

УДК 621.391

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГАРАНТИРОВАННОГО
КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ НИСХОДЯЩЕГО КАНАЛА СВЯЗИ
ТЕХНОЛОГИИ LTE**

Гаркуша С.В.

**Харьковский национальный университет радиоэлектроники
sv.garkusha@mail.ru**

Приведены результаты разработки математической модели планирования частотно-временного ресурса нисходящего канала связи технологии LTE. Предложенная модель направлена на обеспечение гарантированного качества обслуживания пользователей беспроводной сети путем выделения пользовательским станциям требуемых скоростей передачи. Показано, что предложенная модель в условиях высоких требований к скорости передачи пользовательских станций, по сравнению с известными методами, позволяет на 5–20% повысить степень балансировки пропускной способности нисходящего канала связи, а также на 40–100% повысить вероятность выделения пользовательским станциям требуемой скорости передачи.

В технологии LTE (Long-Term Evolution), разработанной 3GPP (3rd Generation Partnership Project), одним из эффективных путей повышения производительности и улучшения основных показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) является усовершенствование сетевых протоколов и механизмов, отвечающих за планирование доступных сетевых ресурсов. К подобного рода ресурсам, прежде всего, относятся временной ресурс – OFDM-символы (Orthogonal frequency-division multiplexing) и частотный ресурс – частотные поднесущие. В технологии LTE, как и в HSDPA или WiMAX, механизмы планирования ресурсов нисходящего канала связи не определены стандартом, оставляя право выбора за производителями оборудования базовых станций (evolved NodeB, eNodeB) [1-5].

Результатом решения задачи распределения частотного и временного ресурсов должно быть закрепление блоков планирования (Scheduling Block, SB) за пользовательскими станциями (User Equipment, UE) в нисходящем канале связи одного кадра. Блок планирования является наименьшим структурным элементом, выделяемым одной пользовательской станцией и формируемый двумя соседними ресурсными блоками (Resource Block, RB) на одинаковых поднесущих (subcarrier) [6].

Проанализированы методы распределения частотного и временного ресурсов, использующие алгоритм Round Robin Scheduler [3, 7, 8], Max C/I Ratio [7, 8] и Proportional Fair Scheduling [7-9]. Проведенный анализ показал, что использование указанных методов направлено на применение для интерактивного "best effort" класса данных, во избежание ситуации, при которой некоторые UE никогда не получают доступ к частотно-временному ресурсу. Использование указанного класса обслуживания (Class of Service, CoS) обеспечивает доставку данных UE по мере возможностей без гарантий скорости передачи данных. Повышение качества обслуживания должно быть направлено на обеспечение гарантированной скорости передачи с возможностью доступа к дополнительной (не гарантируемой) полосе пропускания. Однако ни один из проанализированных механизмов не способен обеспечить подобного CoS.

Принято решение о необходимости разработки математической модели планирования частотно-временного ресурса в нисходящем канале связи технологии LTE, сформулированной как задачи распределения SB, для обеспечения гарантированной скорости передачи UE.

Предлагаемая математическая модель направлена на применение в беспроводных сетях технологии LTE, использующих временное и частотное разделение каналов. При разработке математической модели учитывается тот факт, что наименьшей структурной

единицей радиоресурса, которой можно управлять при решении задачи планирования является SB [1].

В технологии LTE предложено три вида распределения ресурсов. Разработанная модель направлена на использование нулевого вида (Resource Allocation Type 0), предполагающего объединение RB в так называемые группы ресурсных блоков (resource block groups, RBG), которые выделяются UE. При этом количество RB входящих в состав одной RBG (p) зависит от используемой ширины частотного канала. В случае, если деление количества RB на параметр p не дает целочисленного значения, то крайняя RBG будет иметь размер меньший p [10].

С целью учета числа подкадров, выделенных для передачи информации в нисходящем канале связи [1, 2], в математическую модель введено понятие матрицы конфигураций нисходящего канала. Матрица является прямоугольной с количеством строк, соответствующим количеству конфигураций кадра (L), и с количеством столбцов, соответствующим количеству подкадров (K) в кадре, т.е.

$$H = \|h_{l,k}\|, (l = \overline{0, L-1}; k = \overline{0, K-1}), \quad (1)$$

где $h_{l,k} = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-й подкадр при } l\text{-й конфигурации используется} \\ & \text{для передачи информации в нисходящем канале связи;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

В ходе решения задачи распределения блоков планирования в рамках предлагаемой модели необходимо обеспечить расчет булевой управляющей переменной ($x_{k,m}^n$), определяющей порядок распределения блоков планирования:

$$x_{k,m}^n = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й блок планирования на } k\text{-м} \\ & \text{подкадре выделен } n\text{-й UE;} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (2)$$

где $m = \overline{0, M-1}$; $k = \overline{0, K-1}$; $n = \overline{1, N}$; M – число SB, формируемых на протяжении передачи одного подкадра; N – количество UE.

При расчете искомым переменных $x_{k,m}^n$ необходимо выполнить ряд важных ограничений:

1) Условие закрепления m -го SB нисходящего канала связи на протяжении передачи k -го подкадра не более чем за одной UE

$$\sum_{n=1}^N x_{k,m}^n \leq 1 (k = \overline{0, K-1}; m = \overline{0, M-1}). \quad (3)$$

2) Условие выделения UE блоков планирования только нисходящего канала:

$$\frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^N x_{k,m}^n}{M} \leq h_{l,k} (k = \overline{0, K-1}; l - \text{используемая конфигурация кадра}). \quad (4)$$

3) Условие закрепления за n -й UE количества SB, обеспечивающего необходимую скорость передачи в нисходящем канале связи при используемой схеме модуляции и кодирования (Modulation and Coding Scheme, MCS):

$$\begin{aligned} & \sum_{m=\frac{M}{2}-3}^{\frac{M}{2}+2} R_{SB}^0 x_{0,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}-3}^{\frac{M}{2}+2} R_{SB}^5 x_{5,m}^n + \sum_{m=0}^{\frac{M}{2}-4} R_{SB}^{0-9} x_{0,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}+3}^{M-1} R_{SB}^{0-9} x_{0,m}^n + \\ & + \sum_{m=0}^{\frac{M}{2}-4} R_{SB}^{0-9} x_{5,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}+3}^{M-1} R_{SB}^{0-9} x_{5,m}^n + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^4 R_{SB}^{0-9} h_{l,k} x_{k,m}^n + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=6}^{K-1} R_{SB}^{0-9} h_{l,k} x_{k,m}^n \geq R_{mpb}^n, \end{aligned} \quad (5)$$

при $n = \overline{1, N}$, l – используемая конфигурация кадра. В выражении (5) использованы следующие переменные:

- $R_{SB}^0 = \left((N_{symp}^{RB} N_{SF}^{RB} - N_{PDCCH} - N_{PSS,SSS} - N_{PBCH}) K_s - N_{pilot} N_{SF}^{RB} \right) R_c^{n,m} k_b^{n,m} / K T_{SF}$ – пропускная способность SB, формируемых на нулевом подкадре и передающих сигналы первичной синхронизации (Primary Synchronization Signal, PSS), вторичной синхронизации (Secondary Synchronization Signal, SSS) и широковещательный сигнал (Physical Broadcast Channel, PBCH), где $N_{PSS,SSS} = 2$, $N_{PBCH} = 4$ OFDM-символов соответственно, N_{symp}^{RB} – количество OFDM-символов, формирующих один ресурсный блок, $N_{SF}^{RB} = 2$ – количество RB, формируемых на одинаковых поднесущих и выделяемых UE на протяжении передачи одного подкадра, $N_{PDCCH} = 3$ – количество OFDM-символов в каждом подкадре, выделенных для передачи сигнала управления (Physical Downlink Control Channel, PDCCH), $N_{pilot} = 4$ – ресурсные элементы (Resource Element, RE), выделенные для передачи пилотных сигналов в одном RB, K_s – число поднесущих для передачи данных в одном RB и одном SB, $R_c^{n,m}$ – скорость кода, используемого при кодировании сигнала n -й UE на поднесущих m -го SB, $k_b^{n,m}$ – битовая загрузка OFDM-символа n -й UE на поднесущих m -го SB, $T_{SF} = 1$ мс – время передачи одного подкадра;

- $R_{SB}^5 = \left((N_{symp}^{RB} N_{SF}^{RB} - N_{PDCCH} - N_{PSS,SSS}) K_s - N_{pilot} N_{SF}^{RB} \right) R_c^{n,m} k_b^{n,m} / K T_{SF}$ – пропускная способность SB, формируемых на пятом подкадре и передающих сигналы PSS и SSS;

- $R_{SB}^{0-9} = \left((N_{symp}^{RB} N_{SF}^{RB} - N_{PDCCH}) K_s - N_{pilot} N_{SF}^{RB} \right) R_c^{n,m} k_b^{n,m} / K T_{SF}$ – пропускная способность SB, формируемых на всех подкадрах и содержащих из служебной информации только PDCCH.

4) Условие объединения RB в RGB размеров, удовлетворяющих ширине используемого частотного канала:

$$x_{k,m}^n = \frac{1}{p} \sum_{z=\left\lfloor \frac{m}{p} \right\rfloor}^{\left\lceil \frac{m}{p} + 1 \right\rceil} x_{k,z}^n \quad (n = \overline{1, N}; k = \overline{0, K-1}; m = 0, \left\lfloor \frac{M}{p} \right\rfloor p - 1); \quad (6)$$

$$x_{k,m}^n = \frac{1}{p} \sum_{z=\left\lfloor \frac{M}{p} \right\rfloor}^M x_{k,z}^n \quad (n = \overline{1, N}; k = \overline{0, K-1}; m = \left\lfloor \frac{M}{p} \right\rfloor p - 1, M), \quad (7)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – обозначение округления числа до ближайшего целого в меньшую сторону. Условие (7) используется для объединения блоков планирования крайней группы ресурсных блоков, размеры которой могут быть меньше p .

Задача распределения SB может быть решается с использованием критерия оптимальности, направленного на максимизацию общей производительности нисходящего канала связи. Таким образом, критерий оптимальности имеет вид:

$$\max \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=\frac{M}{2}-3}^{\frac{M}{2}+2} R_{SB}^0 x_{0,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}-3}^{\frac{M}{2}+2} R_{SB}^5 x_{5,m}^n + \sum_{m=0}^{\frac{M}{2}-4} R_{SB}^{0-9} x_{0,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}+3}^{M-1} R_{SB}^{0-9} x_{0,m}^n + \right. \\ \left. + \sum_{m=0}^{\frac{M}{2}-4} R_{SB}^{0-9} x_{5,m}^n + \sum_{m=\frac{M}{2}+3}^{M-1} R_{SB}^{0-9} x_{5,m}^n + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^4 R_{SB}^{0-9} h_{l,k} x_{k,m}^n + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=6}^{K-1} R_{SB}^{0-9} h_{l,k} x_{k,m}^n \right), \quad (8)$$

при учете условий-ограничений (3)-(7). Использование критерия оптимальности (8) совместно с условиями-ограничениями (3)-(7) направленно на обеспечение

гарантированной скорости передачи с возможностью доступа к дополнительной (не гарантируемой) полосе пропускания, что в CoS соответствует подклассу В.

Сформулированная задача с математической точки зрения является задачей смешанного целочисленного нелинейного программирования – MINLP (Mixed Integer NonLinear Programming). Переменная, используемая в критерии оптимальности (8), является целочисленной, ограничения на искомые переменные (3)-(5) носят линейный, а ограничения (6) и (7) нелинейный характер.

Проведен сравнительный анализ предложенной модели с известными методами который показал, что в условиях высоких требований к скорости передачи пользовательских станций использование модели. (2)-(8), по сравнению с известными методами, позволяет на 5-20 % повысить степень балансировки пропускной способности нисходящего канала связи, а также на 40-100 % повысить вероятность выделения пользовательским станциям требуемой скорости передачи. При этом производительность нисходящего канала связи, в условиях высоких требований к скорости передачи, на 3 % меньше производительности получаемой с использованием метода Max C/I Ratio и на 10-42 % больше производительности с использованием методов Round Robin и Proportional Fair.

Библиографический список

1. 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 11). – Valbonne, France: Sophia Antipolis, 2012. – 108 p.
2. Ghosh A., J. Zhang, R. Muhamed, Andrews J. Cr. Fundamentals of LTE. – Prentice Hall, USA, 2010. – 464 p.
3. Iosif O., Banica I. On the Analysis of Packet Scheduling in Downlink 3GPP LTE System // The Fourth International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service (CTRQ 2011). – 2011. – P. 99-102.
4. Гаркуша С.В. Разработка и анализ масштабируемой модели распределения подканалов в сети стандарта IEEE 802.16 // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. 2012. Вип. 4(33). С. 68-74.
5. Гаркуша С.В. Разработка и анализ модели распределения подканалов в сети стандарта IEEE 802.16 // Вісник національного університету «Львівська політехніка»: Радіоелектроніка та телекомунікації. 2012. № 738. С. 177-185.
6. Dahlman E., Parkvall S., Skold J., Beming P. 3G Evolution – HSPA and LTE for Mobile Broadband. – Academic Press, 2008. – 608 p.
7. Kawser M. T., Farid H. M. A. B., Hasin A. R., Sadik A. M. J., Razu I. K. Performance Comparison between Round Robin and Proportional Fair Scheduling Methods for LTE // International Journal of Information and Electronics Engineering. – 2012. – Vol. 2, No. 5. – P. 678-681.
8. Galaviz G., Covarrubias D. H., Andrade A. G., Villarreal S. A resource block organization strategy for scheduling in carrier aggregated systems // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2012. – P. 107-124.
9. Girici T., Zhu C., Agre J. R., Ephremides A. Proportional Fair Scheduling Algorithm in OFDMA-Based Wireless Systems with QoS Constraints // Journal of communications and networks. – 2010. – Vol. 12, No. 1. – P. 30-42.
10. 3GPP TS 36.213. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 11). – Valbonne, France: Sophia Antipolis, 2012. – 104 p.