

*В роботі розглянуто методи самоорганізації, обґрунтовано вибір дисципліни обслуговування сенсорних датчиків та методів організації сенсорної мережі. Запропонована імітаційна модель енергетично ефективного алгоритму самоорганізації безпроводних сенсорних мереж*

*Ключові слова: сенсорна мережа, сенсорний вузол, самоорганізація, кластер*

*В работе рассмотрены методы самоорганизации, проведено обоснование выбора дисциплины обслуживания сенсорных датчиков и методов организации сенсорной сети. Предложена имитационная модель энергетически эффективного алгоритма самоорганизации беспроводных сенсорных сетей*

*Ключевые слова: сенсорная сеть, сенсорный узел, самоорганизация, кластер*

*The paper discusses the methods of self-organized, rationale for the choice of service discipline sensors and methods of organizing sensor network. The imitating model of self-organizing of wireless sensory networks is offered*

*Keywords: sensor network, sensor node, self-organization, cluster*

# ЕНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ САМООРГАНИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

**С. Н. Теплицкая**

Кандидат технических наук, старший преподаватель\*

Контактный тел.: (057) 702-13-20, 066-491-52-43

E-mail: S.Goryaeva@mail.ru

**Я. Т. Хусейн**

Аспирант\*

E-mail: tkc@kture.kharkov.ua\*

Кафедра телекоммуникационных систем

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

## Введение

Сенсорная сеть (СС) является разновидностью телекоммуникационных сетей (ТКС) и предназначена для мониторинга различных ситуаций, элементов и явлений живой и неживой природы. С помощью СС обеспечивается наблюдение за процессами в науке и технике, в том числе и в самих телекоммуникациях. Они способствуют эффективному решению задач, специфичных для министерства чрезвычайных ситуаций, медицины катастроф и др.

СС могут быть построены на основе проводных или беспроводных линий связи. Однако чаще всего, из-за удобств использования, эти сети реализуются на базе беспроводных технологий (IEEE 802.15.4, ZigBee и др.).

Достаточно часто СС приходится работать в неподготовленных условиях, при воздействии различных дестабилизирующих факторов, обеспечивая при этом высокую достоверность получаемой информации, надежность самой системы и автономность функционирования.

Очевидно, в любом из элементов СС (сенсор, эмиттер-передатчик, контроллер, антенна, сам канал распространения радиоволн) могут оказаться нарушения, способные понизить надежность работы, однако наиболее критичным в этих автономных условиях является источник питания. Как правило – это аккумулятор или электрохимическая батарея. Время действия этих источников ограничено их емкостью. Важное значение играют также габариты этих источников, ибо сам сенсор часто имеет микроминиатюрное

исполнение, поэтому установка габаритного источника часто недопустима.

## Методы самоорганизации в сенсорных системах

В сложных системах, в связи с изменением обстановки, имеющихся ограничений или дефицитом оставшихся ресурсов, возникает необходимость изменения условий функционирования. Как правило, эти изменения обеспечивает лицо, принимающее решения (ЛПР), руководитель, оператор или иное компетентное лицо. В автономных системах, к которым относятся СС, возможность таких изменений предусматривается с помощью автоматических процедур. Такие системы носят название самоорганизующихся, адаптирующиеся к указанным изменениям.

Самоорганизация сложной системы может быть обеспечена за счет различных механизмов и наличия ресурсов. Известно три метода самоорганизации: энтропийный, гомеостатический и морфогенетический [4]. Энтропийный метод основан на расходовании имеющегося избыточного ресурса. Гомеостатический метод предполагает, при сохранении структуры (в нашем случае графа связей СС) изменение режимов отдельных элементов и функции самой системы. Морфогенетический метод основан на методах реструктуризации системы, изменения имеющихся связей.

Такая декомпозиция задач процедуры самоорганизации уместна с методической точки зрения. На практике указанные три метода применяют одно-

временно в различном сочетании в зависимости от текущей обстановки. Так, при мониторинге зоны пожара вначале из-за неопределенности ситуаций целесообразно СС перевести в режим регулярного поллинга. Затем по мере устранения отдельных очагов и расходования энергоресурса сенсорного узла – перевести в режим случайного метода доступа, затем – в дежурный режим. При этом, очевидно, изменяется как функция, так и структура СС.

### **Выбор дисциплины обслуживания сенсорных датчиков**

Имеется большое число вариантов обслуживания сенсорных датчиков (СД). Дисциплины обслуживания подразделяются по приоритетности: 1, 2, ... и т.д. приоритеты; по времени поступления заявки (первый пришел – первый обслуживается FIFO), (последний пришел – первый обслуживается); по методу множественного (многостанционного) доступа и т.д. Именно метод множественного доступа (МД) наиболее влияет на уровень расходования энергоресурса. Методы МД разделяются на регулярные и случайные.

Наиболее полную информацию о состоянии наблюдаемого объекта доставляет регулярный МД, сводящийся к циркулярному опросу СД, когда все  $n$  – сенсоров по определенному правилу (например, равномерно) опрашиваются по очереди. Данный метод МД называется регулярным поллингом. Одновременно с этим данный метод МД является и наиболее энергозатратным, поскольку многие из сенсоров не несут новой информации.

Время, затрачиваемое на один круг опроса СД выбирается исходя из требований не пропустить какое-либо новое событие, поэтому время цикла  $T_{ц}$  выбирается исходя из того, чтобы на интервале корреляции наблюдаемых процессов  $\tau_k$  могла разместиться не менее 2-х отсчетных значений для любого сенсора, то есть

$$T_{ц} \leq \tau_k / 2, \quad (1)$$

где  $\tau_k = 1/F_{max}$  – интервал на оси времени, где значение корреляционной функции уменьшается на величину  $e^{-1}$ .

Очевидно, этот подход можно найти и по теореме Котельникова:

$$T_{ц} = 1/2F_{max}, \quad (2)$$

где  $F_{max}$  – максимальная частота спектра наблюдаемого процесса.

Таблица поллинга может быть не только равномерной, когда все  $n$  СД опрашиваются за период  $T_{ц}$ , но и более рациональной с позиции энергосбережения. Так таблица может быть ограниченной, когда обслуживается  $m < n$  СД, может быть шлюзовой, когда выделяется группа СД по какому-либо признаку, например, только подавшие первые  $k$  –заявок на обслуживание.

Вместе с тем, регулярный поллинг при случайном характере информации, поступающей от СД, не может считаться рациональным, экономящим энер-

горесурсы. Более эффективными являются методы случайного множественного доступа (СМД), к числу которых относятся разновидности алгоритмов АЛОХА, древовидные алгоритмы, алгоритмы двойной экспоненциальной отсрочки (отката) и др.

Основным достоинством методов СМД является возможность разрешения конфликта состоящего в том, что два или несколько СД одновременно намереваются передавать свой информационный пакет. Эффективность того или иного СМД оценивают относительной скоростью разрешения конфликта:

$$R = \frac{t_k}{T_k}, \quad (3)$$

где  $t_k$  – кратность конфликта (2, 3, ...),

$T_k$  – период разрешения конфликта.

Для алгоритма АЛОХА величина  $R_A \leq 0,1$ , для двойной экспоненциальной отсрочки  $R_B \approx (0,3...0,4)$ , для древовидных алгоритмов с компенсацией интерференции  $R_D \approx (0,5...0,6)$ . Очевидно, с увеличением скорости разрешения конфликта пропорционально экономятся энергоресурсы. То есть имеет смысл использовать в СС методы СМД типа древовидных алгоритмов и алгоритмов двойной экспоненциальной отсрочки.

### **Выбор методов организации сенсорной сети**

В составе СС могут использоваться различные сенсорные узлы (СУ): полнофункциональные, способные выполнять роль как головного, так и подчиненного, оконечного СУ, поддерживать все функции самоорганизации. Другой тип СУ обладает сокращенным набором функций, например, только оконечного СУ.

Построение СС может быть централизованным по двух, трех или более уровневой иерархии с использованием центрального, оконечных узлов и головного СУ.

Другая возможная структура СС – децентрализованная (Ad Hoc), СУ которой являются также полнофункциональными, способными обеспечивать частую смену структуры и возможность передачи от одного СУ к другому.

Размещение СУ организуется таким образом, чтобы наиболее полно обеспечивался мониторинг наблюдаемого объекта. Места размещения СУ выбираются исходя из радиуса действия приемопередатчика данного узла. При этом зоны действия приемопередатчиков соседних СУ должны перекрываться с тем, чтобы была обеспечена возможность передачи информации от узла к узлу и обеспечен выбор режима самоорганизации. Очевидно, наиболее полный мониторинг при минимальном количестве СУ может осуществляться при регулярном размещении этих узлов.

Однако часто это размещение приходится осуществлять случайным образом.

Таким образом, в результате функционирования СС может менять структуру, СУ может менять функцию: из оконечного может стать головным и наоборот (из двух активных – всегда один головной). Основным фактором, из-за которого происходит сме-

на структуры и функции СС, является оставшийся энергоресурс на тех или иных узлах. Рассмотрим ситуацию с изменением структуры, происходящую при самоорганизации централизованной СС с полнофункциональными СУ.

**Имитационная модель самоорганизации СС**

Предположим, что имеет место СС со случайным гауссовым распределением мест размещения СУ, радиус зоны действия передатчиков которых  $r$ . Зону мониторинга при этом  $D \gg r$  необходимо разбить на отдельные кластеры, в пределах которых обеспечивается надежная связь каждого головного СУ в данном кластере со всеми оконечными, появившимися в этот кластер.

Таким образом, создается сеть оконечных узлов (СОУ) и сеть между головными узлами (СГУ) и центральным, куда стекается вся информация.

Для проведения имитационного эксперимента конкретизируем ситуацию. Для определенности будем считать, что имеется  $N=30$  сенсорных узлов с радиусом  $r=20$  м, зона мониторинга:  $X=Y=200$  м,  $Z=3$  м.

Передатчик СУ имеет мощность  $P_{\text{ПЕР}}$ , чувствительность приемника  $P_{\text{ПР}}=S$ , коэффициенты усиления антенн  $G_{\text{ПЕР}}=G_{\text{ПР}}=1$ , то есть антенны – не направлены.

Для имитации размещения сенсорных узлов воспользуемся методом Монте-Карло. Выберем модель со случайным размещением  $N$  сенсорных узлов, подчиняющуюся гауссовому закону по 3-м осям координат XYZ.

Пример данного случайного размещения представлен на рис. 1.

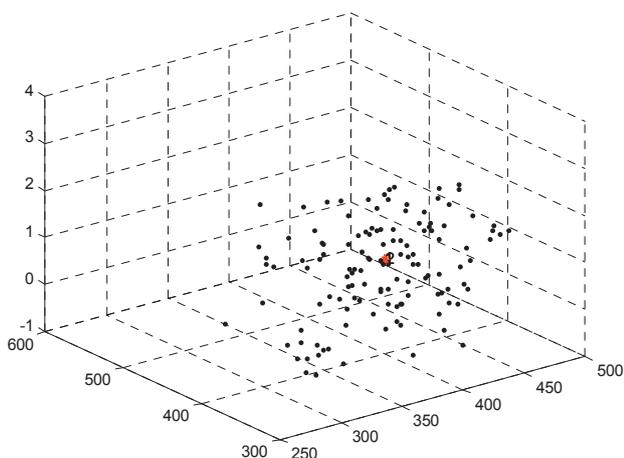


Рис. 1. Пример размещения сенсорных узлов

Полученное размещение далее надо кластеризовать таким образом, чтобы главный узел, размещенный в центре кластера, обеспечивал надежную радио связь, обеспечивая при этом уровень сигнала в каждом из приемников оконечных узлов

$$P_{\text{ПР}_i} \geq S, \tag{4}$$

где  $P_{\text{ПР}} = P_{\text{ПЕР}} + G_{\text{ПЕР}} + G_{\text{ПР}} + W_{\text{СВ}}$  [дБ],

здесь  $G_{\text{ПЕР}} = G_{\text{ПР}} = 0$ ,

$W_{\text{СВ}} = 10 \lg \left( \frac{\lambda}{4\pi\rho} \right)^2$  – ослабление сигнала в свободном пространстве на расстоянии  $\rho$ ,  $\lambda = c/f$  – длина волны рабочей частоты  $f$ ,  $\rho$  – расстояние между головным и оконечными узлами.

Можно представить, что весь объем зоны мониторинга собран из шаров радиуса  $\rho$ , в центре которых находится главный узел. В этом случае для каждого из кластеров может быть построена матрица расстояний  $D$ , каждый из элементов которой вычисляется по формуле:

$$\rho = \sqrt{\left( \frac{2r}{\sqrt{2}} \cdot k - \frac{r}{\sqrt{2}} - x_i \right)^2 + \left( \frac{2r}{\sqrt{2}} \cdot n - \frac{r}{\sqrt{2}} - y_i \right)^2 + \left( \frac{2r}{\sqrt{2}} \cdot f - \frac{r}{\sqrt{2}} - z_i \right)^2}, \tag{5}$$

где  $r$  – радиус действия сенсора,  $k, n, f$  – количество кластеров по осям X, Y, Z,  $x, y, z$  – координаты  $i$ -го сенсора в кластере.

В процессе функционирования СС матрица  $D$  изменяет как структуру, так и значения элементов. Это происходит вследствие потери некоторыми СУ своего энергетического потенциала, расходуемого пропорционально продолжительности работы на передаче (основной энергопотребляющий узел – выходной каскад передатчика). За каждый цикл работы СУ теряется определенное количество энергии:

$$E_s = P_{\text{ПР}} \cdot T \cdot n, \tag{6}$$

где  $T$  – время, затрачиваемое на передачу одного информационного пакета,  $n$  – число СУ в данном кластере. Так для стандарта IEEE 802.15.4 рабочая частота  $f = 868$  МГц, скорость передачи информации  $C = 20$  кбит/с, что позволяет вычислить  $W_{\text{СВ}}$  и  $T = I/C$ , где  $I$  – объем информационного пакета.

Остаточное количество энергии для каждого из узлов с учетом (6) определяется из разности:

$$Q_i^k(E) = Q_{k-1} - k \cdot E_i, \tag{7}$$

где  $k$  – номер очередного цикла работы СС.

На основании этих матриц определяются количественные показатели как расстояние Махаланобиса от многомерного вектора  $a = (D, Q)^T$  до множества  $\mu = (\rho_{\text{min}}, Q_{\text{max}})$ :

$$D_M(a) = \sqrt{(a - \mu)^T \cdot K(a, \mu)^{-1} \cdot (a - \mu)}, \tag{8}$$

где  $K(a, \mu)$  – матрица ковариаций.

Исходя из количественных показателей осуществляется выбор головного узла в кластере.

При каждом следующем цикле функционирования СС топология и построение СГУ и СОУ корректируется из-за добавления сенсорных узлов или же их отключения вследствие нулевой остаточной энергии.

Следовательно, в предложенном алгоритме самоорганизация СС функционирует таким образом,

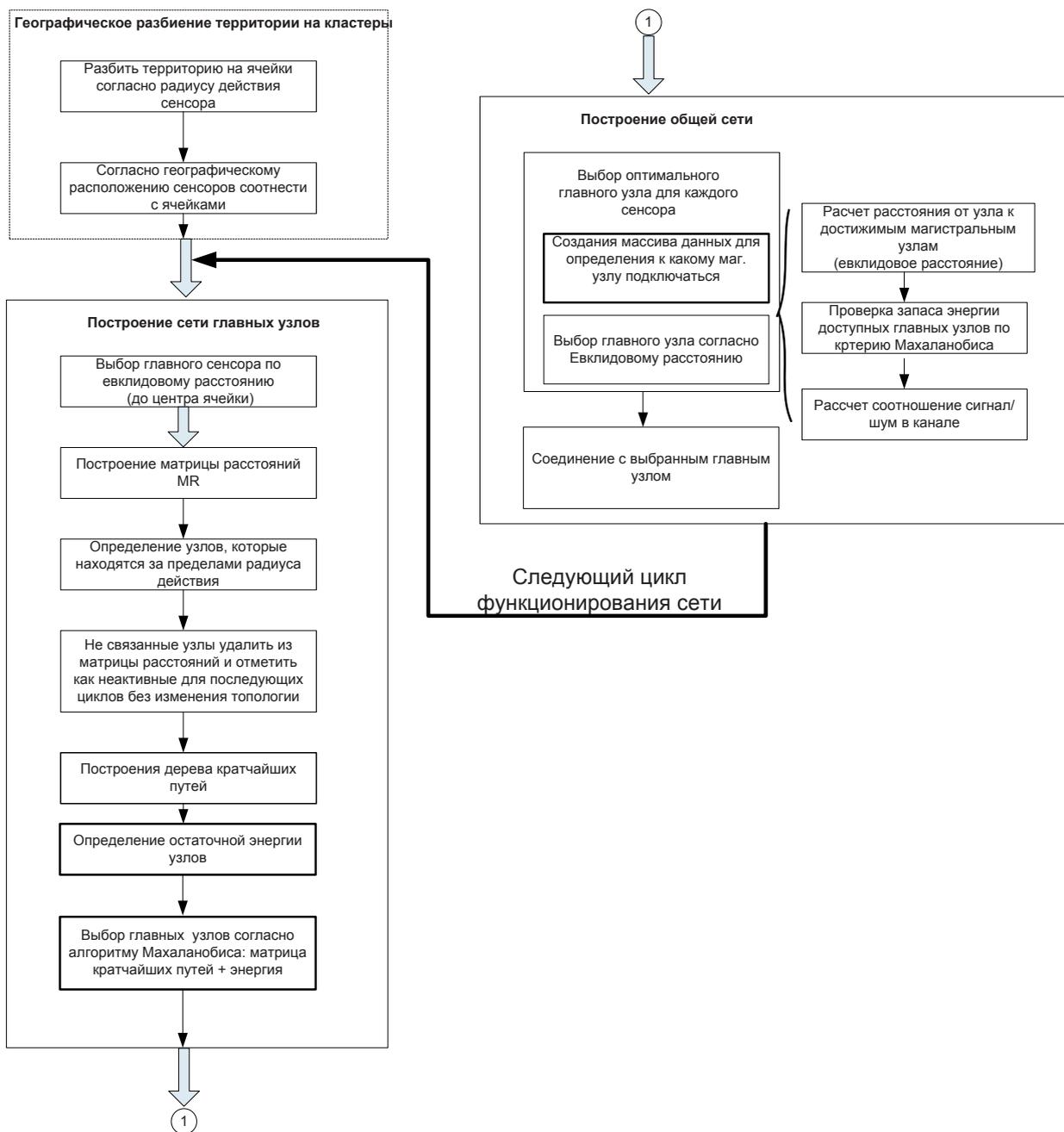


Рис. 2. Алгоритм организации беспроводной сенсорной сети

что при выходе из строя головного узла, его роль автоматически переходит к любому конечному узлу, находящемуся в зоне действия кластера. Более того, если один из конечных узлов теряет связь со своим головным узлом, то он автоматически переходит в режим поиска любого другого конечного узла и при нахождении его сигнала образуется микро-сенсорная сеть. Таким образом, в СС за счет указанной самоорганизации возможно самовосстановление в случае какого-либо мгновенного воздействия на сеть, на пример, разряда молнии, когда со всеми узлами одновременно будет потеряна связь. На рис. 2 представлен разработанный алгоритм организации беспроводной сенсорной сети.

Количественная оценка алгоритма может быть представлена как максимальная продолжитель-

ность непрерывной работы беспроводной сенсорной сети.

Максимальная продолжительность  $T_{max}$  непрерывной работы сенсорной сети зависит от энергоресурса системы и суммарной мощности потребления датчиков:

$$T_{max} = \frac{\sum_k Q_k}{\sum_k (P_{k_0} + P_{k_n})}, \tag{9}$$

где  $Q_k$  – энергия батареи k-го датчика,  $P_{k_0}$  – мощность k-го датчика, которая затрачивается на обработку измерительных сигналов,  $P_{k_n}$  – мощность k-го датчика, которая затрачивается на прием и передачу информации.

Максимальная продолжительность  $t_{\max\_k}$  непрерывной работы  $k$ -го датчика:

$$t_{\max\_k} = \frac{Q_k}{P_{k_0} + P_{k_{\Pi}}} \quad (10)$$

Рассмотрим в качестве примера сенсорную сеть, представляющую собой трехуровневую структуру, в которой имеется центральный узел, на который передается информация от главных узлов, расположенных внутри кластера. На главные узлы информация поступает от конечных узлов, радиус действия которых ограничен  $r$ . Информация на центральный узел поступает от соседних главных узлов, которые передают по цепочке информацию от конечных узлов. Таким образом, при выходе одного или нескольких головных узлов, информация на центральный узел может поступать через оставшиеся рабочие узлы.

Рассмотрим динамику функционирования СС, в которой постепенно, из-за потери энергоресурсов, выходят из строя головные узлы.

На рис. 3 представлены структуры сенсорных сетей для нескольких циклов функционирования СС.

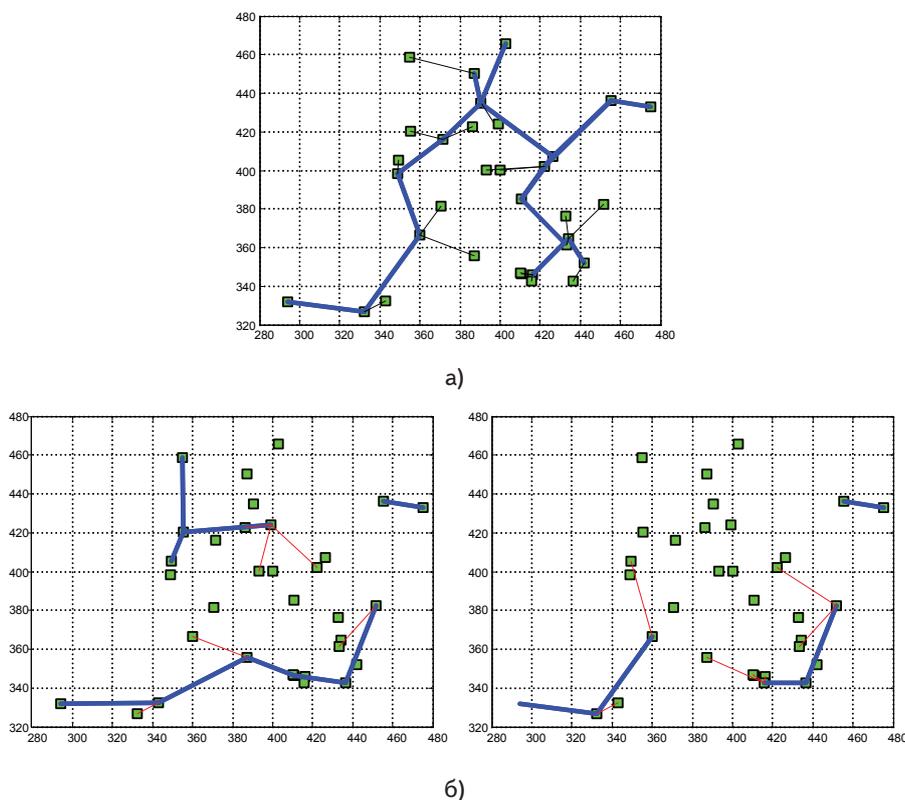


Рис. 3. Результаты моделирования предложенного алгоритма: а) организованная сеть при 1 цикле; б) предпоследний (23) и последний (24) цикл работы СС

Как видно из рис. 3, при изменении энергетических параметров и уровня сигнал/шум, топология сети изменяется на каждом цикле работы сети. При этом, так как выбор магистрального узла основывается на остаточной энергии, то каждый узел может быть выбран главным в кластере, а следовательно продлить срок службы сенсорной сети в целом.

Количественная оценка алгоритма показала, что время жизни сети – 25 временных циклов (не рабо-

тают 20 сенсоров из 32). Для других алгоритмов, не учитывающих проверку энергии и уровня помех при выборе магистральных узлов и подключения к ним, количество циклов сокращается до 9-18.

## Выводы

1. Сенсорная сеть является важной разновидностью телекоммуникационных сетей, с помощью которых обеспечивается мониторинг различных объектов. Имеется ряд стандартных технологий: IEEE 802.15, ZigBee и др., с помощью которых может быть реализована такая сеть.

2. В процессе функционирования СС одним из наиболее критичных факторов, влияющих на ее эффективность, является энергоёмкость источника питания, вмонтированного в СУ.

3. В процессе функционирования из-за различной активности СУ время их жизни различно. Для оставшихся рабочих узлов в СС должна быть предусмотрена процедура самоорганизации, позволяющая реструктуризировать как сеть связи конечных так и головных узлов.

4. Представлена методика анализа процедуры функционирования и реструктуризации СС, позволяющая проводить анализ работы сети при дефиците остаточной энергии.

## Литература

1. Heinzelman W., Chandrakasan A. and Balakrishnan N. Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks/Proceedings of the Hawaii International Conference on Systems Sciences. – Jan. 2000.
2. Кучерявый А.Е. Выбор головного узла кластера в однородной беспроводной сенсорной сети / А.Е. Кучерявый, А. Салим // Электросвязь - №8 – 2009 - С.32-36.
3. Зайцев А.А. Беспроводные сенсорные сети – перспективы и задачи / А.А. Зайцев, Е.А. Устинова // Электросвязь – №8 – 2009 – С.26-31.
4. Поповский В.В. Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах / В.В. Поповский, В.Ф. Олейник – Х.: СМИТ, 2011. – 362с.
5. Андреев С.Д. Древоидный алгоритм разрешения конфликта, устойчивый к неполному погашению интерференции / С. Д. Андреев, Е. В. Пустовалов, А. М. Тюриков // Автоматика и телемеханика – №3 – 2009 – С. 78–96.