

УДК 621.39

А.О. Воропаєва

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк
 кафедра автоматики та телекомунікацій
 E-mail: voropaeva_anna@meta.ua

ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ ПРИЙОМУ ТА ПЕРЕДАЧІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

В статті розглянуто синхронний та асинхронний методи управління телекомунікаційною мережею. Сформульовано вимоги до функції корисності з урахуванням не тривіальності задачі оптимізації, яка декомпозується на дві частини: користувача та мережі. Сформульовано функцію оптимізації у вигляді цінного вектору. При асинхронній роботі мережі пропонується використовувати середньозважений режим, до оцінки якого сформульовані певні вимоги.

Ключові слова: функція корисності, синхронний режим роботи, цінний вектор, смуга пропускання, проблема оптимізації.

Зважаючи на бурхливий розвиток інфокомунікаційних мереж, а відповідно і стрімке підвищення вимог користувачів до різних видів сервісів, можна зауважити, що ресурси мережі операторів є дещо обмеженими, та, нажаль, не можуть розвиватися такими ж темпами. Зрозуміло, що стає необхідним використання сучасних тенденцій управління мережею, при котрих вузли мережі можуть змінювати свою працездатність, а комунікаційні ланки смугу пропускання в залежності від вимог до послуги. Методи керування повинні враховувати режими роботи вузлів в залежності від функціонування мережі.

Загальна постановка питання

Телекомунікаційну мережу будемо представляти у вигляді множини вузлів S та комунікаційних ланок L , які об'єднуються у неорієнтований граф $G = \{S, L\}$ при чому, $L < S$. Також висувається декілька обмежень щодо роботи мережі:

- неможливий двосторонній режим роботи вузлів, тобто вузол не може приймати та передавати інформацію одночасно;
- вузол може приймати дані тільки з одного вузла в даний момент часу;
- кожна ланка мережі отримує хоча б один мовний канал та часовий інтервал може бути призначений ланці тільки за умови виконання заданого співвідношення сигнал/шум γ_0 .

При чому:

$$SNR(i, j) = \frac{P_i}{L_b(i, j)N_r} \geq \gamma_0$$

де P_i - потужність передатчика, L_b - величина шляху між вузлами i та j , N_r - ефект термального шуму [1].

Задача оптимального управління такою мережею полягає в знаходженні максимуму функції корисності $U_s(x_s)$, яка залежить від режиму передачі x_s . Для рішення задачі пропонується використати методи градієнтного прогнозування, в якому кожна ланка та вузол мережі розглядаються як процесори розрахункової системи [2].

© Воропаєва А.О., 2013

Кожній комунікаційній ланці $l \in L$ призначається характеристика p_l («ціна») яка відображає смугу пропускання ланки. Характеристика вузлів мережі залежить від ланок наступним чином: $p^s = \sum p_l$. При чому сума береться серед усіх ланок, які використовує вузол мережі. Потрібно обрати такий режим передачі x_s , при котрому корисність $U_s(x_s) - p^s x_s$ буде максимальною. Треба зауважити, що цей оптимальний режим передачі може бути глобально не оптимальним для глобального значення функції корисності. Наближувати цінове значення пропонується ітераційним методом (для локальних і глобальних випадків).

Для кожного вузла мережі виділяють параметри мінімуму та максимум режимів передачі $m_s \geq 0$ та $M_s < \infty$. Джерело s досягає корисності $U_s(x_s)$, коли його відповідний режим передачі x_s задовольняє умові $m_s \leq x_s \leq M_s$. Метою оптимізації є знаходження такого джерела з режимом передачі $x = (x_s, s \in S)$ для котрого [2]:

$$P: \max_{x_s \in I_s} \sum_s U_s(x_s) \quad (1)$$

при обмеженні $\sum_{s \in S(l)} x_s \leq c_l, \quad l = 1, \dots, L$

де c_l - ємність комунікаційної ланки.

Формулювання вимог до функції корисності

Виділяються два режими роботи вузлів: прийом та передача. Отже, для кожної пари користувачів можна позначити:

$$x_{i_0}^t = x_{i_1}^r \quad \text{та} \quad x_{i_0}^r = x_{i_1}^t$$

відповідно, t – режим передачі, а r – прийому. Враховуючи це, можна записати функції корисності:

$$U_{i_j}(u_{i_j}^t, u_{i_j}^r) = \begin{cases} u_{i_j}^t \\ u_{i_j}^r \end{cases},$$

відповідно для напрямку передачі для одностороннього сеансу зв'язку.

$$U_{i_j}(u_{i_j}^t, u_{i_j}^r) = [\theta_{i_j}^t (u_{i_j}^t)^{\rho_i} + \theta_{i_j}^r (u_{i_j}^r)^{\rho_i}]^{1/\rho_i} \quad \text{для двостороннього сеансу} \quad (2)$$

де $0 < \theta_{i_j}^t, \theta_{i_j}^r < 1$; - відповідні коефіцієнти прийому (r) та передачі (t) i -го вузла та відповідної j -ї комунікаційної ланки, та $\theta_{i_j}^t + \theta_{i_j}^r = 1$. При чому, $\rho_i \leq 1$ являє собою вогнутість функції корисності, яка в такому вигляді (2) має назву константи еластичності заміщення [3]. Коефіцієнт кривизни ізокванти залежності функцій корисності різних режимів сеансу зв'язку має вигляд:

$$\sigma = \frac{1}{1 - \rho_i}$$

В залежності від вогнутості ρ та кривизни ізокванти σ функція корисності рівня сесії змінюється наступним чином:

$$\rho_i = 1, \quad \sigma_i \rightarrow \infty$$

$$U_{i_j}(u_{i_j}^t, u_{i_j}^r) = \theta_{i_j}^t u_{i_j}^t + \theta_{i_j}^r u_{i_j}^r,$$

в цьому випадку задоволеність користувачем кожним напрямком зв'язку має незалежний вплив на загальну функцію корисності (наприклад, сервіси передачі файлів FTP);

$$\rho_i = 0, \sigma_i \rightarrow 1,$$

$$U_{i_j}(u_{i_j}^t, u_{i_j}^r) = \theta_{i_j}^t \log(u_{i_j}^t) + \theta_{i_j}^r \log(u_{i_j}^r),$$

можливе досягнення пропорційності між режимами прийому та передачі за допомогою використання такої функції корисності (сервіси відеоконференцій та відео за запитом);

$$\rho_i \rightarrow -\infty, \sigma_i \rightarrow 0,$$

$$U_{i_j}(u_{i_j}^t, u_{i_j}^r) = \min[u_{i_j}^t, u_{i_j}^r]$$

функція корисності кожного клієнта визначається мінімальним значенням з рівнів корисності сесій (сервіси VoIP).

Для умов реальних мереж функція корисності після застосування ряду Лагранжа має вигляд:

$$D(p) = \max_{x_s \in I_s} L(x, p) = \sum_s B_s(p^s) + \sum_l p_l c_l$$

$$B_s(p^s) = \max_{x_s \in I_s} U_s(x_s) - x_s p^s; \quad p^s = \sum_{l \in L_s} p_l \quad (3)$$

Можна відмітити, що задача оптимізації є нетривіальною та двоїстою, в якій існує оптимум $p^* \geq 0$ для котрого $(x_s(p^*), s \in S)$ є первісним оптимальним значенням. З твердження (3) враховуючи, що $x^* = x(p^*)$ можна отримати максимум для джерела s . При переході до матриці маршрутів:

$$R_{ls} = \begin{cases} 1, & l \in L(s), s \in S(l); \\ 0, & \text{у інших випадках.} \end{cases}$$

Для кожного джерела s компонент $p^s = \sum_{l \in L(s)} p_l$ вказує вартість смуги пропускання для s . Відповідно для комунікаційної ланки l $x^l = \sum_{s \in S(l)} x_s$ ілюструє режим передачі в ланці.

Коли p скалярна, то можна знехтувати нескалярністю функції x_s :

$$x_s(p) = [U_s'^{-1}(p)]_{m_s}^{M_s}, \quad (4)$$

де $U_s'^{-1}$ - інверсоване значення U_s' , котре існує в діапазоні $[U_s'(M_s), U_s'(m_s)]$ за умови, що U_s вогнута. Коли p – вектор, то $x_s(p) = x_s(p^s) = x_s(\sum_{l \in L(s)} p_l)$.

Нехай $x(p) = (x_s(p), s \in S)$, тоді можна дійти до припущення для функції корисності [2]:

- на інтервалі $I_s = [m_s, M_s]$ функція корисності телекомунікаційної мережі U_s зростаюча, вогнута, та двічі диференційована: $\sum_{s \in S(l)} m_s \leq c_l, \forall l \in L$;
- кривизна U_s має відмінне від нульового значення $I_s : -U_s''(x_s) \geq 1/\bar{\alpha}_s > 0, \forall x_s \in I_s$.

Синхронний та асинхронний методи керування мережею

Для визначення оптимального рішення використовується метод керування мережею, робота якого основана на висунутих вимогах до функції корисності. Пропонується використовувати градієнтний метод. Вартість комунікаційних ланок регулюється градієнтом:

$$p_l(t+1) = \left[p_l(t) - \gamma \frac{\partial D}{\partial p_l}(p(t)) \right] \quad (5)$$

Треба зауважити, що з виразу (5) потрібно взяти максимум у випадку додатних значень та нуль при від'ємних. Якщо звернути увагу на поставлену раніше задачу оптимізації (1), то :

$$D(p) = \sum_s (U_s(x_s(p)) - x_s(p)p^s) + \sum_l p_l c_l .$$

Враховуючи те, що функція корисності зростаюча та вогнута:

$$p_l(t+1) = \left[p_l(t) + \gamma(x^l(p(t)) - c_l) \right] \oplus 0 \tag{6}$$

мається на увазі те, що у випадку від'ємного значення виразу вартість приймає нульове значення.

Якщо вимоги до смуги пропускання перевищують існуючу ємність, то підвищується вартість і навпаки. Метод вирішує двоїсту задачу цільової функції та дозволяє вузлам мережі досягати мети оптимізації та обирати необхідний режим передачі по комунікаційній ланці. В свою чергу ланки відновлюють вартість передачі і повідомляють про це вузлу. Синхронізація роботи вузлів та ланок проходить наступним чином:

Комунікаційна ланка l в моменти часу $t = 1, 2, \dots$:

- 1) отримує інформація про режими передачі $x_s(t)$ від усіх джерел $s \in S(l)$, які пов'язані з нею;
- 2) оновлює вартість за (5);
- 3) повідомляє про оновлення всім джерелам, які використовують дану ланку.

В свою чергу джерело s в зазначені моменти часу:

- 1) отримує від мережі інформацію про $p^s(t) = \sum_{l \in L(s)} p_l(t)$;
- 2) обирає новий режим передачі: $x_s(t+1) = x_s(p^s(t))$;
- 3) повідомляє про новий режим передачі усім ланкам на шляху.

Таким чином, оптимізаційна проблема декомпозується на дві частини: користувача та мережі. Зі сторони користувача необхідно обрати вектор w_s що являє собою ціну, яку необхідно сплатити за послугу, що надається, і зрозуміло, з найбільшою вигідністю для клієнта. В свою чергу для мережі необхідно обрати відповідний режим передачі ($x_s, s \in S$) з метою максимізації цінового вектору. Доведено [3] що існують оптимальний шлях $p_s, s \in S$, режим передачі $x_s, s \in S$ та ціновий вектор $w_s, s \in S$, котрі вирішують поставлені проблеми мережі та користувача. Отже, для двоїстої проблеми оптимізації:

$$\frac{d}{dt} x_s(t) = \gamma(w_s - x_s(t) \sum_{l \in L(s)} p_l(t)), \quad p_l(t) = f_l\left(\sum_{s \in S(l)} x_s(t)\right) \tag{7}$$

$$\frac{d}{dt} p_l(t) = \gamma\left(\sum_{s \in S(s)} x_s(t) - q_l(p_l(t))\right), \quad x_s(t) = \frac{w_s}{\sum_{l \in L(s)} p_l(t)} \tag{8}$$

Зрозуміло, що в певних випадках, наприклад при $U_s(x_s) = w_s \log x_s$, наведений вище синхронний алгоритм роботи мережі приймає вигляд (8).

В результаті метод знаходить послідовність, наближену до оптимального рішення, яка задовольняє умовам, висунутим до функції корисності. Тобто, виявляється довжина найдовшого шляху $\bar{L} := \max_{s \in S} |L(s)|$, визначається кількість джерел, що входять до найбільш перевантаженої комунікаційної ланки $\bar{S} := \max_{l \in L} |S(l)|$ та вища границя всіх $U_s''(x_s) \bar{\alpha} := \max\{\bar{\alpha}_s, s \in S\}$.

Треба зазначити, що наведений вище синхронний метод дозволяє оптимізувати роботу мережі в дискретні моменти часу $t = 1, 2, \dots$

При розгляданні мережі з асинхронним налаштуванням (умови якої, доречі, ближчі до реальних мереж) виникають деякі відмінності, котрі потребують додаткового аналізу [4]. Стан мережі залежить від різних вузлів при різних режимах роботи. При оптимізації мереж такого типу деякі вузи повинні працювати швидше та виконувати більше ітерацій за певний часовий інтервал, величина затримки в мережі є істотною та змінною. Отже, для оптимізації мереж такого типу до вище приведеного синхронного методу оптимізації необхідно внести деякі зміни. Нехай $T_l^1 \subseteq \{1, 2, \dots\}$ - часові моменти, коли комунікаційна ланка l регулює ціну передачі інформації в залежності від режиму передачі вузла; в моменти часу $t \notin T_l^1, p_l(t+1) = p_l(t)$. Тоді визначається ще одна множина часових інтервалів $T_s^2 \subseteq \{1, 2, \dots\}$ при котрих вузи мережі змінюють свої режими роботи. В моменти часу $t \notin T_s^2, x_s(t+1) = x_s(t)$. При $t \in T_l^1$ комунікаційна ланка визначає оцінку $\lambda_l(t)$ градієнту та оптимізує ціну:

$$p_l(t+1) = [p_l(t) - \gamma \lambda_l(t)]$$

Оцінка градієнту визначається з урахуванням інформації про режими роботи вузлів, котрі відносяться до комунікаційної ланки l :

$$\begin{aligned} \lambda_l(t) &= c_l - x^l(t) \\ x^l(t) &= \sum_{s \in S(l)} x_{l_s}(t) \end{aligned} \tag{9}$$

$$x_{l_s}(t) = \sum_{t'=t-t_0}^t a_{l_s}(t', t) x_{l_s}(t') \tag{10}$$

де

$$\sum_{t'=t-t_0}^t a_{l_s}(t', t) = 1, \quad \forall t, \forall l, s \in S(l)$$

З (9) визначається наближений режим $\hat{x}^l(t)$ роботи вузлів мережі який отримується як середньозважений показник попередніх режимів. Для такого підходу висуваються наступні вимоги:

1) для оцінки $x^l(t)$ використовується інформація з останнього режиму роботи джерел

$$x_{l_s}(\tau) \text{ для } \tau \in \{t-t_0, \dots, t\}. \text{ тоді } a_{l_s}(t', t) = \begin{cases} 1, & t' = \tau \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases};$$

2) для оцінки $x^l(t)$ використовуються тільки останні k значень. Тобто

$$a_{l_s}(t', t) := \begin{cases} > 0, & t' = \tau - k + 1, \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases}.$$

Вищевказані вимоги призводять до наступного: якщо режим роботи вузла $x_{l_s}(t')$ для $t' > \tau$ не було отримано для комунікаційної ланки l в момент часу t , то режими $x_{l_s}(t')$ для $t' < \tau$ або для $t' \leq \tau - k$ не розглядають.

В моменти часу $t \in T_s^2$ джерело складає оцінку шляху: $x_s(t) = x_s(p^s(t))$. При цьому

$$\begin{aligned} p^s(t) &= \sum_{l \in L(s)} p_{ls}(t), \\ p_{ls}(t) &= \sum_{t''=t-t_0}^t b_{ls}(t'', t) p_{l_s}(t''), \quad l \in L(s), \quad \sum_{t''=t-t_0}^t b_{ls}(t'', t) = 1, \quad \forall t, \forall l, l \in L(s). \end{aligned}$$

Всі обчислення вузла телекомунікаційної мережі можуть притримуватися синхронного методу, за виключенням того, що треба враховувати оцінку оптимального

шляху мережі $p^s(t)$. Приблизна така оцінка може бути отримана з усередненого значення оцінок, отриманих на попередніх кроках ітераційного процесу та залежить, відповідно, від (l, s, t) . Треба зауважити, що така оцінка є приблизною, тому, що залежить від якогось кінцевого числа ітерацій.

З (10) випливає те, що часова затримка між $b(l, s) > t_0$. Пропонується вживати асинхронний градієнтний метод, який враховує ненапрявленість комунікаційних ланок:

1) комунікаційна ланка отримує інформацію від всіх вузлів мережі, що пов'язані з нею;

2) в кожен момент часу $t \in T_l^1$ комунікаційна ланка проводить оцінку $\lambda_l(t)$ з $dD/dp_l(p(t))$ та регулює ціну: $p_l(t+1) = [p_l(t) - \gamma\lambda_l(t)]^+$, при чому: $\forall t \notin T_l^1 \quad p_l(t+1) = p_l(t)$;

3) комунікаційна ланка повідомляє про ціну передачі інформації всім пов'язаним з нею вузлам мережі.

Відповідно для вузлів мережі:

1) вузол мережі отримує інформацію про ціну потрібної для надання відповідної послуги смуги пропускання та оптимальний шлях від комунікаційної ланки;

2) в кожен момент часу $t \in T_s^2$ вузол обирає режим передачі, базуючись на знаннях про ціну $p^s(t)$: $x_s(t+1) = x_s(p^s(t))$. Тоді вузол передає інформацію в обраному режимі передачі, при чому $\forall t \notin T_s^2 \quad x_s(t+1) = x_s(t)$;

3) в зазначені моменти часу вузол мережі повідомляє про обраний режим передачі відповідним комунікаційним ланкам.

Нехай $\bar{x}_s(t)$ - обраний оптимальний режим передачі, тоді якщо вузол мережі має інформацію про ціновий вектор:

$$\bar{x}_s(t) = x_s(p^s(t));$$

$p^s(t)$ визначається з асинхронного методу, який наближує середнє значення ціни до реального за умови, що часові інтервали кінцеві.

Висновки

1. Поставлено задачу оптимального управління телекомунікаційною мережею та запропоновано для її рішення використовувати градієнтний метод.

2. Сформульовано вимоги до функції корисності. Зазначено, що на всьому інтервалі функція повинна бути зростаючою та вогнутою а також мати відмінне від нульового значення коефіцієнта кривизни ізокванти.

3. Запропоновано для дискретних моментів часу використовувати синхронний метод для оптимального управління телекомунікаційною мережею, котрий вирішує двоїсту задачу цільової функції та дозволяє вузлам мережі досягати мети оптимізації та обирати необхідний режим передачі по комунікаційній ланці.

4. Для асинхронних режимів роботи отримано асинхронний метод керування, який використовується для реальних мереж та враховує дуплексність каналів зв'язку.

Список використаної літератури

1. Воропаєва А.О. Критерії та методи оптимізації бездротових динамічних систем / А.О. Воропаєва // Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти. – 2012. – Т. 3, вип. 1. – С. 85.
2. Зорі А.А. Оптимізація розподілу ресурсів телекомунікаційної системи з урахуванням функції корисності / А.А. Зорі, А.О. Воропаєва // Збірник наук. праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – 2012. – Вип. 32. – С. 106-108.

3. Luenberg D.G. Linear and nonlinear programming / D.G. Luenberg. - 2nd ED. - Reading, M.A. Addison-Wesley, 1984.
4. Kelly F.P. Charging and rate control for elastic traffic / F.P. Kelly // Euro. Trans. Telecommun. – 1997. – Vol. 8. – P. 33-37.

Надійшла до редакції:
31.03.2013

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Скобцов Ю.О.

А.А. Воропаева

ГБУЗ «Донецкий национальный технический университет»

Оптимальное управление режимами приема и передачи телекоммуникационных сетей.

В статье рассмотрены синхронный и асинхронный методы управления телекоммуникационной сетью. Сформулированы требования к функции полезности с учетом не тривиальности задачи оптимизации, которая декомпозируется на две части: пользователя и сети. Сформулирована функция оптимизации в виде ценового вектора. При асинхронной работе сети предлагается использовать средневзвешенный режим, к оценке которого сформулированы определенные требования.

Ключевые слова: функция полезности, синхронный режим работы, ценовой вектор, полоса пропускания, проблема оптимизации.

A. Voropaeva

Donetsk National Technical University

Optimal Control of the Transmit and Receive Modes of Telecommunication Networks. *As telecommunications market is rapidly developing it becomes necessary to apply modern approaches to network management and optimization. The paper considers both synchronous and asynchronous methods of telecommunication networks management. The problem of optimal telecommunication networks management is formulated. The author suggests solving it using the gradient method. Optimization problem is decomposed into two parts: the user and the network. Optimization objective is to choose optimal source rate. The objective function of the dual problem and the requirements to it are formulated. The objective function in its entire range should be growing and concave and have isoquant curvature coefficient different from zero. Solving the dual problem is recommended using gradient projection method. When the network operates in asynchronous mode we suggest using weighted average value of utility, obtained to assess particular requirements. In the network sources we should select the transmission rate which gives maximum benefit with corresponding bandwidth cost; and in their turn telecommunication links adjust their bandwidth according to the sources operation. In asynchronous methods sources and links compute outdated information. Communication in different time-sectors is acceptable. The synchronous method is slightly modified and becomes an asynchronous one, which takes into account nondirectionality of communication links. This method is used in the networks, where the sources can be located at different distances from the network links. Links estimate the gradient and update its prices. The estimate is computed using the sum total of the information about the previous modes of operation.*

Keywords: utility function, synchronous operation, price vector, bandwidth, optimization problem.