспроводных сетей интернета вещей // Научно-технический вестник Поволжья. № 11. 2018. С. 258-260.
7. Каницев В. В., Котенев Д. Д. Разработка системы мониторинга состояния человека на основе данных о вариабельности сердечного ритма // Вопросы науки и образования. № 8(20). 2018. С. 36-39.
8. Md Masud Rana, Md Kaisar R. Khan and Ahmed Abdelhadi. IoT Architecture for Cyber-Physical System State Estimation Using Unscented Kalman Filter, Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), 2020. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICIRCA48905.2020.9183350
9. Manus Henry. Low cost, low pass Prism filtering, 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, Publisher: IEEE, 2020. DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138232.
10. Md Khalid Hossain Jewel, Rabiul Sale Zakariyya and Fujiang LinA, Pilot-based Hybrid and Reduced Complexity Channel Estimation Method for Downlink NB-IoT Systems, 2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 2020. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/IWS49314.2020.9360009.
11. Hany Hammad, New Technique for IoT indoor localization by employing segmented UHF RFID bandwidth using bandpass filters and circulators, 2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), 2018. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ANTEM.2018.8573027.
12. Abhishek Ambede, A. P. Vinod and Shanker Shreejith, Efficient FPGA implementation of a variable digital filter based spectrum sensing scheme for cognitive IoT systems, 2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS), 2017. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/GIOTS.2017.8016230.
13. Bart J. Thijssen, Eric A. M. Klumperink, Philip Quinlan and Bram Nauta, A 0.06–3.4-MHz 92- μ W Analog FIR Channel Selection Filter With Very Sharp Transition Band for IoT Receivers, IEEE Solid-State Circuits Letters, Vol. 2, Issue 9, Sept. 2019, pp. 171-174, DOI: 10.1109/LSSC.2019.2935569.
14. Jason Chao, Dennis Liu, Skid Chiu, Chia Shy Chang and Heinz Ru, Ultra-miniature SAW filter new structure: for 5G IoT mobile device, 2019 14th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2019. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/IMPACT47228.2019.9024957.
15. Md Anam Mahmud, Ahmed Abdelgawad, Kumar Yelamarthi and Yasser A Ismail, Signal processing techniques for IoT-based structural health monitoring, 2017 29th International Conference on Microelectronics (ICM), Publisher: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICM.2017.8268825.
16. Cheng Kang, Sizheng Chen, Na Yan, Yunyong Yu and Hao Min. A Low-power Third-Order Butterworth Filter for NB-IoT Application, 2018 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 2018. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICSICT.2018.8564966.
17. Aghus Sofwan, Sumardi and Nely Ulwiyati, Filtering for Data Acquisition on Wireless Sensor Network, 2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), 2018. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICITACEE.2018.8576940.

18. Emmanuel Oyekanlu and Kevin Scoles, Towards Low-Cost, Real-Time, Distributed Signal and Data Processing for Artificial Intelligence Applications at Edges of Large Industrial and Internet Networks, 2018 IEEE First International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Engineering (AIKE), 2018. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/AIKE.2018.00037.
19. Строгонов А.В. Цифровая обработка сигналов в базе программируемых логических интегральных схем: учеб. пособие. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2015. [Электронный ресурс] URL: https://cchgeu.ru/upload/iblock/206/osnovy-tsos-v-plis_2015.pdf (дата обращения: 08.05.2021г.).
20. Anirut Trakultritung, Ekkawin Thanangchusin and Sorawat Chivapreecha. Distributed arithmetic LMS adaptive filter implementation without look-up table, 2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2012. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ECTICon.2012.6254284.
21. Gowtham N. and Babu P. An efficient architecture for BLMS adaptive filter based on distributed arithmetic technique, 2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), 2014. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICGCCEE.2014.6921425.
22. S. Raghunadha Reddy and P. JayaKrishnan, ASIC implementation of distributed arithmetic in adaptive FIR filter, 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), Publisher: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICCPCT.2017.8074252.
23. Walter Huang and David V. Anderson, Adaptive filters using modified sliding-block distributed arithmetic with offset binary coding, 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICASSP.2009.4959641.
24. Atul A. Chandekar and Mahesh Pawar, Delay and power optimized adaptive filter using distributed arithmetic, 2017 International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), 2017. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICECA.2017.8203682.
25. Ушенина И. Расчет, анализ и реализация КИХ-фильтра на FPGA с использованием IP-модуля FIR Compiler 7.2 // Компоненты и технологии. 2021. № 2(235). С. 57-64.
26. Хлуденёв А.В. Эффективная реализация КИХ-фильтра на FPGA // Актуальные проблемы и перспективы в сфере инженерной подготовки. 2020. С. 239-245.
27. Мухин А.Е., Уланов П.Н. Применение FPGA для обработки сигналов в DDC SDR-приемнике // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2020. Том 4. № 1. С. 46-50.
28. Соловьев В.В. Проектирование функциональных блоков встраиваемых систем на FPGA. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 348 с.
29. Md Anam Mahmud, Kyle Bates, Trent Wood, Ahmed Abdelgawad and Kumar Yelamarthi, A complete Internet of Things (IoT) platform for Structural Health Monitoring (SHM), 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 2018. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/WF-IoT.2018.8355094.
30. Du Yong Kim, Ju Hong Yoon, Yong Hoon Kim and Vladimir Shin, Distributed information fusion filter with intermittent observations, 2010 13th International Conference on Information Fusion, 2010. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICIF.2010.5711988.
31. Haiyang Yu, Yisha Liu and Wei Wang. Distributed sparse signal estimation in sensor networks using H_{∞} -consensus filtering, IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, Vol. 1, Issue 2, April 2014, pp. 149-154, DOI: 10.1109/JAS.2014.7004544.
32. Hui Long, Zhihua Qu, Xiaoping Fan and Shaoqiang Liu, Distributed extended kalman filter based on consensus filter for wireless sensor network, Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2012. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/WCICA.2012.6359205.
33. Ерёмин О.Ю., Степанова М.В. Организация распределенных вычислений в инфраструктуре интернета вещей на основе методов машинного обучения с подкреплением // Математические методы в технике и технологиях. Том 12-3. 2020. С. 111-114.
34. Нефедова И.С., Финогеев А.А., Финогеев А.Г. Распределенная обработка данных в беспроводных сенсорных сетях на основе мультиагентного подхода и туманных вычислений // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: Пензенский государственный университет, 2016. Том 1. С. 258-260.
35. Лященко А.М., Манучарян Л.Х., Пачев А.Н. Реализация приложений интернета вещей агентной моделью АККА // Инженерный вестник Дона. 2019. № 5(56). С. 32.
36. Аль-Марди, Мохаммед Хайдар Авадх. Особенности распределенных вычислений, учитываемые в методах оптимизации алгоритмов по объему межпроцессорных передач // Компьютерные инструменты в образовании. 2018. № 2. С. 31-38.
37. Ryzhakov V.V. and Prohorova E.V. Electrocardiogram Signals Digital Processing in a Distributed Computing System, 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2020. Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166080.

REGENERATION OF DISCRETE SIGNALS MISSING SAMPLES IN THE INTERNET OF THINGS APPLICATIONS AT DIGITAL INFORMATION TRANSMITTING VIA INFOCOMMUNICATION CHANNELS

Ekaterina V. Prohorova, Surgut State University, Postgraduate Student, Techer of Dept. of Radioelectronics and Electricity, prohorova_ev@surgu.ru

Vitaliy V. Ryzhakov, Surgut State University, Head of Dept. of Radioelectronics and Electricity, ryzhakov_vv@surgu.ru

Abstract

The paper discusses a method for recovering missing samples of an analog signal during transmission over communication channels in applications of the Internet of Things. The aim of the work is to obtain a mathematical description of the procedure for restoring the values of the signal samples from the output of the analog sensor on the receiving side, which were not transmitted in order to reduce the load on data transmission channels. The procedure is based on the well-known principles of adaptive signal processing, based on the dynamic determination of the parameters of digital filters based on the assessment of the least-mean-square (LMS) deviation of the signal passing through the filter from a reference signal obtained in one way or another. A feature of the proposed method is the solution of the inverse problem of restoring the samples of the original signal with the known parameters of the filter and the reference signal. In this work, the problem of skipping and restoring samples of a discrete signal is formulated, an expression is obtained for the objective function of the method for restoring missing discrete samples, as well as an expression for iterative restoration by Newton's method of the values of the samples of the original analog signal on the receiving side, which were not transmitted via the data transmission channel. The conditions for the applicability of the method are established, which consist in the a priori known parameters of the reference signal and the digital filter, which are determined in advance from the known characteristics of the original signal. Filtration and transmission of electrocardiogram signals through communication channels, for which an electrocardiogram can be obtained as a reference form, as the norm for healthy patients, is considered as a problem for the solution of which the proposed method is applicable. The practical significance of the proposed method lies in the organization of distributed computing for IoT systems, for which it is critically important to ensure energy savings of an autonomous power source for sensors and reduce the load on data transmission channels.

Keywords: *Internet of Things, digital filtering, adaptive signal processing, discrete signals, communication channels, data transmission.*

References

1. S. Haykin and B. Widrow (2003), *Least-Mean-Square Adaptive Filters*, Hoboken, NJ: Wiley -Interscience, 502 p.
2. Widrow B. and Stearns S (1989), *Adaptive Signal Processing*, Radio and communication, 440 p.
3. Dzhigan V. I. (2013), *Adaptive signal filtering: theory and algorithms*, Technosphere, 528 p.
4. Lee P. (2019), *Architecture of the Internet of Things*, DMK Press, 454 p.
5. Parshin A. Yu., Parshin Yu. N. (2020), Experimental study of adaptive signal processing against the background of flicker noise, *Radio engineering*, Vol. 84, No. 11(21). P. 72-81.
6. Terentyev M. N. (2018), Performance indicators of discrete wireless networks of the Internet of things, *Scientific and technical bulletin of the Volga region*, No. 11. Pp. 258-260.
7. Kanishchev V.V., Kotenev D.D. (2018), Development of a human condition monitoring system based on data on heart rate variability, *Problems of Science and Education*. No. 8 (20). Pp. 36-39.
8. Md Masud Rana, Md Kaisar R. Khan and Ahmed Abdelhadi (2020), IoT Architecture for Cyber-Physical System State Estimation Using Unscented Kalman Filter, *Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICIR-CA48905.2020.9183350
9. Manus Henry (2020), Low cost, low pass Prism filtering, *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138232.
10. Md Khalid Hossain Jewel, Rabi Sale Zakariyya and Fujiang LinA (2020), Pilot-based Hybrid and Reduced Complexity Channel Estimation Method for Downlink NB-IoT Systems, *2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/IWS49314.2020.9360009.
11. Hany Hammad (2018), New Technique for IoT indoor localization by employing segmented UHF RFID bandwidth using bandpass filters and circulators, *2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ANTEM.2018.8573027.
12. Abhishek Ambede, A. P. Vinod and Shanker Shreejith (2017), Efficient FPGA implementation of a variable digital filter based spectrum sensing scheme for cognitive IoT systems, *2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/GIoTS.2017.8016230.
13. Bart J. Thijssen, Eric A. M. Klumperink, Philip Quinlan and Bram Nauta (2019), A 0.06-3.4-MHz 92- ? W Analog FIR Channel Selection Filter With Very Sharp Transition Band for IoT Receivers, *IEEE Solid-State Circuits Letters*, Vol. 2, Issue 9, Sept. 2019. Pp. 171-174, DOI: 10.1109/LSSC.2019.2935569.
14. Jason Chao, Dennis Liu, Skid Chiu, Chia Shy Chang and Heinz Ru (2019), Ultra-miniature SAW filter new structure: for 5G IoT mobile device, *2019 14th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/IMPACT47228.2019.9024957.
15. Md Anam Mahmud, Ahmed Abdelgawad, Kumar Yelamarthi and Yasser A Ismail (2017), Signal processing techniques for IoT-based structural health monitoring, *2017 29th International Conference on Microelectronics (ICM)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICM.2017.8268825.

16. Cheng Kang, Sizheng Chen, Na Yan, Yunyong Yu and Hao Min (2018), A Low-power Third-Order Butterworth Filter for NB-IoT Application, *2018 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICSICT.2018.8564966.
17. Aghus Sofwan, Sumardi and Nely Ulwiyati (2018), Filtering for Data Acquisition on Wireless Sensor Network, *2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICITACEE.2018.8576940.
18. Emmanuel Oyekanlu and Kevin Scoles (2018), Towards Low-Cost, Real-Time, Distributed Signal and Data Processing for Artificial Intelligence Applications at Edges of Large Industrial and Internet Networks, *2018 IEEE First International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Engineering (AIKE)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/AIKE.2018.00037.
19. Strogonov A.V. (2015), Digital signal processing in the basis of programmable logic integrated circuits: textbook, Voronezh State Technical University, URL: https://cchgeu.ru/upload/iblock/206/osnovy-tsos-v-plis_2015.pdf (date accessed: 05/08/2021).
20. Anirut Trakultritung, Ekkawin Thanangchusin and Sorawat Chivapreecha (2012), Distributed arithmetic LMS adaptive filter implementation without look-up table, *2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ECTICon.2012.6254284.
21. N. Gowtham and P. Babu (2014), An efficient architecture for BLMS adaptive filter based on distributed arithmetic technique, *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICGCCEE.2014.6921425.
22. S. Raghunadha Reddy and P. JayaKrishnan (2017), ASIC implementation of distributed arithmetic in adaptive FIR filter, *2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICCPCT.2017.8074252.
23. Walter Huang and David V. Anderson (2009), Adaptive filters using modified sliding-block distributed arithmetic with offset binary coding, *2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICASSP.2009.4959641.
24. Atul A. Chandekar and Mahesh Pawar (2017), Delay and power optimized adaptive filter using distributed arithmetic, *2017 International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICECA.2017.8203682.
25. Ushenina I. (2021), Calculation, analysis and implementation of an FIR filter on FPGA using the FIR Compiler 7.2 IP module, *Components and technologies*, No. 2(235), P. 57-64.
26. Khludenyov A.V. (2020), Effective implementation of an FIR filter on FPGA, *Actual problems and prospects in the field of engineering training*. Pp. 239-245.
27. Mukhin A.E. and Ulanov P.N. (2020), Application of FPGA for Signal Processing in DDC SDR Receiver, *High Performance Computing Systems and Technologies*. Vol. 4. No. 1. Pp. 46-50.
28. Soloviev V.V. (2020), Design of functional blocks of embedded systems on FPGA, *Hotline – Telecom*, 348 p.
29. Md Anam Mahmud, Kyle Bates, Trent Wood, Ahmed Abdelgawad and Kumar Yelamarthi (2018), A complete Internet of Things (IoT) platform for Structural Health Monitoring (SHM), *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/WF-IoT.2018.8355094.
30. Du Yong Kim, Ju Hong Yoon, Yong Hoon Kim and Vladimir Shin (2010), Distributed information fusion filter with intermittent observations, *2010 13th International Conference on Information Fusion*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICIF.2010.5711988.
31. Haiyang Yu, Yisha Liu and Wei Wang (2014) Distributed sparse signal estimation in sensor networks using H-consensus filtering, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, Vol. 1, Issue 2, April 2014., Pp. 149-154, DOI: 10.1109/JAS.2014.7004544
32. Hui Long, Zhihua Qu, Xiaoping Fan and Shaoqiang Liu (2012), Distributed extended kalman filter based on consensus filter for wireless sensor network, *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/WCICA.2012.6359205.
33. Eremin O. Yu. And Stepanova M. V. (2020), Organization of distributed computing in the infrastructure of the Internet of things based on reinforcement learning methods, *Mathematical methods in engineering and technology*. Vol 12-3. Pp. 111-114.
34. Nefedova I.S., Finogeev A.A. and Finogeev A.G. (2016), Distributed data processing in wireless sensor networks based on a multi-agent approach and fog computing, *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*, Penza: Penza State University, Vol. 1. Pp. 258-260.
35. Lyashchenko A.M., Manucharyan L.Kh. and Pachev A.N. (2019), Implementation of IoT applications using the AKKA agent model, *Engineering Bulletin of Don*, No. 5(56). P. 32.
36. Al-Mardi Mohammed Haydar Awadh (2018), Features of distributed computing, taken into account in methods of optimizing algorithms for the volume of interprocessor transfers, *Computer tools in education*. No. 2. Pp. 31-38.
37. V. V. Ryzhakov and E. V. Prohorova (2020), Electrocardiogram Signals Digital Processing in a Distributed Computing System, *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166080.

Information about authors:

Ekaterina V. Prohorova, Surgut State University, Postgraduate Student, Techer of Dept. of Radioelectronics and Electricity, prohorova_ev@surgu.ru

Vitaliy V. Ryzhakov, Surgut State University, Head of Dept. of Radioelectronics and Electricity, ryzhakov_vv@surgu.ru