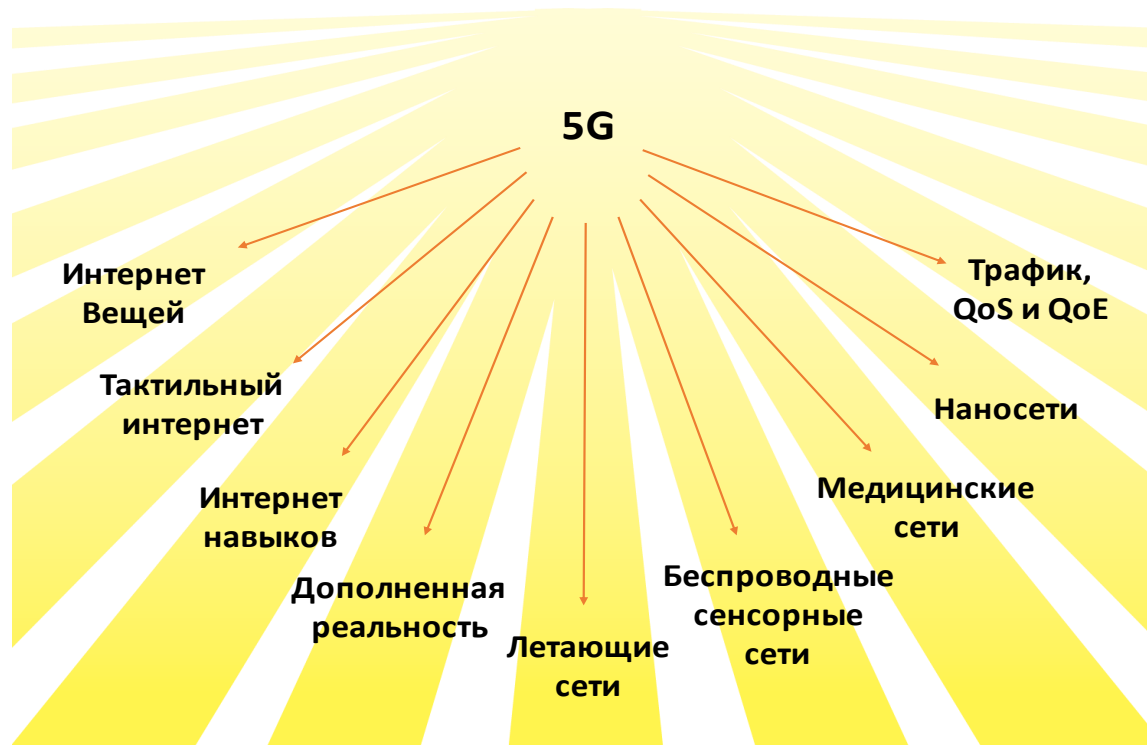


Беспроводные сенсорные сети

А.Е. Кучерявый, зав. кафедрой
сетей связи и передачи данных

Сети и технологии



Сенсоры

21 ideas for the 21st century

(Business Week, August 30, 1999).

Беспроводные сенсорные сети (Wireless Sensor Networks, WSN)

Два типа:

- для технических целей,
- для размещения на и в живых организмах.

История развития направления

u-Korea, февраль 2005 года ICACT'2005

u-Россия, 21 апреля 2005 года, НТС ЦНИИС

u-Japan, май 2005 года, подготовительная встреча к WSIS'05 в Токио

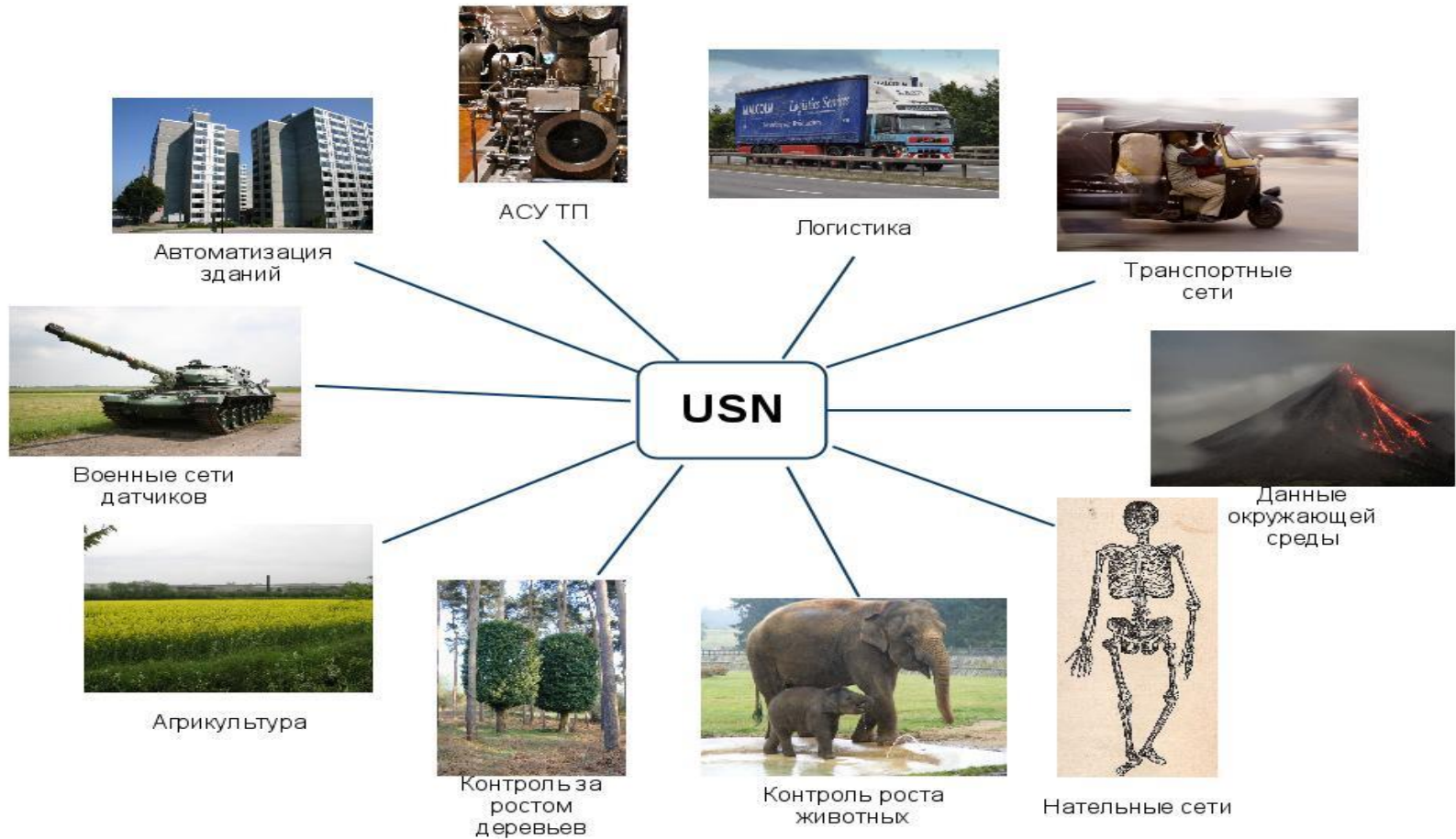
Семинар по u-Japan во время WSIS'05, Тунис, ноябрь 2005

ICACT'2006 – Toward Era of Ubiquitous networks and Ubiquitous Societies,

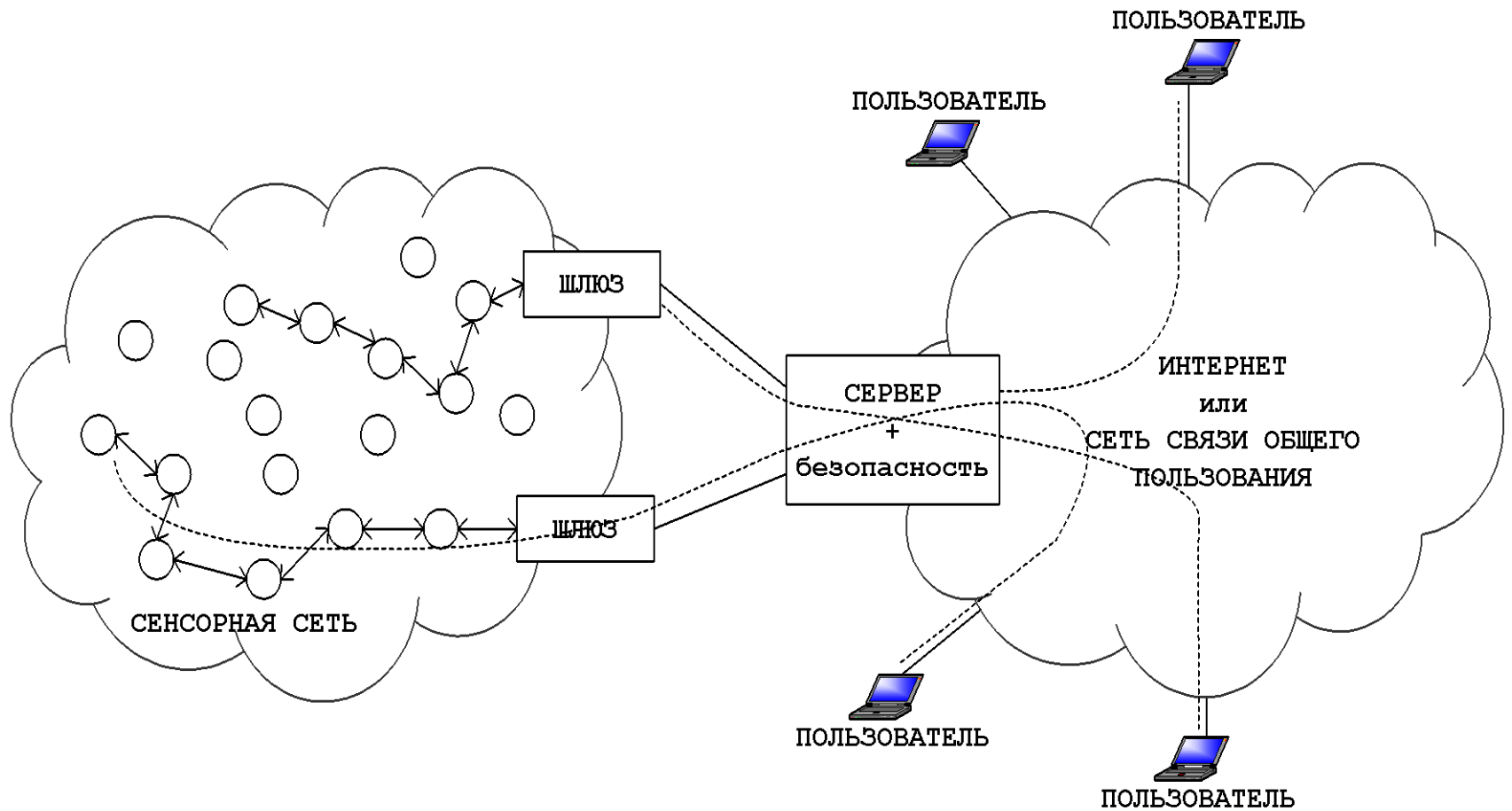
ICACT'2009 - Ubiquitous ICT convergence Makes Life Better

NEW2AN 2014 – Flying Ubiquitous Sensor Networks

Всепроникающие сенсорные сети



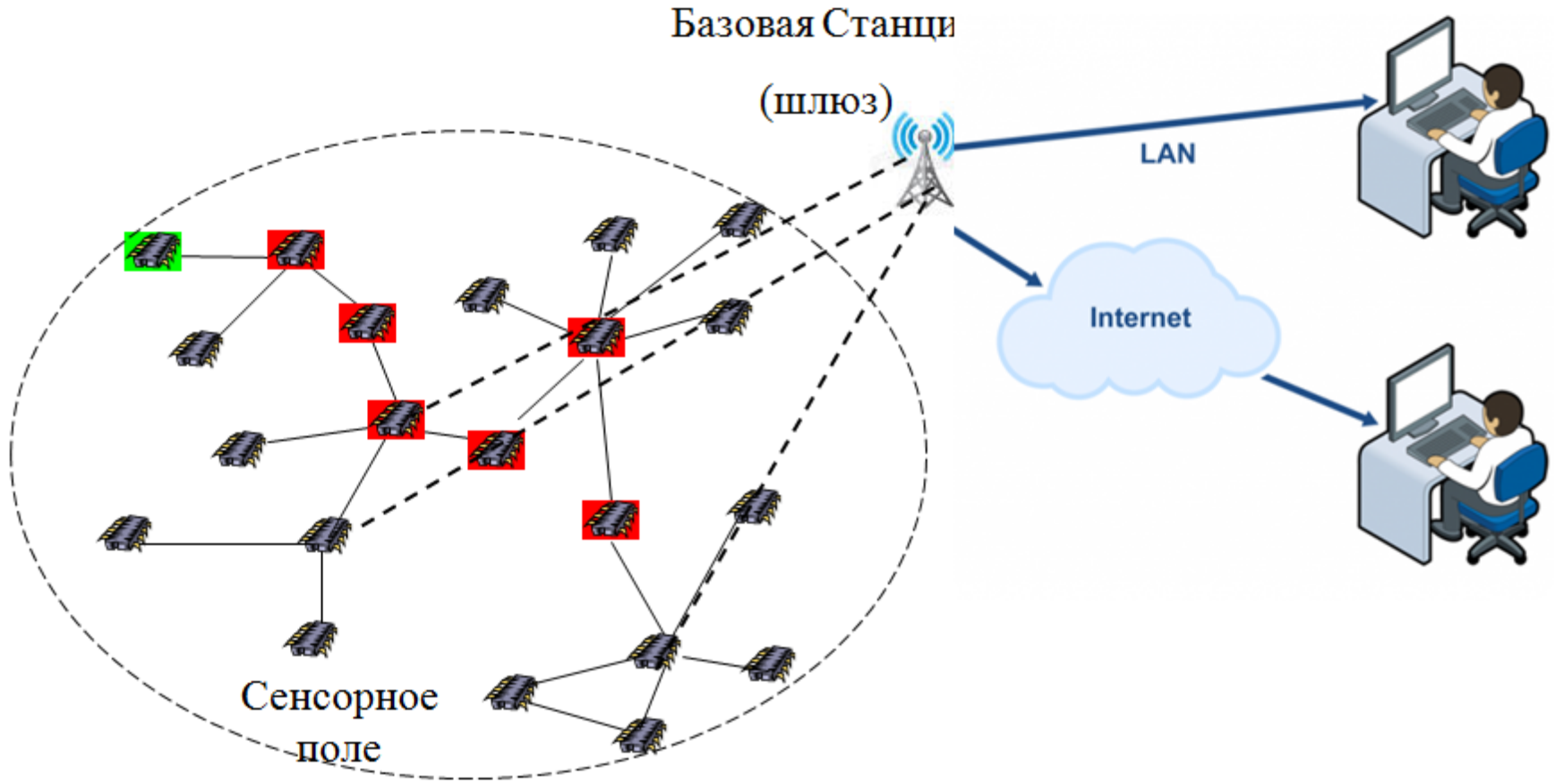
Архитектура сенсорной сети



Особенности сенсорных сетей

1. Очень большое число узлов сети (больше 64000 в одной сети ZigBee, триллионные сети).
2. Ограниченные возможности по электропитанию (зачастую отсутствие ремонтпригодности).
3. Требования по низкому энергопотреблению (КНР, 200000 базовых станций 3G потребляют 1.384 Гига-Ватт часов/год).

Структура БСС



Примеры сенсорных узлов

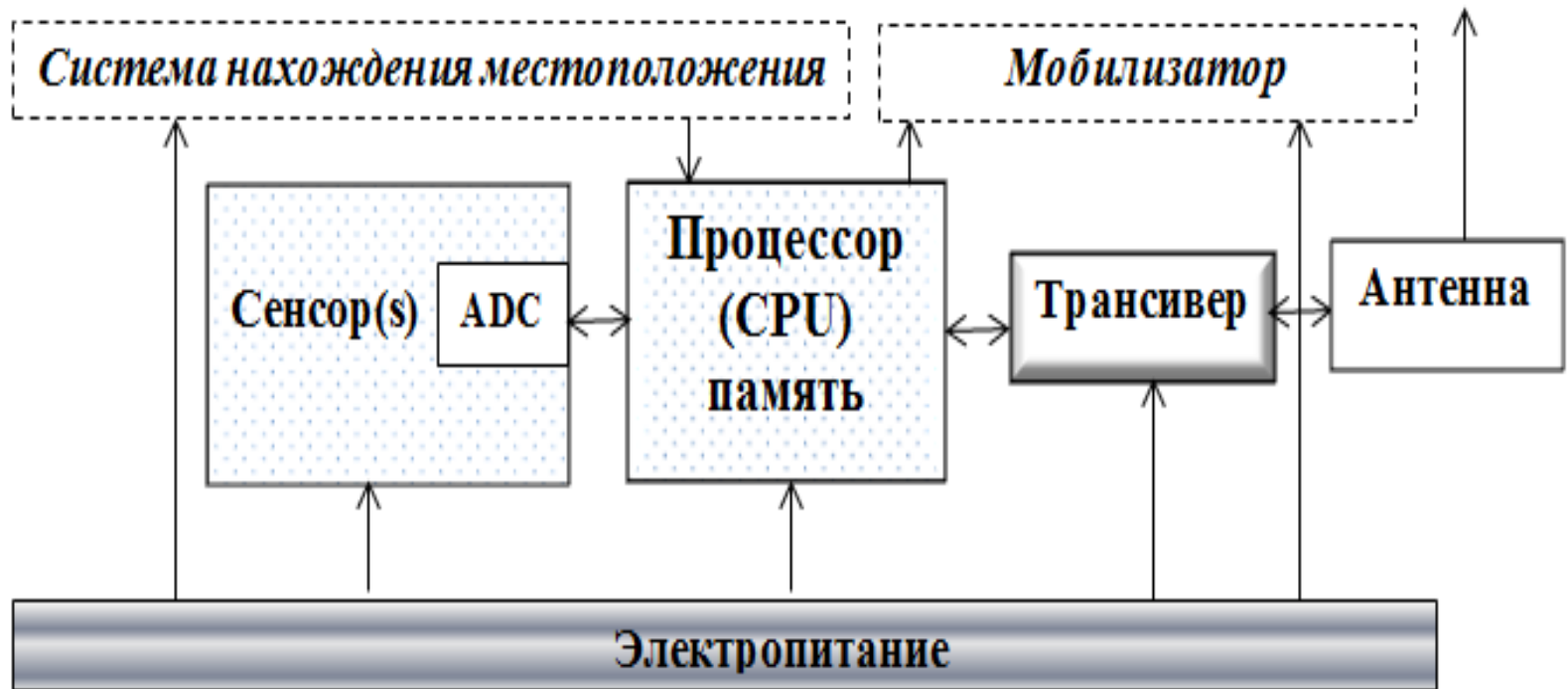
Размеры



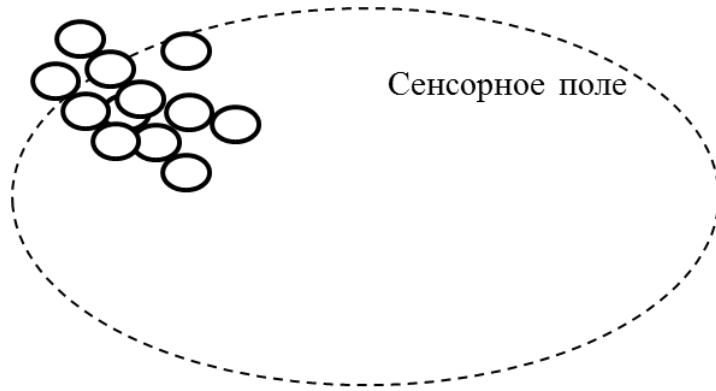
Внешний вид с антенной



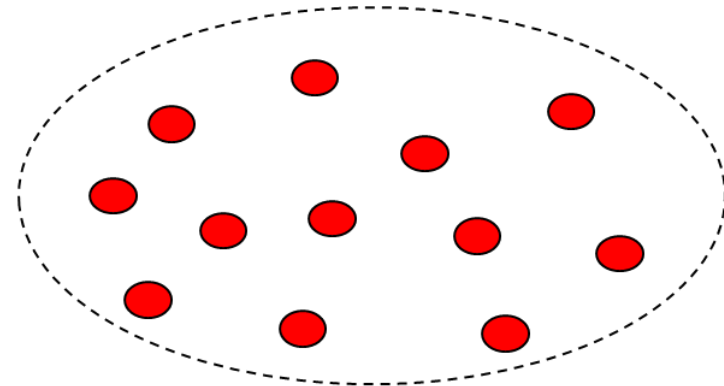
Структура сенсорного узла



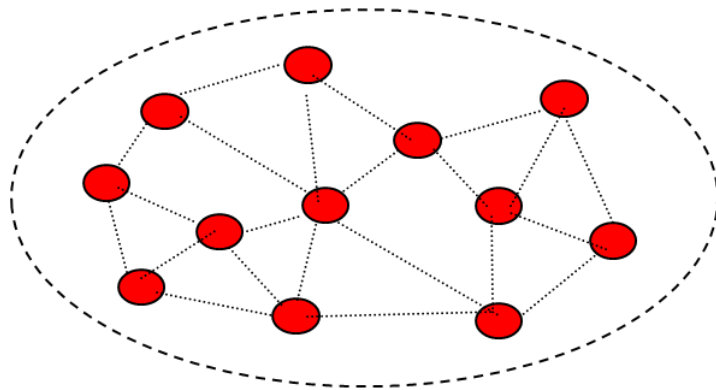
Создание БСС



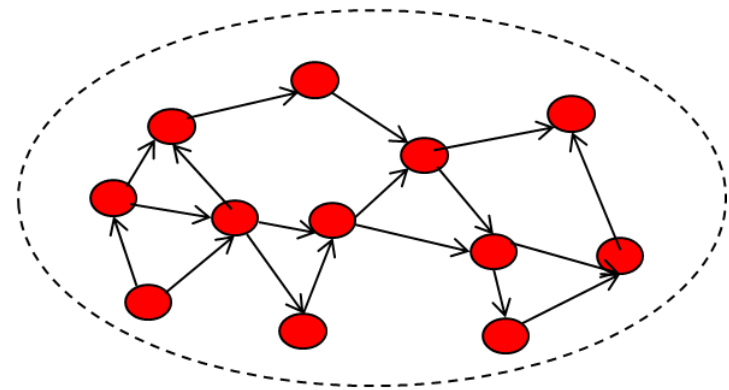
А) Размещения сенсорных узлов



Б) Пробуждения сенсорных узлов



В) Соединение в сеть



Д) Маршрутизация и передача

Проактивные и Реактивные БСС

- На основе способа функционирования и целевого применения сенсорных сетей они могут быть классифицированы на проактивные и реактивные БСС. В проактивной БСС сенсорные узлы в сети периодически проверяют среду и передают данные, представляющие интерес для БСС. В реактивных БСС узлы оперативно реагируют на внезапные и резкие изменения в области сенсорного поля.

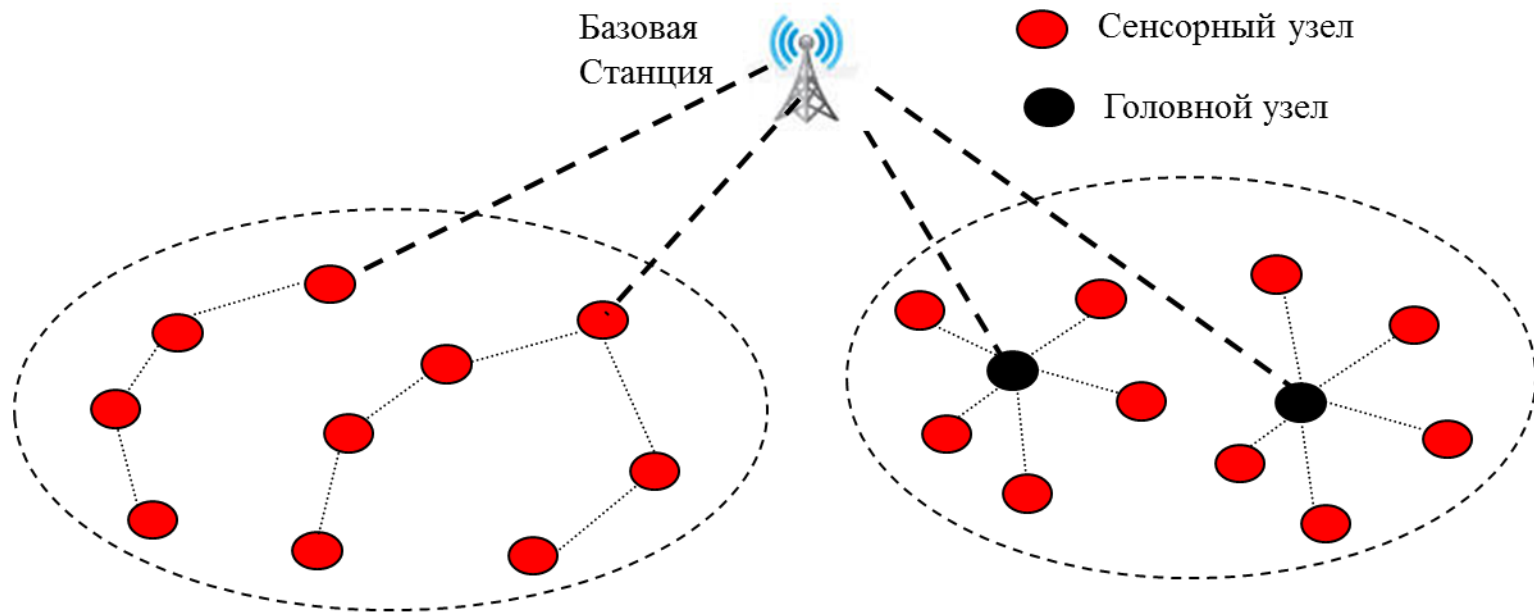
Гомогенные и Гетерогенные БСС

- Сенсорные сети могут быть разделены на два основных типа Гомогенные (однородные) и Гетерогенные БСС (неоднородные) в зависимости от составляющих их узлов. В однородных беспроводных сенсорных сетях все сенсорные узлы одинаковы с точки зрения энергии батареи и аппаратной сложности. Гетерогенные же сенсорные сети могут содержать два, три или больше типов узлов, соответственно с различными энергетическими и функциональными возможностями.

Одноранговые и Иерархические сети

БСС могут быть классифицированы в зависимости от структуры сети на Одноранговые и Иерархические: В одноранговой сети все узлы выполняют одинаковые задачи и передача данных на шлюз или базовую станцию осуществляется непосредственно. В иерархических сетях узлы подразделяются на головные и сенсорные узлы. Сенсорные узлы собирают данные, а головные занимаются их обработкой, анализом и передачей на шлюз или БС

Одноранговые и Иерархические сети



Одноранговые сети

Иерархические сети

Случайное и детерминированное размещение сенсорных узлов

- БСС могут быть классифицированы в зависимости от метода размещения сенсорных узлов. При случайном размещении сенсорные узлы могут быть случайным образом разбросаны по некоторой области. Детерминированное размещение предполагает размещение узлов в соответствии с предварительно определенным планом построения сети. Естественно, что алгоритмы распределения данных между сенсорными узлами в первом и втором случае могут быть существенно различны.

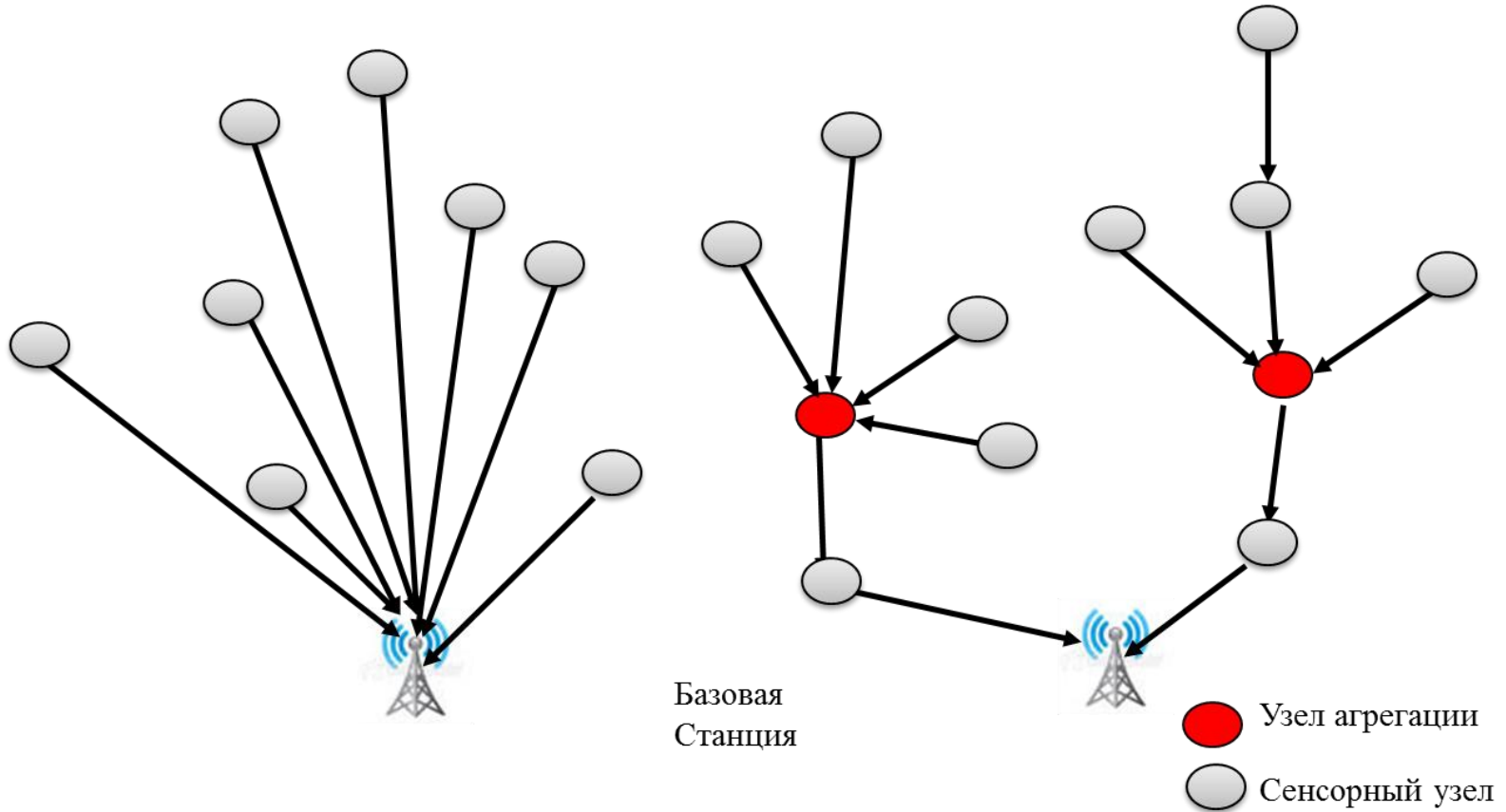
Статичность и Мобильность

- Потребность в мониторинге людей, животных и вещей в целом вызывает необходимость применения мобильных узлов в БСС. Сенсорные узлы, используемые в беспроводных сенсорных сетях, могут быть стационарным или мобильным. При этом мобильные сенсорные узлы могут перемещаться с места на место, из-за чего связь между двумя узлами в сенсорной сети с мобильными узлами может быть очень сложной.

Двумерные и трехмерные беспроводные сенсорные сети

- БСС могут быть также классифицированы на двумерные и трехмерные беспроводные сенсорные сети, Несмотря на то, что большинство существующих работ в области беспроводных сенсорных сетей в настоящее время посвящены двумерному пространству, на самом деле такие сети работают в трехмерном пространстве, особенно с учетом появления новых приложений, таких как летающие сенсорные сети. Таким образом, требуется оценить возможность применения известных протоколов для $2D$ в области БСС, работающих в $3D$.

Маршрутизация в беспроводных сенсорных сетях



Особенности маршрутизации в БСС (1)

- Традиционная адресация на основе *IP*-протоколов не может быть применена к БСС из-за относительно большого количества сенсорных узлов. В БСС иногда получить данные важнее, чем знать идентификаторы узлов, с которых они отправлены.

Особенности маршрутизации в БСС (2)

- Ресурсы сенсорных узлов в беспроводных сенсорных сетях ограничены с точки зрения возможностей обработки информации, пропускной способности, объема памяти, вычислительных возможностей, таким образом, требуется рациональное управление ресурсами.

Особенности маршрутизации в БСС (3)

- Сенсорные узлы как очень простые элементы зачастую ненадежны.
- Топология сенсорных сетей изменяется очень часто. В некоторых приложениях сенсорные узлы могут мобильными и изменять свое местоположение.

Особенности маршрутизации в БСС (4)

- Некоторые узлы в сети осуществляют одни и те же цели, то есть трафик данных может быть сгенерирован так, что различные сенсорные узлы будут передавать одну и ту же информацию.

Протоколы USN

1. ZigBee.
2. 6LoWPAN (IPv6 Low energy protocol for Wireless Personal Area Networks, физический уровень – IEEE 802.15.4).
3. RPL (Routing Protocol for Low energy and lossy networks).

Алгоритмы выбора головного узла

Потребление энергии (Энергетическая эффективность)

- Идеальный алгоритм должен обеспечить своевременную передачу информации с заданной точностью и с минимальными энергозатратами. В многошаговой БСС каждый узел играет двойную роль: сенсор и маршрутизатор данных. Сбой некоторых сенсорных узлов из-за перерыва в питании может вызвать значительные топологические изменения и может потребовать повторной маршрутизации пакетов и реорганизации сети. Энергетическая эффективность – одна из важнейших задач в создании беспроводных сенсорных сетей.

Модель передачи данных

- Сбор и передача данных в БСС зависят от приложения и актуальности представления данных (сообщений). Модели передачи данных могут быть классифицированы как непрерывная, управляемая событиями и гибридная. Непрерывная модель передачи данных подходит для приложений, которые требуют постоянного мониторинга. Таким образом, сенсоры и передатчики будут работать непрерывно. В событийно-управляемой и гибридной моделях сенсорные узлы реагируют на появление какого-либо события или запроса и генерируют сообщения на головной узел кластера или на БС. Алгоритм выбора головного узла и протокол маршрутизации во многом зависят от модели передачи данных, непосредственно связанной с потреблением энергии и стабильностью маршрута.

Гетерогенные узлы

- В зависимости от применения сенсорный узел может играть различную роль в сети или иметь различные параметры.
Существование разнородных сенсоров поднимает много технических проблем, связанных с маршрутизацией данных.

Толерантность к отказам

- Некоторые сенсорные узлы могут выходить из строя или быть заблокированы вследствие недостаточного уровня электропитания, возникновения критических условий во внешней среде, физического повреждения или помех. Отказ отдельных сенсорных узлов не должен влиять на общее функционирование сенсорной сети. БСС должна поддерживать требуемый уровень качества обслуживания и обеспечивать необходимую надежность.

Масштабируемость

- В зависимости от решаемой задачи число сенсорных узлов в беспроводных сенсорных сетях, размещенных в сенсорном поле, может изменяться от нескольких сотен до тысяч или более.

Гибкость

- Алгоритмы в сенсорных сетях должны быть способны адаптироваться к различным приложениям БСС. Условия работы и возможности самого сенсорного узла могут сильно изменяться. Всё это должно быть учтено при разработке алгоритмов для беспроводных сенсорных сетей.

Средства передачи

- Характеристики окружающей среды также определяют метод радиосвязи для БСС. Например, для подводных беспроводных сенсорных сетей *UWSN (Underwater Wireless Sensor Networks)* средой передачи является вода. Традиционные проблемы, связанные с беспроводным каналом (например, замирание, высокий коэффициент ошибок и помехи), также могут влиять на работу сенсорной сети

Связность

- Высокая плотность узлов в сенсорных сетях способствует поддержанию необходимого значения связности. Тем не менее, связность может уменьшаться вследствие вмешательства, помех, шумов или препятствий.

Покрытие

- В беспроводных сенсорных сетях каждый сенсорный узел покрывает ограниченную физическую область окружающей среды. Доля покрытия пространства также является важным параметром БСС, особенно для систем мониторинга.

Мобильность

- Большинство приложений предполагает, что сенсорные узлы стационарны. Тем не менее, мобильность сенсорных узлов может быть необходима в различных приложениях, например, летающих сенсорных сетях. Маршрутизация данных от или до движущихся узлов является более сложной, так как стабильность маршрута становится важной проблемой в дополнение к энергии, пропускной способности и т.д.

Двумерное и трехмерное пространство

- Сенсорные сети могут часто развертываться в трехмерном пространстве, например, в многоэтажных зданиях, при мониторинге лесов, подводном мониторинге, летающих сенсорных сетях и т.д. Переход от двумерного пространства к трехмерному порождает множество новых задач в связи с иной топологией сети.

Агрегация данных

- Сенсорные узлы могут генерировать значительные избыточные данные, включая аналогичные сообщения о событиях от нескольких узлов. Естественно, такие данные можно агрегировать для того, чтобы число сообщений уменьшилось. Объединение данных является типичной операцией во многих приложениях БСС, особенно, в иерархических протоколах маршрутизации для самоорганизующейся БСС. Такой метод широко используется для увеличения жизненного цикла сети.

Самоорганизация

- Сенсорные сети должны иметь возможность самоорганизации. Поэтому, вычислительные возможности, возможности обеспечения связи, возможности управления должны обеспечивать и возможность автономного существования БСС в течение какого-либо времени.

Точность и латентность

- Обеспечение точной информацией в реальном времени – одна из главных задач приложений БСС. Данные должны передаваться через беспроводную сенсорную сеть своевременно и точно. Идеальный алгоритм должен обеспечивать качественную передачу данных с минимальными энергозатратами.

Типы гетерогенных ресурсов (1)

- **Вычислительная неоднородность**

Гетерогенный узел имеет более мощный микропроцессор и больше памяти, чем типовой сенсорный узел. С помощью более мощных вычислительных ресурсов узлы могут обеспечить комплексную обработку данных и их долгосрочное хранение.

Типы гетерогенных ресурсов (2)

- **Неоднородность сетевых возможностей**

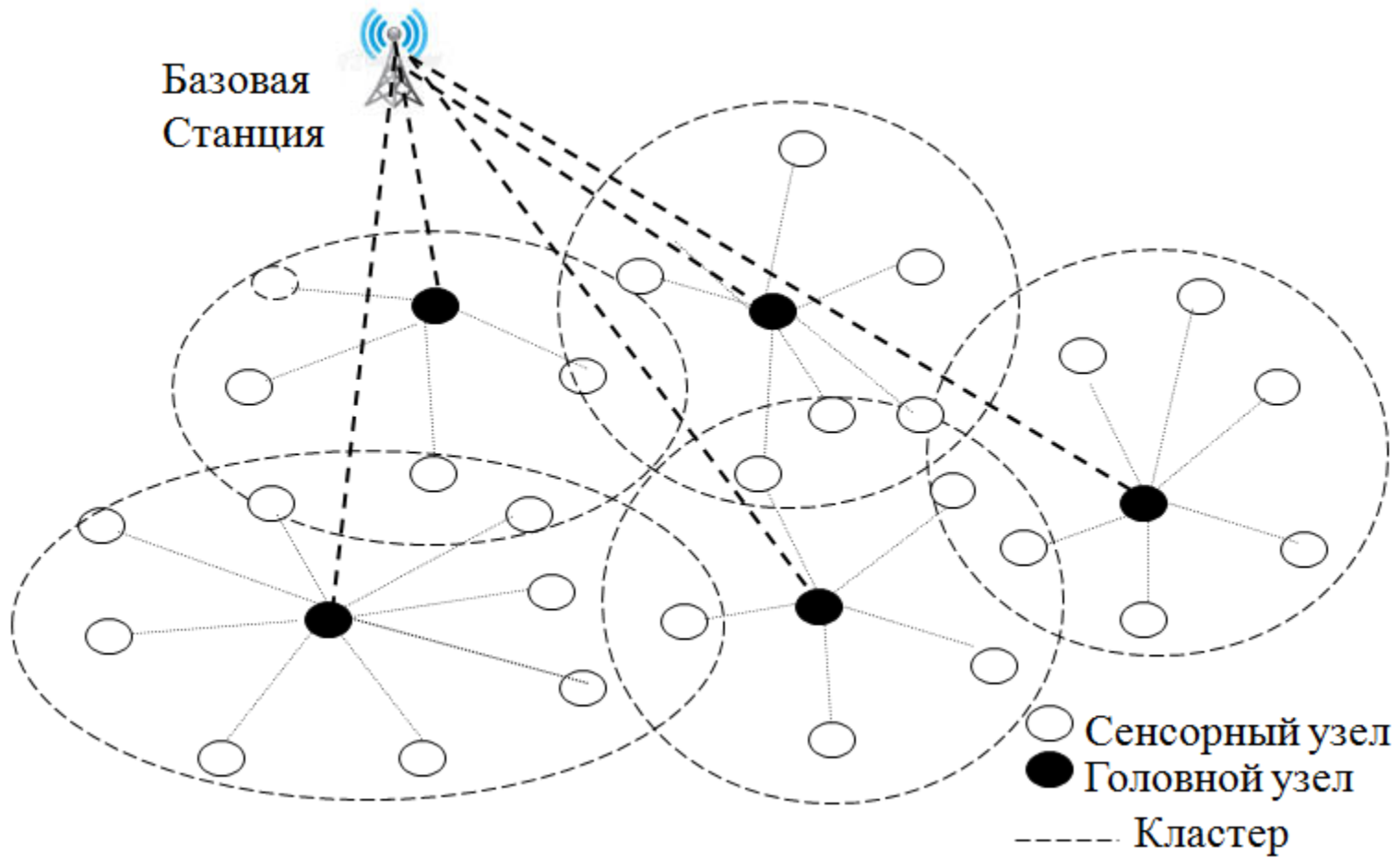
Гетерогенный узел имеет более высокую пропускную способность и более мощный радио передатчик, чем типовой узел. Такие гетерогенные узлы могут обеспечить более надежную передачу данных, чем типовые.

Типы гетерогенных ресурсов (3)

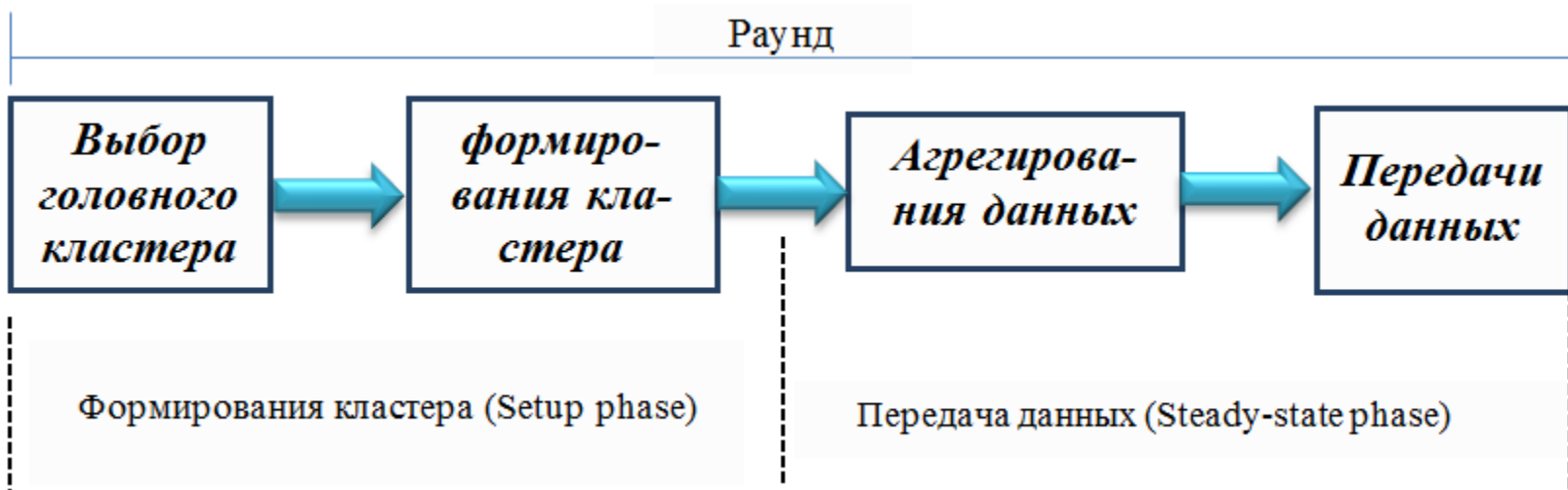
- **Неоднородность энергии**

Для гетерогенного сенсорного узла существует возможность либо постоянного электропитания от сети, либо возможность замены батареи или аккумулятора в течение срока службы сенсорного узла.

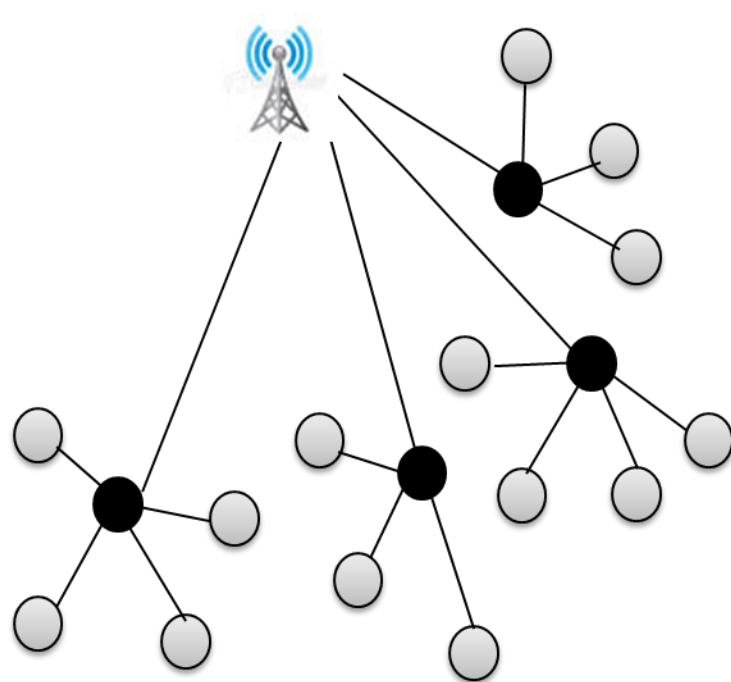
Кластеризация в БСС



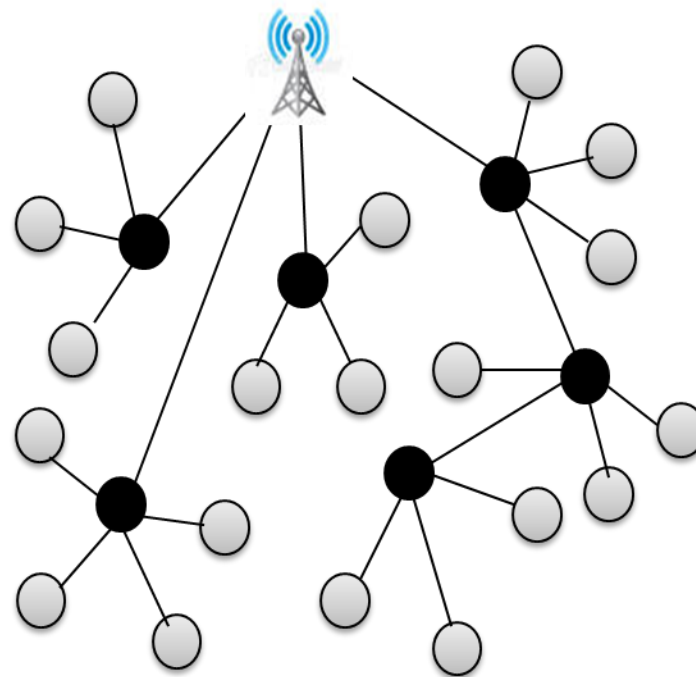
Раунд в кластеризации



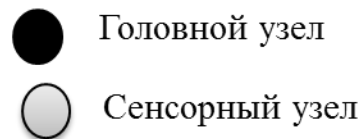
Кластеризация в одноранговой и многошаговой сетях



а) Одноранговая сеть



б) Многошаговой сеть



Головной узел кластера (CH)

- Координация группы узлов, расположенных в границах кластера, агрегация данных от членов кластера и передача собранных или агрегированных данных на следующий узел являются основными функциями CH.

Базовая станция (*BS*) или шлюз

- Учитывая высокие возможности обработки информации и неограниченный источник энергии, БС может быть координатором сети и / или приемным узлом, где все агрегированные данные обрабатываются в соответствии с приложением БСС и требованиями конечного пользователя.

Ретранслятор *RN (Relay node)*

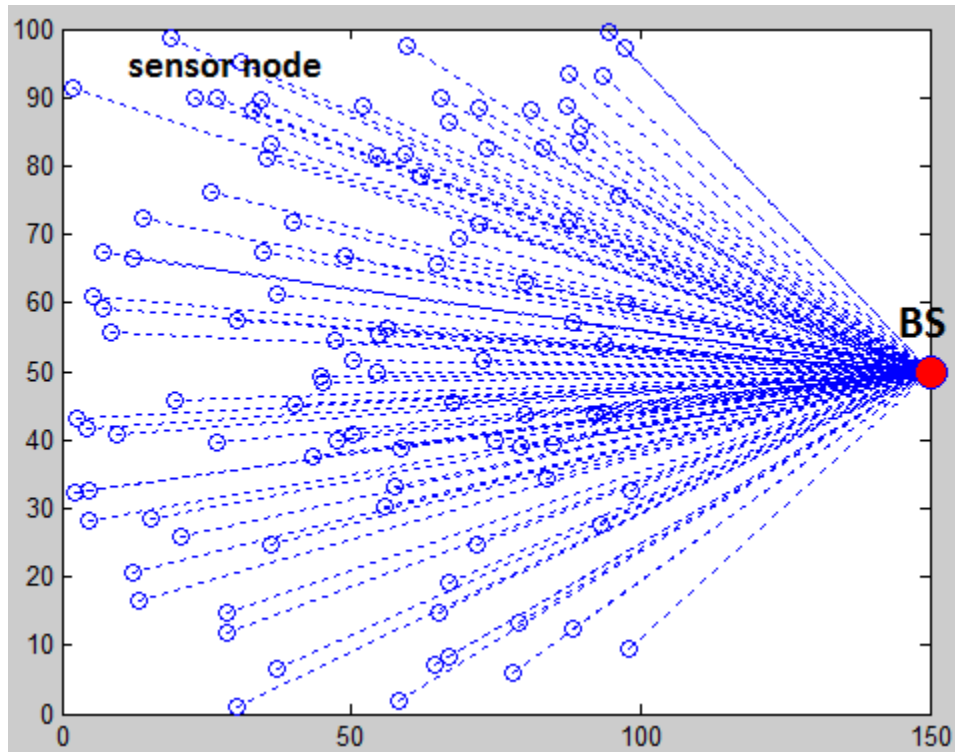
- Транзитные узлы в многошаговых сетях, выполняющие функции передачи собранных или агрегированных данных другими узлами, к месту назначения.

Типовой узел *GN* (*General node*)

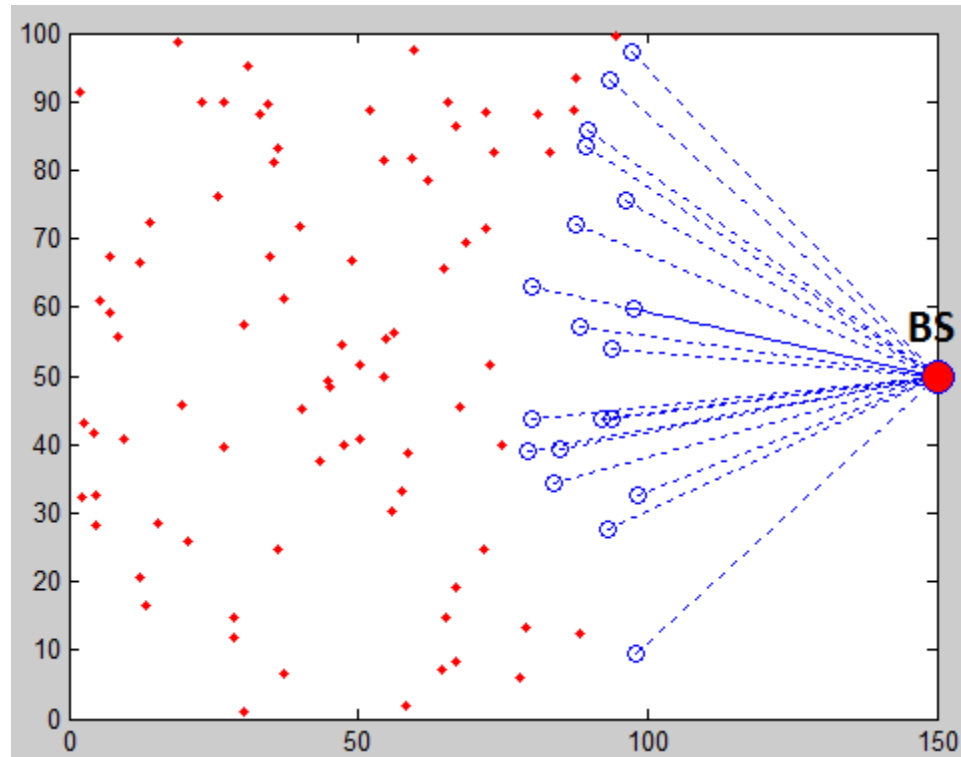
- Большинство узлов в сети, которые только обеспечивают сбор данных, основанных на типе применения.

АЛГОРИТМЫ ВЫБОРА ГОЛОВНОГО УЗЛА ДЛЯ ГОМОГЕННЫХ СЕТЕЙ

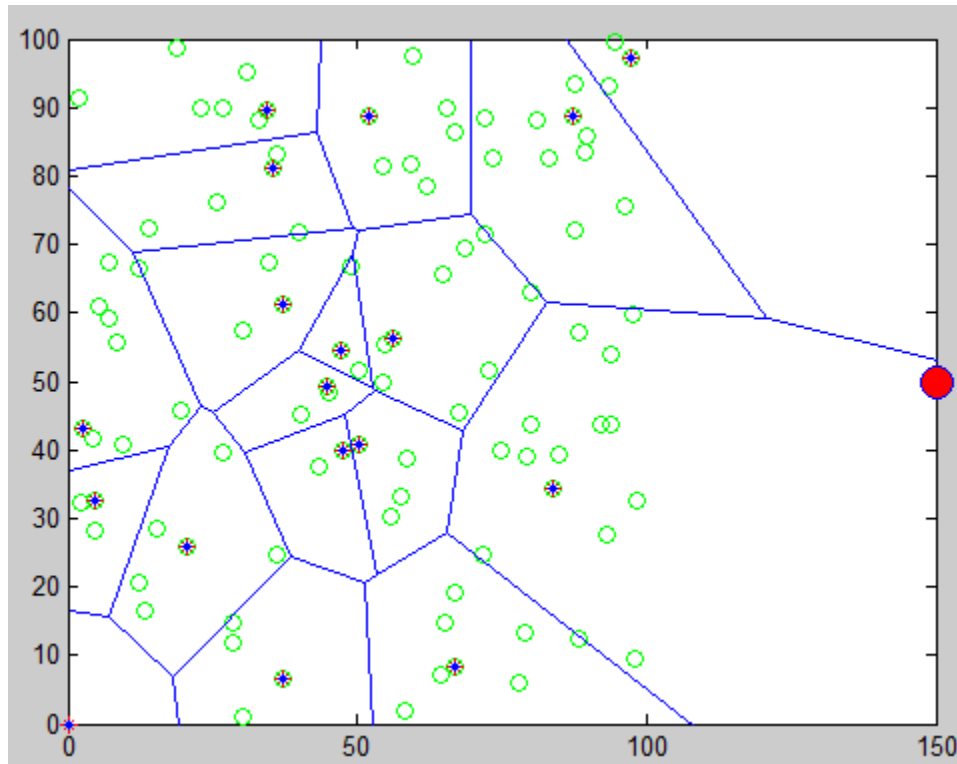
DT (Direct Transmission)



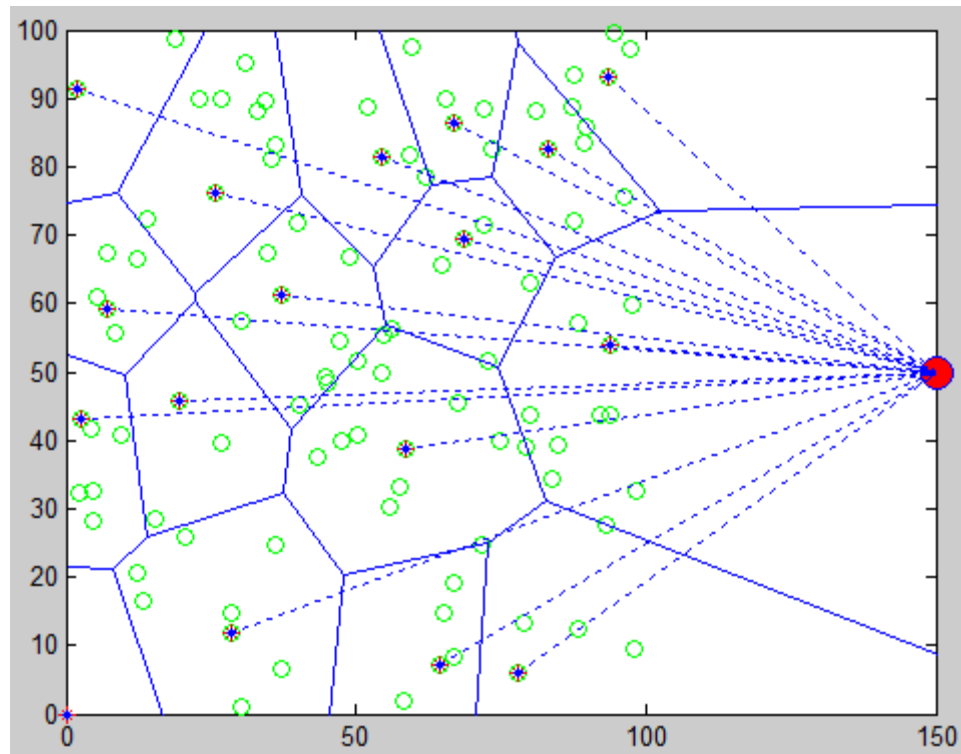
DT после 180 временных раундов



Кластеризация (LEACH)



Кластеризация (LEACH)



LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

- В фазе формирования кластера каждый сенсорный узел генерирует случайное число от 0 до 1. Каждый сенсорный узел имеет порог, который соответствует предварительно определённому числу головных сенсорных узлов в сети. Если интегрированное случайное число меньше, чем порог, то сенсорный узел может стать головным в текущем раунде жизни БСС, в противном случае этот узел остаётся только членом кластера. Вычисление порога является ключевой задачей при реализации алгоритма *LEACH*.

Порог для LEACH

P – predetermined percentage of head nodes among all sensor nodes. Optimal value of P is estimated as 5% of the total number of sensor nodes.

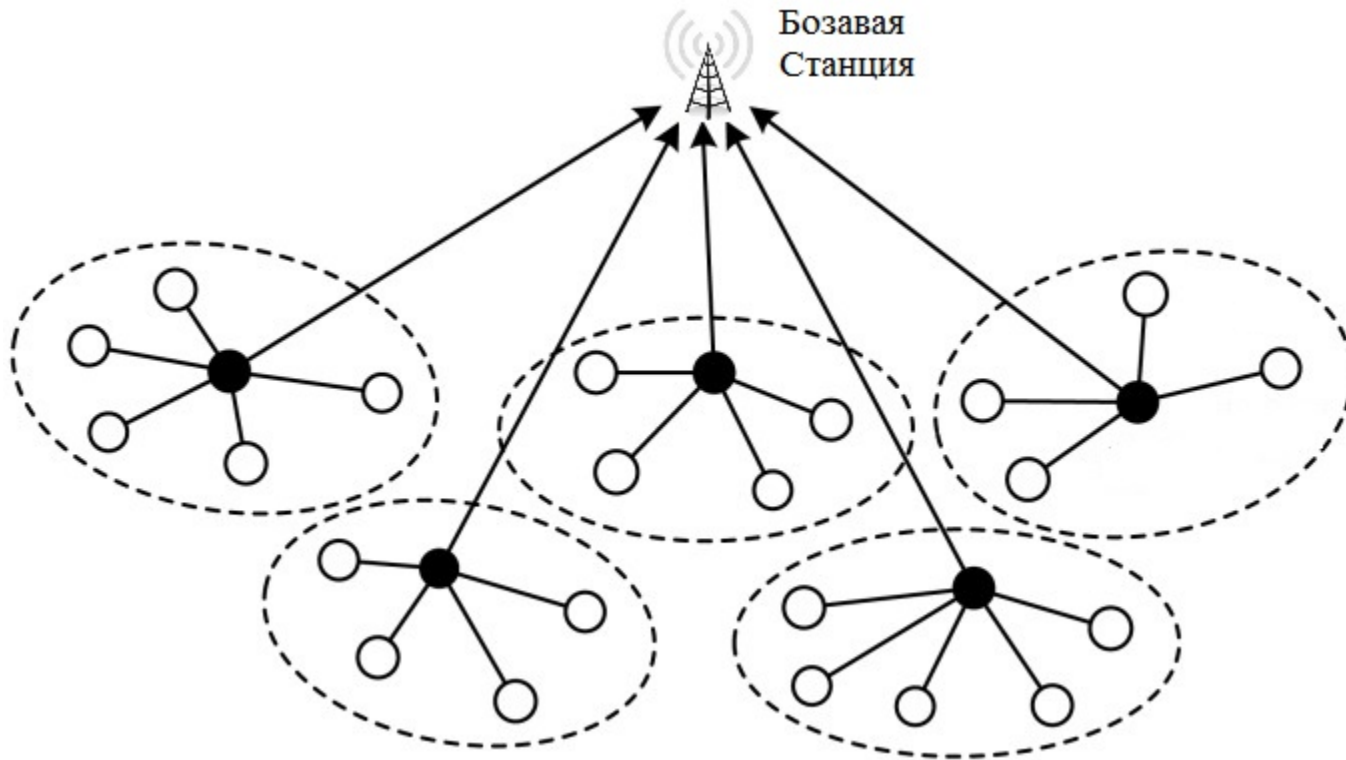
Variable r corresponds to the current interval of network operation, G denotes the number of sensor nodes that were not selected as heads in the last $1/P$ intervals.

$$Th(LEACH) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times \left(r \times \text{mod} \frac{1}{p} \right)} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

LEACH

- При выборе головного узла другие сенсорные узлы определяют, к какому кластеру они хотят присоединиться на основе мощности получаемого сигнала *RSS (Received Signal Strength)* от головного узла.
- Когда все узлы организовались в кластеры, головной узел создает расписание передачи информации на основе метода *TDMA*, что гарантирует отсутствие коллизий при передаче сообщений.

Архитектура сети LEACH



Недостатки алгоритма LEACH (1)

- LEACH выполняет только прямую передачу данных внутри кластера и непосредственно из головного узла в БС. Это не всегда возможно в связи с большим размером сети. Кроме того, при большом расстоянии между головными узлами и БС потребляется много энергии

Недостатки алгоритма LEACH (2)

- Несмотря на ротацию головных узлов *CH* в каждом раунде, чтобы добиться балансировки нагрузки, *LEACH* не может обеспечить реальную балансировку в случае сенсорных узлов с различным количеством начальной энергии, поскольку головные узлы *CH* избираются в терминах вероятностей без энергетических соображений;

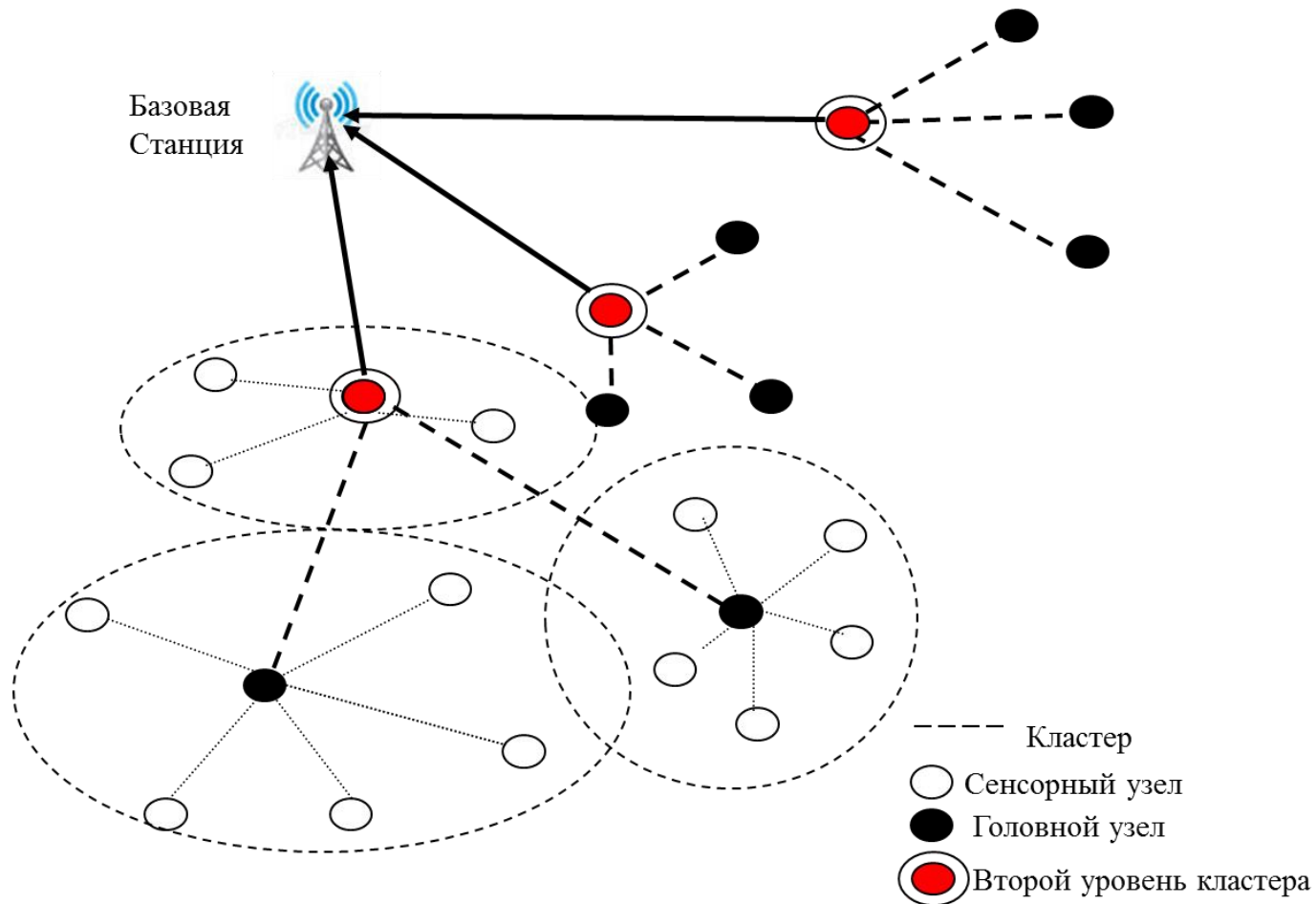
Недостатки алгоритма LEACH (3)

- Так как выборы CH выполняются в терминах вероятностей, трудно равномерно распределить CH всей сети. Таким образом, существуют избранные CHs , сосредоточенные в одной части сети, и некоторые узлы, в окрестностях которых нет CHs

TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols)

- Жесткий порог (*Hard Threshold*): Узел посылает информацию главному узлу только, если количество накопленных данных находится в заданных пределах
- Мягкий порог (*Soft Threshold*): узел посылает информацию главному узлу только, когда количество накопленных данных изменилось как минимум на величину, равную или большую, чем мягкий порог.

Архитектура сети для алгоритма TEEN



Преимущества TEEN (1)

- Жесткий порог (*HT*) сокращает количество сообщений, передавая информацию только тогда, когда собираемые данные находятся в диапазоне интереса. Кроме того, мягкий порог уменьшает количество сообщений исключением тех, у которых есть минимальное изменение в собираемых данных. Таким образом, алгоритм *TEEN* уменьшает потребление энергии и улучшает эффективность и полезность БСС в целом;

Преимущества TEEN (2)

- *TEEN* оперативно реагирует на большие изменения в собираемых данных, что подходит для реактивных сценариев и критически важных приложений.

АЛГОРИТМЫ ВЫБОРА ГОЛОВНОГО УЗЛА ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЕЙ

SEP (Stable Election Protocol)

- Алгоритм *SEP* разработан для выбора головного узла в БСС исходя из предположения, что в сети возможно наличие двух типов узлов с точки зрения их энергии: обычные и продвинутые узлы. Последнее сразу же определяет, что в данном случае сеть является гетерогенной. Энергия продвинутых узлов больше, чем энергия обычных. При этом для обычных узлов начальная энергия равна E_0 , в то время как для продвинутых $E_0 (1 + \alpha)$.

DEEC (Distributed Energy Efficient Clustering)

- Распределенный энергосберегающий алгоритм кластеризации для гетерогенных беспроводных многоуровневых сенсорных сетей.

Энергия для DEEC

Вероятность выбора головного узла

Средняя энергия сети для произвольного раунда r

- $$p_i = p_{opt} \left[1 - \frac{E(r) - E_i(r)}{E(r)} \right] = p_{opt} \frac{E_i(r)}{E(r)}$$

- $$E(r) = \frac{1}{N} E_{total} \left(1 - \frac{r}{R} \right)$$

Показатели (1)

- **Жизненный цикл**
- Жизненный цикл БСС может быть определен с помощью следующих показателей:
 - – длительность интервала времени от начала функционирования БСС до момента гибели первого сенсорного узла,
 - – длительность интервала времени до момента времени, когда в живых остается заданный процент сенсорных узлов,
 - – длительность интервала времени до гибели последнего сенсорного узла.

Показатели (2)

- **Стабильность**

Длительность интервала времени от начала функционирования БСС до момента гибели первого сенсорного узла.

Нестабильность

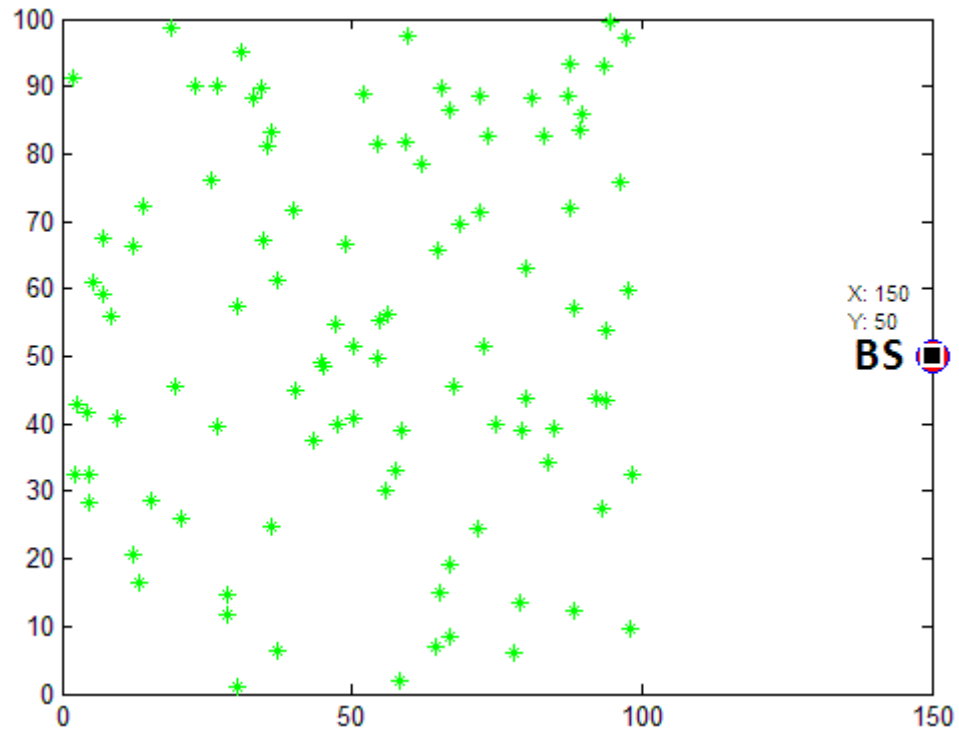
Длительность интервала времени от момента гибели первого сенсорного узла до момента времени гибели последнего

Число живых узлов и число погибших узлов

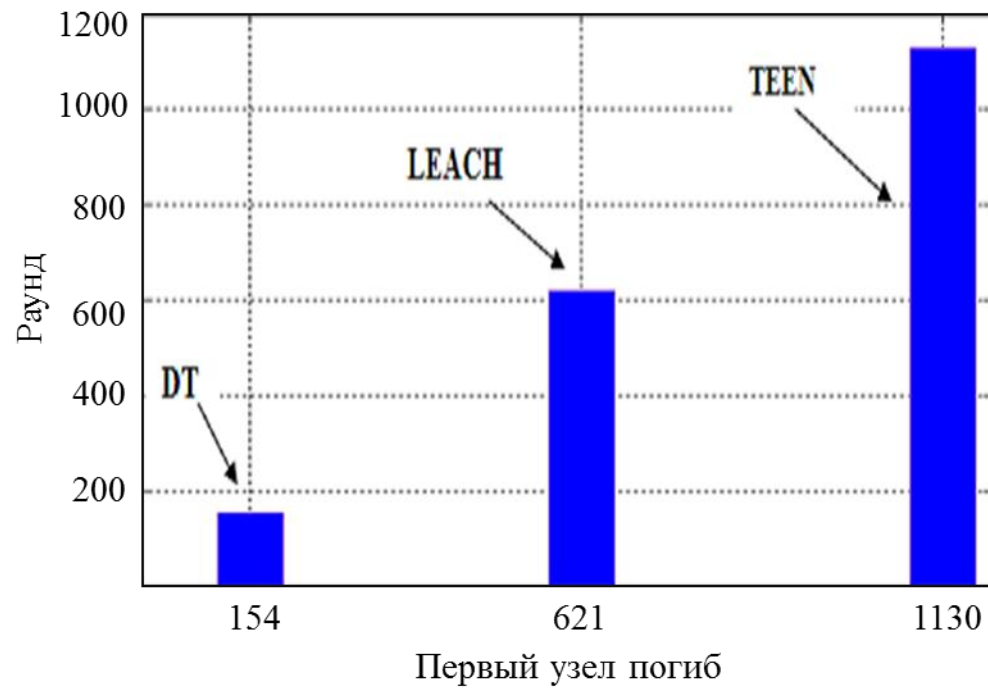
Сравнение алгоритмов

- В первом сценарии сенсорные узлы случайно распределены на плоскости размером $100\text{м} * 100\text{м}$. Число узлов в сети составляет 100 и базовая станция находится на границе сенсорного поля с координатами $(150, 50)$ м

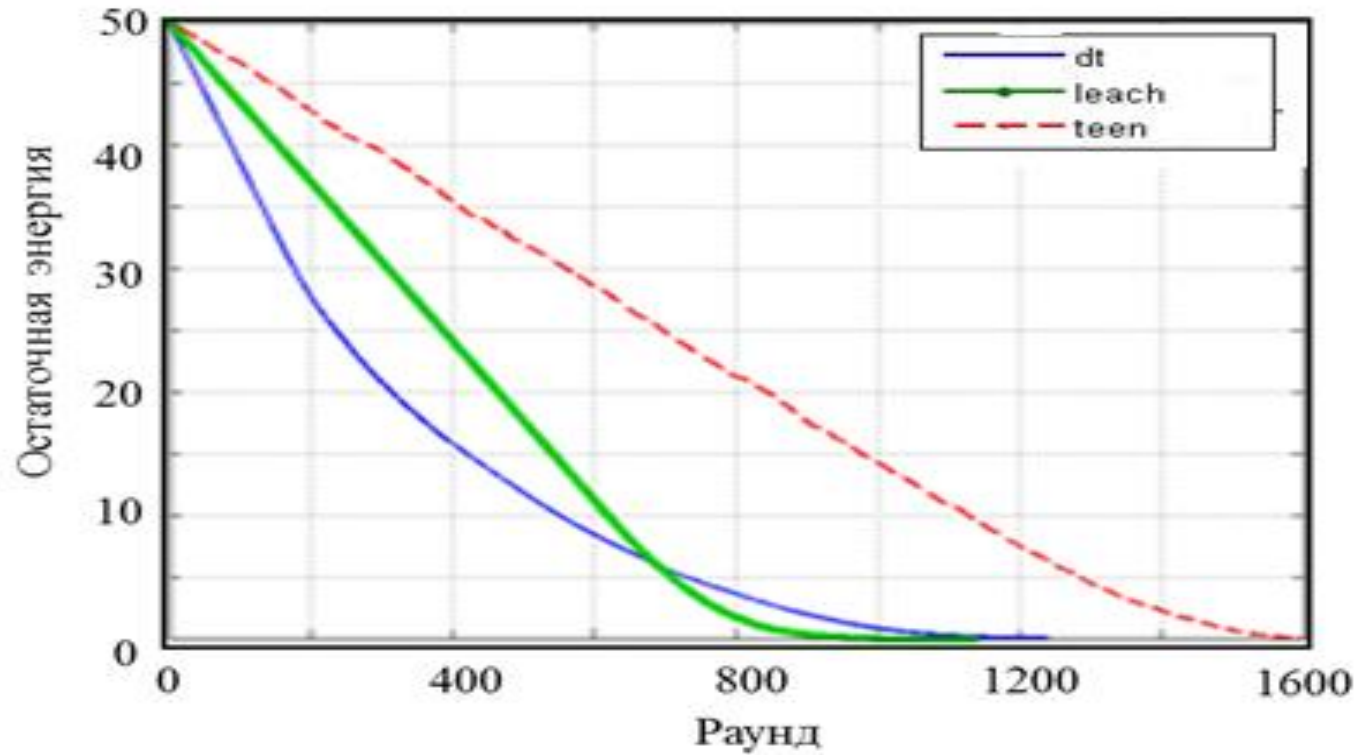
Модель сети



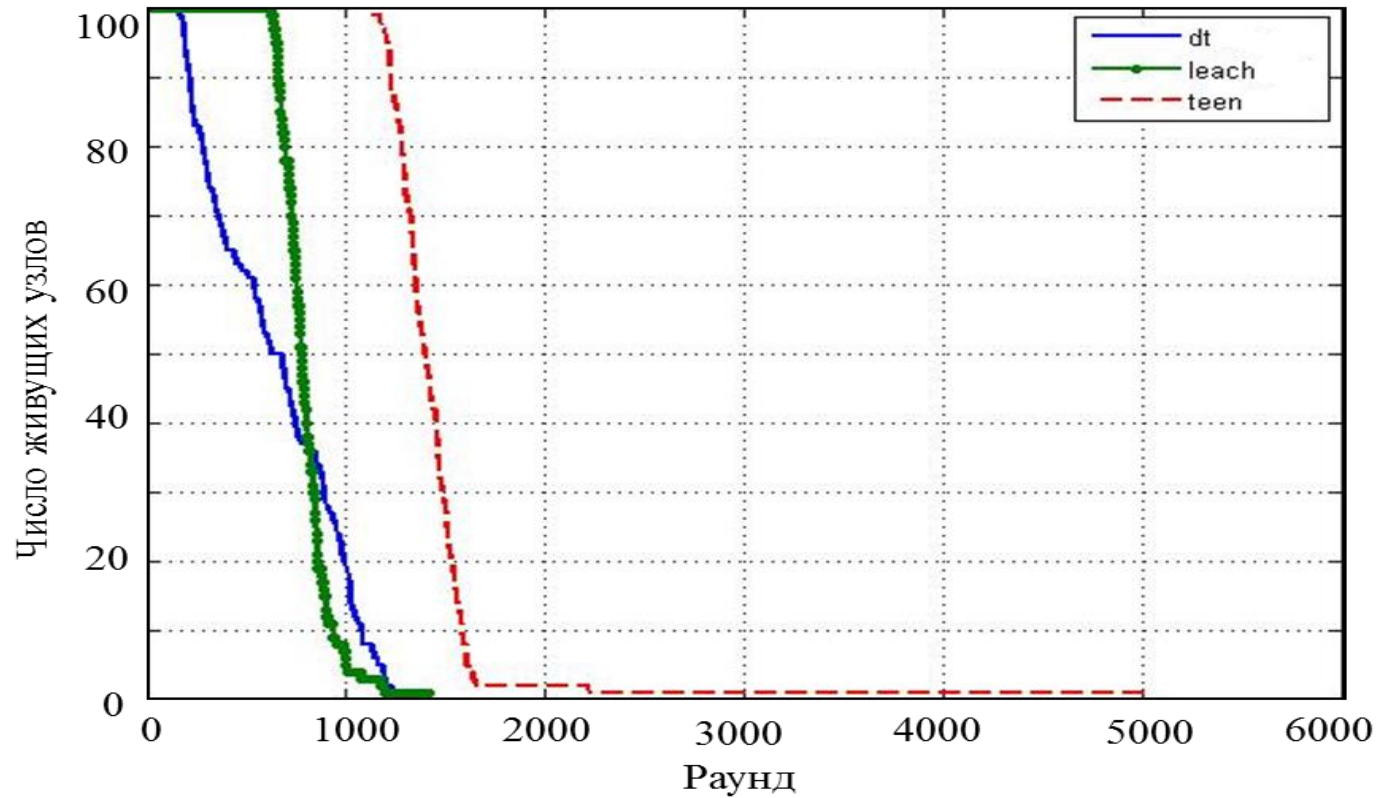
Период стабильности



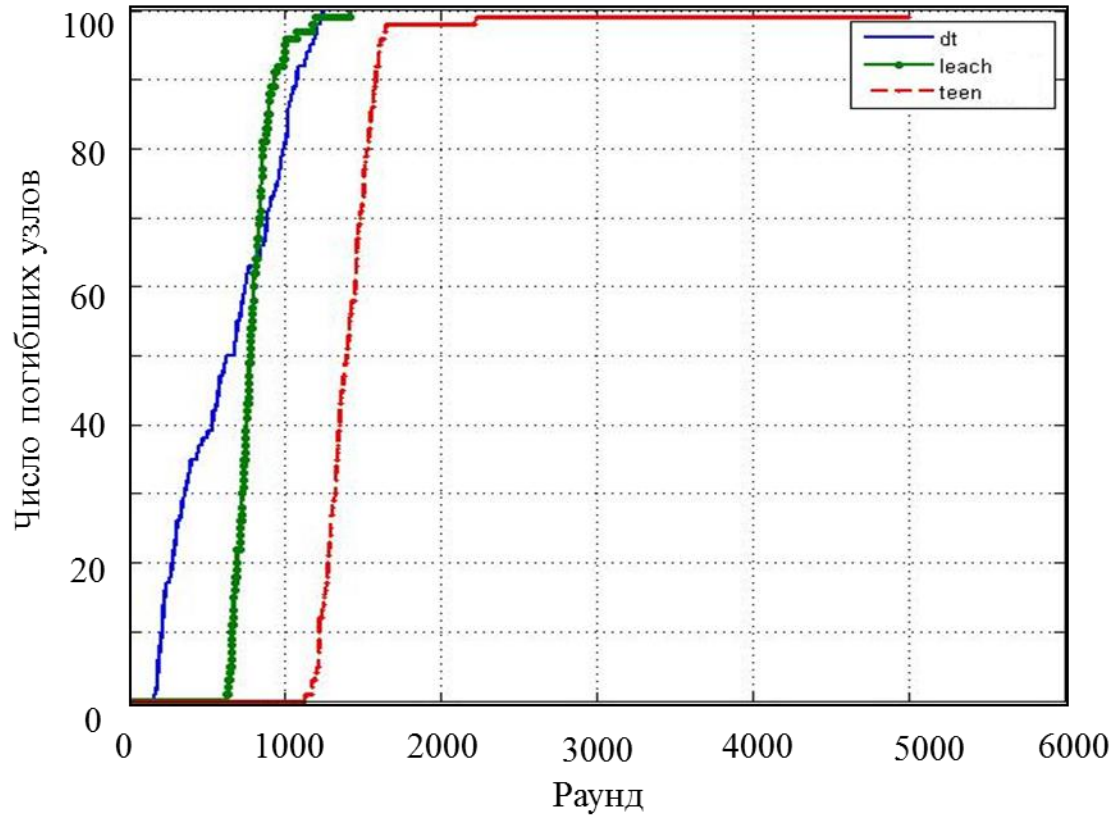
Остаточная энергия



Число живущих узлов



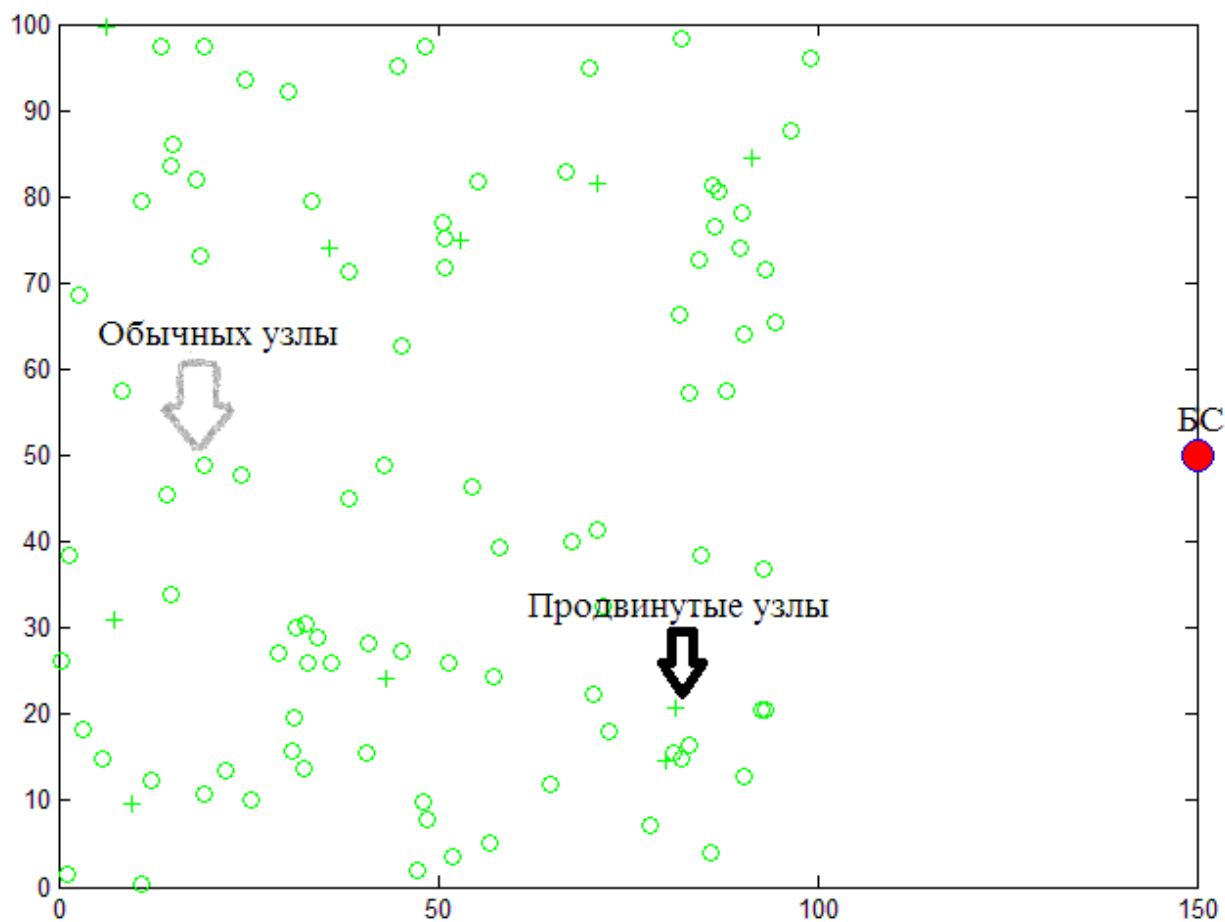
Число погибших узлов



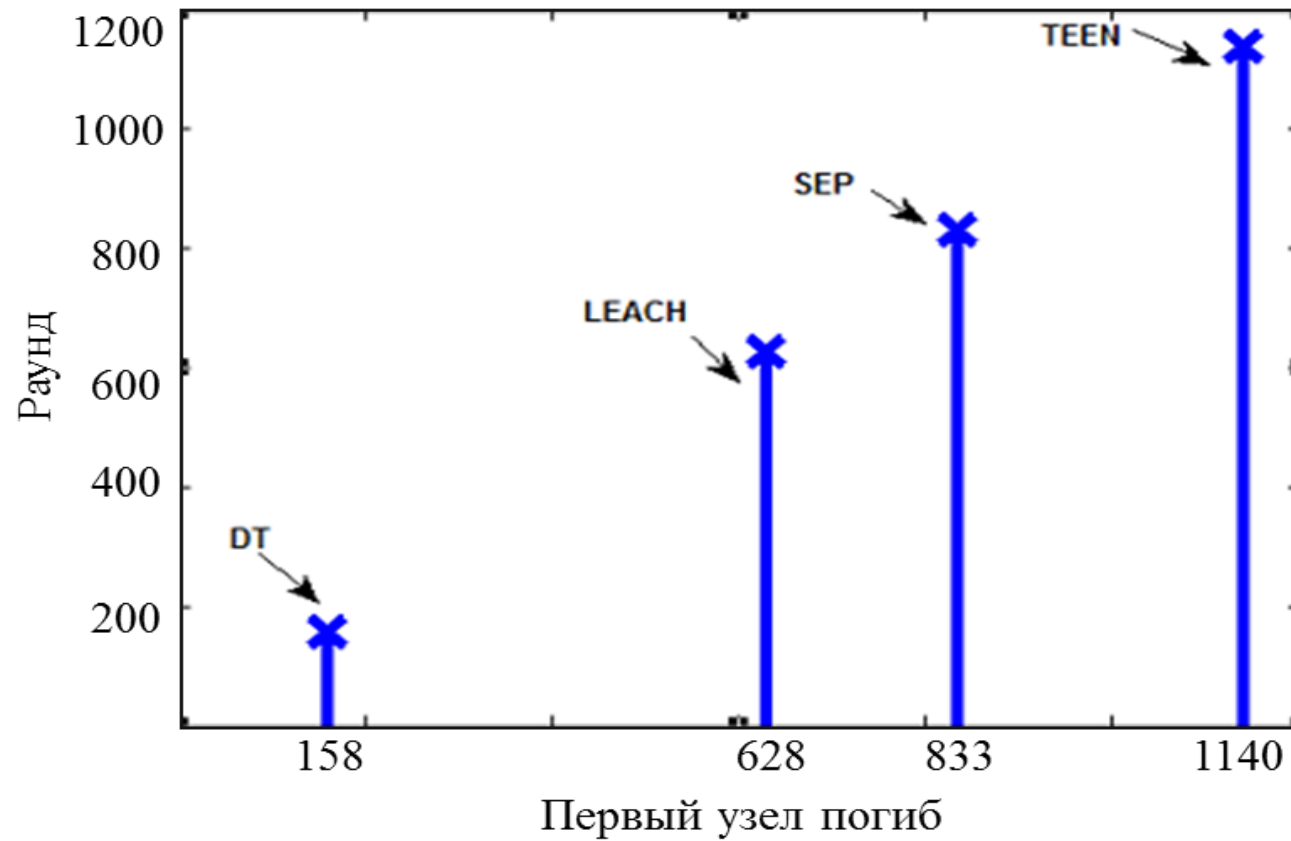
Сравнение для гетерогенных сетей

- В этом сценарии рассмотрим гетерогенную сенсорную сеть, в которой есть два типа узлов – обычные и продвинутые. Рассматривается модель, в которой начальная энергия для продвинутых узлов в два раза больше, чем для обычных. При этом их число составляет 10% от общего числа узлов на сенсорном поле.

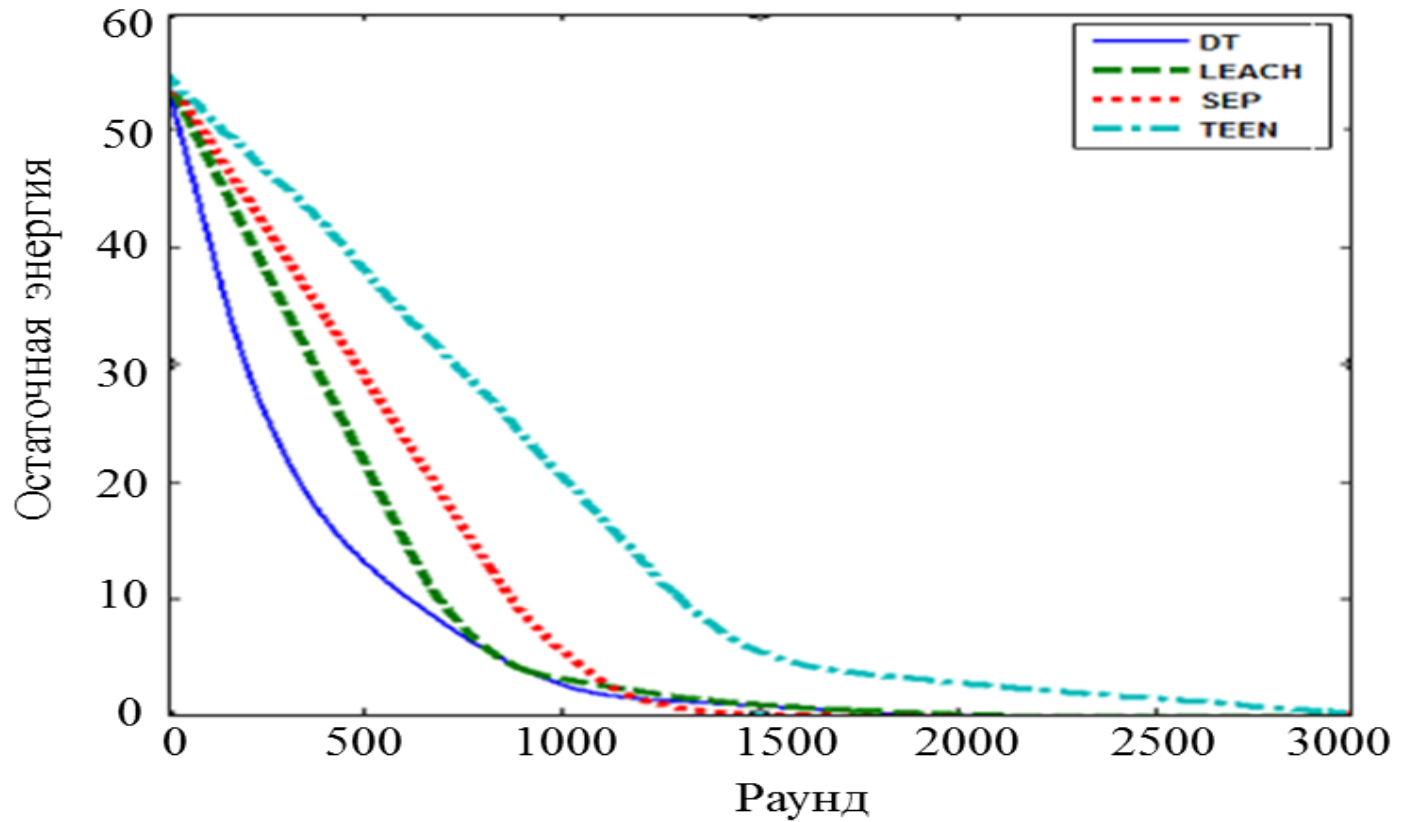
Модель гетерогенной сети



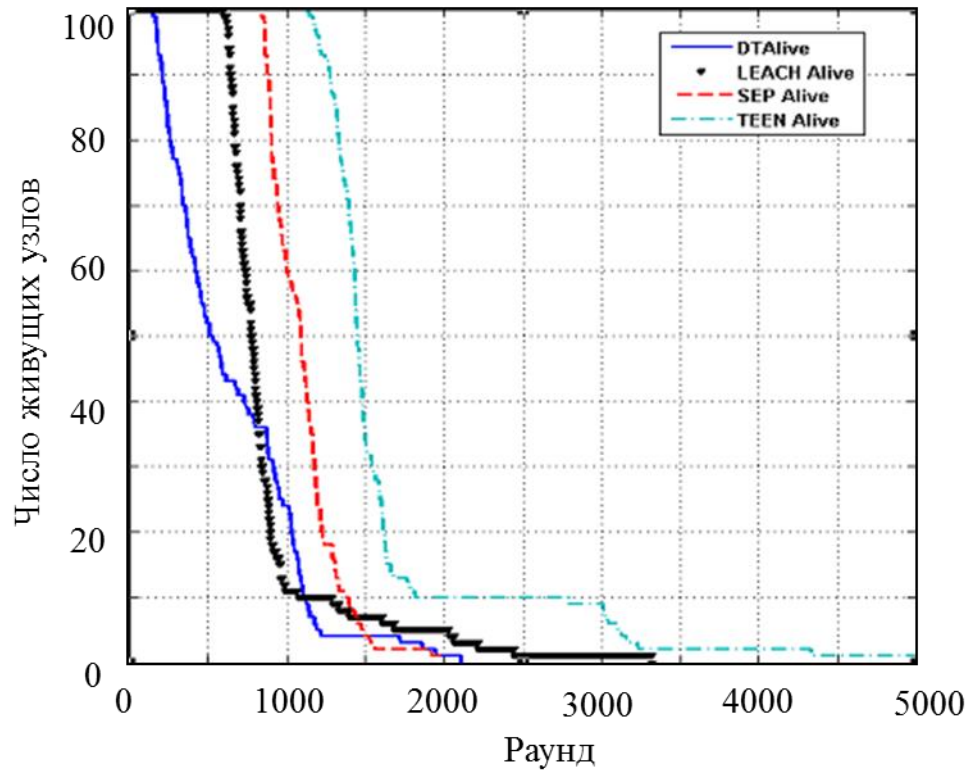
Период стабильности



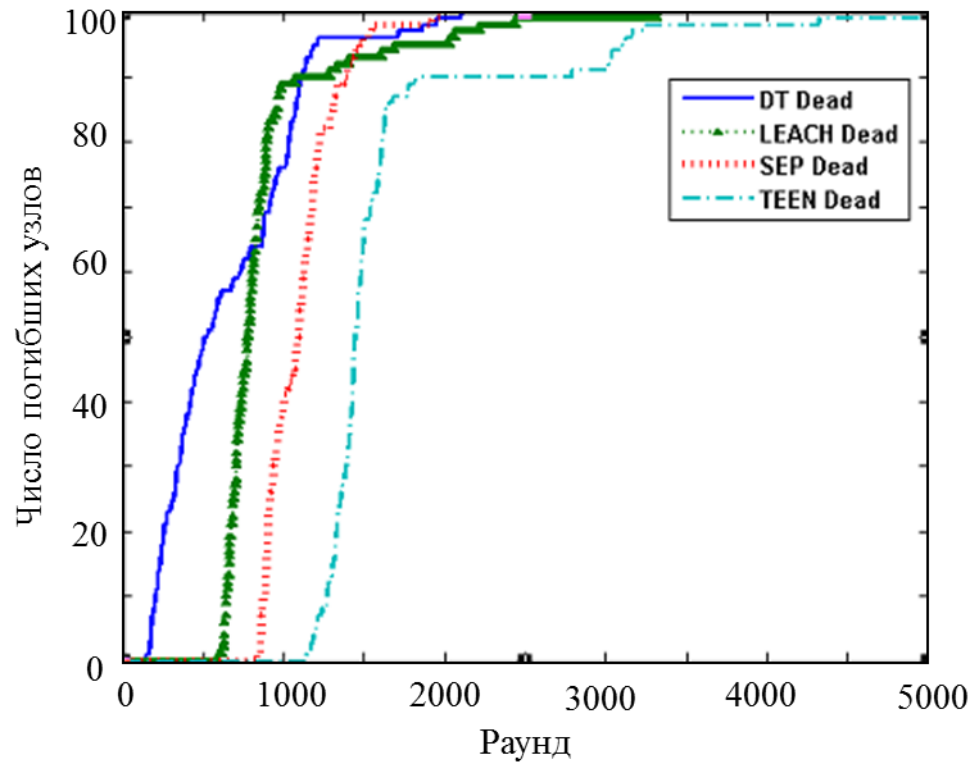
Остаточная энергия



Число живущих узлов



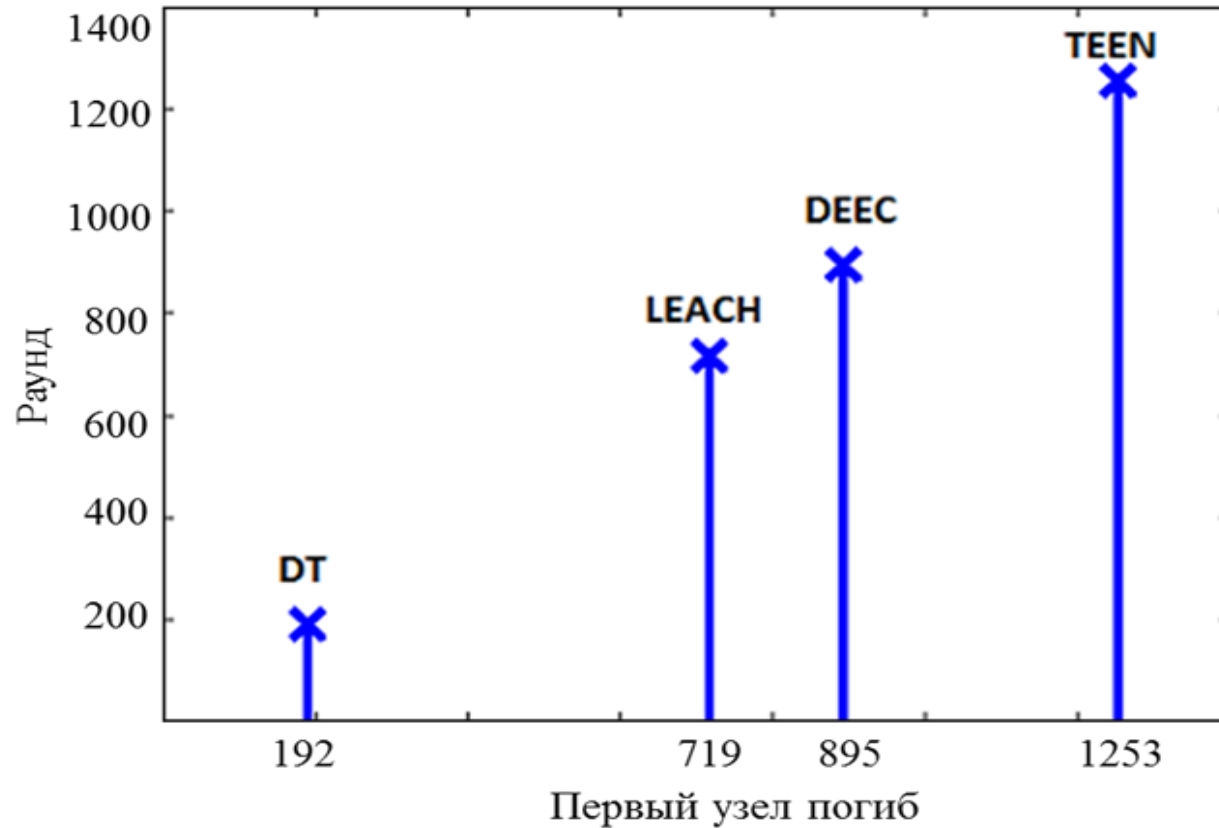
Число погибших узлов



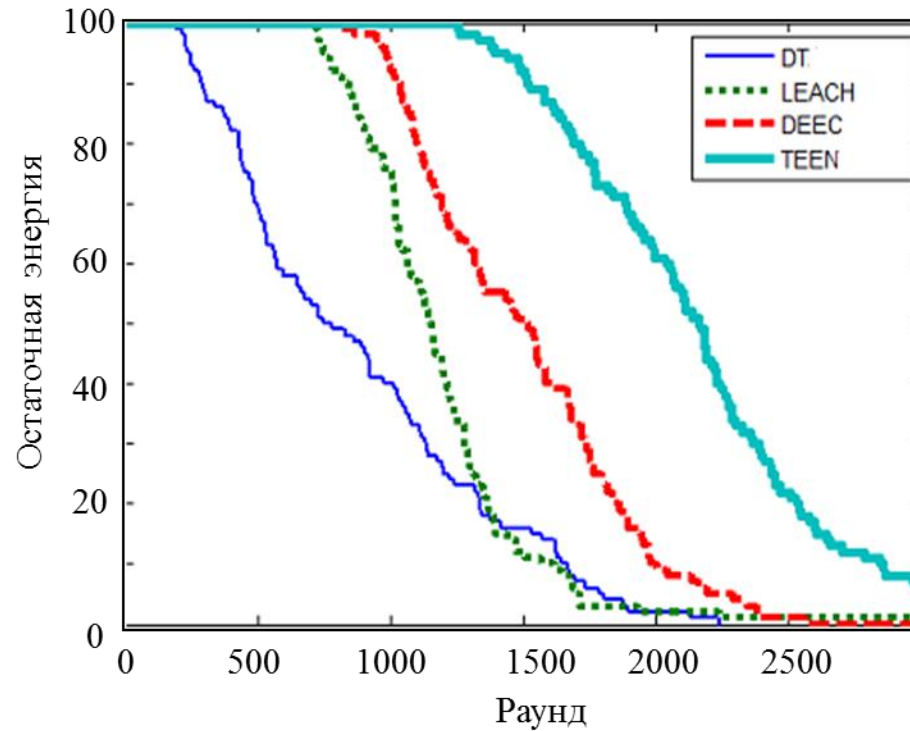
Многоуровневая гетерогенная сеть

- В этом сценарии рассмотрим многоуровневые по возможным энергетическим характеристикам сенсорных узлов гетерогенные сети. При этом гетерогенная сенсорная сеть содержит сенсорные узлы трех уровней: обычные, продвинутые и суперузлы. Каждый узел имеет свою первичную энергию, значение первичной энергии изменяется в рамках от 0,1 до 1дж.

Период стабильности



Остаточная энергия



Мобильные Беспроводные Сенсорные Сети (*MWSN*).

Мобильный узел для сбора информации

- Специальный мобильный узел или узлы участвуют в сборе информации с сенсорных узлов, что снижает энергопотребление в процессе передачи информации и увеличивает длительность жизненного цикла за счет уменьшения средней длины маршрута для передачи информации.

Мобильность базовой станции.

- Мобильная базовая станция может перемещаться между фрагментами сети, что так же, как и в предыдущем случае, снижает энергопотребление и увеличивает длительность жизненного цикла сети.

Мобильность событий

- В БСС событие, которое должно наблюдаться, также может быть мобильным (например, в задачах поиска целей), при этом различные узлы БСС становятся “ответственными” за наблюдение такого события.

Мобильность членов кластера и головного узла кластера.

Мобильность членов кластера и головного узла кластера, оказывая в целом отмеченное выше положительное влияние на параметры БСС, ставит и целый ряд новых проблем для кластеризации мобильных БСС, включая проблемы устойчивости кластера.

Модели мобильности

- случайная мобильность
- предсказуемая мобильность
- управляемая мобильность.

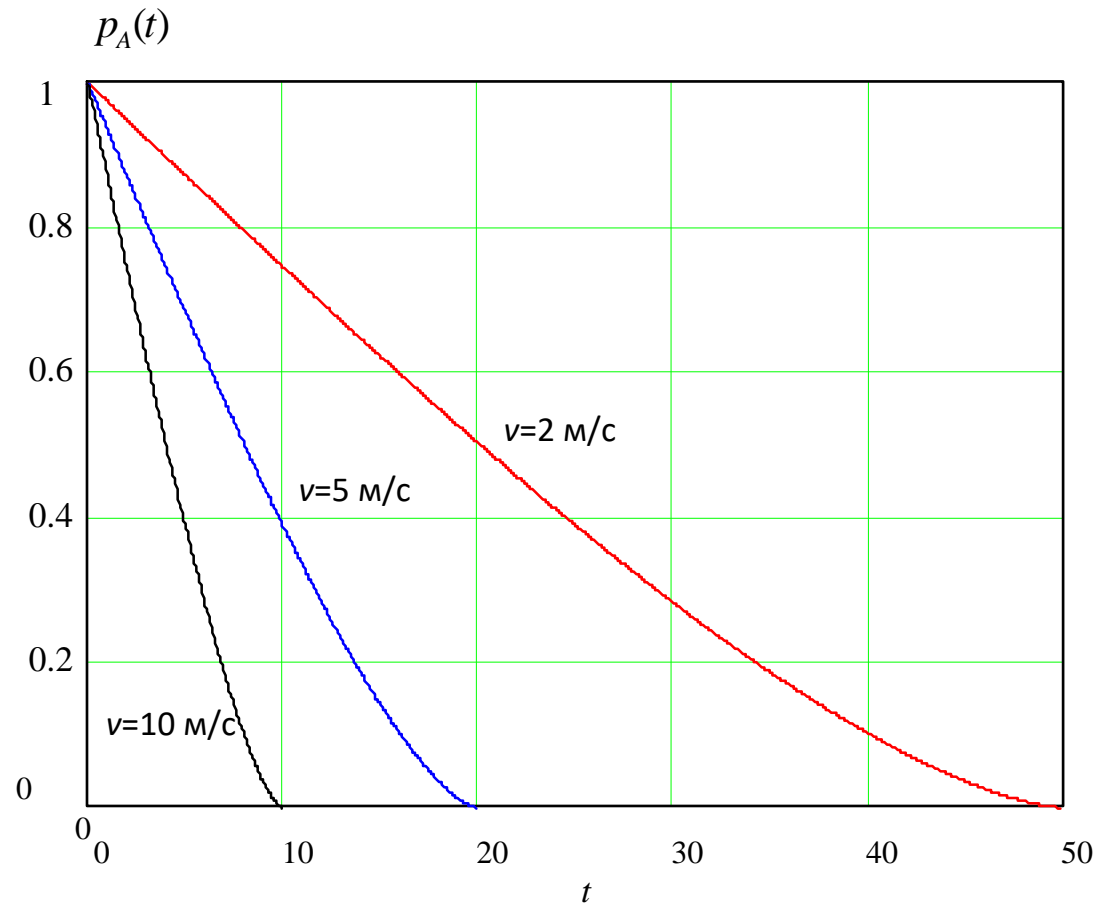
Временные головные узлы. Модель сети (1).

Пуассоновское сенсорное поле полностью расположено в гетерогенной зоне LTE. Шлюз расположен в центре сенсорного поля на расстоянии 500 м от базовой станции LTE. 100 сенсорных узлов распределены изначально случайным образом на плоскости размером 200 на 200 метров. Сенсорные узлы стационарны. Радиус действия сенсорного узла 20 м, запас энергии в каждом узле – 2 Дж, расход энергии на прием - 50 нДж/бит, на передачу – 50 нДж/бит и дополнительно 100 пДж/кв.м. Все сенсорные узлы однородны, т.е. имеют одинаковый радиус действия и начальные энергетические характеристики. Сенсорное поле кластеризовано. В соответствии с практикой использования алгоритма LEACH доля головных узлов predeterminedлена в количестве 5% от общего числа сенсорных узлов.

Временные головные узлы. Модель сети (2).

Через сенсорное поле 1 раз в 100 раундов проходит мобильный узел иной сети со скоростью 2 м/с (типичная скорость для мобильных сенсорных сетей), который становится головным узлом для пересекаемых им кластеров. Точка входа этого узла в сенсорное поле случайна. Также случайным является номер первого раунда для мобильного временного головного узла. После входа мобильный головной узел пересекает сенсорное поле параллельно сторонам квадрата. Этот мобильный узел становится временным головным в первом же целом раунде после его появления в сенсорном поле. Мобильный головной узел считается выбывшим из сенсорного поля в момент времени, когда наступает очередной раунд, а до пересечения границы сенсорного поля этому узлу остается времени меньше, чем длительность раунда. При этом он уже не может быть избран временным головным. При наличии мобильного временного головного узла в сенсорном поле число выбираемых головных узлов из членов кластера уменьшается на единицу. Собранный за время пребывания в роли головного узла мобильный временный головной узел передает на шлюз или базовую станцию.

Изменение вероятности доступности временного мобильного головного узла от времени для разных скоростей его перемещения



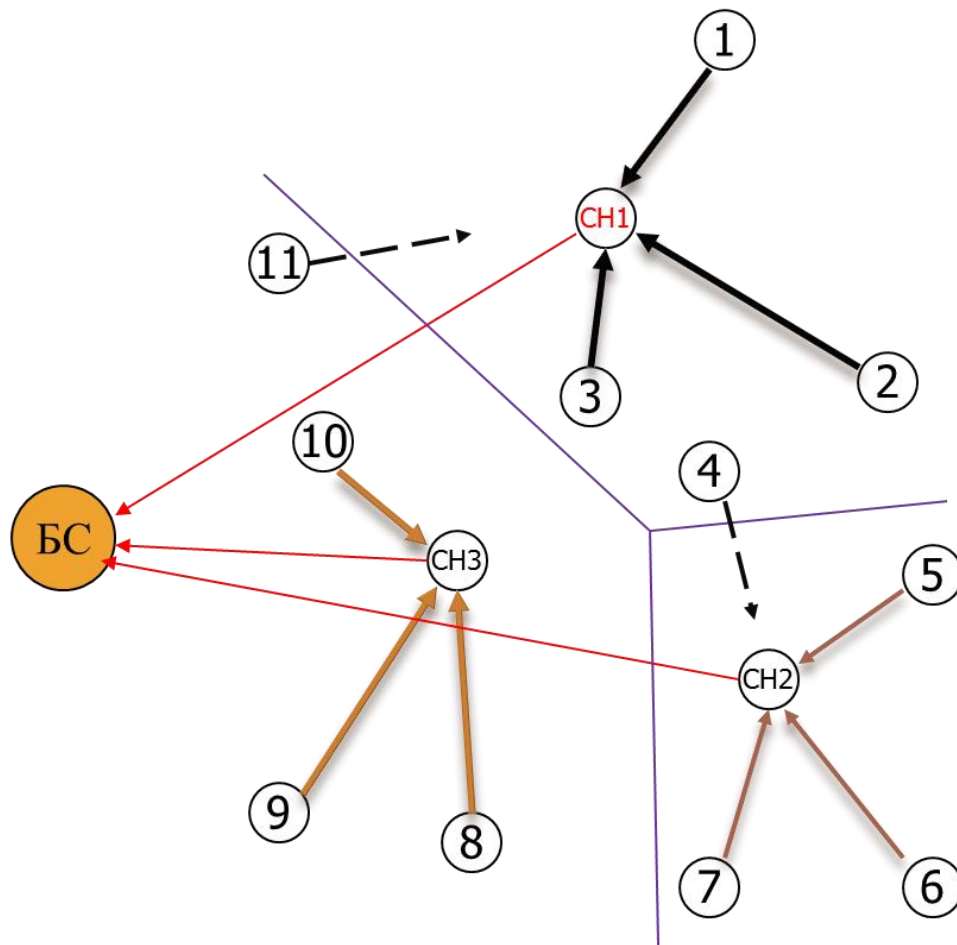
Адаптивный алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами (МАСА)

- В этом алгоритме кластеризации мобильный сенсорный узел выбирает себя головным узлом кластера на основе простого точечного предиктора *SPP (Single Point Predictor)* для комбинированного критерия прогнозирования (алгоритм *DCA*). Другие узлы представляют собой члены кластера, определяемые на основе некоторого значения, указывающего на их пригодность для подключения к конкретному головному узлу (алгоритм *MBC*). Сочетание двух известных алгоритмов обеспечивает существенное увеличение длительности жизненного цикла сети и ее стабильности.

Использование предикторов

- Исследованы три эвристических предиктора: простой точечный предиктор *SPP* (*Single Point Predictor*), линейный экстраполяционный предиктор *LEP* (*Linear Extrapolation Predictor*) и гибридный предиктор *HP* (*Hybrid Predictor*). Исследование показало, что простой предиктор *SPP* обеспечивает наибольший по длительности жизненный цикл сенсорной сети.

Архитектура сети при использовании алгоритма МАСА



Стабильность кластера (1)

- Поскольку рассматриваемая сенсорная сеть состоит из мобильных узлов, то в фазе стационарного состояния сети важным процессом является возможный переход БСУ из старого кластера в новый.
- При этом, когда головной узел кластера не принимает данные от члена кластера, он удаляет его из расписания передачи. В то же время, если БСУ (член кластера) не получает запрос на получение данных от своего головного узла, этот узел будет пытаться передать сообщение на другой головной узел кластера. Для этого в каждом головном узле кластера предусмотрено определенное число свободных интервалов времени для передачи информации.

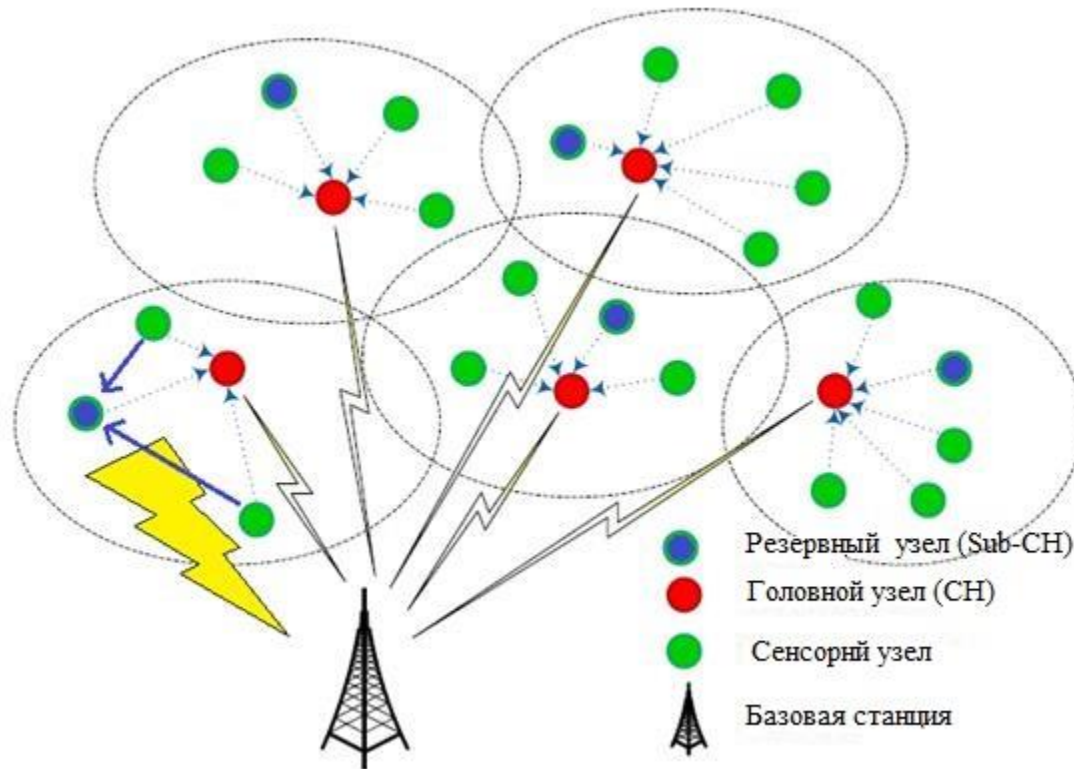
Стабильность кластера (2)

- Кроме того, головной узел кластера и БСУ имеют информацию о примерном времени передачи информации, и можно заранее проверить будет ли БСУ оставаться в кластере, когда в его временном интервале придет запрос на передачу информации. Если есть уверенность в том, что БСУ не останется в кластере, узел должен передать запрос на присоединение к новому кластеру и стараться избежать больших потерь пакетов, прежде чем он потеряет связь с текущим головным узлом.

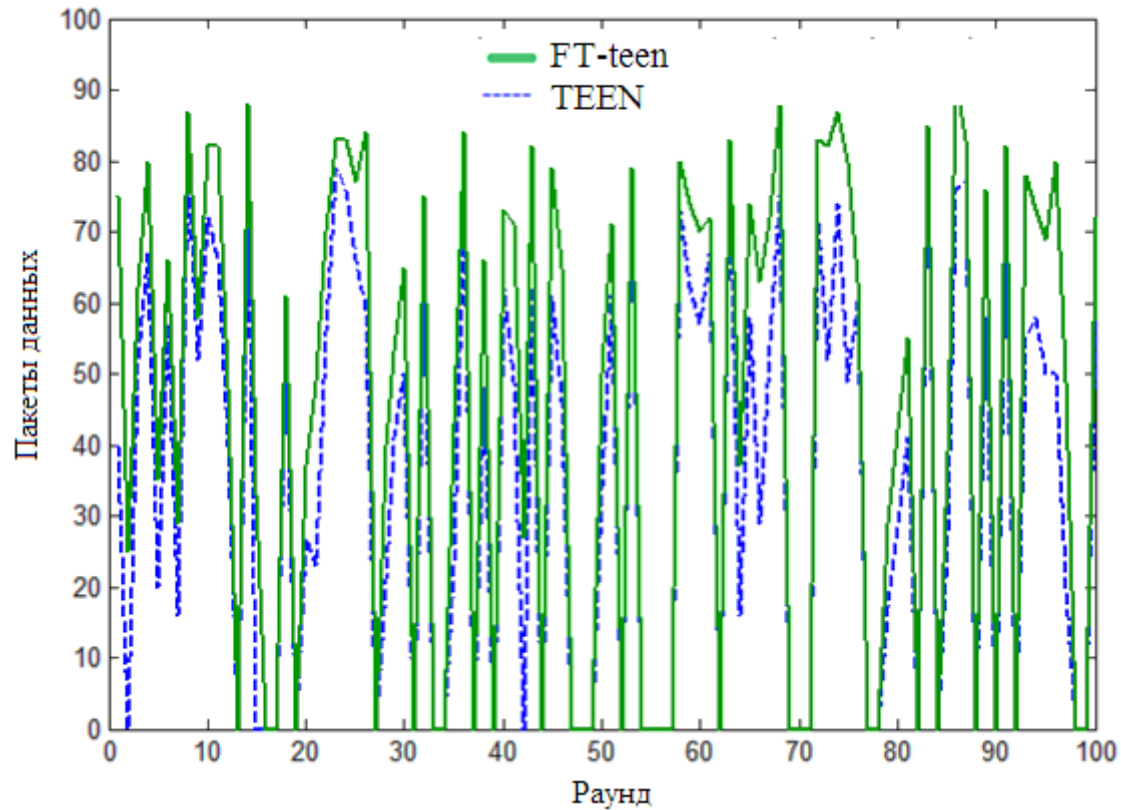
Отказоустойчивый алгоритм кластеризации для БСС *FT-TEEN*

- Фаза формирования кластера
- Фаза передачи данных
- Обнаружение ошибки
- Процесс восстановления ошибки

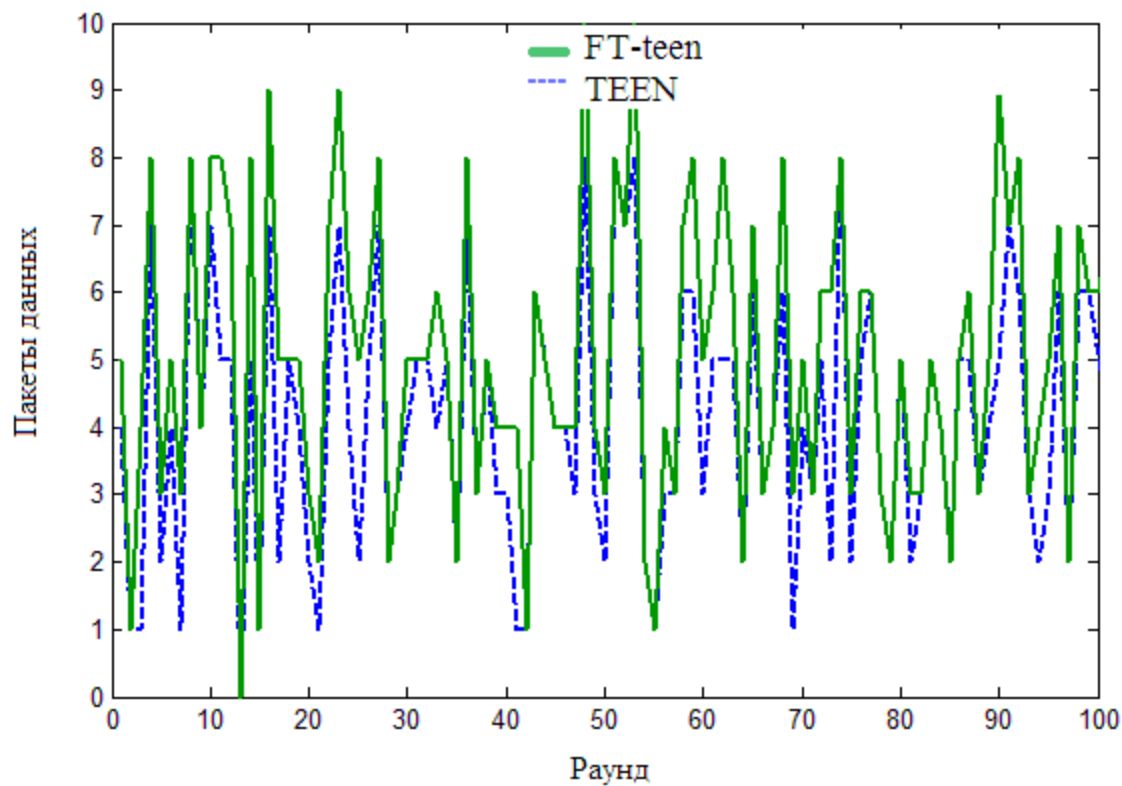
Архитектура сети при использовании алгоритма FC-TEEN



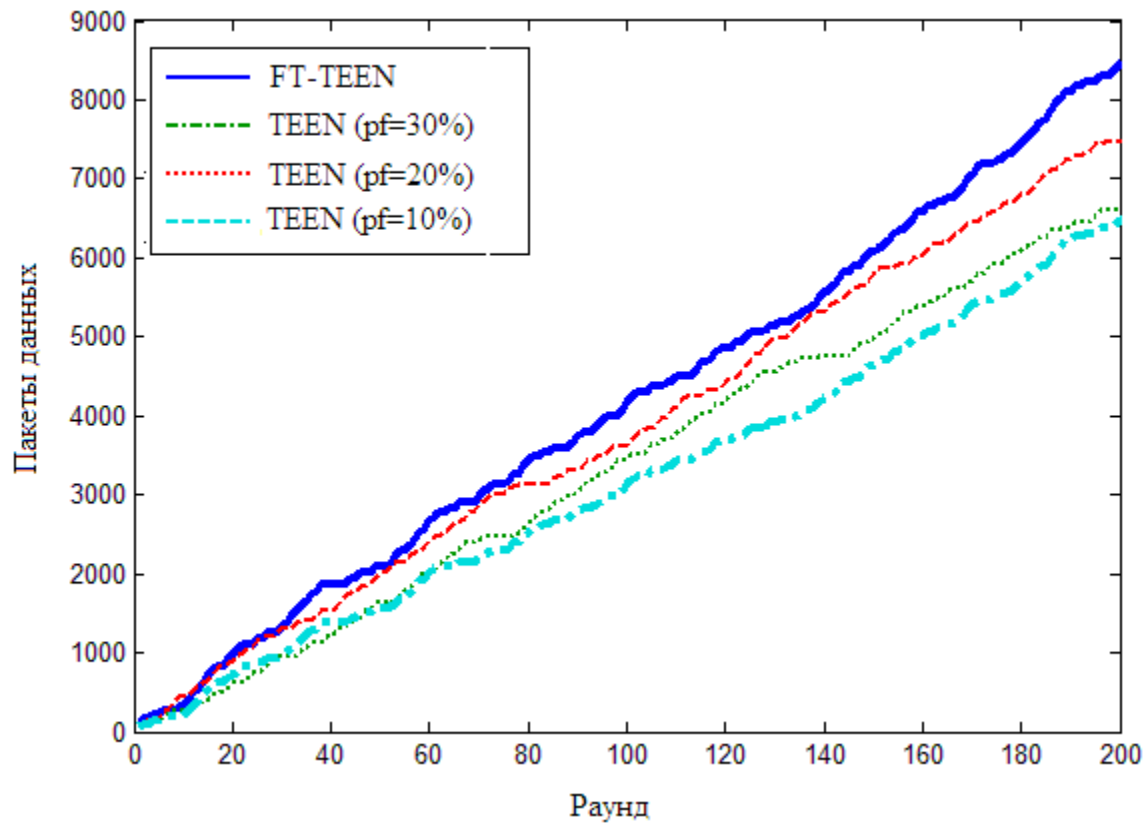
Число успешно переданных пакетов от членов кластера на *CH* (Вероятность ошибки 10%)



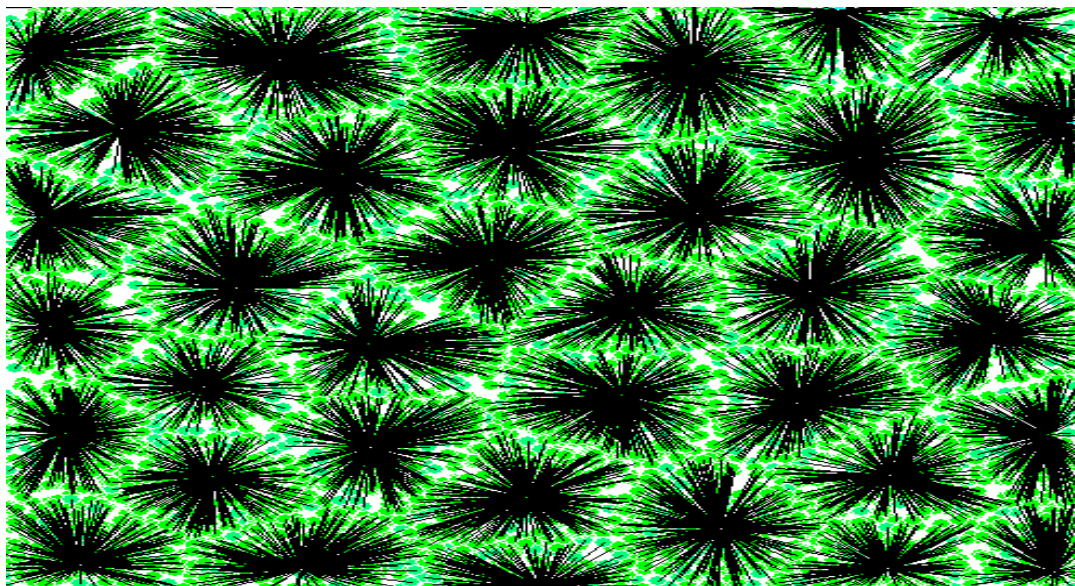
Число успешно переданных пакетов от *СН* на базовую станцию каждый раунд (Вероятность ошибки 10%)



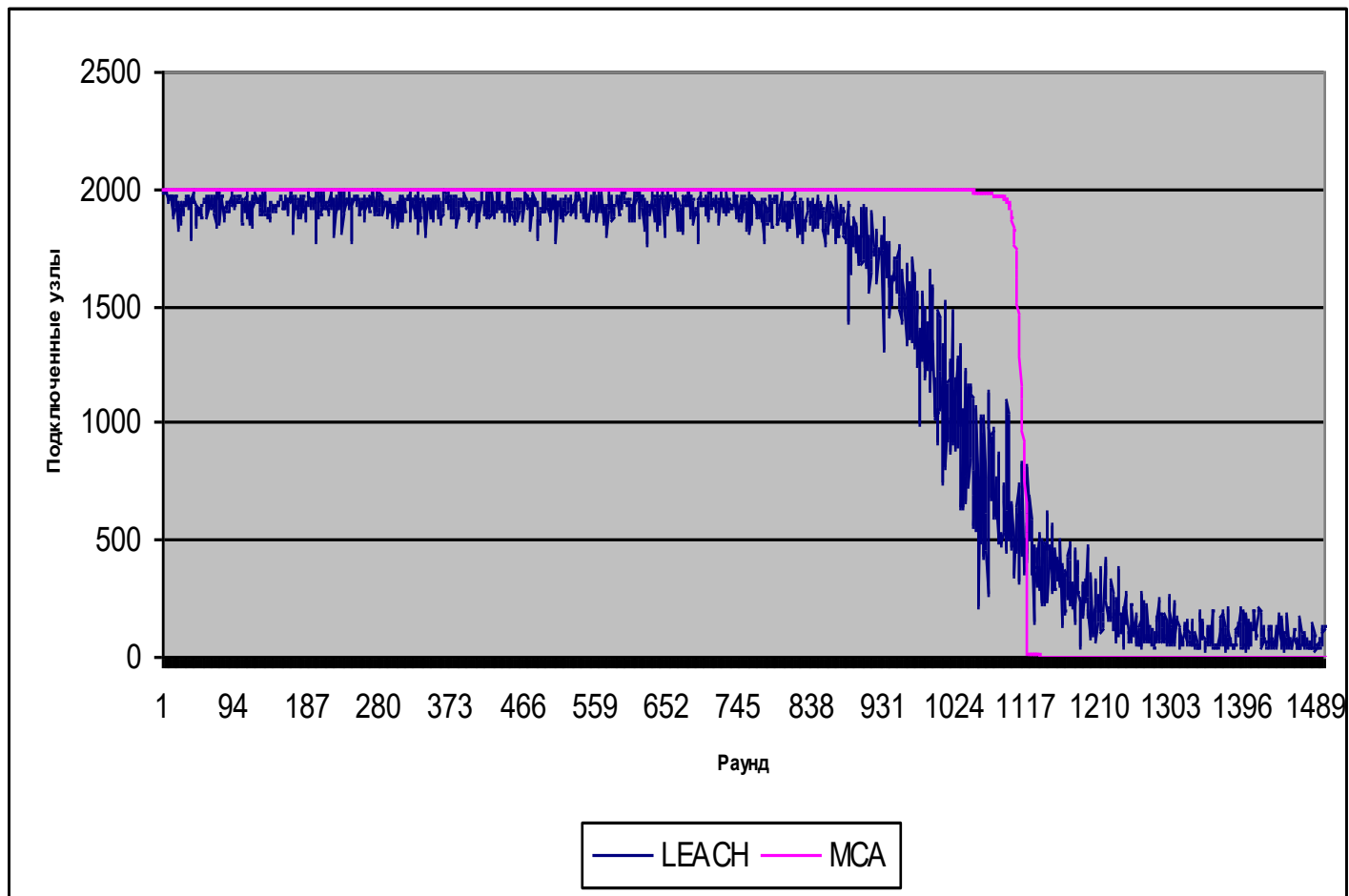
Число успешно переданных пакетов от членов кластера на *CH*



Алгоритмы выбора головного узла для трехмерного пространства



Сравнение алгоритмов (1)



Сравнение алгоритмов (2)

