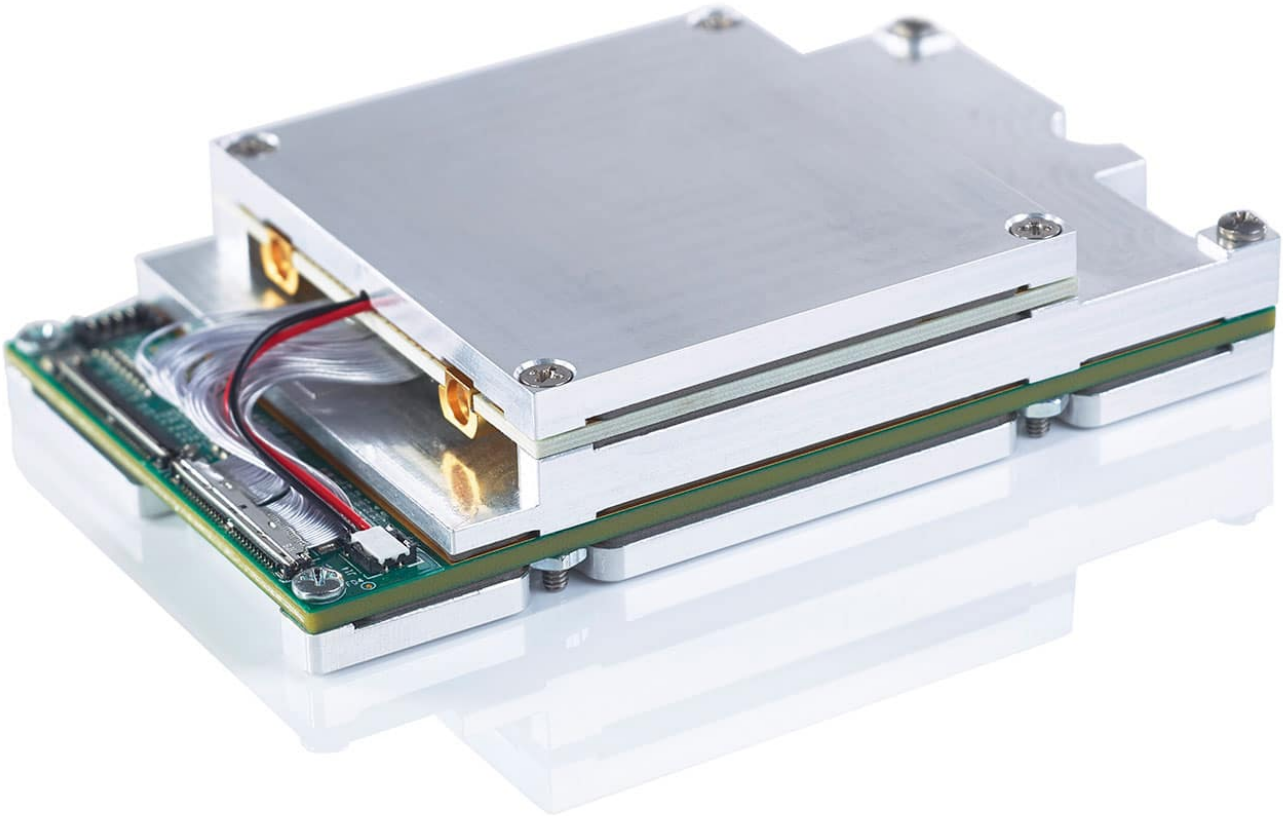
Технології SILVUS MN-MIMO

Mobile Networked MIMO (MN-MIMO) - це найсучасніша форма сигналу, яка вирішує багато проблем, з якими стикаються сучасні бездротові системи.



Технологія MN-MIMO була розроблена в наших лабораторіях в результаті більш ніж 15-річних розробок і 60 мільйонів доларів США, витрачених на науково-дослідні роботи, що фінансуються урядом США та комерційними організаціями IRAD в області MIMO і мобільних спеціальних мереж (MANET). Використовуючи новітні інновації дослідницької спільноти в галузі зв'язку, технологія Silvus MN-MIMO забезпечує надійну, високошвидкісну, пакетну передачу відео та даних у найскладніших умовах у світі.

Ця революційна форма сигналу є потужним поєднанням кодованого ортогонального мультиплексування з частотним розділенням каналів (COFDM), антенних технологій Multiple Input Multiple Output (MIMO) і мобільних спеціальних мереж (MANET) для забезпечення цифрового зв'язку з безпрецедентною продуктивністю і гнучкістю.

Оригінали статей англійською розташований на ресурсі Silvus Technologies

Введення в COFDM

Розбивка широкосмугового каналу на безліч дискретних, вузьких підканалів або піднесучих

Кодоване ортогональне мультиплексування з частотним розділенням каналів (COFDM) є альтернативою сигналу з однією несучою, який часто використовується через обмеження систем з однією несучою для широкосмугових застосувань, де присутня багатопроменева передача. Ці обмеження пов'язані з частотно-селективними завмираннями, які спричиняють різну потужність сигналу в широкосмуговому каналі, а також з міжсимвольною інтерференцією, яка може виникати в середовищах з великим розкидом затримок.

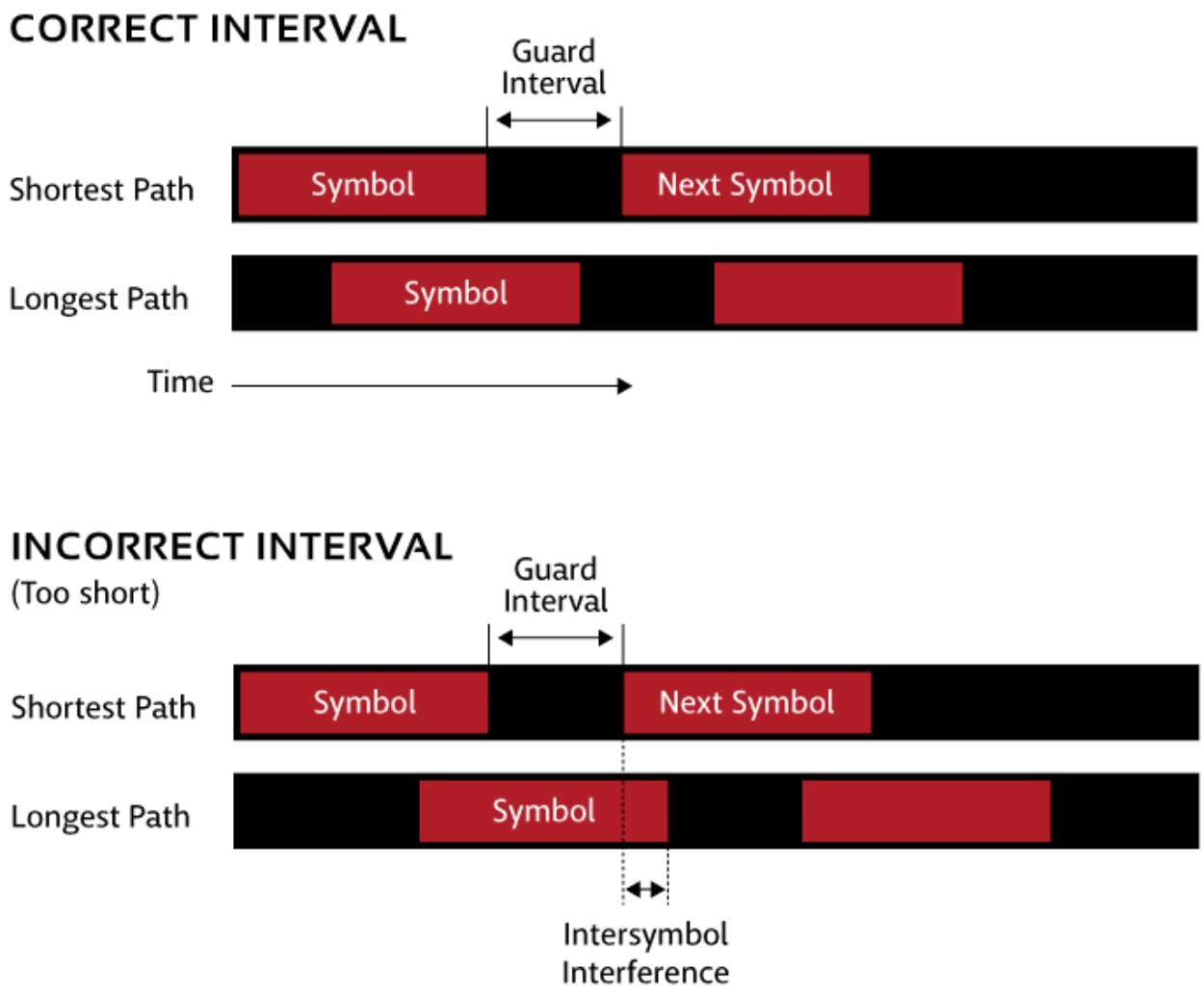
COFDM розбиває широкосмуговий канал на безліч дискретних вузьких підканалів або піднесучих, як показано нижче.

Термін «ортогональні» означає, що кожна з піднесучих створюється таким чином, щоб не створювати перешкод іншим піднесучим без необхідності фільтрації кожної з них у частотній області, як це робиться традиційно для ізоляції каналів один від одного.

Проблема частотно-селективних завмирань вирішується шляхом поєднання використання піднесучих з використанням кодування з прямою корекцією помилок (Forward Error Correction), яке є «C» в COFDM*. Кодування FEC перетворює задану кількість бітів у більшу кількість бітів, які містять інформаційну надлишковість. Грубо кажучи, якщо x біт перетворити на 2x біт, половина з них може бути втрачена, але при цьому вихідні дані можна відновити. Такий сценарій називається кодом зі швидкістю ½.

Перетворення кожних 5 біт даних на 6 біт буде кодом зі швидкістю 5/6. Код 5/6 дозволяє передавати більше користувацьких даних, але він більш схильний до втрати або пошкодження бітів. Це кодування FEC використовується для розподілу даних між піднесучими системи COFDM. Таким чином, навіть якщо певна піднесуча страждає від частотно-селективних завмирань до такої міри, що повністю втрачається, дані можуть бути відновлені, оскільки вони були надлишково закодовані на інших піднесучих.

Бездротовий зв'язок COFDM також забезпечує практичне вирішення проблеми міжсимвольної інтерференції (ISI). Цю проблему можна продемонструвати за допомогою наступної ілюстрації:



Між кожним переданим символом залишається захисний інтервал, щоб у приймача був час для того, щоб копія символу, яка прийшла по довшому відбитому шляху, була прийнята без перекриття з наступним символом. Наведена вище ілюстрація показує, що відбувається на приймачі, коли захисний інтервал достатньо довгий, і коли він занадто короткий, що призводить до виникнення ISI.

Проблема широкосмугової системи з однією несучою полягає в тому, що довжина символу стає дуже короткою для заданої швидкості передачі даних. У практичних сценаріях захисний інтервал, необхідний для врахування різниці в довжині тракту, може стати таким же довгим або навіть довшим за символ. Це значно зменшує обсяг даних, які можна передати, оскільки починає домінувати період мовчання.

Символи бездротової системи COFDM стають довшими прямо пропорційно кількості використовуваних піднесучих. Таким чином, захисний інтервал заданої довжини матиме набагато менший вплив на обсяг даних, які можуть бути передані, оскільки символ, що несе дані, домінує над тихим захисним інтервалом.

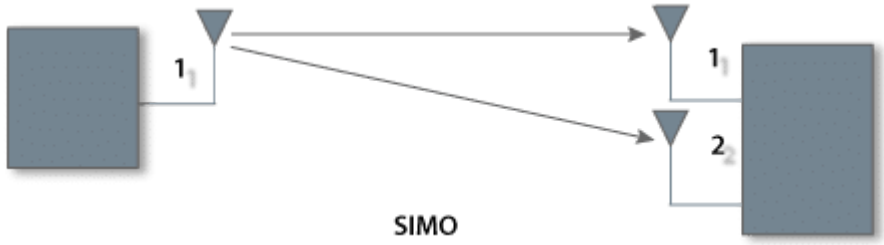
*COFDM іноді використовується як синонім DVB-T у спільноті бездротового відео. Насправді всі практичні системи на основі OFDM використовують кодування FEC і, таким чином, є COFDM.

Введення в MIMO

Кілька антен як для передавачів, так і для приймачів значно покращують продуктивність зв'язку

Багато сучасних телекомунікаційних стандартів, особливо в споживчій сфері, прийняли технологію багатоантенного зв'язку (MIMO) через значні переваги, які вона надає порівняно з аналогічними системами, що використовують приймачі з однією антеною (SISO).

MIMO розшифровується як *Multiple-In Multiple-Out*, що означає, що коли пакет передається в канал, він передається більш ніж на одну антену, а коли він виходить з каналу, він приймається на декілька антен. Це на відміну від системи Single-In Single-Out з однією антеною на обох кінцях каналу, або системи SIMO, яка включає деякі типи радіостанцій, що використовують комбінування на приймальному кінці, але все одно передають лише через одну антену.



Дехто може вважати це позначення дещо дивним, оскільки, коли ці назви були вигадані в Bell Labs, вони були зроблені з точки огляду на канал, а не на радіо, де «in» означало функцію передавання.

Що таке технологія з кількома антенами?

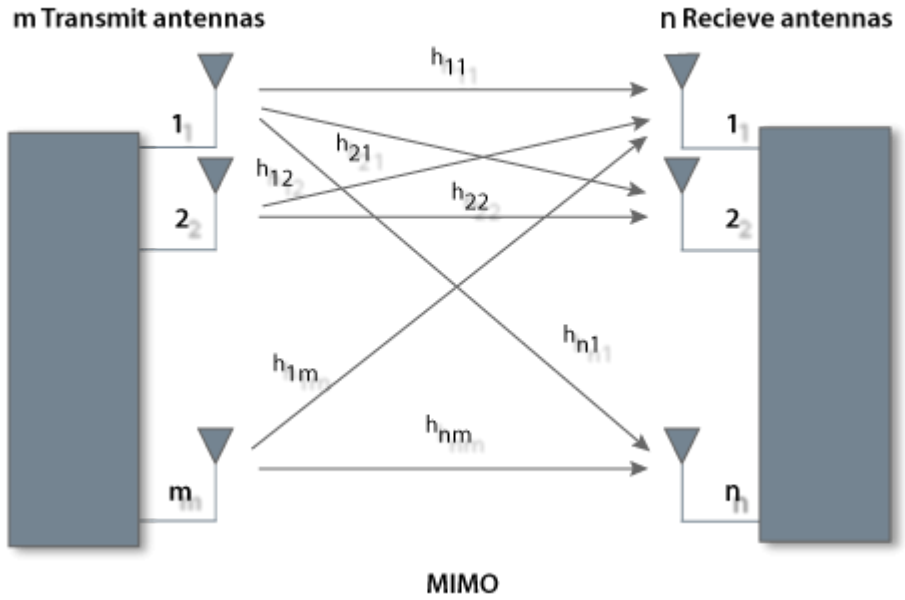
Кілька антен на передавачі та приймачі вводять ступені свободи сигналу, які були відсутні в SISO-системах. Це називається просторовим ступенем свободи. Просторові ступені свободи можуть бути використані для «диверсифікації» або «мультиплексування», або їх комбінації. Простіше кажучи, різноманітність означає надмірність.

Простим прикладом різноманітності є кілька антен, які намагаються прийняти один і той самий сигнал. Сигнал, що приймається двома антенами, спотворюється шумом, який не корелює між антенами, тому, об'єднавши два сигнали, можна відновити сигнал кращої якості. Аналогія полягає в тому, що, дивлячись на один і той самий об'єкт з двох

різних кутів зору, можна отримати багатшу інформацію про об'єкт. Різноманітності також можна досягти за допомогою декількох передавальних антен, використовуючи методи «просторово-часового кодування» (STC).

Друга основна технологія MIMO - це просторове мультиплексування. Просторове мультиплексування дозволяє парі передавач/приймач MIMO збільшити пропускну здатність без збільшення використання смуги пропускання або потужності передачі. Мультиплексування лінійно збільшує пропускну здатність залежно від кількості антен передавача або приймача, залежно від того, яка з них менша. Передавач надсилає сигнали з різними бітовими потоками з кожної своєї антени. Кожна приймаюча антена приймає лінійну комбінацію переданих сигналів. Бездротовий канал являє собою матрицю, яка є функцією геометрії передавальної/приймальної антенної решітки та розсіювачів/рефлекторів, присутніх у навколишньому середовищі.

Коли пара передавач/приймач MIMO працює в середовищі з високим рівнем розсіювання, матриця каналу стає інвертованою, що дозволяє приймачу декодувати всі різні сигнали, що передаються з різних апертур передавальної антени, що призводить до посилення мультиплексування. Існує певний компроміс між кількістю різноманітних сигналів і коефіцієнтом мультиплексування, який може забезпечити система MIMO. Типова пара передавач/приймач MIMO автоматично знаходить робочу точку на кривій співвідношення рознесення і мультиплексування на основі миттєвих умов бездротового каналу.



Технології MIMO:

Власне формування променя

Eigen-Beamforming може здійснюватися як на стороні передачі, так і на стороні прийому. Класичне формування променя схоже на використання антени з високим

коефіцієнтом підсилення, але таку, яку не потрібно переорієнтовувати, щоб спрямовувати в різні боки, а власне формування променя забезпечує таке ж підсилення, але нечутливе до орієнтації антени або елементів розсіювання поблизу антени. Багато людей уявляють собі системи на кшталт радіолокаторів з фазованою антенною решіткою, коли чують про формування променя, і дійсно, фазована антенна решітка - це метод використання декількох антенних елементів для управління спрямованістю антенного кластера в різних напрямках, формуючи передавальний або приймальний антенний «промінь».

Всупереч тому, що «фазовані антенні решітки» здаються просунутими завдяки їх використанню у надзвичайно дорогих військових системах, насправді це простіша форма формування променя, ніж та, що може бути реалізована за допомогою сучасної системи MIMO. Системи з фазованою антенною решіткою виконують формування променя, використовуючи обмежені можливості фазового зсуву і комбінування сигналів в аналоговій області, що має деякі суттєві недоліки, включаючи той факт, що перевага в продуктивності погіршується зі збільшенням смуги пропускання каналу, і що вона, як правило, працює тільки в умовах прямої видимості (LOS) за відсутності будь-яких розсіювачів або багатопроменевих перешкод, які спричиняють значне погіршення продуктивності.

Формування власного променя MIMO, з іншого боку, перетворює сигнали від усіх антен в цифрову область, де може використовуватися складна *Цифрова обробка сигналів* (DSP). Таким чином, формування власного променя може здійснюватися незалежно для кожної з вузькосмугових піднесучих системи *Ортогонального частотного мультиплексування* (OFDM). Зокрема, системи MIMO можуть використовувати тип формування променя, відомий як власне формування променя. Власне формування променя не обмежується формуванням простого променя в тривимірному просторі. На нього не впливають об'єкти розсіювання або багатопроменеві відбиття. Власний формувач променя, що приймає сигнал в умовах відсутності прямої видимості (NLOS) з численними віддзеркаленнями, може сформувати ефективну діаграму спрямованості антени, яка збільшує коефіцієнт підсилення в декількох напрямках, що відповідають окремим віддзеркаленням. Використовуючи цифрову обробку сигналів, системи MIMO мають можливість адаптувати ці діаграми спрямованості на пакетній основі.

Просторово-часове кодування

Space-time coding - це механізм, який може бути використаний для передачі через декілька антен і досягнення аналогічного виграшу, як і при прийомі через декілька антен. Просторово-часове кодування означає, що дані, які зазвичай передаються через одну антену, беруться з однієї антени, і до них застосовується метод кодування обробки сигналу з метою передачі математично зміненої версії того ж інформаційного вмісту на додаткові антени таким чином, щоб підвищити здатність приймача відокремлювати дані від фонового шуму. Просторово-часове кодування може бути

природною відповідністю до прийому з формуванням променя або прийому з диверсифікацією.

Візьмемо, наприклад, ситуацію, коли радіостанція, встановлена на транспортному засобі, може легко мати чотири антени, тоді як невеликий портативний пристрій може бути обмежений двома або навіть однією антеною. Якщо портативний пристрій передає на одну антену, то автомобільний пристрій може використовувати рознесення приймача або формування променя для покращення прийому. Просторово-часове кодування дає транспортному засобу можливість передавати на всі чотири антени і досягати аналогічного посилення, коли портативний пристрій обмежений однією приймальною антеною, таким чином роблячи зв'язок симетричним і набагато кориснішим для двонаправленого зв'язку.

Просторове мультиплексування

Spatial Multiplexing є технологією, в яку людям важко повірити, не кажучи вже про те, щоб зрозуміти. Ця технологія MIMO фактично передає кілька унікальних інформаційних «потоків» з різних антен, кожна з яких працює на ідентичній центральній частоті. Приймач, який використовує принаймні стільки антен, скільки переданих потоків, може декодувати їх окремо і таким чином збільшити обсяг даних, що проходять через фіксовану смугу пропускання каналу. Система 4×4 MIMO може забезпечити чотири потоки за оптимальних умов і, таким чином, передавати в чотири рази більше даних, ніж система SISO за тієї ж смуги пропускання каналу.

Якщо у нас є передавач, який передає чотири потоки (A, B, C і D), ці потоки зливаються в ефірі, і на кожну з чотирьох приймальних антен надходить спотворена комбінація wA+xB+yC+zD, де w, x, y і z представляють спотворення каналу, викликані багатопроменевим каналом, які відрізняються на кожній антені. Саме завдяки дуже складній цифровій обробці сигналів MIMO приймач характеризує всі ці ефекти каналу w, x, y, z, щоб відновити вихідні потоки A, B, C і D, виконуючи те, що дорівнює розв'язанню чотирьох рівнянь з чотирма невідомими, які багато хто може пам'ятати з уроків лінійної алгебри.

Перевага просторового мультиплексування MIMO полягає в тому, що воно дозволяє підвищити спектральну ефективність (біт на секунду на частоту каналу) без зниження стійкості зв'язку настільки, наскільки це можливо за рахунок переходу до систем більш високого порядку. Наприклад, близько 4 біт/с/Гц можна досягти за допомогою 16-QAM з досить надійним кодуванням FEC, використовуючи два потоки. Без MIMO системі довелося б використовувати 64-QAM і менш стійку швидкість кодування FEC, щоб досягти аналогічної пропускної здатності в тому ж каналі, що значно обмежило б його діапазон або вимагало б набагато більшої потужності передачі.

Всі ці технології, незалежно від того, використовуються вони окремо або в певній комбінації, забезпечують переваги, які можна оцінити з урахуванням меншої потужності

передачі, більшого радіуса дії, більшої завадостійкості або більшої пропускної здатності.

Введення в MANET

Передача голосу, даних і відео через «безінфраструктурну» мережу

Інфраструктурні системи, що використовують технології стільникового зв'язку або WiFi, використовують центральний вузол «хаб» для забезпечення високошвидкісного з'єднання і хорошої якості обслуговування (QoS) для користувача. Видалення цієї інфраструктури і додавання мобільності в поєднанні зі змінним у часі профілем з'єднання без негативного впливу на якість обслуговування користувачів - це величезний виклик, з яким стикаються розробники систем бездротових mesh-мереж (також званих MANET, або мобільними спеціальними мережами).

Система MANET - це група мобільних (або тимчасово стаціонарних) пристроїв, які повинні забезпечувати передачу голосу, даних і відео між довільними парами пристроїв, використовуючи інші як ретранслятори, щоб уникнути необхідності в інфраструктурі.

Існує багато методів, які використовуються для забезпечення надійної роботи MANET, включаючи наступні:

Самоформування/самовідновлення

Self-Forming / Self-Healing є ключовою характеристикою систем MANET. У справжній mesh-мережі радіостанції можуть приєднуватися до мережі або залишати її в будь-який час, і мережа буде постійно адаптувати свою топологію в міру того, як вузли переміщуються відносно один одного. Це означає децентралізовану архітектуру, оскільки немає центральних «головних» радіостанцій, необхідних для управління мережею, і зв'язок буде продовжуватись навіть тоді, коли один або декілька вузлів будуть втрачені.

Адаптація каналу зв'язку

Link Adaptation - це здатність кожної радіостанції оптимально налаштувати параметри передачі (структра, кодування FEC і методи MIMO), щоб максимізувати швидкість передачі даних і надійність зв'язку з кожною з інших радіостанцій, з якими вона взаємодіє. Конкретна радіостанція може спілкуватися з іншою радіостанцією, що знаходиться поруч, зі швидкістю передачі даних понад 50 Мбіт/с, в той час, як для забезпечення надійного зв'язку з радіостанцією, що знаходиться набагато далі, вона використовує швидкість лише 2 Мбіт/с. Це швидкість передачі пакетів, де використання пакетів по 50 Мбіт/с є дуже корисним навіть для потоку даних з набагато нижчою швидкістю, оскільки це залишає вільний ефірний час каналу для інших вузлів мережі. Висока потенційна швидкість пакетної передачі даних важлива, тому що чим менше

ефірного часу споживається для коротких каналів, тим більше ефірного часу залишається для використання повільнішої і набагато надійнішої модуляції і кодування на більш віддалених каналах зв'язку.

Адаптивна маршрутизація

Adaptive Routing - це механізм, який визначає, які потенційні шляхи ретрансляції використовуються, коли потрібно передати потік даних між певною парою радіостанцій. Він повинен підтримувати функцію самовідновлення, динамічно адаптуючись до використання всіх наявних радіостанцій як потенційних ретрансляторів, і бути стійким до втрати ретрансляторів. Вона також повинна працювати разом з адаптацією каналів зв'язку, оскільки визначення оптимального маршруту для потоку даних вимагає врахування інших даних, які проходять через мережу, а також динамічної пропускної здатності кожного каналу в мережі. Ця проблема є складною і вимагає, щоб усі радіостанції обмінювалися інформацією про трафік даних, що протікає через них, і про пропускну здатність каналу зв'язку з іншими сусідніми вузлами. Цей обмін інформацією повинен відбуватися в розумний спосіб, щоб не споживати занадто багато дорогоцінної доступної пропускної здатності мережі.

Ефективна IP-мережа з прозорим управлінням

Transparent IP Networking означає, що будь-яка кількість стандартних комп'ютерів, IP-відеокамер або інших пристроїв може бути підключена до кожного з мобільних радіостанцій і обмінюватися даними через mesh-мережу так, ніби всі пристрої знаходяться в одному офісі з дротовою мережею Ethernet. Існують різні способи, як це можна зробити в MANET. Для забезпечення максимальної гнучкості і простоти використання, найкращим вибором є те, щоб вся мережа MANET виглядала так, ніби вона є єдиним мережевим комутатором 2-го рівня. Це означає, що без будь-якої переконфігурації IP-адрес або інших налаштувань група IP-пристроїв, які працюють разом на простому комутаторі Ethernet, може бути підключена до радіостанцій MANET і відновити роботу з повною мірою свободи бездротової мобільності.

Багатоадресний трафік

Multicast Traffic створює ряд специфічних проблем для систем MANET. Підтримка багатоадресної передачі, реалізована в базових дротових комутаторах рівня 2, полягає в реплікації багатоадресних пакетів, що надходять на один порт, на всі інші порти. Наприклад, якщо IP-відеокамера підключена до одного порту, вона надсилає своє відео за допомогою пакетів, позначених як багатоадресні. Тоді комп'ютери, підключені до будь-якого з інших портів комутатора, можуть приєднатися до бездротового відеопотоку. Цей спрощений метод не дуже добре працює в бездротовій мережі, яка працює як комутатор 2-го рівня, тому що багатьом пристроям в мережі може не знадобитися бачити певну багатоадресну передачу, а сліпе надсилання багатоадресної передачі на всі пристрої, таким чином, надмірно збільшує обмежену пропускну здатність бездротової мережі. Більш досконалі системи MANET дозволяють ручну та/

або автоматичну оптимізацію, обмежуючи передачу багатоадресної розсилки лише тим пристроям, яким потрібен певний потік багатоадресної розсилки.

Багатоканальні мережі

Multi-channel Networks - це розширена можливість деяких систем MANET, яка дозволяє мережі використовувати кілька радіочастотних каналів або навіть кілька частотних діапазонів в межах мережі, забезпечуючи при цьому функціональність «підключи і працюй» одного комутатора 2-го рівня. Простим прикладом корисності цього може бути сценарій, коли бійці мають радіостанції, що працюють на одній частоті, в той час, як транспортні засоби мають радіостанції, що працюють не тільки на цій частоті, але й в іншому діапазоні. Цей додатковий діапазон може бути з більш потужними антенами або антенами з більшим коефіцієнтом підсилення, щоб забезпечити високошвидкісний «магістральний» зв'язок між транспортними засобами. Радіопристрій будь-якого солдата може зв'язуватися з радіостанцією будь-якого іншого солдата в ефірі, але вторинний рівень на іншій частоті може зменшити перевантаження на частоті солдата і збільшити площу покриття мережі.

Всі ці мережеві можливості MANET в поєднанні забезпечують надійний високошвидкісний зв'язок, подібний до того, що пропонують сучасні мережі 3G/4G, але в критично важливих операційних сценаріях, де постійна бездротова інфраструктура недоступна.