

УДК 621.391

А.О. Воропаєва (аспірант)ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк
кафедра автоматики та телекомунікацій
E-mail: voropaeva_anna@meta.ua**РОЗРОБКА МЕТОДУ КЕРУВАННЯ БЕЗПРОВОДОВИМИ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ МЕРЕЖАМИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ
ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДУ МАКСИМІЗАЦІЇ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ МЕРЕЖІ**

В статті розглянуто варіант вирішення задачі максимізації завантаженості мережі при використанні абонентами сервісів, зі змінними вимогами щодо швидкості передачі. Пропонується застосовувати функції корисності для оптимізації роботи мережі, на основі яких розроблено алгоритм, який сходиться до оптимального розподілу швидкості передачі. **Ключові слова:** функція корисності, функція Лагранжа, оптимальний розподіл.

Загальна постановка питання

В умовах стрімкого розвитку інфокомунікаційних технологій для операторів зв'язку важливим стає питання економії та ефективного перерозподілу існуючих ресурсів, особливо обмежених в мережах безпроводового зв'язку в умовах переходу до стандартів нового покоління [1]. При цьому важливо враховувати рівень задоволеності абонента сервісом, яким він користується. В загальному випадку, при підвищенні якості ресурсів, що виділяються користувачу, його задоволеність теж підвищується. Однак, загальна кількість ресурсів мережі обмежена, та має бути розподілена між всіма абонентами мережі [2].

Зрозуміло, що неможливо забезпечити задоволеність всіх користувачів мережі одночасно. Відповідно, мережа потребує вірної стратегії розподілу ресурсів, яка буде базуватися на задоволеності кожного абонента та враховувати умови роботи мережі. Одним з підходів до рішення такої задачі є підхід максимізації завантаженості мережі (МЗМ) [3, 4].

Постановка задачі максимізації завантаженості мережі

Розглядається наступна задача оптимізації для управління потоком в мережі:

$$\sum_i U_i(x_i) \rightarrow \max ,$$

при обмеженнях на пропускну здатність та QoS

$$\sum_{i \in T(l)} x_i \leq c_l, \quad \forall l, \quad (1)$$
$$x_i \geq x_i^{\min}, \quad \forall i,$$

де $U_i(x_i)$ - функція корисності (ФК) абонента i , від аргументу швидкості x_i , $T(l)$ - набір абонентів, які використовують канал l , c_l - пропускна спроможність каналу, x_i^{\min} - мінімальна необхідна абонентові швидкість передачі.

Дану задачу автори [5, 6] розглядали як статистичну, тобто умови мережі (кількість абонентів, маршрути передачі, вимоги до швидкості обміну даними) вважались незмінними.

На практиці, такі умови можуть динамічно змінюватись, та цю динаміку потрібно враховувати для адекватного моделювання мережі. Таким чином, доцільно розглядати стохастичні задачі МЗМ. Вони можуть бути поділені на 3 класи в залежності від динаміки мережі:

1) стохастичний МЗМ з динамікою на сеансовому рівні (потоки повідомлень вважаються стохастичними). Для цього випадку питання розподілу ресурсів та стійкості

були досліджені в [7], де було розглянуто задачу обчислення максимуму очікуваної завантаженості для ТКМ зі змінною кількістю стохастичних потоків на сеансовому рівні;

2) стохастичний МЗМ з динамічними змінами довжини пакетів та змінними вимогами до швидкості сервісу. Для таких задач використовують імітаційне моделювання випадкової довжини пакетів;

3) стохастичний МЗМ з динамічними змінами обмежень. Набір обмежень для МЗМ задач також може мати динамічні характеристики. Наприклад, змінний набір обмежень може бути використаний для моделювання зміни станів каналу для бездротових мереж.

Окрім розглянутих типів задач можна розглядати змішані МЗМ, які включають в себе більш ніж одну стохастичність [8].

На практиці існує ще один тип задач, де динаміка довжини пакетів обумовлена ефектом пачечності прикладного рівня, тобто змінюються вимоги користувача щодо швидкості передачі. На протязі такого з'єднання кожний абонент чергує час передачі та час очікування. Тобто, його потреби щодо швидкості змінюються випадковим образом. Така поведінка може бути змодельована за допомогою переривчастих ТСП з'єднань, в котрих користувач передає данні через ТСП-з'єднання.

Розглянемо задачу керування потоком для сервісів зі змінними вимогами до швидкості передачі, аналогічними до HTTP сервісу. Фактично більшість мультимедійних сервісів (потокове відео, відео-виклик) мають змінні вимоги до швидкості передачі. В таких сервісах задоволеність користувача рівнем QoS залежить не тільки від виділеної йому швидкості. Вона може змінюватися при зміні вимог до швидкості передачі інформації. Тобто при одній й тій самій швидкості передачі, рівень задоволеності може бути високим в період, коли користувачеві потрібна нижча швидкість, та низьким, коли вимоги до швидкості зростають.

Задоволеність користувачем QoS повинна моделюватися з урахуванням зміни вимог до швидкості передачі. Це не може здійснюватися за допомогою статичної ФК, тому доцільно застосовувати динамічну ФК.

Розглянемо HTTP-подібний сервіс зі змінними вимогами до швидкостей передачі. Динамічна ФК для такого сервісу може бути записана як:

$$U(x, s) = \begin{cases} U(x), & \text{для стану передчі в момент } t, \\ 0, & \text{для стану очікування.} \end{cases}$$

Більш того, оскільки стани передачі та очікування передуються випадковим чином,

$U(x, t)$ слід формулювати як стохастичну функцію. Таким чином, сервіс з вимогами до швидкості, які змінюються стохастично буде змодельовано за допомогою стохастичної ФК.

Постановка задачі МЗМ для сервісів, що динамічно змінюються

Розглянемо мережу з N користувачами та L каналами. Кожний канал l має пропускну здатність c_l . Припускається, що наскрізний момент кожного користувача фіксований.

Позначимо $\bar{L}(i)$ - набір каналів, котрий користувач i проходить при своєму наскрізному з'єднанні, $\bar{N}(i)$ - набір шляхів, котрі використовує канал l . Набір станів обмежений, він назначає різні ФК для різних станів користувача. ФК конкретного стану відображає міру задоволеності користувачем назначеною йому швидкістю в цьому стані. Стани користувача змінюються із часом, тому в усі моменти часу йому має бути призначено ФК, яка відповідає рівню швидкості передачі в даному стані.

Припустимо, що зміна станів всіх користувачів, а відповідно і рівень їх вимог до швидкостей передачі, описано стаціонарним стохастичним процесом, при чому стан системи визначається комбінацією станів всіх користувачів в даний момент часу. Відповідно, не тільки кожен користувач, але і система в цілому може бути описана стаціонарним стохастичним процесом.

Позначимо чисто станів системи K , та імовірність, що система знаходиться в k -му стані - P_k . За відомим станом системи можна знайти стани та ФК всіх користувачів та навпаки. Тому далі буде використовуватися стан системи для моделювання вимог до швидкості, які змінюються стохастично, для всіх користувачів замість того, щоб розглядати поведінку кожного користувача окремо. Позначимо $S_{i,k}, \Phi_{i,k}(S_{i,k})$ відповідно швидкість передачі та ФК для i -го користувача в k -му стані. ФК вважається строго вогнутою та зростаючою.

Розглянемо 3 обмеження на управління потоком: за пропускною здатністю каналів, та два за вимогами QoS. Перше обмеження потребує, щоб сумарна швидкість по каналу не перевищувала його пропускну спроможність:

$$\sum_{k=1}^k P_k \sum_{i \in \bar{N}(l)} S_{i,k} \leq c_l, \quad \forall l. \quad (2)$$

Якщо середня сума швидкостей по комунікаційній ланці наближується до його пропускної здатності, то середня затримка по каналу наближується до нескінченності. Тому, середня сума швидкостей для каналу повинна бути меншою, ніж його пропускну здатність на величину $\eta_l * c_l$. Де η_l - бажаний трафік каналу $0 \leq \eta_l \leq 1$.

Друге обмеження враховує необхідність гарантованого мінімального рівня задоволеності всіх користувачів сеансом:

$$\sum_{k=1}^k P_k \Phi_{ik}(S_{ik}) \geq q_i, \quad \forall i, \quad (3)$$

де q_i - нижня границя значення СФК для i -го користувача.

Третє обмеження враховує те, що користувач вимагає швидкість передачі не нижче деякого мінімального рівня:

$$S_{ik} \geq S_{ik}^{\min}, \quad \forall i, k. \quad (4)$$

Таким чином, задача оптимізації формулюється:

$$F = \sum_{k=1}^k P_k \sum_{i \in \bar{N}(l)} \Phi_{ik}(S_{ik}) \xrightarrow{S_k} \max,$$

при обмеженнях:

$$\sum_{k=1}^k P_k \sum_{i \in \bar{N}(l)} S_{i,k} \leq c_l, \quad \forall l,$$

$$\sum_{k=1}^k P_k \Phi_{ik}(S_{ik}) \geq q_i, \quad \forall i,$$

$$S_{ik} \geq S_{ik}^{\min}, \quad \forall i, k.$$

Рішення даної задачі дає розподіл швидкості всіх користувачів для всіх станів, яке буде максимізувати завантаженість мережі при урахуванні обмежень на пропускну спроможність та вимоги QoS.

При відомій кількості станів k та імовірностей P_k задача зводиться до детерміністичної задачі випуклої оптимальності. Однак, таку інформацію доволі важко отримати апіорі.

Тому пропонується розробити розподілений алгоритм, котрий буде вирішувати дану задачу без апіорної інформації про імовірності станів мережі.

Функція Лагранжа для цільової функції має вигляд:

$$L(\mu, \lambda, S) = \sum_{k=1}^k P_k \sum_{i=1}^N \Phi_{ik}(S_{ik}) + \sum_{l=1}^L \mu_l (c_l - \sum_{k=1}^k P_k \sum_{i \in \bar{N}(l)} S_{i,k}) + \sum_{i=1}^N \lambda_i (\sum_{k=1}^k P_k \Phi_{ik}(S_{ik}) - q_i),$$

де

$$\bar{\mu} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_L], \quad \bar{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N], \quad \bar{S} = [S_1, S_2, \dots, S_k].$$

Тоді двоїста задача визначається:

$$\min_{\mu \geq 0, \lambda \geq 0} G(\bar{\mu}, \bar{\lambda}), \quad (6)$$

де $G(\bar{\mu}, \bar{\lambda}) = \max L(\bar{\mu}, \bar{\lambda}, \bar{S})$.

Для рішення задачі (6) визначається вектор, який максимізує L для даних $\bar{\mu}, \bar{\lambda}$.

$$\bar{S}(\bar{\mu}, \bar{\lambda}) = [S_1(\bar{\mu}, \bar{\lambda}), S_2(\bar{\mu}, \bar{\lambda}), \dots, S_L(\bar{\mu}, \bar{\lambda})].$$

А кожній S_k відповідає

$$\bar{S}_k(\bar{\mu}, \bar{\lambda}) = [S_{k,1}(\bar{\mu}, \bar{\lambda}), S_{k,2}(\bar{\mu}, \bar{\lambda}), \dots, S_{k,L}(\bar{\mu}, \bar{\lambda})].$$

Отже, функція Лагранжу приймає вигляд:

$$L(\bar{\mu}, \bar{\lambda}, \bar{S}) = \sum_{k=1}^k P_k L_k(\bar{\mu}, \bar{\lambda}, \bar{S}_k) + \sum_{l=1}^L \mu_l c_l - \sum_{i=1}^N \lambda_i q_i,$$

де

$$L_k(\bar{\mu}, \bar{\lambda}, \bar{S}_k) = \sum_{i=1}^N ((1 + \lambda_i) \Phi_{ik}(S_{ik}) - S_{ik} \sum_{l \in L(i)} \mu_l), \quad \forall k. \quad (7)$$

Задача оптимізації може бути вирішена без апріорної інформації про P_k шляхом максимізації $L_k(\bar{\mu}, \bar{\lambda}, \bar{S}_k)$ по k . Оптимальне рішення (7):

$$\bar{S}_k^*(\bar{\mu}, \bar{\lambda},) = \arg \max_{\bar{S}_k \geq \bar{S}_k^{\min}} \sum_{i=1}^N [(1 + \lambda_i) * \Phi_{ik}(S_{ik}) - S_{ik} \sum_{l \in L(i)} \mu_l], \quad \forall l. \quad (8)$$

Задача (7) має рішення:

$$\hat{\mu}_i = \sum_{l \in L(i)} \mu_l.$$

Оскільки $\Phi_{ik}(S_{ik})$ - вогнута та диференційована функція, то $\bar{S}_{ik}^*(\hat{\mu}_i, \lambda_i,)$ можна обчислити із (8).

Тепер розглянемо двоїсту задачу, в котрій необхідно мінімізувати двоїсту цільову функцію $G(\bar{\mu}, \bar{\lambda})$. Внаслідок випуклості функції двоїста задача є задачею випуклої стохастичної оптимальності. Однак, внаслідок відсутності інформації про стани системи, вона не може бути вирішена напряму. Тому повинен бути використаний стохастичний градієнтний алгоритм [9], який дозволяє вирішити цю проблему.

Даний алгоритм задається ітераційною процедурою:

$$\mu_l^{n+1} = [\mu_l^n - \Delta^n x_l^n], \quad \forall l, \quad \lambda_i^{n+1} = [\lambda_i^n - \Delta^n y_i^n], \quad \forall i.$$

де Δ^n - розмір кроку на n -й ітерації;

x_l^n, y_i^n - випадкові величини, котрі є елементами послідовності стохастичного градієнту

$G(\bar{\mu}, \bar{\lambda})$ в точках $\bar{\mu} = \bar{\mu}^n$ та $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}^n$.

Значення змінних x_l^n, y_i^n отримують із

$$x_l^n = c_l - \sum_{i \in N(l)} S_{ik}^n(\hat{\mu}_i^n, \lambda_i^n), \quad \forall l, \quad y_i^n = \Phi_{ik}^n(S_{ik}^n(\hat{\mu}_i^n, \lambda_i^n)) - q_i, \quad \forall i.$$

де k^n - стан системи на n -й ітерації. Тоді $\bar{\mu}^n, \bar{\lambda}^n$ сходяться з імовірністю 1 до оптимальних рішень $\bar{\mu}^*, \bar{\lambda}^*$, якщо розмір кроку задовольняє умовам:

$$\Delta^n \geq 0, \sum_{n=0}^{\infty} \Delta^n = \infty, \sum_{n=0}^{\infty} (\Delta^n)^l < \infty. \quad (9)$$

Крім того, оскільки задача є задачею випуклої оптимальності, при суворо вогнутій цільовій функції, вектор рішення (8) є оптимальним.

Розробка методу керування потоком безпроводової телекомунікаційної мережі нового покоління

Пропонуються наступний метод керування потоком:

1. Задати початкові значення векторів $\bar{\mu}, \bar{\lambda}$.

2. Для кожної n -ї ітерації виконувати наступні дії:

- для кожного i -го користувача:

- розраховується його швидкість передачі даних, базуючись на його множині

Лагранжа λ_j^n та множині каналів, яку він використовує:

$$S_{ik}^n(\hat{\mu}_i^n, \lambda_i^n) = \arg \max_{S_{ik} \geq S_{ik}^{\min}} (1 + \lambda_i^n) \Phi_{ik}(S_{ik}) - S_{ik} \hat{\mu}_i^n,$$

- розраховується значення його множини Лагранжа для наступної ітерації, ґрунтуючись на поточному значенні ФК, та з урахуванням обмеження на QoS (4):

$$y_i^n = \Phi_{ik}^n(S_{ik}^n(\hat{\mu}_i^n, \lambda_i^n)) - q_i, \lambda_i^{n+1} = [\lambda_i^n - \Delta^n y_i^n],$$

- для кожного каналу розраховується значення його множини Лагранжу для наступної ітерації, базуючись на сумарній швидкості користувачів, що використовують цей канал.

$$x_l^n = c_l - \sum_{i \in N(l)} S_{ik}^n(\hat{\mu}_i^n, \lambda_i^n), \forall l, \mu_l^{n+1} = [\mu_l^n - \Delta^n x_l^n].$$

Запропонований алгоритм може бути реалізований окремо для кожного користувача та кожного каналу, ґрунтуючись тільки на локальній інформації. Кожному абонентові не потрібно мати інформацію про поточний стан усієї системи, а лише знати суму множин Лагранжа усіх каналів, які він використовує та поточне значення своєї ФК. Також кожний користувач має змінювати власний стан та ФК відповідно до змін своїх швидкісних вимог.

Сума множників Лагранжу може передаватися через канали його маршруту у службових пакетах. Також кожний канал має знати миттєву сумарну вхідну швидкість на поточній ітерації, яка може надходити до вузлів-джерел, що використовують цей канал у службових пакетах, або спеціальних полях пакетів даних, або шляхом вимірювань.

Висновки

В статті розглянуто задачу управління потоком в безпроводових телекомунікаційних мережах нового покоління на основі ФК. Зазначено, що раніше ФК розглядалися як детермінована функція, тобто справедливо, якщо потреби користувача до швидкості обміну даними є фіксованими на протязі всього сеансу зв'язку.

Задача управління потоком формулюється як стохастична задача оптимізації за критерієм максимізації середньої ФК мережі при обмеженнях на пропускну здатність комунікаційних ланок та вимог QoS. Для рішення даної задачі оптимізації пропонується розподілений метод керування безпроводовими телекомунікаційними мережами нового покоління, котрий сходиться до оптимального розподілу швидкості передачі.

Список використаної літератури

1. Дегтяренко І.В., Шахов Д.С., Кнерцер Д.О., Орехов О.О. Модель розвитку мережі мобільного оператора при використанні технології LTE/SON // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. Випуск 20 (182) - Донецьк, ДонНТУ, 2011. - С. 130 - 136
2. Зорі А.А., Воропаєва А.О. Оптимізація розподілу ресурсів телекомунікаційної системи з урахуванням функції корисності // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту – Випуск 32. – Донецьк 2012 – с.106-108.
3. F. Kelly, Charging and rate control for elastic traffic, *European Transactions on Telecommunications* 8 (1) (1997) 33–37.
4. F. Kelly, A. Maulloo, D. Tan, Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability, *Journal of the Operational Research Society* 49 (3) (1998) 237–252.
5. Воропаєва А.О. Оптимальне управління режимами прийому та передачі телекомунікаційних мереж // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 1 (24) - Донецьк, ДонНТУ, 2013. С - 89-95.
6. J. Cho, S. Chong, Utility max-min flow control using slope-restricted utility functions, *IEEE Transactions on Communications* 55 (5) (2007) 963–972.
7. K. Ma, R. Mazumdar, J. Luo, On the performance of primal/dual schemes for congestion control in networks with dynamic flows, in: *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2008.
8. Y. Yi, M. Chiang, Stochastic network utility maximization, *European Transactions on Telecommunications* 19 (4) (2008) 421–442.
9. P. Kall, S.W. Wallace, *Stochastic Programming*, Wiley, 1994.

References

1. Degtyarenko, I., Shahov D., Knertser D., Orehov O. (2011) “Model of development of the mobile operator’s network based on LTE/SON technology”, *Proceedings of Donetsk National Technical University. Series: "Computers and Automation"* vol. 20 no 182, 2011 pp/130-136.
2. Zori A., Voropaeva A., (2012) “Optimization of resource allocation telecommunication system based on the utility function”, *Scientific Papers of Donetsk Institute of Railway Transport Ukrainian State Academy of Railway Transport* vol 32 pp/ 106-108.
3. F. Kelly, Charging and rate control for elastic traffic, *European Transactions on Telecommunications* 8 (1) (1997) 33–37.
4. F. Kelly, A. Maulloo, D. Tan, Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability, *Journal of the Operational Research Society* 49 (3) (1998) 237–252.
5. Voropaeva A., (2013) “Optimal control modes of reception and transmission of telecommunications networks”, *Proceedings of Donetsk National Technical University. Series: "Computers and Automation"* vol. 1 no 24, 2013 pp 89-95.
6. Cho, S. Chong, Utility max-min flow control using slope-restricted utility functions, *IEEE Transactions on Communications* 55 (5) (2007) 963–972.
7. K. Ma, R. Mazumdar, J. Luo, On the performance of primal/dual schemes for congestion control in networks with dynamic flows, in: *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2008.
8. Y. Yi, M. Chiang, Stochastic network utility maximization, *European Transactions on Telecommunications* 19 (4) (2008) 421–442.
9. P. Kall, S.W. Wallace, *Stochastic Programming*, Wiley, 1994.

Надійшла до редакції:
20.03.2014 р.

Рецензент:
докт. техн. наук, проф. Зорі А.А.

А.А. Воропаева

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

Разработка метода управления беспроводными телекоммуникационными сетями нового поколения на основе применения подхода максимизации загрузки сети. В статье рассмотрен вариант решения задачи максимизации загрузки сети при использовании абонентами сервисов с изменяющимися требованиями скорости передачи. Предлагается применение функций полезности для оптимизации работы сети, на основе которых разработан алгоритм, который сходится к оптимальному распределению скорости передачи.

Ключевые слова: функция полезности, функция Лагранжа, оптимальное распределение.

A. Voropaeva

Donetsk National Technical University

Method control wireless telecommunications networks based on next-generation approach to maximize the network congestion. The framework of network utility maximization (NUM) has become an important part of resource allocation in communication networks due to its broad adaptability to various problems and network protocols. In this framework, each user is assigned a utility function that represents its satisfaction to the quality of service (QoS) of its communication service according to the amount of resource allocation. Then, resource allocation is performed such that network utility, which is defined as the sum of utilities of all users in the network, is maximized while satisfying some constraints on resource allocation, such as the total amount of the available resource. In this paper a utility based flow control problem for a wireless communication network is develop. The article presents an option for solving the problem of maximizing network utilization using subscriber services with the changing requirements of the transmission rate. In wireless communication networks, many services are variable rate services, i.e., the degree of their rate requirement varies over time, which cannot be modeled with traditional static utility functions. Author proposes to solve this problem via stochastic utility function that varies stochastically according to the variation of the degree of the rate requirement of a service. There offered examples of utility functions to optimize the operation of the network on which the algorithm that converges to an optimal allocation of transmission rate. A flow control problem as a stochastic optimization problem with stochastic utility functions that aims at maximizing the average network utility while satisfying the constraint on link capacity and QoS requirement is solving. Using the approach of maximizing network utilization for services with varying bandwidth requirement. A distributed flow control algorithm that converges to the optimal rate allocation is develop in article.

Keywords: utility function, the Lagrange function, the optimal allocation



Воропаева Анна Александровна, Украина, закончила Донецкий национальный технический университет, аспирант третьего года обучения, ассистент ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – методы исследования и оптимизации беспроводных телекоммуникационных сетей.