

Процедуры уровней L1 и L2

2. Параметры физического уровня и доступ UE к сети

2.1. Канальный ресурс и его характеристики

На физическом уровне (на радиointерфейсе) в E-UTRAN используют технологию OFDM с модуляцией 4-ФМ, 16-КАМ 64-КАМ и 256-КАМ. При этом число поднесущих частот в рабочей полосе 20 МГц составляет 1200.

Для взаимной синхронизации E-UTRAN и UTRAN используют тактирование с длительностью временной единицы $T_s = 1/(15000 \times 2048)$ с. Передача по радиоканалу идет кадрами длиной 10 мс, что составляет $307200 T_s$. Кадр состоит из 20 временных слотов длиной $15360 \times T_s = 0,5$ мс, пронумерованных от 0 до 19. Два последовательных слота составляют 1 субкадр – всего 10 субкадров, от 0 до 9 рис.2.1. Различают 2 структуры кадров: кадры типа 1 при работе с частотным дуплексом (FDD) и кадры типа 2 при работе с временным дуплексом (TDD). На рис. 2.2. показаны структуры кадров с FDD и TDD.

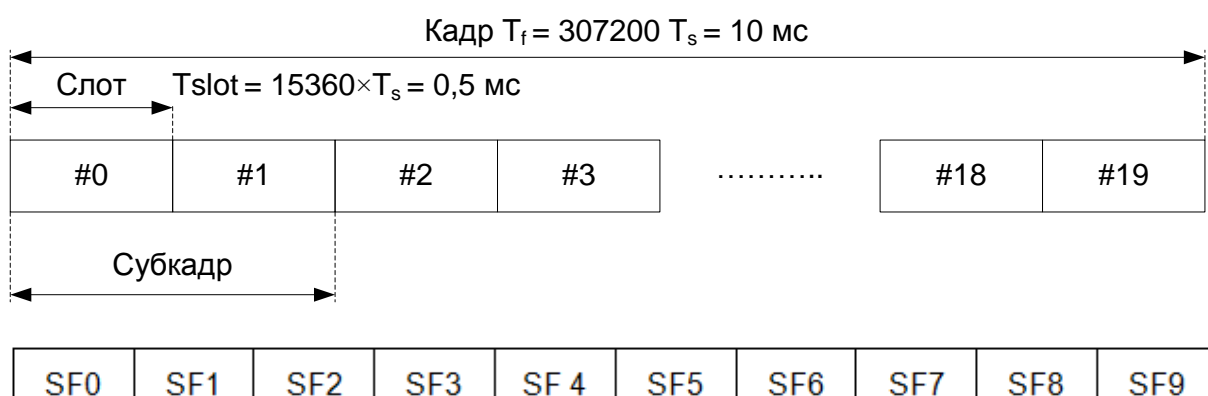


Рис.2.1. Структура кадра LTE в виде последовательности слотов и субкадров

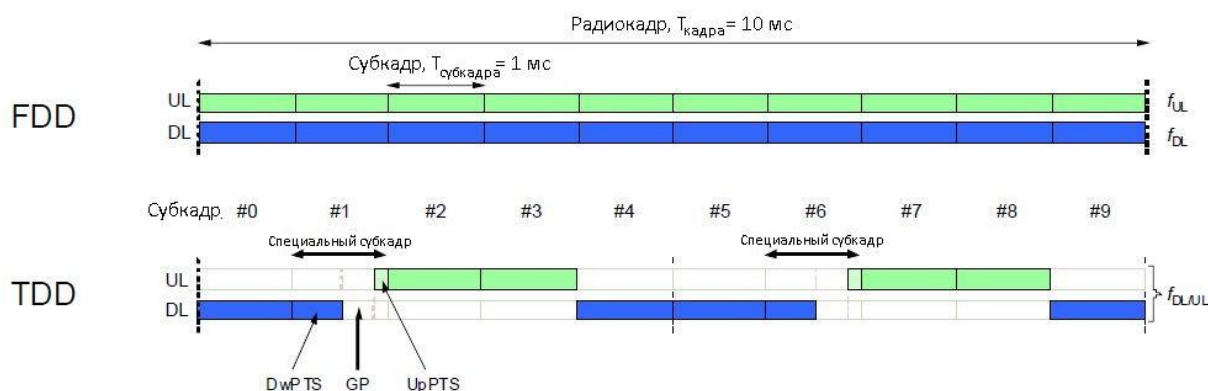


Рис.2.2. Конфигурация кадра при частотном и временном дуплексе

При частотном дуплексе в каждом субкадре идет одновременная передача вверх (UL) и вниз (DL) в разных частотных полосах. При временном дуплексе в некоторых субкадрах идет передача вниз (D), в других вверх (U). Кроме того, есть специальные (переходные) субкадры (S), состоящие из трех полей: DwPTS – поля передачи вниз, UpPTS – поля передачи вверх и защитного интервала (GP).

Канальный ресурс выделяют в виде ресурсных блоков (РБ). Структура РБ вниз показана на рис. 2.3, вверх на рис. 2.4. Длина РБ 1мс, в нём размещены 14 символов на каждой из 12 поднесущих.

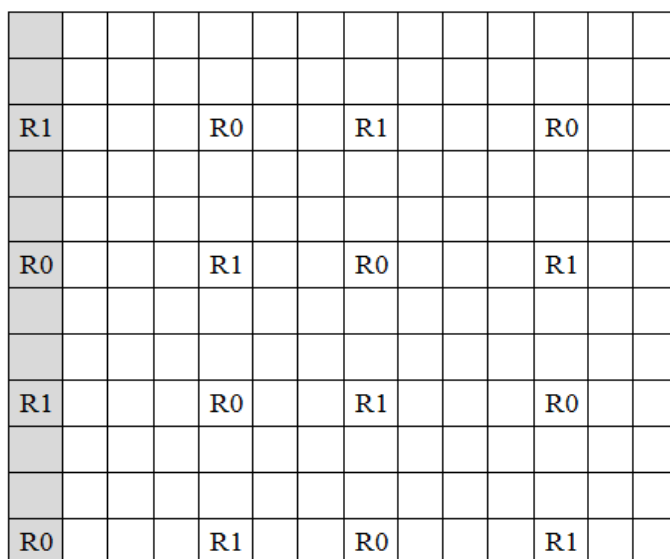


Рис.2.3. Структура ресурсного блока при передаче вниз

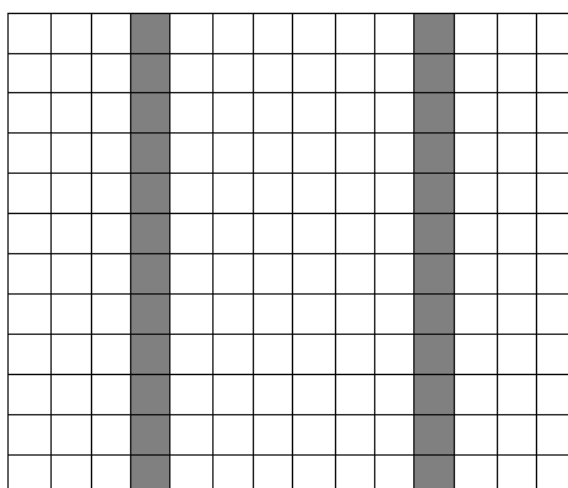


Рис.2.4. Структура ресурсного блока при передаче вверх

На рис.2.3. R0 и R1 – символы опорных сигналов CRS (Cell specific Reference Signals), необходимые для организации когерентной демодуляции и оценки каналов. Нулевой OFDM-символ затемнен – в нём передают канал управления PDCCH/

На рис. 2.4. затемнены символы, где передают опорные сигналы демодуляции вверх DM-RS (Demodulation Reference Signal).

Размещение каналов в субкадре 0 показано на рис. 2.5, в субкадрах 1 – 4 и 6 – 9 на рис. 2.6.

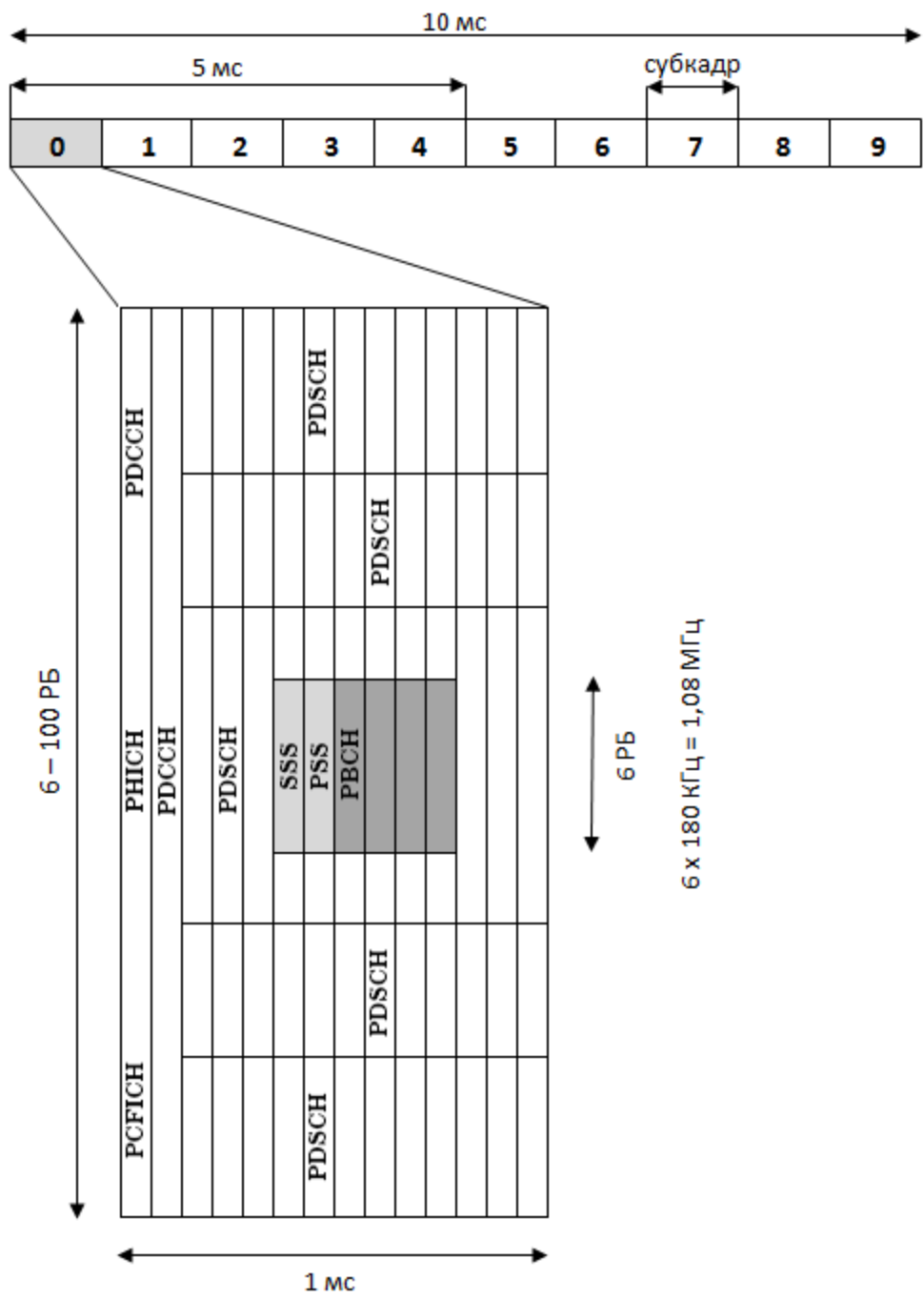


Рис.2.5. Размещение каналов в субкадре 0

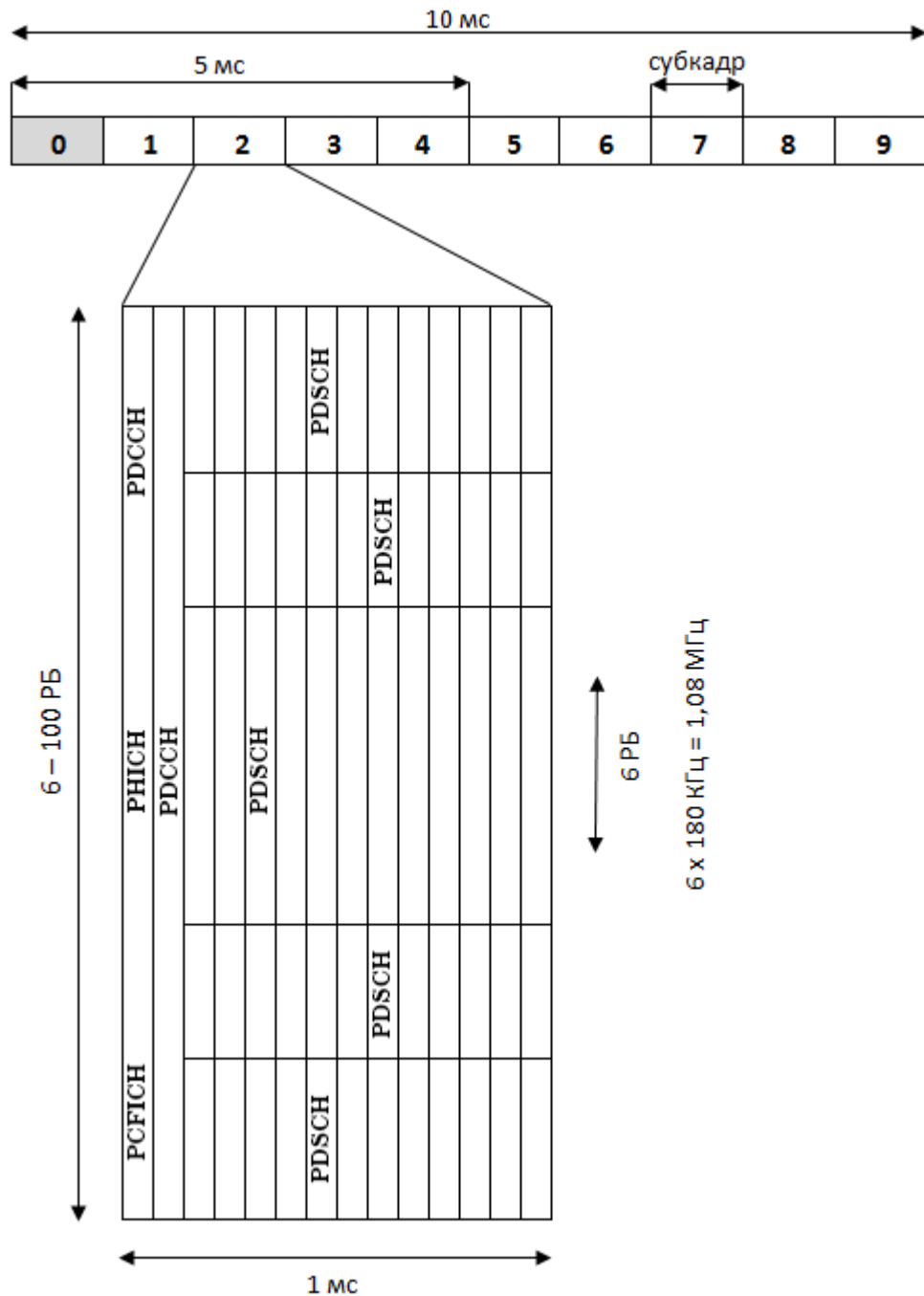


Рис.2.6. Размещение каналов в субкадрах вниз

2.2. Обнаружение сети абонентской станцией

В начале сеанса связи UE должна обнаружить сеть. Для этого UE должна обеспечить синхронизацию с потенциальной базовой станцией и определить идентификатор соты. После этого UE читает канал системной информации, откуда берет необходимые сведения для посылки в сеть первого сигнала: преамбулы. E-UTRAN поддерживает 504 различных идентификаторов сот, разделенных на 168 групп. В каждую группу входят 3 различные соты.

Сценарий поиска сети в определенной степени заимствован из стандарта UMTS. Как и в UMTS, для определения идентификатора соты в направлении вниз

передают 2 синхронизирующих сигнала: первичный PSS (Primary Synchronization Signal) и SSS (Secondary Synchronization Signal). Приняв PSS, UE обнаруживает сеть и синхронизируется с ней с точностью до половины кадра. Приняв SSS, UE синхронизируется с точностью до кадра и определяет идентификатор соты. Идентификатор соты определяет формат передачи опорных сигналов (символов), что позволяет UE производить необходимые измерения. Далее UE читает сообщения канала BCCH системной информации и по каналу случайного доступа посылает запрос на доступ к сети – преамбулу.

Сигналы PSS и преамбулы построены на основе последовательностей Zadoff-Chu (ZC-последовательности) с циклическим сдвигом. Аналогичные последовательности используют и в качестве опорных сигналов при передаче вверх. Из каждой корневой ZC-последовательности $X_{ZC}^{(u)}$ можно получить $m-1$ циклически сдвинутых последовательностей со сдвигом на M_{ZC}/m , где M_{ZC} – длина корневой последовательности.

ZC-последовательности относятся к классу последовательностей CAZAC (Constant-Amplitude Zero-Auto-Correlation), обладающими следующими свойствами:

- постоянством амплитуды сигнала,
- нулевой взаимной корреляцией (кросс-корреляцией) одной и той же корневой последовательности при различных циклических сдвигах и некоторых разных последовательностей при определенных u .

ZC-последовательность представляет собой функцию

$$\left(X_{ZC}\right)^{(u)}(k) := e^{-j \cdot \pi \cdot u \cdot \frac{k \cdot (k+1)}{M_{ZC}}} \quad (2.1)$$

где u – индекс ZC-последовательности из всего возможного набора для данной длины M_{ZC} (рис.2.7). Число ZC-последовательностей длиной M_{ZC} равно количеству простых целых чисел от 0 до M_{ZC} . Очень часто длину M_{ZC} тоже берут равным простому целому числу. Здесь однако возникают проблемы согласования длины ZC-последовательности и числа символов в ресурсных блоках, которое как известно, кратно 12. Эту задачу решают либо путем усечения ZC-последовательности на 1 или более символов, либо с помощью циклического расширения на 1 или несколько символов. При этом корреляционные свойства полученных последовательностей ухудшаются незначительно.

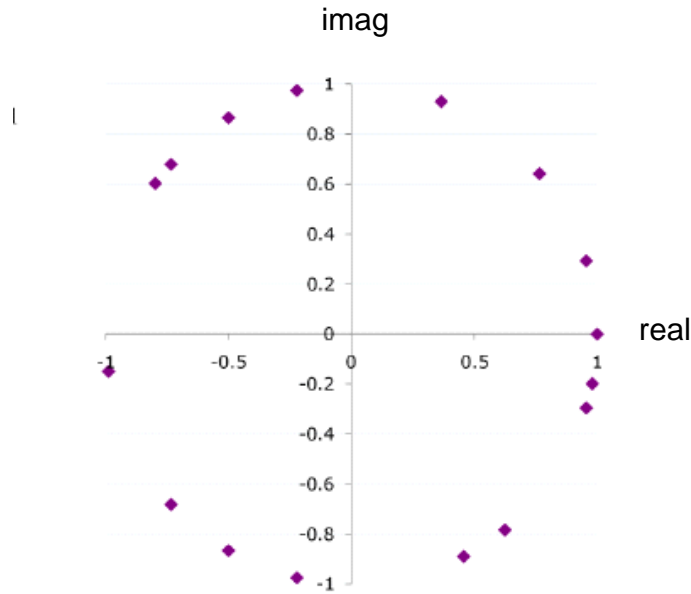


Рис.2.7. ZC-последовательность

В качестве PSS в E-UTRA используют три взаимно-ортогональные ZC-последовательности. Каждой из них соответствует идентификатор физического уровня $N_{ID}^{(2)} = 0; 1; 2$. На практике это удобно при построении сети на основе трехсекторных сотовых структур: в eNB находятся 3 базовые станции, принадлежащие к одной идентификационной группе, но каждая имеет свой собственный $N_{ID}^{(2)}$.

Сигнал PSS состоит из 62 символов ($n=0\dots61$) вида

$$d_u(n) = \begin{cases} e^{-j\frac{\pi n(n+1)}{63}} & n = 0,1,\dots,30 \\ e^{-j\frac{\pi n(n+1)(n+2)}{63}} & n = 31,32,\dots,61 \end{cases} \quad (2.2)$$

Корневые индексы для 3-х различных сигналов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

$N_{ID}^{(2)}$	u
0	25
1	29
2	34

Символы сигнала PSS размещают в одном OFDM-символе, резервируя для этого 72 поднесущие по обеим сторонам от центральной частоты f_0 (рис. 2.8). Это

означает, что число ресурсных блоков, используемых в сети, не может быть меньше 6. Фактически передачу ведут на 62 поднесущих с модуляцией 4-ФМ. По 5 поднесущих по обоим краям полосы не используют.

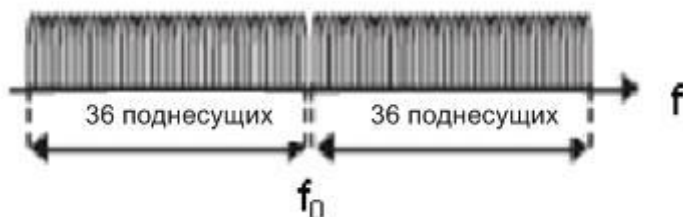


Рис.2.8. Генерация синхронизирующих сигналов

PSS передают дважды в течение 10 мс кадра. При работе с частотным дуплексом (кадры типа 1, рис.2.1) его размещают в субкадрах 0 и 5 в последних OFDM-символах временных слотов 0 и 10 соответственно. При работе с временным дуплексом (кадры типа 2, рис.2.2) PSS передают в трех OFDM-символах в субкадрах 1 и 6. Приняв PSS, UE оказывается синхронизированной с сетью с точностью до половины кадра и определяет группу $N_{ID}^{(2)}$.

Как было сказано, сигнал SSS позволяет определить группу идентификатора соты. Эту группу обозначают номером $N_{ID}^{(1)}$, который лежит в пределах 0...167. Фактический идентификатор соты

$$N_{ID}^{(cell)} = 3 N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)} \quad (2.3)$$

что дает возможность использовать 504 идентификатора базовых станций.

Сигналы SSS, в отличие от сигналов PSS, построены на основе m -последовательностей длиной в 31 бит. Их передают в субкадрах 0 и 5. Структура передачи сигнала SSS в частотной области такая же, как и для сигнала PSS: передачу ведут на 31 поднесущей слева и справа от центральной частоты (рис. 2.9). При частотном дуплексе SSS размещают в предпоследнем OFDM-символе 0 и 10 временных слотов, т.е. непосредственно перед сигналом PSS. При временном дуплексе для передачи SSS занимают последние символы во временных слотах 1 и 11. Однако, в отличие от PSS, коды SSS в субкадрах 0 и 5 разные. Это позволяет UE при приеме SSS обеспечить кадровую синхронизацию.

Для формирования символов $d(n)$ сигнала SSS используют 3 разные m -последовательности: $s(n)$, $c(n)$ и $z(n)$ длиной в 31бит (рис. 3.12).

$\bar{s}(n)$	1 1 1 1 -1 1 1 -1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 -1 1 1 -1 1 -1
$\bar{c}(n)$	1 1 1 1 -1 1 -1 1 -1 -1 -1 1 1 -1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 1 -1
$\bar{z}(n)$	1 1 1 1 -1 -1 -1 1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 1 -1 1 1 1 -1 1 1 -1 1 1 -1 -1 -1

Рис.2.9. m -последовательности, используемые в канале SSS

При этом основную m -последовательность $s(n)$ подвергают скремблированию m -последовательностью $c(n)$, а нечетные символы сигнала SSS вторично скремблируют m -последовательностью $z(n)$.

$$d(2n) = \begin{cases} s^{(m_0)}(n)c_0(n) & \text{в субкадре } 0 \\ s^{(m_1)}(n)c_0(n) & \text{в субкадре } 5 \end{cases}$$

$$d(2n+1) = \begin{cases} s^{(m_1)}(n)c_1(n)z^{(m_0)}(n) & \text{в субкадре } 0 \\ s^{(m_0)}(n)c_1(n)z^{(m_1)}(n) & \text{в субкадре } 5 \end{cases} \quad (2.4)$$

Последовательности $c_0(n)$ и $c_1(n)$ отличаются между собой сдвигом, определяемым $N_{ID}^{(2)}$:

$$c_0(n) = \bar{c} \left((n + N_{ID}^{(2)}) \bmod 31 \right)$$

$$c_1(n) = \bar{c} \left((n + N_{ID}^{(2)} + 3) \bmod 31 \right) \quad (2.5)$$

В (2.4) все символы последовательностей $d(n)$, $s(n)$, $c(n)$ и $z(n)$ принимают значения +1 или -1. Различие между $s^{(m_0)}$ и $s^{(m_1)}$, равно как между $z^{(m_0)}$ и $z^{(m_1)}$ состоит в циклическом сдвиге соответствующих m -последовательностей на m_0 и m_1 элементов.

Приняв сигналы PSS и SSS, UE читает информацию вещательного канала PBCH (Physical Broadcast Channel). По этому каналу передают MIB (Master Information Block), где указана полоса рабочих частот, конфигурация канала PICH, передан номер кадра SFN (System Frame Number) и определено число передающих антенн в eNB. Приняв MIB, UE может прочесть блоки системной информации SIB (System Information Block) в DL-SCH (Downlink Shared Channel). Эти блоки содержат информацию, необходимую для всех процедур в E-UTRAN (SIB1 – SIB5), для выполнения межсистемных хэндоверов (SIB6 – SIB8), идентификаторы фемтосот (SIB9) и предупреждения о землетрясениях и цунами (SIB10, SIB11). Наиболее важный блок SIB1 повторяют каждые 80 мс. Приняв системную информацию, UE выбирает eNB с наиболее сильным принимаемым сигналом и начинает **процедуру доступа к сети**.

2.3. Измерения, выполняемые UE

В процессе работы UE производит измерение трёх величин: RSSI, RSRP и RSRQ.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) – это полная мощность, измеренная UE во всей основной полосе. При агрегации полос UE производит измерение в полосе первичной соты и в полосах всех вторичных сот. Мощность RSSI – это мощность всех принятых символов (информационных и опорных, включая собственные шумы приёмника и помехи от соседних eNB).

RSRP (Reference Signal Received Power) – среднее значение мощности ресурсных элементов, в которых передают опорные сигналы. При передаче CRS измеряют мощность опорных символов, передаваемых через R0 (первой антенной), либо опорных символов двух первых антенн R0 и R1. Измерения производят на входе антенны UE. Если в UE использована схема разнесённого приёма, то значение RSRP берут по максимальному сигналу. Абсолютная погрешность при измерении RSRP лежит в диапазоне от ± 6 до ± 11 дБ в зависимости от уровня шума и условий окружающей среды. При использовании технологии агрегации полос введены дополнительные требования к точности измерений. Если обе полосы лежат в одном диапазоне, то погрешность в измерениях разности RSRP между этими полосами не должна превышать ± 3 дБ. Если первичные и вторичные соты находятся в разных диапазонах, то погрешность в измерении разности RSRP может быть увеличена до ± 6 дБ. Результаты измерения RSRP в дБм UE передаёт eNB в виде кода от 0 до 97. Диапазон отчетов RSRP определён от -140 дБм до -44 дБм с шагом в 1 дБм. Соответствие измеренных значений в дБм с их кодовыми значениями приведено в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Отчёт RSRP	Измеренное значение RSRP в дБм
RSRP_00	RSRP < -140
RSRP_01	$-140 \leq \text{RSRP} < -139$
RSRP_02	$-139 \leq \text{RSRP} < -138$
...	...
RSRP_95	$-46 \leq \text{RSRP} < -45$
RSRP_96	$-45 \leq \text{RSRP} < -44$
RSRP_97	$-44 \leq \text{RSRP}$

Третьей измеряемой характеристикой является качество приёма сигнала. Измерения проводят в ресурсных блоках, выделенных для передачи по каналу PDSCH. RSRQ (Reference Signal Received Quality) – это отношение

$$\text{RSRQ} = \frac{\text{RSRP}}{(\text{RSSI} / N_{\text{РБ}})} \text{ (дБ)}, \quad (2.6)$$

где $N_{\text{РБ}}$ – число ресурсных блоков, в которых проводят измерение. Измерение RSRQ проводят либо во всех ресурсных блоках выделенных полос (сот), либо в отдельных группах ресурсных блоков. Величина RSRQ служит индикатором качества приёма. eNB передаёт символы CRS всегда с максимальной мощностью. Вблизи eNB мощность передачи символов информационного сигнала значительно меньше уровня мощности передачи опорных символов. При этом RSRQ максимально. Для станций, находящихся на границе сот, eNB увеличивает мощность передачи информационных сигналов, что приводит к росту знаменателя в (2.6). Результаты измерения RSRQ представляют в дБ. Абсолютная погрешность измерений, как в пределах одной полосы, так и погрешность измерения в разных поло-

сах, не должна превышать ± 4 дБ. Коды измеренного RSRQ приведены в табл. 2.3. Шаг измерения составляет 0.5 дБ.

Таблица 2.3

Отчёт RSRQ	Измеренное значение RSRQ в дБ
RSRQ_00	$RSRQ < -19.5$
RSRQ_01	$-19.5 \leq RSRQ < -19$
RSRQ_02	$-19 \leq RSRQ < -18.5$
...	...
RSRQ_32	$-4 \leq RSRQ < -3.5$
RSRQ_33	$-3.5 \leq RSRQ < -3$
RSRQ_34	$-3 \leq RSRQ$

2.4. Селекция сот

Под селекцией сот понимают выбор соты абонентским терминалом при подключении UE к сети. Абонентский терминал выбирает соту по критериям S , которые должны быть больше нуля.

$$S_{rxlev} = \{Q_{rxlev\ meas} - (Q_{rxlev\ min} + Q_{rxlev\ min\ offset}) - P_{compensation}\} > 0 \quad (2.7)$$

$$S_{qual} = Q_{qual\ meas} - (Q_{qual\ min} + Q_{qual\ min\ offset}) > 0 \quad (2.8)$$

Величину $Q_{rxlev\ meas}$ UE определяет, измеряя на входе своего приемника мощность опорных символов, передаваемых eNB. $Q_{rxlev\ meas}$ – это RSRP. UE измеряет RSRP в отдельных РБ, принимая опорные сигналы антенного порта 0 и порта 1, если он активен.

Величину $Q_{qual\ meas}$ UE определяет, рассчитывая RSRQ по формуле (2.6).

$Q_{rxlev\ min}$ – минимальная величина (порог) RSRP, при которой возможно подключение UE к сети. $Q_{rxlev\ min\ offset}$ – дополнительная уставка, с помощью которой оператор может регулировать пороговый уровень при подключении абонентских станций к сети. $Q_{qual\ min}$ – минимальная величина (порог) RSRQ, при которой возможно подключение UE к сети, а $Q_{qual\ min\ offset}$ – дополнительная уставка. $Q_{rxlev\ min}$, $Q_{rxlev\ min\ offset}$, $Q_{qual\ min}$ и $Q_{qual\ min\ offset}$ передают в SIB3-4.

Величина $P_{compensation} = \max(P_{EMAX} - P_{UMAX}, 0)$ дБ – поправка, служащая для обеспечения надёжного соединения по радиointерфейсу при перемещении UE в соте. P_{EMAX} – максимальная требуемая мощность излучения вверх в той части соты, где потери на трассе максимальны; P_{UMAX} – максимальная мощность передатчика данной UE. Если разность $P_{EMAX} - P_{UMAX}$ отрицательна, $P_{compensation} = 0$.

2.5. Реселекция сот

Когда станция находится в состоянии IDLE, то, перемещаясь по сети, она переключается от соты к соте, выполняя процедуру реселекции. Для реселекции сот UE используют критерий R:

$$R_s = Q_{meas,s} + Q_{Hyst}$$

$$R_n = Q_{meas,n} + Q_{offset} \quad (2.9)$$

где R_s – для обслуживающей соты, а R_n – для соседней соты. Переключение на соседнюю соту происходит, если $R_n > R_s$. Q_{meas} – уровни измеренных сигналов соответствующих сот. Для устранения множественных переключений на границах сот в (2.9) введен гистерезис Q_{Hyst} , а в параметры соседней соты Q_{offset} . Оператор также регулирует минимальные временные интервалы между последующими переключениями.

Оператор может помечать соты как доступные (acceptable for camping), недоступные (barred), и доступные только для UE выделенных групп пользователей (reserved).

2.6 Процедура доступа UE к сети

Процедура доступа UE к сети является процедурой логического уровня L2. Она проиллюстрирована рис. 2.10. 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. 2.11 показан вариант для передачи преамбулы формата 0 длительностью в 1 субкадр (1 мс).

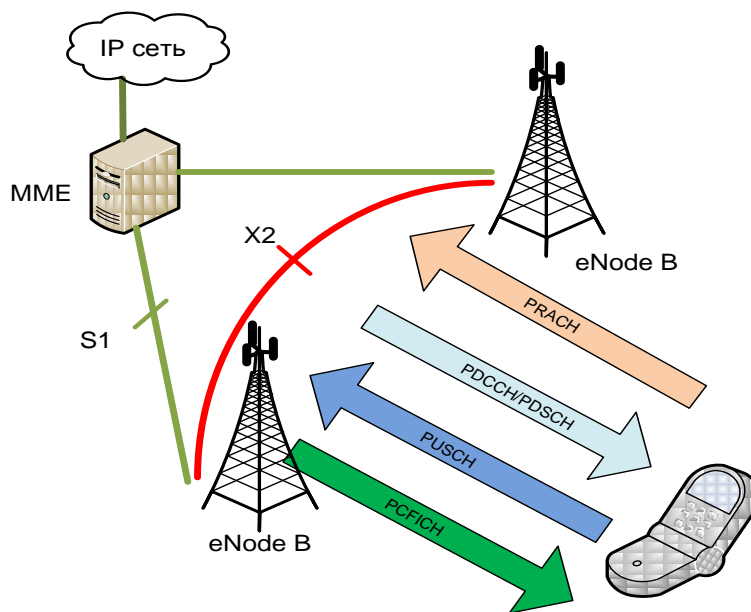


Рис.2.10. Процедура доступа UE к сети

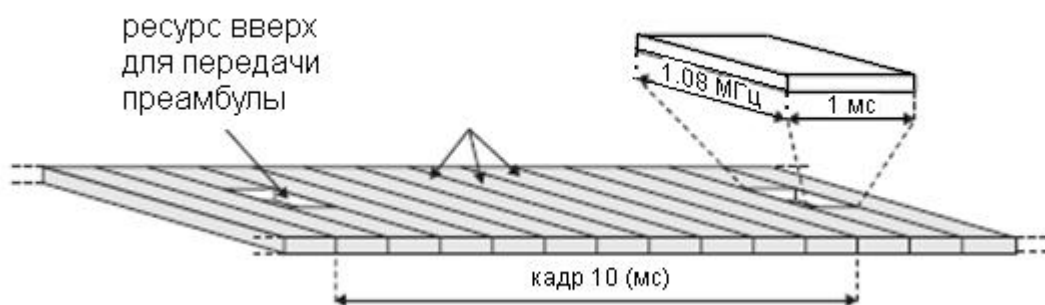


Рис.2.11 Выделение канального ресурса для передачи преамбулы

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. 2.12, 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).

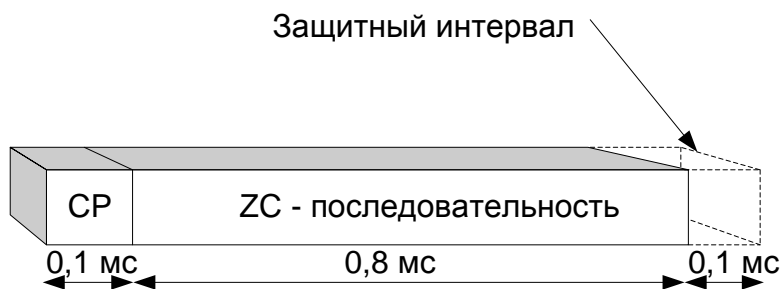


Рис.2.12. Временные соотношения при передаче преамбулы

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. 2.4).

Таблица 2.4

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.2.4 следует, что в формате 0 для передачи преамбулы выделяют 1 субкадр (напомним, что его длина составляет $30720 T_s$ - 1мс). 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 (рис.2.2). 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 пере-

дает 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 подключение к сети. Структура MAC RAR приведена на рис. 2.13.

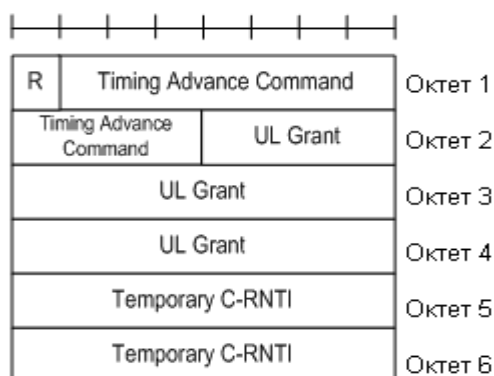


Рис.2.13. Структура MAC RAR

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...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...0,668мс (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.