

НОВИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ РАДІОМЕРЕЖ ІЗ САМООРГАНІЗАЦІЄЮ AD-HOC І MANET З НАДШИРОКОСМУГОВИМИ ІМПУЛЬСНИМИ СИГНАЛАМИ

Проводиться оцінка нового підходу до побудови радіомереж із самоорганізацією Ad-Hoc і MANET з використанням надширокопосмугових імпульсних радіосигналів. Зокрема, використання ортогональних імпульсних послідовностей для передачі інформації в мережі дозволяє організувати неконтрольований множинний доступ до мережі за рахунок передачі даних кожному абонентом по своєму ортогональному каналу. Також за рахунок використання надширокопосмугових імпульсних радіосигналів можна організувати побітову ретрансляцію в мережі, використовуючи тільки фізичний рівень моделі взаємодії відкритих систем, шляхом додавання маркера в кожен біт, який однозначно характеризує маршрут в мережі. В результаті, застосування надширокопосмугових імпульсних радіосигналів при побудові радіомереж із самоорганізацією Ad-Hoc і MANET дозволяє істотно скоротити затримки при багатострибковій передачі даних в мережі та підвищити швидкість передачі даних в такій мережі.

Бунин С.Г., Плотник К.А. Новый подход к построению самоорганизующихся радиосетей Ad-Hoc и MANET со сверхширокополосными импульсными сигналами. Проводится оценка нового подхода к построению самоорганизующихся радиосетей Ad-Hoc и MANET с применением сверхширокополосных импульсных радиосигналов. В частности, использование ортогональных импульсных последовательностей для передачи информации в сети позволяет организовать неконтролируемый множественный доступ к сети за счет передачи данных каждым абонентом по своему ортогональному каналу. Также за счет использования сверхширокополосных импульсных радиосигналов можно организовать побитовую ретрансляцию в сети, используя только физический уровень модели взаимодействия открытых систем, путем добавления маркера в каждый бит, который однозначно характеризует маршрут в сети. В итоге, применение сверхширокополосных импульсных радиосигналов при построении самоорганизующихся сетей Ad-Hoc и MANET позволяет существенно сократить задержки при многострипковой передаче данных в сети и увеличить скорость передачи данных в такой сети.

S.Bunin, K.Plotnyk New approach in construction Ad-Hoc and MANET radio networks with ultra wideband signals. Evaluation of a new approach to the construction of wireless networks Ad-Hoc and MANET using ultra-wideband (UWB) impulse radio signals is presented. In particular, usage of orthogonal pulse sequence for transmitting information on the network makes it possible to organize uncontrolled media access due to transfer of information by each subscriber within his orthogonal channel. Also, due to the usage of ultra-wideband impulse radio signals it is possible to organize a bit-relay network using only the physical layer of the OSI model by adding a marker in each bit that uniquely describes the route in the network. As a result, the use of UWB impulse radio signals in Ad-Hoc and MANET networks can significantly reduce the delay in multihop data transmission network and increase data rate transmission in such a network.

Ключові слова: Ad-Hoc, MANET, надширокопосмугові сигнали, побітова ретрансляція, маркер маршруту.

Вступ

Безінфраструктурні радіомережі із самоорганізацією Ad-Hoc і MANET [1 – 5] залишаються на увазі дослідників, не дивлячись на те, що вони ще не є реальним засобом організації зв'язку в радіомережах з випадковою і мінливою топологією абонентів. Моделювання таких радіомереж показує, що вони за продуктивністю і якістю обслуговування поступаються радіомережам з інфраструктурною організацією. Одна з причин цього криється в спробах використовувати в них архітектурні рішення, характерні для мереж з інфраструктурою. Сучасні програми, однак, вимагають від таких радіомереж гарантованої пропускної здатності і обмеженого часу затримок пакетів при помірному джитері.

Зазвичай ретрансляція пакетів в мережах Ad-Hoc і MANET заснована на механізмі „прийняв-запам'ятав-передав” (store-and-forward) [6], при якому кожен прийнятий пакет ставиться в чергу на обробку на каналному і мережевому рівнях, після чого знову ставиться в чергу на каналному рівні для отримання доступу до каналу зв'язку для передачі пакету на наступний проміжний вузол. Затримки, що виникають в процесі обробки пакета, а особливо затримка при очікуванні вільного каналу, значно впливають на продуктивність і пропускну здатність мережі і часто, при високій активності абонентів, є непереборною перешкодою для

виконання вимог щодо якості обслуговування. Наприклад, в роботі [7] показано, що при затримці в 20 мс на кожному проміжному вузлі при п'ятидесятивідсотковій завантаженості мережі, при передачі даних об'ємом 1,5 МБ, „критична” пропускна здатність, що обмежена затримками для маршруту в 50 проміжних вузлів, становить 24 МБ/с. Це означає, що навіть при збільшенні пропускної здатності мережі вище „критичної”, швидкість передачі даних не збільшиться через обмеження затримок.

У роботі [8] пропонується застосувати ретрансляцію пакетів „на льоту”, використовуючи лише фізичний рівень без втручання канального і мережевого рівнів. Для цього весь маршрут передачі пакету ділиться на сегменти. Ретрансляція на фізичному рівні відбувається тільки в межах сегмента. Реалізація заснована на багаточастотній системі, з можливістю налаштувати приймач і передавач на різні частоти, що не інтерферують між собою. Недоліком такого підходу є те, що ортогональні „канали” формуються на різних частотах багаточастотної системи: кожен вузол у маршруті повинен мати свою частоту для прийому і передачі, а частота передачі повинна збігатися з частотою прийому наступного вузла в маршруті. При такому підході виникає проблема присвоєння частот для кожного з абонентів-ретрансляторів і знання частотної таблиці всієї мережі при організації маршруту, не кажучи вже про необхідність мати достатній частотний ресурс для мережі.

Пропонується також резервувати канал для всіх вузлів у межах сегмента. Це скорочує затримки ретрансляції пакета в межах сегмента, пов'язані з отриманням доступу до каналу на кожному проміжному вузлі. Недоліком такого підходу є те, що вузли, які беруть участь у даному сегменті, не можуть брати участь одночасно в іншому сегменті, тобто якщо через вузол встановлений маршрут і йде сеанс передачі по цьому маршруту, інші сеанси передачі через цей вузол неможливі.

Постановка задачі

Мета дослідження – оцінити новий підхід побудови радіомереж Ad-Hoc і MANET із застосуванням надширококузових імпульсних радіосигналів.

Надширококузові імпульсні радіосигнали в мережах із самоорганізацією

Принциповою проблемою створення безінфраструктурних радіомереж із самоорганізацією є спроби їх реалізації на основі вузькокузових радіосигналів, що припускають монопольне заняття радіоканалу одним абонентом у будь-який момент часу. Це означає необхідність застосування протоколів множинного доступу до каналу зв'язку на кожному з стрибків ретрансляції. Протоколи множинного доступу дозволяють мінімізувати ймовірність накладення пакетів в часі, але не вирішують проблеми очікування в чергах передачі пакетів. Затримки передачі в чергах протоколів множинного доступу можуть набагато перевищувати затримки самої ретрансляції проміжними вузлами. Очевидно це є основною причиною відсутності реальних радіомереж Ad-Hoc та MANET до сьогоднішнього дня. Сигнали з розширеним спектром пом'якшують цю проблему, дозволяючи здійснювати одночасну передачу обмеженої множини пакетів, але знижують ефективність використання виділеного для мережі частотного ресурсу.

Рішенням проблеми множинного доступу, аж до усунення її, є застосування в зазначених радіомережах імпульсних надширококузових сигналів – IR-UWB [9], побудованих на основі взаємоортогональних імпульсних послідовностей (рис. 1). Біти інформації в них кодується послідовністю ультракоротких імпульсів, часове розташування яких формує взаємоортогональний (квазіортогональний) код по відношенню до сигналів інших абонентів. Під взаємною ортогональністю або квазіортогональністю кодових послідовностей розуміють розбіжність у часі всіх або більшості імпульсів послідовностей різних абонентів. Кожна послідовність одночасно є адресою абонента-відправника або ретранслятора. Очевидно, що для збільшення кількості ортогональних (квазіортогональних) кодів необхідно збільшувати довжину кодової послідовності та її середню скважність:

$$\bar{Q} = \frac{T_c}{n \cdot \tau_u},$$

де:

T_c – тривалість сигналу (кової послідовності), що дорівнює довжині кода помноженої на тривалість імпульсу;

n – кількість імпульсів в кодовій послідовності;

τ_u – тривалість імпульсу.

Середня скважність \bar{Q} фактично відображає максимальну кількість абонентів в мережі, що можуть одночасно передавати повідомлення в радіомережі, не заважаючи один одному, тобто використовувати неконтрольований доступ до радіомережі. Так, при довжині кода 256, тривалості імпульсу 160 нс та 8 імпульсів на одну кодову послідовність, середня скважність складатиме $\bar{Q} = 30$, і враховуючи, що кожному абоненту необхідно 2 ортогональних коди для передачі нулів і одиниць, то максимальна кількість абонентів в мережі за таких умов становитиме 15.

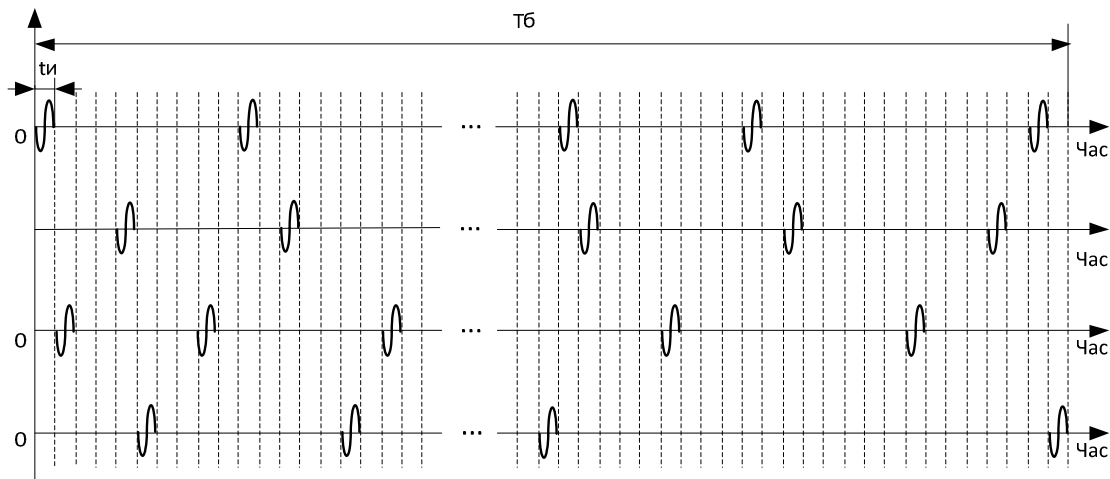


Рис. 1. Приклади квазіортогональних імпульсних кодових послідовностей
 t_u – тривалість імпульсу, T_b – тривалість біта

Також, застосування імпульсних радіосигналів дозволяє практично реалізувати ідею швидкої ретрансляції пакетів, запропонованої в роботі [8], побітовою ретрансляцією їх вмісту. За рахунок ретрансляції меншого об'єму інформації в мережі, в даному випадку біта, затримка ретрансляції на кожному проміжному вузлі багаторазово зменшується, в порівнянні з ретрансляцією пакетів. При цьому відпадає і проблема виділення та обліку ортогональних радіочастот для кожної пари вузлів, що зв'язуються.

Для того, щоб ретранслювати біти в мережі, необхідно ідентифікувати як відправника, так і одержувача кожного біта. Оскільки кодова послідовність імпульсів, що кодує один біт інформації, є ще й адресою відправника, то необхідно лише ідентифікувати одержувача цієї кодової послідовності. Для визначення одержувача біта, в кодову послідовність вставляється певний маркер (рис. 2), що однозначно характеризує маршрут в мережі. При цьому слід зауважити, що маркер не додається до основної кодової послідовності, а вставляється в неї. Наприклад, маючи кодову послідовність довжиною 256, останні 10 часових інтервалів цієї послідовності можна виділити для вставки маркера. Навіть якщо в цих останніх 10 часових інтервалах будуть присутні один чи декілька імпульсів основної кодової послідовності, і вони „затруться” маркером, то при мажоритарному способі прийому правильний прийом більшої частини імпульсів в послідовності гарантує правильний прийом всієї кодової

послідовності. Кожен проміжний вузол, який бере участь у ретрансляції даного біта, розпізнає цей маркер і визначає кому далі ретранслювати прийнятий біт.

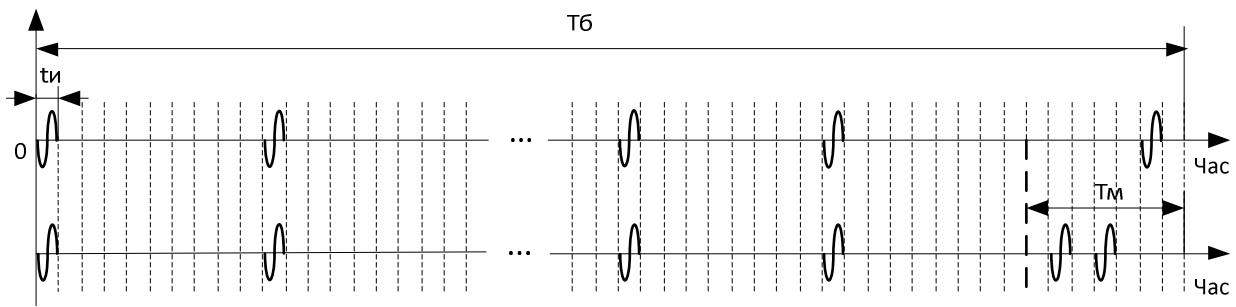


Рис. 2. Приклад вставки маркера в кодову послідовність
 t_u – тривалість імпульсу; T_b – тривалість біта; T_m – тривалість маркеру

Для організації побітової ретрансляції в мережі на основі надширокосмугових імпульсних радіосигналів, необхідно виконати наступні кроки:

- 1) Кожному вузлу в мережі необхідно виділити 2 ортогональні (квазіортогональні) коди, що використовуються для кодування одного біта інформації (0 або 1). Дані коди повинні бути ортогональними або квазіортогональними для усіх вузлів в межах мережі.
- 2) Передача завжди ведеться в коді вузла відправника, в який „вшивається” маркер.
- 3) На фізичному рівні додається список можливих маркерів, необхідний для присвоєння маршрутам.
- 4) На фізичному рівні додається таблиця задіяних маркерів (табл. 1), в якій кожному маркеру у відповідність ставиться певний код. При цьому маркер повинен бути унікальним лише в межах одного коду. Ця таблиця необхідна для аналізу маркерів, що вже використовуються і призначення нового маркеру із списку маркерів для нового маршруту.

Таблиця 1

Приклад таблиці задіяних маркерів

Marker	Code
010001	00100010001...01
100010	00100010001...01
010001	10001000010...00
100010	10001000010...00

4) На фізичному рівні додається таблиця комутації (табл. 3), по якій можна визначити, на який вихідний передавач комутувати вхідний біт, або яким вихідним передавачем генерувати повідомлення для певного отримувача.

Таблиця 2

Приклад таблиці комутації

Input	Output	Bit	Dest IP
1	2	1	IP C
2	4	0	IP C
–	1	1	IP A
4	–	0	IP B

де:

Input – означає номер вхідного пасивного узгодженого фільтра вузла

Output – означає номер вихідного передавача

Bit – означає, який біт передається за допомогою вихідного передавача

Dest IP – вказує IP адресу одержувача для даного вихідного передавача

Процес формування маршруту передачі даних та сам процес передачі даних в мережі з урахуванням бітової ретрансляції на основі маркерів представлено в роботі [10]. В якості базового протоколу маршрутизації обрано реактивний протокол AODV, який піддається модифікації для організації бітової ретрансляції на проміжних вузлах. Особливість процесу формування маршруту для передачі даних полягає в тому, що кожен проміжний вузол встановлює унікальний маркер (маркер унікальний в межах певного коду і сусідніх вузлів) для обраного маршруту і налаштовує один із своїх приймачів та передавачів на код вузла отримувача в цьому маршруті з урахуванням обраного маркеру, при цьому зв'язок між приймачем та передавачем встановлюється на етапі формування маршруту і заноситься в таблицю комутації вузла. В результаті, в процесі передачі даних по встановленому маршруту, кожен проміжний вузол, прийнявши біт інформації на певному приймачі, відразу комутує його на попередньо налаштований передавач, без накопичення всього пакету даних.

При побітовій ретрансляції, аналіз прийнятої імпульсної послідовності відбувається тільки на фізичному рівні, так як можна визначити вузол відправник і маркер, що відповідає певному маршруту в мережі, тому маємо „сквозну” ретрансляцію, не піднімаючись вище фізичного рівня. Це також скорочує затримки на кожному проміжному вузлі, пов'язані з часовими витратами на обробку пакета на каналному та мережевому рівнях.

Фізично процес розпізнання міток маршрутизації при некогерентному прийомі на пасивні узгоджені фільтри реалізується наступним чином. Лінія затримки узгодженого фільтра або її еквівалент в аналоговій або цифровій формі містить відрізок з двома наборами відводів: один узгоджений із адресною частиною бітової серії імпульсу, інший дешифрує маркер маршрутизації (рис. 3).

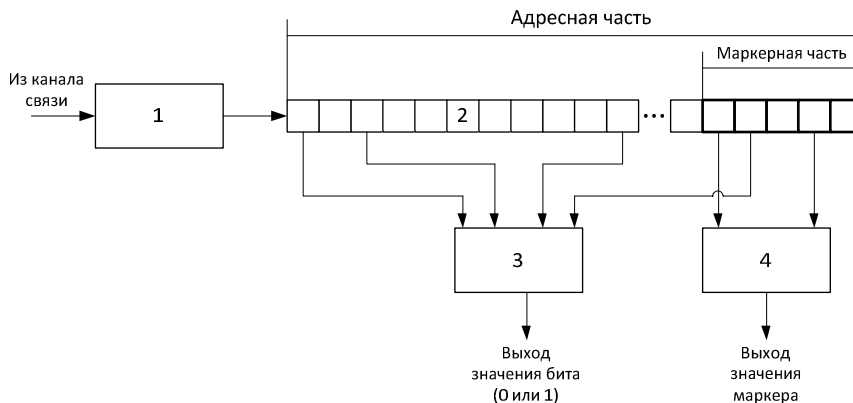


Рис.3. Схема дешифрування інформаційних бітів і маркера маршрутизації: 1 – приймач імпульсних сигналів; 2 – лінія затримки; 3 – суматор; 4 – дешифратор маршрутного маркера

Оцінка ефективності використання побітової ретрансляції та неконтрольованого множинного доступу в мережах із самоорганізацією

Оцінимо ефективність побітової ретрансляції на фізичному рівні із застосуванням неконтрольованого множинного доступу до радіоканалу в порівнянні із пакетною ретрансляцією з використанням протоколу множинного доступу CSMA-CA (стандарт 802.11) за таких умов: передається пакет довжиною 1500 Кб, швидкість передачі в каналі зв'язку 10 Мбіт/с, довжина кодової послідовності 240 позицій і тривалість радіоімпульсу 160 пс, відстань між проміжними вузлами приймемо 1 км.

Проведемо розрахунок часу передачі пакета від джерела до отримувача при пакетній ретрансляції із застосуванням протоколу множинного доступу CSMA-CA для маршруту із 10 проміжних вузлів.

Час передачі пакету від джерела до отримувача через H стрибків можна записати в наступному вигляді:

$$t = T_{ПВ} \cdot H + T_{ПВ_{H-1}-отрим} \quad (1)$$

де:

$T_{ПВ}$ – час передачі пакету на проміжний вузол, с;

$T_{ПВ_{H-1}-отрим}$ – час передачі пакету між останнім проміжним вузлом и отримувачем, с;

H – кількість проміжних вузлів.

Час передачі пакету на проміжний вузол можна представити у вигляді суми декількох доданків:

$$T_{ПВ} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4, \quad (2)$$

де:

t_1 – час розповсюдження сигналу між вузлами;

t_2 – час прийому пакету із каналу у вхідний буфер вузла, тобто час буферизації пакету;

t_3 – час обробки і комутації пакету;

t_4 – середній час отримання доступу до радіоканалу.

Час розповсюдження сигналу рахується як частка від ділення відстані між вузлами на швидкість світла: $t_1 = \frac{1000 м}{3 \cdot 10^8 м/с} = 0,003 мс$

Час буферизації пакету рахується як час прийому кожного біту пакета з бітовою швидкістю в каналі: $t_2 = \frac{1500 \cdot 8 біт}{10 \cdot 10^6 біт/с} = 1,2 мс$

Час обробки пакету і його комутація у вихідний порт фіксовано для конкретної моделі і зазвичай, має значення від декількох мікросекунд до декількох мілісекунд. Наприклад, для маршрутизатора Freeway компанії National час обробки пакету в піковому режимі складає 0,05 - 0,07 мс. Виберемо $t_3 = 0,06 мс$.

Середній час отримання доступу до радіоканалу для протоколу CSMA-CA залежить від інтенсивності трафіку, швидкості передачі в каналі зв'язку і від кількості вузлів в мережі. Для мережі із швидкістю передачі даних 10Мб/с і 10 вузлами згідно [11] $t_4 = 50 мс$.

Розрахуємо час передачі пакета на проміжний вузол:

$$T_{ПВ} = 0,003 мс + 1,2 мс + 0,06 мс + 50 мс = 51,263 мс$$

Час передачі пакету між останнім проміжним вузлом і отримувачем $T_{ПВ_{H-1}-отрим}$ відрізняється від часу передачі на проміжний вузол відсутністю складових t_3 і t_4 у виразі (2) (в кінцевому вузлі відсутня операція комутації і отримання доступу до радіоканалу). Маючи маршрут з 10-ма проміжними вузлами, сумарний час передачі пакету від джерела до отримувача складатиме:

$$t = 51,263 \cdot 10 + 1,203 = 513,833 мс$$

Проведемо розрахунок часу передачі того ж пакету, але за допомогою бітової ретрансляції при неконтрольованому множинному доступі на каналному рівні. Для початку розрахуємо час передачі одного біта інформації, для цього використаємо вираз (1).

Час розповсюдження сигналу буде таким же, як і в попередньому розрахунку $t_1 = 0,003 мс$.

Час буферизації пакету зміниться на час буферизації біта і складатиме $t_2 = 0,0001 мс$.

Час обробки і комутації пакета зміниться на час обробки одного біта. Оскільки зв'язок між „входом” та „виходом” в проміжному вузлі попередньо встановлено (на етапі пошуку та встановлення маршруту [10]), то потрібна лише одна логічна операція для того, щоб запустити вихідний передавач. Так, процесор маршрутизатора Freeway, вибраного для

попередніх розрахунків, має тактову частоту 25МГц, це значить, що одну логічну операцію він виконує за 1/25МГц, що дорівнює $t_3 = 0,00004мс$.

Час отримання доступу до радіоканалу $t_4=0$, так як ми використовуємо неконтрольований множинний доступ за рахунок використання надширокосмужових імпульсних сигналів.

Тоді час передачі біта на проміжний вузол складатиме:

$$T_{ПВ} = 0,003мс + 0,0001мс + 0,00004мс = 0,00314мс$$

Час передачі біта між останнім проміжним вузлом і отримувачем $T_{ПВ_{Н-1-отрим}}$ відрізняється відсутністю складових t_3 і t_4 у виразі (2). Тоді, маючи маршрут с 10-ма проміжними вузлами, сумарний час передачі біта від джерела до отримувача складатиме:

$$t_{\sigma} = 0,00314 \cdot 10 + 0,0031 = 0,345мс \quad (3)$$

При бітовій ретрансляції, процес буферизації бітів на кожному вузлі виконується послідовно, тобто один за одним. Процес буферизації наступного біта і процес обробки попереднього біта виконуються паралельно. І процес передачі бітів також виконується послідовно. Якщо час обробки одного біта менший ніж час буферизації біта (в нашому випадку $t_3 < t_2$), то на виході передавача на кожному проміжному вузлі біти відносно друга друга не зміщуються, а мають таку ж послідовність і відносне часове розташування як і початкова послідовність бітів на вузлі відправнику (рис. 4).

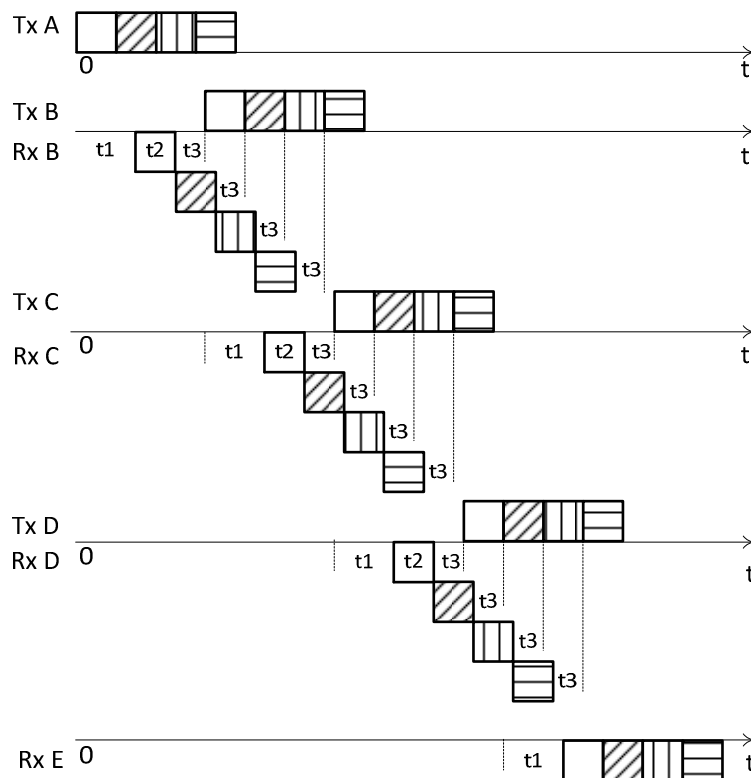


Рис. 4. Приклад передачі 4 біт інформації від джерела до отримувача через 3 проміжних вузла з використанням бітової ретрансляції і неконтрольованого множинного доступу

Тоді сумарний час передачі пакету між джерелом та отримувачем буде складатися із часу передачі одного біта по цьому маршруту, а також із часу буферизації всього пакету на вузлі отримувачі:

$$t_{\text{обц}} = t_{\sigma} + t_n \quad (4)$$

Підставивши у вираз (4) час передачі біта по маршруту із виразу (3), а також час буферизації пакету, отриманого при розрахунках часу передачі для пакетної ретрансляції, отримаємо час передачі пакету при побітовій ретрансляції для заданих початкових умов

$$t_{\text{обц}} = 0,345 + 1,2 = 1,545 \text{ мс} .$$

Отже час передачі пакета по маршруту із 10 проміжних вузлів для побітової ретрансляції з неконтрольованим множинним доступом в 330 разів менший, ніж для пакетної ретрансляції з множинним доступом по протоколу CSMA-CA при початкових умовах, заданих вище.

Висновки

Застосування надширокопосмугових імпульсних сигналів в радіомережах із самоорганізацією дозволяє забезпечити їх функціонування з показниками, що не досяжні при використанні „традиційних” неперервних сигналів. Зокрема, застосування ортогональних імпульсних послідовностей різними абонентами мережі дозволяє в принципі здійснювати неконтрольовану передачу інформації кожним з них з малою ймовірністю взаємних спотворень інформації за допомогою неконтрольованого множинного доступу до радіоканалу. Також за допомогою надширокопосмугових імпульсних сигналів в радіомережах із самоорганізацією можливо організувати побітову ретрансляцію з використанням тільки фізичного рівня, що суттєво зменшує затримки передачі інформації від джерела до одержувача при багатострибковій передачі даних.

В подальшому планується дослідити паралельну передачу даних в радіомережах із самоорганізацією з використанням надширокопосмугових імпульсних радіосигналів.

ЛІТЕРАТУРА

1. P. N. J. Nardelli, M. Kaynia, P. Cardieri, and M. Latva-aho, "Optimal Transmission Capacity of Ad Hoc Networks with Packet Retransmissions," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, pp. 2760-2766, Aug. 2012.
2. V. Firoiu, G. Lauer, B. DeCleene, S. Nanda, "CONCERTO: Experiences with a Real-World MANET System Based on Network Coding," in *Network Coding*, Elsevier, 2012.
3. L. Landmark, K. Ovsthus, O. Kure, "Routing Trade-offs in Sparse and Mobile Heterogeneous Multi-Radio Ad Hoc Networks", in *proceedings MILCOM, San Jose, CA, USA*, pp. 2229-2236, Nov. 2010.
4. S. Moore, B. Hung, „MANET IP Header Compression,” in *IEEE Military Communications Conference, MILCOM, 2013*.
5. S. Tang, „Modeling and Evaluation of Traffic Flow and Availability for Mobile Ad Hoc Networks," *Proc. WCNC 2006, paper NET16-4*.
6. D. Russel, „The principles of computer networking,” *Cambridge University Press, 1989*. – 514 p.
7. L. Kleinrock, „The Latency/Bandwidth Tradeoff in Gigabit Networks,” *IEEE Communications Magazine*, April 1992, pp. 36 – 40.
8. R. Ramanathan, „Challenges: A Radically New Architecture for Next Generation Mobile Ad Hoc Networks”, *Proc. ACM MOBICOM 2005, Cologne, Germany, August 2005*, pp. 132 – 139.
9. Ильченко М.Е., Бунин С.Г., Войтер А.П., Романюк В.А. Самоорганизующиеся сети со сверхширокополосными сигналами.// Глава 7. Декабрь 2011.
10. Bunin S., Plotnyk K. and Voitenko Iu. Retransmission Method of Impulse Ultrawideband Signals in Ad-Hoc Networks // *Наукові вісті НТУУ „КПІ”*. – 2012. – № 5. – С. 7 – 11.
- J.S. Vardakas, I. Papapanagiotou, M.D. Logothetis and S.A. Kotsopoulos, „On the End-to-End Delay Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function,,, *ICIMP 2007, San Jose, California*, pp. 16 – 21.