ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТРЕТЬОГО ПОКОЛІННЯ

Бессараб В.І., Воропаєва А.О.
Донецький Національний Технічний Університет, м. Донецьк
кафедра автоматики та телекомунікацій
E-mail: bvi@fcita.dn.ua

Abstract

Bessarab V.I., Voropayeva A.A. Features of core network optimization for 3G communication. *SDH core networks for 3G services support both packet- and circuit-switched traffic. Optimal design of such a network has certain features. This letter presents a ring-based SDH core network design problem with multiple constraints. Different approaches to solving this problem are compared. Then a genetic algorithm is proposed.*

Аннотация

Бессараб В. И., Воропаева А. А. ***Особенности оптимизации транспортных сетей мобильной связи третьего поколения.*** *Проанализированы методы и алгоритмы оптимизации транспортных SDH-сетей. Видилены особенности в постановке задачи оптимизации транспортных сетей для операторов мобильной связи при внедрении услуг третьего поколения. Предложены методы и алгоритмы решения задач оптимизации сетей с коммутацией каналов при внедрении новых услуг.*

Анотація

Бессараб В. І., Воропаєва А. О. ***Особливості оптимізації транспортних мереж мобільного зв'язку третього покоління.*** *Проаналізовані методи та алгоритми оптимізації транспортних SDH-мереж. Виділені особливості в постановці задачі оптимізації транспортних мереж для операторів мобільного зв'язку при впровадженні послуг третього покоління. Запропоновані методи та алгоритми рішення задач оптимізації мереж з комутацією каналів при впровадженні нових послуг.*

Ключові слова

3G-мережі, SDH-мережі, теорія графів, генетичні алгоритми, задача комівояжера, віртуальні з'єднання, QoS.

Сучасні тенденції розвитку телекомунікацій пов'язані з появою нових послуг та сервісів, що є більш вимогливими до характеристик транспортних мереж, порівняно з традиційними. Ці тенденції стосуються як стаціонарних, так і мобільних телекомунікацій, зокрема для останніх вони пов'язані з впровадженням мереж 2,5G та 3G. Оскільки деякі оператори в Україні (PeopleNet, Utel) вже розпочали надання послуг третього покоління, а решта подали заявки на отримання відповідних ліцензій, то задача оптимізації транспортних мереж, здатних забезпечити функціонування нових широкосмугових сервісів, є важливою і актуальною.

До транспортної мережі, яка є базою надання послуг кінцевому користувачеві, завжди висувались вимоги надійності, керованості, масштабованості та здатності до розвитку. Але з появою та широким розповсюдженням широкосмугового доступу до Інтернет, пакетної комутації голосу та відео-викликів до транспортних мереж висуваються нові вимоги мультисервісності та конвергентності [1].

Загальна постановка проблеми.

Оптимальне проектування та модернізація транспортних мереж завжди були в центрі уваги дослідників та науковців в галузі телекомунікацій. Використання класичної теорії оптимізації для транспортних мереж здійснювалося українськими науковцями Захарченко М.В., Стекловим В.К., Беркман Л.Н., Поповським В.В. В Росії цю тему аналізують Н. Н. Слепов (механізми адаптації SDH мереж до сучасного пакетного трафіку), А.П. Галицький (оптимізація управління потоками даних за рахунок динамічної передачі пакетів), Н.А. та В.Г. Оліфери.

Останнім часом з'явились роботи, здебільшого англомовні, що висвітлюють проблеми відповідності підходів до оптимізації транспортних мереж, побудованих на технологіях комутації каналів, новим вимогам якості обслуговування мультимедійного трафіку за допомогою пакетної комутації.

Постановка задачі дослідження.

Для вирішення поставленої задачі необхідно:

- проаналізувати існуючі методи та алгоритми оптимізації телекомунікаційних, зокрема, транспортних мереж;
- сформулювати особливі умови (обмеження) та критерії, що виникають при оптимізації транспортних мереж для операторів мобільного зв'язку при впровадженні послуг третього покоління;
- запропонувати методи для рішення задач оптимізації транспортних мереж, побудованих на технологіях комутації каналів, при впровадженні нових послуг.

Рішення задачі та аналіз результатів.

Транспортні мережі операторів зв'язку традиційно базувалися на технологіях канальної комутації. Спочатку це були аналогові системи передачі з частотним розділенням каналів, потім – цифрові системи з часовим ущільненням та використанням плезіохронної цифрової ієрархії (PDH). Зараз стандартом при побудові транспортних мереж стало використання синхронної цифрової ієрархії (SDH) [2].

Основними елементами SDH мереж є термінальні мультиплексори (TM), призначені для формування високошвидкісного цифрового потоку з , мультиплексори вводу/ виводу (ADM), що забезпечують транспортування високошвидкісних потоків у заданому напрямку з одночасною можливістю додавання або виділення потоків E1/E3, та цифрові крос-конектори (DCX) для крос-комутації високошвидкісних потоків.

Традиційним підходом до оптимального проектування SDH мереж передбачається визначення кількості, типу та місце розташування елементів мережі, вибір топології та пропускної здатності мережі, що з мінімальними витратами забезпечить обслуговування заданого (або прогнозованого) обсягу трафіку з необхідним рівнем якості.

З математичної точки зору задача полягає у відшуканні мінімуму цільової функції багатьох змінних при обмеженнях на їх значення та функціональні зв'язки. В якості змінних виступають кількість та типи мережних вузлів, наявність або відсутність зв'язків між ними при визначенні топології, пропускна здатність каналів мережі. За критерій оптимізації доцільно прийняти вартість розгортання (або модернізації) мережі, а показники якості (надійність, наскрізна затримка, вірогідність відкидання пакету) слугують обмеженнями.

Отже, сформульована задача є задачею нелінійного цільового програмування, для рішення якої запропоновано низку методів та алгоритмів, що розрізняються за можливістю відшукання глобального оптимуму або квазіоптимального рішення. Найбільш розповсюдженими підходами до рішення складових такої задачі є використання графових алгоритмів для визначення оптимальної топології, комбінаторні методи

оптимізації, зокрема, методи скороченого перебору, „гілок та границь”, пошуку з поверненням, побудови дерева рішень.

При умові завдання кількості вузлів транспортної мережі та матриці інформаційних тяжінь між ними можна використовувати методи лінійного цілочислового програмування та теорію графів. Але методи лінійного програмування виявляються доцільними для невеликих або середніх за розмірами мереж, в яких кількість вузлів обчислюється десятками, а, відповідно, кількість потенційних кілець-кандидатів – сотнями.

При використанні графових методів [4] транспортну мережу моделюють за допомогою потокового графа $G = (N, A)$, де N – множина вершин, A – множина дуг, при чому кожній дузі *(i,j)* з множини A поставлено у відповідність деякий кількісний параметр (узагальнена вартість дуги) c_{ij}. В цьому графі вершини позначають вузли мережі, ребра – цифрові канали передачі, вартість ребер – довжину або пропускну здатність каналів. Множину вершин можна розглядати як $N = N_s \bigcup N_t \bigcup N_p$, де N_s, N_t, N_p – множини джерел, приймачів та проміжних вузлів відповідно. Нехай β_i – множина всіх вузлів, зв’язаних з вузлом i дугами, що мають напрямок до i, а α_i – множина всіх вузлів, зв’язаних з вузлом i дугами, що мають напрямок в протилежний бік. Цілочислова функція f_{ij}, визначена на множині A, називається потоком в графі $G = (N, A)$, якщо вона відповідає умові:

$$\begin{aligned} & f_{ij} \geq 0 \quad для\ всіх \quad (i,j) \in A \\ & \sum_{j \in \alpha_i} f_{ij} - \sum_{j \in \beta_i} f_{ji} = 0 \quad для\ всіх \quad i \in N, i \neq s, i \neq t, \\ & f_{ij} \leq c_{ij} \quad для\ всіх \quad (i,j) \in A \end{aligned} \qquad (1)$$

Дана залежність відома як умова збереження потоку та вимагає, щоб потік був невід’ємний по кожній дузі, не перевищував значення c_{ij}, якщо під узагальненою вартістю розуміють пропускну здатність, та зберігав своє значення у транзитних вузлах.

Важливою характеристикою графа є його зв’язність $K_{зв}$ – кількість незалежних маршрутів між будь-якою парою вершин, яка залежить від умов, в яких функціонує мережа, вимог до її надійності та залежить від топології мережі. При низьких вимогах до надійності достатньо дерево- або зіркоподібної топології, отже $K_{зв} = 1$; якщо необхідна підвищена надійність, приймають $K_{зв} = 2$ або більше.

Основними топологіями для SDH мереж є кільцева (Ring-topology) та комірчаста (Mesh-topology). Головною перевагою Mesh мереж є можливість самоорганізації та забезпечення зв’язку “кожний з кожним”, стійкості при відмові окремих елементів, здатності до масштабування. Але кільцева топологія має переваги з точки зору простоти управління, швидкості переключення у випадку порушення цілісності, підвищеної надійності, а, головне, – економічності. Отже, найбільш розповсюдженою топологією транспортної мережі є кільце ($K_{зв} = 2$) або комбінація кілець з різною швидкістю передачі.

Для побудови оптимального (найкоротшого) кільця використовується алгоритм Літтла [3]. У випадку побудови мережі за топологією дерева можна використовувати алгоритм Прима. Ці алгоритми використовуються для побудови оптимальної топології мережі при відомій кількості та координатах вузлів. При цьому не враховується розподіл трафіку між вузлами.

Зупинимося більш детально на задачі побудови оптимального кільця, відомій ще як „задача комівояжера”. Розглядаємо мережу з n вузлів, задану матрицею відстаней

$D = [d_{ij}]$, кожний елемент якої характеризує довжину дуги *(i,j)* або відстань між відповідними вузлами. Задача полягає у визначенні послідовності під'єднання вузлів у кільце так, щоби довжина кільця виявилась мінімальною. Цю послідовність можна зобразити у вигляді маршруту *T*, що представляє з себе множину *n* впорядкованих пар вузлів $T = \{(i_1, i_2), (i_2, i_3), ..., (i_{n-1}, i_n), (i_n, i_1)\}$. Кожний допустимий маршрут вимагає послідовного чергування всіх вузлів, причому кожний вузол обов'язково входить в маршрут один і тільки один раз, кінцевий і початковий вузли співпадають. Довжина $Z(T)$ маршруту *T* дорівнює сумі відповідних елементів матриці відстаней і характеризує цільову функцію даної задачі оптимізації:

$$Z(T) = \sum_{(i,j) \in T} d_{ij} \qquad (2)$$

Обмеженнями в задачі виступають перш за все вимога невід'ємності елементів матриці відстаней та умова допустимості маршрутів. Зрозуміло, що всього існує *(n*—1)! можливих маршрутів, серед яких один чи декілька – оптимальні. Алгоритм Літтла [4] працює наступним чином. Спочатку знаходиться деяке допустиме рішення (довжина допустимого маршруту), після чого множина решти маршрутів розбивається на все більш дрібні підмножини. На кожному кроці обчислюється нижня границя довжини поточного найкращого маршруту. За допомогою знайдених границь здійснюється подальша розбивка підмножин допустимих маршрутів і в кінцевому рахунку визначається оптимальний маршрут. Якщо знаходиться маршрут, довжина якого не перевищує найменшу нижню границю решти маршрутів, то він стає найкращим допустимим рішенням. Основними процедурами запропонованого алгоритму є обчислення нижніх границь довжин маршрутів, виділення субоптимальних рішень і розгалуження з метою отримання нових (більш коротких) маршрутів.

Розглянута задача побудови оптимального кільця є комбінаторною задачею, оскільки число можливих маршрутів залежить за експонентою від числа вузлів; вона належить до класу NP–повних задач. Доведено [4], що клас комбінаторних задач є класом еквівалентних задач, де еквівалентність розуміється в тому сенсі, що всі задачі можуть бути вирішені за допомогою алгоритмів, що мають поліноміальну складність обчислень, або жодна з них не може бути вирішена за допомогою таких алгоритмів. Важливо відзначити, що задача комівояжера не може бути безпосередньо вирішена як задача лінійного програмування. Вона належить до класу потокових задач.

Наступним кроком рішення загальної задачі оптимізації після визначення топології мережі є вибір пропускної здатності каналів, типів обладнання, кількості та параметрів портів тощо. При цьому розглядається як початкове розгортання мережі, так і її подальший розвиток або модернізація, тобто враховується динаміка функціонування мережі. Одним з підходів до рішення цієї задачі є використання генетичного алгоритму [5], при цьому всі змінні задачі оптимізації представляються у вигляді вектора $\mathbf{X}$, званого хромосомою:

$$\mathbf{X} = (\mathrm{A}_1, \mathrm{A}_2, ..., \mathrm{A}_T), \qquad (3)$$

де A_i геноми, що описують стан мережі в різні часові періоди. Кожний геном

$$\mathrm{A}_i = P(i), H(i), M(i), \qquad (4)$$

де $P(i)$, $H(i)$ та $M(i)$ – матриця параметрів цифрових каналів передачі між вузлами мережі, вектор опису мережевих вузлів та матриця інформаційних тяжінь в *i*-й період

часу. Для визначення можливих для використання типів мережевих вузлів та параметрів каналів попередньо здійснюється розподіл інформаційних потоків в мережі.

Ефективність роботи генетичного алгоритму (ГА) переважно залежить від коректного вибору його параметрів – імовірностей використання генетичних операторів, методів відбору в наступні покоління, вибору потужності популяції та моменту закінчення пошуку рішення. При цьому, початкова потужність популяції – один з найважливіших параметрів. При значній розмірності початкового числа особин у популяції збільшується час генерації нових поколінь, отже зростає час пошуку рішення. Оптимальне значення своє для кожної мережі. На основі експериментальних даних в [6] пропонується вибирати початкову потужність популяції в 10 раз більшу за кількість вузлів мережі.

Отже, методи та алгоритми оптимізації класичних SDH мереж, побудованих на принципі комутації каналів, досліджені вже досить широко. Але при оптимізації транспортних мереж для операторів мобільного зв'язку при впровадженні послуг третього покоління виникають особливі умови, пов'язані з тим, що користувачі переважно генерують різні класи пакетного трафіку. Для забезпечення необхідної якості обслуговування здійснюється налаштування віртуальних з'єднань з відповідними показниками QoS. Ці віртуальні з'єднання будуються на фізичній основі SDH мережі і залежно від типу трафіку мають забезпечувати різні показники QoS (середню затримку пакету, джиттер затримки, частку втрат пакетів).

Зазвичай задачу побудови оптимальної логічної топології вирішують для вже існуючої канальної мережі, встановлюючи за певними міркуваннями віртуальні з'єднання для обслуговування пакетного трафіку. Але цей процес також може бути оптимізований.

Отже, розглянемо наступну задачу. Задано набір мережних вузлів $A = \{1, 2, ..., N\}$, визначена C_{ij} – пропускна здатність фізичних каналів між вузлами *i* та *j*. Для кожного вузла *i* обрано кількість його вхідних K_i^{in} та вихідних K_i^{out} портів відповідно. Величина пакетного трафіку між вузлами *s* та *t* є p^{st}. Для вузлів, що генерують трафік, це – додатна величина, для вузлів-приймачів пакетного трафіку – від'ємна. Пропускна здатність віртуального каналу для передачі відповідного пакетного трафіку є c^p. Фізична топологія SDH мережі з комутацією каналів описується множиною $T = \{(s_k, t_k), c_k\}$, де (s_k, t_k) характеризує прямий зв'язок між вузлами s_k і t_k, а c_k – відповідну пропускну здатність фізичного каналу.

Введемо змінну $h_{ij}^k (i, j \in A)$ для позначення віртуального *k*-го з'єднання. Причому $h_{ij}^k = 1$ тільки, якщо існує фізичне з'єднання вузлів *i, j*. Інакше $h_{ij}^k = 0$. Змінна $\lambda_{uv}(u, v \in A)$ також приймає значення 0 або 1 та характеризує логічну топологію мережі, що створюється для передачі пакетного трафіку. $\lambda_{uv} = 1$ при наявності віртуального зв'язку між вузлами *u, v*. Невід'ємна змінна $\rho_{uv}^{lm}(l, m, u, v \in A)$ характеризує частку пакетного трафіку p_{lm}, який спрямовується через λ_{uv}, отже загальний трафік через λ_{uv} дорівнює $\Omega = \sum_{l,m \in A} \rho_{uv}^{lm}$. Невід'ємна змінна Ψ позначає втрати пакетного трафіку.

Тоді задача оптимізації для такої мережі може бути сформульована наступним чином: знайти мінімум цільової функції

$$\min\{\Psi\} \qquad (5)$$

при обмеженнях на

- збереження потоку у вузлах

$$\sum_{u\in A}\rho_{uv}^{st}-\sum_{v\in A}\rho_{uv}^{st}=\begin{cases}p^{st} & якщо\ u=s\\ -p^{st} & якщо\ u=t\\ 0 & для\ інших\end{cases} \tag{6}$$

- можливості вузлів по кількості портів

$$\begin{aligned}&\sum_{u}\lambda_{uv}\le K_v^{in},\quad \forall v\in A\\ &\sum_{v}\lambda_{uv}\le K_u^{out},\quad \forall u\in A\end{aligned} \tag{7}$$

- наявності віртуального з'єднання для кожного джерела s_k та приймача t_k k-го типу пакетного трафіку

$$\sum_{j\in A}h_{ij}^{k}-\sum_{i\in A}h_{ji}^{k}=\begin{cases}1 & якщо\ i=s_k\\ -1 & якщо\ i=t_k\\ 0 & для\ інших\end{cases}\quad \forall k=1,...,K;\ \forall i\in A \tag{8}$$

- пропускну здатність фізичних каналів мережі для обслуговування пакетного трафіку

$$c^{p}+\sum_{k=1}^{K}c_k h_{ij}^{k}\le C_{ij},\quad \forall i,j\in A \tag{9}$$

Розглянута задача (5) – (9) також належить до класу NP–повних задач, отже найкращим підходом до її рішення (особливо в умовах значної кількості вузлів) може бути використання генетичного алгоритму за наступною схемою. Знаходиться особина, що задовольняє умові (8) та містить k генів, причому кожний ген відбиває маршрут віртуального k-го з'єднання ($k=1,2,...,K$). Мутація особини означає зміну декількох генів шляхом перемаршрутизації віртуального з'єднання. Відбір особин в наступну генерацію здійснюється за умовами (6) та (7) з урахуванням доступної смуги пропускання каналів, вільної від передачі канального трафіку.

Висновки

1. Проведений аналіз існуючих методів та алгоритмів оптимізації транспортних SDH мереж.
2. Приведена математична постановка задачі оптимізації транспортної мережі для надання нових послуг мобільного зв'язку третього покоління.
3. Запропоновано використовувати генетичні алгоритми для рішення задач оптимізації транспортних мереж, побудованих на технологіях комутації каналів, при впровадженні нових послуг.

Перелік літератури.

1. ITU-T Recommendation Y.1540/Y.1541. Network perfomance objectives fot IP-based services. Geneva: International Telecommunication Union. – 2006.
2. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Проектування телекомунікаційних мереж. – К.: Техніка, 2002.

3. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. ─ М.: Эко-Трендз, 1999.
4. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей─ М.: Мир, 1984.
5. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В.В. Поповський, С.О. Сабурова, В.Ф. Олійник та ін. ; За загал. ред. В.В. Поповського . ─ Харків : Компанія СМІТ, 2006
6. Design of Multi-Service SDH Networks: Formulation and Heuristics / Xi Kang, Ge Ning, Feng Chongxi // Journal of Electronocs, Vol.20 No.3, May 2003