

УДК 681.325

Г.А. Кучук, Я.Ю. Стасєва, О.О. Болубаш

Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

РОЗРАХУНОК НАВАНТАЖЕННЯ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МЕРЕЖІ

Запропонований метод умовного розділення пропускної спроможності пучка каналів ланки передачі даних мультисервісної мережі, який є базовим для алгоритму розрахунку її навантаження.

мультисервісна мережа, ланка передачі даних, пропускна спроможність, навантаження

Вступ

Модернізація озброєння і військової техніки пов'язана з удосконаленням і глобалізацією автоматизованих систем управління військами (АСУВ), зокрема мереж передачі даних (МПД), що, враховуючи сучасні тенденції розвитку телекомунікацій [1 – 3] зумовило необхідність створення мультисервісних мереж (МСМ). У низці актуальних завдань, пов'язаних з перспективою втілення МСМ у АСУВ [4 – 5], одним з найпріоритетніших є розрахунок навантаження мережі у нових умовах функціонування.

На сьогодні є ряд методик та алгоритмів розрахунку мультисервісного навантаження [6 – 12], але вони не припускають випадку, коли МСМ створюється в умовах безперервного функціонування базової модернізуємої МПД. Тому **метою даної статті** є розробка методу умовного розділення пропускної спроможності пучка каналів ланки передачі даних мультисервісної мережі при безперервному функціонуванні МПД, на базі якого запропонувати алгоритм розрахунку навантаження МСМ. Пропонується наступна **послідовність дій**: 1) дослідити пропускну спроможність ланки передачі даних МСМ; 2) проаналізувати характеристики мультисервісного навантаження при модернізації існуючої МПД; 3) запроєктувати розподіл навантаження для ділянки МСМ; 4) запропонувати узагальнений вираз для розрахунку метрик вузлів МСМ; 5) довести метод умовного розділення пропускної спроможності пучка і запропонувати відповідний алгоритм розрахунку навантаження.

1. Дослідження пропускної спроможності ланки передачі даних МСМ

Одним з головних завдань при побудові сучасних МСМ є надання необхідної якості обслуговування (QoS) різним видам трафіку. До технологій, що володіють здатністю забезпечити задане значення QoS, необхідно, в першу чергу, віднести Frame Relay, ATM, а також MPLS. Застосування кожної з них дає можливість внести в архітектуру протоколу механізм утворення віртуальних маршрутів, що дозволяє розглядати процес їх надання для потоків, що надходять, аналізуються на рівні з'єднання, аналогі-

чно процесу, який має місце при занятті маршруту в мережі з комутацією каналів. Це означає, що моделі і методи оцінки показників передачі навантаження, розвинені в теорії телетрафіка, при аналізі класичних систем зв'язку можна переносити на моделі, які з'являються при описі процесу передачі мультимедійного навантаження в сучасних МСМ.

Розглянемо повнодоступний пучок місткістю V каналів, на які поступають потоки транзакцій від джерел n різних категорій. Кожна транзакція i -ої категорії ($i = \overline{1, n}$) вимагає для свого обслуговування m_i каналів ($m_i \geq 1$), які одночасно займаються при встановленні з'єднання і також одночасно звільняються після завершення сеансу зв'язку. Нехай транзакції i -ої категорії утворюють простий потік з інтенсивністю λ_i , а середня тривалість обслуговування окремого виклику є h_i . Потоки транзакцій різних категорій вважаються статистично незалежними, а поточний стан системи однозначно характеризується вектором $X = (x_1, \dots, x_n)$, де x_i – число обслуговуваних транзакцій i -ої категорії. При цьому загальна кількість зайнятих каналів дорівнює $Z_X = \sum_{i=1}^n m_i x_i$.

Множина Ω станів системи утворюється сукупністю векторів X , компоненти яких задовольняють умовам $x_i \geq 0$ при $i = \overline{1, n}$ і $Z_X \leq V$.

Для стану $X \in \Omega$ ймовірність p_x виражається співвідношенням

$$p_x = p_0 \prod_{i=1}^n \frac{y_i^{x_i}}{x_i!}, \quad (1)$$

де $y_i = \lambda_i h_i$, а ймовірність p_0 обчислюється за такою формулою:

$$p_0 = \left[\sum_{x \in \Omega} \prod_{i=1}^n \frac{y_i^{x_i}}{x_i!} \right]^{-1}, \quad (2)$$

яка витікає з умови нормування ймовірностей

$$\sum_{x \in \Omega} p_x = 1.$$

Транзакція k -ої категорії ($k = \overline{1, n}$) буде втрачена, якщо у момент її надходження стан системи задовольняє умові

$$Z_x > V - m_k, \quad (3)$$

тобто кількість вільних каналів в пучку менше, ніж потрібно для обслуговування транзакції. Отже, індивідуальна ймовірність втрат для транзакцій k -ої категорії є

$$\pi_k = \sum_{x \in \Omega_k^*} p_x,$$

де Ω_k^* – підмножина тих станів $X \in \Omega$, для яких виконана нерівність (3). Тоді, вважаючи на (1) і (2), остаточно одержуємо:

$$\pi_k = \sum_{x \in \Omega_k^*} \prod_{i=1}^n \frac{y_i^{x_i}}{x_i!} / \sum_{x \in \Omega} \prod_{i=1}^n \frac{y_i^{x_i}}{x_i!}.$$

У кожному стані X втрачаються транзакції тих категорій, для яких виконується умова (3). Вони утворюють множину, що дозволяє визначити загальне втрачене навантаження:

$$Y_{\text{пот}} = \sum_{x \in \Omega} \sum_{j \in J_x^*} y_j m_j p_x.$$

Сумарне навантаження, що надходить, є $Y_{\text{пост}} = \sum_{j=1}^n y_j m_j$, і це дає можливість обчислити загальну ймовірність втрат по навантаженню:

$$\begin{aligned} \pi_n &= Y_{\text{пот}} / Y_{\text{пост}} = \\ &= \sum_{x \in \Omega} \left(\sum_{j \in J_x^*} y_j m_j \right) \prod_{i=1}^n \frac{y_i^{x_i}}{x_i!} / \left(\sum_{j=1}^n y_j m_j \right) \sum_{x \in \Omega} \prod_{i=1}^n \frac{y_i^{x_i}}{x_i!}. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогічним чином розраховується ймовірність втрат за транзакціями:

$$\pi_T = \sum_{x \in \Omega} \left(\sum_{j \in J_x^*} y_j \right) \prod_{i=1}^n \frac{y_i^{x_i}}{x_i!} / \left(\sum_{j=1}^n y_j \right) \sum_{x \in \Omega} \prod_{i=1}^n \frac{y_i^{x_i}}{x_i!}. \quad (5)$$

2. Аналіз характеристик мультисервісного навантаження

У розрахунках найчастіше використовують середнє значення інтенсивності обслуженого навантаження, що обчислюється як математичне сподівання випадкової величини $i(t)$:

$$M[i(t)] = \sum_{i=1}^V i \cdot p_j,$$

де p_j – ймовірність того, що в довільний момент часу в пучку з V сполучних пристроїв зайнято рівно j пристроїв, $j = \overline{0, V}$.

Іншою важливою характеристикою випадкового процесу, що описує функціонування пучка сполучних пристроїв при обслуговуванні транзакцій МСМ, є дисперсія навантаження, яке вже обслуговано:

$$D[i(t)] = \sum_{i=1}^V (i - M[i(t)])^2 \cdot p_j.$$

Скупченість навантаження z вимірюється відношенням дисперсії навантаження D до її математичного сподівання Y :

$$z = D / Y.$$

Якщо на пучок сполучних пристроїв поступають відразу декілька (n) потоків транзакцій, то математичні сподівання Y_i цих навантажень підсумовуються. Для статистично незалежних потоків також підсумовуються і дисперсії D_i відповідних навантажень. Таким чином, математичне сподівання Y і дисперсія D сумарного навантаження розраховуються по формулах:

$$Y_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Y_i; \quad D_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n D_i.$$

Коефіцієнт скупченості об'єднаного навантаження визначається таким виразом:

$$z_{\Sigma} = \frac{D_{\Sigma}}{Y_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^n D_i / \sum_{i=1}^n Y_i. \quad (6)$$

Розглянемо окремих випадок, коли для обслуговування кожного виклику, що надійшов, потрібне однакове число (v) вільних каналів. Тоді у будь-який момент часу обслуговуване навантаження на канали буде в v раз більше обслуговуваного навантаження по транзакціях: $i(t) = v \cdot j(t)$. Якщо потік транзакцій простий і характеризується параметром λ , то навантаження, що поступає за транзакціями, буде пуасонівським, а його математичне сподівання Y_B і дисперсію D_B можна обчислити як

$$Y_B = D_B = \lambda \cdot h,$$

де h – середній час обслуговування однієї транзакції.

У теоретичному нескінченному пучку каналів, як і в реальному пучку, число зайнятих каналів буде в v раз більше числа обслуговуваних транзакцій. Звідси витікають вирази, що дозволяють визначити інтенсивність навантаження, що надходить, на канали та його дисперсію:

$$Y_k = v \cdot Y_B = v \cdot \lambda \cdot h; \quad D_k = v^2 \cdot D_B = v^2 \cdot \lambda \cdot h. \quad (7)$$

З приведених формул видно, що дане навантаження є скупченим. Це обумовлено неординарністю потоку занять каналів. При цьому коефіцієнт скупченості z_k є рівним кількості каналів, які потрібні для обслуговування однієї транзакції:

$$z_k = D_k / Y_k = v. \quad (8)$$

Під час надходження транзакцій від джерел різних категорій МСМ формули (7) будуть справедливими для математичного сподівання і дисперсії навантаження на канали, яка створюється транзакціями i -ої категорії ($i = \overline{1, n}$):

$$Y_i = v_i \cdot \lambda_i \cdot h_i; \quad D_i = v_i^2 \cdot \lambda_i \cdot h_i,$$

тому коефіцієнт скупченості об'єднаного навантаження на канали

$$z_k = \sum_{i=1}^n D_i / \sum_{i=1}^n Y_i = \sum_{i=1}^n v_i^2 \cdot \lambda_i \cdot h_i / \sum_{i=1}^n v_i \cdot \lambda_i \cdot h_i \quad (9)$$

Звідси витікає, що для розрахунку ймовірності втрати транзакції в модифікованій системі S' (потік зайняття каналів обслуговування робимо ординарним за рахунок об'єднання каналів) можна скористатися першою формулою Ерланга:

$$\pi' = E(v, Y_B) = \frac{Y_B^v}{v!} / \sum_{k=1}^v \frac{Y_B^k}{k!}$$

З погляду статистичних характеристик процесу обслуговування транзакцій, системи S (аналізуєма система) і S' повністю еквівалентні і, зокрема, очевидно, що $\pi = \pi'$. Звідси з урахуванням співвідношень (8) і (9) слідує, що

$$\pi = E\left(\frac{V}{z_k}, \frac{Y_k}{z_k}\right) \quad (10)$$

Також відзначимо, що застосування формули (10) припускає наявність процедури обчислень за першою формулою Ерланга при нецілих значеннях числа ліній x . Як одним з можливих варіантів, можна скористатися такою інтерполяційною формулою:

$$E(x, Y) \approx B^{1-h} B_1^h \left(\frac{B_1^2}{B \cdot B_2}\right)^{h(1-h)/2}$$

де

$$B = E(N, Y), \quad B_1 = E(N+1, Y), \\ B_2 = E(N+2, Y), \quad N = [x], \quad h = x - N.$$

3. Проектування навантаження для ділянки МСМ

Коли відома кількість каналів V на деякій ділянці МСМ, завдання проектування навантаження полягає у визначенні допустимого числа N_i потоків навантаження для кожної категорії користувачів, за умови, що дотримуються встановлені вимоги до якості обслуговування транзакцій (норма ймовірності втрат ϵp_i). З математичної точки зору сформульоване завдання є невизначеним, оскільки є n невідомих змінних (N_i при $i = \overline{1, n}$) і каналні ресурси можуть в різних пропорціях поділятися між відповідними потоками навантаження різних категорій. Для виключення цієї невизначеності задамо профіль навантаження – $k_1 : k_2 : \dots : k_n$, тобто

$$\frac{N_1}{k_1} = \frac{N_2}{k_2} = \dots = \frac{N_n}{k_n} = x = \text{const} \quad (11)$$

В результаті потрібно визначити єдину невідому величину x , через яку виражаються всі і змінні:

$$N_i = x \cdot k_i \quad (12)$$

при $i = \overline{1, n}$.

Для розрахунку навантаження для ділянки МСМ використовуємо описаний у підрозділі 1 метод, а також процедуру умовного розділення пропускної спроможності пучка.

3.1. Розрахунок коефіцієнта скупченості об'єднаного навантаження. Обчислимо коефіцієнт скупченості навантаження, що надходить. Для кожної категорії джерел навантаження ($i = \overline{1, n}$) інтенсивність λ_i сумарного потоку транзакцій визначимо за формулою $\lambda_i = N_i \alpha_i$, де α_i – інтенсивність індивідуального потоку транзакцій i -ої категорії. Підставляючи цю рівність в (9), та враховуючи (12) отримуємо, що

$$z_k = \sum_{i=1}^n v_i^2 k_i \alpha_i h_i / \sum_{i=1}^n v_i k_i \alpha_i h_i \quad (13)$$

Таким чином, коефіцієнт скупченості не залежить від кількісного складу потоків навантаження різних класів, а визначається тільки профілем навантаження, за допомогою якого задається відносна вага кожної категорії.

3.2. Розрахунок норми на середні втрати транзакцій. У МСМ рівень якості обслуговування транзакцій нормується окремо для кожного виду послуг, що надаються, тому вимоги до втрат транзакцій на ділянці МСМ записуються у вигляді сукупності нерівностей $\pi_i \leq p_i$, де $i = \overline{1, n}$. Отже, повинні виконуватися нерівності

$$\frac{m_i}{z_k} \pi \leq p_i \quad (14)$$

при $i = \overline{1, n}$.

У нерівностях (14) є єдина невідома величина $\pi \leq z_k \frac{p_i}{m_i}$, тобто $\pi = z_k \min_i \frac{p_i}{m_i}$, що можна прийняти за норму для середніх (загальних) втрат транзакцій.

4. Розрахунок метрик вузлів МПД МСМ

Для визначення невідомої величини x у виразі (12) необхідно заздалегідь розрахувати метрики вузлів мережі передачі даних МСМ. Коефіцієнт завантаження m -го вузла є тією частиною пропускної спроможності вузла, яка у даний момент часу безпосередньо зайнята передачею пакетів, тобто

$$k_{B_m} = t_{B_m} \cdot \frac{p_{B_m}}{l_p} \quad (15)$$

де t_{B_m} – час передачі пакету даних через m -й вузол; l_p – об'єм пакету даних, переданого мережею; p_{B_m} – номінальна пропускна спроможність m -го вузла МПД.

Середня затримка пакету у вузлі МПД МСМ має вигляд [4]

$$T_p = \sum_{m=1}^M \frac{l_p}{p_{ec_m} \cdot k_{B_m}} / t, \quad (16)$$

де M – число вузлів МПД; p_{ec_m} – середня ефек-

тивна пропускна спроможність вузла m .

Під часом збіжності будемо розуміти інтервал часу від моменту початку розповсюдження довільним вузлом службової інформації (всієї або частини таблиці маршрутизації) до моменту отримання цієї інформації самим видаленим по відношенню до вузла-джерела, тобто

$$T_{зб} = \sum_{m=1}^M \max(T_{gq_m}) / t, \quad (17)$$

де T_{gq} – діагональна матриця мінімальних затримок передачі пакету від вузла g у вузол q ($g, q = \overline{1, M}$).

Вважаючи на те, що ймовірність помилки в пакеті даних можна визначити як $P_p = 1 - (1 - P_{bit})^l$, де P_{bit} – ймовірність спотворення одного біта передачі даних, а також враховуючи вирази (15) – (17), пропонуємо узагальнений вираз для розрахунку метрик вузлів МПД МСМ у вигляді:

$$\mathfrak{J}_m = \frac{K_n \left((p_{ecm} - V_{km} / T_p) / p_{vm} \right) \cdot t}{T_{зб} (1 - P_p) (V_{km} / l_p)}, \quad (18)$$

де K_n – коефіцієнт нормування; V_{km} – об'єм корисної інформації, яка передана через вузол m за час t .

5. Метод умовного розділення пропускної спроможності пучка

Для знаходження невідомої величини x (вираз (12)), запропонуємо наступний метод.

При найпростішому випадку ($n = 2$) позначимо через $F(N_1, N_2)$ середню ймовірність втрат для даного пучка як функцію від числа індивідуальних потоків навантаження з невідомими змінними N_1 і N_2 , такими, що:

$$\begin{aligned} N_1 / k_1 &= N_2 / k_2 ; \\ F(N_1, N_2) &= p , \end{aligned}$$

тобто на декартовій площині координатними осями N_1 і N_2 (передбачається, що в загальному випадку кількість потоків навантаження може приймати і нецілі значення) задано деяку криву.

Точки перетину цієї кривої з осями координат визначаються з рівнянь $F(N_1^*, 0) = p$, які відповідають випадкам, коли пучок обслуговує транзакції тільки однієї категорії. Замінімо цю криву на лінію, що проходить через точки $(N_1^*, 0)$ і $(0, N_2^*)$, яка задається рівнянням

$$\frac{N_1}{N_1^*} + \frac{N_2}{N_2^*} = 1. \quad (19)$$

Наближеним рішенням поставленої задачі будуть координати точки перетину двох прямих, а для отримання результату в аналітичному вигляді

необхідно розв'язати елементарну систему лінійних рівнянь

$$\begin{cases} N_1 / k_1 = N_2 / k_2 ; \\ N_1 / N_1^* + N_2 / N_2^* = 1, \end{cases} \quad (20)$$

з якої слідує, що

$$N_i = k_i / (\beta_1 + \beta_2), \quad (21)$$

де $\beta_i = k_i / N_i^*$, $i = 1, 2$.

У загальному, випадку, коли $n > 2$, аналогічно викладеному вище, при кожному $i = \overline{1, n}$ можна розглядати уявну ситуацію, коли сумарний потік складається тільки з транзакцій i -ої категорії.

Навантаження, що в цьому випадку надходить, дорівнює

$$Y_k = N_i \alpha_i v_i h_i$$

і має коефіцієнт скупченості $z_k = v_i$.

Отже, за формулою (10) можна визначити ймовірність втрати транзакції:

$$\pi = E \left(\frac{V}{v_i}, \frac{Y_k}{v_i} \right) = E \left(\frac{V}{v_i}, N_i \alpha_i h_i \right).$$

Найбільше значення, при якому виконується ця рівність,

$$E \left(\frac{V}{v_i}, N_i \alpha_i h_i \right) = p \quad (22)$$

і, відповідно, дотримуються задані вимоги до якості обслуговування транзакцій, позначається як N_i^* і повністю характеризує пропускну спроможність даного пучка каналів щодо навантаження i -ої категорії.

Якщо у рівнянні (22) число V/v_i не є цілим, то необхідно провести інтерполяцію.

При сумісному обслуговуванні транзакцій декількох категорій припускаємо, що середня ймовірність втрат залишиться в нормі, якщо допустимо кількість потоків навантаження кожної категорії узяти пропорційною відповідній величині N_i^* , тобто $N_i = \beta_i N_i^*$, де β_i є часткою пропускної спроможності пучка, яка при її умовному розподілі відводиться навантаженню i -ої категорії. Тоді

$$\sum_{i=1}^n \beta_i = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_i^*} = 1, \text{ тобто } x \cdot \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{N_i^*} = 1$$

і остаточно

$$x = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{N_i^*}. \quad (24)$$

Висновки

Для розрахунку навантаження мультисервісної мережі необхідно визначити прийнятну кількість індивідуальних потоків мультисервісного навантаження, які обслуговуються повнодступ-

ним пучком каналів при відомій місткості пучка і заданих вимогах до якості обслуговування транзакцій. Для цього пропонується виконання наступної послідовності дій:

- 1) обчислити коефіцієнт скупченості навантаження, що надходить;
- 2) знайти норму на середні втрати транзакцій.
- 3) знайти метрики розглядаємих вузлів;
- 4) визначити пропускну спроможність пучка каналів щодо навантаження і-ої категорії ;
- 5) розрахувати коефіцієнт, через який встановлюється взаємозв'язок між профілем мультисервісного навантаження і чисельністю відповідної групи потоків;
- 6) обчислити допустиме число індивідуальних потоків навантаження і-ої категорії.

Напрямок подальших досліджень є модифікація запропонованого методу для випадку, коли сумарний потік транзакцій МСМ буде мати розподіл, який суттєво відхиляється від нормального та описується негаусовим стохастичним процесом.

Список літератури

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. *Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы.* – С.-Пб.: Питер, 2001. – 672 с.
2. Кучук Г.А. *Моделирование трафика изолированного пульсирующего источника // Системи обробки інформації.* – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 1. – С. 168-173.
3. Зайченко Ю.П. *Комп'ютерні мережі.* – К.: Слово, 2003. – 283 с.
4. Королёв А.В., Кучук Г.А., Пашинев А.А. *Управление сетевыми ресурсами.* – Х.: ХВУ, 2004. – 224 с.
5. Система космического навигационного обеспечения Украины // *Пояснительная записка эскизного проекта по теме «Навигация».* – АФКЕ.461513.010. – Х.: АО НИИРИ, 2000. – 264 с.
6. Еришов В.А., Кузнецов Н.А. *Мультисервисные телекоммуникационные сети.* – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 432 с.
7. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. *Телекоммуникаційні мережі.* – К.: Техніка, 2001. – 392 с.
8. Еришов В.А., Еришова Е.Б., Ковалев В.В. *Метод расчета пропускной способности звена Ш-ЦСИС с технологией АТМ при мультисервисном обслуживании // Электросвязь.* – 2000. – № 3. – С. 20-23.
9. Кучук Г.А. *Метод оценки характеристик АТМ-трафика // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті.* – 2003. – № 6 (44). – С. 25-29.
10. Кучук Г.А. *Метод дослідження фрактального мережного трафіка // Системи обробки інформації.* – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 5 (45). – С. 74-84.
11. Семенов Ю.А. *Сети Интернет. Архитектура и протоколы.* – М.: Блик плюс, 1998. – 424 с.
12. Кучук Г.А., Кіріллов І.Г., Пашинев А.А. *Моделирование трафика мультисервисной розподіленої телекоммуникаційної мережі // Системи обробки інформації.* – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 9 (58). – С. 50-59.

Надійшла до редколегії 21.11.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.І. Обод, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.