

## УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНИМИ РАДІОМЕРЕЖАМИ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ – ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ РІШЕННЯ

Розглядається динамічна архітектура побудови мобільних радіомереж (МР), що припускає відсутність базових станцій і фіксованих маршрутів передачі інформації (так звані мережі MANET – Mobile Ad-Hoc Networks [1]). Всі вузли мережі мобільні та обмінюються інформацією безпосередньо між собою чи застосовують ретрансляцію пакетів. Під вузлом мережі розуміється термінал (переносний комп'ютер, персональний секретар, сенсорний пристрій, робот тощо), який оснащений прийомопередавачем та реалізує функції маршрутизатора. Застосування МР охоплює сфери як військового (мережі тактичної ланки управління [2], бездротові мережі пунктів управління, сенсорні мережі), так і цивільного призначення (надзвичайні ситуації і стихійні лиха; будинок і офіс; проведення виставок, конференцій, олімпіад тощо; гібридні стільникові/мобільні радіомережі). Комерційну привабливість МР одержали з появою недорогих бездротових мережевих рішень (стандарт IEEE 802.11 Wireless Ethernet, технології HiperLAN 2, Bluetooth) [3], що використовують неліцензійні смуги частот (для більшості країн світу) у діапазонах 2,4 чи 5,1 ГГц. Дані технології забезпечують радіозв'язність між вузлами в межах прямої видимості на відстанях від 10 до 1000 метрів і є основою для побудови радіомереж (бездротових).

МР тактичної ланки управління характеризуються:

- динамічною топологією (вузли мережі мобільні, піддаються знищенню та відмовам; канали радіозв'язку нестабільні, мають обмежені дальність зв'язку й пропускну здатність через вплив радіоелектронної протидії супротивника, взаємних перешкод, умов поширення радіохвиль тощо);
- обмеженою енергетичною можливістю вузлів, оснащеними батареями;
- різною розмірністю (десятки, сотні та тисячі вузлів);
- неоднорідністю за потужністю передачі та мобільністю (солдат, танк, вертоліт, літак);
- обмеженою безпекою через широкомовну природу радіоканалу;
- наявністю режиму “мовчання” і ін.

Вузли даної мережі повинні швидко адаптуватися до частих змін топології й ефективно використовувати обмежені мережеві ресурси. У таких умовах забезпечити інформаційний обмін із заданою якістю неможливо без ефективною системою управління (СУ) мережею. Аналізу і синтезу методів (алгоритмів) управління мережами зв'язку присвячена значна кількість робіт [4 – 9]. Існуючі сучасні технології управління телекомунікаційними мережами [9 – 11] розраховані на статичні чи квазістатичні умови їх функціонування та не враховують особливості МР. Наприклад, технологія TMN (Telecommunication Networks Management) є централізованою, для управління телекомунікаційною мережею використовується виділена мережа управління. Вона побудована на технології “агент-менеджер” із низьким ступенем автоматизації процесів управління.

У той же час основними відмінностями систем управління мережами зв'язку військового призначення від цивільних є:

1. Різні цілі управління, вимоги до якості й оперативності прийнятих рішень. Управління МР військового призначення має більш складні задачі і жорсткі вимоги до оперативності і якості прийнятих рішень. По-перше, функціонування мережі буде відбуватися в умовах частої зміни обстановки (оперативної, тактичної, по зв'язку тощо) при веденні бойових дій, високої мобільності абонентів, мінливості і непередбачуваності топології мережі. По-друге, підтримка необхідних характеристик мережі обумовлюється колективною роботою її елементів в умовах обмежених мережевих ресурсів. По-третє, неоднорідність елементів мережі обумовлюють різноманітність задач управління.

2. Різна архітектура систем управління мережами. Архітектура системи управління МР тактичного рівня повинна реалізовувати цілком децентралізоване (розподілене) управління.

3. Відсутність виділеної мережі передачі управляючої інформації.

4. Активна роль агентів управління і високий рівень їх "інтелекту".

Тому системі управління військовими мережами зв'язку характерні наступні особливості:

- багатомірність, яка обумовлена великою кількістю підсистем, елементів і зв'язків між ними;
- багатопараметричність, що обумовлена різноманітністю цілей окремих підсистем, різноманітністю їх характеристик, вимог і показників ефективності;
- багатofункціональність і ієрархічність, що впливає з необхідності рішення різних задач управління на різних рівнях і етапах функціонування системи;
- сильна залежність характеру функціонування від параметрів системи і зовнішніх впливів.

Існують труднощі рішення проблеми управління мережами військового зв'язку через відсутність повної формалізації задач управління (через їхню складність і динамічний характер), складність формування повної системи характеристик і показників ефективності самої системи управління (через сильну кореляцію і нечіткий характер деяких з них), високу розмірність задач управління.

У той же час до системи управління МР військового призначення пред'являються наступні основні вимоги  $\{TR_q\}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ : забезпечення засекреченої передачі різних типів інформації з заданою якістю; забезпечення адаптивного і розподіленого функціонування мережі з можливістю її самоорганізації; прийняття рішень у реальному чи близькому до нього масштабі часу; мінімальне завантаження мережі службовою інформацією; оптимізація характеристик мережі; максимальна автоматизація процесів управління мережею.

У [12] визначені основні принципи управління МР, до яких можна віднести: адаптивність, функціональність, розподіленість, координація взаємодії, ієрархічність, оптимальність і автоматизація. Розроблено модель системи оперативного управління мережею з виділенням наступних функціональних підсистем: контролю та збору інформації про стан мережі, маршрутизації, передачі по маршрутах, управління топологією, управління навантаженням, управління радіоресурсом, забезпечення безпеки, планування і корекції, навчання (рис. 1). Перелік задач управління МР та їх класифікація представлені в [13]. Кількість і конкретні задачі оперативного

управління визначаються характеристиками й умовами функціонування мережі, а також прийнятими технологічними рішеннями на етапі її проектування.

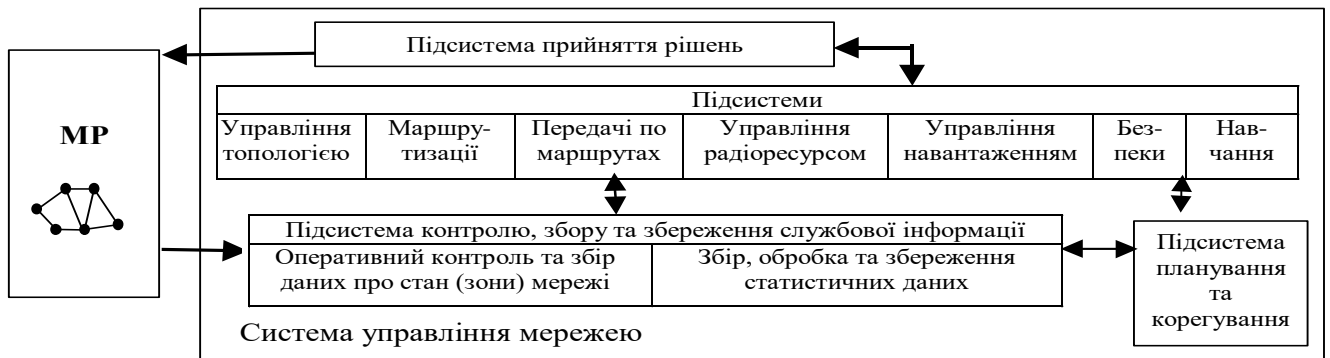


Рис. 1. Функціональна модель системи управління МР

З позицій системного підходу управління повинно бути спрямоване на досягнення визначеної мети. У динамічних умовах функціонування МР загальною проблемою є максимізація пропускної здатності мережі (сумарного обсягу повідомлень, що доставляється в одиницю часу по всіх радіоканалах при визначених потужностях передач вузлів) за умови побудови найкоротших маршрутів між парами відправник-адресат [14]. В умовах децентралізованого управління ціль управління декомпозується на користувальницьку та мережеву оптимізацію. Користувальницька – передача інформації між парою відправник-адресат із заданою якістю при прагненні знизити витрати мережевих ресурсів (мережева оптимізація – мінімізація службового трафіка за рахунок оптимізації процесів управління) і на цій основі створити потенційні умови для підвищення пропускної здатності мережі [15]. Оптимізація рішень досягається застосуванням відповідних стратегій, що реалізують сукупність методів і алгоритмів на фізичному, каналному, мережевому і транспортному рівнях. Дані стратегії визначаються вимогами до інформаційного обміну, складом управляючих і неуправляючих параметрів мережі, перелік яких визначається прийнятими і реалізованими на етапі проектування комунікаційними технологіями, а також умовами функціонування мережі.

Оптимальна стратегія передачі повинна задовольняти обмеженням на використання всіх відомих ресурсів мережі при оптимізації цільової функції. Тоді ціль управління полягає в максимізації пропускної здатності мережі  $S$

$$U^*(t) = \arg \max_{U(t) \in \Omega} S(\Gamma^\xi(t), v(t), N(t), E^{\bar{6}}(t), U(t)) \quad (1)$$

при обмеженнях  $\Omega$ , що накладаються на вибір управління

$$\Omega = \{t_3^\xi(U(t)) \leq t_{3\text{зпр}}^\xi, r(U(t)) \leq r_{\text{imax}}, U(t) \in \{\overline{\text{TP}}_q\}, q = \overline{1, Q}\} \quad (2)$$

і обмеженнях на ресурси мережі

$$e_i^{\bar{6}} \leq e_{i\text{imax}}^{\bar{6}}, v_i \leq v_{\text{imax}}, s_{ij} \leq s_{ij\text{imax}}, N \leq N_{\text{max}}, \quad (3)$$

де  $U(t) = \langle U_\phi(t), U_k(t), U_c(t), U_T(t) \rangle$ , де  $U_i(t)$  – управління на  $i$ -му рівні (фізичному, каналному, мережевому, транспортному),  $t_3(U(t)) = (t_{31}(U(t)), \dots, t_{3m}(U(t)))$  – вектор середніх часів затримки передачі пакетів між  $m$  кореспондуючими парами абонентів;

$\Gamma^\xi(t) = \|g_{ik}^\xi(t)\| = [0 \dots g_{\text{imax}}^\xi]$  – інтенсивність вхідних потоків  $\xi$ -типу;  $v(t) = [0 \dots v_{\text{max}}]$  –

інтенсивність зміни топології мережі;  $v(t) = \|v_i(t)\|$  – мобільність вузлів;  $E^{\bar{6}}(t) = \|e_i^{\bar{6}}\|$

$(t) \parallel$  – ємність батарей вузлів;  $s_{ij}$  – пропускна здатність каналу  $(i, j)$ ;  $i, j, k \in V$ ,  $|V| = N$  – множина вузлів мережі,  $r$  – радіус передачі.

Цикл управління кожним вузлом включає  $U = \{U^z, U^a, U^b, U^p\}$  (рис. 2):

- $U^z$  – збір інформації про стан мережі (яку інформацію збирати? як часто? яким способом? якого обсягу і глибини?);
- $U^a$  – аналіз даної інформації – визначаються: виконання мережею своїх функцій, необхідність управляючого впливу, цілі управління з подальшою деталізацією їх на підцілі;
- $U^b$  – вироблення рішення (обчислення маршруту, вибір протоколу доступу, вибір методу передачі, способу розсилання службової інформації т.д.);
- $U^p$  – реалізація рішення (розсилання службової інформації, резервування ресурсу, установлення потужності передачі й ін.).

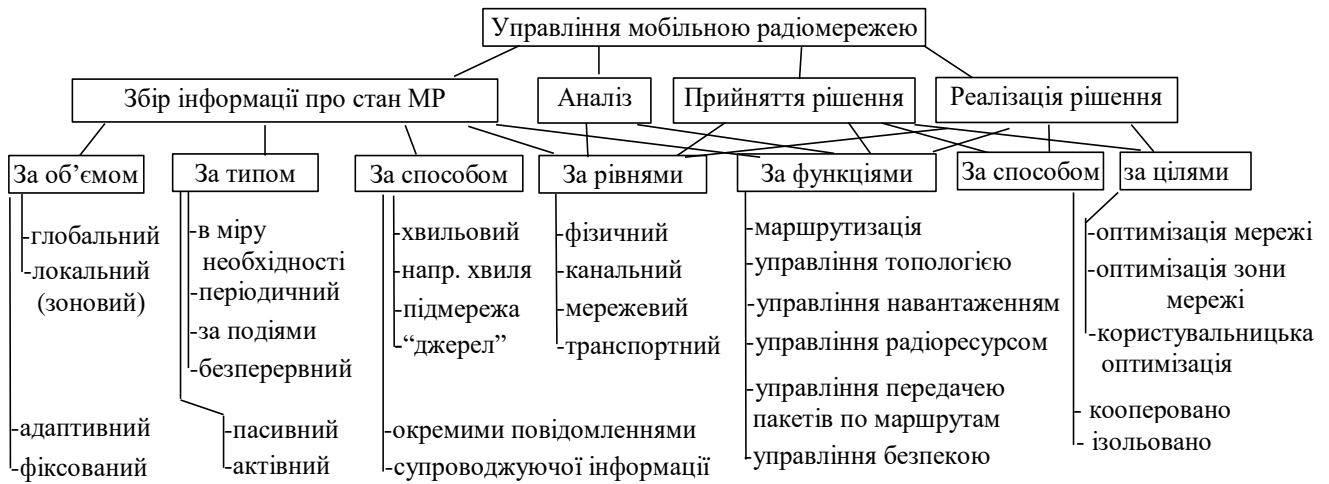


Рис. 2. Функції управління МР, які синтезуються

**1. Збір інформації про стан мережі.** Контрольована інформація містить у собі параметри, що описують модель вузла (мережі чи її зони). База даних управління (Management Information Base, МІВ) повинна підтримуватися в актуальному стані і буде формалізована наступними  $l$ -групами ознак  $X_{\psi}^l$ ,  $l = \overline{1, L}$ ,  $\psi = \overline{1, \Psi_l}$  [16]:

- з позиції інформаційного навантаження –  $X_{\psi}^1$ : тип інформації  $\xi$  та вимоги до її передачі (час доставки, пропускна здатність маршруту, надійність тощо), інтенсивність вхідного навантаження, інтенсивність обслуговування, розмір вільної черги, час перебування пакетів у черзі тощо;
- з позиції маршрутизації –  $X_{\psi}^2$ : прийнятий у даний момент метод маршрутизації; обсяги службового  $V_{ст}$  і корисного трафіка; величина відмов активних маршрутів; стан маршрутної таблиці (глибина збору інформації та її “свіжість”, число активних пар відправник-адресат) тощо;
- з позиції топології –  $X_{\psi}^3$ : число сусідів вузла  $N_i(p_i)$  при  $p_i$  потужності передачі, координати вузлів, їхнє взаємне розташування (кут, відстань тощо);
- з позицій каналного та фізичного рівнів –  $X_{\psi}^4$ : прийнятий протокол каналного рівня, потужність передачі, якість радіоканалів вузла (співвідношення сигнал/шум, імовірність помилки, пропускна здатність, час затримки передачі, імовірність зіткнень пакетів), прийнятий спосіб модуляції тощо;

- організаційно-технічні –  $X_{\psi}^5$ : приналежність до ієрархії управління (командир, підлеглий), величина мобільності  $v_i$ , ємність акумуляторної батареї  $e_i^6$  та інші.

Методи збору інформації можна класифікувати: за обсягом – глобальний і локальний (зоновий), фіксований і адаптивний; за типом – в міру необхідності, періодичний, за подіями та безперервний, пасивний (не припускає розсилання службової інформації і заснований на аналізі транзитного трафіка) і активний; за способом передачі службової інформації – хвильовий, спрямована “хвиля”, по виділеній підмережі і “джерел” (передача інформації з заздалегідь визначеного маршруту), окремими повідомленнями і супровідної інформації.

Різні функції (рівні) управління (рис. 2) вимагають різного обсягу (кількості параметрів) і глибини збору інформації про стан мережі. Глибина збору  $i$ -м вузлом мережі звичайно визначається відстанню (площею при наявності системи позиціонування), вираженим числом ретрансляційних ділянок від даного вузла. Звичайно, знання повної інформації про мережу дозволяє приймати більш обґрунтовані рішення, однак приводить до значного росту службового трафіка в умовах динаміки топології і вхідного навантаження. Тому класичні рішення оптимального розподілу потоків у мережі [4 – 11] не прийнятні в МР, так як вимагають знання глобального стану мережі, що неможливо в МР. Тому необхідний пошук рішень користувальницької оптимізації при мінімізації ресурсів мережі на їх одержання.

Даний підхід уже реалізований на мережевому рівні. Для мінімізації обсягу службового трафіка при побудові і підтримці найкоротших маршрутів в умовах динаміки топології мережі запропонований  $R$ -зоновий (таблично-зондовий) метод маршрутизації [17]. Даний метод припускає виділення кожним вузлом маршрутної  $R$ -зони й акумулює достоїнства двох способів побудови маршрутів – табличного і зондового (контроль стану мережі всередині маршрутної зони періодичний, за її межами – у міру необхідності). Адаптація розмірів маршрутної  $R$ -зони дозволяє мінімізувати службовий трафік. Дану ідею доцільно перенести на весь процес управління мережею, тобто глибина й обсяг службового трафіка повинні визначатися метою управління. Кожен  $i$ -й вузол мережі збирає і зберігає інформацію про стан контрольованої зони мережі  $Z_i$  періодично, за межами зони – у міру необхідності. Величина  $Z_i = f(v, g, U_i)$  зони варіюється в залежності від динаміки мережевої топології  $v$ , рівня  $g$  і “спрямованості” вхідного (транзитного) навантаження, а також функції (за рівнем, способом) управління  $U_i$ . Приклади  $Z$ -зон для вузлів  $A, B, C$  та пошук оптимального значення  $Z^*$  показані на рис. 3а та рис. 3б відповідно.

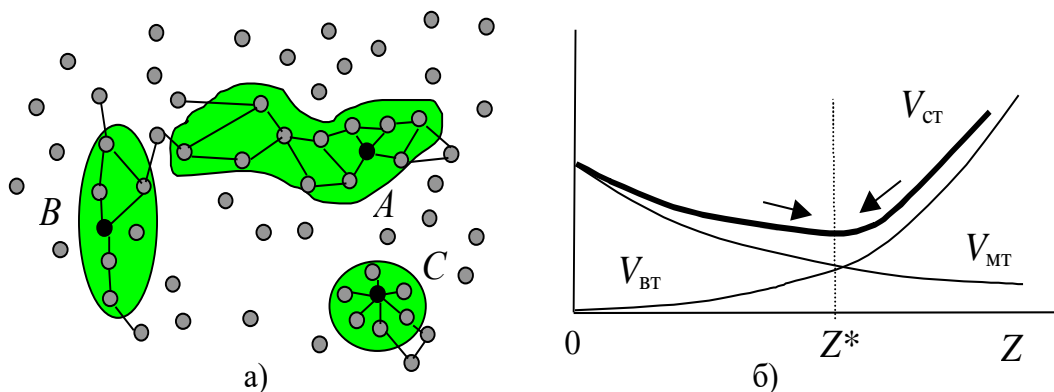


Рис. 3. Зони контролю вузлів  $A, B, C$  та їх адаптація

Так як збір інформації здійснюється локально в межах  $Z$ -зони, то обсяг службового трафіка усередині зони не залежить від розмірності мережі, а залежить від розміру зони, ступеня зв'язності вузлів і інтенсивності її зміни. Загальний службовий трафік  $V_{ст} = V_{вт} + V_{мт}$ , де  $V_{вт}$ ,  $V_{мт}$  – обсяг внутрішньозонового і міжзонового службового трафіка. Крім цього, для скорочення  $V_{вт}$  усередині зони повинні використовуватися хвильові алгоритми передачі інформації [18], що враховують широкомовну природу радіоканалу. В процесі функціонування мережі кожен вузол може оцінити співвідношення  $V_{вт}/V_{мт}$  і здійснити адаптацію величини  $Z$ -зони (рис. 3б).

**2. Аналіз стану мережі** полягає в оцінці кожним вузлом параметрів функціонування мережі ( $Z$ -зони, самого вузла) та її ідентифікація, встановлення відповідності вимогам інформаційного обміну, визначення мети управління та виявлення необхідності керуючих впливів.

З урахуванням вимог по управлінню для кожної ознаки  $X_{\psi}^l$  інформаційної моделі мережі (зони, вузла) повинні бути задані його граничні (нижні і верхні) значення  $X_{\psi}^{ln} < X_{\psi}^l < X_{\psi}^{lb}$ , що визначають їхній стан, де  $l = \overline{1, L}$  і  $\psi = \overline{1, \Psi_l}$ . Під ситуацією будемо розуміти стан вузла  $S_i^b(t)$  і мережі (зони мережі)  $S_j^m(t)$  у момент часу  $t$  [19]. Стан мережі (зони) визначається множиною станів вузлів її складових  $S_j^m(t) = \{S_i^b(t)\}$ ,  $i = \overline{1, B}$ . Визначаються множини  $A_1$  і  $A_2$ , де  $A_1$  – підмножина станів, що задовольняє граничним умовам нерівності, і  $A_2$  – підмножина станів, що вимагають застосування управляючих впливів. Класифікатор здійснює класифікацію стану, ідентифікацію поточної ситуації і визначає необхідність управляючого впливу [20]. Математичним апаратом, що здійснює ідентифікацію стану мережі в умовах її неповної інформації, може служити теорія нечітких множин [21].

**3. Прийняття рішень** здійснюється за задачами управління, реалізується на різних рівнях і різними способами (рис. 2). Управління повинне бути функціональним і реалізовувати одну з цілей: побудова та підтримка маршрутів передачі інформації, управління передачею по маршрутах, управління топологією, управління безпекою тощо. Виділимо наступні основні етапи рішення задач управління:

а. Виявлення цілі функціонування. Кожна ціль характеризується вектором ознак, які можна розбити на наступні групи:

- ресурси, тобто сукупність засобів досягнення мети;
- керовані параметри: на фізичному рівні – потужність передачі, вид модуляції, швидкість передачі й ін., на канальному – тип протоколу доступу, на мережевому – метод маршрутизації, на транспортному – спосіб передачі тощо.
- некеровані параметри: прийняті протоколи обміну, динаміка топології, розмірність мережі й інше;
- вимоги до якості інформаційного обміну різних типів трафіка (дані, мова, відео, графіка); апаратно-програмні можливості вузлів (по пам'яті, продуктивності процесора, ємності батарей) тощо;
- вихідні продукти – результат рішення.

б. Структуризація цілей (декомпозиція глобальної цілі на більш прості). Із загальних позицій цільову структуру (ЦС) можна представити у виді списку підцілей, зв'язаних визначеними відносинами [19]:

$$ЦС = \{Ц_0 R_{01} \{Ц_{11}, Ц_{12}, \dots, Ц_{1n}, \}, R_{12} \{Ц_{21}, Ц_{22}, \dots, Ц_{2n}, \}, \dots R_{ij} \{Ц_{k1}, Ц_{k2}, \dots, Ц_{kn}, \} \},$$

де  $\mathcal{C}_0$  – глобальна ціль системи управління,  $\mathcal{C}_{ij}$  –  $j$ -та підціль  $i$ -го рівня на цільовій структурі,  $i = 1 \dots k, j = 1 \dots n$ ;  $R$  – множина відносин на підцілі структури. Причому якщо  $R$  описує відношення на підцілях тільки суміжних рівнів, то варто говорити про дерево цілей, інакше цільова структура вироджується в мережу.

Фрагмент цільової структури для вузла зображений на рис. 4.



Рис. 4. Фрагмент цільової структури вузла мережі

- с. Математична інтерпретація цільової структури.
- d. Опис ситуацій прийняття рішень.
- e. Безпосереднє прийняття рішень.

Для етапів с, d, e доцільно застосовувати теорію нечітких множин і правила типу: **ЯКЩО**  $x = A_i$  і  $y = B_j$ , **ТО**  $z = C_k$ , де  $x, y, z$  – лінгвістичні перемінні [21, 22]. Як приклад по застосуванню різних методів маршрутизації можна привести наступне правило: “ЯКЩО рівень трафіка в мережі *низький*, динаміка топології *середня*, **ТО** застосовувати методи багатопляхової маршрутизації”. Рішення може стосуватися і функції збору інформації. Наприклад, первісне значення розмірів  $Z$ -зони вузла може встановлюватися центром управління мережею на етапі її планування. Надалі вузол буде прагнути мінімізувати службовий трафік, тобто оптимізувати значення розміру зони  $Z$ , використовуючи наступні правила (рис. 3б):

ЯКЩО  $V_{\text{вт}} <\text{великий}>$  ( $<\text{малий}>$ ) і  $V_{\text{мт}} <\text{норма}>$ , **ТО**  $Z = Z - 1$  ( $Z = Z + 1$ );

ЯКЩО  $V_{\text{вт}} <\text{великий}>$  ( $<\text{малий}>$ ) і  $V_{\text{мт}} <\text{норма}>$ , **ТО**  $Z = Z + 1$  ( $Z = Z - 1$ ).

Розглянемо рішення проблеми управління МР по рівнях і функціях.

**1. Канальний рівень.** Пропускна здатність радіоканалу не постійна і залежить від відстані між абонентами, потужності передачі, кількості сусідніх вузлів і рівнем створюваного ними трафіка (наявність так званої проблеми “схованого терміналу”), застосовуваного протоколу канального рівня (випадкового чи детермінованого). У радіомережі простір, частота, код і час – чотири основні складові, які визначають поділ загального ресурсу радіоканалу. Протокол доступу (Medium Access Control, MAC) встановлює правила, що дозволяють поділяти канал між декількома користувачами. Основні характеристики протоколів канального рівня, які запропоновані для використання в МР цивільного призначення приведені в табл. 1. Розходження в характеристиках визначає області застосування МР, які побудовані на цих протоколах.

Таблиця 1

Характеристика	Протокол каналного рівня			
	IEEE 802.11	HomeRF	HiperLAN 2	Bluetooth
Частота (ГГц)	2.4 / 5.1	2.4	5.1	2.4
Відстань (м)	100...1000	50	100...250	10.....100
Швидкість передачі в каналі (Мб/с)	1 / 2 / 11 / 54	11	54	0.7.....1
Протокол доступу до каналу (MAC)	DFWMAC (CSMA/CA)	TDMA / TDD		Polling / TDD
Тип управління, організація мережі	Децентралізоване, всі вузли рівноправні		Зонове (кластеризація мережі), централізоване управління ресурсами (Master/Slave) у кожній зоні (пікомережі)	
Мобільність вузлів	Легко реалізується на мережевому рівні		Утруднено, викликає необхідність перебудови зон мережі	
Пропускна здатність мережі	Обмежена взаємними перешкодами		Визначається конфігурацією мережі, час реконфігурації мережі значний	
Можливість хвильової передачі	Так		Утруднена	

Аналіз таблиці дозволяє зробити висновок про те, що в умовах високої мобільності вузлів кращим протоколом є IEEE 802.11 (необхідно помітити, що аналог даного протоколу застосовувався в апаратурі передачі даних комплексу засобів автоматизації 9с717 “Маневр”). Аналіз каналних протоколів [3, 5] показав їхню різну ефективність при різних умовах функціонування мережі. При малому завантаженні ефективний протокол випадкового доступу з контролем несучої (CSMA/CA), при сильному – детермінований (TDMA), який вимагає при цьому рішення задач часової синхронізації і динамічного просторового розподілу слотів між вузлами. При генерації супротивником неправдивого трафіка – протокол випадкового доступу типу ALOHA [23].

У найближчому майбутньому вузол може бути оснащений В-секторною спрямованою антеною, що дозволяє утворювати  $\beta_i$  ( $1 \leq \beta_i \leq B$ ) діаграму спрямованості та значно підвищити ефективність протоколів каналного рівня [24].

Таким чином, у МР військового призначення необхідно передбачити реалізацію кілька протоколів каналного рівня й в залежності від умов її функціонування застосовувати той чи інший протокол доступу (чи використовувати гібридні схеми доступу). Крім цього очевидний тісний взаємозв'язок каналного рівня з мережним і транспортним, тому що кожен радіоканал може використовуватися в декількох маршрутах передачі інформації.

**2. Мережевий рівень – маршрутизація й управління навантаженням.** Управління навантаженням поділяється на управління доступом пакетів у мережу (застосовні відомі підходи [7]) та їх розподіл за маршрутами передачі. Особливості мобільних радіомереж визначають ключові вимоги до протоколів маршрутизації (багато з яких носять суперечливий характер): розподілене (децентралізоване) функціонування; мінімальне завантаження мережі службовою інформацією при реакціях на зміни в мережі; відсутність зациклення маршрутів; швидка збіжність; одержання маршруту в міру необхідності; забезпечення декількох маршрутів доставки інформації до адресата; мінімізація потужностей передач вузлів тощо.



В даний час для використання в МР запропонована велика кількість протоколів маршрутизації [15, 25]. Кожний з них має достоїнства та недоліки, витрачає різну кількість часових, зв'язних і обчислювальних ресурсів на побудову маршруту, має особливості в реалізації. Тому вибір конкретного протоколу маршрутизації на етапі проектування буде визначатися характеристиками конкретної МР (число вузлів, пропускна здатність радіоканалів і ін.) і умовами її функціонування (динаміка зміни топології, навантаження тощо). Для досягнення користувальницької і системної оптимізації на етапі оперативного управління мережею необхідно використовувати “активну” маршрутизацію [16], що припускає: функціонування в мережі множини (а не одного) методів маршрутизації; динамічне формування метрик вибору маршруту; управління топологією мережі як складовою частиною маршрутизації в МР та інтелектуалізацію процесів ухвалення рішення по маршрутизації.

**3. Управління топологією [26].** Топологія визначає потенційні можливості мережі по доставці даних між взаємодіючими вузлами. Мобільність (знищення) вузлів приводить до різноманітних мережевих топологій. Проте, мережа повинна підтримувати необхідний рівень продуктивності, що у багатьох ситуаціях не вдається досягти тільки за рахунок маршрутизації. У той же час зміна топології мережі може мати більш значний ефект, на відміну від використання адаптивної маршрутизації.

Передбачається, що кожен вузол  $i$  може змінювати потужність передачі з визначеним кроком дискретизації  $i$ /чи діаграму спрямованості антени. Збільшення потужностей передач вузлів приводить до збільшення імовірності успішної передачі пакетів, збільшенню швидкості передачі в каналі, зниженню часу їх доставки (менше число ретрансляцій), скороченню обсягу службової інформації (зменшення діаметра мережі). Однак, вимагає більшої витрати енергії батарей і обумовлює високий рівень взаємних перешкод, що в підсумку приводить до різкого зниження пропускної здатності мережі. Зменшення потужностей передач вузлів дозволяє збільшити пропускну здатність мережі (за рахунок просторового рознесення каналів і зниження рівня взаємних перешкод), знизити витрати енергії батарей  $i$ , відповідно, збільшити час функціонування мережі, однак збільшує час передачі й обсяг службового трафіка, а також може привести до поділу мережі на незв'язні компоненти.

Управління топологією (перерозподіл потужностей передач вузлів  $i$ /чи діаграм спрямованості їх антен) здійснюється з метою: забезпечення зв'язності мережі; виконання вимог по маршрутизації повідомлень (наприклад, по оперативності доставки повідомлень між парою відправник-адресат); досягнення мережевої оптимізації (максимізації пропускної здатності мережі, мінімізації потужностей передач вузлів і ін.). Таким чином, для підвищення ефективності функціонування МР необхідно здійснювати оперативне управління топологією мережі (створювати потенційні маршрути передачі інформації) і далі здійснювати управління побудовою і підтримкою маршрутів при отриманій топології [26].

**5. Управління енергоспоживанням вузлів мережі.** Електроживлення більшості вузлів мережі здійснюється від батарей, що впливає на роботу процесора, використання пам'яті, обробку сигналів і потужність передавача. Тому протоколи різних рівнів повинні мінімізувати енергоспоживання. На фізичному рівні це реалізується за рахунок мінімізації потужностей передач між сусідніми вузлами. На каналному – за допомогою енергозберігаючих протоколів, що припускають наступні режими: режим “пасивного” квітування (вузол  $i$ , передавши пакет вузлу  $j$ , замість

квитанції очікує ретрансляцію пакета вузлом  $j$ ) і/чи режим “сну” (вузол, знайшовши, що переданий пакет призначений не йому, відключається на час передачі даного пакета). Співвідношення потужності, що витрачається, в залежності від режимів роботи хоста “сон”/пошук/прийом/передача для сучасних бездротових карт (наприклад, для Lucent IEEE 802.11 WarePC Card) складає 0,025:1,2:1,6 Вт. На мережевому рівні зменшення споживаної потужності реалізується маршрутизацією з наступними метриками (параметрами) вибору маршрутів: потужність передачі вузла  $p_i$  і ємність акумуляторної батареї, що залишилася  $e_i^b$  [27]. Це дозволяє вибирати маршрути з мінімальною сумарною потужністю передачі і максимальною ємністю батарей.

**6. Транспортний рівень.** Для МР характерна втрата частини пакетів у процесі їх передачі, часові затримки через необхідність побудови (перебудування) маршрутів, що вимагає вдосконалювання механізмів функціонування протоколу транспортного рівня (зокрема, TCP). Для цього пропонується процес управління міжкінцевою передачею пакета по маршруті розбити на кілька ділянок з введенням управління на кожному з них з обліком нижчих протоколів [28, 29].

**7. Передача з заданою якістю обслуговування (Quality and Service, QoS)** різних типів трафіка: мова, відео, дані, інтерактивний доступ тощо. При цьому не прогнозований характер радіоканалу в МР, необхідність поділу його ресурсу між сусідніми вузлами (кожний з яких може бути потенційним джерелом QoS трафіка) створюють труднощі в забезпеченні гарантованої якості передачі інформації. Підтримка QoS передачі в МР впливає на велику частину розглянутих рівнів і функцій, особливо на маршрутизацію. В цій ситуації побудова маршруту заданої якості полягає в резервуванні ресурсів вузлів і радіоканалів на час передачі інформації визначеного типу [30]. Крім того, для обробки різних типів трафіка в терміналах необхідне введення управління буферною пам'яттю, механізмів підтримки пріоритетів тощо [11].

**8. Забезпечення безпеки.** МР функціонує у загальному радіосередовищі і тому вразлива для потенційних атак супротивника. Результатами деструктивних дій на МР можуть стати як прослуховування (сканування) трафіка, так і повна дезорганізація їхньої роботи.

Атаки, спрямовані на мережу, класифікуються як: зовнішні і внутрішні, активні і пасивні. Захист від зовнішніх атак включає шифрування переданої маршрутної інформації і забезпечення різних сервісів безпеки. Для захисту від внутрішніх атак (передбачається можливість існування в мережі скомпрометованих вузлів) поки не існує ефективних рішень. Можливі способи захисту від внутрішніх атак припускають:

- поділ інформації на частини, їхнє шифрування і передача по декількох каналах чи незалежних маршрутах;
- виявлення скомпрометованих вузлів і виключення їх із процесу маршрутизації. Для цього кожен вузол мережі контролює сукупність параметрів сусідніх вузлів і робить висновки про їхню “поведінку”. Вибір “кращого” маршруту здійснюється в залежності від історії “поведінки” сусідів;
- застосування кожним вузлом мережі системи виявлення вторгнення IDS (Intrusion Detection System) для ідентифікації відомих атак по даних сигнатурах атак, що містяться в базі; виявлення може здійснюватися локально чи кооперованою роботою декількох вузлів.

Пасивні атаки здійснюються шляхом прослуховування радіоефіру і збору інформації з метою розкриття топології мережі і способів її адресації. Вони не порушують нормальну роботу протоколів обміну, але їх майже неможливо виявити. Активні атаки спрямовані на часткову чи повну дезорганізацію роботи мережі шляхом введення в мережу повторної (застарілої) чи помилкової (зміненої) маршрутної інформації. Наприклад, атака типу “відмова в обслуговуванні” (DoS – Denial of Service) може бути легко реалізована модифікацією одного чи декількох полів маршрутного повідомлення: адреси відправника (spoofing), числа ретрансляцій, його номера і самого маршруту передачі. Результатами активних атак (наприклад, на маршрутизацію) можуть бути: перенапрямок маршрутів, їхнє зациклення, створення перевантаження у вузлах, переповнення маршрутних таблиць, імітація поділу мережі на окремі підмережі, збільшення часу доставки повідомлень тощо. Захист від активних атак повинен передбачати автентифікацію і цілісність маршрутної інформації.

З криптографічної точки зору МР не створюють ніяких нових проблем. Вимоги в частині автентифікації, конфіденційності, цілісності і неспростовності є аналогічними і для мереж зв'язку загального користування. При цьому центральною проблемою залишається розподілене функціонування декількох трастових центрів [31, 32]. У будь-якому випадку потрібно розуміти, що абсолютну безпеку не може гарантувати жодна існуюча технологія, а рішення цієї проблеми лежить у площині розумної достатності.

**9. Сумісність з іншими мережами.** Користувачу МР буде необхідний доступ до стаціонарної мережі. Це вимагає наявності функцій управління мобільністю, що дозволять підтримувати доступ до стаціонарної мережі для терміналів, що знаходяться від неї "на відстані" декількох ретрансляцій.

У сучасних мережах стільникового зв'язку мобільність вузлів (користувачів) підтримується, в основному, засобами переадресації з використанням технології домашніх агентів [3]: при переміщенні користувача поза своєю домашньою мережею, всі виклики, що надходять до нього, будуть переадресовані в гостьову (чужу) мережу через його домашню. Такі ж принципи переадресації застосовуються в мережах стільникового зв'язку на базі IP-протоколів. Слід зазначити, що даний підхід у МР не застосуємо, оскільки всі вузли в МР можуть переміщатися, і вся ідеологія полягає у використанні пристроїв, що одночасно служать як маршрутизаторами, так і хост-вузлами. Отже, у МР управління мобільністю буде здійснюватися безпосередньо протоколом маршрутизації.

**10. Неоднорідність потужностей вузлів мережі** приводить до асиметричності радіоканалів, використання яких потребує застосування спеціальних протоколів обміну на всіх рівнях [33].

**11. Управління мережами великої розмірності.** Інтенсивність службового трафіка залежить від розмірності мережі  $N$ , інтенсивності її топологічних змін  $\nu$  і визначається величиною  $N^2\nu$  (при глобальному контролі). Теоретичні дослідження [34] показали, що пропускна здатність вузла  $s_y$  МР обмежена величиною  $\Theta(W / \sqrt{N \log N})$ , де  $W$  – швидкість передачі вузла (біт/с). При значному збільшенні розмірності мережі  $N$  значення  $s_y \rightarrow 0$ . Очевидно, що для рішення цієї проблеми необхідно ввести ієрархічне управління мережею – провести розбивку МР на окремі зони (кластери) з виділенням головних вузлів зони (ГВЗ), вузлів-шлюзів і

внутрішніх вузлів. Множина ГВЗ і виділені вузли-шлюзи утворять у мережі віртуальну магістраль, що може використовуватися як для поширення службової інформації, так і для передачі інформаційних повідомлень. В якості ГВЗ можуть виступати як виділені вузли (наприклад, мобільні базові станції чи енергонезалежні вузли) так і будь-який мобільний абонент.

Очевидно, що ієрархічна організація МР дозволить:

- збільшити стабільність мережевої топології (динаміка зміни зони мережі значно нижча від динаміки зміни зв'язності для окремих вузлів мережі);
- багаторазово використовувати частотний (кодовий) радіоресурс за рахунок його просторового рознесення;
- підвищити ефективність управління мережею.

Однак, ієрархічна організація мережі ускладнює процес управління мережею і припускає рішення наступних задач [35]: динамічне створення і підтримка зон мережі; динамічну адресацію абонентів; внутрішньозонову і міжзонову маршрутизацію пакетів; відновлення управління зоною внаслідок відмов (знищення) ГВЗ.

**12. Апаратна та програмна реалізація.** Конкретний перелік задач управління буде визначатися реалізованими технологічними рішенням (наприклад, застосування кодового поділу каналів, наявність спрямованих антен, мультимедійної і координатної систем тощо) і організаційно-технічними характеристиками вузлів мережі. У найближчій перспективі необхідно говорити про створення “програмованих мереж”, тобто алгоритми управління реалізуються програмно у вузлах мережі. Можливість їхньої реалізації буде визначатися характеристиками апаратно-програмних засобів. Уже зараз в архітектурі вузла передбачається наявність баз даних і знань, електронної карти місцевості й інше (рис. 5). В найближчій перспективі – застосування технології розподілених інтелектуальних агентів [20].

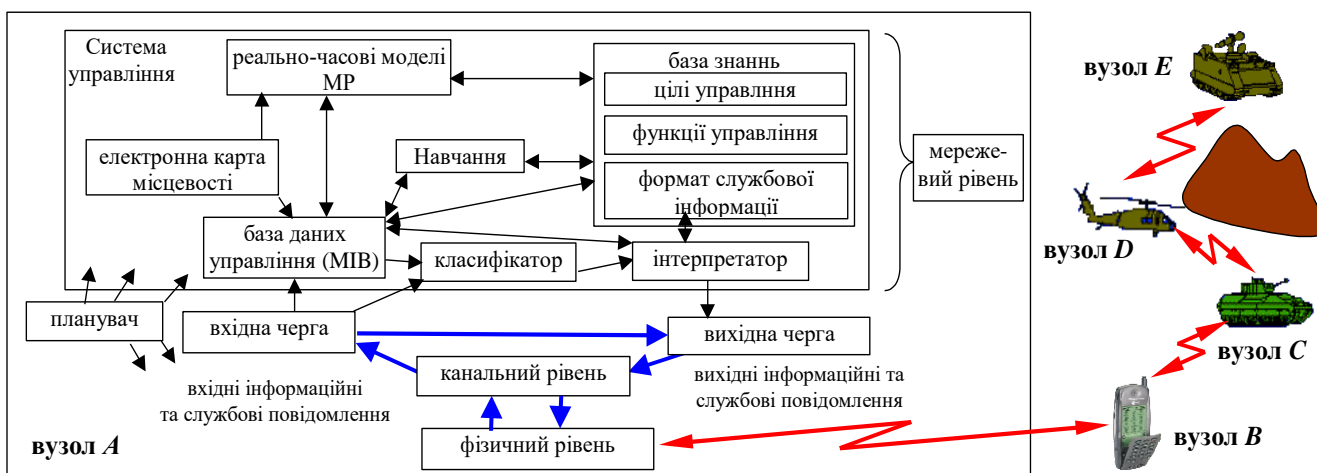


Рис. 5. Архітектура вузла мережі (приклад розвитку мережевого рівня)

**13. Оцінка ефективності методів управління мережею.** Загальний підхід полягає в наступному. Пропонується розділити оцінку ефективності використовуваних методів управління на два етапи:

- а). Оцінка і порівняння на основі алгоритмічного підходу з позицій теорії складності алгоритмів (визначення тимчасової, зв'язної й обчислювальної складності алгоритмів), що реалізують пропонувані методи. Приклад даного підходу стосовно до проблеми маршрутизації запропонований у [25].

б). Оцінка впливу системи управління на показники ефективності всієї мережі. У загальному випадку повинні бути побудовані залежності мережевих показників ефективності (пропускної здатності, середнього часу затримки передачі повідомлень, співвідношення обсягу службової інформації до корисної, середня потужність передачі й ін.) від динаміки зміни топології (рис. 6б) і рівня вхідного навантаження (рис. 6а). Ступінь відмінності кривих 2 і 3 від кривої 1 (ідеальна система спостереження) показує ефективність обраного методу управління. Таким чином, комплексною оцінкою ефективності функціонування методів управління  $U_1$  і  $U_2$  є різниця в пропускній здатності ( $\Delta S$ ) при змінах рівня вхідного навантаження ( $g$ ) та інтенсивності топології мережі ( $v$ )

$$\Delta S = S_{\text{п}}(g, v) - S_{\text{рi}}(g, v, U_i) \text{ чи } \Delta S = S_{\text{п}}(g, v, U_1) - S_{\text{п}}(g, v, U_2), \quad (5)$$

де  $S_{\text{п}}$  і  $S_{\text{р}}$  – потенційна і реалізована пропускна здатність.

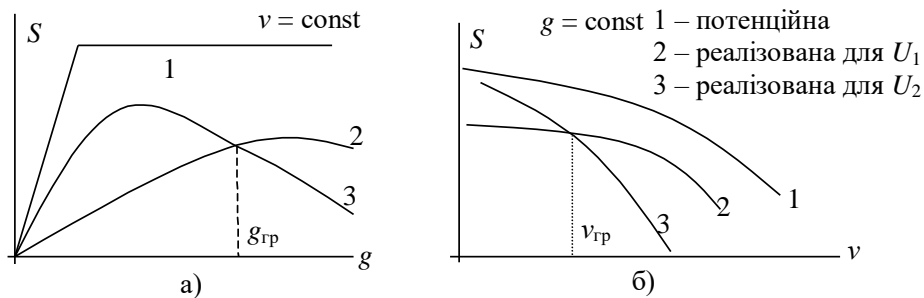


Рис. 6. Залежності пропускної здатності мережі  $S$  при різних методах управління  $U$

Для одержання даних залежностей необхідна розробка відповідних математичних моделей. Одержати аналітичне рішення (5) не представляється можливим внаслідок нестаціонарності процесів, що відбуваються, і значної розмірності задачі. Існуючі аналітичні моделі дозволяють визначити лише граничні значення пропускної здатності вузла мережі [34, 36]. Тому необхідна розробка відповідних імітаційних моделей МР із реалізацією у вузлах розроблених методів (алгоритмів) управління, планування і проведення експериментів та аналіз отриманих результатів. При цьому задачею є оцінка адекватності отриманої моделі, тому що отримані результати сильно залежать від застосовуваної моделі мобільності вузлів (випадкової, випадкової з зупинками, групової тощо) [37].

Також необхідно відзначити значну трудомісткість, складність побудови імітаційних моделей і проведення експериментів. Використовуване в інституті середовище імітаційного моделювання СІМПАС [38], характеризується простотою побудови моделей, але в той же час не має бібліотек протоколів інформаційного обміну та вимагає значного часу на побудову і налагодження моделей МР. Тому доцільно перейти на сучасну систему імітаційного моделювання NS/2 [39], що поширюється безкоштовно, має відкритий код і численні бібліотеки протоколів інформаційного обміну.

Таким чином, запропоновані нові підходи до рішення проблем управління МР тактичної ланки управління. Проведена декомпозиція проблем (за рівнями та функціями) на задачі, визначені вимоги до методів (алгоритмів) управління в МР військового призначення та запропоновані основні напрямки їх аналізу і синтезу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Mobile Ad-Hoc Networks. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.

2. Романюк В.А. Направления развития тактических сетей связи // Зв'язок. – 2001. – № 3. – С. 63 – 65.
3. Шиллер Й. Мобильные коммуникации.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2002. – 384 с.
4. Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.
5. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. – М.: Мир, 1989. – 544 с.
6. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Построение сетей интегрального обслуживания. – Л.: Машиностроение, 1990. – 332 с.
7. Арипов М.Н., Присяжнюк С.П., Шарипов Р.А. Контроль и управление в сетях передачи данных с коммутацией пакетов. – Ташкент: Фан, 1988. – 160 с.
8. Шаров А.Н. Автоматизированные сети радиосвязи. – Л.: ВАС, 1988. – 178 с.
9. Дымарский Я.С., Крутякова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. – М.: НТЦ “Мобильные коммуникации”, 2003. – 384 с.
10. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 288 с.
11. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. – СПб: Питер, 2000. – 672 с.
12. Романюк В.А. Принципи побудови системи управління автоматизованою мережею радіозв'язку // Збірник наукових праць № 5. – К.: КВІУЗ. – 2000. – С. 60– 64.
13. Романюк В.А. Класифікація і загальна характеристика задач управління тактичними автоматизованими мережами радіозв'язку // Праці КВІУЗ № 4. – К.: КВІУЗ. – 1999. – С. 3 – 7.
14. Zaden A.I., Jabbari B., Mason G., Pickholtz R., Vojcic B. Self-Organizing Packet Radio Ad Hoc Networks with Overlay // IEEE Communication Magazine, 2002, № 6. – pp. 149 – 157.
15. Романюк В. А. Постановка проблеми маршрутизації інформаційних потоків у мережах радіозв'язку з динамічною топологією // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2003. – С. 112 – 119.
16. Романюк В.А. Активная маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 3. – С. 21 – 25.
17. Романюк В.А. R-зоновый метод маршрутизації в автоматизованих мережах радіозв'язку // Збірник наукових праць № 3. – К.: КВІУЗ. – 2001. – С. 182 – 186.
18. Романюк В.А. Волновая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2003. – № 4.
19. Серегин А.Г., Лычагин С.В., Шибанов В.С. Средства автоматизированного управления в системах связи. – М.: Радио и связь, 1990. – 232 с.
20. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
21. Герасимов Б.М., Грабовский Г.Г., Рюмшин Н.А. Нечеткие множества в задачах проектирования, управления и обработки информации. – К.: Техніка, 2002. – 140 с.
22. Гостев В.И., Федяев В.Е., Худолий Д.А. Динамическое управление радиоресурсом в системах связи: – К.: Издательство “Радиоаматор”, 1998. – 448 с.
23. Бунин С.Г., Войтер А.П. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. – К.: Техника, 1989. – 223 с.

24. Korakis T., Jakllari G., Tassiulas L. A MAC protocol for full exploitation of Directional Antenas in Ad-hoc Networks // In Proceedings MOBIHOC'03, 2003. – pp. 98 – 107.
25. Минович А.И., Романюк В.А. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2001. – № 1. – С. 31 – 36.
26. Минович А.И., Романюк В.А. Управление топологией в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33.
27. Романюк В. А. Метод маршрутизації з управлінням ресурсом потужності в автоматизованих мережах радіозв'язку тактичної ланки управління // Труды Академії № 33. – К.: НАОУ. – 2001. – С. 188 – 192.
28. Fu Z., Zerpos P., Gerla M. The Impact of Multihop Wireless Channel on TCP Throughput and Loss // In Proceedings of IEEE INFOCOM'03, 2003.
29. Cordeiro C.M., Das S.R., Agrawal D.P. COPAS: Dynamic Contention-Balancing to Enhance the Performance of TCP over Multi-hop Wireless Networks // In Proceedings of ICCCN'03, 2003.
30. Романюк В.А. Маршрутизация интегрального трафика в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 2. – С. 24 – 27.
31. Kong J., Luo H., Xu K., Gu D.-L., Gerla M. Adaptive Security for Multi-layer Ad-hoc Networks // Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC), 2002.
32. Zhou L., Haas Z.J. Securing Ad Hoc Networks // IEEE Networks Magazine, vol. 13, no. 6, 1999. – pp. 24 – 30.
33. Романюк В.А. Асимметричная маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2003. – № 3. – С. 28 – 30.
34. Gupta P., Kumar P.R. The capacity of wireless networks // IEEE Transactions on Information Theory, no.46 (2), 2000, – pp. 388 – 404.
35. Романюк В.А. Иерархическая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 1. – С. 38 – 42.
36. Grossglauser M., Tse D. Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks // In Proceedings of IEEE INFOCOM'01, 2001.
37. Camp T., Boleng J., Davies V. Mobility models for ad hoc networks simulation // Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC), 2002.
38. Любарський С.В., Минович А.И., Романюк В.А., Шацко П.В. Системи імітаційного моделювання. Навчальний посібник. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2003. – 140 с.
39. NS-2 (The Networks Simulator). <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.