

# ПЕРСОНАЛЬНЫЕ СЕТИ С НИЗКОЙ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ (ZigBee сети)

Разработка протокольной структуры передачи сообщений в сенсорных сетях производилась начиная с 2000 г. творческими коллективами двух организаций:

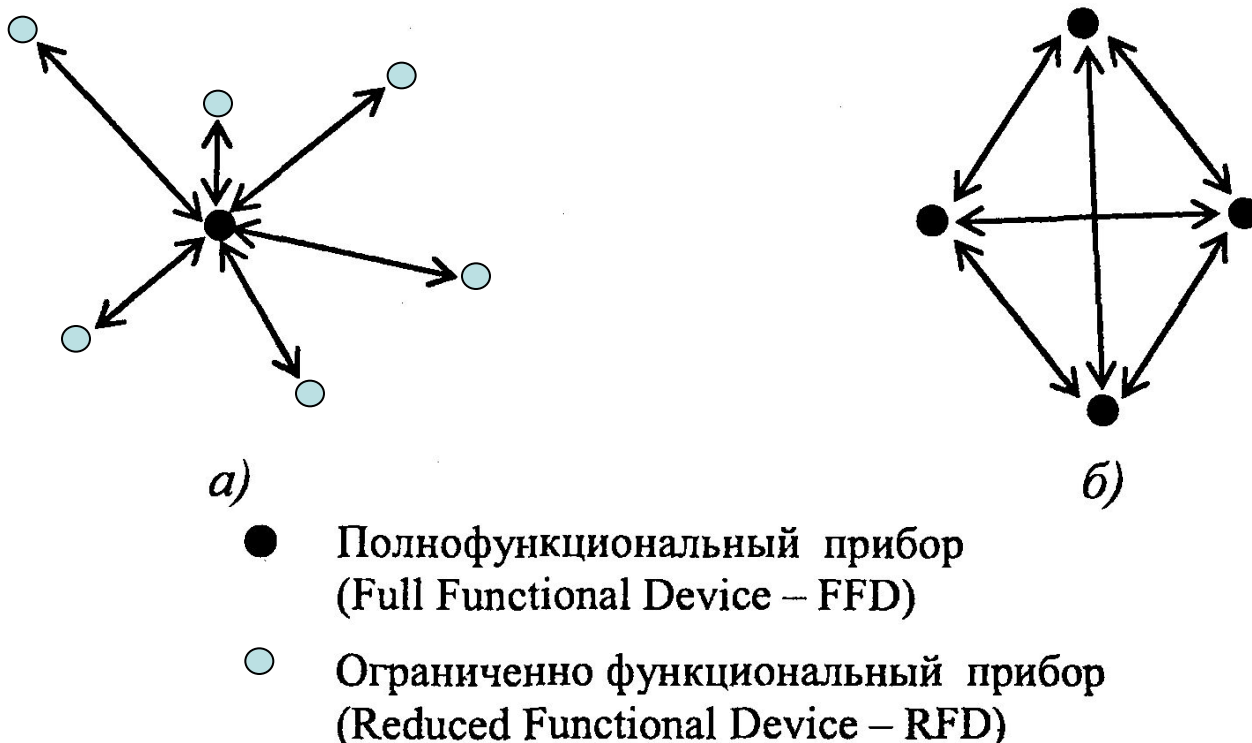
- целевой группой TG 15.4 комитета IEEE 802 по стандартизации LAN/MAN; эта группа выполняла разработку стандарта, регламентирующего протоколы РНУ и MAC уровней LR-PAN; первая версия соответствующего стандарта (IEEE 802.15.4–2003) была утверждена в октябре 2003 г.; вторая версия (IEEE 802.15.4–2006) – в сентябре 2006 г.
- группой разработки спецификации ZigBee альянса, предмет деятельности которой составляли вопросы стандартизации протоколов высших уровней LR-PAN; первая версия стандарта (ZigBee Specification 1.0) была утверждена в декабре 2006 г., а две последующие версии (ZigBee Specification 2006, ZigBee Specification 2007) – в декабре 2006 и ноябре 2007 гг.



**Рис. 1 — Структура протоколов стандарта IEEE 802.15.4 и ZigBee спецификаций**

# Топология ZigBee сети

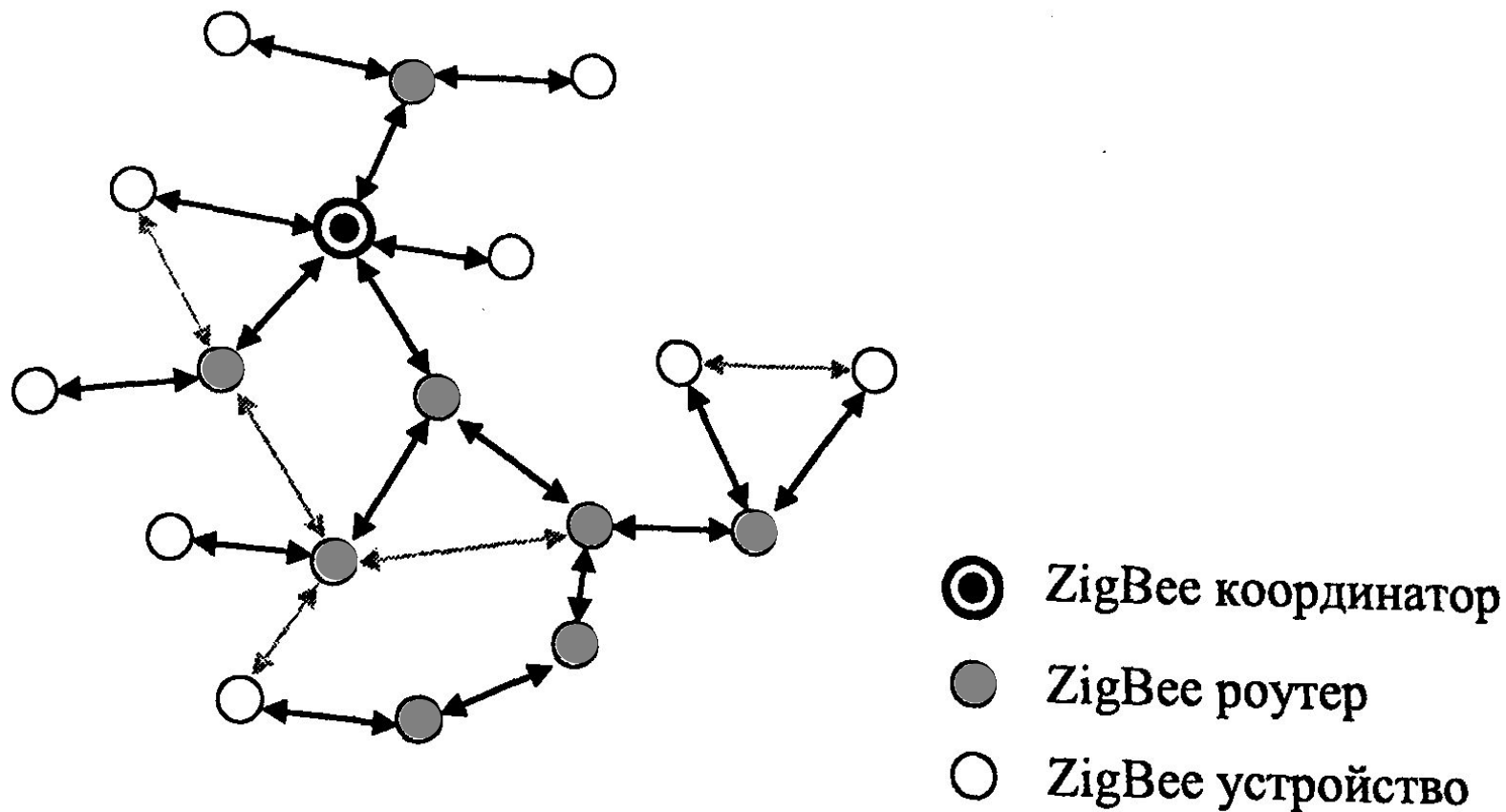
ZigBee сети являются самоорганизующимися (Ad-Hoc) сетями. Стандартом [62] предусмотрены две топологии ZigBee сетей, приборы которых расположены в пределах перекрывающихся сфер персонального радиовидения:



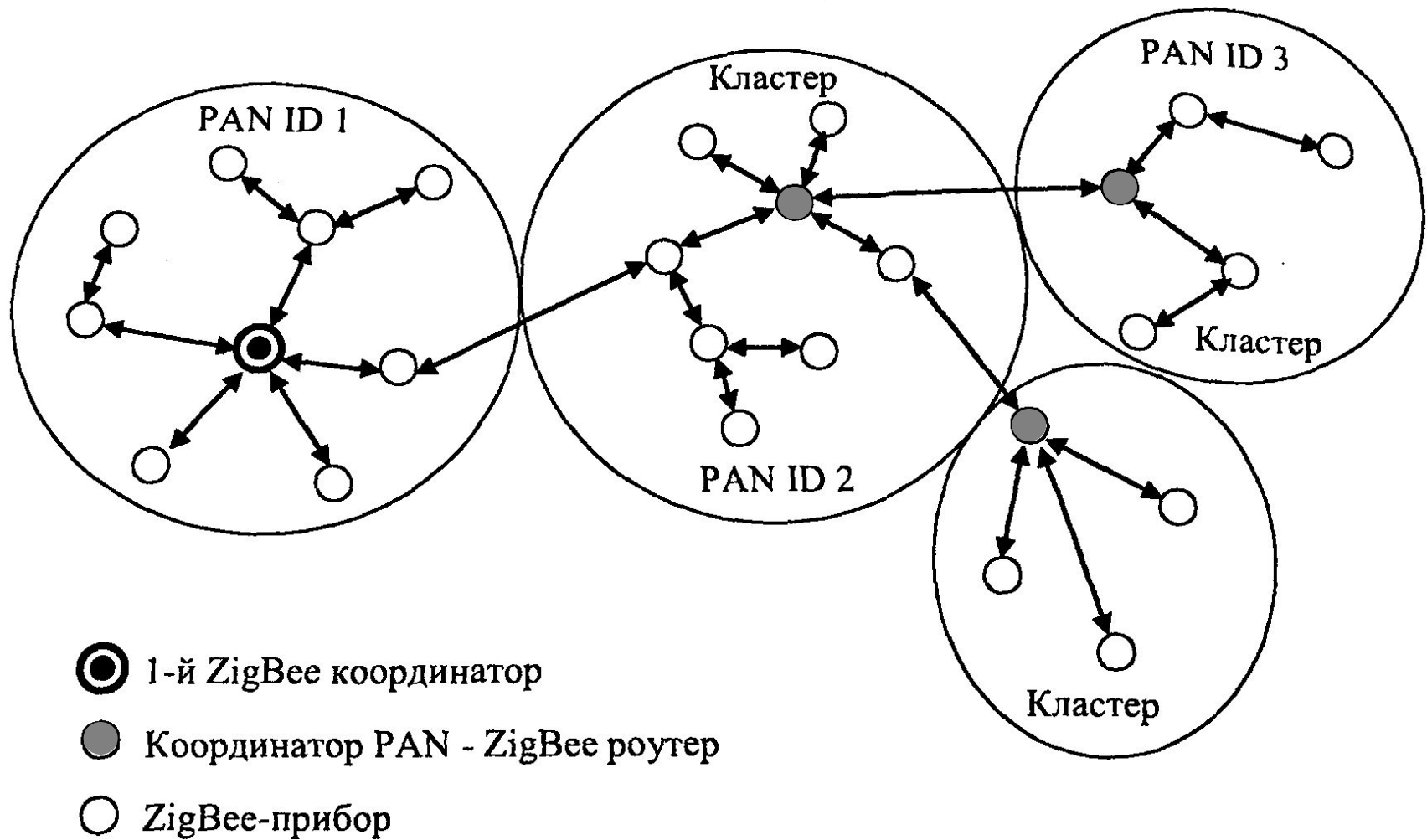
**Рис. 2 — Топологии ZigBee сетей с перекрывающимися сферами персонального радиовидения приборов:**

**а) топология типа звезда;**

**б) полностью связанная топология**



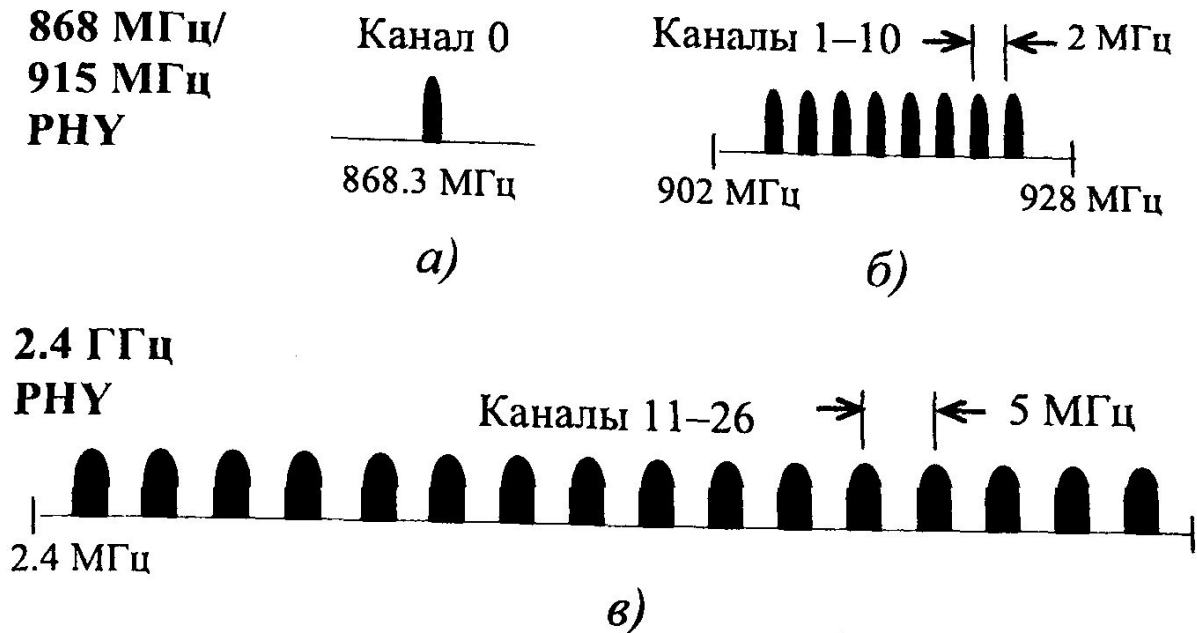
**Рис. 3 — Топологии ZigBee сети типа дерево**



**Рис. 4 — Топологии ZigBee сети типа кластерное дерево**

## Сведения о частотном ресурсе и каналах ZigBee сетей

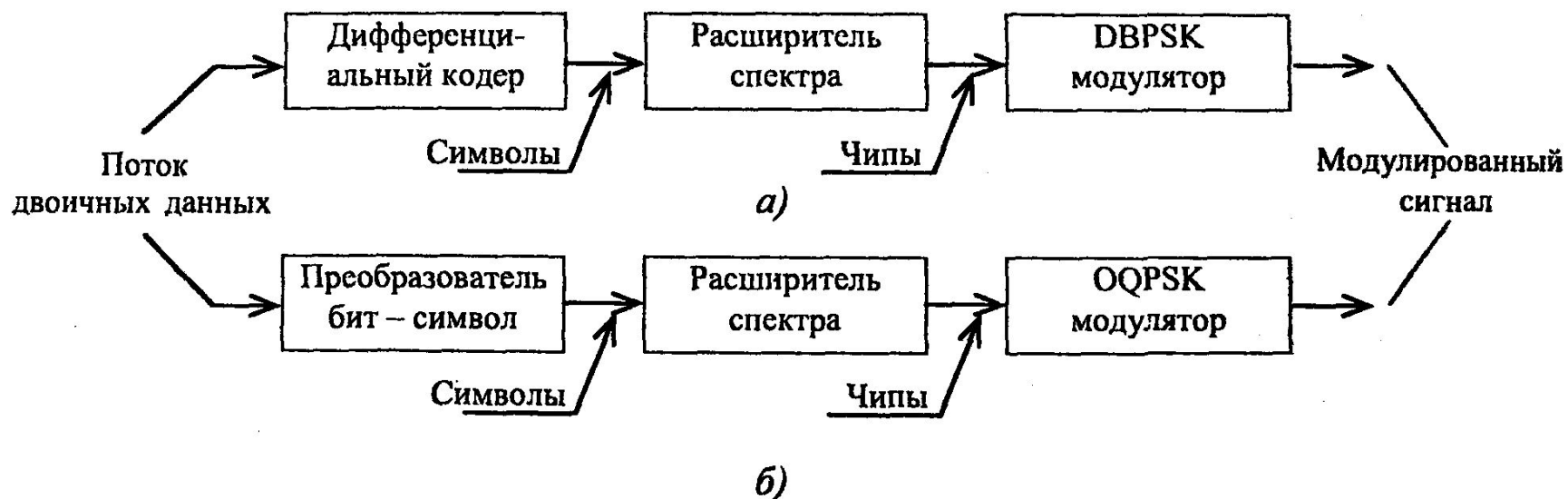
| Частотный диапазон, МГц | Число частотных каналов | Номера каналов     | Шаг сетки частот, МГц | Соотношения, определяющие средние частоты каналов, МГц |
|-------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|--|
| 868–868.6               | 1                       | $k=0$              | –                     | $f_k = 868.3$  |
| 902–928                 | 10                      | $k=1,2,\dots,10$   | 2                     | $f_k = 906 + 2(k-1)$                                   |
| 2400–2483.5             | 16                      | $k=11,12,\dots,26$ | 5                     | $f_k = 2405 + 5(k-11)$                                 |



**Рис. 5 — Частотные каналы ZigBee сетей:**  
 а) 0-й канал; б) каналы 1-10; в) каналы 11-26

## Характеристики радиоканалов 0-й канальной страницы ZigBee сетей

| Номера каналов | Битовая скорость, кбит/с | Передаваемые символы |                              | Расширение спектра |                          | Метод модуляции |
|----------------|--------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|--------------------------|-----------------|
|                |                          | Тип                  | Символьная скорость, ксимв/с | Способ             | Чиповая скорость, кчип/с |                 |
| 0              | 20                       | Двоичные             | 20                           | DSSS               | 300                      | DBPSK           |
| 1-10           | 40                       | Двоичные             | 40                           | DSSS               | 600                      | DBPSK           |
| 11-26          | 250                      | 16-ричные            | 62,5                         | DSSS               | 2000                     | OQPSK           |



**Рис. 6 — Структурные схемы формирования сигналов каналов 0-10 (а) и 11-26 (б)**

# Множественный доступ абонентов к временному ресурсу ZigBee каналов

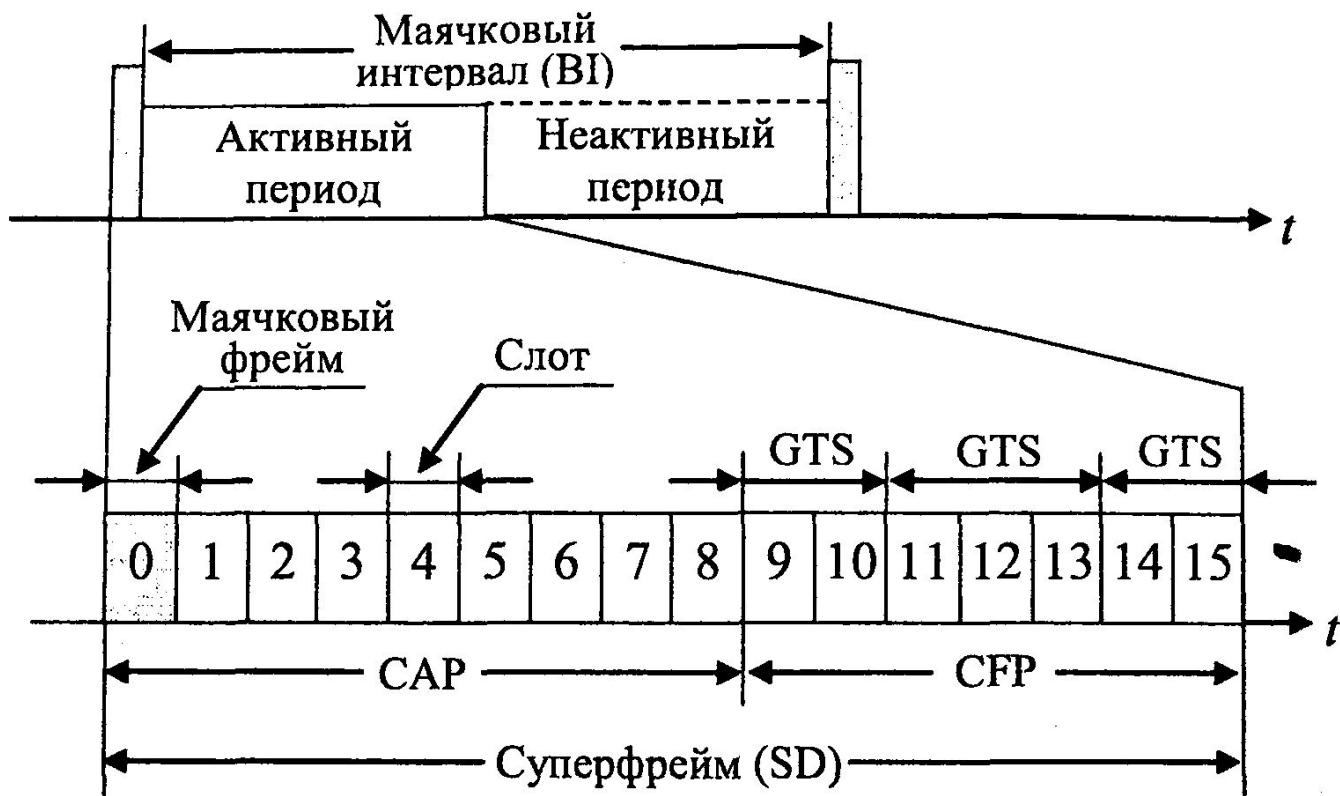
При условии низкого энергопотребления передача сообщений возможна только двумя способами:

- посредством строго синхронизированной работы трансиверов различных приборов сети при их *прямой связи* (Direct Transmission);
- посредством применения промежуточного передаточного элемента, благодаря которому обеспечивается разделение во времени интервалов передачи сообщения источником и приема сообщения получателем, т.е. посредством *«непрямой» связи* (indirect transmission).

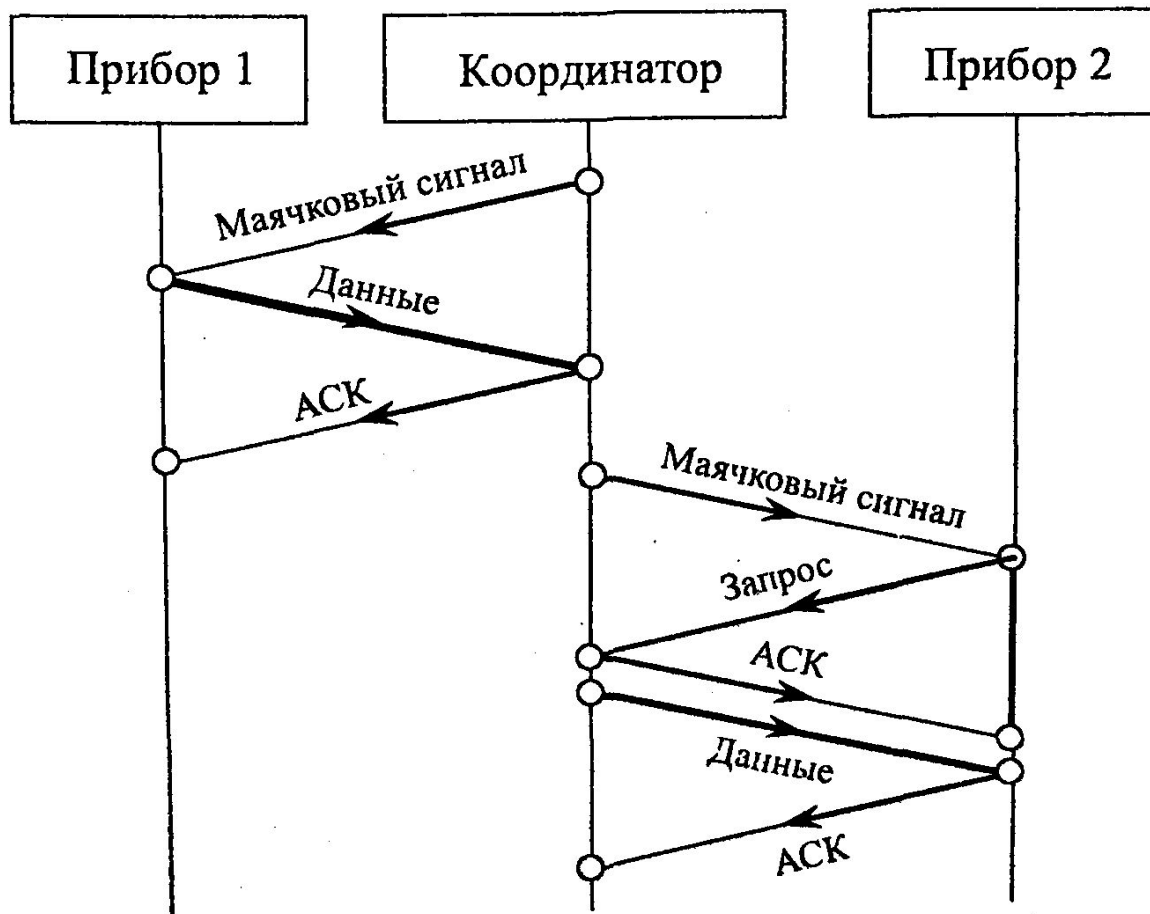
Согласно технологии обеспечения множественного доступа приборов сети к ее частотному каналу различают два возможных режима работы сети:

- *маячковый режим* (Beacon-enabled mode), состоящий в том, что координатор синхронизирует работу ассоциированных с ним приборов и упорядочивает использование временного ресурса занимаемого частотного канала посредством регулярной широковещательной передачи *маячковых сообщений/фреймов* (Network Beacon);
- *безмаячковый режим* (Non Beacon-enabled mode), состоящий в том, что координатор после образования сети прекращает передачу маячковых сообщений и взаимодействует с приборами сети только при поступлении от них соответствующих уведомлений (в частности, служебных фреймов запроса).

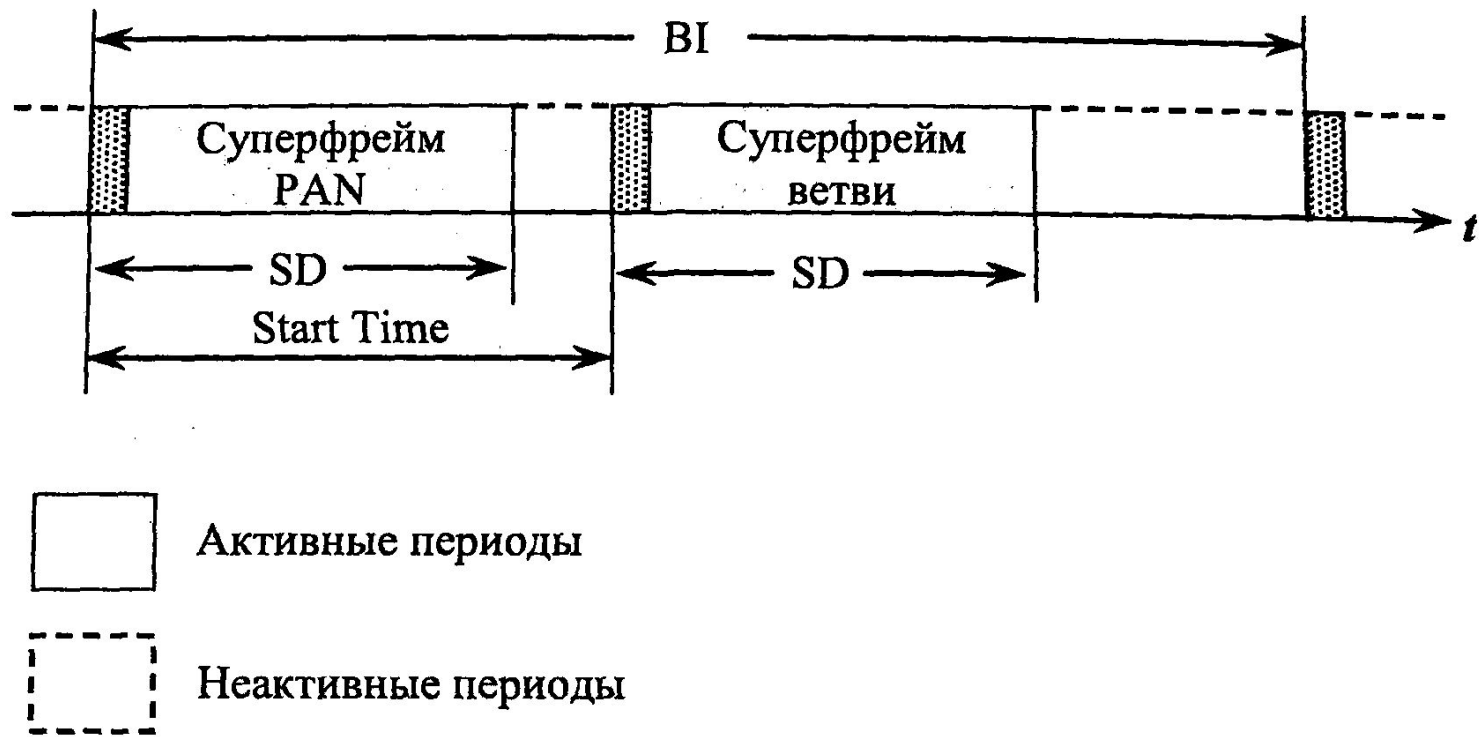




**Рис. 7 — Структура маячкового интервала и суперфрейма**



**Рис. 8 — «Непрямая» передача данных в маячковом режиме**



**Рис. 9 — Чередование суперфреймов сети PAN и ветви**

Нормативные значения длительности суперфрейма (SD) и маячкового интервала (BI) изменяются ступенчато и показательно относительно базовой длительности суперфрейма (BSD); основание показательной функции равно 2, а значения показательной степени носят наименования «*порядок суперфрейма*» (SO) и «*порядок маячкового интервала*» (BO); значения SD и BI определяются соотношениями:

$$SD = BSD \cdot 2^{SO}, \quad 0 \leq SO \leq 14;$$

$$BI = BSD \cdot 2^{BO}, \quad 0 \leq BO \leq 14.$$

## Характеристики суперфреймов ZigBee сетей

| Наименование характеристик  | Безразмерные значения |                 | Размерные значения, с              |
|---|-----------------------|-----------------|------------------------------------|
|   | Единицы               | Величины        |                                    |
| Базовая длительность слота (Base Slot Duration)                     | symbol                | 60              | $0.96 \cdot 10^{-3}$               |
| Число слотов в суперфрейме (Number Superframe Slots)                | –                     | 16              | –                                  |
| Базовая длительность суперфрейма (Base Superframe Duration – BSD)   | symbol                | 960             | $15.36 \cdot 10^{-3}$              |
| Минимальная длительность составляющего периода (Minimum CAP Length) | symbol                | 440             | $7.04 \cdot 10^{-3}$               |
| Порядок суперфрейма (Superframe Order – SO)                         | –                     | 0...14(15)      | –                                  |
| Длительность суперфрейма (Superframe Duration)                      | symbol                | 960 (1...16384) | $15.36 \cdot 10^{-3} \dots 251.66$ |
| Порядок маячкового интервала (Beacon Order – BO)                    | –                     | 0...14(15)      | –                                  |
| Длительность маячкового интервала (Beacon Interval Duration – BI)   | symbol                | 960 (1...16384) | $15.36 \cdot 10^{-3} \dots 251.66$ |

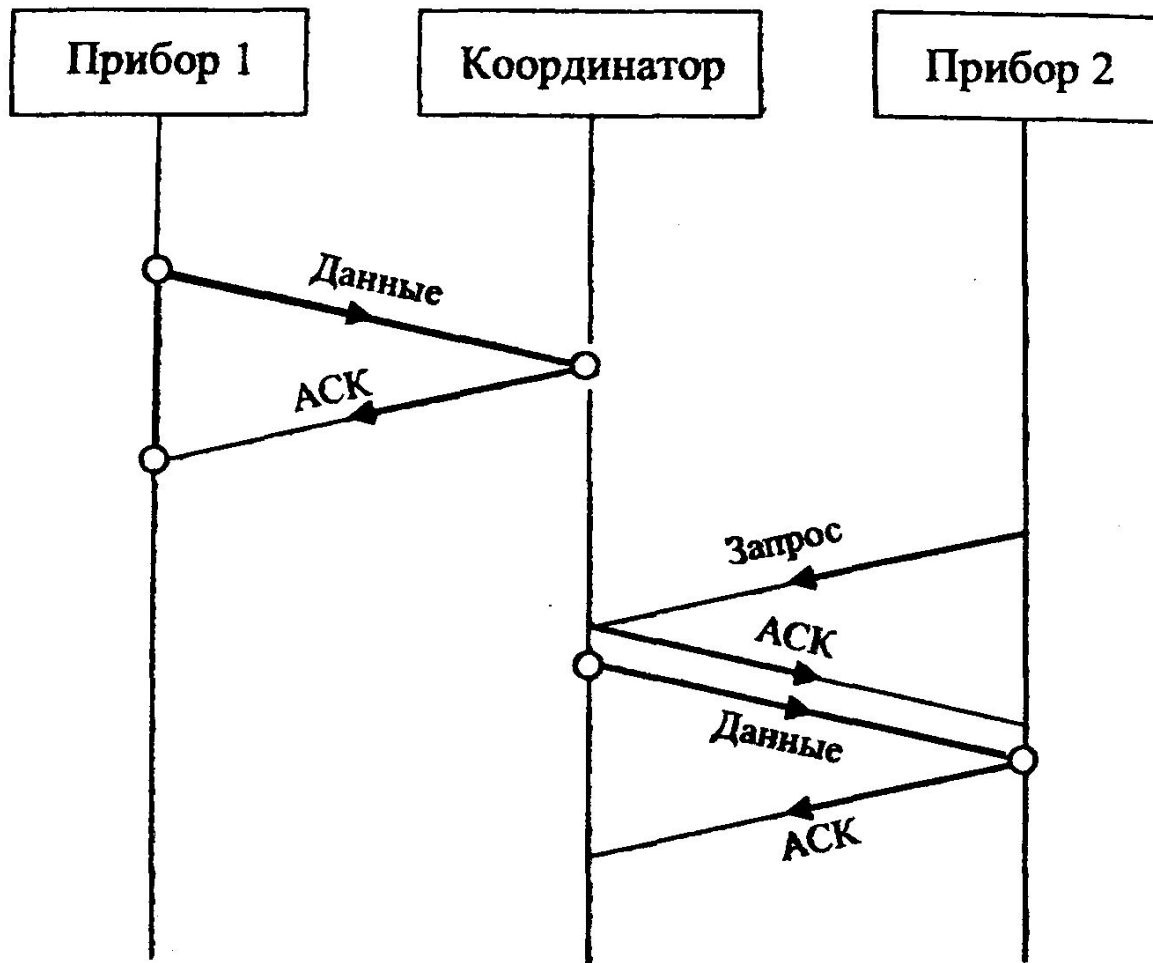


Рис. 10 — «Непрямая» передача данных в безмаячковом режиме

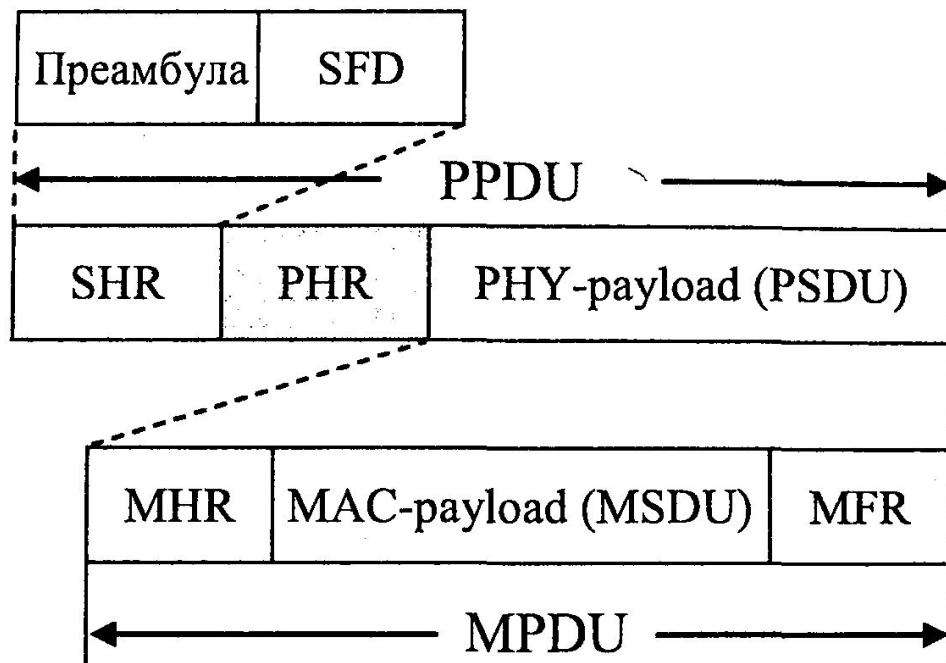
# Транспорт сообщений в ZigBee сетях

## Обозначения протокольных блоков данных и точек доступа MAC и PHY уровней

| Протокольные уровни | Протокольные блоки данных |          | Протокольные точки доступа |                     |
|---------------------|---------------------------|----------|----------------------------|---------------------|
|                     | входные                   | выходные | протоколов данных          | сервисных сообщений |
| MAC                 | MSDU                      | MPDU     | MCPS-SAP                   | MLME-SAP            |
| PHY                 | PSDU                      | PPDU     | PD-SAP                     | PLME-SAP            |

*Примечания:*

- MSDU, PSDU – MAC и PHY сервисные блоки данных;
- MPDU, PPDU – MAC и PHY протокольные блоки данных;
- MCPS-SAP, PD-SAP – MAC и PHY сервисные точки доступа блоков данных;
- MLME-SAP, PLME-SAP – MAC и PHY сервисные точки доступа управляющих (сервисных) сообщений.



**Рис. 11 — Структура фреймов физического уровня (PPDU) и MAC подуровня (MPDU) ZigBee сетей**

Заголовок фрейма физического уровня (PHR) содержит сведения о размерах его полезной нагрузки, т.е. о длине MPDU. Максимально допустимая длина последней, выраженная в безразмерных единицах, составляет 127 октетов.

Заголовок синхронизации (SHR) включает два поля:

- *поле преамбулы* (Preamble), назначение которой состоит в обеспечении чиповой и символьной синхронизации приемника с частотами следования соответствующих элементов принимаемого сигнала;
- *поле разделения* (Start-of-Frame Delimiter – SFD), служащее для отделения конца преамбулы от начала заголовка фрейма (PHR).

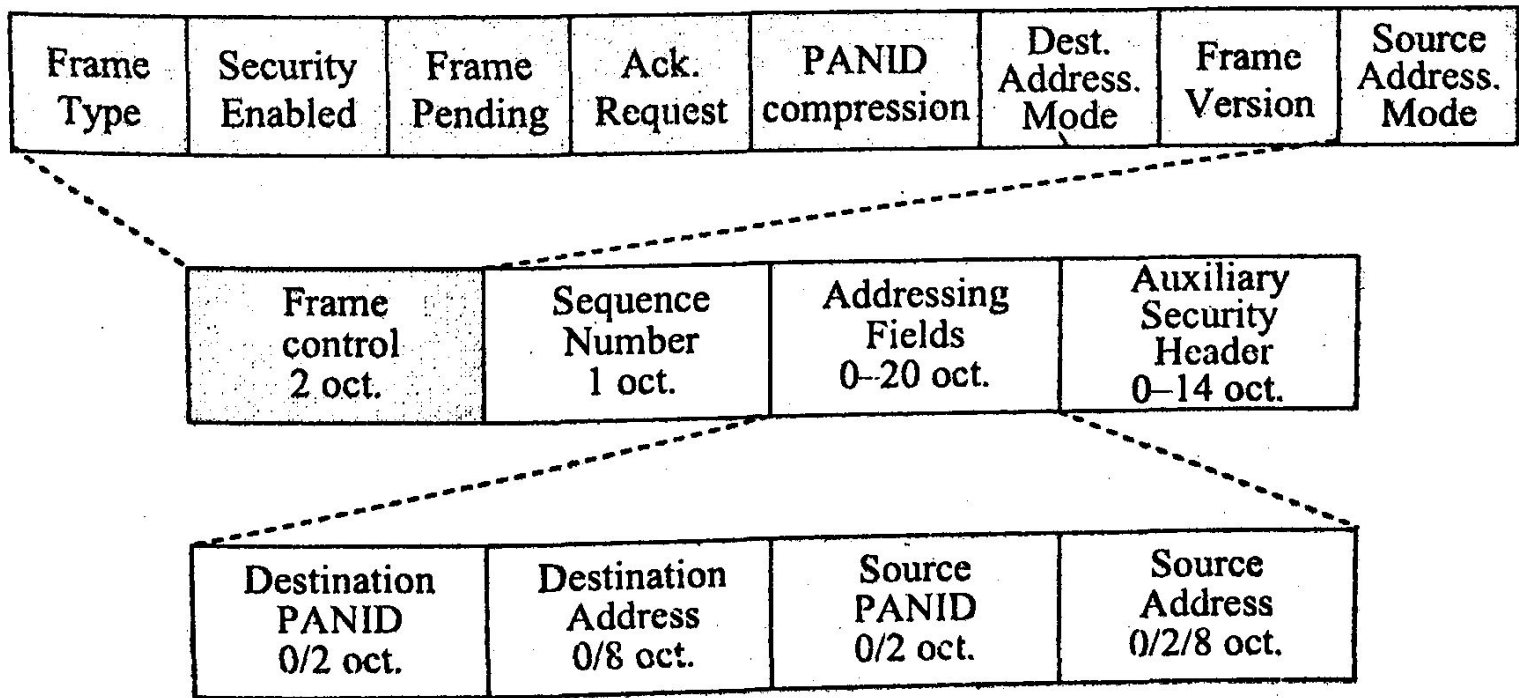
## Характеристики фреймов физического уровня каналов «нулевой» канальной страницы

| Элементы фреймов | Длина элементов, октет | Длительность элементов в различных каналах, мс |             |               |
|------------------|------------------------|--|-------------|---------------|
|                  |                        | 0  | 1...10      | 11...26       |
| SHR              | 5                      | 2  | 1           | 0.160         |
| PHR              | 1                      | 0.4  | 0.2         | 0.022         |
| PSDU             | 9...127                | 3.6...50.8                                     | 11.8...25.4 | 0.288...4.064 |
| PPDU (в целом)   | 15...133               | 6...53.2                                       | 3...26.6    | 0.48...4.256  |

*Заголовки MAC фреймов при их полноформатной реализации содержат следующие поля служебной информации, необходимой для передачи фрейма в сети*

- *поле спецификации (характеристик) фрейма (Frame Control Field);*
- *поле нумерации фрейма (Frame Number Field);*
- *поля адресации фрейма (Addressing Fields);*
- *поле заголовка конфиденциальности фрейма (Auxiliary Security Header Field).*

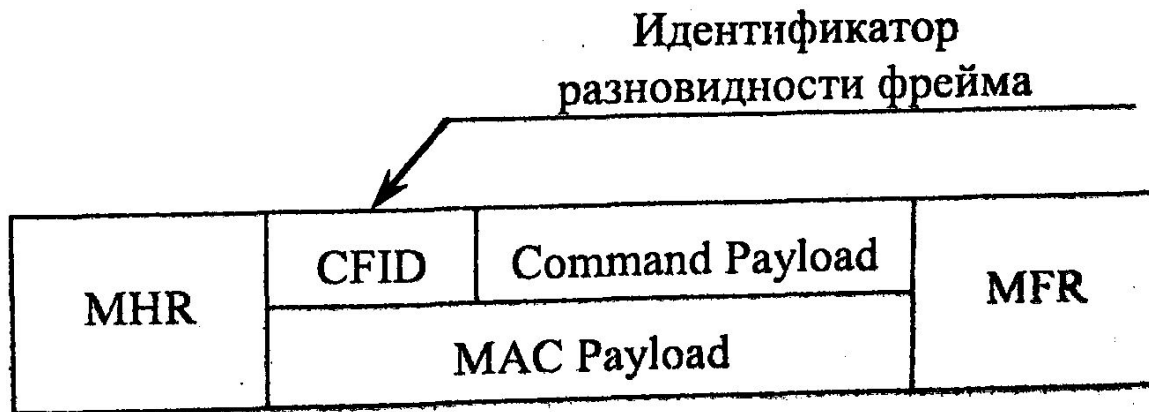




**Рис. 12 — Структура заголовка MAC фреймов ZigBee сетей**

## Перечень команд управления ZigBee сетей и их функциональное назначение

| Сетевая функция   | Разновидность команд управления                               | RFD |    | ACK        |
|---|---|-----|----|------------|
|   |   | Tx  | Rx |            |
| Самоорганизация сети  | Запрос маячкового фрейма (Beacon Request)                     |     |    |            |
|   | Запрос ассоциации (Association Request)                       | ×   |    | ×          |
|   | Ответ ассоциации (Association Response)                       |     | ×  | ×          |
|   | Уведомление о деассоциации (Deassociation Notification)       | ×   | ×  | ×          |
| Поддержание работоспособности   | Запрос гарантированных слотов (GTS Request)                   |     |    | ×          |
|   | Уведомление «осиротевшего» прибора (Orphan Notice)            | ×   |    |            |
|   | Перенастройка координатора (Coordinator Realignment)          |     | ×  | Примечание |
|   | Уведомление о PAN ID конфликте (PAN ID Conflict Notification) | ×   |    | ×          |
| Поддержка передачи данных   | Запрос данных (Data Request)                                  | ×   |    | ×          |
| <i>Примечание.</i> Подтверждение приема команды производится при ее адресной передаче «осиротевшему» прибору и не производится при ее широковещательной передаче. |   |     |    |            |



**Рис. 13 — Структура MAC фреймов команд управления**

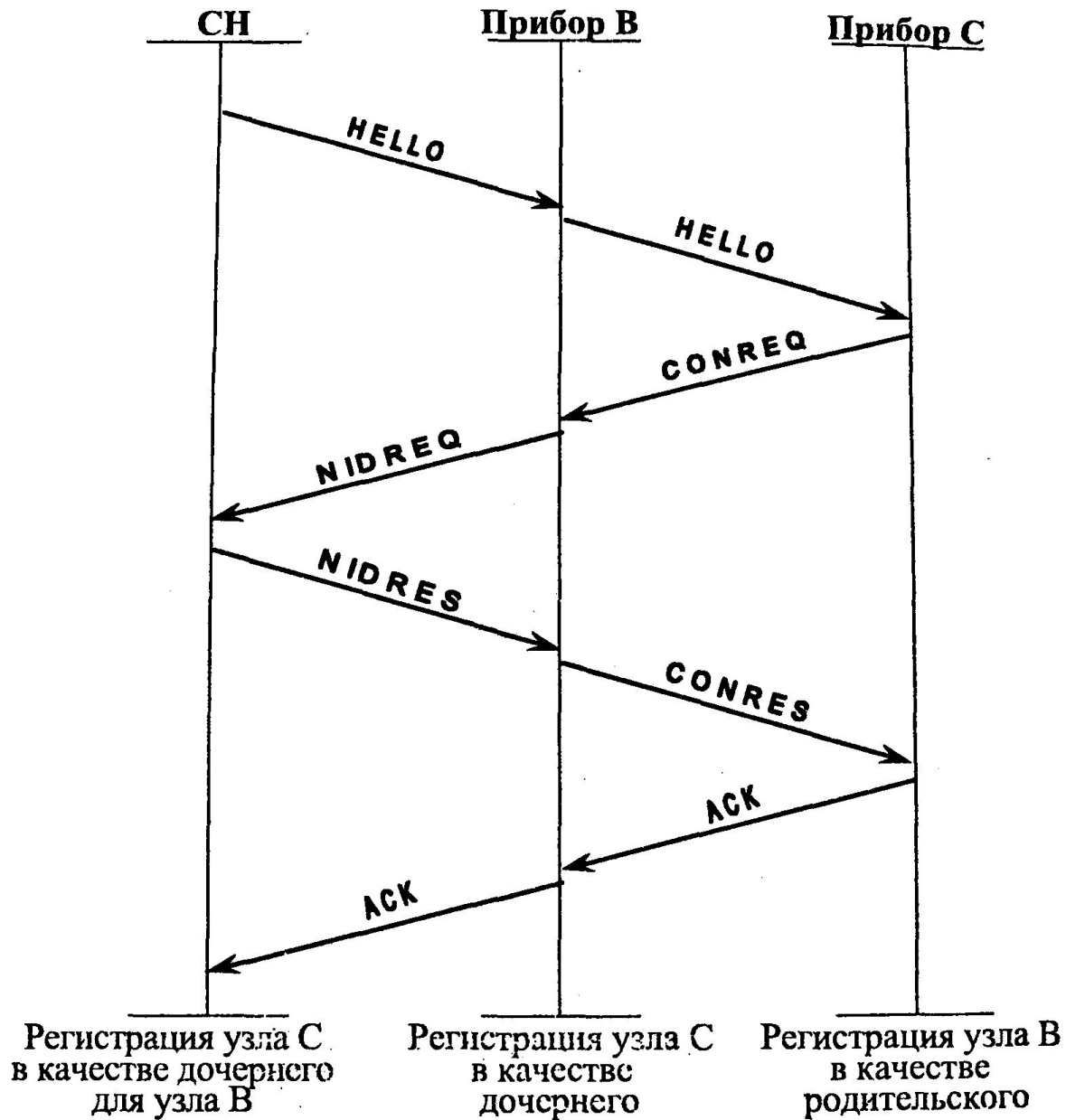
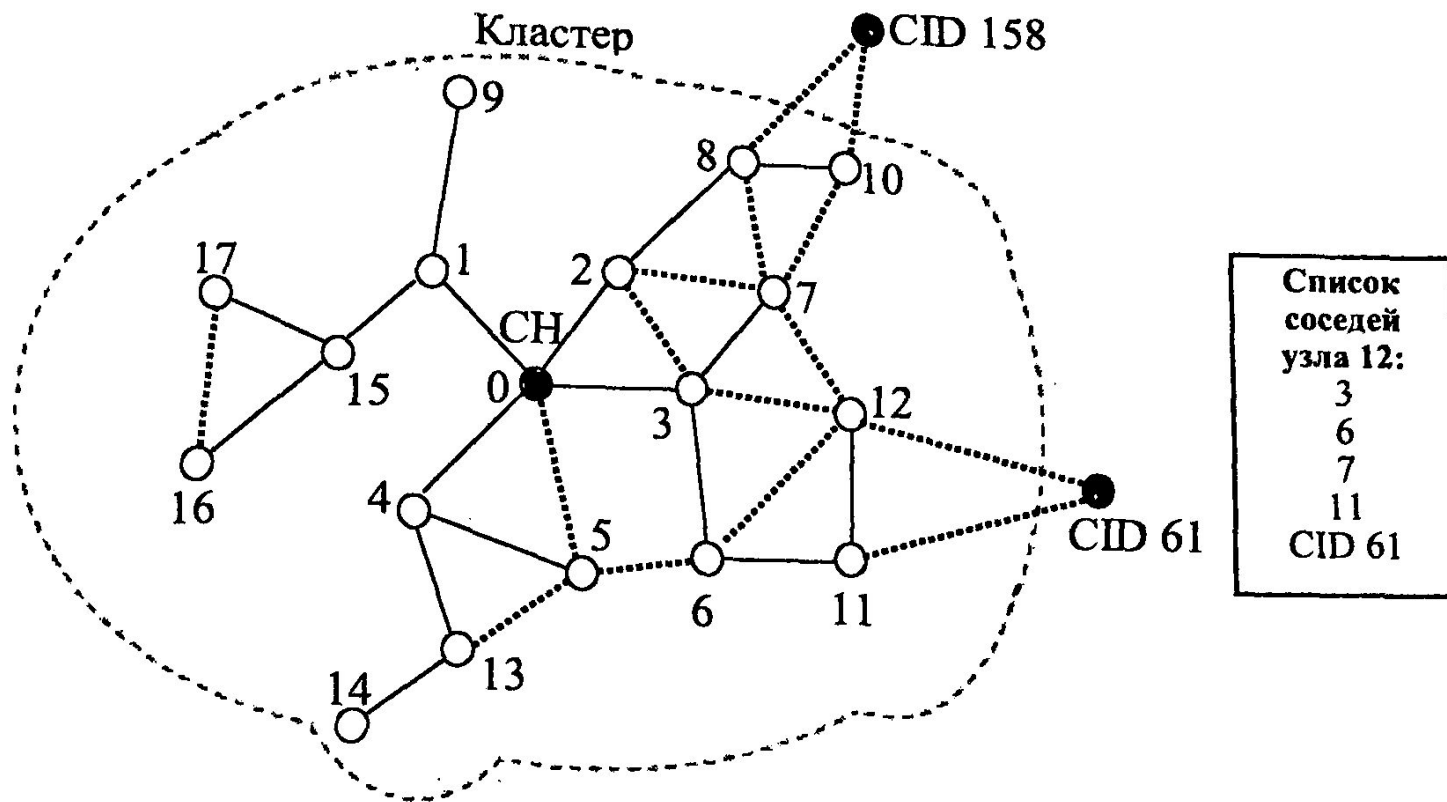


Рис. 14 — Обмен фреймами между вершиной сети и приборами



**Рис. 15 — Иллюстрация учета взаимосвязей между соседними узлами**