

2.1 LTE радио протокол

Для передачи трафика в радиоканале в eNB и UE происходит обработка дейтаграмм на протокольном уровне L2, в результате которой формируют блоки, передаваемые по радиointерфейсу. Структура уровня L2 в eNB при передаче вниз показана на рисунке 2.1; структура уровня L2 в UE при передаче вверх – на рисунке 2.2.

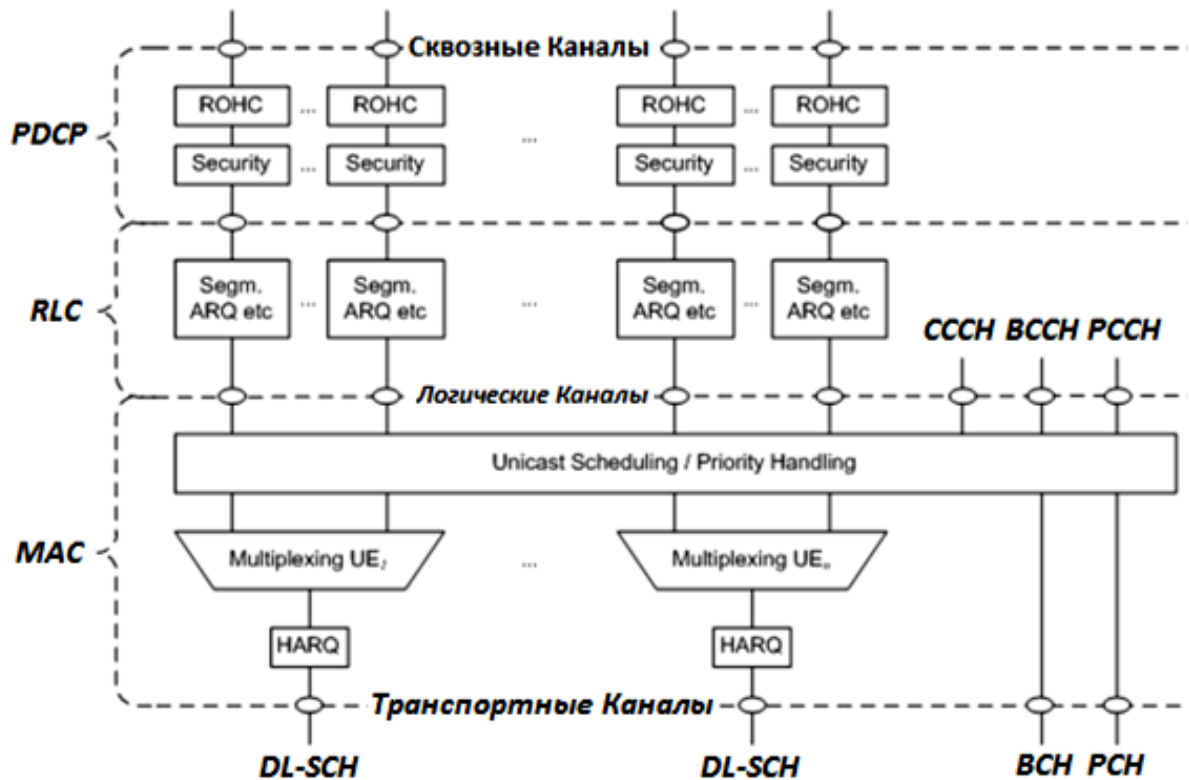


Рисунок 2.1 – Структура уровня L2 при передаче вниз

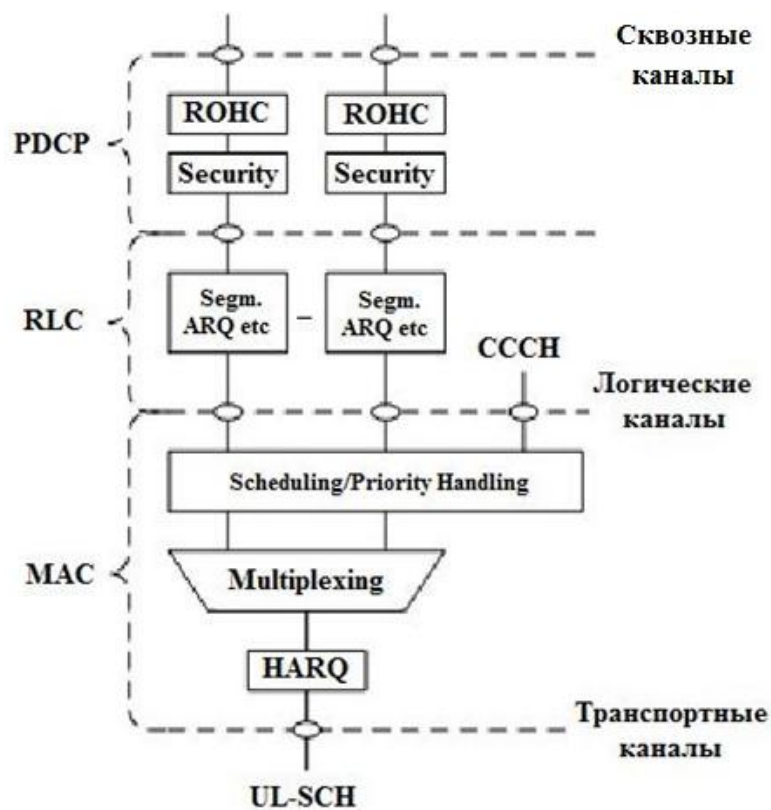


Рисунок 2.2 – Структура уровня L2 при передаче вверх

LTE радио протокол включает в себя 3 уровня (рисунок 2.3).

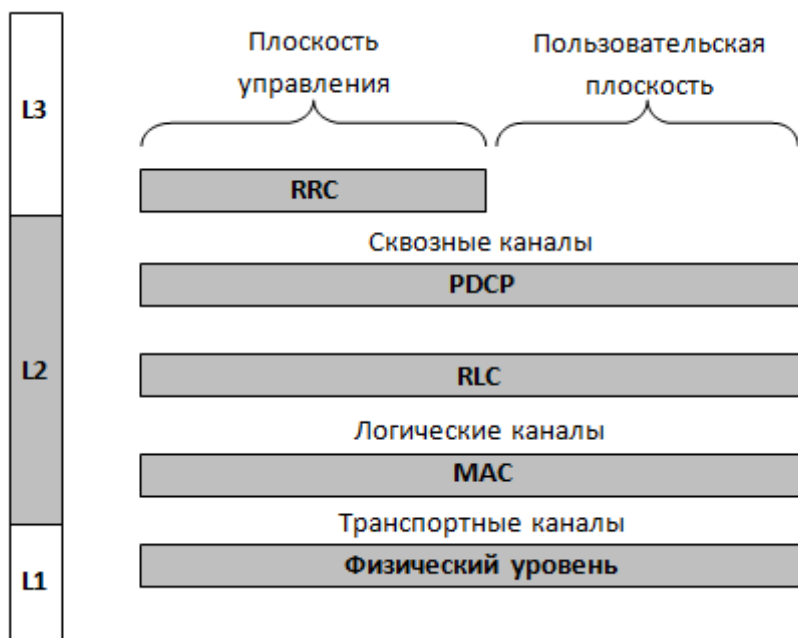


Рисунок 2.3 – Структура радио протоколов LTE

В плоскости управления на уровне L3 находится RRC (Radio Resource Control) протокол. Уровень L2 расщеплен на 3 подуровня:

- PDCP – Packet Data Convergence Protocol, протокол конвергенции пакетов данных;
- RLC – Radio Link Control Protocol, протокол управления радиосоединением;
- MAC – Medium Access Control Protocol, протокол управления доступом к среде.

Протокол RRC представляет собой систему алгоритмов и команд, используемых для обслуживания UE на радиointерфейсе.

Рассмотрим функции, выполняемые различными подуровнями L2 радиointерфейса. На **протокольном уровне PDCP** обрабатывают данные более высоких уровней: SDU (Service Data Units) – дейтаграммы трафика и сигнальные сообщения. При этом осуществляют:

- сжатие (и, соответственно, восстановление) IP-заголовков, используя протокол ROHC (Robust Header Compression),
- шифрацию и дешифрацию SDU трафика и сигнализации (в UMTS это делают на уровнях RLC или MAC),
- защиту (проверку) целостности сигнальных сообщений (в UMTS это осуществляют на уровне RLC).

Последовательность производимых операций показана на рисунке 2.4.

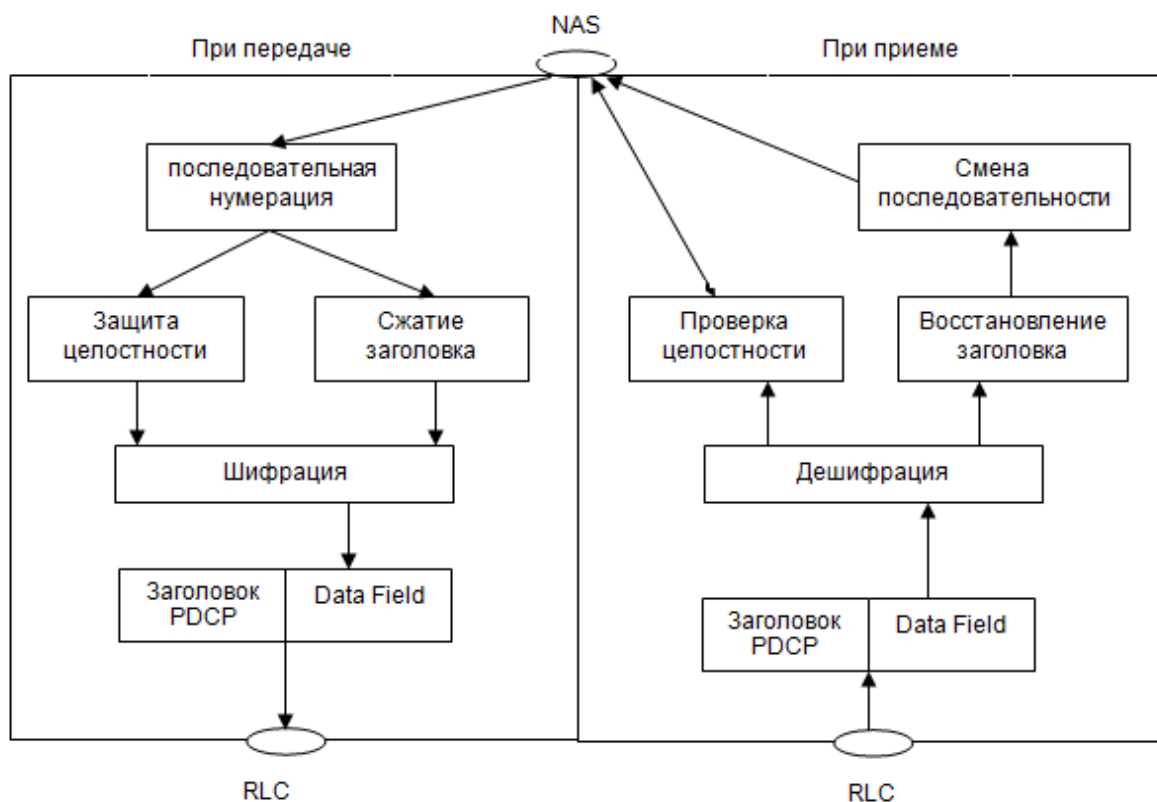


Рисунок 2.4 – Операции, выполняемые на уровне PDCP

Кроме указанных функций, уровень PDCP обеспечивает передачу данных без потерь при хэндоверах и обрывах связи.

На *уровне RLC* осуществляют:

- сегментацию SDU на PDU (Protocol Data Unit) для передачи и объединение пакетов при приеме в требуемой последовательности,
- коррекцию ошибок при передаче, используя повторную передачу (ARQ),
- устранение ошибок в передаче пакетов, вызванных ошибками сигнализации.

Возможны 3 режима обработки пакетов на уровне RLC в зависимости от характера передаваемой информации:

- прозрачный (transparent mode) пакеты не обрабатывают на уровне RLC,
- передача без подтверждения (unacknowledged mode),
- передача с подтверждением (acknowledged mode).

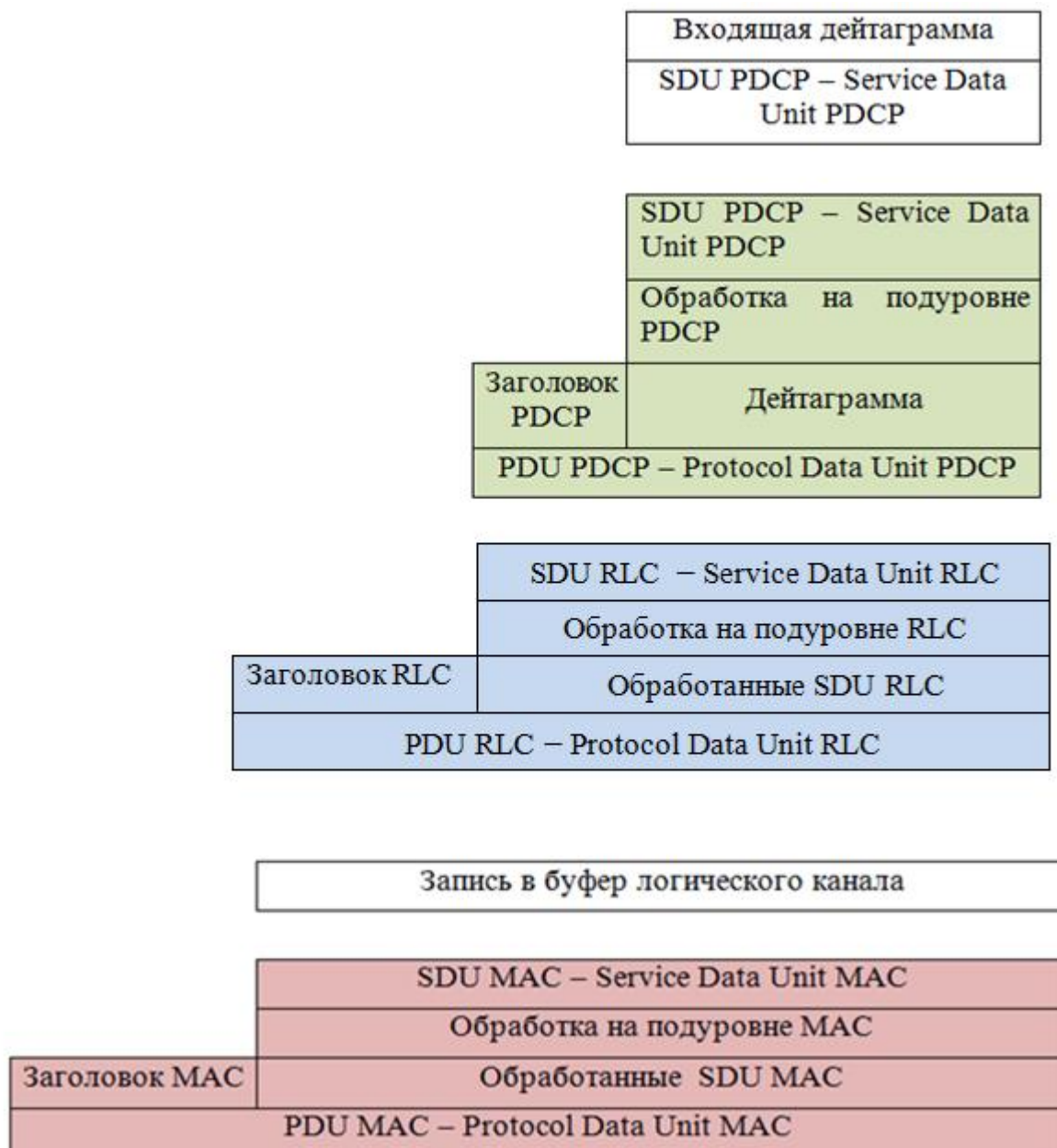
На *уровне MAC* происходит размещение и мультиплексирование пакетов логических каналов в транспортных с последующей передачей их по физическим каналам. Уровень MAC осуществляют:

- управление выделением канального ресурса с учетом приоритетов трафика, т.е. выполняют задачи планирования передач,
- выбор транспортных форматов передач,
- управление повторными передачами непринятых пакетов,
- организацию процедур доступа UE к сети и периодической синхронизации UE,
- измерения: объема передаваемого трафика, загрузки канала, состояния буферов передачи UE, относительной мощности передачи UE и ряд других,
- организацию режима сна/прерывистого приема (DRX) абонентских станций.

Протокольные уровни MAC и RLC тесно связаны между собой. В зависимости от характеристик канала связи и загрузки сети MAC выбирает оптимальный формат передачи (модуляцию, скорость избыточного кодирования, объем передачи), на основе которого RLC устанавливает размер PDU. MAC уведомляет RLC о начале передачи по конкретному соединению и о числе PDU, которые RLC должен выставить в данный момент. При приеме PDU MAC сообщает RLC о необходимости повторной передачи.

Работой уровня MAC непосредственно руководит планировщик (scheduler), алгоритмы работы которого и ПО являются know-how производителя аппаратуры.

Последовательность обработки дейтаграмм



Рассмотренная структура уровня L2 на радиointерфейсе с незначительными добавками сохраняется и в стандарте NR. Принципиальным является ввод ещё одного верхнего подуровня SDAP – Service Data Adaptation Protocol, расположенного над подуровнем PDCP. Задачей подуровня является выделение потоков трафика с определёнными QoS и обеспечение QoS на радиointерфейсе. Однако подуровень SDAP является опциональным.

2.2 Процедура доступа UE к сети

Процедура доступа UE к сети является процедурой логического уровня L2. Она проиллюстрирована рис. 2.5. Она начинается с посылки **преамбулы** по каналу PRACH. В отличие от сетей UMTS, где преамбула не является сообщением ортогональным по отношению к пользовательскому трафику, в E-UTRA приняты специальные меры для ортогонализации передачи преамбулы. По каналу системной информации сеть передает сообщение всем пользовательским терминалам о выделенном канальном ресурсе для передачи преамбул. Этот ресурс составляет 6 ресурсных блоков и определенное число временных слотов. На рис. 2.6 показан вариант для передачи преамбулы формата 0 длительностью в 1 субкадр (1 мс).

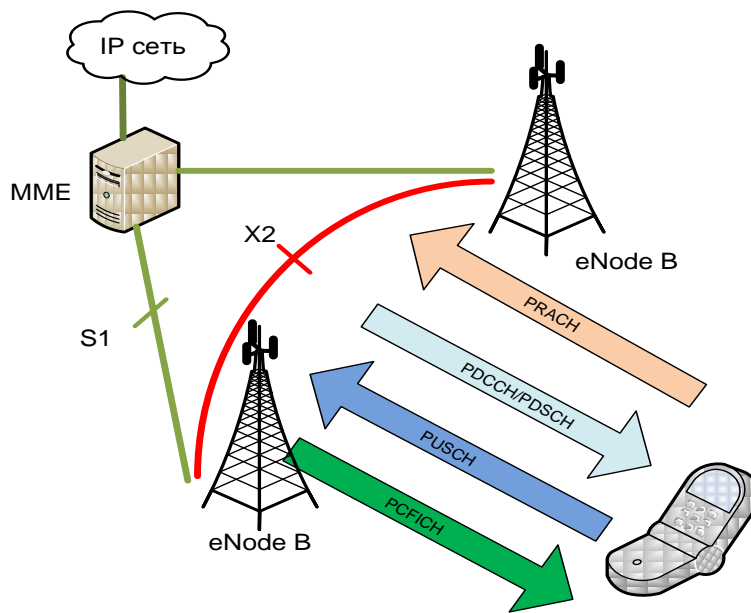


Рис.2.5. Процедура доступа UE к сети

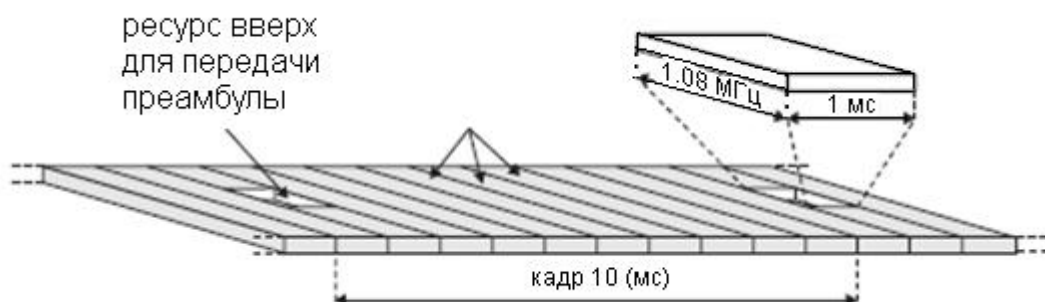


Рис.2.6 Выделение канального ресурса для передачи преамбулы

При этом возникает проблема устранения межсимвольной интерференции, поскольку UE передает преамбулу с запаздыванием, обусловленным ее удалением от eNB. Ее решают следующим образом. Длина преамбулы составляет примерно 80% выделяемого временного ресурса, а в начале преамбулы передают CP, занимающий 10% выделенного времени (рис. 2.7, соответствующий формату 0). В результате образуется защитный интервал порядка 10% выделенного времени, что позволяет обслуживать UE при их удалении до 15 км от eNB (суммарный пробег по трассе 30 км, что при скорости света 3×10^8 м/с

создает задержку в 0,1 мс).

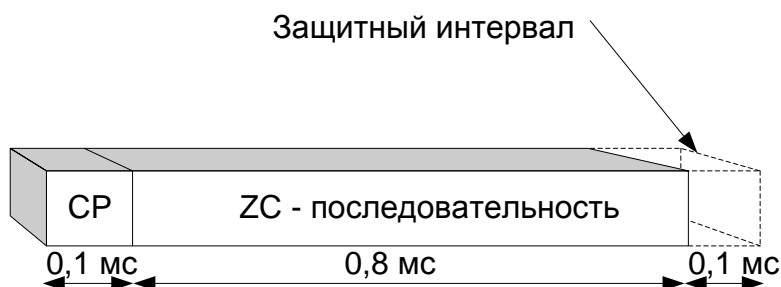


Рис.2.7. Временные соотношения при передаче преамбулы

Преамбула представляет собой ZC-последовательность; ее длина и длина CP зависят от выбранного в сети формата преамбулы. Спецификациями LTE установлено 5 возможных форматов преамбул (табл. 2.1).

Таблица 2.1

| Формат преамбулы | T_{CP} | $T_{ZC-последоват.}$ |
|------------------|-------------------|---------------------------|
| 0 | $3168 \cdot T_s$ | $24576 \cdot T_s$ |
| 1 | $21024 \cdot T_s$ | $24576 \cdot T_s$ |
| 2 | $6240 \cdot T_s$ | $2 \cdot 24576 \cdot T_s$ |
| 3 | $21024 \cdot T_s$ | $2 \cdot 24576 \cdot T_s$ |
| 4 | $448 \cdot T_s$ | $.4096 \cdot T_s$ |

Из табл.2.1 следует, что в формате 0 для передачи преамбулы выделяют 1 субкадр (напомним, что его длина составляет $30720 T_s - 1\text{мс}$). Передача преамбулы в форматах 1 и 2 занимает 2 субкадра, а в формате 3 – 3 субкадра. В формате 4 преамбулу передают в поле U_pPTS подкадра S. Для формирования преамбул форматов 0-3 используют ZC-последовательности длиной 839 символов, для преамбул формата 4 длина ZC-последовательности составляет 139 символов. Всего в каждой соте UE случайным образом выбирает один из 64 возможных вариантов взаимно-ортогональных преамбул. За один кадр (10 мс) UE может отправить только одну преамбулу.

eNB обнаруживает абонента, запрашивающего доступ, детектируя преамбулу. В ответном сообщении RAR (Random Access Response) eNB подтверждает получение преамбулы, присваивает абоненту временный идентификатор и передает информацию о времени упреждения, что необходимо для синхронной работы в сетях с частотно-временным разделением каналов.

Информацию о поступлении ответа от eNB UE получает по каналу PDCCH. Его идентифицируют как RA-RNTI. Обратное сообщение RAR от eNB к UE, передаваемое по каналу PDSCH, состоит из заголовка (MAC header) и информационной части. Заголовок занимает один октет и содержит номер преамбулы (0...63), выбранной UE для запроса на подсоединение к сети. Структура MAC RAR приведена на рис. 2.8.

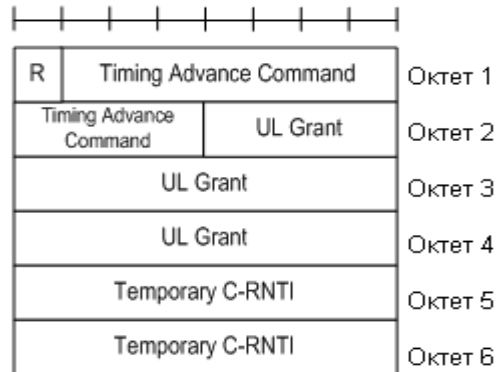


Рис.2.8. Структура MAC RAR

Сообщение MAC RAR содержит информацию о выделяемом абонентской станции канальном ресурсе (*UL Grant*), временный идентификатор абонента (*Temporary C-RNTI*) и команду на установку таймера времени упреждения (*Timing Advance Command*). Величину *Timing Advance* передают в виде 11-битового числа T_A в диапазоне $0 \dots 1282$. Для вычисления *Timing Advance* в секундах надо переданное число T_A умножить на $16T_s$. Следовательно, диапазон возможных установок *Timing Advance* находится в пределах $0 \leq N_{TA} \leq 20512 T_s$, что при $T_s = 1/(15000 \times 2048)$ с составляет $0 \dots 0,668$ мс (это соответствует соте радиусом 100 км). Далее, в процессе обслуживания при перемещении UE сеть корректирует *Timing Advance*, отправляя сообщения T_A для вычисления $N_{TA,new}$ по формуле

$$N_{TA,new} = N_{TA,old} + (T_A - 31) \times 16$$

Точность установки *Timing Advance* составляет $16 T_s$, что во времени означает погрешность в 0,52 мкс.