

УДК 004.738 (043.3)

DOI: 10.18372/2073-4751.75.18019

Толстікова О.В.,
orcid.org/0000-0002-7616-2757,**Водоп'янов С.В.**,
orcid.org/0009-0006-0424-6173,**Дрововозов В.І.**,
orcid.org/0000-0002-6303-9741,**Аль-Шаммарі А.А.А.**,
orcid.org/0000-0001-5678-2732,**Андрєєв О.В.**,
orcid.org/0000-0001-9032-1139

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖНИХ СТРУКТУР КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ ПРИ НАЯВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Національний авіаційний університет

drovvlad47@gmail.com

Вступ

Перспективні корпоративні мережі систем управління повітряним рухом (СУ УПР) є гетерогенними за визначенням. До них в якості мереж доступу входять локальні обчислювальні мережі (у тому числі безпроводові). Робочі станції операторів підключаються до цих мереж доступу. Оптимальна структура та сегментація мережі повинні враховувати такі переваги стандартної спільної мережі, як проста зміна топології та регулювання потоків даних і доступу користувачів тощо. Вибираються оптимальна кількість сегментів мережі та кількість кінцевих вузлів у кожному сегменті. Корпоративні мережі систем управління повітряним рухом є складними неоднорідними системами з великою кількістю елементів і вузлів. Фактично сучасна мережа аеровузла являє собою ієрархічну систему менеджер-агент з набором стаціонарних та мобільних агентів (так звана мультиагентна система) [1-3].

Виходячи з цих міркувань, можна зробити очевидний висновок, що завдання оптимізації параметрів, структур та топологій мережі СУ УПР є завданням багатокритеріальної стохастичної оптимізації.

Пов'язані роботи

У [4] було надано дослідження ємності та справедливості розподілу енергетичних та інформаційних ресурсів гетерогенних мереж з розширенням частотного

діапазону, контролем та координацією характеристик завод. У цій роботі переваги розвантаження від розширення діапазону в гетерогенних мережах були отримані за допомогою кумулятивних функцій розподілу (*CDF*) різниці відношення сигналу низхідної лінії зв'язку до завод плюс шум (*SINR*) між сигналами мережних вузлів та найпотужнішими сигналами термінальних вузлів. Потім ці *CDF* були використані для дослідження потужності та справедливості системи як безперервної функції зміщення розширення діапазону. У [5] досліджувалася пропускна спроможність гетерогенних безпроводових мереж із загальними налаштуваннями мережі. Вони запропонували аналізувати пропускну спроможність звичайних і випадкових гетерогенних безпроводових мереж, припускаючи, що допоміжні вузли розміщені регулярно та рівномірно та незалежно розміщені відповідно.

У роботі [6] автори запропонували метод визначення сумарної потужності з управлінням радіоресурсами в гетерогенних безпроводових мережах. Вони почали з представлення моделі системи, яка складається з *RAT* з перекриттям покриття в певній області, де ресурсами керують спільно. Вони визначили ємність системи як максимальну кількість користувачів, які можуть бути допущені при дотриманні необхідних обмежень *QoS*. Автори

змодельовали гетерогенну систему як багатовимірний ланцюг Маркова. Стан позначався як $s_i = (n_{1i}, \dots, n_{ji}, \dots, n_{Mi})$, де $j = 1, \dots, M$, $1 \leq i \leq M$, M представляє кількість областей, що розглядаються в моделі архітектури, n_{ji} представляє поточну кількість викликів, які поступають в область A_j та приймаються у точці $RAT(i)$, i N є кількістю RAT . Запропонований метод враховував виклики передачі обслуговування при розрахунку максимальної кількості користувачів. Автори розглянули ймовірність втрат і середню пропускну спроможність допущених користувачів як необхідну міру QoS .

У [8] автори запропонували новий метод, заснований на апроксимації точкового процесу, для аналізу очікуваної потужності комунікаційних систем, у яких користувачі входять у мережу та виходять з неї. При цьому процеси входу та виходу є здійснюються у випадкові моменти часу. Запропоновано статистичну модель загибелі та розмноження. Показано, що сила цього наближення полягає в полегшенні асимптотичного аналізу ємності таких систем у різних неоднорідних сценаріях, де користувачі були або за своєю природою неоднорідними, або змушені діяти таким чином через обмеження QoS . З урахуванням кількості користувачів, встановлено високий поріг пропускну спроможності, так що лише невелика частина користувачів перевищить його. Очікувана ємність була оцінена при роботі з одним користувачем у неоднорідному середовищі. Кілька дослідницьких робіт були зосереджені на аналізі пропускну спроможності даної мережі, наприклад [8], де автори вивчали пропускну спроможність безпроводової мережі, зокрема висхідної лінії зв'язку за допомогою двовимірного ланцюга Маркова безперервного часу. Розглядаючи два типи запитів: запити в режимі реального часу (RT) і запити з найкращими зусиллями (BE). Розроблено підхід, заснований на спектральному аналізі, для оцінки ємності комутаційного вузла. Роботи [9-13] служать фундаментальним підґрунтям аналізу та проектування мережних

систем спеціального призначення, зокрема, систем реального часу, критичного застосування, гетерогенних систем тощо.

Стан проблеми та постановка завдання досліджень

Мультиагентна система автономного управління повітряним рухом включає наступні програмні додатки (спеціальні агенти):

- асистент пілота (АП-агент). Агент цього класу допомагає пілоту в процесі вирішення завдань забезпечення безпеки при управлінні рухом у повітряному просторі при польоті та посадці;

- асистент диспетчера УПР (АТСС-агент). Агент цього класу допомагає диспетчеру при вирішенні завдань управління в межах району (секторів) підходу, а також допомагає йому при формуванні команд на вхід СС в район прибуття аеропорту;

- агент, що проектує поведінку виявленого та супроводжуваного повітряного судна (*hijacking-agent*). Рух цього літака представлений тривимірними векторними диференціальними рівняннями третього порядку (з урахуванням координат, швидкості та прискорення). Його рух не підкоряється прийнятим правилам і командам диспетчера УПР;

- сервер імітації. Цей компонент архітектури насправді не є агентом. Призначений для моделювання та відображення повітряної обстановки. Крім того, він відповідає за генерацію подій типу появи нового для СС у повітряному просторі та обслуговування СС від нього.

Цей компонент надає інтерфейс користувача, який необхідний для вирішення різних ситуацій, включаючи ситуації викрадення, управління засобами відображення, візуалізації зароджуються конфліктів тощо.

Формальна специфікація внутрішньої поведінки агентів виконується шляхом опису сценаріїв поведінки ролі в тому чи іншому протоколі взаємодії. Крім того, щоб задовольнити потреби в безперервності операцій, безпеці та пропускну здатності, наземні системи проектуються

багатофункціональними та резервованими [1]. Наприклад, системи зв'язку певний час будуть використовуватися для створення резервних навігаційних можливостей. Обслуговування спостереження

забезпечуватиметься комбінацією радарів, вторинного залежного спостереження та звітів про місцезнаходження літака. Рис. 1 ілюструє концепцію багаторівневої архітектури CNS.

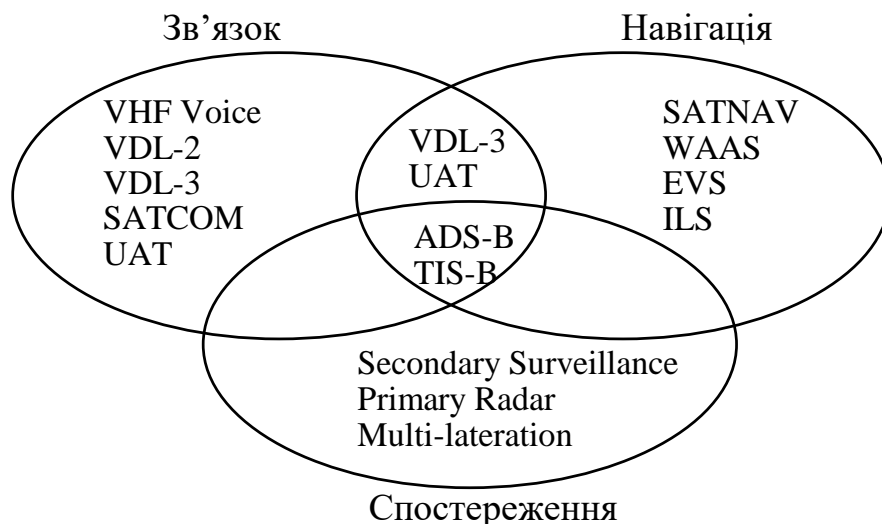


Рис. 1. Концепція багаторівневої архітектури ЦНС, скорочення:

ADS-B: автоматичне залежне спостереження – ширококомвні повідомлення; *CNS*: зв'язок, навігація та спостереження; *EVS*: вдосконалена система зору; *ILS*: система посадки за приладами; *SATCOM*: супутниковий зв'язок; *SATNAV*: Супутникова навігація; *TIS-B*: Послуги інформації про трафік; *UAT*: трансивер універсального доступу; *VDL*: надвисокочастотний (*VHF*) цифровий зв'язок; *VHF Voice*: Голосовий зв'язок через *VHF* канал; *WAAS*: Система розширення зони доступу.

Новими ключовими технологіями є когнітивне радіо та мережа передачі даних спостереження. Когнітивне радіо та мережні протоколи Інтернету забезпечують глобальне підключення незалежно від основного фізичного каналу.

Але топологічна структура мережі аероузла дуже складна і неоднорідна. Необхідно проводити постійну структурну адаптацію мережі в режимі реального часу в залежності від завантаженості аеродрому, наявності та загальної кількості конфліктних ситуацій у зоні відповідальності аеродрому тощо. При цьому треба враховувати енергетичні обмеження, обумовлені специфікою безпроводових сегментів мережі, перш за все, співвідношення сигнал / (шуми плюс завади).

Отже, розглянемо підхід до задачі оптимізації з огляду на інформаційно-обчислювальну мережу аеродрому.

Оптимізація топологічної структури мережі

Розглянемо спеціалізовану інформаційно-комунікаційну мережу з мобільними комутаційними вузлами (КВ) та затримками передачі. Мережні вузли можуть бути як мобільними, і стаціонарними (рис. 2). Мобільні мережні вузли розташовані на бортах літаків, що знаходяться у зоні аероузла. Над ними здійснюється неперервне диспетчерське управління.

Дамо коротку характеристику мережі. Об'єм мережі не фіксований: $L_{netw} \leq L_{netwmax} | q \geq q_{min} |$, де $L_{netwmax}$ – максимальна відстань між вузлами мережі, обумовлена мінімальним співвідношенням $SINR$ – сигнал/(завади + шуми). Об'єм мережі неперервно змінюється випадковим чином. Зміни залежать від різних (внутрішніх та зовнішніх) чинників. При перевищенні припустимого об'єму мережі система управління мережею

намагається негайно повернути мережу до початкового стану. Механізм управління – триплет якості сервісу QoS . Для забезпечення норм на QoS у відповідності до рекомендацій Y.1564-201602-III – паспортизація потоку трафіку – зазвичай

використовують наступні параметри (ключовий триплет QoS): пропускна спроможність C_{th} ; затримка передачі τ_{lt} та її імовірнісний розподіл $w(\tau_{lt})$; середня кількість бітових помилок у потоці f_{err} .

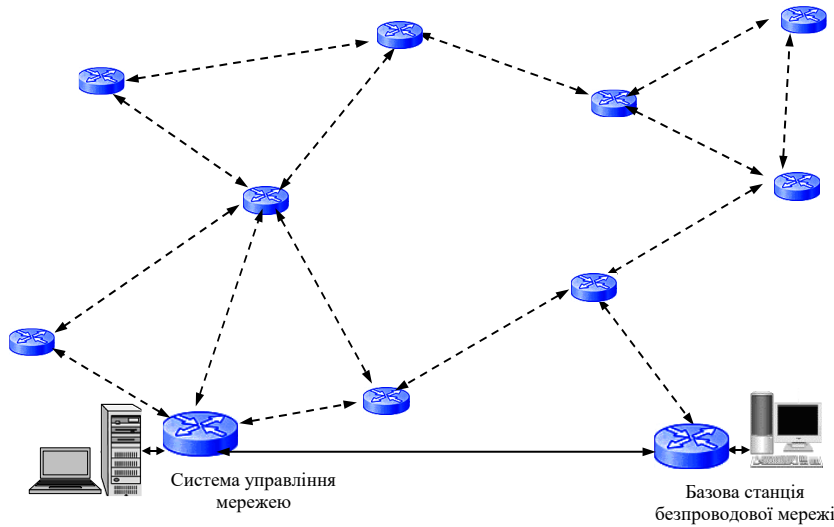


Рис. 2. Схема мережі з мобільними вузлами у зоні аеродрому

Дуже важливою характеристикою продуктивності систем зв'язку є відношення сигнал-шум (ОСШ). ОСШ – це відношення енергії сигналу на 1 біт до щільності потужності шумів на 1 герц. Розглянемо сигнал, що містить двійкові цифрові дані, що передаються з певною швидкістю – R біт/с. Нагадаємо, що $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$ і обчислимо питому енергію одного біта сигналу: $E_b = STb$ (де S – потужність сигналу; Tb – час передачі одного біта). Швидкість передачі можна виразити через різницю ентропії корисного сигналу $H(u)$ й умовної ентропії $H(u|v)$, яка дорівнює ентропії теплового шуму [8]. Врахуємо, що тепловий шум, що є присутнім у смузі шириною 1 Гц, для будь-якого пристрою або провідника, становить:

$$N_0 = kT \left(\frac{\text{Вт}}{\text{Гц}} \right), \quad (1)$$

де N_0 – щільність потужності шумів у ватах на 1 Гц смуги; k – постійна Больцмана; T – температура в градусах Кельвіна (абсолютна температура). Отже,

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N_0} = \frac{S}{kTv}. \quad (2)$$

Відношення $\frac{E_b}{N_0}$ має велике практичне значення, оскільки швидкість появи помилкових бітів є функцією даного відношення. При відомому значенні, необхідному для отримання бажаного рівня помилок, можна вибирати інші параметри в наведеному рівнянні. Слід зазначити, що для збереження необхідного значення при підвищенні швидкості передачі даних R доведеться збільшувати потужність сигналу, що передається по відношенню до шуму.

Досить часто рівень потужності шуму достатній зміни значення одного з бітів даних. Якщо ж збільшити швидкість передачі вдвічі, біти будуть "упаковані" вдвічі щільніше, і той самий сторонній сигнал призведе до втрати двох бітів інформації. Отже, при постійній потужності сигналу і шуму збільшення швидкості передачі тягне за собою зростання рівня виникнення помилок.

Для розрахунку дальності візьмемо класичну формулу розрахунку втрат у вільному просторі [7]:

$$F_{SL} = 33 + 20(\lg F + \lg r).$$

Тут F_{SL} (*Free Space Loss*) – втрати у вільному просторі (дБ); F – центральна частота каналу, на якому працює система зв'язку (МГц); r – відстань між двома точками (км).

F_{SL} визначається сумарним посиленням системи. Воно розраховується так:

$$Y = P_{\Sigma} + G_t + G_r - Pt_r [\text{дБ}]_{\min}, \quad (3)$$

де $P_{\Sigma} [\text{дБмВт}]$ – потужність передавача; $G_t [\text{дБ}]$ – коефіцієнт посилення передавальної антени; $G_r [\text{дБ}]$ – коефіцієнт посилення приймальної антени; $P [\text{дБмВт}]_{\min}$ – чутливість приймача на даній швидкості; $L_t [\text{дБ}]$ – втрати сигналу в коаксіальному кабелі та роз'ємах передаючого тракту; $L_r [\text{дБ}]$ – втрати сигналу в коаксіальному кабелі та роз'ємах приймального тракту.

F_{SL} обчислюється за формулою:

$$F_{SL} = Y - S_{OM}, \quad (4)$$

де S_{OM} (*System Operating Margin*) – запас в енергетиці радіозв'язку (дБ). За допомогою S_{OM} враховуються можливі фактори, що негативно впливають на дальність зв'язку, такі як:

- температурний дрейф чутливості приймача та вихідний потужності передавача;
- різні атмосферні явища: туман, сніг, дощ;
- неузгодженість антени, приймача, передавача з антенно-фідерним трактом.

Цей параметр зазвичай береться рівним 10 дБ [3]. Вважається, що 10-децибелний запас посилення достатній для інженерного розрахунку [4].

У результаті отримаємо формулу дальності зв'язку:

$$r = 10^{\left(\frac{F_{SL} - 33}{20} - \lg f_0\right)}. \quad (5)$$

Нехай мережа вміщує N кінцевих вузлів, об'єднаних у сегмент мережі доступу через вузол комутації (ВК), одне джерело s_n та один вузол збору інформації (приймач) d_n . Схему розташування вузлів зображено на рис. 3.

Передача у мережі вважається успішною, якщо виконуються такі правила [7]:

- джерело після передачі чергового повідомлення отримує підтвердження прийому повідомлення хоча б від одного КВ;
- КВ, який отримав повідомлення, зберігає його, доки не буде встановлено з'єднання з будь-яким комутаційним вузлом (крім того, від якого це повідомлення отримано) або поки не пройде певний час до очікуваного моменту входження в контакт з будь-яким комутаційним вузлом. КВ – зберігач повідомлення передає його та отримує підтвердження про прийом;
- приймач, який отримав повідомлення від одного з найближчих до нього КВ, своєю чергою, надсилає підтвердження про отримання;
- якщо на будь-якому з проміжних етапів проходження повідомлення через мережу підтвердження i -м вузлом ($i = 1, 2, \dots, j, \dots, MM < N$) не отримано протягом заданого часу, передача повідомлення i -м вузлом повторюється.

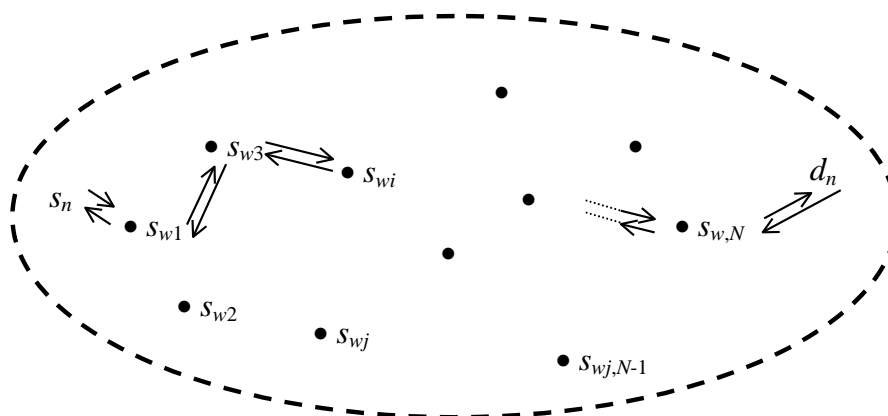


Рис. 3. Схеми послідовних передач повідомлень із проміжними підтвердженнями

Вважаючи закони розподілу сигналу та шуму взаємно незалежними, використовуємо для пошуку закону розподілу суми сигналу та шуму формулу композиції законів розподілу [11].

Нехай вхідний сигнал являє собою адитивну суміш корисного сигналу та шуму:

$$y(t) = s(t) + n(t).$$

Дисперсія сигналу $y_{\text{вих}}$:

$$\sigma_{\text{вих}}^2 = \frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} [s(t - t_c)]^2 dt = \frac{N_0 E_0}{2}.$$

Ймовірність виявлення:

$$P_d = \int_{y_{\text{п}}}^{\infty} w(y|s \neq 0) dy = \frac{1}{\sqrt{2\pi\left(\frac{N_0 E_0}{2}\right)}} \int_{y_{\text{п}}}^{\infty} \exp\left[-\frac{(y_{\text{вих}} - aE_0)^2}{2\left(\frac{N_0 E_0}{2}\right)}\right] dy_{\text{вих}}. \quad (6)$$

Інтеграл у правій частині (6) є табульованою функцією – інтегралом ймовірності $\Phi(x)$ [8]. Відповідно, ймовірності виявлення P_d та хибної тривоги P_f можна записати у вигляді

$$P_d = 1 - \Phi\left[y_{\text{п}} \sqrt{2\left(\frac{N_0 E_0}{2}\right)} - \sqrt{R}\right] \quad (7)$$

$$R = \frac{2E}{N_0};$$

$$P_f = 1 - \Phi\left[y_{\text{п}} \sqrt{2\left(\frac{N_0 E_0}{2}\right)}\right], \quad (8)$$

де $E_0 = \int_{-\infty}^{\infty} [s(t - t_0)]^2 dt$ – енергія "опорного" сигналу, який визначається видом сигналу, що передається.

З урахуванням виразів (1-8) розроблено методику розрахунку дальності зв'язку у вільному просторі.

Нехай є передавач потужністю P_{Σ} із ізотропним випромінювачем. Електромагнітне поле випромінюється за сферою радіусом r . Тоді щільність потоку потужності на одиницю поверхні сфери визначається наступним виразом:

$$P_{\Sigma 0} = \frac{P_{\Sigma}}{4\pi r^2}. \quad (9)$$

Якщо енергія сигналу, що генерується передавачем, випромінюється в

простір через антену з коефіцієнтом посилення G_{Σ} , то

$$P_{\Sigma G} = \frac{P_{\Sigma} G_{\Sigma}}{4\pi r^2}. \quad (10)$$

Потужність сигналу на вході приймача, що знаходиться на дальності r , дорівнює

$$P_{\text{прм}} = P_{\Sigma G} A_{\text{еф}} = \frac{P_{\Sigma} G_{\Sigma} A_{\text{еф}}}{4\pi r^2}. \quad (11)$$

З урахуванням співвідношення $A_{\text{еф}} = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$, де λ – довжина хвилі випромінюваного сигналу, можна записати (11) в наступному вигляді:

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\Sigma} G_{\Sigma} G_{\text{прм}} \lambda^2}{(4\pi r)^2}. \quad (12)$$

Для врахування впливу внутрішніх шумів та зовнішніх завад введемо поняття "еквівалентний рівень шуму на вході приймача". Виразимо його через коефіцієнт шуму $k_{\text{ш}}$:

$$k_{\text{ш}} = \frac{\frac{P_{\text{прм}}}{N_{\text{ш}}}}{\frac{k_B T \Delta f}{\left(\frac{P_{\text{прм}}}{N_{\text{ш}}}\right)_0}}, \quad (13)$$

де $k_B = k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ (Вт/Гц). K – постійна Больцмана; T – абсолютна температура джерела випромінювання, K ; Δf – еквівалентна шумова смуга пропускання приймача; $\frac{P_{\text{прм}}}{N_{\text{ш}}}$ – відношення потужності сигналу, обчисленої за формулою (12), до потужності шуму, наведеної до входу приймача.

Прийmemo $T_0 = 290^\circ \text{K}$. Тоді:

$$\left(\frac{P_{\text{прм}}}{N_{\text{ш}}}\right)_0 k_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{прм}}}{k_B T \Delta f \cdot k_{\text{ш}}}. \quad (14)$$

З рівняння (14) отримаємо:

$$N_{\text{ш}} = k_B T \Delta f \cdot k_{\text{ш}}. \quad (15)$$

Поєднуючи рівняння (12) з рівнянням (15) та вводячи множник втрат L_s для системи зв'язку в цілому, отримаємо рівняння дальності зв'язку у простій та зручній формі:

$$\frac{P_{\text{прм}}}{N_{\text{ш}}} = \frac{P_{\Sigma} G_{\Sigma} G_{\text{прм}} \lambda^2}{(4\pi r)^2 k_B T_0 \Delta f \cdot k_{\text{ш}} L_s}. \quad (16)$$

Видно, що відношення сигнал/шум на вході приймача обернено пропорційно квадрату відстані між передавачем і приймачем. На рис. 4 зображені графіки залежності ймовірності виявлення від квадрата дальності для сигналу з гаусівським розподілом і сигналу з розподілом Парето. Для наочності самі графіки зображені на рис. 5 у логарифмічній шкалі.

Вихідні дані для розрахунків [5]:

1. Ймовірність доставки повідомлення – щонайменше 0,9.

2. Нормована дальність – від 1 до 2,5.
3. Відношення сигнал/шум – від 10 до 20 дБВт.

4. Коефіцієнти посилення передавальної та приймальної антен – від 10 до 20 дБ.

Введемо нормовану дальність $r_{norm} = \frac{r}{r_{max}} = m^{-0.5}$. Величина r_{norm} може розглядатися як коефіцієнт, що враховує зменшення дальності зв'язку порівняно з максимальною внаслідок імовірнісного характеру зв'язку.

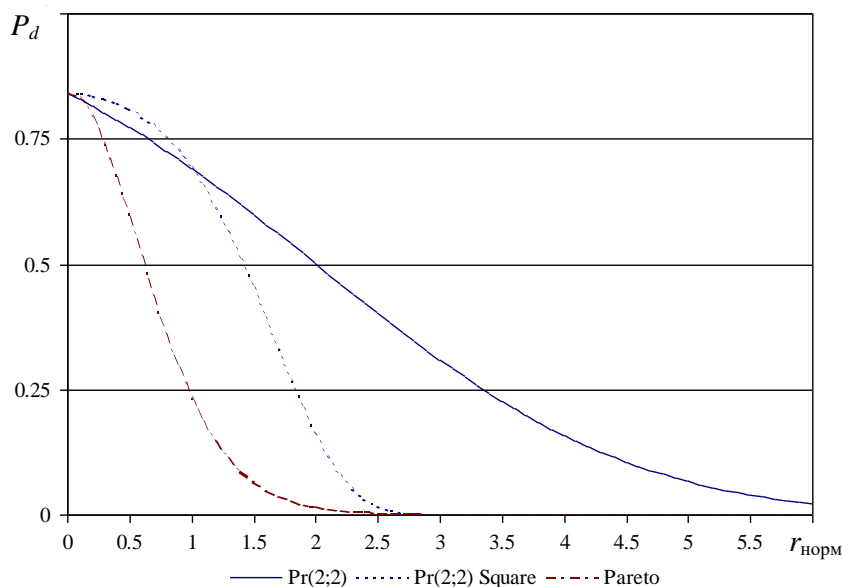


Рис. 4. Залежність ймовірності виявлення від квадрата нормованої дальності. Відношення сигнал/шум за потужністю дорівнює 4

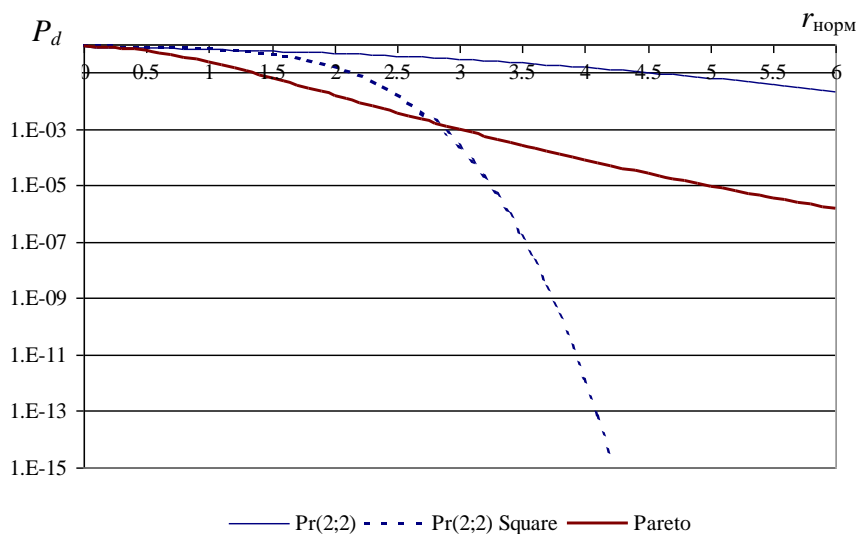


Рис. 5. Залежність ймовірності виявлення від квадрата нормалізованої дальності (логарифмічна шкала). Відношення сигнал/шум за потужністю дорівнює 4

Видно, що при збільшенні дальності ймовірність виявлення сигналу з розподілом Парето меншає повільніше, ніж сигналу з нормальним (гаусівським) розподілом. Через таку специфічну особливість імовірнісних розподілів самоподібного трафіку їх часто називають розподілами з "важкими хвостами" (*heavy-tale distributions*). Використовуючи наведені вище формули, рівняння та графіки, необхідно розрахувати потрібну потужність передавальних пристроїв, число та чутливість приймальних пристроїв, при яких забезпечується необхідна ймовірність доставки повідомлень.

Отримані результати використаємо далі для дослідження залежності ймовірності доставки повідомлення від числа комутаційних вузлів, які приймають повідомлення та пересилають його кінцевому споживачу.

У вихідному стані, без ознак перевантаження мережі, всі ВК працюють у "прозорому" режимі, тобто інформація через них передається транзитом. Сегмент – це загальне спільне середовище та один домен колізій. Кількість втрат пакетів і повторних передач дає інформацію про наявність перевантаження. Кількість повторних передач не пов'язана строгою функціональною залежністю з коефіцієнтом використання i -го сегмента мережі. Таким чином, ми можемо звести його в таблицю за результатами попередніх розрахунків з урахуванням збережених попередніх даних про параметри трафіку в кожному сегменті, наприклад, за співвідношенням між кількістю повторних передач і кількістю переданих пакетів користувача. Завдання оптимізації формулюється наступним чином:

- U – вектор параметрів навантаження мережі. Складовими вектора є інтенсивності потоків даних, статистичні параметри трафіку, пріоритети окремих потоків даних.

- Q є вектором параметрів якості обслуговування, таких як затримки доставки, втрати пакетів тощо.

- W є вектором параметрів експлуатації мережі: ємності, буферної пам'яті ВК, надійності обладнання й середнього часу відновлення та ін. Векторні обмеження на граничні параметри мережного обладнання, включаючи загальну вартість мережі:

$$C_i(U, Q, W) \leq C \overline{1, N_{c_i \rightarrow \max}},$$

де N_c – кількість елементів множин. Векторні обмеження на параметри архітектури мережі залежать від умов фізичної та практичної реалізації, наприклад, гранична досягнута швидкість передачі даних, максимальні відстані між вузлами, мінімально досягнуті затримки в СН, рівень взаємних завад: $R_i(U, Q, W) \in R_{\max}$.

Треба знайти множину векторів, яка дає екстремум функціоналу нормованої ефективності:

$$\Psi_{en}(U, Q, W) \xrightarrow[\substack{Q=Q_{opt} \\ W=W_{opt}}]{U=U_{opt}} \max \Leftrightarrow \quad (17)$$

Як і у всіх великих системах [2], витрати є квадратичними функціями відхилення від оптимуму:

$$\Psi \left(\frac{N_{\Pi, N_{lost}}}{S_i} \right) = \Psi \left\{ \frac{a \left[1 - \left(\frac{|N_{\Pi} - N_{lost}|}{N_{\Pi}} \right) \right]^2}{S_i} \right\}, \quad (18)$$

де N_{Π}, N_{lost} – номери доставлених і втрачених пакетів відповідно; S_i – i -та структура мережі; a – масштабний коефіцієнт. Припускаючи незалежність ключових факторів оптимізованого функціоналу, ми можемо спростити рівняння (6):

$$\Psi_{en}(U, Q, W) = \sum_{i=1}^{N_U} \alpha_i u_i + \sum_{j=1}^{N_Q} \beta_j q_j + \sum_{k=1}^{N_W} \gamma_k w_k \xrightarrow[\substack{q_j=q_{jopt} \\ w_k=w_{kopt}}]{u_i=u_{iopt}} \max,$$

$$i = \overline{1, N_U}, j = \overline{1, N_Q}, k = \overline{1, N_W};$$

$$N_U \neq N_Q \neq N_W. \quad (19)$$

Іншими словами, пропонується скаляризація задачі (17). Звичайно, теоретично існує ризик зациклення на локальному екстремумі, але зі зростанням мережі як великої системи цей ризик асимптотично прагне до нуля [2]. Розроблено загальний

алгоритм адаптивного логічного структування мережі з використанням методу Сааті аналізу ієрархій [3]. Помилки у визначенні відносної важливості критеріїв відіграють роль стабілізаторів рішення, оскільки їх наявність забезпечує несингулярність матриці пріоритетів. Ці помилки піддаються поточному контролю, щоб досягти оптимальної кінцевої точності отриманого рішення.

Висновки

У статті запропонована формальна модель комбінованого (статистично-сигнального) аналізу повідомлень, що поступають на вхід мережних сегментів з закритим доступом, дозволяє перейти на якісно новий метод виявлення та опрацювання даних не тільки на мережному та транспортному рівнях, а й безпосередньо на фізичному рівні. Завдяки використанню такого підходу вдається подолати обмеження, притаманні детерміністським методам мереженезалежних рівнів еталонної моделі. Статистичний підхід також є запорукою захисту від хибних рішень, обумовлених новими, раніше невідомими атаками та вторгненнями – так званими "експлоїтами нульового дня".

У роботі визначено багатовимірний функціонал ефективності інформаційно-розрахункової комп'ютерної мережі – такої системи критичного застосування, як система управління повітряним рухом та інформаційно-комунікаційна мережа аероузла. Спеціальне припущення про середньоквадратичні помилки відносних пріоритетів частинних критеріїв дозволяє виключити ризик сингулярності матриці пріоритетів у застосованому методі Saaty аналізу ієрархій. Крім того, наявність зазначених помилок зменшує ризик заціклення алгоритму оптимізації на локальних екстремумах. Ми знаходимося на етапі дослідження граничних похибок в експертних оцінках, щоб мінімізувати як ризик помилкових висновків про порівняльну важливість впливових факторів, так і виключити заціклення на локальних екстремумах під час поточної структурної оптимізації.

Література

1. Satish C. Mohleji, Andrew R. Lacher, Paul A. Ostwald. CNS/ATM System Architecture Concepts and Future Vision of NAS Operations in 2020 Timeframe. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. 2003. P. 1–10.
2. Mesarovic M.D., Macko D., Takahara Y. Theory of hierarchical multilevel systems. New York : Academic Press, 1970. 294 p.
3. Saaty T.L. The analytic hierarchy process. New York : McGraw Hill, 1980. 288 p.
4. Ciunzo D., Rossi P.S. (Eds.) Data Fusion in Wireless Sensor Networks. The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, Six Hills Way, Stevenage Herts, SG1 2AY, United Kingdom, 2019. 323 p.
5. Feng Wu, Jiang Zhu, Zhipeng Xi, Kai Gao. Capacity of Heterogeneous Mobile Wireless Networks with D-Delay Transmission Strategy. *Sensors (Basel)*. 2016. V. 16. 30 p.
6. Radio Resource Management White Paper. Cisco Systems, Inc., 2018. 52 p.
7. Frenzel L. Principles of Electronic Communication Systems (5th ed.) McGraw Hill, 2022. 946 p.
8. Sankararaman A., Baccelli F. Spatial Birth-Death Wireless Networks. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2017. V. 63, Iss. 6. P. 3964–3982.
9. Xuemin (Sherman) Shen, Xiaodong Lin Kuan Zhang (Eds.) Encyclopedia of Wireless Networks. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 1566 p.
10. Dordal P.L. An Introduction to Computer Networks. 2019. 872 p.
11. Gentle J.E. Mori Y., Härdle W.K. (Eds.) Handbook of Computational Statistics Concepts and Methods Second revised and updated Eq. Springer, 2012. 1204 p.
12. Tanenbaum A.S., Wetherall D.J. Computer Networks (5th ed.) Prentice Hall, Cloth, 2011. 960 p.
13. Kurose J.F., Ross K.W. Computer Networking: A Top-Down Approach. Pearson Education, Inc., 2017. 864 p.

Толстікова О.В., Водоп'янов С.В., Дрововозов В.І., Аль-Шаммарі. А.А.А., Андрєєв О.В.

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖНИХ СТРУКТУР КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ ПРИ НАЯВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ

У статті, що подається, розглянуто проблеми інформаційно-телекомунікаційних систем авіаційного транспорту, які, з одного боку, є системами жорсткого реального часу, а, з другого боку – системами критичного застосування. За результатами аналізу перспективних інформаційно-комунікаційних та комп'ютерних мереж критичного застосування виявлено, що основним проблемами для мереж є їх уразливість до зовнішніх завад різного походження, що погіршує показники QoS, зокрема, продуктивність. Розглянуто процес аналізу енергетичних та інформаційних характеристик безпроводових мереж критичного застосування. Введено та обґрунтовано основні критерії оцінки якості функціонування комп'ютеризованих систем управління повітряним рухом. Визначено багатовимірний функціонал ефективності інформаційно-обчислювальної та керуючої комп'ютерної мережі – такої системи критичного застосування, якою є система управління повітряним рухом та інформаційно-комунікаційна мережа аеровузла. Для постійного контролю характеристик мережних на належному рівні розроблено методіку розрахунку поточного співвідношення сигнал/(завади плюс шуми). За результатами аналізу енергетичних та інформаційних характеристик мережі встановлено їх взаємозв'язок, не завжди очевидний, але вельми показовий та корисний, наприклад, для розв'язання завдань багатокритеріальної оптимізації параметрів та управління станом мережі. Рішення проблеми багатокритеріальної оптимізації досягається за рахунок скалярного підходу до векторної оптимізації через метод аналізу ієрархій Сааті. Стійкість рішення забезпечується вставкою в матрицю пріоритетів випадкових компонент.

Ключові слова: гетерогенні мережі, архітектура мережі, метод аналізу ієрархії Сааті, стійкість рішення.

Tolstikova O.V., Vodopianov S.V., Drovovozov V.I., Al-Shammari A.A.A., Andreiev O.V.

OPTIMIZATION OF AIR TRAFFIC CONTROL NETWORK STRUCTURES IN THE PRESENCE OF ENERGY CONSTRAINTS

The article examines the problems of information and telecommunication systems of air transport, which, on the one hand, are hard real-time systems, and, on the other hand, critical application systems. Based on the results of the analysis of promising information and communication and computer networks of critical application, it was found that the main problems for networks are their vulnerability to external interference of various origins, which worsens QoS indicators, in particular, performance. The process of analyzing energy and information characteristics of wireless networks of critical application is considered. The main criteria for assessing the quality of functioning of computerized air traffic control systems have been introduced and substantiated. The multidimensional functionality of the efficiency of the information-computing and control computer network - such a critical application system as the air traffic control system and the information-communication network of the air hub – has been determined. In order to constantly monitor network characteristics at the proper level, a method of calculating the current signal/(interference plus noise) ratio has been developed. According to the results of the analysis of the energy and information characteristics of the network, their relationship is established, which is not always obvious, but very indicative and useful, for example, for solving the tasks of multi-criteria parameter optimization and network state management. The solution to the problem of multi-criteria optimization is achieved due to the scalar approach to vector optimization through the method of analysis of Saati hierarchies. The stability of the solution is ensured by inserting random components into the priority matrix.

Keywords: heterogeneous networks, network architecture, Saati hierarchy analysis method, decision stability.