

УДК 004.738 (043.3)

DOI: 10.18372/2073-4751.77.18665

Толстікова О.В., к.т.н.,

orcid.org/0000-0002-7616-2757,

e-mail: olena.tolstikova@npp.nau.edu.ua,

Водоп'янов С.В., к.т.н.,

orcid.org/0009-0006-0424-6173,

e-mail: serhii.vodopianov@npp.nau.edu.ua,

Андреєв О.В., к.т.н.,

orcid.org/0000-0001-9032-1139,

e-mail: oleksandr.andreiev@npp.nau.edu.ua,

Коцюр А.Б.,

orcid.org/0000-0003-4404-1966,

e-mail: anatolii.kotsiur@npp.nau.edu.ua

МОДЕЛЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОПОРТУНІСТИЧНОЮ КОМП'ЮТЕРНОЮ МЕРЕЖЕЮ

Національний авіаційний університет

Вступ

У статті розглянуто завдання інформаційно-комунікаційного обслуговування крупного аеровузла. Частина інформаційно-комунікаційної мережі призначена для контролю та управління літальними апаратами (ЛА) в зоні аеровузла. Вона представляє собою мобільну мультисервісну комп'ютерну мережу з множинним випадковим доступом. На літальних апаратах розташовуються мобільні мережні вузли (комутатори, маршрутизатори) та термінальні вузли, призначені для прийому даних контролю та управління. Саме ці мобільні та термінальні вузли складають комп'ютерну мережу. У подальшому будемо оперувати термінами "мобільний вузол", "термінальний вузол", маючи на увазі вузли, що знаходяться на борту ЛА.

Деякі ЛА можуть входити у зону дії мережі та покидати її на порівняльно короткі терміни, наприклад, при побудові маршруту заходу на посадку. Інші ЛА покидають її без повернення (виліт до пункту призначення). Одна з проблем функціонування мережі, що розглядається – розрізнення випадків остаточного покидання мережі від тимчасового покидання.

Для аналізу просторово-часових характеристик мережі з випадковим множинним доступом треба побудувати математичну модель, в якій адекватно

описувалися б процеси доступу, відстеження поточної топології мережі, що необхідно для прийняття обґрунтованих рішень щодо загального обміну інформацією та маршрутизації [1]. Однак вузли в мережі, яка розглядається, приймають рішення на основі виключно локальних знань, оскільки немає гарантії, що повний шлях до вузла призначення існує або коли-небудь існуватиме. Очевидно, можна лише пересилати пакети до вузла, який, ймовірно, наблизить пакет до місця призначення.

Тим не менш, якщо пакет пересилається від вузла до вузла, один з них зрештою ввійде в прямий контакт з вузлом призначення. Відповідно, затримка пакетів залежить від якості обраного алгоритму маршрутизації.

Крім того, в алгоритмі маршрутизації необхідно передбачати не тільки обмеженість затримки, а також збереження даних при розривах з'єднань, що, зокрема, передбачено в опортуністичних мережах [2] та в мережах з толерантністю до затримок [3].

У доступних нам джерелах, включаючи найбільш свіжі [4-6 та ін.] ці питання розглядаються лише частково. Дана стаття є спробою закрити цю прогалину стосовно мобільної мультисервісної комп'ютерної мережі з множинним випадковим

доступом, призначеної для інформаційно-комунікаційного обслуговування крупного аеровузла.

Математичні моделі процесів зміни топологій та маршрутів у мережі

Розглянемо параметри системи обміну даними та управління при організації повітряного руху інформації, в яких вирішуються завдання щодо аналізу та прогнозу рівня безпеки польотів. Алгоритм оптимального вибору параметрів та топології мережі визначається статистикою та інтенсивністю мережного трафіку. Метод вибору цільової функції оптимізації також залежить від необхідної якості. У перспективних корпоративних мережах систем управління повітряним рухом роль пристроїв доступу гратимуть локальні мережні вузли. Як відмічалось раніше, ці вузли раптово з'являються та зникають, тому для побудови моделі мережі треба застосовувати статистичні методи [7, 8].

Для коректного опису у термінах математичної статистики процесів появи та зникнення довільних об'єктів зазвичай використовують моделі процесів загибелі та розмноження або альтернуючих процесів відновлення. Для конкретного випадку, що розглядається, оцінки часу очікування будуть зміщеними [9]. У той же час модель класичного (однорідного) альтернуючого процесу відновлення адекватно відображає реальні процеси відновлення з однаковими періодами між моментами переходів. Для усунення цього обмеження застосуємо модель неоднорідного альтернуючого процесу відновлення [10]. Опишемо застосовану модель більш докладно.

Нехай мають місце послідовності появи та зникнення мережних вузлів. Припустимо, що в результаті появи i -го мережного вузла ймовірність штатного функціонування мережі знижується, можливо, на величину одного порядку порівняно з ймовірністю, яка спостерігалася до цього моменту, а в результаті зникнення j -го ($i \neq j$) вузла ймовірність функціонування мережі підвищується, можливо, на величину другого порядку малості порівняно з

ймовірністю, яка спостерігалася до цього моменту. Таким чином, у кожний момент часу система може перебувати в одному з N можливих фазових станів $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$, що характеризують ймовірність функціонування об'єкта. Відомі початковий стан системи (в початковий час вона перебуває у стані $\psi_0 = \varphi_i$) і однокрокові ймовірності переходу $\rho_{ik} = P\{\psi_l = \varphi_k | \psi_{l-1} = \varphi_i\}$, $i, k = \overline{1, N}$. Отже, якщо враховувати випадковий характер часу очікування та цікавитися моментами переходу, то процес $\psi_l = \psi(t_l)$ є вкладеним однорідним ланцюгом Маркова [9]. Ймовірність переходу ρ_{ik} визначається i -м станом об'єкта і результатами змін кількості вузлів. Запізнення і в системах і є дискретними процесами, які не обов'язково є марківськими.

Запізнення τ_1 і τ_2 в мережі є дискретними процесами, які не обов'язково є марківськими. Однак це не критично для подальшого аналізу, оскільки самі величини ρ_{mn} , $m, n \in M$ дають вичерпну інформацію про еволюцію мережі.

Співставимо кожному ненульовому елементу матриці ймовірностей переходу випадкову величину ζ_{ik} з функцією розподілу $F_{ik}(t) = F_{ik}(\tau_{ik} \leq t)$. У розглянутій задачі випадкову величину ζ_{ik} будемо трактувати як час перебування мережі в стані φ_i за умови, що наступним станом, в який перейде мережа, буде φ_k . При цьому величина ζ_{ik} вважається невід'ємною із щільністю ймовірності $w_{ik}(t)$. При такій інтерпретації величину ζ_{ik} можна назвати інтервалом знаходження мережі у стані φ_i до переходу у стан φ_k .

Припустимо, що точка, яка відображає поведінку мережі в просторі станів $\Phi, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N \subset \Phi$, залишиться в стані φ_i протягом часу ζ_{ij} , перш ніж вона перейде в стан φ_j (рис. 1 – рис. 2). Після досягнення стану φ_j «миттєво» (відповідно до матриці ймовірностей переходу $\{\rho_{ik}\}$) вибирається наступний стан. Тут «миттєвість» трактується у тому сенсі, що тривалість переходу є величиною другого порядку малості проти мінімальної тривалості перебування у поточному стані.

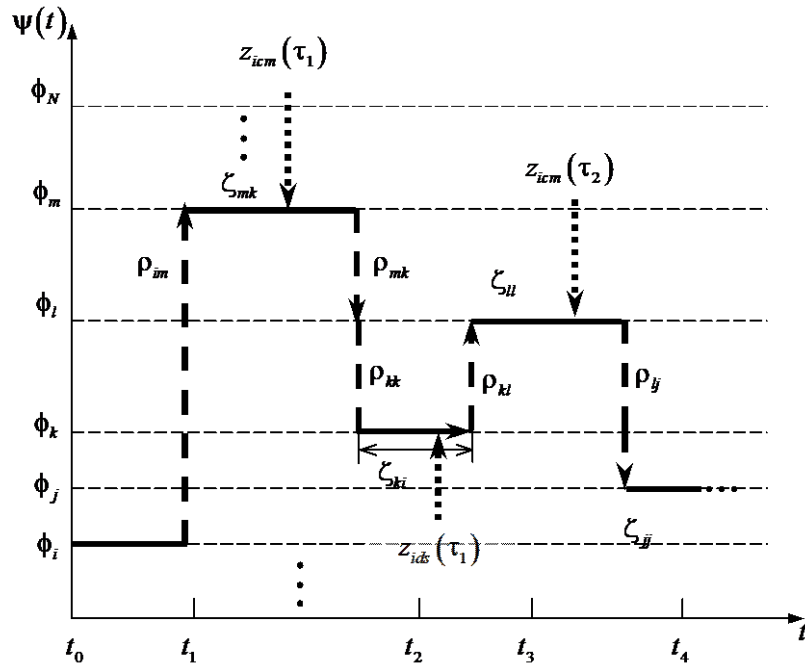


Рис. 1. Зміни імовірностей станів мережі. Імовірність появи нових вузлів переважає імовірність зникнення існуючих вузлів: $z_{icm}(\tau_n) > z_{ids}(\tau_n)$

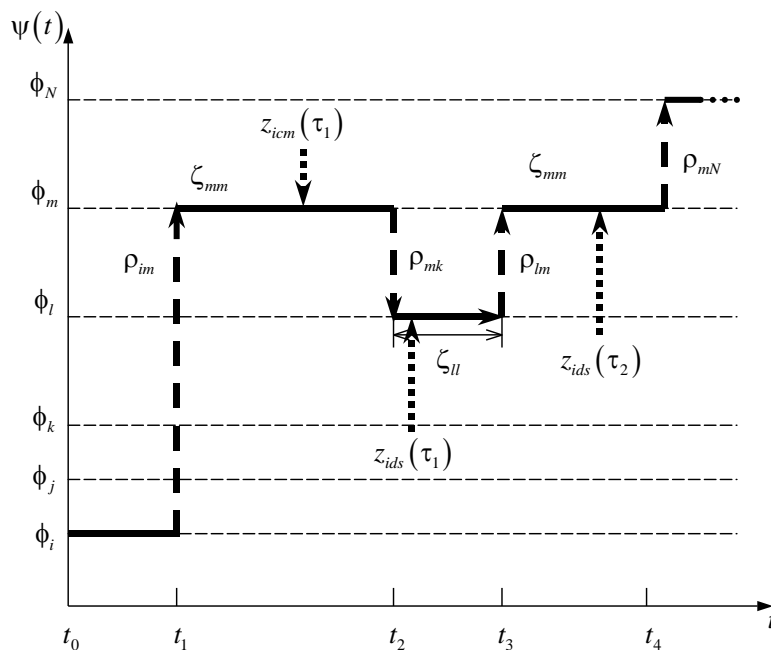


Рис. 2. Зміни імовірностей станів мережі. Імовірність зникнення існуючих вузлів переважає імовірність появи нових вузлів: $z_{ids}(\tau_n) > z_{icm}(\tau_n)$

Як відомо [1], коефіцієнт використання мереж не може бути близьким до одиниці, інакше корисна пропускання мережі різко впаде. Мережа або повторно передаватиме загублені пакети і квитанції, або оброблятиме колізії, тобто. працюватиме "на себе". Тому для

управління ресурсами та підтримки пропускання мережі в цілому на необхідному рівні необхідно перерозподіляти навантаження на окремі сегменти вже при появі найперших симптомів навантаження, поки воно ще контролюване. Структуризація та сегментація мереж може

бути доведена до виродженого стану (режим «мікросегментації», коли кожен термінальний вузол фактично є окремим автономним сегментом). Тоді число вузлів комутації практично дорівнює числу термінальних вузлів.

Якщо для точки, що відображає поведінку системи і перебуває в l -му стані, з ймовірністю переходу знову вибирається стан l , горизонтальна частина траєкторії руху точки позначається лінією зі стрілкою на кінці, як це зображено на графіках, див. рис. 1 – рис. 2. Вираз $x \succ y$ означає домінування x над y .

Після того, як наступний стан φ_i вибрано, час очікування в поточному стані φ_k належить рівним ζ_{ki} з функцією розподілу $F_{ki}(t)$ та, відповідно, щільністю ймовірності $w_{ki}(t)$. Цей процес надалі необмежено продовжується. Щоразу незалежно вибираються наступний стан та час очікування. Якщо через $\psi(t)$ позначити стан системи, в якому вона знаходиться в момент часу t , отриманий випадковий процес є напівмарківським. При заданому початковому стані подальша поведінка процесу повністю визначається матрицею ймовірностей переходу $\{\rho_{ik}\}$, і матрицею функцій розподілу $\{F_{ki}(t)\}$.

Таким чином, математична модель процесів зміни топологій та маршрутів у мережі, представлена у вигляді узагальненої моделі фазових станів на основі неоднорідних альтернуючих процесів відновлення, дає можливість поточного контролю та управління мережею. Мета управління – забезпечити стабільність роботи мережі при раптових змінах топологій та маршрутів доставляння даних – може бути досягнута безпосередньо при реальному функціонуванні.

Підхід до мобільності мережних вузлів передбачає апроксимацію деякою математичною функцією, яка є відповідним чином рандомізована та визначає фактори мобільності, такі як швидкість, місце розташування та довжина шляху.

Висновки

На завершення необхідно підкреслити, що використання адекватних

математичних моделей дозволяє отримати асимптотичні оцінки імовірностей стану комп'ютерної мережі у широкому діапазоні змін кількості мережних вузлів. Основні підходи до моделей мобільності наступні:

- випадкова мобільність: мобільність вузлів є випадковою та незалежною в різних аспектах (швидкість, час паузи, напрямок...). Ця модель може бути придатною для ряду конкретних застосувань, але, не є повною;

- моделі з часовою залежністю: щоб протистояти виникненню різких і раптових змін швидкості, деякі моделі припускають, що вузли мають певну "пам'ять", яка дозволить оцінити поточний стан із попередніх станів, вимірних протягом останніх кількох одиниць часу;

- моделі з просторовою залежністю: цей вид моделі вирішує проблему вузлів, рух яких залежить від інших вузлів, наприклад, у ситуації, коли вузол рухається позаду іншого і може рухатися так само швидко, як і передній вузол; при цьому потрібно дуже ретельно моделювати вектор напрямку з урахуванням існуючої топології;

- моделі з географічними обмеженнями зони дії мережі: рухомі вузли обмежені топологією.

Література

1. Водоп'янов С. В. Алгоритм вибору оптимальної топології комп'ютерної мережі для автоматизованої системи управління повітряним рухом. *Проблеми інформатизації та управління*. 2012. Т. 3, № 39. С. 35–38.

2. Opportunistic Networks Mobility Models, Protocols, Security, And Privacy / ed. by K. Ahmad, N. I. Udzir, G. C. DeKa. 1st ed. Boca Raton : Chapman and Hall/CRC, 2018. 314 p.

3. Birrane E. J., Heiner S., McKeever K. Securing Delay-Tolerant Networks with BPsec. 1st ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2022 – 352 p.

4. Opportunistic Networks Fundamentals, Applications and Emerging Trends /

ed. by A. Verma et al. 1st ed. Boca Raton : CRC Press, 2021. 318 p.

5. Advances in Delay-Tolerant Networks (DTNs): Architecture and Enhanced Performance / ed. by J. J.P.C. Rodrigues. 2nd ed. Oxford : Woodhead Publishing Ltd, 2020. 322 p.

6. Medhi D., Ramasamy K. Network Routing Algorithms, Protocols, and Architectures. 2nd ed. Amsterdam : Morgan Kaufmann, 2017. 1018 p.

7. Benslama M., Batatia H., Boucenna M.L. Ad Hoc Networks

Telecommunications and Game Theory. 1st ed. London : ISTE, 2015. 141 p.

8. Box G. E. P. et al. Time series analysis: forecasting and control. 5th ed. Hoboken : Wiley, 2016. 669 p.

9. Franken P. et al. Queues and Point Processes. Chichester : Wiley–Blackwell, 1983. 208 p.

10. Beichelt F. Franken P. Zuverlässigkeit und Instandhaltung : mathematische Methoden. München : Hanser, 1984. 315 s.

Толстікова О.В., Водоп'янов С.В., Андреев О.В., Коцюр А.Б.

МОДЕЛЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОПОРТУНІСТИЧНОЮ КОМП'ЮТЕРНОЮ МЕРЕЖЕЮ

Розглядається мобільна мультисервісна мережа – сегмент інформаційно-комунікаційної системи контролю, управління та обслуговування крупного аеровузла. Показано, що за умов раптового входу літальних апаратів до зони дії мережі та виходу з неї остання набуває властивостей опортуністичної мережі, а інколи – мережі з толерантністю до затримок та розривів з'єднань. Встановлено, що внаслідок зміни кількості активних мережних вузлів може змінюватися топологія мережі та виникає необхідність зміни маршрутів доставки даних. Побудовано модель процесів, що спостерігаються в опортуністичній мережі. В якості математичного підґрунтя моделі використано неоднорідний альтернуючий процес відновлення, у якому враховуються зміни інтервалів переходу від одного фазового стану до іншого. Доведено, що при різних варіантах домінування появ нових мобільних вузлів або зникнення вузлів, які входили до складу мережі раніше, відповідно змінюється асимптотична збіжність станів мережі.

Ключові слова: мобільна мережа; аеровузол; опортуністична мережа; математична модель; зміна станів; неоднорідний альтернуючий процес відновлення.

Tolstikova O.V., Vodopianov S.V., Andreiev O.V., Kotsiur A.B.

A MODEL OF AN OPPORTUNISTIC COMPUTER NETWORK CONTROL SYSTEM

The mobile multi-service network is considered – a segment of the information and communication system of control, management, and maintenance of a large air hub. It is shown that under conditions of sudden entry of aircraft into and out of the network coverage area, the latter acquires the properties of an opportunistic network, and sometimes – a network with tolerance to delays and disconnections. It has been established that as a result of a change in the number of active network nodes, the network topology may change and there is a need to change data delivery routes. A model of the processes observed in the opportunistic network is built. As a mathematical basis of the model, a non-homogeneous alternating restoration process is used, which takes into account changes in the transition intervals from one phase state to another. It is proved that with different variants of dominance, the appearance of new mobile nodes or the disappearance of nodes that were part of the network earlier, the asymptotic convergence of the network states changes accordingly.

Keywords: mobile network; air knot; opportunistic network; mathematical model; change of states; heterogeneous alternating recovery process.