

УДК 004.7

О.М. ТРОФИМЧУК, В.М. ВАСИЛЕНКО, С.В. ЗАЙЦЕВ

АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО ЗАПИТУ НА ПОВТОРНУ ПЕРЕДАЧУ

***Анотація.** У роботі розглядаються основні типи систем автоматичного запиту на повторну передачу та систем гібридного автоматичного запиту на повторну передачу, їх структура, особливості, параметри. Проведено порівняльний аналіз наведених систем для визначення основних переваг та недоліків. Показано залежність гнучкості та накладних витрат для різних систем гібридного автоматичного запиту на повторну передачу.*

***Ключові слова:** система, автоматичний запит, передача.*

Вступ

Надійність передачі даних є однією з основних проблем в області безпроводового зв'язку. Тому для підвищення надійності були впроваджені системи автоматичного запиту на повторну передачу (Automatic Repeat reQuest – ARQ). Існує декілька типів систем ARQ: ARQ вибіркового повтору, Go-Back-N ARQ, Stop-and-wait ARQ. Однак, застосування методів ARQ знижує пропускну здатність систем передачі даних. Тому для вирішення проблеми зниження пропускну здатності були створені системи гібридного автоматичного запиту на повторну передачу (HARQ – Hybrid ARQ). Системи HARQ включені в безпроводові стандарти, такі як LTE, LTE-Advanced та WiMAX [1–8].

1. Аналіз основних систем ARQ

Звичайним способом керування помилками передачі є використання методів прямої корекції помилок (FEC – Forward Error Correction). FEC використовують корегуючі коди. Коли приймач виявляє наявність помилок, він намагається виявити місцезнаходження помилок і виправити їх. Навіть якщо приймач не зможе виправити помилки, помилкові дані будуть доставлені на верхній рівень. Як альтернатива, коли доступний канал зворотного зв'язку від приймача до передавача, схеми ARQ можуть бути використані для подолання помилок передачі. У системі ARQ використовується код з хорошою здатністю виявлення помилок. Пакети даних додаються з бітами виявлення помилок і надсилаються на приймач. Після отримання пакета даних приймач перевіряє наявність помилок у отриманих даних. Якщо є помилки, приймач надсилає сигнал NACK у каналі зворотного зв'язку, що вимагає повторної передачі, і цей процес продовжується до тих пір, поки дані не будуть успішно отримані. Якщо пакет приймається без будь-яких помилок, приймач надсилає сигнал ACK до передавача. Циклічні надлишкові коди (CRC) – це найбільш часто використовувані коди для виявлення помилок [9, 10]. Існують три основні

типи схем ARQ – stop-and-wait ARQ, go-back-N ARQ та ARQ вибіркового повтору.

Stop-and-wait ARQ. Приклад Stop-and-wait ARQ показано на рис. 1. Після того як пакет закодований за допомогою коду виявлення помилок і відправлений на приймач, передавач чекає зворотного зв'язку з приймачем. Якщо передавач отримує повідомлення ACK, він надсилає наступний пакет. Якщо передавач отримує повідомлення NACK на каналі зворотного зв'язку, він повторно передає помилковий пакет. Ця схема зупинки та очікування ARQ є неефективною, коли існує велика затримка (затримка зворотного зв'язку) між часом передачі кожного пакета та повідомлення про час відгуку ACK або NACK. Перевага цього протоколу полягає в тому, що його легко реалізувати і що передавач або приймач повинні зберігати лише один пакет у будь-який момент часу [9].

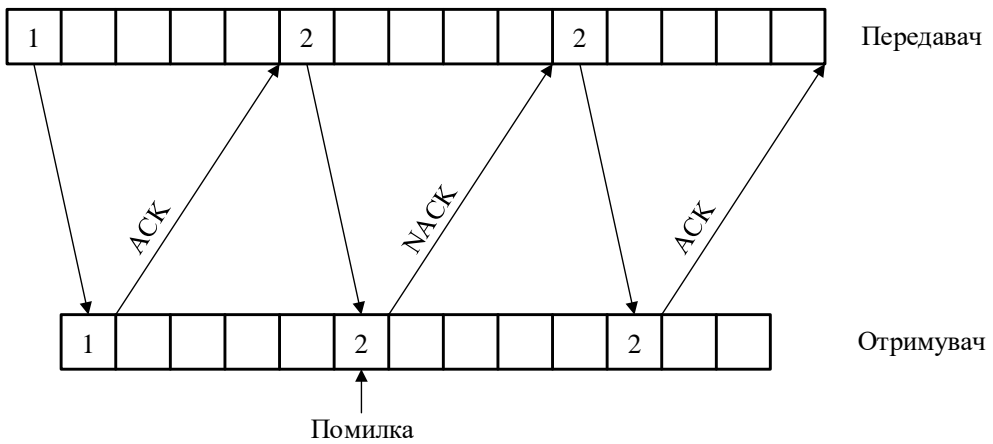


Рисунок 1 – Процес передачі пакетів для Stop-and-wait ARQ

Go-back-N ARQ. Робота системи Go-back-N ARQ показана на рис. 2.

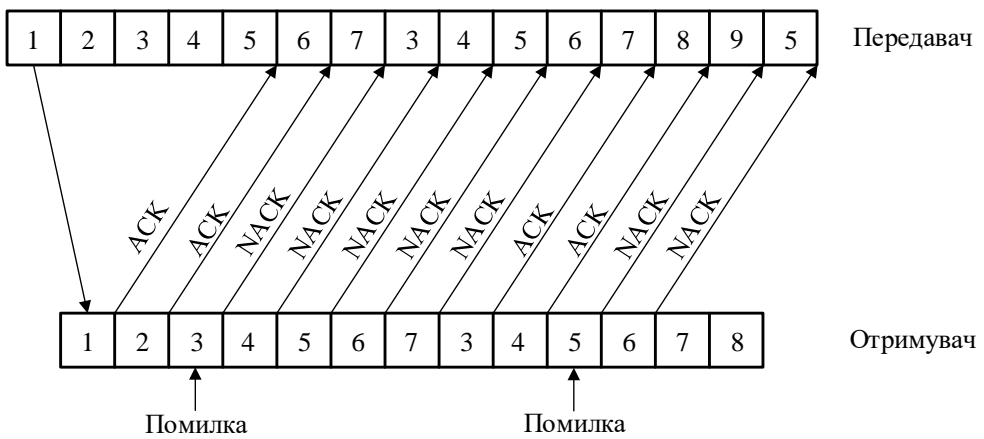


Рисунок 2 – Процес передачі пакетів для Go-back-N ARQ

У цьому протоколі ARQ передатчик не чекає повідомлення ACK для передачі наступного пакета, пакети передаються безперервно. Повідомлення ACK / NACK для переданого пакета буде прийнято після затримки в обидва кінці. Протягом цього часу передавач посилає інші $N-1$ пакети. Коли приймається повідомлення NACK, передавач виконує резервне копіювання помилкового пакета і відправляє його разом з $N-1$ пакетами, які були відправлені під час затримки в обидва кінці. Передавач повинен мати буфери для зберігання N пакетів в будь-який даний момент часу. Беручи до уваги, що на стороні одержувача пакети $N-1$, наступні за помилково прийнятим пакетом, відкидаються незалежно від того, чи є вони помилками, чи ні. Через безперервну передачу пакетів цей протокол більш ефективний, ніж протокол зупинки і очікування. Протокол go-back-N також стає неефективним, якщо затримка із зворотним проходом велика і швидкість передачі даних висока. Неефективність цього протоколу полягає в тому, що багато пакетів без помилок будуть відкинуті в приймальнику після виявлення пакета з помилкою [10].

ARQ вибіркового повтору. Робота системи ARQ вибіркового повтору показана на рис. 3. У цьому протоколі пакети безперервно відправляються з передавача. Передавач продовжує відправляти нові пакети, поки приймаються повідомлення ACK. Коли приймається повідомлення NACK, передавач передає тільки помилковий пакет. Оскільки пакети повинні бути доставлені в правильному порядку, в приймачі повинен бути наданий буфер для зберігання пакетів, які приймаються без помилок після пакета, який був з помилкою. Коли перший помилковий пакет успішно прийнято, приймач звільняє пакети без помилок в послідовному порядку до тих пір, поки не зустрінеться наступний помилково прийнятий пакет.

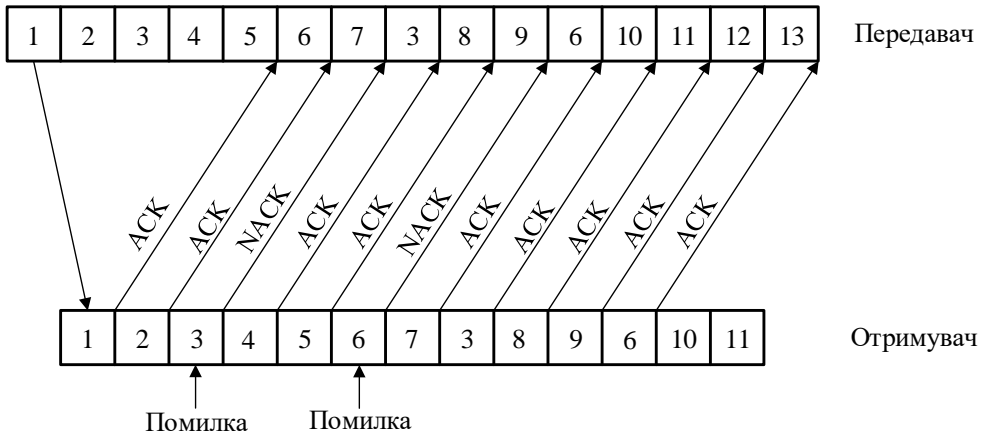


Рисунок 3 – Процес передачі пакетів для ARQ вибіркового повтору

ARQ вибіркового повтору є найбільш ефективним з трьох протоколів ARQ [10]. Основним недоліком схеми ARQ з вибірковим повтором є підвищена складність, оскільки передавач і приймач повинні мати буфери. Оскільки ймовірність помилки декодування набагато вище ймовірності невиявленої помилки, системи, що використовують тільки схеми FEC, не можуть гарантувати високу надійність. Для отримання високої надійності з

використанням FEC необхідно використовувати довгі потужні коди і виправляти велику кількість помилок. Однак використання довгих кодів робить декодування складним для реалізації і дорогим обчисленням. У порівнянні із системами, що використовують тільки FEC, системи ARQ прості і забезпечують більшу надійність. Схеми ARQ мають недолік в тому сенсі, що їх пропускна здатність значно погіршується в умовах сильного загасання. Недоліки в схемах ARQ і FEC можуть бути подолані, якщо дві схеми керування помилками належним чином об'єднані. Така комбінація називається HARQ [10].

2. Аналіз основних систем HARQ

На рис. 4 представлена класифікація типів передачі систем HARQ на основі часу та адаптації [11].

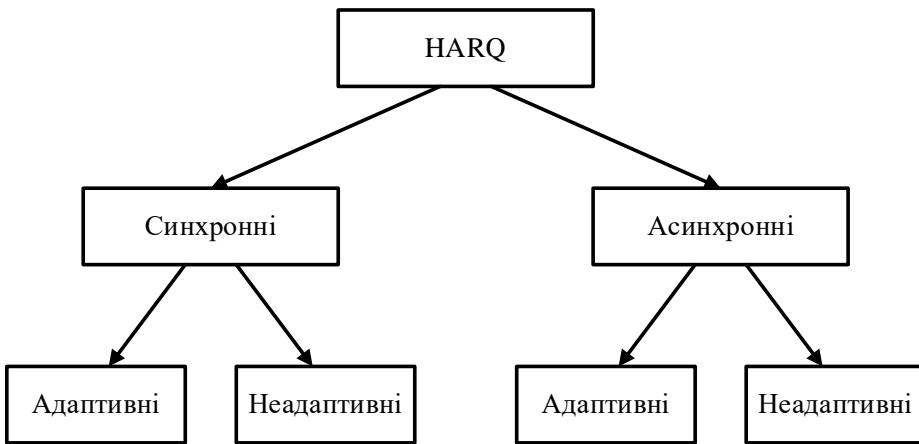


Рисунок 4 – Класифікація типів передачі систем HARQ

У синхронних неадаптивних системах HARQ повторні передачі відбуваються з фіксованими інтервалами часу. На рис. 5 представлений процес передачі даних в синхронних неадаптивних системах HARQ з кількістю блоків передачі в кадрі $N = 8$.

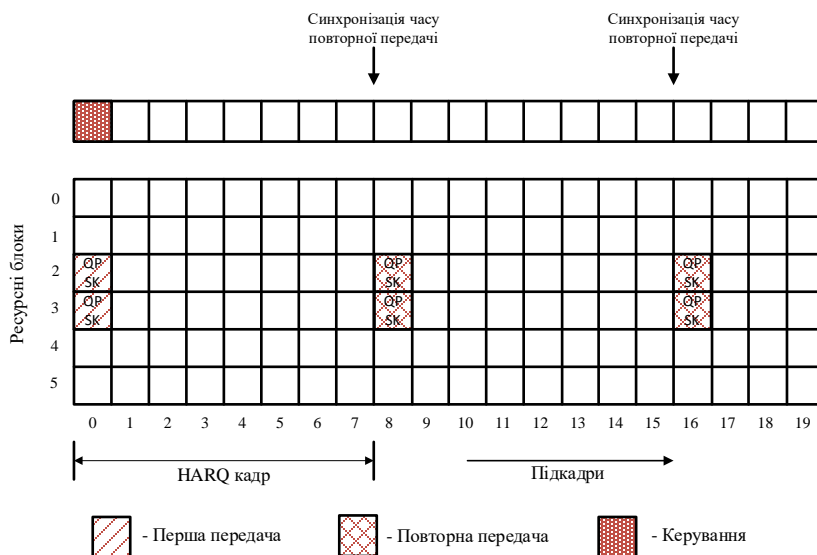


Рисунок 5 – Процес передачі даних у синхронних неадаптивних системах HARQ

Однією з переваг синхронного неадаптивного HARQ є те, що керуюча інформація повинна передаватися лише разом з першим блоком, оскільки час повторних передач визначено. Однак основним недоліком синхронного неадаптивного HARQ є те, що повторно передані блоки не можуть бути заплановані на частотно-часових ресурсах, які мають хороші умови каналу під час повторних передач [11].

На рис. 6 представлений процес передачі даних в синхронних адаптивних системах HARQ з кількістю блоків передачі в кадрі $N = 8$.

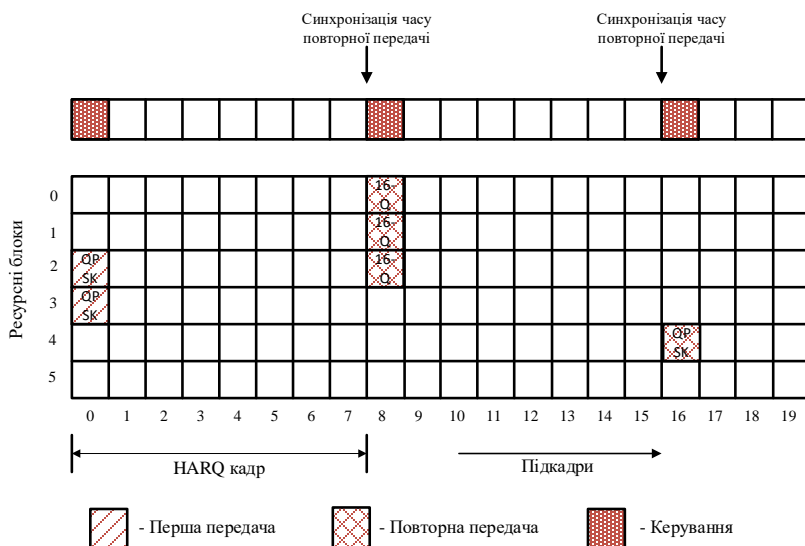


Рисунок 6 – Процес передачі даних у синхронних адаптивних системах HARQ

Синхронний адаптивний HARQ дозволяє змінювати розподіл ресурсів, схему модуляції та кодування для повторних передач. Подібно до синхронної неадаптивної HARQ, час повторної передачі фіксовано. Оскільки розподіл ресурсів, схема модуляції та кодування може змінюватися для повторних передач, керуюча інформація відправляється з повторною передачею.

На рис. 7 представлений процес передачі даних в асинхронних неадаптивних системах HARQ з кількістю блоків передачі в кадрі $N = 8$. Асинхронний неадаптивний HARQ дозволяє запланувати повторні передачі в часі. У такому HARQ розподіл ресурсів, схема модуляції та кодування для повторних передач зберігаються так само, як і на вхідній передачі. Тільки керуюча інформація, що несе ідентифікатор користувальницького обладнання, HARQ процесу і версії надлишковості, передається з кожною повторною передачею [11].

Основним недоліком цієї схеми є обмежена гнучкість. Резервування ресурсів передачі, схема модуляції та кодування для повторних передач не можуть бути адаптовані.

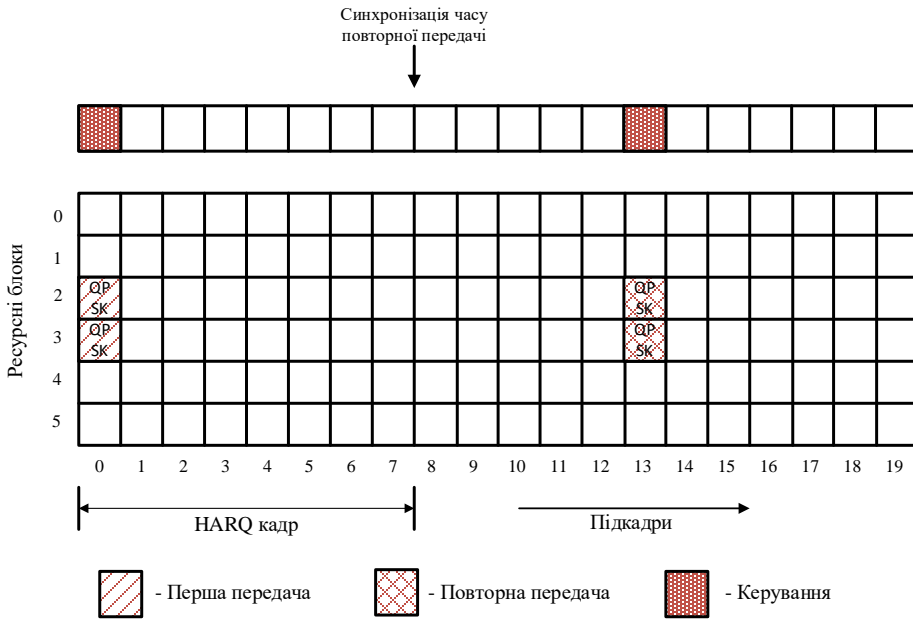


Рисунок 7 – Процес передачі даних в асинхронних неадаптивних системах HARQ

Асинхронна адаптивна система HARQ забезпечує повну гнучкість при повторних передачах. Повторні передачі виконуються так само, як і початкові передачі, як показано на рис. 8 [11]. Як адаптація, так і синхронізація коригуються відповідно до якості каналу. Отже, час повторної передачі, розподіл ресурсів, схеми модуляції та кодування адаптуються відповідно до умов каналу і ресурсів під час повторної передачі. Одним з основних недоліків є те, що повну інформацію керування потрібно відправляти з повторними передачами. Навіть якщо час, розподіл ресурсів, модуляція та кодування не змінюються щодо початкової передачі, то все одно необхідно передати інформацію керування в асинхронному адаптивному HARQ.

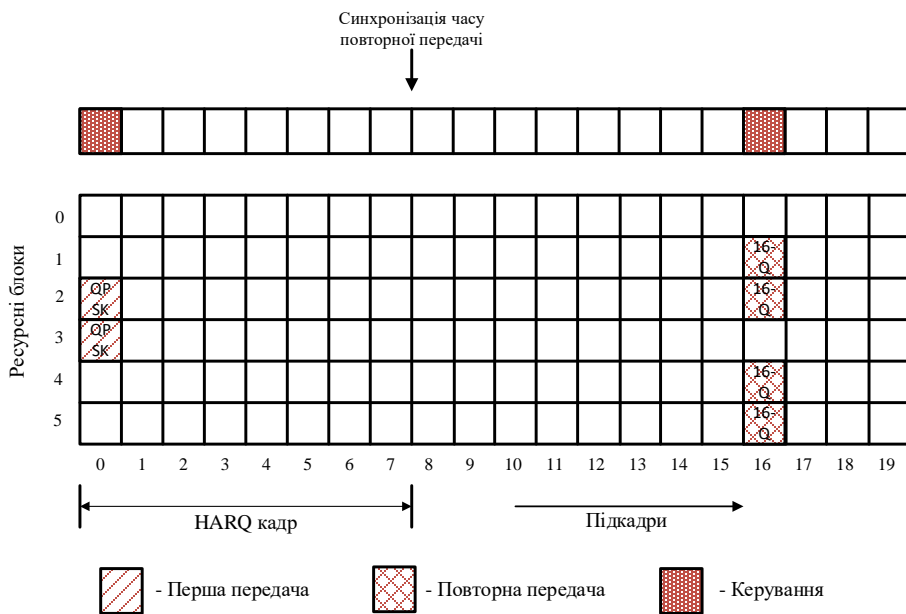


Рисунок 8 – Процес передачі даних в асинхронних адаптивних системах HARQ

На рис. 9 показаний графік залежності гнучкості і накладних витрат для різних гібридних схем ARQ [11]. Синхронна неадаптивна система HARQ має найменші витрати, а також забезпечує мінімальну гнучкість. З іншого боку, асинхронна адаптивна схема забезпечує максимальну гнучкість за рахунок великих накладних витрат. Синхронна адаптивна система і асинхронна неадаптивна система забезпечують деяку гнучкість для запобігання конфліктам ресурсів з проміжними накладними витратами. Очікується, що накладні витрати для синхронної адаптивної системи будуть більше, ніж асинхронної адаптивної системи, оскільки розподіл ресурсів зазвичай найбільше впливає на загальні накладні витрати.

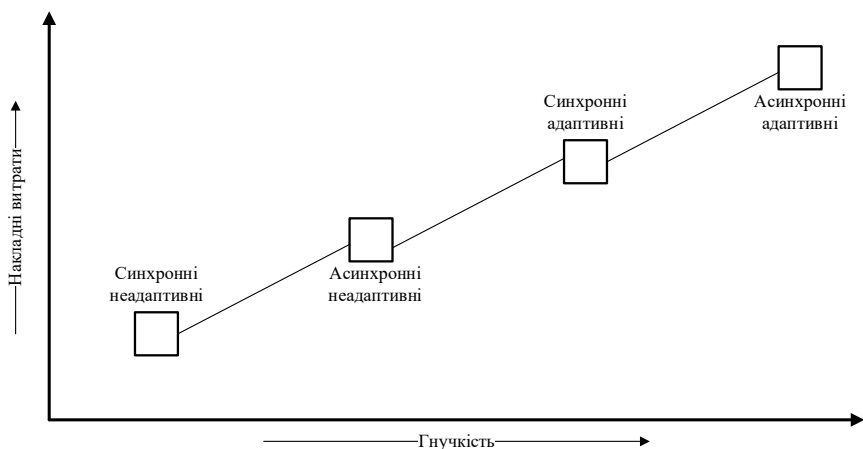


Рисунок 9 – Накладні витрати та гнучкість HARQ

Також системи HARQ класифікуються як системи HARQ типу-1 та HARQ типу-2.

Тип-I HARQ. У цих системах може одночасно використовуватися корекція помилок і виявлення помилок. Якщо число помилок в прийнятому пакеті знаходиться в межах корегуючої здатності коду, помилки будуть виправлені. Якщо приймач не в змозі виправити помилки, відбувається запит на повторну передачу. Коли повторно переданий пакет отриманий, приймач знову намагається виправити помилки (якщо вони є). Якщо помилки не виправилися, то знову відбувається запит на повторну передачу. Цей процес триває до тих пір, поки пакет не буде прийнятий правильно. Оскільки код повинен мати можливість одночасно виявляти і виправляти помилки, потрібно більше бітів контролю парності. Це збільшує додаткові витрати, які пов'язані з передачею. Через це системи типу HARQ-I можуть мати більш низьку пропускну здатність, ніж схеми ARQ, якщо умови каналу хороші. Однак, якщо канальні умови не є хорошими і коригувальна здатність FEC коду хороша, система типу HARQ-I може досягти більш високої пропускну здатності, ніж система ARQ [10].

Тип-II HARQ. Тип-II HARQ використовує повторну передачу послідовності, яка містить в основному біти парності, а не повторного надсилання вихідної послідовності. Ці схеми іноді називають схеми HARQ з м'яким комбінуванням.

Вони підрозділяються на два типи: системи з відслідковуючим комбінуванням (Chase Combining (CC) Schemes) та системи з інкрементальною надлишковістю (Incremental Redundancy (IR) Schemes) [12–13].

Системи з відслідковуючим комбінуванням (Chase Combining (CC) Schemes). Це схеми типу HARQ-II, в якому всі повторні передачі містять ту ж саму інформацію, тобто пакет кодується з використанням того ж коду каналу під час кожної передачі і сигнал, що передається, містить ті ж кодовані біти [9, 14–15]. Приймач використовує максимальне співвідношення об'єднання (MRC) для декодування пакета даних. Об'єднання зазвичай виконується після демодуляції, але перед декодуванням.

Системна модель схеми CC-HARQ показана на рис. 10. Набір інформаційних бітів N_I кодується для отримання N_C кодованих бітів. Потім ці біти перемежуються і N модульованих символів відправляється адресату в N каналах. Якщо приймач не в змозі декодувати пакет, то ті ж N символів модуляції s_1, \dots, s_N передаються протягом фази повторної передачі. Якщо максимальна кількість повторної передачі для кожного пакета даних обмежена L , то максимальна кількість каналів, що використовуються для передачі кожного пакета – $L \cdot N$.

У літературі пропонується кілька варіантів схем з відслідковуючим комбінуванням. Наприклад, замість передачі цілого кодового слова під час повторних передач може бути передана лише частина кодового слова, і такі схеми називаються частковими схемами з відслідковуючим комбінуванням, що поєднують схеми HARQ.

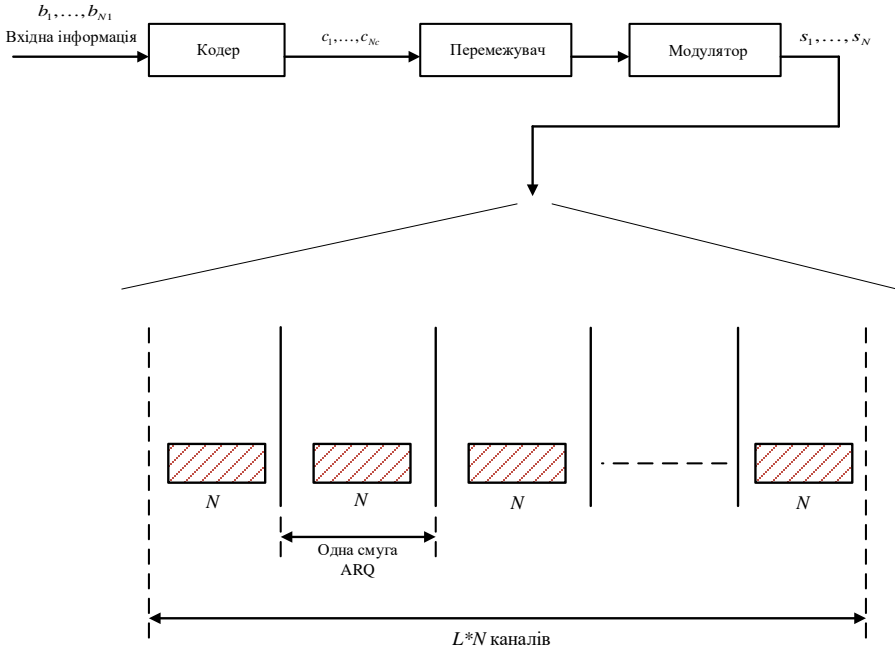


Рисунок 10 – Модель HARQ з відслідкуючим комбінуванням

Системи з інкрементальною надлишковістю (Incremental Redundancy (IR) Schemes). У цих схемах типу HARQ-II, всі наступні повторні передачі додають «нову» інформацію. Зазвичай під час повторних передач додаються додаткові біти парності, які передаються адресату [9, 16–17]. Приймач об'єднує інформацію з поточної повторної передачі з інформацією з попередніх спроб передачі одного і того ж пакета. Оскільки кожна передача містить інформацію, яка не була передана раніше, то швидкість передачі коду в приймачі знижується на кожній повторній передачі.

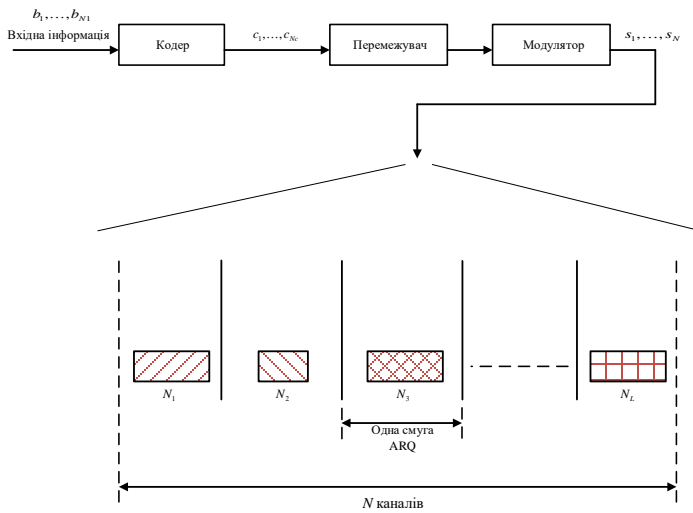


Рисунок 11 – Модель HARQ з інкрементальною надлишковістю

Системна модель HARQ з інкрементальною надлишковістю показана на рис. 11. Ця модель подібна до тієї, що показана для схеми HARQ з відслідковуючим комбінуванням на рис. 10, за винятком того, що під час повторних передач символи модуляції, що відповідають новим бітам парності, надсилаються в пункт призначення.

Висновки

1. У роботі розглядаються основні типи систем автоматичного запиту на повторну передачу та систем гібридного автоматичного запиту на повторну передачу, їх структура, особливості, параметри.

2. ARQ вибіркового повтору є найбільш ефективним з трьох протоколів ARQ. Але основним недоліком є підвищена складність за рахунок застосування додаткових буферів для збереження пакетів, які були прийняті без помилок.

3. Синхронна неадаптивна система HARQ має найменші витрати, а також забезпечує мінімальну гнучкість. А асинхронна адаптивна схема забезпечує максимальну гнучкість за рахунок великих накладних витрат.

4. Недоліком HARQ є те, що при запиті на повторну передачу передається заново весь блок, тим самим зменшуючи швидкість передачі інформації і збільшуючи час передачі інформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Abudakar B. Automatic Repeat Request (Arq) Protocols / B. Abudakar // The International Journal of Engineering Science. – 2017. – Vol. 6, Issue 5. – P. 64–66. DOI: 10.9790/1813-0605016466.
2. Mallanagouda P. Dynamic and Channel Adaptive Error Control Scheme in Wireless Sensor Networks / P. Mallanagouda, B. Rajashekhar // Global Journal of Computer Science and Technology: Network, Web & Security (USA). – 2017. – Vol. 17, Issue 2. – P. 43–54.
3. Cheolsu H. EMI Reduction algorithm using enhanced-HARQ Implementation for Controller Area Network / H. Cheolsu H, K. Seok // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, Num. 21. P. 11124–11129.
4. Santosh C. Review on Cross Layer Hybrid Scheme in WMSNS Using Error Correcting Codes for Energy Efficiency / C. Santosh, J. Swarna // International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education. – 2017. – Vol. 2, Issue 5. – P. 315–322.
5. Yong J. Adaptive Cooperative FEC Based on Combination of Network Coding and Channel Coding for Wireless Sensor Networks / J. Yong, R. Peng // Journal of Networks. – 2014. – Vol. 9, No 2. – P. 481–487.
6. Simmi G. An introduction to various error detection and correction schemes used in communication / G. Simmi, K. Anuj, A. Tyagi // International Journal of Applied Research. – 2016. – 2 (8). – P. 216–218.
7. Farouq M. Maximizing Throughput of SW ARQ with Network Coding through Forward Error Correction / M. Farouq, O. Yahya, K. Ismail, B. Adel // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2015. – Vol. 6, No. 6. – P. 291–297.
8. Sesia S. LTE – The UMTS Long Term Evoluton. From Theory to Practice / Sesia S., Toufik I., Baker M. – West Sussex : John Wiley & Sons, 2009. – 626 p.
9. Chaitanya V. K. T. HARQ Systems: Resource Allocation, Feedback Error Protection, and Bits-to-Symbol Mappings / V. K. T. Cgaitanya // Linköping Studies in Science and Technology, Dissertations, No. 1526.
10. S. Lin and D. J. Costello, Error Control Coding, 2nd ed., Prentice-Hall, 2004.

11. Khan F. LTE for 4G Mobile Broadband / F. Khan // Cambridge University Press, 2009 – P. 315–320.
12. Mandelbaum D. An Adaptive-Feedback Coding Scheme Using Incremental Redundancy / D. Mandelbaum // IEEE Transactions on Information Theory. – 1974. – Vol. 20, N 3. – P. 388–389.
13. Lin S. Automatic-Repeat-Request Error Control Schemes / S. Lin, D. Costello, M. Miller // IEEE Communications Magazine. – 1984. – Vol. 22. – P. 5–17.
14. G. Benelli, “An ARQ scheme with memory and soft error detectors,” IEEE Trans. Commun., vol. 33, no. 3, pp. 285–288, Mar. 1985.
15. D. Chase, “Code combining – a maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets,” IEEE Trans. Commun., vol. 33, no. 5, pp. 385–393, May 1985.
16. D. M. Mandelbaum, “Adaptive-feedback coding scheme using incremental redundancy” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 20, no. 3, pp. 388–389, May 1974.
17. J. J. Metzner, “Improvements in block retransmission schemes,” IEEE Trans. Commun., vol. 27, no. 2, pp. 524–532, Feb. 1979.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2018.