

*И.И. ОБОД*, д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" (г. Харьков),  
*Л.С. ЛИТВИНЕНКО*, бакалавр НТУ "ХПИ" (г. Харьков),  
*И.Г. МИРОНЕНКО*, бакалавр НТУ "ХПИ" (г. Харьков),  
*И.В. ПАНАРИНА*, бакалавр НТУ "ХПИ" (г. Харьков)

## **КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, МОНИТОРИНГА И СБОРА ДАННЫХ НА БАЗЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ**

Рассматриваются принципы координатно-временного обеспечения универсальной цифровой системы мониторинга, построенной на базе технологии беспроводных сенсорных сетей, которая могла бы применяться в различных сферах жизни. Ключевой особенностью сенсорной сети является возможность ретрансляции сообщений от одного узла к другому, что позволяет покрывать большие территории без использования мощных передатчиков.

**Ключевые слова:** координатно-временное обеспечение, мониторинг, сенсорные сети.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Создание распределенных систем сбора информации и управления на основе сетей беспроводных датчиков считается сегодня наиболее перспективным направлением в области информационных технологий [1, 2]. Действительно, успехи современной микроэлектроники позволяют в настоящее время интегрировать на одном кристалле разнородные технологии. В результате в одной микросхеме стало возможно объединение микропроцессора с радиомодемом, что обеспечивает технологическую возможность реализации разного рода сетевых протоколов. Малые размеры элементов цифровой радиосвязи и наличие в них возможностей сетевого взаимодействия привели к появлению целого спектра новых применений средств управления и наблюдения за пространственно распределенными, в том числе и подвижными, объектами. Такие сети используются для наблюдения какого-либо подвижного объекта, где часто возникает задача с высокой точностью фиксировать как время регистрации событий, так и координаты объекта. Высокая точность локальных часов также необходима для работы протоколов связи.

В известной литературе [3 – 8], как правило, вопросы координатного и временного обеспечения датчиков сенсорной сети (СС) рассматриваются раздельно, что несколько усложняет наблюдение за подвижными объектами в рассматриваемой сети.

**Цель работы.** Разработка структуры и математической модели единого координатно-временного обеспечения датчиков сенсорной сети.

**Основной раздел.** Беспроводные СС состоят из множества узлов, которые собирают данные о физическом мире, обрабатывают и передают информацию посредством радиосвязи. Такие сети используются для

наблюдения какого-либо подвижного объекта, где часто возникает задача с высокой точностью фиксировать как время регистрации событий, так и координаты объекта. Подвижность наблюдаемого объекта приводит к сложностям синхронизации его шкалы времени (ШВ). Изменение местоположения наблюдаемого объекта приводит к изменению времени распространения сигнала синхронизации и, как следствие, к нарушению принципа одновременности в СС.

При этом необходимо отметить, что понятие синхронности тесно связано с понятием одновременности. Действительно, в датчиках СС должны одновременно вырабатываться одноименные временные импульсы. Само же понятие одновременности в общей теории относительности не является однозначным. Однако можно утверждать, что единственным непротиворечивым определением одновременности является следующее определение. Для анализа любых явлений в рамках общей теории относительности можно ввести некоторую четырехмерную систему координат (СК), имеющую одну временную координату и три пространственных. Два события, фиксированные в некоторой СК значениями  $(t_1, x_1, y_1, z_1)$  и  $(t_2, x_2, y_2, z_2)$ , считаются одновременными относительно этой СК, если соответствующие им значения временной координаты совпадают:  $t_1 = t_2$ . В дальнейшем такое определение одновременности (и соответствующее ему определение синхронизации часов) будем называть координатным. Указанное определение позволяет ввести в рамках общей теории относительности самосогласованную единую ШВ в самых различных областях пространства-времени и с любой разумной точностью. Тот факт, что выбор СК, по координатному времени которой производится синхронизация, произволен, не должен вызывать беспокойство: от синхронизации по координатному времени одной СК легко перейти к синхронизации по координатному времени любой другой СК. Это утверждение очень важно для реализации СС. Действительно, датчики СС функционируют на некотором территориальном уровне. Для согласования ШВ датчиков СС необходимым условием является наличие общего источника синхронизации (ИС), т.е. источника, по времени которого синхронизируются ШВ.

В качестве такой СК, координатное время которой позволяет осуществлять синхронизацию местного времени СС датчиков подвижных объектов, удобно использовать координатную систему глобальных спутниковых систем навигации или подобную им.

Как следует из вышеизложенного, основу СС составляет формирователь местной ШВ и элементы его синхронизации. Формирователь местной ШВ, как показано выше, должен произвести не только сверку своей ШВ с образцовой ШВ системы, но и осуществить смещение ее на определенный интервал времени, если это необходимо. Следовательно, алгоритм формирования ШВ в такой СС состоит из двух этапов. На первом этапе устройство, входящее в СС,

производит оценку своего местоположения и по результатам оценки, на втором этапе, производит сдвиг ШВ на время, вычисляемое по следующему выражению

$$t_3 = \frac{1}{c} \sqrt{(x_b - x_p)^2 + (y_b - y_p)^2 + (z_b - z_p)^2} - \sqrt{(x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2 + (z_c - z_p)^2}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света;  $x_b, y_b, z_b$  – координаты регионального пункта привязки данной СС;  $x_p, y_p, z_p$  – координаты потребителя СС;  $x_c, y_c, z_c$  – координаты пункта синхронизации. Этим удастся формировать местные ШВ и, следовательно, местные СК.

Для описания временных процессов получим математическую модель (ММ) рассматриваемой синхронной СС. Для этого рассмотрим ММ опорного генератора ШВ отдельного пункта СС. При этом будем учитывать то, что в элементах СС возможно формирование ШВ как со скомпенсированным временем задержки между датчиками СС, так и без него.

ММ опорного генератора отдельного пункта описывает временной процесс, наблюдаемый на выходе генератора. Опорный генератор представляет собой устройство, состоящее из прецизионного генератора и делителей. Выходной сигнал генератора можно моделировать в виде периодического колебания  $S(t) = A \sin \Phi(t)$ , где  $A$  – амплитуда колебаний, а через  $t$  обозначено идеальное время. Функцию мгновенной угловой частоты  $\Phi(t)$  можно моделировать в следующей форме:

$$\dot{\Phi}(t) = \omega_0 + \sum_{k=0}^{M-1} (L(k) / k!) \cdot t^k + \dot{\xi}(t), \quad (2)$$

где  $\omega_0$  – постоянная величина, обозначающая номинальное значение частоты собственных колебаний генератора;  $L(0)$  – случайная величина с нулевым средним значением, выражающая начальную ошибку по частоте (отклонение). Эта ошибка возникает вследствие неопределенности в начальной установке частот собственных колебаний генератора. Величины  $L(k)$  ( $k = 1, \dots, M - 1$ ) задают совокупность независимых от времени случайных величин, моделирующих уходы  $k$ -порядка, а  $\xi$  – стационарный случайный процесс с нулевым средним, описывающий кратковременные нестабильности частоты.

Фазовый процесс генератора можно найти, интегрируя выражение (2) в пределах от 0 до  $t$ . В результате получим:

$$\Phi(t) = \Phi(0) + \omega_0 \cdot t + \sum_{k=0}^{M-1} (L(k-1) \cdot k!) \cdot t^k + [\xi(t) + [\xi(t) - \xi(0)]]. \quad (3)$$

"Временной процесс", вырабатываемый опорным генератором отдельного пункта, можно получить делением фазового процесса генератора на

номинальную частоту собственных колебаний  $\omega_0$ . С учетом (3) временной процесс  $T(t)$  опорного генератора передающего пункта можно записать в следующем виде:

$$T(t) = T(0) + t + \sum_{k=1}^M (q(k) / k!) \cdot t^k + \Psi(t), \quad (4)$$

где  $q(k) = L(k-1) / \omega_0$ ,  $k = 1, \dots, M$  – совокупность случайных величин, моделирующих уходы во времени  $(k-1)$  порядка, а  $\Psi(t) = \{\xi(t) - \xi(0)\} / \omega_0$  – в общем случае нестационарные стохастические кратковременные нестабильности формирования ШВ датчика. Таким образом, временной процесс опорного генератора характеризуется начальной ошибкой установки времени, систематическим уходом времени, а также случайными кратковременными нестабильностями.

В СС временной процесс опорного генератора каждого пункта управляется сигналом ошибки, получаемым из сигнала времени опорного генератора пункта синхронизации. Рассмотрим двухдатчиковую СС с синхронизацией по задающему генератору без компенсации временной задержки между датчиками. В такой системе сигнал времени опорного генератора пункта синхронизации передается на приемный пункт. Принятый сигнал, представляющий собой задержанный передаваемый сигнал времени, сравнивается с сигналом времени местного генератора. В результате этого вырабатывается сигнал ошибки, пропорциональный разности времени опорных генераторов синхронизирующего и приемного пунктов. Полученный сигнал ошибки используется для управления местным опорным генератором. Путем анализа можно получить следующие уравнения, описывающие работу такой системы синхронизации:

$$\dot{T}_1(t) = \Omega_1(t), \quad (5)$$

$$\dot{T}_2(t) = \Omega_2(t) + B_2 F_2(p) \{q_{21} [T_1(t - t_3) - T_2(t)] + N_{21}(t)\}, \quad (6)$$

где  $B_2$  – коэффициент усиления в петле обратной связи приемного пункта;  $F_2(p)$  – передаточная функция фильтра;  $q_{21}(p)$  – характеристика временного детектора приемного пункта;  $N_{21}$  – эквивалентный шум в канале передачи синхросигнала;  $\Omega(t)$  – нормированная частота, определяемая из следующего выражения:

$$\Omega_i(t) = (\dot{\Phi}(t) / \omega_0) = 1 - \sum_{k=1}^M [q_i(k) / (k-1)!] \cdot t^{k-1} + \dot{\Psi}_i(t). \quad (7)$$

Приведенные выражения (5) и (6) позволяют математически описать временные процессы, происходящие в СС. При этом выражение (5) описывает временной процесс ведущего пункта, а (6) – приемного пункта.

ММ СС для  $N$ -пунктов, в этом случае, можно описать следующей

системой уравнений:

$$\dot{T}_i(t) = \Omega_i(t) + B_i F_i(p) \cdot a_{ij} \left\{ q_{ij} \left[ T_j(t - t_3) - T_i(t) \right] + N_{ij}(t) \right\} \quad (8)$$

при  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $j = 1$ , где  $a_{ij}$  – весовые коэффициенты, удовлетворяющие

следующему условию  $a_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{при } i = j, \\ 1 & \text{при } i \neq j. \end{cases}$

Используя аналогичные рассуждения, получаем ММ СС с  $N$  датчиками при синхронизации по задающему генератору с компенсацией времени задержки при помощи линии задержки в следующем виде:

$$\dot{T}_i(t) = \Omega_i(t) + B_i F_i(p) a_{ij} \left\{ q_{ij} \left[ T_j(t - t_3) - T_i(t - \hat{t}_3) \right] + N_{ij}(t) \right\}, \quad (9)$$

где  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $j = 1$ , а  $\hat{t}_3$  – оценка величины  $t_3$ .

На основании полученных ММ СС с различной системой синхронизации можно записать обобщенную математическую модель СС, которая представляется следующим выражением:

$$\dot{\vec{T}}(t) = \vec{\Omega}(t) + \vec{F}(p) [\vec{G} + \vec{N}] \vec{I}, \quad (10)$$

где  $\vec{T}(t) = [T_1(t), \dots, T_N(t)]$ ;  $\vec{\Omega}(t) = [\Omega_1(t), \dots, \Omega_N(t)]^T$ ;  $I = [1, 1, \dots, 1]^T$ ;  $\vec{N} = [B_i N_{ij}(t)]$ ;  $T$  – знак транспонирования;  $\vec{F}(p) = \text{diag}[F_1(p), \dots, F_n(p)]$ ;  $\vec{G} = \{B_i a_i g_i [T_j(t - t_{3ij} - \eta_{ij})]\}$ .

При соответствующем выборе коэффициентов уравнение (10) подходит для описания работы всех рассмотренных выше систем синхронизации.

Путем выбора величины  $\eta_{ij}$  выражение (10) может моделировать различные методы компенсации задержки. При этом для системы без компенсации задержки  $\eta_{ij} = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , а для систем с компенсацией посредством линии задержки  $\eta = \hat{t}_{3ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ .

**Выводы.** Таким образом, приведенные ММ можно использовать для описания временных процессов в СС систем сбора информации подвижных объектов. Переход к четырехмерной системе путем включения времени в координатную систему позволит реализовать синхронный принцип сбора информации от подвижных датчиков и, следовательно, снизить требования к пропускной способности систем радиодоступа.

**Список литературы:** 1. *Ilyas M., Mahgoub I.* Handbook of Sensor Networks, CRC Press, 2004. – 864 p. 2. *Ye W., Heidemann J., Estrin D.* Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2004. – V. 12. – № 3. – P. 140 – 155. 3. *Ganesan D., Ratnasamy S., Wang H., Estrin D.* Coping with Irregular Spatio-Temporal Sampling in Sensor Networks // Computer Communication Review. – 2004. – 34 (1) – P. 125 – 130. 4. *Ye W., Heidemann J., Estrin D.* An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks / In Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications

Societies (INFOCOM). – New York. – 2002. – Vol. 3. – P. 1567 – 1576. **5. Roemer K.** Temporal message ordering in wireless sensor networks / In Proceedings of the IFIP Mediterranean Workshop on Ad-Hoc Networks (Med-Woc-Net 2003). – Madhia. – Tunisia. – 2003. – P. 131 – 142. **6. Dai H., Han R.** Tsync: A lightweight bidirectional time synchronization service for wireless sensor networks // Mobile Computing and Communications Review. – 2004. – 8 (1). – P. 125 – 139. **7. He T., Huang C., Blum B.M., Stankovic J.A.** Range-Free Localization Schemes in Large Scale Sensor Networks // CS-TR2003-06. Submit to MobiCom. – 2003. – P. 654 – 667. **8. Nagpal R., Shrobe H., Bachrach J.** Organizing a Global Coordinate System from Local Information on an Ad Hoc Sensor Network / 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '03). – Palo Alto. – 2003. – P. 123 – 129.

УДК 004.045

**Координатно-часове забезпечення систем керування, моніторингу та збору даних на базі бездротових сенсорних мереж / Обод І.І., Літвіненко Л.С., Міроненко І. Г., Панаріна І.В.** // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 13. – С. 109 – 114.

Розглядаються принципи координатно-часового забезпечення універсальної цифрової системи моніторингу, побудованій на базі технології бездротових сенсорних мереж, яка могла б застосовуватися в різних сферах життя. Ключовою особливістю сенсорної мережі є можливість ретрансляції повідомлень від одного вузла до іншого, що дозволяє покривати великі території без використання могутніх передавачів. Бібліогр.: 8 назв.

**Ключові слова:** координатно-часове забезпечення, моніторинг, сенсорні мережі.

UDC 004.045

**Coordinate-temporal providing of control systems, monitoring and capture of data on base of wireless sensory networks / Obod I.I., Litvinenko L.S., Mironenko I.G., Panarina I.V.** // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2009. – №. 13. – P. 109 – 114.

Principles of the co-ordinate-temporal providing of the universal digital monitoring system are examined, to the technology of wireless sensory networks, which would be used in the different spheres of life, built on a base. The key feature of sensory network is possibility of retransmitting of reports from one nodes to other, that allows to cover large territories without the use of powerful transmitters. Refs: 8 titles.

**Keywords:** coordinate-temporal providing, monitoring, sensory networks.

*Поступила в редакцію 05. 04.2009*