

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Розглядаються перспективи розвитку сенсорних мереж, їх класифікація й вимоги, які ставляться до них. Аналізуються проблеми, пов'язані зі створенням і розвитком таких мереж.

Сенсорними називаються розподілені безпроводові мережі, що складаються з маленьких вузлів (сенсорів), з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки й передавання даних.

Сенсорні пристрої являють собою інтегровану платформу, яка поєднує можливості сенсорів (зовнішніх датчиків, що реєструють сукупність параметрів — акустичних, вібраційних, радіаційних, хімічних, біологічних) і мікрокомп'ютерів, об'єднаних у безпроводову мережу. *Це дає змогу такому пристрою самостійно проводити початкову обробку даних і вимірювання, а також підтримувати зв'язок із зовнішньою інформаційною системою.*

Основні елементи сенсорів (рис. 1) такі:

- ▶ датчики для контролю зовнішнього середовища;
- ▶ мікрокомп'ютер;
- ▶ джерело живлення;



Рис. 1. Склад сенсорного пристрою

▶ радіоприймач-передавач, який завдяки малій потужності (нижчій за 10 мВт) може використовуватися без отримання спеціального дозволу.

Елементи сенсорної мережі автономні, тобто містять усе необхідне для роботи. Сенсорні пристрої, що не потребують зовнішнього живлення, проводів для комунікації та сервісного обслуговування, мають розроблятися так, щоб споживати мінімальну потужність і протягом кількох років функціонувати за рахунок внутрішніх елементів живлення (рис. 2).

Класифікація сенсорних мереж

Сенсорні мережі класифікуються за п'ятьма ознаками — мобільністю, організацією, середовищем моніторингу, параметрами моніторингу та сферою застосування (рис. 3).

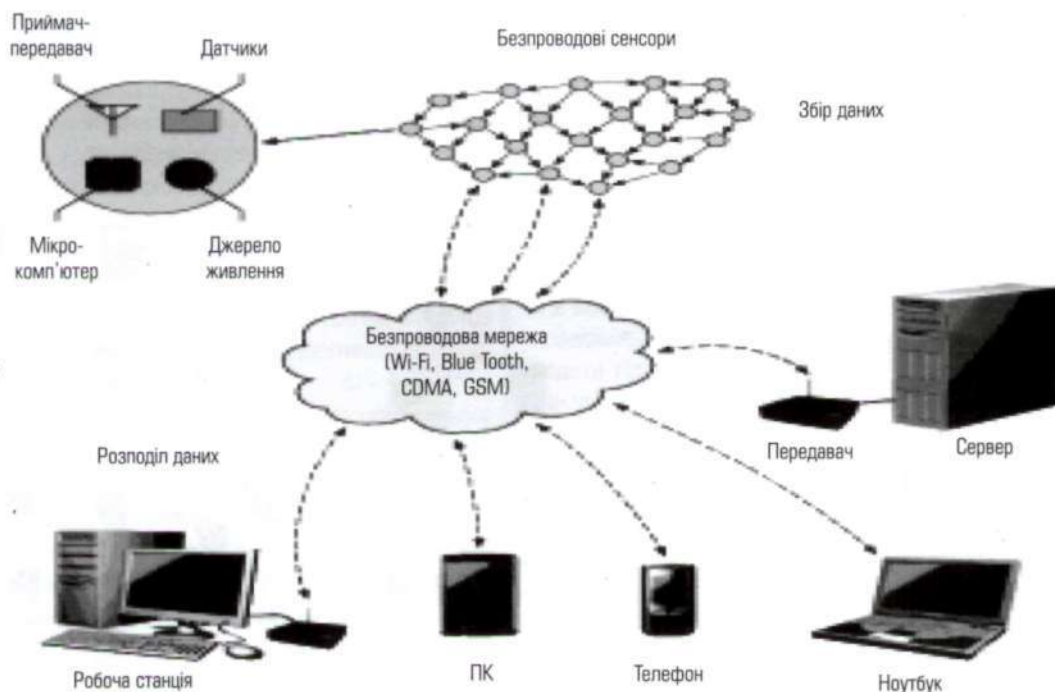


Рис. 2. Схема взаємодії сенсорних пристроїв із зовнішнім інформаційним середовищем



Рис. 3. Класифікація сенсорних мереж

За мобільністю розрізняють *стаціонарні та рухомі (мобільні)* сенсорні мережі (останні є окремим випадком MANET — Mobile Ad-hoc Networks). Вибір тих чи інших залежить від сфери застосування.

За організацією сенсорні мережі можуть бути *децентралізованими, ієрархічними або гібридними*. Ієрархічна організація припускає розбиття мережі на зони (кластери) з виділенням у кожній головних і простих вузлів, а також шлюзів (для зв'язку між зонами); вона являє собою комбінацію централізованого (у зонах) і децентралізованого (між головними вузлами) способів управління.

Приклад взаємодії сенсорних мереж різної архітектури подано на рис. 4 [1]; їхні характерні особливості підсумовано в таблиці.

Тип мережі	Сенсори	Обробка даних	Зберігання інформації
Неієрархічна	Однотипні	Розподілена	Централізоване
Ієрархічна кластеризована	Різноманітні	Централізована	
Гібридна		Розподілена	Розподілене

У випадку неієрархічної мережі (рис. 4, а) однотипні відеосенсори виконують розподілену обробку даних. Інформація передається з використанням багаторазових ретрансляцій (маршрутизацій). Один або кілька сенсорів мають безпроводовий доступ до зовнішнього шлюзу, який, своєю чергою, пов'язаний з іншими мережами (проводовими, стільниковими і т. ін.).

В ієрархічній кластеризованій мережі різноманітних сенсорів (на рис. 4, б зображено тільки одну групу) відео-, аудіо- та скалярні сенсори передають дані до головного вузла (кластера), який відповідає за виконання централізованої обробки даних. Цей вузол передає зібрану інформацію через зовнішній шлюз у концентратор пам'яті й на центральну станцію.

У гібридній мережі (рис. 4, в) з однотипними і неоднотипними сенсорами кожний рівень виконує свої функціональні завдання. Обмежені ресурсом, однотипні сенсори з низьким енергоспоживанням відповідають за виконання простіших завдань (таких як виявлення скалярних фізичних розмірів), тоді як на сенсорні пристрої з великою потужністю покладається розв'язання комплексних завдань (обробка, передавання інформації). Зберігання й

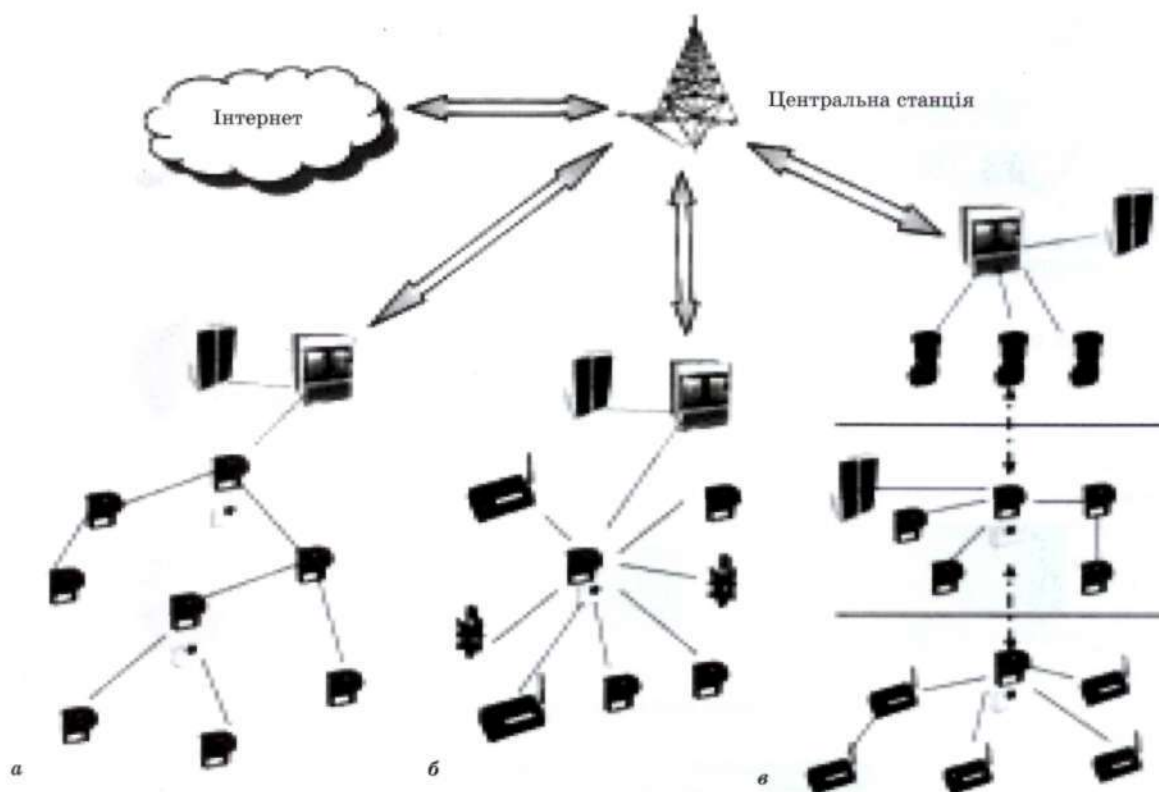


Рис. 4. Взаємодія неієрархічної (а), ієрархічної кластеризованої (б) і гібридної (в) сенсорних мереж:

— концентратор обробки; , — відповідно відео- й аудіосенсор; — високофункціональний відеосенсор;
 — скалярний сенсор; — безпроводовий шлюз; — концентратор пам'яті

обробка даних можуть виконуватись розподіленим способом на кожному рівні.

Як свідчать результати експериментів, гібридна архітектура має значні переваги з погляду масштабованості, забезпечуючи нижчу вартість, ліпше покриття, вищі функціональні можливості та більшу надійність [2].

За середовищем моніторингу сенсорні мережі бувають наземні, підземні, повітряні й морські (один із прикладів — розгорнена на океанському дні Управлінням оборонних науково-дослідних робіт США — DARPA — ще в 60-х роках XX століття підводна сенсорна мережа стеження за радянськими підводними човнами).

Оскільки **параметри моніторингу** численні й різноманітні, класифікація за цим критерієм передбачає велику кількість видів сенсорних мереж, зокрема *акустичні, хімічні*. Залежно від середовища моніторингу в сенсорах використовують датчики та мікрокомп'ютери, реєструючи певні параметри (наприклад, рівень радіації на забрудненій території).

За сферою застосування також можна виокремити чимало видів мереж.

Охорона здоров'я. Медичні сенсорні мережі [3] можуть бути інтегровані з 3G мультимедійними мережами для забезпечення повсюдного охоплення населення послугами системи охорони здоров'я. Застосування медичних сенсорів уможливить безперервний контроль найважливіших параметрів функціонування

організму хворого (температура тіла, кров'яний тиск, частота пульсу, дихальна активність, робота серця). Крім того, медичні центри зможуть виконувати дистанційний моніторинг своїх пацієнтів через відео- та звукові сенсори, сенсори позиціонування, переміщення або сенсори активності, що також закріплюються на поверхні тіла чи вживлюються під шкіру.

Екологічний моніторинг. Перспективність застосування сенсорних мереж у цій сфері зумовлюється необхідністю якомога оперативніше передавати акустичну та відеоінформацію. Уже сьогодні масиви відеосенсорів використовують, наприклад, океанографи, щоб визначити мілину через технології отримання зображення [4].

Управління виробничим процесом. Сенсорні мережі доцільно застосовувати для контролю якості виробів (деталей або кінцевих продуктів), які автоматично оглядаються з метою виявлення дефектів.

Управління автомобільним рухом. За допомогою сенсорних мереж можна контролювати автомобільний рух у великих містах або на магістралях, а також розгорнути службу, яка, керуючи рухом транспортних засобів на дорогах, сприятиме уникненню «пробок». Інтелектуальна паркувальна система, що складається з мультимедійних сенсорів [5], дасть змогу оперативного відшукувати вільні місця й організувати автоматичне паркування, підвищуючи мобільність у міських зонах. Мультимедійні сенсори зможуть забезпечувати контроль автомобільних потоків на

магістралях, надавати відповідну інформацію (наприклад, про середню швидкість і кількість автомобілів), а також виявляти порушення правил дорожнього руху й надсилати повідомлення про них у службу охорони правопорядку для ідентифікації порушника, а в разі аварії — для дослідження місця події.

Надзвичайні ситуації. Наприклад, при пожежі на великому складі в промисловій зоні міста безпроводова сенсорна мережа, розгорнена в будівлі, зможе надати пожежникам докладну інформацію щодо місцезнаходження джерела спалахування, характеристики пожежі й причини її виникнення, а також про найімовірніші шляхи її поширення. Завдяки цьому уможливуватиметься швидке взяття ситуації під контроль.

Сільське господарство. У певних галузях агропромислового сектору для досягнення успіху необхідно брати до уваги величезний обсяг різноманітної інформації. Характерний приклад — винарство: на якість вина впливає безліч чинників, і досвідчені винороби ретельно враховують щонайменші нюанси, намагаючись досягти найкращого букета напою. Розв'язати це складне завдання на науковій основі допоможе використання сенсорних мереж. «Засіявши» виноградник безпроводовими датчиками, можна безперервно відстежувати температуру, вологість та інші параметри, важливі для дозрівання плодів кожної лози, а потім, зіставляючи зібрану інформацію й отримані результати встановлювати, якому поєднанню погодних умов відповідає та або та якість вина.

Військова сфера. У світі вже існують сенсорні мережі військового призначення — деякі з них проходили випробування під час ведення бойових дій в Афганістані й Іраку, де Збройні сили США розмістили кілька тисяч сенсорів для відстежування пересувань бойової техніки.

Основні характеристики сенсорних мереж

До основних характеристик сенсорних мереж належать:

- ▶ **розмірність** (сотні або тисячі залежно від сфери застосування);
- ▶ **принцип організації та побудови** (самоорганізація мережі, комутація пакетів, кожний вузол — маршрутизатор);
- ▶ **мобільність** (мобільні сенсорні мережі є окремим випадком MANET);
- ▶ **тип і спосіб управління** (ієрархічний, розподілений);
- ▶ **потужність передачі терміналу** (визначається типом сенсора);
- ▶ **дальність зв'язку** (сотні метрів);
- ▶ **швидкість передавання** (швидкість передавання в радіоканалі залежить від відстані між абонентами, потужності передавача та інших параметрів фізичного рівня [9]).

Вимоги до сенсорних мереж

До сенсорних мереж ставляться такі основні вимоги.

- ▶ **Висока пропускна здатність.** Прикладні програми, особливо відеопотоки, потребують високої пропускної здатності — на порядок вищої, ніж та, що сьогодні підтримується сенсорними елементами. Наприклад, номінальна швидкість передавання сучасних вузлових елементів типу Crossbow [10] MICAz або TelosB [11], становить 250 кбіт/с.

▶ **Програмованість.** Передбачається можливість програмування та зручність перепрограмування кожного сенсора для виконання різних прикладних завдань.

▶ **Масштабованість.** Сенсорна мережа має швидко перебудуватися з урахуванням зростаючої складності топологічної структури.

▶ **Самоорганізація мережі.** Розгорнена сенсорна мережа самостійно прокладає маршрути обміну інформацією й здатна коригувати їх згідно зі змінами в мережі.

▶ **Інтелектуальність, децентралізованість і оптимізація функцій управління.** У систему управління сенсорною мережею мають входити підсистеми, що виконують функції управління маршрутизацією, навантаженням, енергозбереженням, топологією, радіоресурсом і безпекою [12].

▶ **Здатність працювати з різними видами трафіку.** Сенсорні мережі мають бути пристосованими до обробки різної інформації (мова, дані, відео), отримуваної з навколишнього середовища. З огляду на це постає потреба в новій архітектурі для спільної, розподіленої та обмеженої ресурсом обробки, що уможливить фільтрацію й відбір важливої інформації, підвищивши системну масштабність і скоротивши передавання зайвої інформації, зокрема й завдяки узагальненню даних, отриманих із різних датків, різними засобами зв'язку [13].

▶ **Наявність систем позиціонування та спрямованих антен.** Використання спрямованих антен у сенсорних мережах дає можливість збільшувати не лише пропускну здатність радіоканалу завдяки просторовому рознесенню процесу передавання (передачі між сусідніми вузлами не заважають одна одній), а й відносно одержувача. Утім це ускладнює розв'язання проблеми прихованого терміналу, а також створює нові труднощі, пов'язані зі встановленням наявності сусідніх вузлів та визначенням їх місцезнаходження (напрямів щодо даного вузла) [14].

▶ **Інтеграція з IP-архітектурою.** У майбутньому необхідно забезпечити віддалений доступ до сенсорних мереж з Інтернету, інтегрувавши їх з IP. Проте оскільки поки що характеристики сенсорних мереж виключають таку можливість, рекомендується на прикладному рівні використовувати міжмережні інтерфейси або оверлейнери IP-мереж як найефективніші засоби об'єднання сенсорних мереж та Інтернету [15].

▶ **Гнучка архітектура, для підтримки різних додатків.** Архітектура сенсорної мережі має підтримувати різні незалежні додатки з відповідними технічними вимогами. Необхідно розробити гнучку ієрархічну архітектуру, яка об'єднувала б усі технічні вимоги в одній інфраструктурі.

Переваги сенсорних мереж

Перспективність сенсорних мереж зумовлюється низкою істотних переваг. Розглянемо найважливіші з них.

▶ **Низька вартість сенсорного елемента.** За прогнозами, на 2010 рік вартість елемента становитиме близько 0,2 дол. США.

▶ **Швидке розгортання.** Нового абонента можна підімкнути до сенсорної мережі за кілька хвилин, тоді як для побудови нової кабельної мережі потрібні місяці.

▶ **Мінімізація потреби в обслуговуванні.** Після встановлення сенсорний елемент здатний працювати впродовж кількох років без заміни елемента живлення.

▶ **Інтелектуальність.** При включенні точки доступу вона автоматично виявляє інші точки доступу, з'ясовуючи свою роль у

мережі. Це дає змогу уникнути ручного адміністрування мережі й має велике значення для оперативного розгортання устаткування.

▶ **Відказостійкість і живучість у жорстких умовах експлуатації.** Особливість сенсорної мережі полягає у відсутності центрального керувального пристрою, а також у можливості самоорганізації й самоадаптації до швидко змінюваних параметрів середовища.

▶ **Велике покриття.** Завдяки багатострибковій маршрутизації відпадає необхідність у встановленні прямого зв'язку між абонентами й базовою станцією.

Проблеми створення й розвитку

Для подолання труднощів, з якими доводиться стикатись при побудові сенсорних мереж, необхідно розв'язати низку наукових завдань (маршрутизація, управління потужністю, топологією, енергоресурсом, безпека, підтримання заданої якості передавання) з огляду на обмеженість ресурсу радіотерміналу (місткість пам'яті, продуктивність процесу, ємність батареї).

Розглянемо зазначені проблеми за відповідними рівнями.

Канальний рівень. Згідно з результатами докладного факторного аналізу [16] доходимо, зокрема, таких висновків:

▶ ефективність методу доступу в сенсорних мережах залежить не тільки від вхідного навантаження, а й від мобільності вузлів, використовуюваного методу маршрутизації [17] і поточної топології мережі;

▶ жодний із методів доступу, так само як і жодна комбінація методу доступу з методом маршрутизації, не може забезпечити незмінно ефективного функціонування мережі за будь-яких умов.

Отже, єдиного методу доступу, який задовольняв би всі вимоги, не існує. Вибір (синтез) оптимального методу доступу не можна розглядати ізольовано від інших аспектів еталонної моделі взаємодії відкритих систем. Це завдання розв'язують з огляду на параметри сенсорної мережі (включаючи розмірність, мобільність, оснащеність вузлів, обладнання позиціонування, спрямовані антени), параметри інформаційного навантаження, а також на вимоги до передавання інформації з урахуванням рішень, ухвалених на інших рівнях.

Застосування конкретного методу доступу визначатиметься поточними завданнями управління мережею, її станом та ухваленими на інших рівнях еталонної моделі рішеннями. Розв'язуючи це питання за відсутності повної інформації про стан мережі, доцільно вдаватися до методів нечіткого ситуативного управління [18].

Безпека на каналному рівні підтримується за допомогою автентифікації й шифрування. Слід зазначити, що використовувані нині в стільникових і проводових мережах зв'язку механізми безпеки через свою централізованість неприйнятні для мобільних радіомереж. Загалом розв'язання проблеми безпеки передавання інформації в таких мережах потребує окремого розгляду, що виходить за рамки цієї статті [25].

Мережний рівень (маршрутизація). Застосовувані в стаціонарних мережах зв'язку методи маршрутизації (ММ) [19] зорієнтовані на статичну мережну топологію, тому в сенсорних мережах вони неефективні. За останні кілька років для використання в сенсорних мережах запропоновано значну кількість ММ [20], проте технологічний прогрес у галузі мікроелектроніки,

необхідність надання нових послуг та освоєння нових сфер застосування сенсорних мереж спонукають до розробки нових ефективних ММ.

Транспортний рівень. Основна проблема управління навантаженням на транспортному рівні полягає у втраті пакетів. Однак на відміну від проводових мереж передавання даних, де це явище зумовлюється переважно локальними перевантаженнями на окремих вузлах мережі, у безпроводових мережах існує багато причин втрати пакетів, через які ефективність стандартного протоколу транспортного рівня TCP (Transmission Control Protocol) практично зводиться нанівець. Зокрема, до втрати пакетів даних може призводити мобільність абонентів мережі, через що відбуваються обриви каналу між абонентами, зміни маршруту передавання, повторні передавання великої кількості пакетів, а також виникають обмеження ширини смуги пропускання, затримки при доступі до каналу й численні помилки в каналі [21].

Опубліковано чимало праць з адаптації протоколу TCP для використання в мобільних мережах, проте, як зазначається у [22], більшості з них притаманні такі недоліки: вони враховують лише окремі особливості безпроводового середовища (СЗTCP, TCP-MEDX) або потребують істотної модернізації мережного устаткування, яке успішно застосовується нині (TCP Vegas). Тому для ефективного функціонування протоколів транспортного рівня необхідно розробити механізм, який урахував би всі перелічені особливості безпроводових мереж і давав змогу чітко й точно визначати причину втрати пакетів (перевантаження чи помилки в мережі).

Якість обслуговування (Quality of Services — QoS). Поняття QoS передбачає набір параметрів (пропускна здатність, затримка доставки пакетів, її варіація тощо) для певного потоку даних [23].

В Інтернеті модель QoS визначається трьома основними рівнями сервісу [23]:

- ▶ **сервіс «без гарантії доставки»** (Best-effort Service);
- ▶ **диференційований сервіс** — певному класу трафіку надається перевага при обслуговуванні;
- ▶ **гарантований сервіс** — повне (абсолютне) резервування мережних ресурсів для трафіку певного класу.

Крім того, згідно з особливостями сенсорних мереж висуваються такі основні вимоги до QoS-методів управління:

- ▶ забезпечення параметрів інформаційного обміну відповідно до типу трафіку;
- ▶ децентралізованість і розподіленість функціонування;
- ▶ нечутливість до втрати частини пакетів і можливої відсутності точних значень QoS-параметрів;
- ▶ адаптованість до поточної ситуації в мережі;
- ▶ мінімізація витрат обчислювальних і мережних ресурсів.

Тому застосовувані в стаціонарних мережах QoS-моделі непридатні для застосування в сенсорних мережах. На сьогодні для останніх запропоновано низку QoS-моделей управління [24], серед яких INSIGNIA, FQMM (Flexible QoS Model for MANET), iMAQ (Integrated MANET QoS), DS-SWAN (Differentiated Services in Stateless Wireless Ad hoc Networks), 2LQoS (Two-Layer QoS). Проте вони передбачають управління якістю на певному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем і реалізують прості алгоритми адаптації та резервування ресурсів вузлів (каналів) до різних типів трафіку.

Фізичний рівень. Необхідна адаптація до швидких змін параметрів радіоканалу. Сенсорні мережі мають задовольняти такі вимоги:

► мобільність (підтримання частоти й адаптації до заганання каналу на фізичному рівні);

► адаптація каналу з використанням коригувальних кодів;

► зміна потужності передавання (для мінімізації перешкод і затримок, максимізації пропускну здатності).

Насамкінець наголосимо, що на особливу увагу заслуговують методи збільшення терміну служби сенсорних пристроїв, до яких належать:

► оптимізація апаратного забезпечення (напруги, тактової частоти);

► застосування режиму «сон», що підтримує електронну апаратуру в пасивному стані більшу частину часу;

► розробка енергетичних протоколів для сенсорних систем передавання.

Крім того, одним із важливих напрямків досліджень у сенсорних мережах є пошук методів енергозбереження, зорієнтованих на отримання енергії з навколишнього середовища.

* * *

Сенсорні мережі забезпечують найбільш економічно вигідне й гнучке вирішення безпроводового зв'язку. Хоча ця технологія поки що перебуває в стадії розвитку, вона вже демонструє значний потенціал щодо створення ефективних безпроводових обчислювальних середовищ, які задовольняють вимоги бізнесу, придатні для використання і в побуті, і в промисловості, зокрема й постачальниками послуг широкосмугового зв'язку.

Технологія потенційно успішно поєднується з іншими традиційними технологіями (3G, WLAN, WMAN). Основна перешкода — повна складність подолання суперечностей між суто безпроводовими технологіями та функціями кожного вузла як хоста й маршрутизатора.

Наукові дослідження останніх років уможливають реалізацію всіх переваг, що їх здатні забезпечити сенсорні мережі.

Література

1. Kulkarni P., Ganesan D., Shenoy P., Lu Q. *Sens Eye: a multitier camera sensor network* // *Proc. of ACM Multimedia, Singapore, November 2005*.

2. Kulkarni P., Ganesan D., Shenoy P. *The case for multitier camera sensor network* // *Proc. of the ACM Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV), Stevenson, WA, USA, June 2005*.

3. Hu F., Kumar S. *Multimedia query with QoS considerations for wireless sensor network in telemedicine* // *Proc. of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers // International Conf. on Internet Multimedia Management Systems, Orlando, FL, September 2003*.

4. Holman R., Stanley J., Ozkan-Haller T. *Applying video sensor networks to near shore environment monitoring* // *IEEE Perv. Comput.* — 2003. — № 2 (4). — P. 14–21.

5. Campbell J., Gibbons P. B., Nath S., Pillai P., Seshan S., Sukthakar R. *IrisNet: an Internet-scale architecture for multimedia sensors* // *Proc. of the ACM Multimedia Conference, 2005*.

6. ITU-T G.114. *One-way transmission time, 1996*.

7. ITU-T G.1010. *End use multimedia QoS categories, 2001*.

8. Романюк В. А. *Мобильные радиосети — перспективы беспроводных технологий* // *Сети и телекоммуникации.* — 2003. — № 12. — С. 53–58.

9. Holland G., Vaidja H., Bahl P. *A rate-adaptive MAC protocol for wireless networks* // *Proc. ACM/IEEE MOBICOM'01, July 2001*.

10. Crossbow. <<http://www.xbow.com>>.

11. Crossbow, TelosB, Mote Specifications. <<http://www.xbow.com>>.

12. Миночкин А. И., Романюк В. А. *Методы множественного доступа в мобильных радиосетях* // *Зв'язок.* — 2004. — № 2. — С. 46–50.

13. Stockdon H., Holman R. *Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery* // *J. Geophys. Res.* — 2000. — 105 (C9). — 22, 015–22, 033.

14. Korakis T., Jaklari G., Tassioulas L. *A MAC protocol for full exploitation of directional antennas in ad-hoc wireless networks* // *Proc. MOBIHOC'03, 2003.* — P. 98–107.

15. Zuniga M., Krishnamachari B. *Integrating future large-scale sensor networks with the Internet* // *USC Computer Science Technical Report CS 03-792, 2003*.

16. Barlett C., Drozda M., Marathe A. *Analysis interaction between networks protocols, topology and traffic in wireless radio networks* // *Proc. WCNC'03, 2003*.

17. Миночкин А. И., Романюк В. А. *Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях* // *Зв'язок.* — 2001. — № 1. — С. 31–36.

18. Леоненков А. *Нечеткое моделирование в среде MATLAB и Fuzzy TECH.* — Спб.: БХВ-Петербург, 2003. — 736 с.

19. Кульгин М. *Технологии корпоративных сетей.* — Спб.: Изд-во «Питер», 2000. — 704 с.

20. <http://www.ietf.org/html/charters/manet-charter.html>.

21. Kliazovich D., Granelli F. *Cross-layer congestion control in ad hoc wireless networks* // *Ad Hoc Networks Journal.* — 2006. — Vol. 4, № 6. — P. 678–708.

22. Міночкин А. И., Романюк В. А., Сова О. Я. *Аналіз методів управління навантаженням у мобільних радіомережах на транспортному рівні моделі OSI* // *36. наук. праць ВІПІ НТУУ «КПІ».* — 2006. — № 3.

23. Кучерявый Е. А. *Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет.* — Спб.: Наука и техника, 2004. — 336 с.

24. Perillo M., Heinzelman W. *Sensor management policies to provide application QoS* // *Ad Hoc Networks (Elsevier).* — 2003. — 1 (2–3). — P. 235–246.

25. Papadimitratos P., Haas Z. J. *Secure data transmission in mobile ad hoc networks* // *Proc. of Second ACM Workshop on Wireless Security (WiSe'03), 2003*.