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:

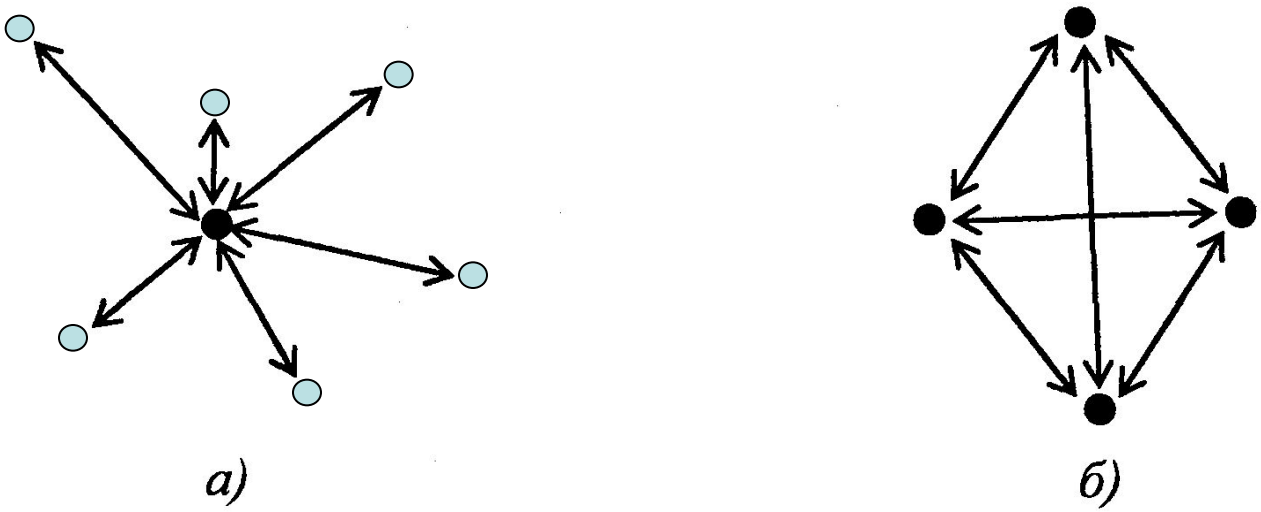
– целевой группой TG 15.4 комитета IEEE 802 по стандартизации LAN/MAN; эта группа выполняла разработку стандарта, регламентирующего протоколы PHY и MAC уровней LR-PAN; первая версия соответствующего стандарта (IEEE 802.15.4–2003) была утверждена в октябре 2003 г.; вторая версия (IEEE 802.15.4–2006) – 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 радиовлияния:



● Полнофункциональный прибор (Full Functional Device – FFD)

○ Ограниченно функциональный прибор (Reduced Functional Device – RFD)

Рис. 2 — Топологии ZigBee сетей с перекрывающимися сферами персонального радиовидения приборов:
а) топология типа звезда;
б) полносвязная топология

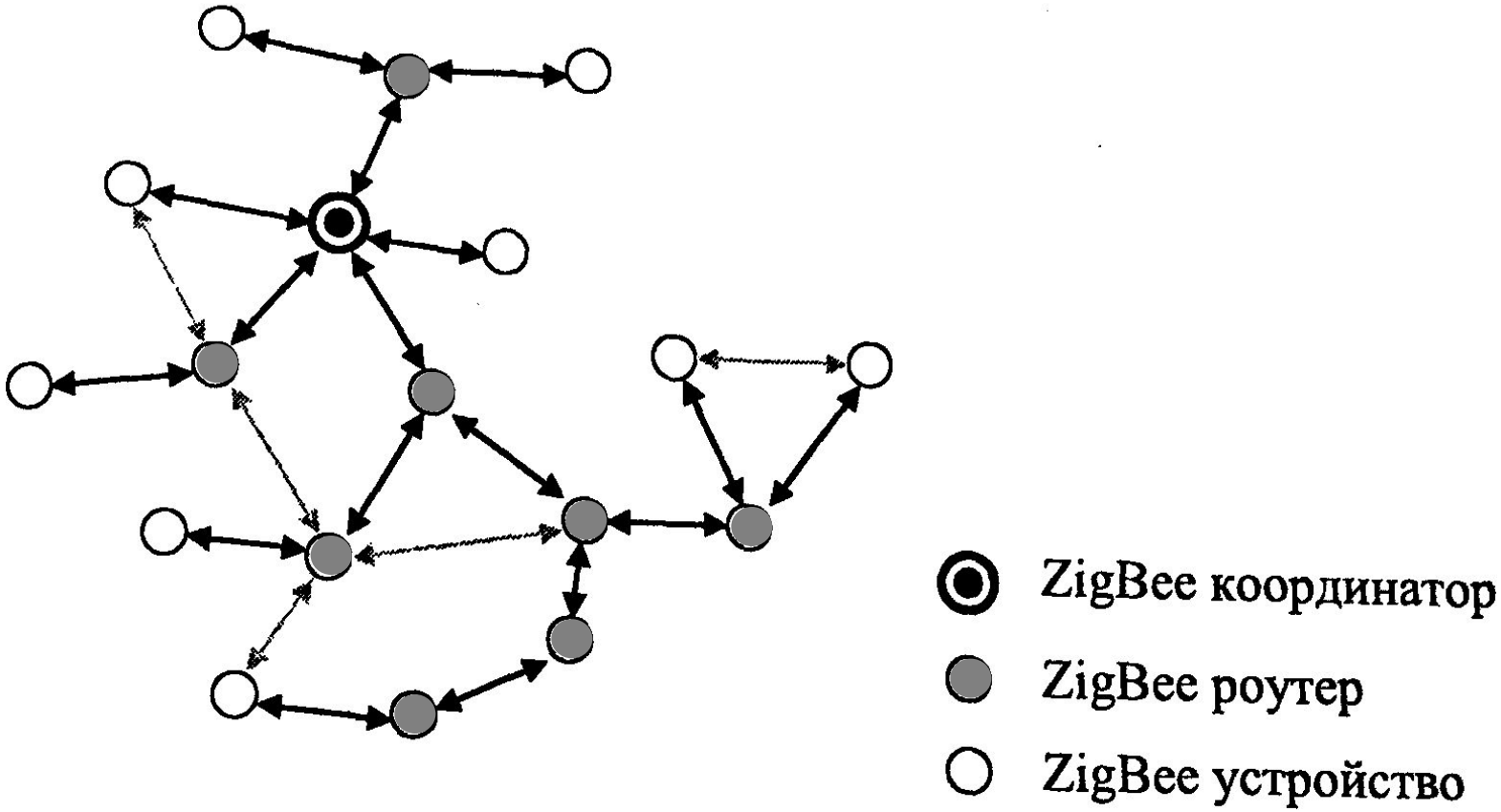


Рис. 3 — Топологии ZigBee сети типа дерево

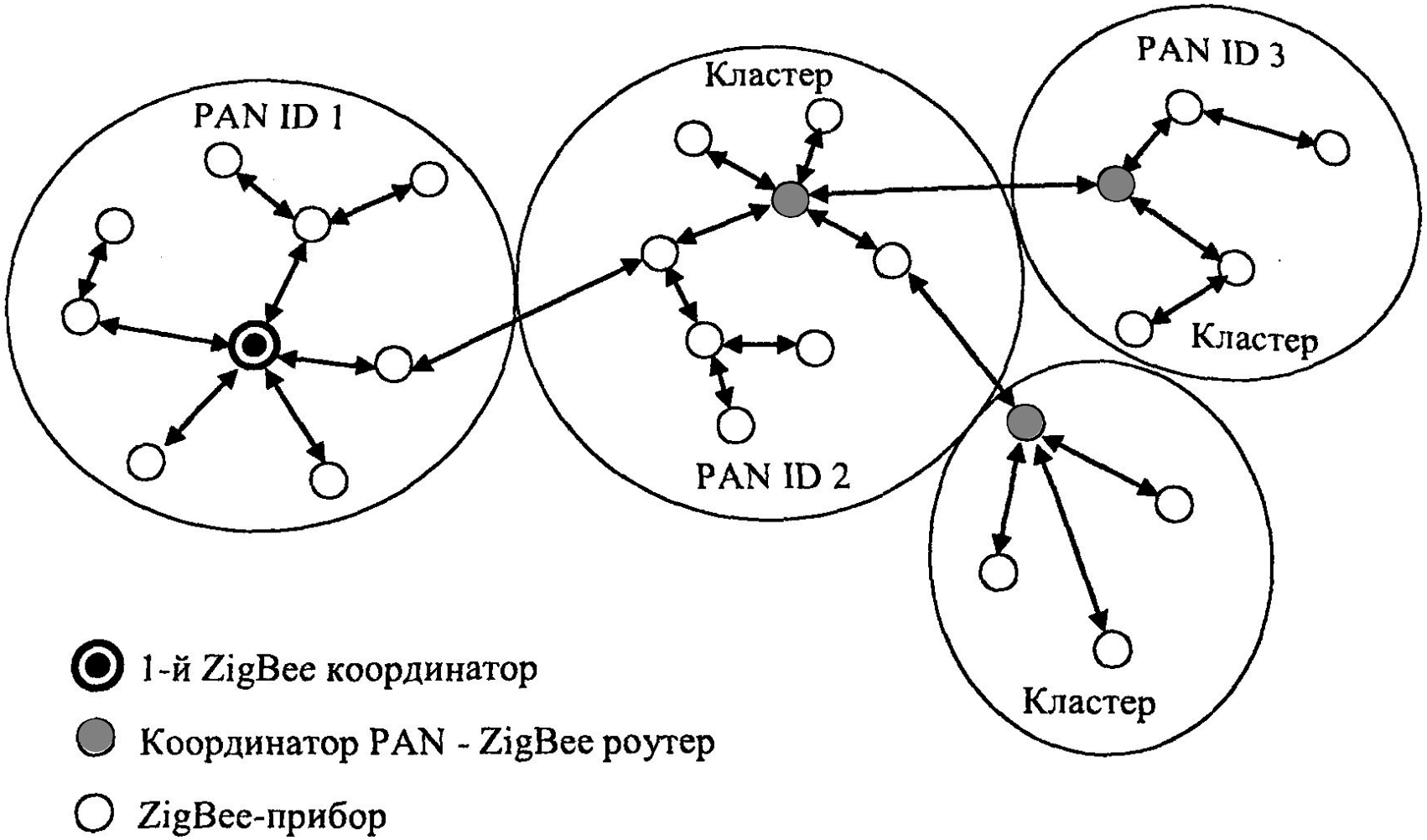


Рис. 4 — Топологии ZigBee сети типа кластерное дерево

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,…,10	2	$f_k = 906 + 2(k-1)$
2400–2483.5	16	k=11,12,…,26	5	$f_k = 2405 + 5(k-11)$

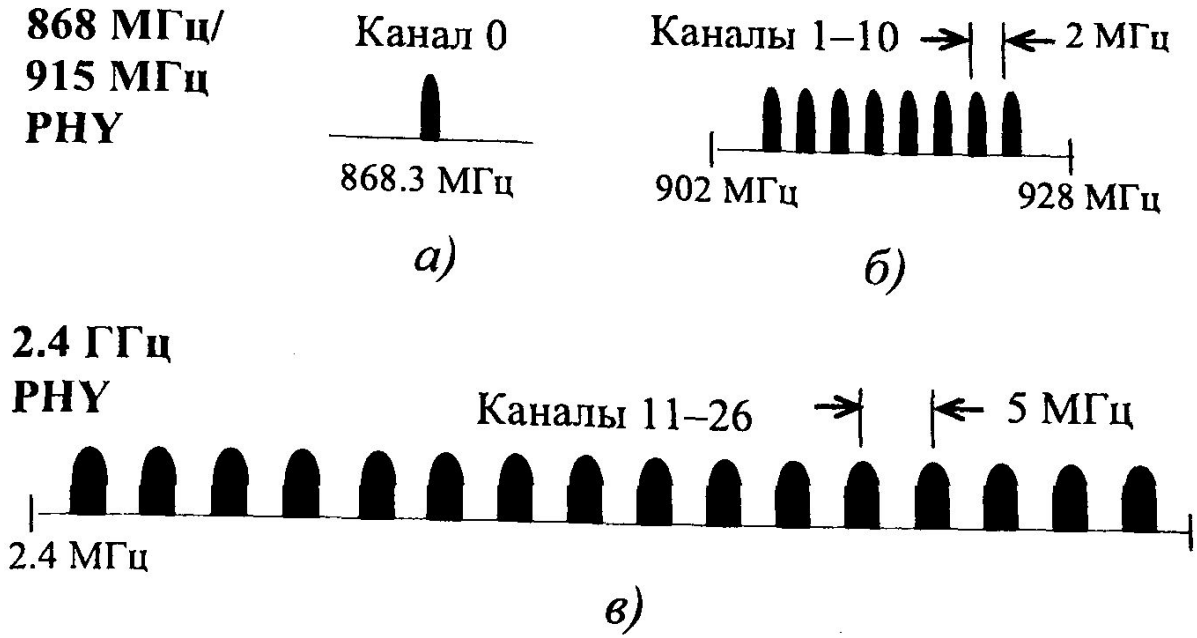


Рис. 5 — Частотные каналы ZigBee сетей:
а) 0-й канал; б) каналы 1-10; в) каналы 11-26

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

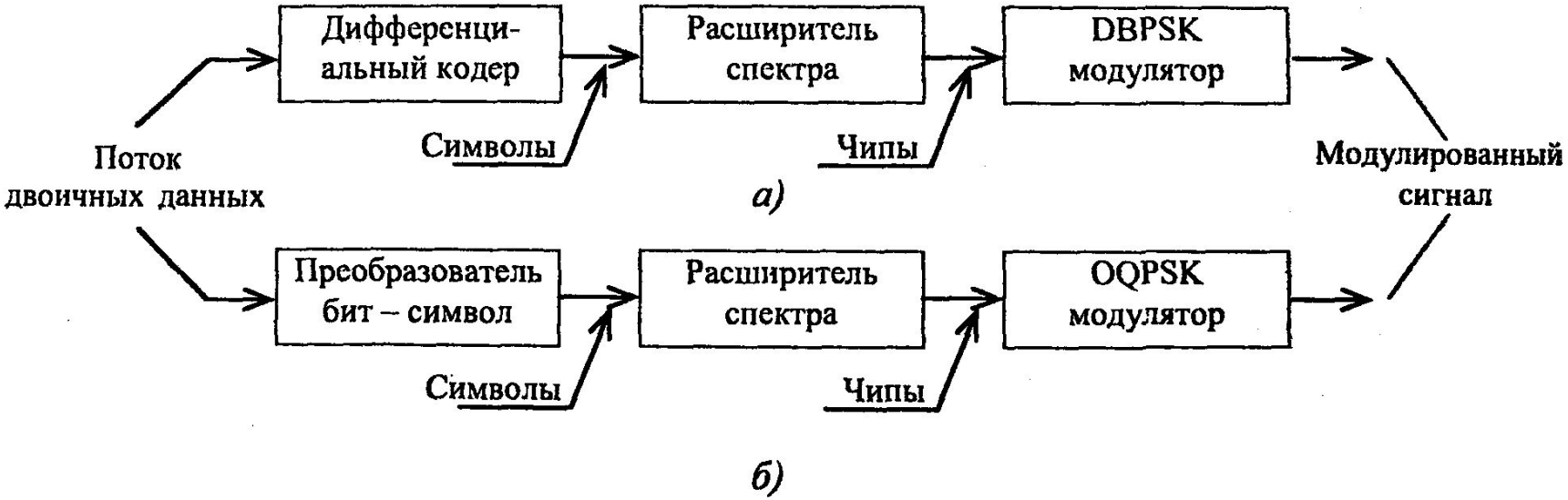


Рис. 6 — Структурные схемы формирования сигналов каналов 0-10 (а) и 11-26 (б)

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).

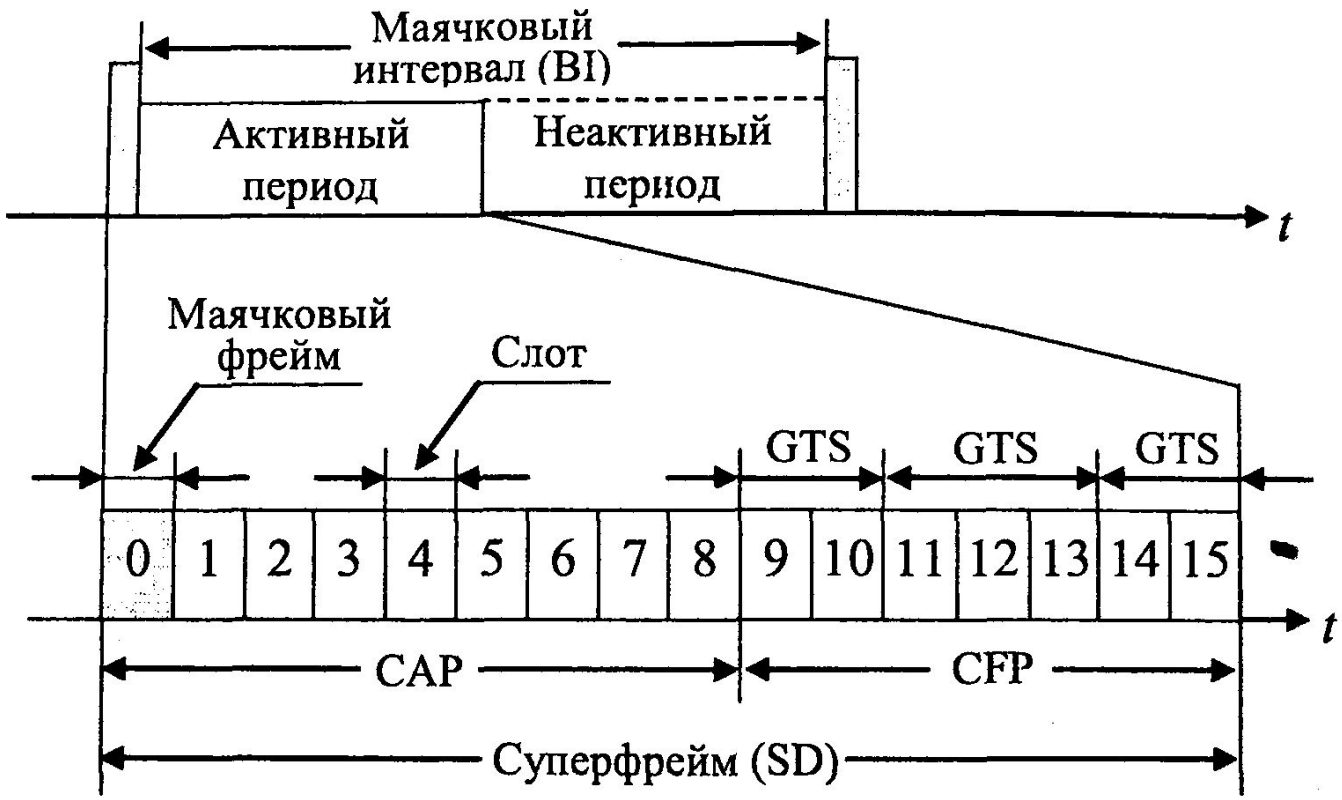


Рис. 7 — Структура маячкового интервала и суперфрейма

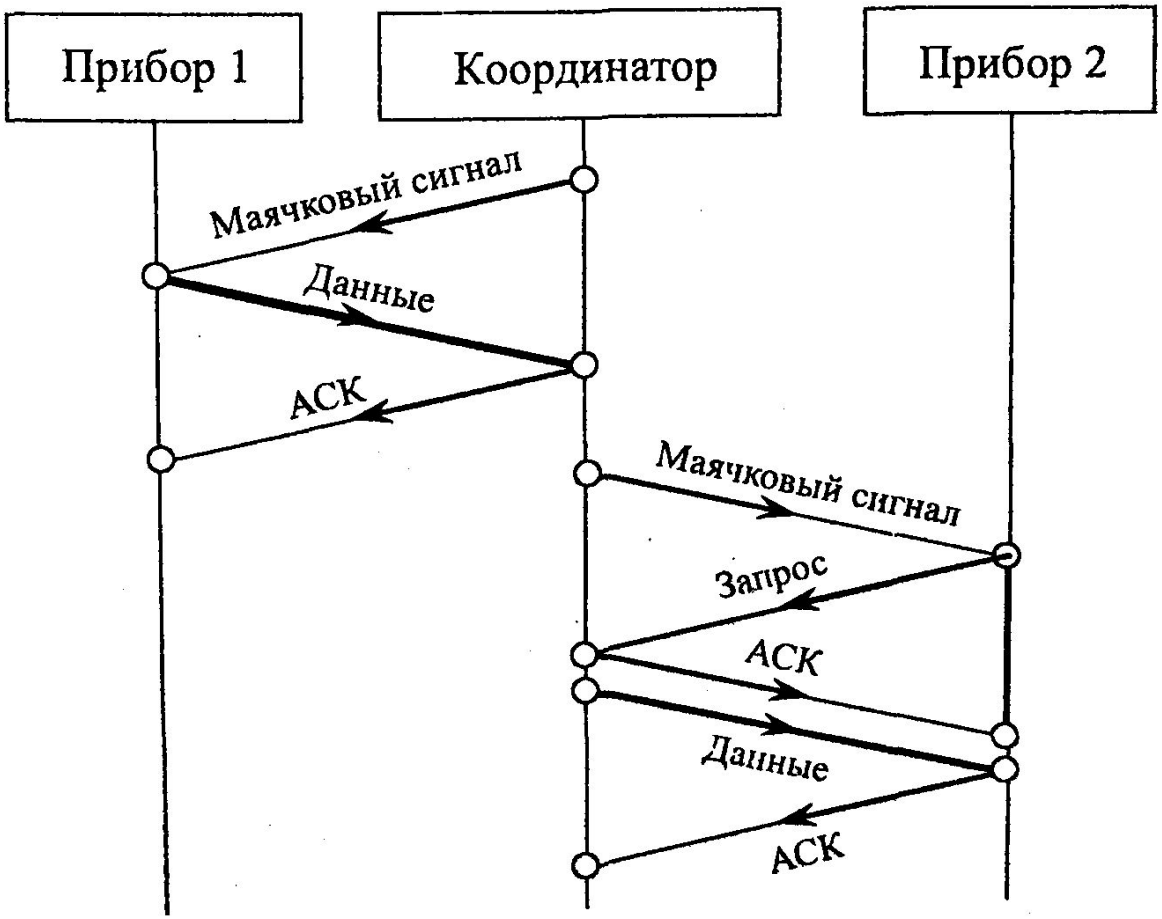


Рис. 8 — «Непрямая» передача данных в маячковом режиме

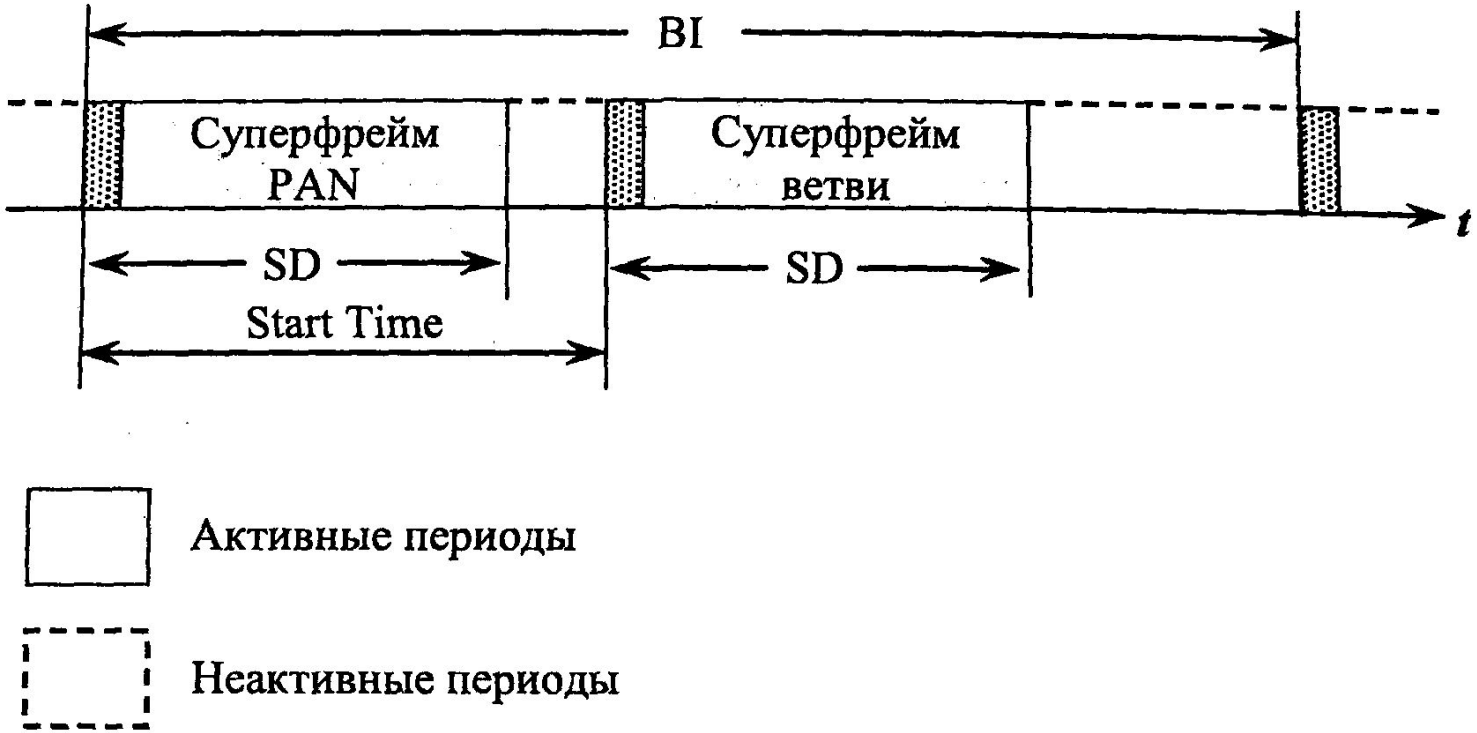


Рис. 9 — Чередование суперфреймов сети PAN и ветви

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:

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

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

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 состязательного 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)	$15.36 \cdot 10^{-3}$ … 251.66
Порядок маячкового интервала (Beacon Order – BO)	–	0…14(15)	–
Длительность маячкового интервала (Beacon Interval Duration – BI)	symbol	960 (1…16384)	$15.36 \cdot 10^{-3}$ … 251.66

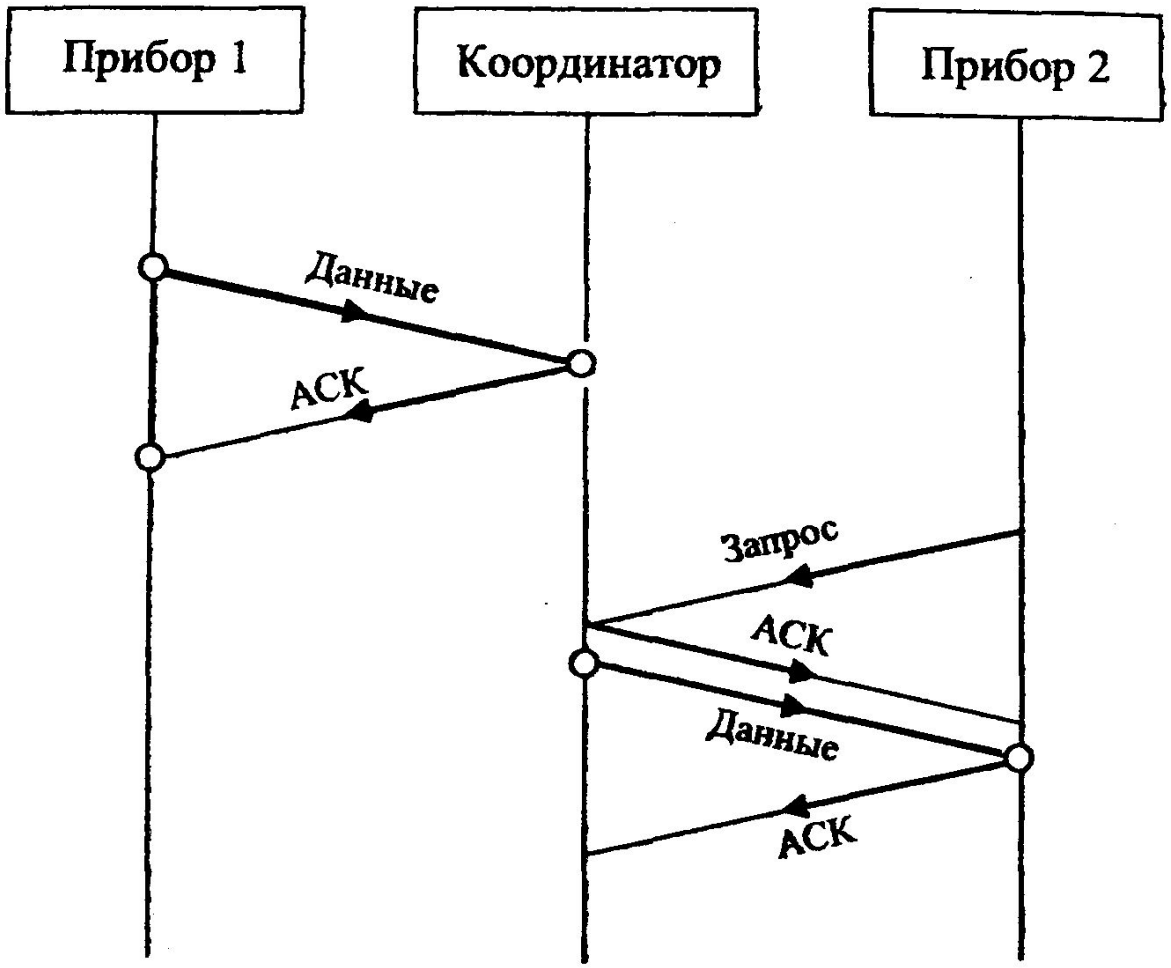


Рис. 10 — «Непрямая» передача данных в безмаячковом режиме

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.

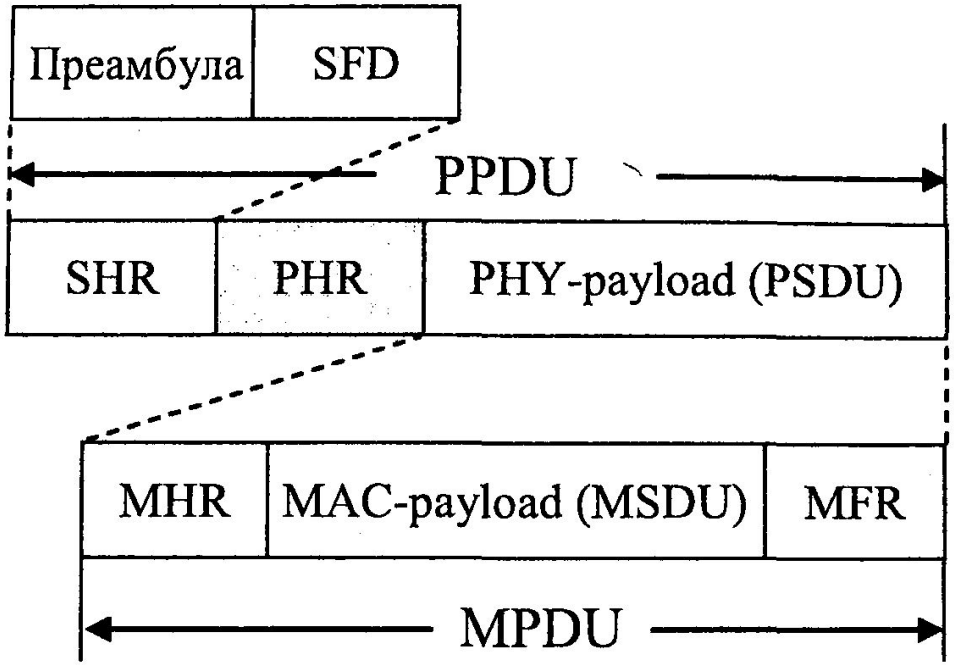


Рис. 11 — Структура фреймов физического уровня (PPDU) и MAC подуровня (MPDU) ZigBee сетей

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).

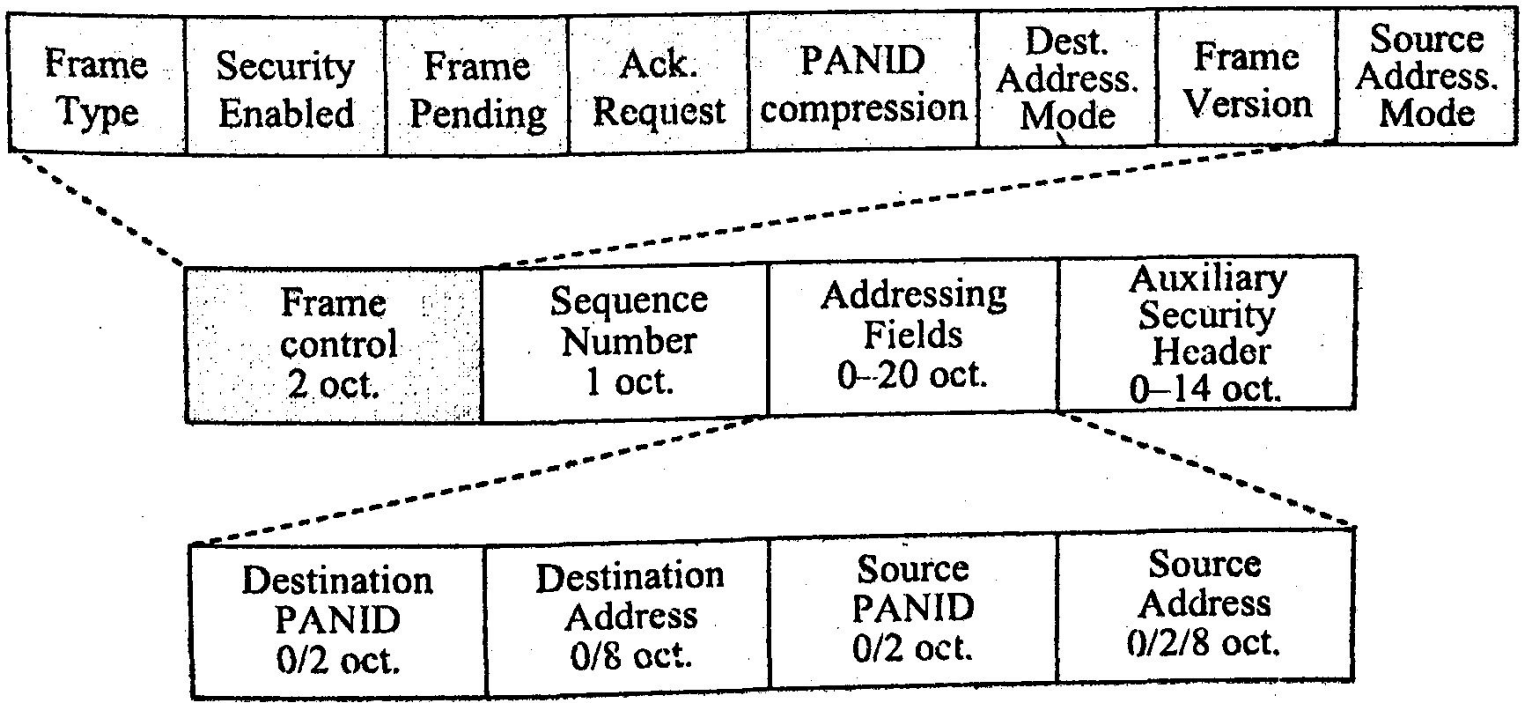


Рис. 12 — Структура заголовка MAC фреймов ZigBee сетей

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)	×		×

Примечание. Подтверждение приема команды производится при ее адресной передаче «осиротевшему» прибору и не производится при ее широковещательной передаче.

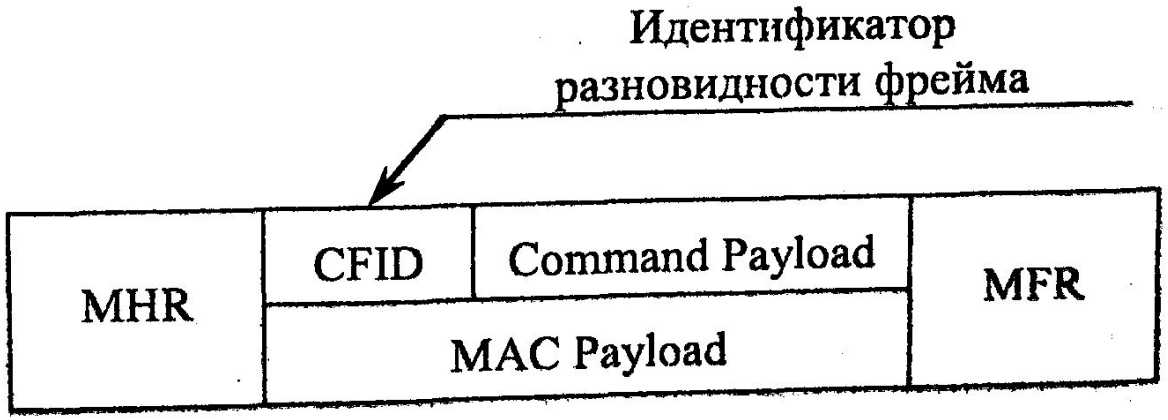


Рис. 13 — Структура MAC фреймов команд управления

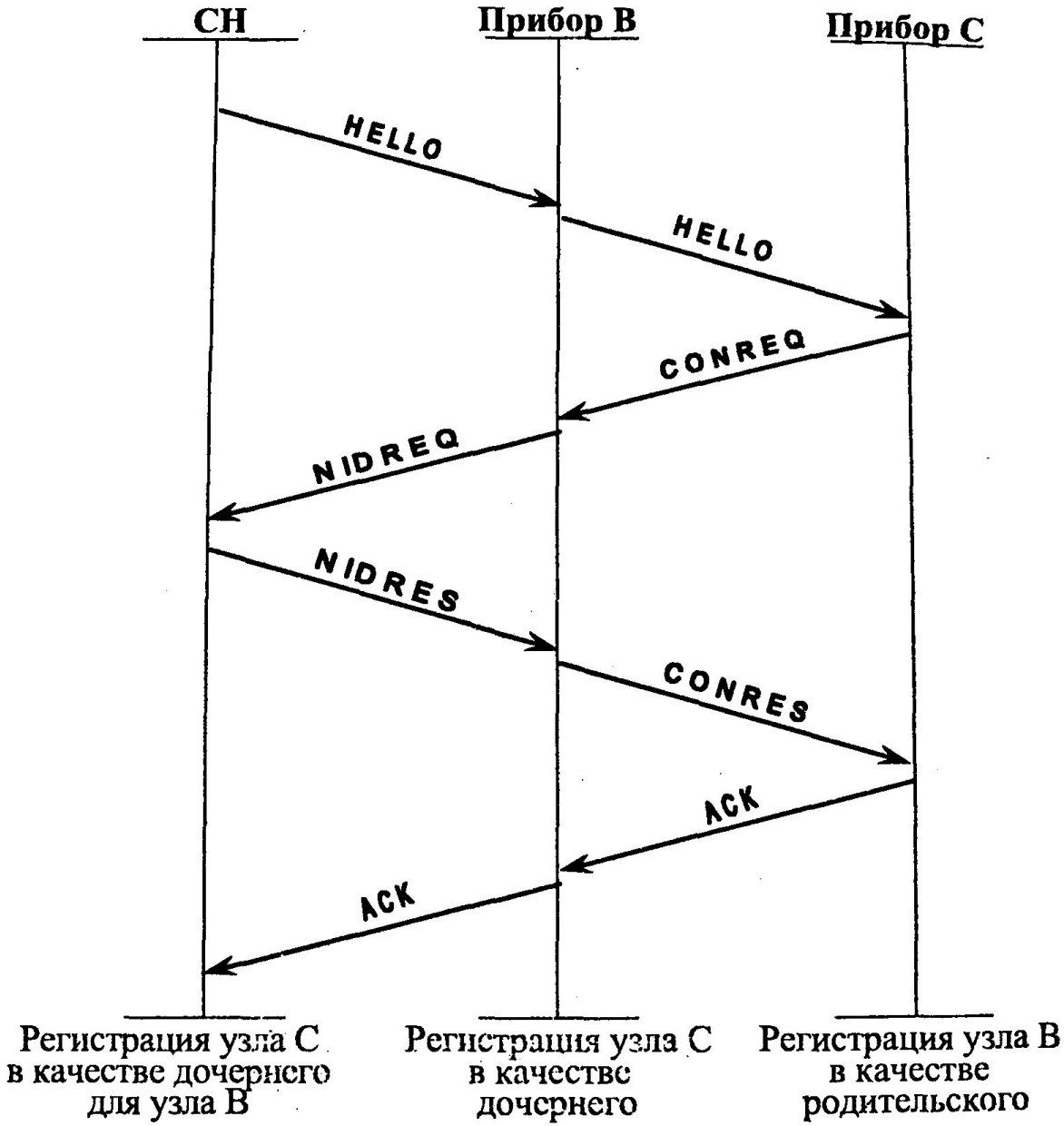


Рис. 14 — Обмен фреймами между вершиной сети и приборами

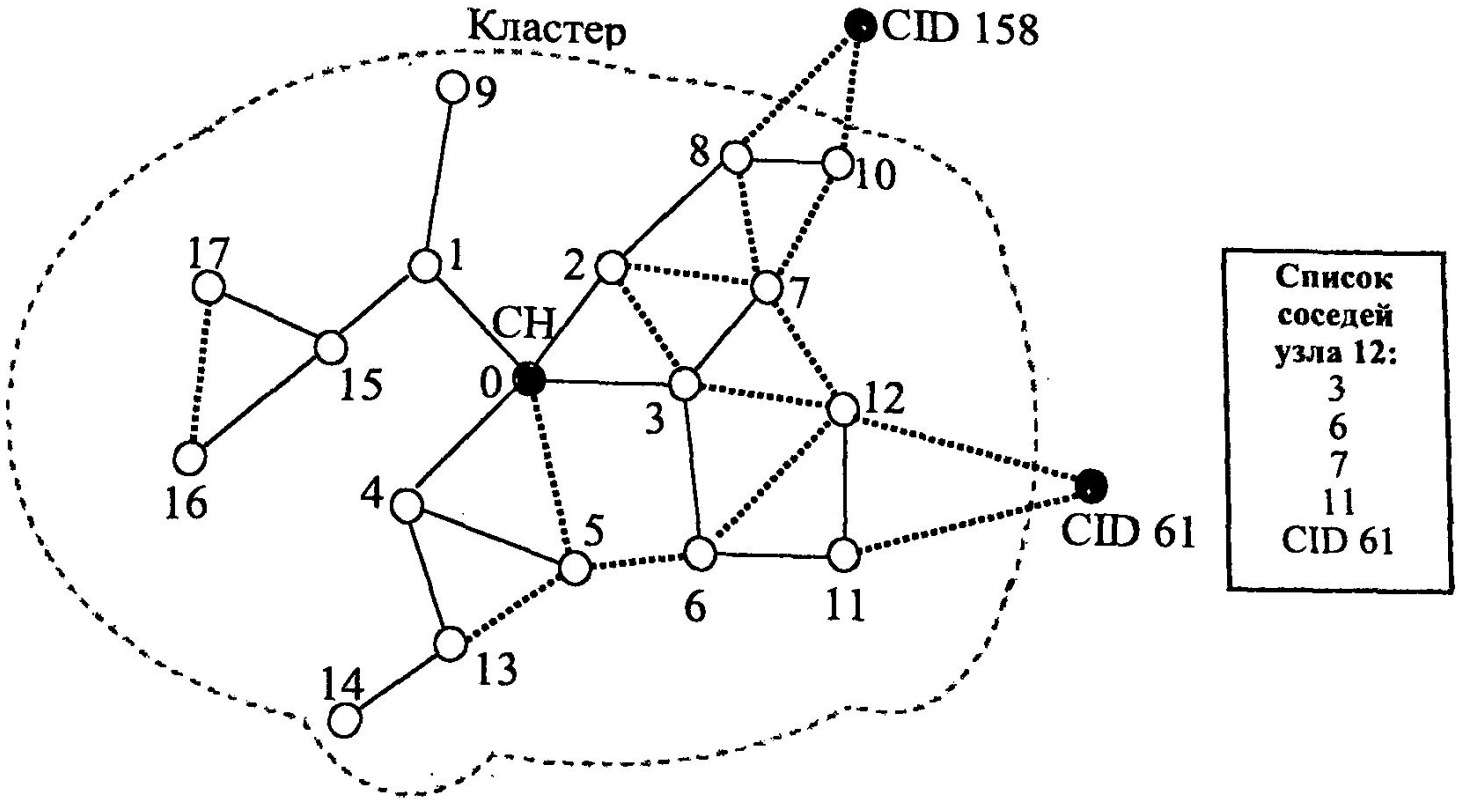


Рис. 15 — Иллюстрация учета взаимосвязей между соседними узлами