

ПЯТИН І.С.

Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка»  
ORCID ID: 0000-0003-1898-6755, e-mail: ilkhmel@ukr.net

МАКАРИШКІН Д.А.

Хмельницький національний університет  
ORCID ID: 0000-0003-3447-811X, e-mail: makaryshkin@ukr.net

МІШАН В.В.

Хмельницький національний університет  
ORCID ID: 0000-0002-8505-2648, e-mail: v\_mishan@ukr.net

ШПИРУК М.С.

Хмельницький національний університет  
ORCID ID: 0000-0002-2983-3781, e-mail: shpiruk1809@gmail.com

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕДУРИ ПОЧАТКОВОГО ДОСТУПУ ДО МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

Вимоги до синхронізації системи зв'язку 5G враховують роботу з високою швидкістю передачі даних, меншою затримкою та підвищеним ущільненням. Пошук комірки – це процедура, за допомогою якої обладнання користувача (UE) отримує синхронізацію часу та частоти з базовою станцією та декодує ідентифікатор комірки мобільного пристрою. У роботі проведено дослідження процедури пошуку комірки, моделі відновлення синхронізації символів і фреймів у системі QPSK, порушену через змінну помилку синхронізації. Проведено дослідження формування радіомовного каналу на фізичному рівні.

Ключові слова: пошук комірки, первинний сигнал синхронізації, вторинний сигнал синхронізації, радіомовний канал, канал довільного доступу.

PYATIN I.S.

Khmelnitskyi Politechnic Professional College of Lviv Politechnic National University

MAKARYSHKIN D.A., MISHAN V.V., SHPIRUK M.S.

Khmelnitskyi National University

## RESEARCH OF THE PROCEDURE OF INITIAL ACCESS TO THE FIFTH GENERATION COMMUNICATION NETWORK

Traditional mobile networks have bandwidth and infrastructure limitations. Each base station has a limited number of users and data capacity. 5G technology uses advanced technologies, such as massive MIMO and beamforming, to increase data rates and spectrum efficiency. These features, and the large number of small cells, allow many 5G users to receive low latency and high traffic without overloading the base station. Small cells work the same way as regular cells, but use new technology and millimetre waves (5G New Radio). Low-power base stations can be easily deployed. Cell search is a procedure by which the user equipment (UE) obtains time and frequency synchronization with the base station and decodes the cell ID of the mobile device. System information is broadcast information that is periodically transmitted by the base station on the downlink. This is very important information for the mobile device (UE) needed to connect to the base station (gNB). The UE reads system information to determine the location of mobile devices when turned on, to select and re-select a cell. System information provides the following information: system frame number, system bandwidth, PLMN, mobile subscriber selection and redial thresholds, etc., required to access the network. Physical Cell ID (PCI) is used to distinguish mobile devices in the network radio communication. PLMN (Public land Mobile Network) - mobile network service area. Is a set of all mobile devices of one cellular network operator. The UE scans the bandwidth in the sync raster. The synchronization raster indicates the frequency positions of the synchronization unit that can be used by the UE to detect the system when there is no explicit indication of the position of the synchronization unit. In the next step, the UE decodes the primary and secondary synchronization signals to obtain the Physical Cell ID (PCI) and the DMRS PBCH. The base station transmits SSB packets that contain one SSB per beam. The beam direction changes for each SSB transmission. The following steps are performed to complete the synchronization procedure. The UE selects the preferred beam and decodes the PBCH MIB information, such as SFN, SSB index, raster offset, default DL numerology, RMSI configuration, DM-RS location, and cell prohibition information. If the cell is not locked, the UE attempts to decode the physical downlink control channels (PDCCH) to obtain the frequency location of the PDSCH resources. A study of the model of restoring the synchronization of symbols and frames in the QPSK system, caused by a variable synchronization error. A study of the formation of the radio channel at the physical level.

Keywords: Cell search, Primary synchronization signal, Secondary synchronization signal, Broadcast channel, Random access channel.

### Постановка проблеми

Традиційна мережева інфраструктура має багато обмежень. Технологія 5G вирішує проблеми збільшення швидкості передачі даних, надійності і зменшення затримок. Для забезпечення широкої смуги сигналу і розширення зони покриття для більшої кількості користувачів, технологія 5G використовує концепцію малих комірок (small cells).

Малі комірки – це базові станції з малим енергоспоживанням, які охоплюють невелику зону або застосовуються всередині приміщень. Малі комірки мають всі основні характеристики звичайних базових станцій і здатні обробляти високі швидкості передачі даних для окремих користувачів. У мережах LTE Advanced і 5G малі комірки будуть відігравати важливу роль для мобільного широкосмугового доступу і додатків, де потрібна мала затримка. Малі комірки поділяються на три основні категорії в залежності від зони покриття і кількості користувачів. Фемто-комірки – це невеликі мобільні базові станції, призначені для

покриття всередині приміщень. Проблема низького рівня сигналу від базових макро-станцій для широких зон, які розташовуються поза будівлями), може бути вирішена за допомогою фемто-комірок всередині будівель. Фемто-комірки, підключені через провідний Інтернет, можуть використовуватися для розвантаження мережі, в разі перевантаження мобільного широкосмугового доступу, створюючи обхідний канал через Інтернет, а також для розширення зони покриття і збільшення трафіку даних для користувачів всередині приміщень. Піко-комірки також відносяться до категорії малих комірок, вони застосовуються, головним чином, для невеликих підприємств для розширення покриття мережі у важкодоступних місцях і для збільшення пропускної здатності мережі доступу. Мікро-комірки призначені для підтримки більшого числа користувачів, в порівнянні з фемто-комірками і піко-комірками. Завдяки більшій потужності передачі, вони здатні покривати великі зони і підходять для застосування, наприклад, в «розумних містах», «розумному метро» тощо.

Традиційні мобільні мережі мають обмеження смуги пропускання і інфраструктури. Кожна комірка має обмежену кількість користувачів і ємність передачі даних. В технології 5G використовуються передові технології, такі як масивний MIMO і формування променя (Beamforming), для збільшення швидкості передачі даних і ефективності використання спектра. Ці функції і велика кількість малих комірок дозволяють багатьом користувачам 5G отримувати великий трафік без перевантаження комірки і низьку затримку. Малі комірки працюють так само, як і звичайні комірки, але використовують нові технології, такі як множинність антен передачі і приймання (MIMO), формування променя (Beamforming), і міліметрові хвилі (5G New Radio). Базові станції малої потужності можуть легко розгортатися. Крім того, пристрої з малими комірками спроектовані так, щоб знизити складність, і, отже, їх установка і запуск здійснюється швидше і простіше.

### Аналіз останніх досліджень

В роботах [1–6] наведена інформація про отримання початкового доступу до мережі зв'язку п'ятого покоління. Описуються сигнали, що передаються між обладнанням користувача та базовою станцією, включаючи керування променем. Описуються всі повідомлення, якими обмінюються мобільний пристрій та базова станція. Для мобільного зв'язку п'ятого покоління необхідне забезпечення можливості швидкої синхронізації фреймів для зменшення часу під'єднання мобільного абонента до мережі базових станцій [7–14]. Але в зазначених роботах не проаналізовані питання встановлення початкового доступу в залежності від відношення сигнал–шум в каналі передачі між базовою станцією і мобільним абонентом.

**Метою роботи** є дослідження процедури пошуку комірки для мобільного зв'язку п'ятого покоління в умовах наявності частотних і часових зміщень сигналів у каналі передачі, дослідження шляхів синхронізації символів і фреймів, вивчення питань формування сигналу фізичного радіомовного каналу.

### Процедура пошуку комірки у мобільному зв'язку п'ятого покоління

Пошук комірки – це процедура, за допомогою якої обладнання користувача (ОК) отримує синхронізацію часу та частоти з базовою станцією та декодує ідентифікатор комірки мобільного пристрою. У 5G NR для пошуку комірки відбувається декодування первинного сигналу синхронізації (PSS) і вторинного сигналу синхронізації (SSS) і визначення фізичного ідентифікатора комірки (PCI).

Є два методи, за допомогою яких обладнання користувача може отримати доступ до комірки 5G NR:

- розгортання в неавтономному режимі (NSA): подвійне підключення (EN-DC);
- розгортання в автономному (SA) режимі: тільки для мережі зв'язку п'ятого покоління NR.

У EN-DC інформація про пошук комірки, така як абсолютний номер радіочастотного каналу (NR-ARFCN – Absolute Radio-Frequency Channel Number), ідентифікатор комірки, параметри RACH (Random Access Channel – канал довільного доступу) тощо надається мережею в повідомленні реконфігурації RRC (Radio Resource Control – контроль радіоресурсів) через базову станцію (eNB).

В автономному режимі процедура пошуку комірки NR включає такі кроки (рис. 1):

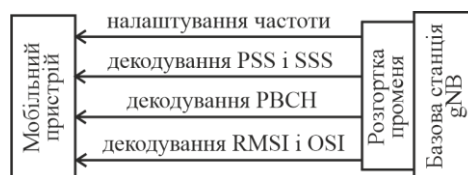


Рис. 1. Процедура пошуку комірки мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G)

- обладнання користувача (ОК) налаштовується на певну частоту;
- ОК намагається виявити сигнали PSS, SSS, щоб отримати синхронізацію частоти та часу;
- як тільки обладнання користувача успішно виявляє PSS/SSS, воно отримує інформацію про синхронізацію та фізичний ідентифікатор комірки (PCI), отже, ОК готове до декодування PBCH;
- як тільки ОК успішно декодує PBCH, воно намагається виконати PDCCH та PDSCH для RMSI та OSI.

Алгоритм процедури пошуку комірки наведений на рис. 2.

Системна інформація – це ширококомовна інформація, що періодично передається базовою станцією

по низхідній лінії зв'язку. Це дуже важлива інформація для мобільного пристрою (ОК), необхідна для підключення до базової станції (gNB). ОК зчитує системну інформацію для визначення місця розташування мобільних пристроїв при включенні, для вибору і повторного вибору комірки. Системна інформація надає таку інформацію: номер системного фрейму, пропускна спроможність системи, PLMN, вибір мобільного абонента та порогові повторного вибору тощо, потрібна для доступу до мережі.

Системну інформацію 5G New Radio можна розділити на три категорії.

- Мінімальна системна інформація (MSI)
- Мінімальна системна інформація, що залишилася (RMSI)
- Інша системна інформація (OSI)

Ці категорії включають головний інформаційний блок (MIB) та 9 системних інформаційних блоків (SIB). Інформація MIB передається каналами BCH і PBCH, SIB передається каналами DL-SCH і PDSCH.

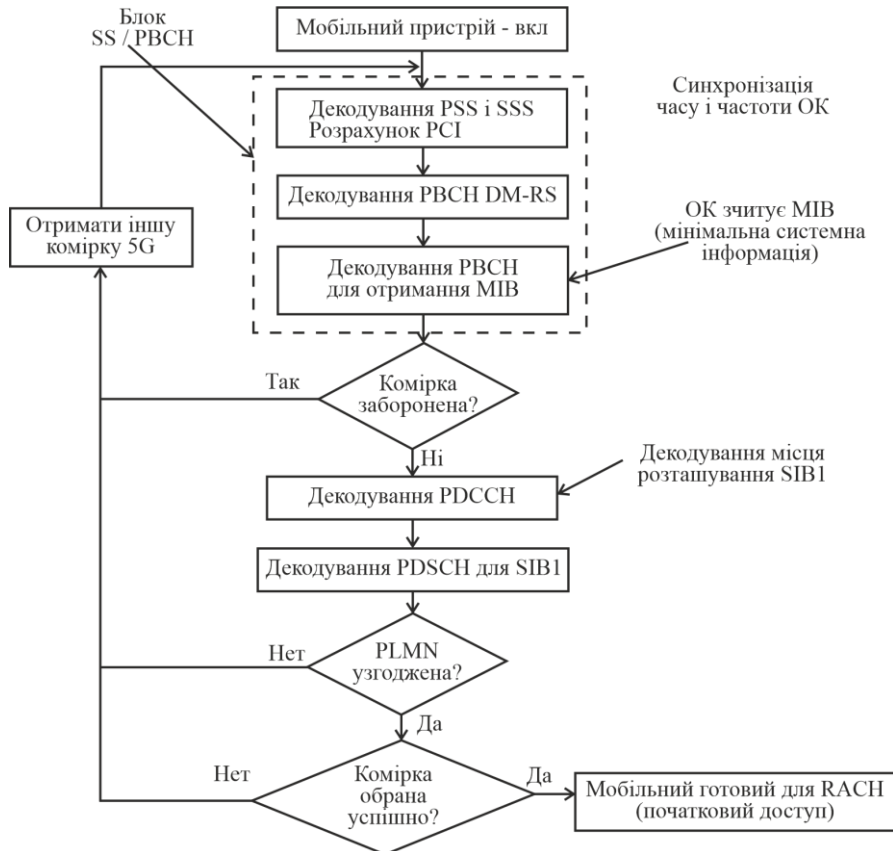


Рис. 2. Алгоритм процедури пошуку комірки

Кожна комірка 5G NR має ідентифікатор фізичної комірки (PCI – Physical Cell ID) і використовується для розрізнення мобільних пристроїв у мережі радіозв'язку. Погане або неправильне планування PCI може вплинути на процедуру синхронізації, демодуляції та передачі сигналів і погіршити роботу мережі. Планування PCI має бути простішим для NR порівняно з LTE, оскільки для розподілу доступно вдвічі більше PCI. У 5G New Radio є 1008 унікальних PCI в порівнянні з LTE 504 PCI, і це визначається наступним виразом:

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)},$$

$N_{ID}^{(1)}$  – вторинний сигнал синхронізації (SSS) та його діапазон від {0, 1... 335}

$N_{ID}^{(2)}$  – первинний сигнал синхронізації (PSS) та його діапазон від {0, 1, 2}

Використання високих несучих частот призводять до збільшення частотних і часових зміщень несучої. Виникнення часових і частотних зміщень призводять до завад між несучими (ICI) і міжсимвольним завадам (ISI). Часовий зсув відбувається через затримку передачі, коли переданий сигнал досягає приймача з затримкою в часі. В цьому випадку приймач не знає, коли передавач відправив новий пакет. Зазвичай розглядається нормалізоване часове зміщення, що дорівнює кількості відліків між переданим і прийнятим сигналами. Проведено дослідження залежності кореляції для трьох значень послідовностей первинного сигналу синхронізації (PSS)  $N_{ID}^{(2)}$  від зміщення частоти на вході приймача (рис. 3).

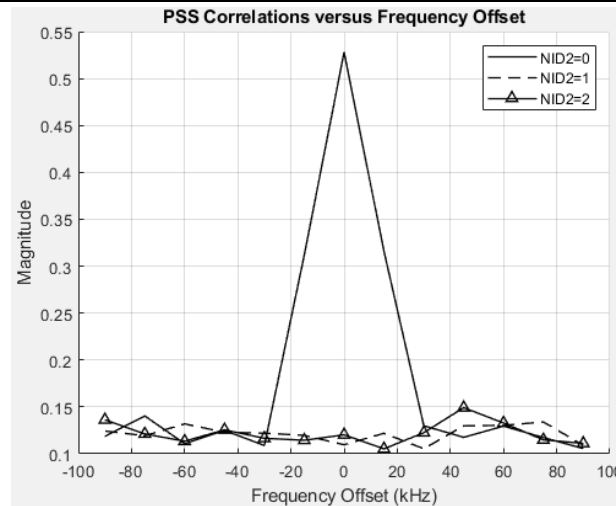


Рис. 3. Залежність кореляції для трьох значень послідовностей первинного сигналу синхронізації (PSS)

$$N_{ID}^{(2)} \text{ від зміщення частоти на вході приймача}$$

PLMN (Public land Mobile Network) – зона обслуговування мобільної мережі. Являє собою сукупність всіх мобільних пристроїв одного оператора стільникової мережі зв'язку. Таким чином, одночасно в одній країні може бути кілька PLMN відповідно до кількості операторів мережі зв'язку. Причому, якщо той самий оператор здійснює свою діяльність у кількох країнах, це будуть різні PLMN.

UE сканує смугу частот у синхронізуючому растрі на основі того, в якій смузі частот UE виконує пошук комірки для налаштування конкретної частоти. Для діапазону FR1 виділені частоти від 450 МГц до 6 ГГц. Для діапазону FR2 виділені частоти від 24,25 ГГц до 52,6 ГГц. Растр синхронізації вказує частотні позиції блоку синхронізації, які можуть бути використані UE для виявлення системи, коли явна вказівка позиції блоку синхронізації відсутня.

На наступному етапі UE декодує первинні та вторинні сигнали синхронізації, щоб отримати Physical Cell ID (PCI) та PBCH DMRS, розташовані в растрі синхронізації. PSS, SSS та NR-PBCH передаються у блоці сигналу синхронізації (SSB). SSB складається з чотирьох символів: 1-символьного PSS, 1-символьного SSS та 2-символьного PBCH. Синхронізація в області часу у термінах рівня символу та рівня слота, а також частотна синхронізація реалізована через PSS/SSS. Склад блоку сигналів синхронізації (SSB) приведений на рис. 4.

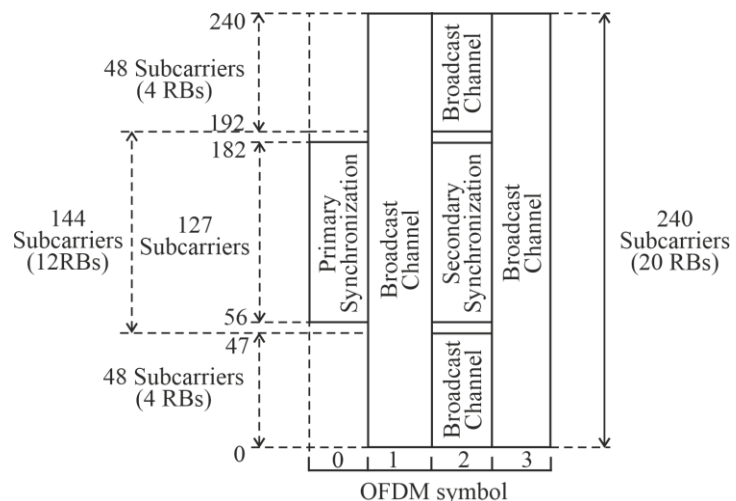


Рис. 4. Структура блоку сигналів синхронізації (SSB)

SSB передаються шляхом формування пакета SSB (один SSB на промінь), який використовується під час розгортки променя. Механізм розгортки променя використовується для визначення найкращого променя.

Група пакетів SS називається набором пакетів SS, як наведено на рис. 5. Пакет сигналів синхронізації (SSB), і набір пакетів сигналів синхронізації можуть містити один або кілька елементів, у той час як максимальна кількість SSB в пакеті SS залежить від частоти і може бути 4 (нижче 3 ГГц), 8 (від 3 до 6 ГГц) або 64 (6 до 52,6 ГГц). Періодичність SSB конфігурується мережею, періодичність набору SSB пакетів становить 20 мс для всього діапазону частот, тобто включає 2 кадри. Схематична структура набору блоків сигналів синхронізації і їх періодичне повторення приведено на рис. 5.

Базова станція (gNB) визначає кілька можливих позицій для SSB в радіокадрі, і це число відповідає кількості променів, що випромінюються в певному напрямку. Кожен SSB може бути ідентифікований унікальним номером, що називається індексом SSB, і ідентифікація того, який SSB виявлений, залежить від місця розташування UE. UE вимірює рівень сигналу опорного сигналу демодуляції (PBCH DMRS) кожного SSB, який він виявив протягом певного періоду (періоду одного набору SSB). За результатом вимірювання UE може ідентифікувати індекс SSB із найсильнішим сигналом, який є найкращим променем для UE.

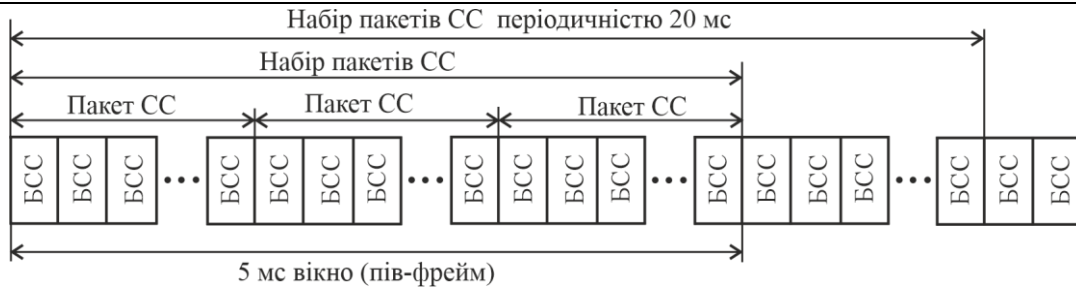


Рис. 5. Структура набору блоків сигналів синхронізації і їх періодичне повторення

Для завершення процедури синхронізації виконуються наступні кроки:

- UE вибирає кращий промінь і декодує інформацію PBCH MIB, таку як SFN, індекс SSB, зміщення растру, нумерологія DL за замовчуванням, конфігурація RMSI, розташування DM-RS та інформація про заборону комірок, тощо.

- Якщо комірка не заблокована, UE намагається декодувати наступні фізичні канали управління низхідної лінії зв'язку (PDCCH), щоб отримати частотне розташування ресурсів PDSCH для підготовки інформації SIB #1.

- Конфігурація PDCCH для RMSI надається PBCH. Конфігурація Control Resource Set (CORESET) для RMSI пов'язана з блоком SS у наборі пакетів SSB.

- UE зчитує мінімальну системну інформацію, що залишилася, з SIB # 1 і декодує ідентифікатор PLMN, параметри вибору комірки, параметри RACH

- Якщо PLMN ID мережі збігається зі списком PLMN ID, доступним з UE, тоді UE запускає процедуру вибору комірки, інакше UE отримує іншу комірку 5G і перезапускає процес знову.

- Інший параметр UE намагається перевірити  $q_{Rxmin}$ , якщо сигнал, виявлений UE, задовольняє рівню  $q_{Rxmin}$ , процедура вибору комірки успішна і UE може спробувати виконати синхронізацію висхідної лінії зв'язку з процедурою RACH.

- Якщо вибір комірки не успішний, UE намагається захопити іншу комірку і перезапускає процес.

#### Синхронізація символів і фреймів

Виконаємо дослідження моделі відновлення синхронізації символів і фреймів у системі QPSK, порушену через змінну помилку синхронізації. Simulink модель дослідження синхронізації символів і фреймів мобільних засобів телекомунікацій приведена на рис. 6.

Блок Variable Fractional Delay вводить змінну помилку синхронізації в сигнал QPSK, оброблену за допомогою фільтра з характеристикою кореня з піднесеного косинуса (RRC). Блок Symbol Synchronizer коригує неузгодженість тактових імпульсів між передавачем і приймачем, вирівнюючи вихідний сигнал з дійсним опорним сигналом. Синхронізатор символів повертає вектор, що містить 99, 100 або 101 символ для вхідного вектора з 200 відліків.

Щоб вирівняти потік бітів по правильним границям фрейму і визначити допустимі індикатори фрейму в демодульованому потоці бітів, блок Frame Synchronizer використовує початок індексу пакета, виявленого блоком Preamble Detector. Підсистема декодування даних BER обчислює частоту помилок по бітам (BER). Підсистема декодування даних BER регенерує біти вхідних даних замість використання виведення блоку генерації бітів, щоб уникнути обчислення BER для неприпустимих кадрів.

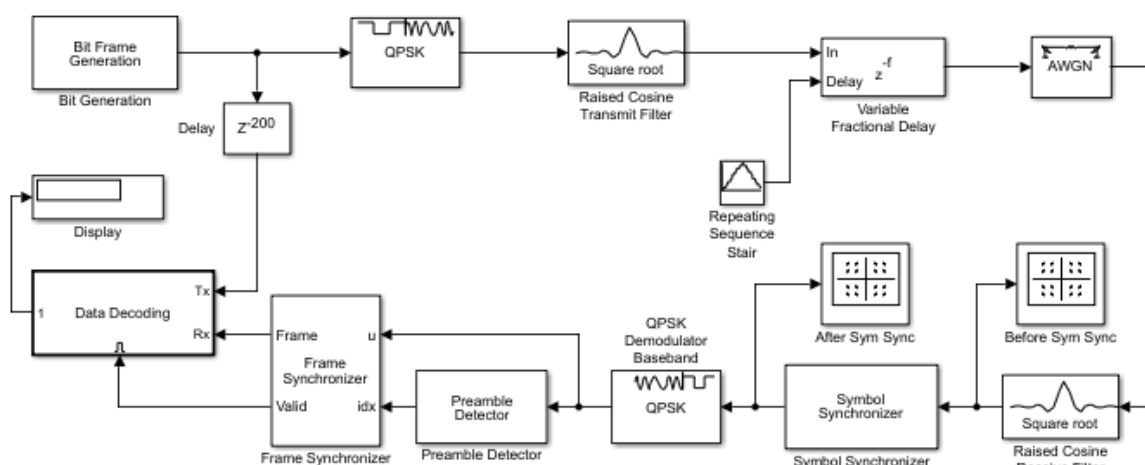


Рис. 6. Simulink модель дослідження синхронізації символів і фреймів мобільних засобів телекомунікацій

При співвідношенні сигнал/шум 20 дБ і змінній помилці синхронізації в діапазоні [0, 0,9] відліків відновлення сигналу відбувається успішно на тракті приймача, який включає синхронізацію символів.

Помилка синхронізації змінюється з часом, змушуючи сукупність коливатися між пошкодженим і чистим станами. На рис. 7 показана констеляційна діаграма QPSK сигналу до синхронізації. На рис. 8 показана констеляційна діаграма QPSK сигналу після синхронізації. BER з синхронізацією символів і без неї показує поліпшення продуктивності за рахунок блоку Symbol Synchronizer.

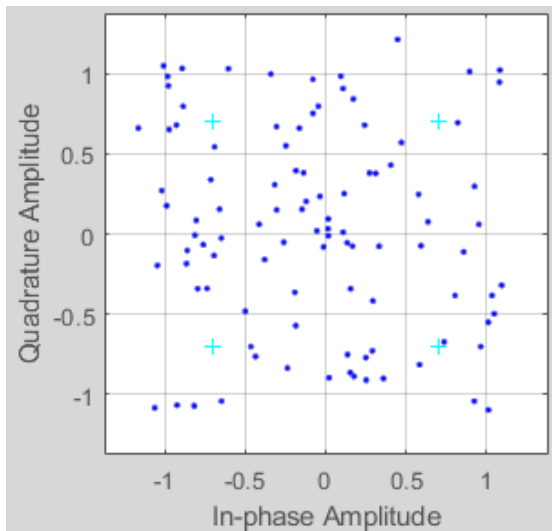


Рис. 7. Констеляційна діаграма QPSK сигналу до синхронізації

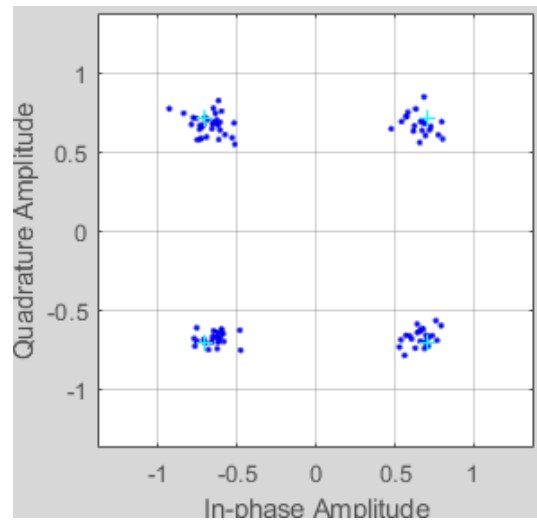


Рис. 8. Констеляційна діаграма QPSK сигналу після синхронізації

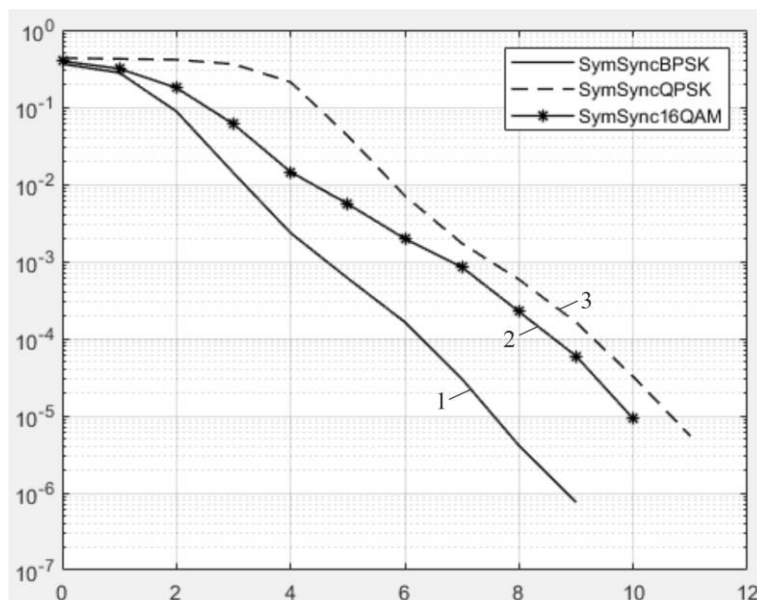


Рис. 9. Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум моделі синхронізації символів і фреймів з різними видами модуляції (1 – BPSK; 2 – 16QAM; 3 – QPSK)

З отриманих залежностей можна зробити висновок, що при встановленій синхронізації, модуляція BPSK на 3 дБ ефективніше модуляції QPSK

**Формування сигналу радіомовного каналу**

Повідомлення радіомовного каналу складається з 32 біт і включає MIB (Master Information Block). Біти повідомлення вказують:

- відстань між піднесучими SCS контрольного каналу та повідомлення SIB1, яке в загальному випадку відрізняється від  $SCS_{SSB}$ ;
- положення частотно-часового блоку CORESET0, в якому розташоване повідомлення контрольного каналу з інформацією про розташування та параметри SIB1;
- параметр  $k_{SSB}$ , що визначає частотний зсув між початковою піднесучою блоку сигналів синхронізації і найближчим елементом сітки ресурс блоків;
- номер фрейму;
- номер напівфрейму;
- доступність комірки для абонентських станцій;
- номер блоку сигналів синхронізації в пакеті, тощо.

Для формування радіомовного каналу на фізичному рівні відбуваються перетворення за рис. 10:

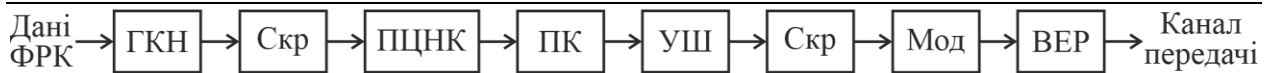


Рис. 10. Структурна схема перетворень сигналів фізичного радіомовного каналу (ФРК – фізичний радіомовний канал; ГКН – генерація корисного навантаження; Скр – скремблювання; ПЦНК – приєднання циклічного надлишкового коду; ПК – полярне кодування; УШ – узгодження швидкості; Мод – модуляція; ВЕР – відображення елементів ресурсів

Після приймання даних РВСН (24 біта) приєднується 8 додаткових бітів, пов'язаних з синхронізацією для генерації корисного навантаження (32 біта). Далі приєднується циклічний надлишковий код, що містить 24 біта, що разом дає 56 біт. Ці 56 біт перетворюються у 512 біт після полярного кодування, які перетворюються у 864 біти після узгодження швидкості. Для передачі 432 символів QPSK (864 біта) необхідно 432 елементів ресурсів. Для РВСН виділено 576 елементів ресурсів, решта 144 елементів ресурсів використовуються для РВСН DM-RS. Для формування сигналу радіомовного каналу виконуються наступні перетворення:

- скремблювання, що залежить від ідентифікатора комірки фізичного рівня, від максимальної кількості блоків сигналів синхронізації у пакеті, а також від двох біт номера фрейму;
- додавання до скремблених біт 24 перевірочних біт, що формуються за допомогою полінома;
- полярне (Polar) кодування;
- узгодження швидкостей потоків, яке полягає у відкиданні деяких біт та перемежуванні решти;
- друге скремблювання, що залежить від ідентифікатора комірки фізичного рівня та від номера блока сигналів синхронізації в пакеті;
- QPSK модуляція, для якої кожній парі біт ставиться у відповідність комплексний QPSK символ;
- відображення символів модуляції на частотно-часові комірки блока сигналів синхронізації.

Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум для фізичного радіомовного каналу при різній кількості антен  $R$  приймача наведено на рис. 11.

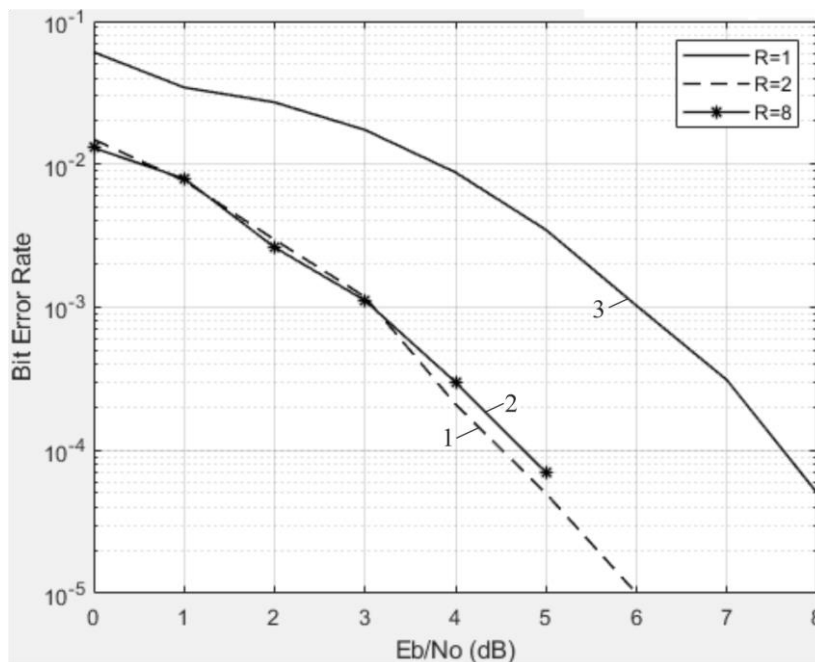


Рис. 11. Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум для фізичного радіомовного каналу (РВСН) при різній кількості антен  $R$  приймача (1 –  $R = 2$ ; 2 –  $R = 8$ ; 3 –  $R = 1$ )

З отриманих залежностей можна зробити висновок, що використання декількох антен (режим MIMO) на боці приймача підвищує енергетичну ефективність системи зв'язку на 3 дБ у порівнянні з використанням однієї антени.

### Висновки

У статті проаналізований алгоритм процедури пошуку комірки у мобільному зв'язку п'ятого покоління. Досліджена залежність кореляції для трьох значень послідовностей первинного сигналу синхронізації (PSS)  $N_{ID}^{(2)}$  від зміщення частоти на вході приймача і визначений максимум кореляції PSS на одній з послідовностей. Це дозволяє визначити ідентифікатор комірки обладнання користувача. Досліджена модель відновлення синхронізації символів і фреймів у системі QPSK, порушену через змінну помилку синхронізації. Зроблений висновок, що при встановленій синхронізації, модуляція BPSK на 3 дБ ефективніше модуляції QPSK. Досліджена структурна схема формування сигналу радіомовного каналу. Встановлено, що використання декількох антен (режим MIMO) на боці приймача підвищує енергетичну ефективність системи зв'язку на 3 дБ у порівнянні з використанням однієї антени.

## Література

1. Пятін І.С. Система зв'язку з QPSK модуляцією і синхронізацією несучої / І.С. Пятін, В.В. Мішан, О.О. Кухарець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 5. – С. 211–217.
2. Pyatin I. Investigation of signals distortion during interpolation in SDR transmitters with QPSK modulation / J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko, I. Parkhomey // Adaptive systems of automatic control. – 2019 – № 1 (34). – P. 5–15.
3. Пятін І.С. Порівняльний аналіз детекторів помилки символної синхронізації когерентної системи цифрового зв'язку з модуляцією QPSK / Ю.М. Бойко, І.С. Пятін // Зв'язок. – 2019. – № 6. – С. 12–18.
4. Пятін І.С. Дослідження синхронізації цифрових систем зв'язку / І. С. Пятін, І.Ю. Кукал // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 5. – С. 175–183.
5. Boiko J., Pyatin I., Karpova L., Eromenko O. (2021) Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate. In: Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_4)
6. Пятін І.С. Передача управляючої інформації у системах широкосмугових телекомунікацій технології 5G / Ю. Бойко, І. Пятін, Л. Карпова, І. Пархомей // Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2021. – № 1 (38). – С. 82–95. DOI://doi.org/10.20535/1560-8956.38.2021.233200
7. Boiko J., Eromenko O., Kovtun I. and Petrashchuk S. Quality Assessment of Synchronization Devices in Telecommunication, in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019. <https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783438>.
8. Boiko J., Pyatin I., Eromenko O. and Barabash O. Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices, Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020. DOI: 10.25046/aj050242.
9. Parkhomey I. Assessment of quality indicators of the automatic control system influence of accident interference / I. Parkhomey, J. Boiko, N. Tsopa, I. Zeniv, O. Eromenko // Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control). – 2020. – Vol. 18, No. 4. – P. 2070–2079.
10. Boiko J. Synthesis and analysis of information-control systems of synchronization of means of telecommunications / J. Boiko // Adaptive systems of automatic control. – 2017. – No 1(30). – P. 8–28. – DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.30.2017.117700>.
11. Zhurakovskiy B. Increasing the efficiency of information transmission in communication channels / B. Zhurakovskiy, J. Boiko, V. Druzhynin, I. Zeniv, O. Eromenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2020. – Vol. 19, No. 3. – P. 1306–1315.
12. Boiko J., Pyatin I. and Eromenko O. Farrow Interpolator Features in QPSK Telecommunication Devices. 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET - 2020) Lviv-Slavske, Ukraine February 25-29, 2020. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235410
13. Pyatin I., Boiko J. and Eromenko O. Design and Simulation of Synchronization Systems in Telecommunications with QPSK, 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 98-103, DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349354.
14. Бойко Ю. М. Підвищення завадостійкості блоків оброблення сигналів засобів телекомунікацій на основі модифікованих схем синхронізації / Ю. М. Бойко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2015. – Вип. 61. – С. 91–107. – URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_rr\\_2015\\_61\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2015_61_11).

## References

1. Piatin I.S. Systema zviazku z QPSK moduliatsiieiu i synkhronizatsiieiu nesuchoi / I.S. Piatin, V.V. Mishan, O.O. Kukharets // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2019. - № 5. - S. 211-217
2. Pyatin I. Investigation of signals distortion during interpolation in SDR transmitters with QPSK modulation / J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko, I. Parkhomey // Adaptive systems of automatic control. – 2019 – № 1 (34). – P. 5–15.
3. Piatin I.S. Porivniialnyi analiz detektoriv pomylyky symvolnoi synkhronizatsii koherentnoi systemy tsyfrovoho zviazku z moduliatsiieiu QPSK / J.M. Boiko I.S. Piatin // Naukovyi zhurnal Zviazok. – 2019. – № 6. – S. 12-18.
4. Piatin I.S. Doslidzhennia synkhronizatsii tsyfrovyykh system zviazku / I.S. Piatin, I.Iu. Kukal // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2016. – № 5. – S. 175-183.
5. Boiko J., Pyatin I., Karpova L., Eromenko O. (2021) Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate. In: Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_4)
6. Piatin I.S. Peredacha upravliaiuchoi informatsii u systemakh shyrokosmuhovyykh telekomunikatsii tekhnologii 5G / J. Boiko, I. Piatin, L. Karpova, I. Parkhomey // Mizhvidomchyi nauково-tekhnichniy zbirnyk «Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnia», 2021 – № 1 (38). – S. 82-95. DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.38.2021.233200>
7. Boiko J., Eromenko O., Kovtun I. and Petrashchuk S. Quality Assessment of Synchronization Devices in Telecommunication, in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019. <https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783438>.
8. Boiko J., Pyatin I., Eromenko O. and Barabash O. Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices, Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020. DOI: 10.25046/aj050242.



9. Parkhomey I. Assessment of quality indicators of the automatic control system influence of accident interference / I. Parkhomey, J. Boiko, N. Tsopa, I. Zeniv, O. Eromenko // *Telkommnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. – 2020. – Vol. 18, No. 4. – P. 2070–2079.
10. Boiko J. Synthesis and analysis of information-control systems of synchronization of means of telecommunications / J. Boiko // *Adaptive systems of automatic control*. – 2017. – No 1(30). – P. 8–28. – DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.30.2017.117700>.
11. Zhurakovskiy B. Increasing the efficiency of information transmission in communication channels / B. Zhurakovskiy, J. Boiko, V. Druzhynin, I. Zeniv, O. Eromenko // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. – 2020. – Vol. 19, No. 3. – P. 1306–1315.
12. Boiko J., Pyatin I. and Eromenko O. Farrow Interpolator Features in QPSK Telecommunication Devices. 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET - 2020) Lviv-Slavske, Ukraine February 25-29, 2020. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235410
13. Pyatin I., Boiko J. and Eromenko O. Design and Simulation of Synchronization Systems in Telecommunications with QPSK, 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 98-103, DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349354.
14. Boiko J. M. Pidvyshchennia zavadostiikosti blokiv obroblennia syhnaliv zasobiv telekomunikatsii na osnovi modyfikovanykh skhem synkhronizatsii / J. M. Boiko // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut»*. Seriya : Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia. – 2015. – Vyp. 61. – S. 91-107. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_rr\\_2015\\_61\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2015_61_11).

Рецензія/Peer review : 10.09.2021 р.

Надрукована/Printed :10.10.2021 р.