

УДК 004.056.53:004.492.3 (045)

**Водоп'янов С.В.,
Дровозов В.І., к.т.н.,
Журавель Н.В.**

МОДЕЛІ Й МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТА УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНИМИ СЕГМЕНТАМИ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ КРУПНОГО АЕРОВОЗЛА

Національний авіаційний університет

s.vodopianov@abris-print.com

tolstikova_alena@mail.ru

zhuravel.nata83@gmail.com

Проблема стійкості функціонування авіаційних бортових мереж в зоні аеровузла стоїть особливо гостро в зв'язку з необхідністю безумовного забезпечення безпеки польотів, виключення льотних пригод і передумов до них. Ця проблема посилюється через безперервні зміни структури мережі - одні літаки як мережні елементи входять в зону відповідальності аеровузла, інші виходять. Цей процес є суттєво нестаціонарним. Для забезпечення безпеки мережі при наявності зовнішніх і внутрішніх заважаючих впливів необхідно не просто підвищувати енергетичні та інформаційні ресурси, а застосовувати оптимальні методи управління реконфігурацією мережі. В роботі запропоновані математичні моделі марковських процесів загибелі і розмноження з нестаціонарними імовірностями переходу, якими описується поточний стан локальної авіаційної бортової мережі аеровузла. Виїдена система рівнянь Колмогорова - Чепмена для нестаціонарних ймовірностей стану мережі. Застосовано метод гаусовської апроксимації розподілу координат системи в просторі станів

Ключові слова: авіаційна бортова мережа, рівняння Колмогорова - Чепмена, марковський процес, процес загибелі і розмноження

Вступ

В даний час активно впроваджуються локальні комп'ютерні мережі різного масштабу типу стільникових інформаційно-комунікаційних і обчислювальних систем з самоорганізацією. Вони мають змішану структуру "борт-борт" або "борт-земля". Завдяки таким системам забезпечуються швидкий і економічний доступ протягом польотів середньої і малої протяжності. Для реалізації "безшовної" технології [1] при побудові інтегрованої мережі аеровузла, перш за все, необхідно визначитися з комутаційними пристроями - їх принципами побудови, мережними протоколами і специфікою обробки даних. Наприклад, при застосуванні супутникових сегментів в складі інформаційно-обчислювальної мережі необхідно враховувати затримки доставки даних. Для супутників, які знаходяться на

високих геостаціонарних орбітах, тільки затримки на поширення сигналу від користувача до супутника і назад становлять близько 250 мілісекунд. Тому в інтегрованих комутаційних вузлах, побудованих на базі маршрутизаторів, комутаторів звичайних (*Switch*) і програмних (*Softswitch*), систем передачі даних через IP-мережі (*IP Multimedia Subsystem – IMS*) набори протоколів доставки даних повинні бути доповнені протоколами тривалого зберігання і гарантованої доставки даних (по типу протоколів мереж з толерантністю до затримок – *Delay-Tolerant Networks – DTN*). Крім того, необхідно забезпечувати взаємодію між успадкованими мережами *ATN* на основі еталонної моделі *OSI* і майбутніми мережами *ATN/IPS* на основі стандарту *IPv6*. В подальшому планується впроваджувати модифіковані архітектури протоколів і ін-

терфейсів [2] для застосування в інтегрованих аеровузлових мережах.

Якщо розглядати аеровузлу як автономний елемент авіатранспортної інфраструктури, то одним з найважливіших автономних мережних сегментів аеровузла, відповідно, є авіаційна бортова мережа з мобільними вузлами. Принциповою особливістю мережі з мобільними вузлами є її змінна структура. Внаслідок переміщення літальних апаратів (ЛА) в зоні аеровузла поточна топологія і кількість мережних елементів безперервно змінюються: одні ЛА входять в зону відповідальності аеровузла, інші, навпаки, з неї виходять.

Метою даного дослідження є побудова математичної моделі авіаційної бортової мережі як стохастичного керованого об'єкта. Для управління безпекою мережних структур необхідно розробити рівняння і структурні схеми систем з використанням методів теорії марковських процесів та теорії систем зі змінною структурою.

Терміни та визначення

Перш ніж розглядати конкретні питання побудови та керування інформаційно-керуючими системами авіації, доцільно надати основні терміни та визначення, пов'язані з питаннями, що розглядатимуться. Для детального ознайомлення з особливостями побудови обчислювальних (комп'ютерних) мереж можна порадити книгу В.Г.Оліфер, Н.А.Оліфер «Комп'ютерні мережі. Принципи, технології, протоколи». Чергове (четверте) видання найвідомішого і популярного підручника по комп'ютерних мережах повністю перероблено і оновлено відповідно до сучасного рівня розвитку мережних технологій. Популярність підручника така, що його видавали на англійській, іспанській, португальській та китайській мовах; зокрема у Великобританії у видавництві Wiley вийшло стереотипне англomовне видання *Computer Networks: Principles, Technologies and Protocols for Network Design* – Natalia Olifer, Victor Olifer November 2005. – 974 pp. При наведенні термінів, які здаються важливими, будемо

керуватися в основному згаданою книгою.

Складена мережа – сукупність мереж з різними принципами передачі інформації між кінцевими вузлами. Для визначення складеної мережі в англomовній літературі служить термін *інтермережа* (*internetwork*).

Компонентами складеної мережі можуть бути як локальні, так і глобальні мережі.

Неоднорідні (гетерогенні) мережі, які складаються з різних робочих станцій, операційних систем і додатків, а для реалізації взаємодії між комп'ютерами використовують різні протоколи. Різноманітність всіх компонентів, з яких будується мережа, породжує ще більшу різноманітність структур мереж, які утворюються з цих компонентів.

Мережний сегмент (автономний мережний сегмент) – логічно або фізично відокремлена частина мережі. Розбиття мережі на сегменти здійснюється з метою оптимізації мережного трафіку та/або підвищення безпеки мережі в цілому.

Інформаційно-керуюча (іноді – інформаційно-управляюча) *система критичного застосування* – це система з жорсткими вимогами до живучості, надійності, безпеки та дотримання найбільш важливих принципів побудови (наприклад, нейтралізації наслідків відмови будь-якого елемента програмно-апаратних засобів інформаційно-управляючої системи). Однією з найважливіших властивостей систем критичного застосування є спроможність видавати результати обробки інформації у реальному часі при великих перепадах обчислювального та комунікаційного навантаження.

Аеровузлу (англ. *Air Cluster*) – сукупність близько розташованих аеродромів, організація і виконання польотів з яких вимагають спеціального узгодження і координації. Наприклад, до лондонського аеровузла прийнято відносити аеропорти Хітроу (*Heathrow*), Гатвік (*Gatwick*), Станстед (*Stansted*), Фарнборо (*Farnborough*).

Такі терміни, як, наприклад, "складена мережа", "гетерогенна мережа" або "автономний мережний сегмент" є загально вживаними і уповні зрозумілими для спеціалістів. Інші терміни, можливо, потребують додаткових пояснень або обумовлених сфер застосування.

Постановка завдання

Розглянемо типову структуру і параметри авіаційної бортової мережі з найбільшими вузлами.

Реальні динамічні системи, і, зокрема, системи управління мережною структурою мають елементи, що випадково змінюються, а процеси в них визначаються рівняннями з випадковими параметрами. Випадкові зміни параметрів є повільними в порівнянні з часами процесів управління, що протікають в системі. Отже, ці зміни розглядаються не як статичні нелінійності, а як малі параметри збурення. На малому інтервалі спостереження зміни параметрів також малі та з прийнятною для практики точністю апроксимуються лінійними функціями. Відповідні системи класифікуються як лінійні параметричні. Практично при аналізі таких систем слід враховувати випадкові зміни параметрів в ансамблі однотипних систем. Структура рівнянь, якими описується їх стан, однакова для всіх систем, а параметри систем розглядаються як випадкові величини, а не як випадкові функції.

Однією з основних проблем організації та функціонування авіаційних бортових мереж є забезпечення їх безпеки і захисту інформації, що циркулює в мережі. Оскільки авіаційні бортові мережі в принципі можуть бути тільки бездротовими, їх вразливість до несанкціонованого доступу (вторгненням) є досить високою. При цьому загрози можуть бути як зовнішніми, так і внутрішніми (наприклад від пасажирів, які перебувають на борту повітряного судна (ПС) і одержують сервісну і медійну інформацію через інтерфейси загального доступу [4]).

Процес зміни топології і структури бортової авіаційної мережі представимо у вигляді процесу "загибелі і розмножен-

ня". Подія появи нового мережного вузла розглядається як розмноження, вихід вузла із зони покриття мережі – як загибель. Крім того, прийємо припущення про те, що ймовірність одночасної зміни двох і більше вузлів - величина другого порядку малості і тут не розглядається.

Слідуючи [5], стосовно до задачі організації авіаційної бортової мережі розглянемо стану і параметри входять в неї мережних вузлів. Одне з станів відповідає повній відсутності вузлів (літаків в зоні аеровузла), а інші - функціонуванню з різним їх кількістю. Перенумерувати все структури в можливій послідовності від відсутності елементів мережі до стану максимального дозволеного їх кількості в зоні аеровузла, отримаємо кінцеве число можливих структур. Перехід системи з одного стану в будь-яке інше характеризується відповідними ймовірностями. Можна показати [5], що цей процес є марковським з кінцевим числом станів. Перехідні ймовірності не залежать від поведінки системи до моменту часу t і визначаються тільки ймовірністю стану системи і тривалістю інтервалу Δt – величини другого порядку малості.

Таким чином, отримуємо систему зі змінною структурою або мультиструктурну систему, математична модель якої описується марковським процесом загибелі і розмноження [6]. Без будь-якої втрати спільності опису прийємо $0 \leq N \leq 7$, тобто загальне число елементів мережі в моменти часу t_i може змінюватися від нуля (відсутність літаків в зоні аеровузла) до 7 (максимально дозволена кількість літаків в зоні аеровузла). При переході зі стану j в стан $j+1$ конфігурація мережі змінюється відповідним чином з інтенсивністю реконфігурації, що дорівнює μ_p . При цьому вважається, що ймовірність переходу зі стану j в стан $j+m$, $m \geq 1$ є величини другого порядку малості.

Математична модель системи управління структурою мережі

Керуючись наведеними вище міркуваннями, побудуємо математичну модель системи управління структурою мережі. На рис. 1 надана модель процесу функці-

онування авіаційної бортової мережі, яка відображає мультиструктурну систему, математична модель якої описується марковським процесом загибелі і розмноження.

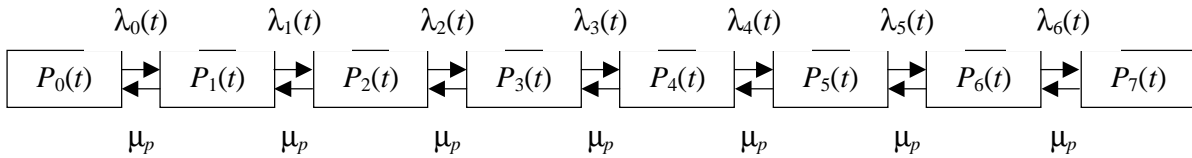


Рис. 1. Модель процесу функціонування авіаційної бортової мережі

$\lambda_i, i = 0, 7$ – інтенсивності переходів;

μ_p – інтенсивність реконфігурації мережі при зміні її параметрів

Ймовірності знаходження мережі в певному j -му стані P_{kj} в рамках моделі загибелі і розмноження визначаються з рівнянь Колмогорова-Чепмена [6] з урахуванням умови нормування

$$\sum_{k=0}^{N-1} P_k(t) = 1:$$

$$\begin{cases} -P_0(t)7\lambda_d + P_1(t)\mu_\delta = 0; \\ P_0(t)7\lambda_d - P_1(t)(\mu_\delta + 6\lambda_d) + P_2(t)\mu_\delta = 0; \\ P_1(t)6\lambda_d - P_2(t)(\mu_\delta + 5\lambda_d) + P_3(t)\mu_\delta = 0; \\ P_2(t)5\lambda_d - P_3(t)(\mu_\delta + 4\lambda_d) + P_4(t)\mu_\delta = 0; \\ P_3(t)4\lambda_d - P_4(t)(\mu_\delta + 3\lambda_d) + P_5(t)\mu_\delta = 0; \\ P_4(t)3\lambda_d - P_5(t)(\mu_\delta + 2\lambda_d) + P_6(t)\mu_\delta = 0; \\ P_5(t)2\lambda_d - P_6(t)(\mu_\delta + \lambda_d) + P_7(t)\mu_\delta = 0; \\ P_6(t)\lambda_d - P_7(t)\mu_\delta = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де λ_d – інтенсивність відключення того чи іншого елемента мережі з будь-якої причини (ослаблення сигналу при видавленні літака від зони покриття, поява завад даному абоненту та ін.).

Принциповою відмінністю системи рівнянь (1) від рівнянь звичайної моделі загибелі і розмноження є нестационарність ймовірностей переходу $P_i(t)$ на ін-

тервалі спостереження. Рішення в замкнутій формі для такої системи неможливо отримати в принципі, тому необхідно застосовувати наближені (чисельні) методи аналізу. Для кожного типу структури мережі, інтенсивності відключення мережного елемента і заданого критерію зв'язності базової станції бездротової мережі з цим елементом $l_{\text{wn}} \geq l_{\text{qos}}$ ($l_{\text{wn}} \geq 1$ або $l_{\text{wn}} \geq 2$) проводиться розрахунок коефіцієнта захищеності елемента, яким характеризується ймовірність його знаходження в стані з заданим числовим показником якості сервісу l_{qos} .

У мультиструктурній системі з матричними функціями поглинання і відновлення реалізацій $v(t)$ типу стохастичних матриць [7,8] ймовірності стану визначаються з рівнянь типу (1) незалежно від рішення рівнянь для вихідних змінних стану. Ці функції визначаються з рівнянь:

$$p'_l(t) = p_l(t) \sum_{r=1}^N v_{lr}(t) + \sum_{r=1}^N p_r(t) v_{rl}(t), \quad p_l(t_0) = p_{l0}, \quad l = \overline{1, N} \quad (2)$$

Ймовірності стану системи визначаються тільки матрицями потоків поглинання і відновлення, що не залежить від станів системи. Якщо все інтенсивності переходів на інтервалі

спостереження постійні, то рішення рівнянь (1) є дозвіл повної проблеми власних значень [6]. Воно повністю визначається початковими умовами і корінням характеристичного рівняння:

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 + \sum_{r=1}^N v_{1r} & -v_{21} & \mathbf{L} & -v_{N1} \\ -v_{12} & \lambda_2 + \sum_{r=1}^N v_{2r} & \mathbf{L} & -v_{N2} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ -v_{1N} & -v_{2N} & \mathbf{L} & \lambda_N + \sum_{r=1}^N v_{Nr} \end{pmatrix} = 0 \quad (3)$$

Для нестационарного випадку ($v_{lr}(t) = \text{var}$, $v_{rl}(t) = \text{var}$) матриця в лівій частині рівняння (3) є несиметричною. Однак і в цьому випадку чисельне рішення рівняння (3) не представляє нездоланих труднощів. Існують добре розроблені методи обчислення власних значень і власних векторів несиметричною матриці шляхом приведення її до верхньої майже трикутної форми Гесенберга і застосування методів *LR*- або *QR*-ітерацій. У зв'язку з нагнітанням обчислювальних потужностей в мережне комутаційне обладнання таке завдання може вирішуватися в реальному часі навіть на прикордонних вузлах мережного периметра.

Як впливає з рівняння (2), мережа як об'єкт управління описується рівнянням N -го порядку. З теорії систем зі змінною структурою [6] слідує, що система є повністю керованою, якщо для об'єкта управління, описуваного рівнянням N -го порядку застосовується керуючий пристрій з $N - 1$ ланкою змінної структури.

Моделі процесів стохастичної реконфігурації мережі з мобільними абонентами

Рівняння системи реконфігурації мережі мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} R(p)Y &= -k[U + X] + R(p)f; \\ U &= \sum_{j=1}^{N-1} u_j, \quad u_j = \frac{1}{2} [s_{21}^{(j)} Y_j + s_{12}^{(j)} |Y_j| \text{sgn } g]; \\ Y_j &= p^{j-1} Y, \quad g = Q(p)Y, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де $R(p) = \sum_{j=0}^N a_j p^j$, $Q(p) = \sum_{j=1}^N c_j p^{j-1}$, $s_{21}^{(j)} = l_{1j} + l_{2j}$, $s_{12}^{(j)} = l_{1j} - l_{2j}$,

$X(t)$ – випадкова завада з параметрами, в загальному випадку залежать від часу: середнім значенням і спектральної щільності; - Детермінована функція управління; - Оператор Лапласа. Ланки управління являють собою перемикачі на ту чи іншу структуру, найбільш ефективну в поточний момент. Перемикач здійснюється при зміні знака керуючого сигналу.

Для отримання асимптотичних оцінок ефективності системи управління захистом мережі доцільно використовувати метод Гаусса апроксимації функції розподілу координат в просторі станів. Правомірність такого підходу, як зазначалося вище, обумовлюється нормалізацією процесів, що протікають в складних системах. Тоді можна застосовувати статистичну лінеаризацію нелінійностей, яка полягає в наступному.

$$\left. \begin{aligned} R(p)m_1 &= -\frac{k}{2} \sum_{j=1}^{n-1} \left[s_{21}^{(i)} m_j + s_{22}^{(j)} \Phi_{0j} \right] + R(p)f; \\ m_g &= Q(p)m_1, \quad m_j = p^{j-1} m_1, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де Φ_{0j} - Коефіцієнти розкладання векторів, описуваних рівнянням (5), у вигляді лінеаризованої залежності $\Phi_j(Y_1, Y_2) = \Phi_{0j} + k_1 Y_{01} + k_2 Y_{02}$. Вибір коефіцієнтів k_1 і k_2 здійснюється виходячи з умови нормування по змінним стану системи.

Відповідно до поставленої мети роботи отримані рівняння і структурні схеми систем управління безпекою мережних структур. Для досягнення поставленої мети застосовано математичний апарат методів теорії марковських процесів та теорії систем зі змінною структурою.

Специфіка авіаційних бортових мереж полягає в безперервній зміні структури і складу користувачів мережі і в підвищених вимогах до захисту від зовнішніх і внутрішніх впливів. Для реалізації різних сценаріїв еволюції мобільних мережних структур в умовах не тільки па-

передбачається, що в малій ϵ -околиці зображуючої точки розподілу ймовірності фазових координат можна апроксимувати гаусовським розподілом. Тоді, розклавши вектор стану (фазових координат), в ряд Тейлора з утриманням перших двох членів, досить скласти рівняння для вектора математичних очікувань і кореляційної матриці фазових координат системи.

Для розглянутого випадку вектор Y системи управління замінюється його математичним очікуванням m_1 , обчисленим шляхом статистичного усереднення в ϵ -околиці, а елементи векторів u і X - творами їх математичних очікувань на відповідні елементи кореляційної матриці:

раметричної і структурної невизначеності, а й невизначеності цілей конфлікту доцільно використовувати найбільш універсальні методи статистичного опису вихідних даних і власне процесів протистояння. У той же час необхідно отримувати рішення в замкнутій формі - у вигляді систем функціональних рівнянь, алгоритмів і схем, асимптотичних оцінок. Універсальним апаратом для вирішення цих завдань є теорія марковських процесів, зокрема, процесів загибелі і розмноження, якими з достатньою для практики адекватністю і точністю описуються процеси розвитку конфлікту.

Нелінійності в перемикаючих чарунках доцільно апроксимувати методом статистичної лінеаризації.

Справа в тому, що чим більш складною та розгалуженою є динамічна система, тим ближче до гаусовських процеси, що в ній протікають. Крім того, при достатньо великому часі спостереження та

накопичення інформації, а також при збільшенні відношення енергії корисних сигналів до енергії шумів та завад апостеріорна точність оцінок зростає. Відповідно, точність стохастичної (гаусовської) апроксимації покращується.

Висновки

Відповідно до поставленої мети роботи отримані рівняння і структурні схеми систем управління безпекою мережних структур. Для досягнення поставленої мети застосовано математичний апарат методів теорії марковських процесів та теорії систем зі змінною структурою.

Специфіка авіаційних бортових мереж полягає в безперервній зміні структури і складу користувачів мережі і в підвищених вимогах до захисту від зовнішніх і внутрішніх впливів. Для реалізації різних сценаріїв еволюції мобільних мережних структур в умовах не тільки параметричної і структурної невизначеності, а й невизначеності цілей конфлікту доцільно використовувати найбільш універсальні методи статистичного опису вихідних даних і власне процесів протиборства. У той же час необхідно отримувати рішення в замкнутій формі – у вигляді систем функціональних рівнянь, алгоритмів і схем, асимптотичних оцінок. Універсальним апаратом для вирішення цих завдань є теорія марковських процесів, зокрема, процесів загибелі і розмноження, якими з достатньою для практики адекватністю і точністю описуються процеси розвитку конфлікту.

Нелінійності в перемикаючих чарунках пропонується апроксимувати методом статистичної лінеаризації. Правомірність такого підходу обумовлена ефектами нормалізації в складних динамічних системах і статистичної стійкості імовірнісних розподілів сумарних потоків вхідних впливів.

Список літератури

1. Future Aeronautical Communications / Edited by Simon Plass. - Institute of Communications and Navigation, German Aerospace Center (DLR), Germany.

– Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. – InTech, 2011. – 378 p.

2. Виноградов Н.А., Дрововозов В.И., Лесная Н.Н., Зембицкая А.С. Анализ нагрузки на сети передачи данных в системах критичного применения // «Зв'язок». – 2006. – №1. – С. 9–12.

3. С.В. Водопьянов, В.И. Дрововозов, Е.В. Толстикова. Защита авиационных бортовых сетей от атак методами теории конфликта с применением медовых ловушек // Захист інформації, Том 17, №3 липень-вересень 2015 р., С. 255 – 263.

4. Mohd. Junedul Haque. An Approach for Intrusion Detection using HoneyPots to Improve Network Security // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). – Volume 3 Issue IV, April 2015. – P. 1029-1033.

5. Виноградов Н.А., Данилина Г.В., Домарев Д.В., Милокум Я.В. Управление псевдосервисами в защищенных информационных системах на основе теории конфликта // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №6(34). – С. 5–12.

6. Казаков И.Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой / И.Е. Казаков – М.: Наука, 1977. – 416 с.

7. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц / Гантмахер Ф.Р.– М.: Наука, 1966. – 576 с.

8. Ланкастер П. Теория матриц / П.Ланкастер. – М.: Наука, 1978. – 280 с.

Статтю подано до редакції 20.01.2016