

## БЕЗПРОВІДНІ ЧАРУНКОВІ МЕРЕЖІ

*Розглядається новий клас безпроводних, так званих, чарункових мереж. Представлено архітектуру, принципи побудови і сфери застосування даних мереж, а також особливості їхнього використання в системах військового зв'язку.*

Безпроводний доступ останнім часом отримує велику популярність як у стільникових мережах зв'язку, так і в безпроводних локальних мережах WLANs (wireless local area networks), що, звичайно, асоціюються із сімейством стандарту IEEE 802.11 (названого популярно Wi-Fi). Одна із найпомітніших тенденцій останніх років у Європі – надзвичайно, швидкий ріст безпроводних мереж, підкріплюваний споживчим попитом на ноутбуки з вбудованою підтримкою Wi-Fi.

Дані технології (зовсім різні за принципами побудови) призначені для забезпечення зв'язності між абонентами і можуть знайти застосування значній кількості додатків. Однак перетворення Wi-Fi у діючий інструмент корпоративної комунікації і, справді, масову технологію обміну даними ставить перед розробниками серйозну проблему „безшовного” міжмережевого роумінгу. Ця проблема вирішується в рамках чарункової (mesh) архітектури і саме з її впровадженням аналітики зв'язують черговий виток росту безпроводних мереж [1, 2].

Стільникові мережі (рис. 1) при відносно великому покритті забезпечують відносно невисоку швидкість передачі інформації. Навіть третє покоління мереж 3G забезпечує відносно невисоку швидкість передачі даних (не більш 2 Мб/с) у порівнянні зі швидкостями в безпроводних локальних мережах (більш 50 Мб/с для протоколів IEEE 802.11a, IEEE 802.11g і інших подібних рішень). З іншого боку WLANs здебільшого мають менше покриття і, відповідно, обмежують мобільність абонентів. Крім цього, для збільшення покриття WLANs необхідна побудова відповідної провідної магістралі.

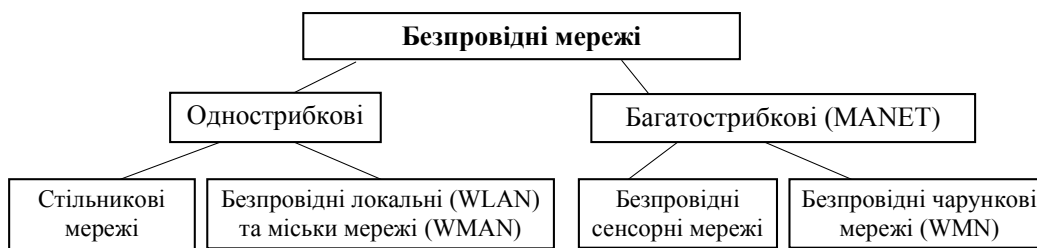


Рис. 1. Класифікація безпроводних мереж

Безпроводні міські мережі WMANs (wireless metropolitan local area networks), засновані на сімействі стандартів IEEE 802.16, частково усувають дані недоліки і забезпечують високу швидкість передачі з гарантованою якістю обслуговування значній кількості користувацьких баз (до десятків миль між базовими станціями). Основний недолік WMANs – це відсутність (на сьогодні) підтримки мобільності і необхідність прямої видимості (якщо користувач не має зв'язності прямої видимості з базовою станцією WMANs, то і малоімовірно одержання даного сервісу). Звичайно через високу щільність перешкод (споруджувані багатоповерхівки або дерева) більше половини користувачів потенційно не можуть забезпечити радіозв'язок прямої видимості. Крім того, устаткування базових станцій досить складне і вимагає значних фінансових витрат.

Безпроводні чарункові мережі (БЧМ) або wireless mesh networks (WMN) потенційно включають більшість з наведених недоліків і при цьому забезпечують дешевий безпроводний доступ до Інтернет для фіксованих і/або мобільних абонентів (діючий протокол безпроводних чарункових мереж – IEEE 802.11s). На рис. 2 представлено типовий варіант побудови БЧМ, що складається з безпроводних маршрутизаторів (mesh-маршрутизаторів), шлюзів та абонен-

тів. Для підключення до Інтернет (провідної мережі) достатньо одного шлюзу. Кожен абонент оснащений радіоустаткуванням для зв'язку з mesh-маршрутизаторами.

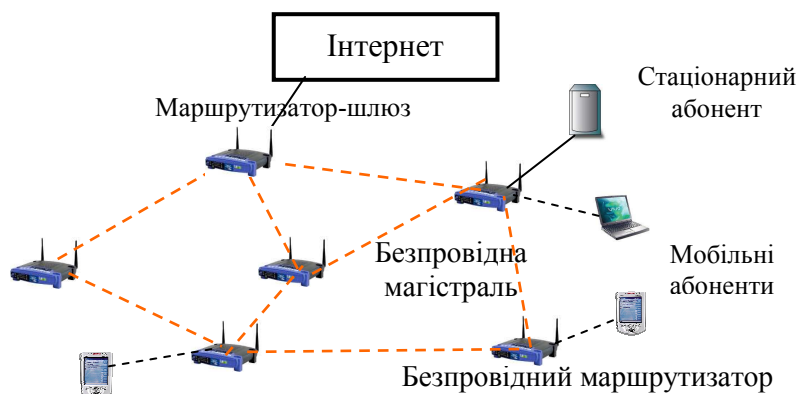


Рис. 2. Варіант чарункової мережі

Mesh-маршрутизатори утворюють безпроводну магістраль чарункової мережі і забезпечують динамічну маршрутизацію пакетів між собою. Mesh-маршрутизатори фактично є стаціонарними вузлами (зазвичай, монтуються на видимих ділянках дахів будинків – рис. 3).

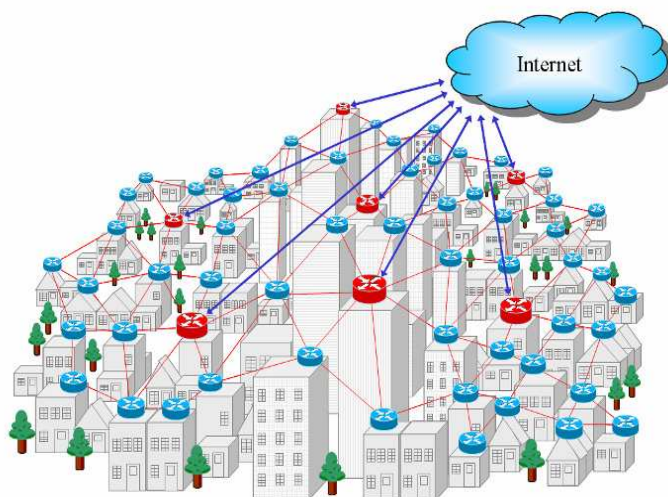


Рис. 3. Приклад БЧМ

Устаткування mesh-маршрутизаторів відрізняється від устаткування абонентів наступними основними характеристиками: велика потужність передачі, наявність декількох приймально-передавальних пристроїв і антен, підтримка декількох безпроводних протоколів, відсутність обмежень на споживану потужність, реалізація протоколів маршрутизації та ін. У загальному випадку архітектура чарункової мережі ієрархічна і представлена наступними елементами:

- верхній рівень – шлюзи (специфічні маршрутизатори), зв'язані з Інтернет високошвидкісними провідними каналами;
- середній рівень – магістральна мережа стаціонарних безпроводних маршрутизаторів;
- нижчий рівень утворюють собою стаціонарні або мобільні користувачі, зв'язані в чарунці з безпроводним маршрутизатором (у загальному випадку, абоненти, також можуть виступати в ролі маршрутизаторів, тобто, можуть передати дані один через одного – фактично утворити мережу типу MANET, Mobile Ad-hoc Networks).

Алгоритм обміну інформацією полягає в наступному. При необхідності передачі mesh-абонентом даних адресата (mesh-абонентів або шлюзові), що не знаходиться з ним у безпосередній зоні радіозв'язності, пакет передається найближчому mesh-маршрутизаторові. Далі пакет (відповідно до прийнятого протоколу маршрутизації) передається за маршрутом безпроводної магістралі доки не досягне mesh-маршрутизатора, що має радіозв'язність з адреса-

том, який і передасть пакет адресатові.

Звичайним способом організації безпроводних чарункових мереж є використання в радіоканалах окремих стандартів (для зменшення перешкод) між маршрутизаторами магістралі і каналами „маршрутизатор-абонент”. Наприклад, стандарт IEEE 802.11a може бути використаний для каналів магістралі, а стандарт IEEE 802.11b для зв'язку між абонентом і маршрутизатором.

БЧМ надають можливість перейти від локалізованих осередків доступу до цілком безпроводних зон, що охоплюють будинок (кампус) або навіть місто. Мережні архітектори і системні інтегратори одержують безпрецедентну свободу і гнучкість в інсталяції високопродуктивної мережі в рекордно короткий час. При цьому відсутність проводки істотно знижує вартість і спрощує поточні операції з налаштування.

Відсутність додаткових вимог до БЧМ (за винятком маршрутизації) пояснює гнучкість і багатоваріантність їхньої побудови. Наприклад, доступ до Інтернет може бути провідним, або безпроводним (типу крапка-крапка або крапка-багатокрапка). Користувачі можуть входити до мережі внутрішніми безпроводними каналами, використовуваних для зв'язності мобільних абонентів або використовувати інші технології (мережі Wi-Fi, стільникові, WiMax, MANET, сенсорні) і працювати з різними додатками (рис. 4).

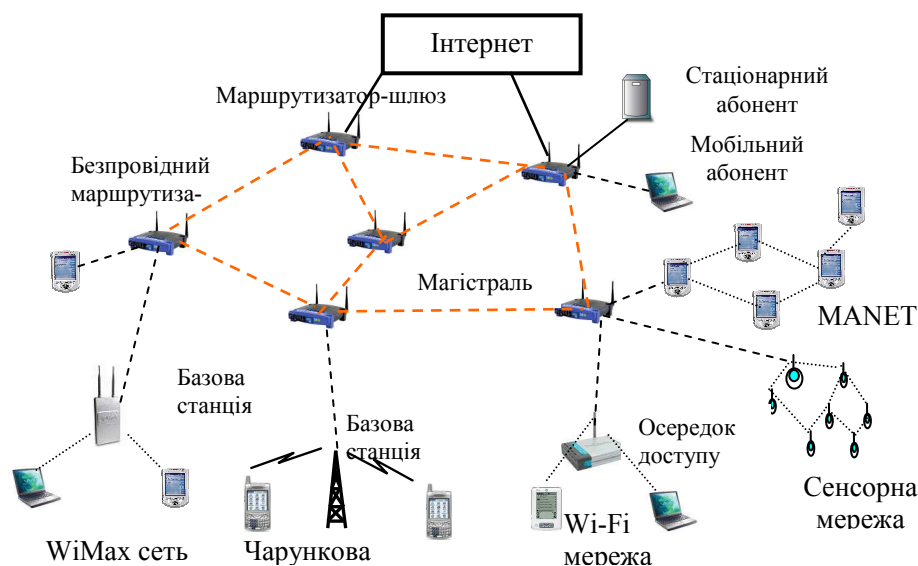


Рис. 4. Варіант побудови гібридної чарункової мережі

Характеристики БЧМ (одні з них властиві чарунковим мережам, інші розширюють поняття гібридних MANETs [1 – 3]):

**Безпроводність.** БЧС, з одного боку, обмежена в дальності передачі через згасання при поширенні радіохвиль, потенційно має високу величину помилок і втрат пакетів; з іншого боку – забезпечує мобільність абонентів.

**Багатострибковість.** Звичайна безпроводна мережа збільшує покриття мережі за рахунок збільшення потужності передачі або додаванням додаткових осередків доступу. На противагу, вузли БЧМ, використовуючи багатострибкову маршрутизацію, передають дані без збільшення радіусу передачі.

**Надмірність.** Безпроводна магістраль формує чарункову мережу. Це забезпечує додаткові канали (маршрути) між mesh-маршрутизаторами, mesh-шлюзами і mesh-абонентами. Відмовлення каналу або вузла не приводить до відмовлення в передачі повідомлення.

**Мобільність.** У загальному випадку mesh-маршрутизатори і mesh-шлюзи також можуть бути мобільними. У цьому випадку БЧМ фактично стає дворівневою мережею MANET (проблеми керування якої описані в [3]). На відміну від MANETs чарункові мережі мають визначену ієрархічну архітектуру. Mesh-шлюзи і mesh-маршрутизатори формують квазістатичну магістраль, не обмежені в потужності передавачів і продуктивності процесорів, мо-

жуть оснащуватися декількома прийомопередавачами. Абонент, що не реалізує функції маршрутизації, може бути впроваджений у БЧМ без всяких обмежень (на противагу MANETs, де всі вузли повинні виконувати функції маршрутизатора).

Завдяки своїм особливостям чарункові мережі можуть бути використані в різних сферах.

#### *Широкопasmовий доступ до Інтернет.*

Поки ще значна кількість користувачів не має можливості підключитися за допомогою кабелю або DSL-каналом до Інтернет. Рішення – використовувати БЧМ. Так у Європі публічний доступ до Інтернет поки надають кілька міських БЧМ, у США ця послуга значно більш розвинена. У Москві продовжується будівництво чарункової мережі стандарту Wi-Fi, що нараховує більш 6 тис. базових станцій.

*Мережі селищ.* Локальні мережі стрімко сягнули за межі великих міст, де конкуренція дуже велика. Багато Інтернет-провайдерів зайнялися підключенням коттеджних і дачних селищ, де безпроводне підключення є єдино рентабельним способом підключення клієнтів. Аналогічна ситуація в регіонах з малоповерховою забудовою, коли тягти кабель у кожен будинок з декількома квартирами просто не вигідно.

*Мережі приміщень, підприємств.* Для одержання покриття з використанням протоколу 802.11 потрібна значна кількість осередків доступу, які, у свою чергу, зв'язані Ethernet мережею. Чарункові мережі дозволяють забезпечити зв'язність осередків доступу без прокладання кабелю.

Гетерогенні мережі чарункової топології, що поєднують велику кількість безпроводних датчиків і порівняно небагато осередків доступу з кабельними каналами можуть стати практичним і економічно вигідним рішенням на підприємствах. Об'єднання датчиків у мережу дозволить автоматизувати збір даних і скоротити витрати на ручний збір даних. Створення кабельних мереж було б непрактично і дорого. Орендовані приміщення є гарним прикладом доцільності розгортання БЧМ.

*Домашні мережі.* У даному середовищі істотною перевагою використання чарункової мережі є її здатність підтримувати додатки, що вимагають великої пропускної здатності (наприклад, для передачі відеовисокого чіткості). Використання БЧМ в домашніх умовах може зв'язати настільний ПК, ноутбук і кишенькові комп'ютери, телевізійні приймачі високого дозволу, програвачі DVD, ігрові приставки, відеокамери та інші побутові електронні пристрої без необхідності прокладання кабелів, установки мережних розеток та спеціального налаштування пристроїв.

*Міські мережі.* У міському середовищі з неоднорідним покриттям або в корпоративному середовищі з різним типом устаткування БЧМ вирішує також проблеми взаємодії різних безпроводних мереж (а також провідних і безпроводних мереж). У більшості випадків впровадження БЧМ усуває необхідність прокладання магістральної лінії зв'язку.

Звичайно, в містах і мегаполісах екстренні служби використовують власні, закриті комунікаційні системи, що працюють на різних радіочастотах. У результаті стихійного лиха дані радіосистеми не дозволяють співробітникам таких служб зв'язуватися один з одним. У випадку функціонування на території міста БЧМ, співробітники всіх екстренних служб зможуть підключатися до даної єдиної мережі свої комунікаційні пристрої.

*Доступ мобільних абонентів.* Третє покоління мереж 3G забезпечить відносно високу швидкість передачі даних (від 2 Мб/із для стаціонарних користувачів і 144 Кб/із для високомобільних користувачів). Однак для їхнього розвитку потрібен ще не один рік. Це означає, що користувач поки має можливість передачі зі швидкістю 19.2 Кб/з (з обліком GPRS 20 – 30 Кб/з або теоретично 171.2 Кб/с). Впровадження БЧМ дозволить вже зараз одержати більш високі швидкості передачі при відсутності одержання додаткових ліцензій і незначних інвестицій.

*Чарункові мережі комунальних служб.* В якості вузлів виступають вузли (лічильники) електроенергії, газу і води в одній мережі. Лічильники утворюють керовану через шлюз безпроводну чарункову мережу, що має здатність самоорганізовуватися та самовідновлюватися

безпроводну чарункову мережу, яка керується через шлюз. Вузли періодично передають у шлюз накопичені дані. Один шлюз може підтримувати до тисячі приладів обліку. Збереження даних у кожному вузлі, автоматична синхронізація часу і реорганізація мережі в обхід порушених каналів зв'язку дозволяють одержати надійне, потужне, економічне й відмовостійке рішення для обліку витрати ресурсів.

*Чарункові мережі військового застосування.* Наприклад, чарункові тактичні сенсорні мережі (крихітні сенсори, оснащені прийомопередавачами з функціями маршрутизації). Кожен сенсор забезпечує безпроводну передачу інформації із сенсорної мережі (наприклад, координати танка), командуванню для її аналізу й ухвалення рішення.

Перспективна тактична мережа буде представляти сукупність 3-х рівневих MANET і протоколи чарункових мереж також можуть знайти своє застосування [4]. На рис. 5 представлений варіант застосування чарункову мережі для організації обміну інформацією в тактичній ланці управління. Командно-штабні машини (крім комплексу КХ, УКХ- радіозасобів) будуть оснащені безпроводними маршрутизаторами, що створюють високошвидкісну магістраль. Військовослужбовці одержують доступ до даної мережі по радіотерміналах.

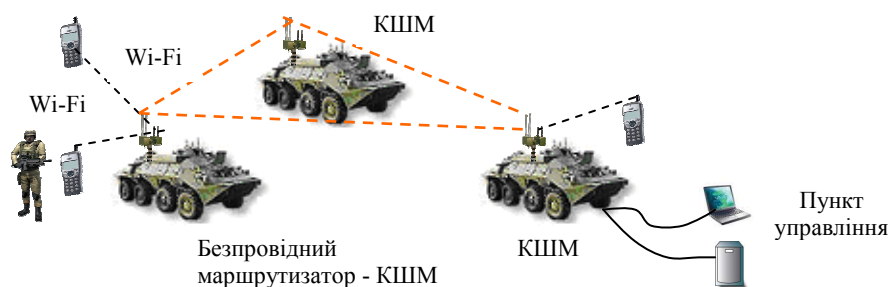


Рис. 5. Варіант застосування чарункових мереж в тактичній ланці

### ***Переваги.***

*Невисока вартість інвестицій.* Технологія чарункових мереж створює перспективи розгортання безпроводного середовища, що не вимагає особливого планування архітектури. В результаті створення безпроводної мережі стає дешевшим в порівнянні з традиційними WLAN. Установка і підключення точки доступу обходиться в суму менш 500 дол. Тому, БЧМ, викликають великий інтерес муніципалітетів і інших організацій, що мають обмежений бюджет.

*Значне покриття користувачів.* Завдяки багатострибковій маршрутизації не потрібна наявність прямої зв'язності між абонентом і базовою станцією.

*Швидке розгортання і масштабування.* Новий абонент може бути підключений до БЧМ за кілька хвилин замість місяців, необхідних для побудови нової кабельної мережі. Тому, БЧМ, знайдуть своє застосування на виставках, конференціях та ін.

*Живучість.* БЧМ, звичайно, використовує кілька шлюзів для підключення до Інтернет, маршрутизатори забезпечують децентралізовану побудову і підтримку маршрутів у залежності від ситуації на мережі. Особливість чарункової мережі – відсутність центру керування, можливість самоорганізації і самоадаптації відповідно до змін в параметрах середовища (автоматичне фігурування та реконфігурування).

*Висока пропускну здатність.* Фізичні властивості безпроводних каналів такі, що на більш коротких відстанях пропускну здатність мережі вища. Одним зі способів підвищення пропускну здатності мережі є передача даних через декілька ретрансляторів, що знаходяться на малих відстанях. Тому, БЧМ, може забезпечити підвищення пропускну здатності мережі (вимагаючи меншу потужність передавача і задовольняючи при цьому всі законодавчі норми, що обмежують максимальну потужність передавачів).

*Просторовий поділ* є ще однією перевагою БЧМ в порівнянні з однострибковими мережами (пристрої спільно використовують один осередок доступу). У БЧМ безліч пристроїв можуть підключатися одночасно через різні вузли. Малі відстані передачі даних у БЧМ

дозволяють зменшити вплив перешкод і дозволяють здійснювати одночасну передачу просторово розділених потоків даних.

*Інтелектуальність* інтегрована безпосередньо в БЧМ і забезпечує автоматизацію процесу адміністрування й оперативного керування мережею. При включенні осередку доступу, вона автоматично виявляє інші та „з’ясовує” свою роль у мережі. Це виключає необхідність ручного адміністрування мережі і відіграє важливу роль для оперативного розгортання устаткування. Як тільки мережа запускається в експлуатацію, вона починає автоматично керувати своєю роботою.

#### ***Проблеми створення і розвитку.***

Незважаючи на великий потенціал БЧМ, дотепер залишається ряд проблем, що перешкоджають їхньому повсюдному поширенню. Серед основних: функціональна сумісність; ефективність протоколів на кожному з рівнів еталонної моделі OSI; якість обслуговування передачі; керування мережею; безпека передачі.

*Функціональна сумісність.* Поширенню БЧМ сприяє її здатність взаємодії з існуючими мережними стандартами і протоколами (Ethernet, VPN, VLAN, OSPF і ін.). Ця здатність дозволяє безлічі БЧМ різних виробників взаємодіяти на каналному і мережному рівнях OSI, включаючи протоколи IPv4 і IPv6. Мережа повинна поєднувати безліч пристроїв з різними інтерфейсами безпроводної зв’язку. Тому в даний час у корпорації Intel ведуться роботи з рішення цієї задачі на рівні пристроїв – розробляються радіопередаючі системи, що адаптуються до будь-якого середовища безпроводного зв’язку. Такий підхід є істотно менш дорогим, ніж реалізація декількох безпроводних інтерфейсів у кожному пристрої.

*Фізичний рівень* БЧМ повинен відповідати наступним вимогам: адаптація радіоканалу (мінімізація помилок за рахунок комбінації різних типів модуляції і способів кодування); регулювання потужності передачі (з метою мінімізації перешкод, мінімізації затримки передачі та ін.); наявність декількох прийомопередавачів, використання спрямованих антен і ін. В перспективі розглядається використання програмувальних радіозасобів (soft radio), застосування МІМО-технологій, надширокополосних сигналів (UWB) і ін.

*Канальний рівень.* В порівнянні з класичними безпроводними WLANs MAC протоколи для БЧМ: вимагають децентралізованого кооперативного функціонування вузлів на відстань більше, ніж одна ретрансляція; повинні враховувати мобільність абонентів і спрямованість трафіка (абонент-шлюз). Використання випадкових протоколів доступу в БЧМ неефективним і тому перспективним є: використання гібридних схем тимчасового і кодового поділу каналів; використання декількох каналів замість одного (в одному маршрутизаторі кілька радіоінтерфейсів); інтеграція в безпроводні маршрутизатори різних протоколів (IEEE 802.11, IEEE 802.16, IEEE 802.15) і ін.

*Мережний рівень (маршрутизація).* Основна задача рівня – забезпечення передачі пакета від відправника до адресата за допомогою декількох ретрансляцій. У цьому відношенні БЧМ радикально відрізняються від технологій 3G, WLANs, WMANs, що використовують єдиний безпроводний канал і тому не потребують мережного рівня. У БЧМ же (як і в MANET) вузли будують і підтримують маршрути для передачі пакетів. Як основні вимоги до методів маршрутизації можна віднести наступні [2, 5]: багатомасштабність, ефективність, надійність, адаптивність, забезпечення заданої якості обслуговування (QoS) і ін.

На даний час значну кількість методів маршрутизації запропоновано для MANET [5]. Однак у MANET трафік може існувати між будь-якою парою вузлів і всі вузли мобільні, тоді як у БЧМ трафік має спрямованість (абонент-шлюз), крім цього абоненти можуть бути як мобільними, так і стаціонарними. Очевидно, що ряд протоколів маршрутизації, запропонованих для MANET, з визначеними доробками може бути використаний і БЧМ [6]. Для максимізації продуктивності при передачі трафіка можуть застосовуватися різні метрики, що враховують смугу пропускання, рівень сигналу, його стабільність, затримку або інші параметри каналу (вузла).

*Транспортний рівень.* Протоколи транспортного рівня спеціально поки не запропоновані для БЧМ. Однак, значна кількість протоколів, запропонованих для MANET, можуть бу-



ти основою для створення протоколу транспортного рівня, орієнтованого на БЧМ [7].

*Керування мережею.* Більшість функцій керування мережею повинні бути реалізовані в БЧС [3], наприклад, моніторинг мережі, керування потужністю передачі та ін.

*Якість обслуговування.* Різні додатки генерують потоки даних різної інтенсивності і мають різні вимоги до пропускну здатності [8]. Проблема – класифікації і пріоритезації трафіка у вузлах (і в обсязі всієї мережі) для досягнення максимальної продуктивності, і забезпечення максимуму зручностей користувачів.

*Безпека* БЧМ визначається наступними особливостями: децентралізованою мережною архітектурою, вразливістю радіоканалу і динамічністю топології. Сервісу безпеки (таємність, дійсність, цілісність, контроль доступу, неспростовність) повинні враховувати особливості МР і забезпечуватися тими, або іншими механізмами безпеки з метою захисту від визначеної кількості атак [9, 10].

#### **Висновки.**

Таким чином, безпроводні чарункові мережі пропонують найбільш економічно вигідне і гнучке рішення безпроводного зв'язку. Хоча технологія поки що знаходиться в стадії розвитку, вона вже демонструє значний потенціал в області створення ефективних безпроводних обчислювальних середовищ, що відповідають вимогам військового середовища, можуть бути використаними в бізнесі, в домашніх умовах, у промисловості і серед постачальників послуг широкополосного зв'язку.

Технологія успішно сполучиться з іншими традиційними технологіями (3G, WLANs, WMANs). Відносний її недолік – це складність її комбінування з іншими безпроводними технологіями при сполученні функцій хоста і маршрутизатора в кожному вузлі мережі. Однак, наукові дослідження останніх років свідчать про швидке створення ефективних безпроводних чарункових мереж.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Sichitiu M.L.* Wireless mesh networks: opportunities and challenges // In Proc. of the Wireless World Congress, May 2005.
2. *Akyildiz F., Wang X.* A Survey on Wireless Mesh Networks // IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 9, 2005.
3. *Минович А.И., Романюк В.А.* Методология оперативного управления мобильными радиосетями // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53 – 58.
4. *Минович А.И., Романюк В.А.* Перспективи побудови тактичних мереж зв'язку // III Науково-практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2006. – С. – 16-28.
5. *Минович А.И., Романюк В.А.* Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути решения // Зв'язок. – 2006. – № 5.
6. *Ramachandram K.N., Buddhikot M.M., Miller S.* On design and implementation of infrastructure mesh networks // In Proc. of WiMesh'05, 2005.
7. *Минович А.И., Романюк В.А., Сова О.Я.* Аналіз методів управління навантаженням в мобільних радіомережах на транспортному рівні моделі OSI // Збірник наукових праць № 3. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2006. – С. 55 – 65.
8. *Минович А.И., Романюк В.А.* Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2005. – № 8. – С. 17 – 23.
9. *Salem N.B., Hubaux J.-P.* Securing Wireless Mesh Networks // IEEE Wireless Communications, vol. 13, no. 2, 2006.
10. *Минович А.И., Романюк В.А., Шацко П.В.* Виявлення атак в мобільних радіомережах // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2005. – С. 102 – 111.