

А. А. ТКАЧУК, В. Ю. ЗАБЛОЦЬКИЙ,
Й. Р. СЕЛЕПИНА, С. А. МОРОЗ, Т. В. ТЕРЛЕЦЬКИЙ
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ МЕРЕЖ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

В роботі проведено дослідження адаптивного алгоритму вимірювання швидкості Internet-з'єднання шляхом зміни розміру тестового файлу. Встановлено ряд оптимальних розмірів тестових файлів залежно від типу з'єднання. Проведено добовий моніторинг бітової швидкості. Запропоновано виконувати перерозподіл ресурсів базової станції задля стабілізації бітової швидкості, економії електроенергії та покращення умов експлуатації базових станцій.

Ключові слова: моніторинг, з'єднання, навантаження, абонентський термінал, стільникова мережа.

A. A. TKACHUK, V. Y. ZABLOTSKY, Y. R. SELEPYNA, S. A. MOROZ, T. V. TERLETS'KYI
Lutsk National Technical University

RESEARCH OF FUNCTIONING MODES OF BASE STATIONS MOBILE COMMUNICATION NETWORK

In this paper, an adaptive algorithm for measuring the speed of an Internet connection was performed by changing the size of the test file. There are a number of optimal sizes of test files depending on the type of connection. The speed measurement will take place as follows: the small file is initially transmitted and the bit rate is determined in relation to the reference time interval. If the test file is transmitted without delay, then the second step will be a repetition of the procedure with a larger file, and so on until the results of two consecutive measurements will not be the same order, then the results are averaged and displayed to the operator, as the final results of the measurement. After conducting a test study with the first file, the second file is selected, then if the file is transmitted for the same short time, several steps can be skipped and immediately selected a larger file that will more accurately determine the bit rate of the Internet connection. According to the proposed algorithm, the volume of test data is automatically selected, depending on the bandwidth of the channel, therefore the operator error is excluded from the measurement procedure. An alternative, passive way of determining the hours of maximum and minimum load, as well as the maximum and minimum speeds of the Internet connection is offered. When using a passive way to control the bit rate of an Internet connection, the minimum amount of traffic is spent, and bit rate control can be carried out continuously. The bit rate of the investigated terminal depends on the violation of the orthogonality of the codes of the investigated terminal caused by the multipath signal propagation, as well as the violation of the orthogonality of the codes of other subscriber terminals caused by the multiple use of frequency. Daily monitoring of bit rate is carried out. It is proposed to redistribute the resources of the base station in order to stabilize bit rate, save energy and improve the operating conditions of the base stations.

Keywords: monitoring, connection, loading, subscriber terminal, mobile network.

Вступ

На даний момент послуги зв'язку в мережах WCDMA в Україні надають такі компанії, як «Київстар», «Vodafone» Україна та «Lifecell». Операторам необхідно підтримувати якість послуг на високому рівні, тому виникає потреба періодично проводити тестування мереж стільникового зв'язку. Процедура тестування каналу зв'язку відбувається наступним чином. На віддаленому сервері формується тестовий файл певного обсягу, потім сформований файл передається на тестовий пристрій. Швидкість передачі даних визначається як обсяг переданих даних за певний проміжок часу. Зазвичай це проміжок становить одну секунду, але інколи необхідно визначити середню швидкість передачі даних за годину або за добу. Деякі сервіси перед запуском алгоритму вимірювання швидкості пропонують вибрати тип з'єднання терміналу з мережею, це забезпечує більш коректне вимірювання швидкості, так як обсяг тестового файлу буде змінюватися залежно від обраного типу з'єднання. Проте набір тестових файлів визначено заздалегідь для кожного типу з'єднання і це може викликати неточності при вимірюванні швидкості Internet-з'єднання через неможливість зміни в часі кінцевого обсягу переданих даних. Наприклад: через програмну помилку в роутері зі вбудованим бездротовим модемом, швидкість Internet-з'єднання досліджуваного абонентського терміналу (АТ) обмежена. При тестуванні оператор вибере ширококутне з'єднання, так як провайдер надає такий тип з'єднання, при цьому сервер тестування швидкості задасть тестовий файл великого обсягу, що необхідно для точного визначення швидкості передачі даних. Під час передачі файлу відбудеться «пробка» в найвужчому місці, в даному випадку в роутері. Через низьку швидкості, тестування відбуватиметься довше, запланованого, що може призвести до помилок визначення швидкості Internet-з'єднання або до «зависання» сервісу [1, 2, 4].

Для того щоб уникнути таких ситуацій, пропонується використати адаптивний алгоритм вимірювання швидкості способом зміни розміру файлу, що передається. Вимірювання швидкості буде відбуватись таким чином: спочатку передається файл малого обсягу і визначається бітова швидкість щодо контрольного проміжку часу. Якщо тестовий файл переданий без затримок, то другим етапом буде повторення процедури з файлом більшого обсягу, і так далі до тих пір поки результати двох послідовних вимірювань не будуть одного порядку, потім результати усереднюються і виводяться оператору, як підсумкові результати вимірювання [3]. З метою підвищення точності вимірювання бітової швидкості Internet-з'єднання, а також зменшення загального часу тестування, пропонуються наступні обсяги тестових файлів (табл. 1).

Рекомендовані обсяги файлів для тестування швидкості Internet-з'єднання

Розмір тестового файлу	Призначення тесту
10 кбайт	Перевірка тестованої лінії
200 кбайт	Тестування EDGE (GPRS) з'єднань
800 кбайт	Тестування EDGE (GPRS) з'єднань (підвищена точність)
1,6 Мбайт	Тестування HSDPA/HSUPA з'єднання до 3,6 Мбайт/с
8 Мбайт	Тестування HSDPA/HSUPA з'єднання до 14,4 Мбайт/с
16 Мбайт	Тестування HSDPA/HSUPA з'єднання до 14,4 Мбайт/с (підвищена точність)

Для перевірки працездатності каналу зв'язку рекомендується використовувати обсяг тестового файлу 10 кбайт. При будь-якій якості каналу зв'язку такий малий обсяг інформації повинен передатися на тестовий сервер. Слідом можна оцінити час, за яке була здійснена передача даних. При перевищенні тимчасового проміжку, рівного 2...4 с, можна вважати тестування каналу закінченим, так як досліджуваний канал передачі даних є низько швидкісним. Обсяг даних, що дорівнює 200 кбайт використовується для тестування каналу передачі даних, який формується під час використання мережами 2G при швидкостях 384 кбіт/с EDGE (GPRS). Такий обсяг файлу дозволяє отримати верхню оцінку швидкості Internet-з'єднання. Для більш точного визначення швидкості Internet-з'єднання потрібно більший обсяг даних для того, щоб виміряти швидкість в кілька проходів. Для цього рекомендується використовувати тестовий файл обсягом даних 800 кбайт. Тестування мереж третього покоління вимагає набагато більшого обсягу даних для адекватного визначення бітової швидкості. Починати тестування в мережах WCDMA рекомендується тестовим файлом з обсягом інформації 1,6 Мбайт. При початковій швидкості передачі даних 3,8 Мбіт/с файл буде переданий за 8...10 секунд. Для більш пізніх версій стандарту HSDPA при використанні 15 каналоутворюючих кодів і модуляції 16-QAM досягається швидкість передачі даних до 14,4 Мбіт/с. При таких високих швидкостях передачі даних рекомендується використання обсягу даних 8 Мбайт, а для більш точного визначення швидкості передачі даних 16 Мбайт.

Після проведення тестового дослідження першим файлом, вибирається другий файл, далі якщо файл переданий за настільки ж короткий час, кілька етапів може бути пропущено і відразу обраний файл більшого обсягу, що дозволить більш точно визначити бітову швидкість Internet-з'єднання. За запропонованим алгоритмом обсяг тестових даних вибирається автоматично, в залежності від пропускної спроможності каналу, тому з процедури вимірювання виключається похибка оператора. Особливо актуальними є добові вимірювання, проведені в різні дні тижня. Добові вимірювання дозволяють оцінити завантаженість окремого сектора базової станції, невеликої ділянки або всієї мережі. Це необхідно для аналізу роботи мережі, а також для оптимізації проблемних її ділянок. За результатами спостереження можна виявити години максимального та мінімального навантаження, екстремум навантаження характеризується тим, що кількість абонентів, що використовують стільникову мережу для голосових викликів або для передачі даних, максимальна. У зв'язку з цим можливі випадки, коли абонентський термінал зареєстрований в мережі, але не можливо здійснити голосовий виклик або передати дані. Якщо подібний випадок поодинокий, то немає необхідності змінювати мережу або проводити оптимізацію. Однак, якщо перевантаження мережі виникає з певною періодичністю, то необхідно додати в проблемну ділянку мережі додатковий передавач або здійснити оптимізацію ділянки. Подальший безперервний моніторинг мережі повинен виявити, чи зникла проблема.

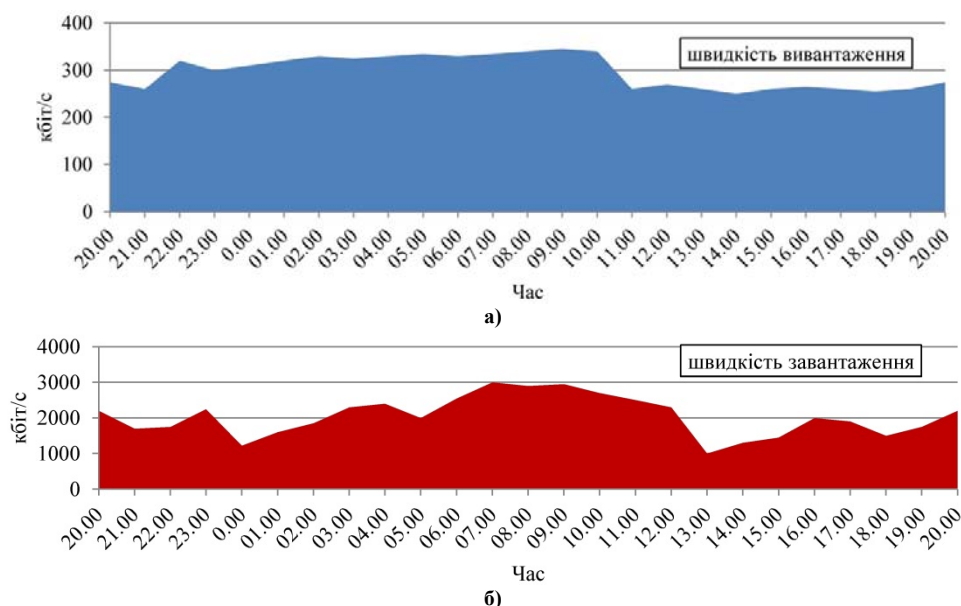


Рис. 1. Діаграми добової зміни швидкості Internet-з'єднання для вивантаження (а) та завантаження даних (б)

Години мінімального навантаження це період, в який кількість абонентів на досліджуваній ділянці мінімальна. На основі даних добового моніторингу бітової швидкості можна виявити такі години і спробувати перерозподілити ресурси в інші сектори або ділянки, де це необхідно. Діаграми добової зміни швидкості Internet-з'єднання для вивантаження (а) і завантаження (б) даних представлені на рис. 1.

З графіків видно, що мінімальна швидкість завантаження (рис. 1б) спостерігається приблизно о першій годині дня, з цього випливає, що цей момент відповідає максимальному навантаженню на мережу. Мінімальне навантаження на мережу було зафіксовано о сьомій ранку, ця експериментально визначена максимальна швидкість співпадає даними з контролера LAC. Дані з контролера про коефіцієнти завантаженості базової станції в умовних одиницях за контрольний проміжок часу представлені на рис. 2.

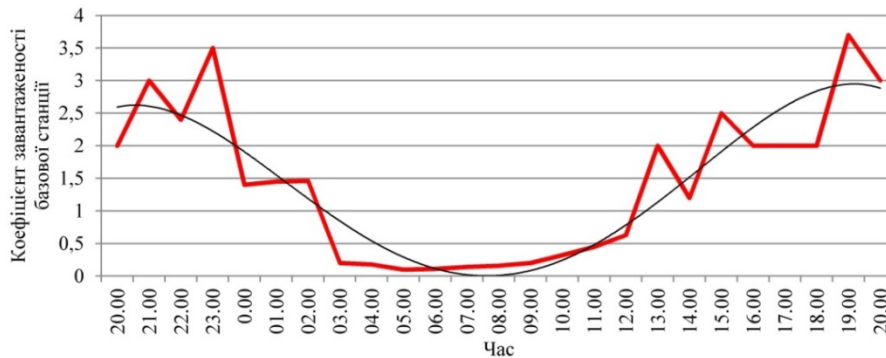


Рис. 2. Зміна коефіцієнта завантаженості базової станції за добу

Швидкість вивантаження даних штучно обмежується оператором до 300 кбіт/с. Це робиться для звільнення ресурсів мережі. Для щоденного моніторингу швидкості Internet-з'єднання в мережі стільникового зв'язку, описаний метод є досить затратним, оскільки витрачається великий обсяг трафіку. У наведеному прикладі за час тестування витрачено близько 22 Гбайт трафіку. Середню добову швидкість можна розрахувати так:

$$S_{CP} = \sum_{k=1}^n \frac{S_k}{n}, \tag{1}$$

де S_{CP} – середня добова бітова швидкість, біт/с, S_k – бітова швидкість одиничного вимірювання біт/с, n – кількість вимірювань.

У прикладі, наведеному на рис. 1б, середня добова швидкість завантаження при використанні Internet-з'єднання дорівнює 1283 кбіт/с. Для щоденного спостереження за мережею описаний метод є неефективним, так як через безперервний обмін даними відбувається велика витрата трафіку, що буде відбирати ресурси у користувачів, і відповідно в години максимального навантаження викличе збої у різних сервісах зв'язку.

Експериментальна частина

Пропонується альтернативний, пасивний спосіб визначення годин максимального і мінімальною навантаження, а також максимальних і мінімальних швидкостей Internet-з'єднання. Під час використання пасивного способу для контролю бітової швидкості Internet-з'єднання витрачається мінімальна кількість трафіку, а контроль за бітовою швидкістю можна вести постійно.

Для пояснення принципу визначення швидкості пасивним способом розглянемо принципи функціонування виділеного каналу передачі даних на фізичному рівні (DPDCH). Виділений канал передачі даних на фізичному рівні переносить інформацію високих рівнів, включаючи дані користувача, в той час як виділений канал керування на фізичному рівні (DPCCH) переносить необхідну керуючу інформацію на фізичному рівні. Швидкість передачі даних DPCCH є постійною, тоді як швидкість передачі даних DPDCH між фреймами може змінюватися [1, 5]. Для відділення сигналів одного стільника від іншого використовують скремблюючі коди, усічені послідовності Голда. Всі абонентські термінали, що знаходяться в зоні дії одного стільника, працюють на одній частоті, а для поділу інформації, що передається з абонентських терміналів на базову станцію і назад, використовуються каналізуючі коди Уолша, з коефіцієнтом ортогональності α [2]. Скремблюючі коди накладаються на каналізуючі коди, таким чином, що вони не змінюють ширину смуги сигналу, а просто дозволяють сигналам від різних джерел відділятися один від одного. При великій затримці в радіоканалі абонентський термінал буде сприймати частина сигналу передавача базової станції, як перешкоду від множинного використання. Тому на практиці отримати ідеальний ортогональний сигнал дуже складно; (типове значення $\alpha = 0,4...0,9$). Потужність сигналу на виході антени базової станції P_{TX} дорівнює:

$$P_{TX} = \frac{N_{rf} \bar{L} \sum_{j=1}^N v_j \frac{(E_b / N_0)}{W / R_j}}{1 - \eta_{DL}}, \tag{2}$$

де W – швидкість передачі чіпів, біт/с; R_j – бітова швидкість j -го АТ, біт/с; v_j – коефіцієнт активності j -го користувача на фізичному рівні, для мови – 0,67, для передачі даних – 1; \bar{L} – середнє загасання інформаційного сигналу між передавачем стільника і АТ; N – кількість АТ, що обслуговуються стільником; E_b/N_0 – енергія інформаційного біту, поділена на спектральну щільність потужності шуму; N_{rf} – потужність шуму на вхідному каскаді приймача АТ, Вт;

$$N_{rf} = N_m + NF,$$

де N_m – рівень теплового шуму. При швидкості бітів 3,84 Мчп/с; $N_m=108,2$ дБ; NF – коефіцієнт шуму приймача АТ. Типові значення $NF=5\dots 9$ дБм; $\overline{\eta_{DL}}$ – середній коефіцієнт навантаження в низхідному каналі, який можна знайти як:

$$\overline{\eta_{DL}} = \sum_{j=1}^N v_j \frac{(E_b/N_0)_j}{W/R_j} [(1-\bar{\alpha}) + \bar{i}], \quad (3)$$

де $\bar{\alpha}$ – середній коефіцієнт ортогональності сигналу передавача базової станції для j -го АТ; \bar{i} – відношення рівня радіоперешкод від іншого стільника до перешкод у власному стільнику.

Відношення E_b/N_0 визначає мінімальні вимоги до радіолінії для можливості прийому/передачі даних. Для передачі мови достатньо $E_b/N_0=5$ дБ, а для передачі даних зі швидкістю 384 Кбіт/с необхідно співвідношення $E_b/N_0=1$ дБ [3]. За допомогою (2) і (3) отримано співвідношення, що дозволяє оцінити бітову швидкість k -го терміналу R_k :

$$R_k = \frac{W \cdot P_{TX} - W \cdot P_{TX} \cdot \sum_{j=2}^N v_j \frac{(E_b/N_0)_j}{G_j} [(1-\bar{\alpha}) + \bar{i}] - W \cdot N_{rf} \cdot \bar{L} \cdot \sum_{j=2}^N v_j \frac{(E_b/N_0)_j}{G_j}}{v_k \cdot (E_b/N_0)_k \cdot [N_{rf} \cdot \bar{L} + P_{TX} \cdot ((1-\alpha_k) + \bar{i})]}, \quad (4)$$

де R_k – бітова швидкість досліджуваного терміналу, біт/с; v_k – коефіцієнт активності користувача на фізичному рівні; α_k – коефіцієнт ортогональності сигналу передавача базової станції для досліджуваного АТ; $(E_b/N_0)_j$ – енергія інформаційного біту, поділена на спектральну щільність потужності шуму для j -го АТ, разів; G_j – вираш у відношенні сигнал/перешкода під час обробки сигналів j -го АТ.

У формулі (4) k -й абонентський термінал входить в загальну кількість терміналів N , що обслуговуються одним передавачем. При цьому k -й АТ є досліджуваним, а j -і АТ є обслуговуваними тим же передавачем, але при цьому з їх кількості виключається k -й АТ, тобто k – відповідає $j = 1$. Якщо базова станція обслуговує один АТ і збережена ідеальна ортогональність кодів, вираз (4) спрощується, тому що виключається вплив всіх АТ, крім досліджуваного:

$$R_k = \frac{W \cdot P_{TX}}{v_k \cdot (E_b/N_0) \cdot [N_{rf} \cdot \bar{L} + P_{TX} \cdot ((1-\alpha_k) + \bar{i})]}, \quad (5)$$

Розрахуємо значення бітової швидкості для типових параметрів мережі. Нехай потужність базової станції P_{TX} дорівнює 16 Вт (42 дБм), потужність сигналу в приймачі АТ дорівнює 80 дБм, середнє загасання на трасі складає $(L=42+80)$ 122 дБ, спектральна щільність шуму у вхідному каскаді приймача абонентського терміналу $N_{rf} = -101$ дБм, він використовується для передачі даних, тоді $\bar{i}=0,55$, що відповідає макрокомірці з ненаправленими антенами. При таких значеннях параметрів бітова швидкість дорівнює:

$$R_k = \frac{3,84 \cdot 10^6 \cdot 16}{1 \cdot 10^{1/10} \cdot \left[10^{-101/10} \cdot 10^{122/10} + 16 \cdot ((1-1) + 0,55) \right]} \approx 3,649 \cdot 10^5 \approx 364 \text{ кбіт/с.}$$

Зі співвідношень (4) і (5) можна зробити висновок, що бітова швидкість прямо пропорційна потужності сигналу, а також обернено пропорційна втратам на радіотрасі та сигналам перешкод, що виникають через порушення ортогональності каналізуючих кодів.

$$R_k \approx \frac{W \cdot P_{TX}}{[N_{rf} \cdot \bar{L} + P_{TX} \cdot ((1-\alpha_k) + \bar{i})]}, \quad (6)$$

Порушення ортогональності виникає не тільки від багаторазового використання частоти, але також і за рахунок багатопроменевого поширення сигналу. Коли базовою станцією обслуговується один АТ, то все одно можливе порушення ортогональності кодів. На рис. 3 представлені залежності бітової швидкості R_j від коефіцієнта ортогональності сигналу α при різній потужності прийнятого сигналу, отримані шляхом математичного моделювання.

З рис. 3 видно, що бітова швидкість залежить від порушення ортогональності каналізуючих кодів, причому чим вище рівень прийнятого АТ сигналу, тим чіткіше виражається дана залежність, наприклад при рівні сигналу 75 дБм, відбувається зміна бітової швидкості на 20%, при зміні коефіцієнта ортогональності $\bar{\alpha} = 0,3 \dots 0,9$. Зі співвідношення (4) можна знайти бітову швидкість R_j як:

$$R_j = \frac{(1 - \eta_{DL}) \cdot P_{TX} \cdot W}{N_{rf} \cdot \bar{L}_j \cdot v_j \cdot (E_b / N_0)} \quad (7)$$

З виразу (7) випливає, що бітова швидкість j -го АТ буде прямувати до 0, коли η_{DL} наближається до 1 (рис. 4).

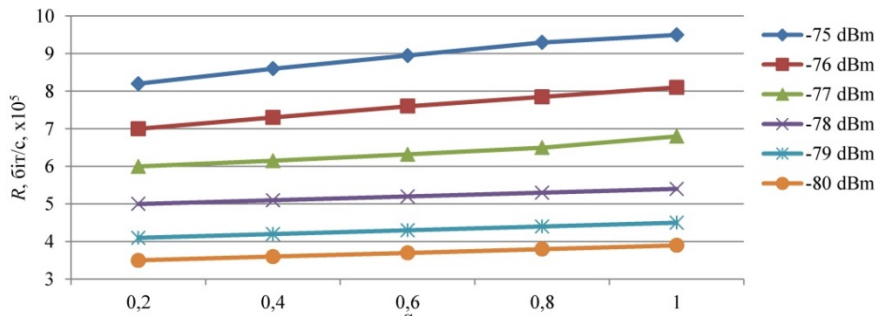


Рис. 3. Залежність бітової швидкості від коефіцієнта ортогональності досліджуваного терміналу

Згідно зі співвідношенням (3) середній коефіцієнт навантаження в низхідному каналі зростає зі збільшенням кількості абонентів, з рис. 3 видно що з ростом коефіцієнта навантаження бітова швидкість зменшується, ортогональна і інтерференційна перешкоди збільшуються. Відповідно зі зростанням загальної кількості абонентів зменшується бітова швидкість j -го АТ.

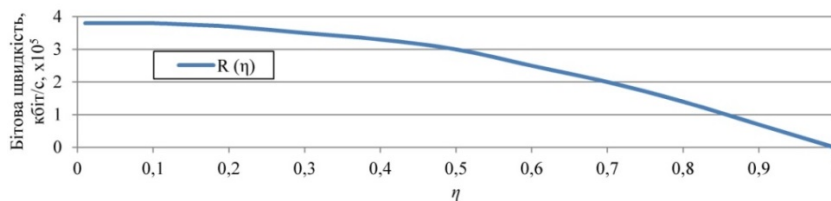


Рис. 4. Залежність бітової швидкості від коефіцієнта навантаження

Приймемо порушення ортогональності коду через багатопроменеве поширення для досліджуваного абонента рівним $\alpha_k = 0,9$, а порушення ортогональності коду через багаточисельне використання частоти будемо варіювати від 0,1 до 0,8. При цьому візьмемо типовий випадок використання мережі, коли досліджуваний термінал знаходиться в режимі передачі даних, а інші АТ використовуються для передачі голосових повідомлень. Використовуючи отримане автором співвідношення (4), проведемо моделювання зміни бітової швидкості від кількості абонентів. Результати представлені на рис. 5.

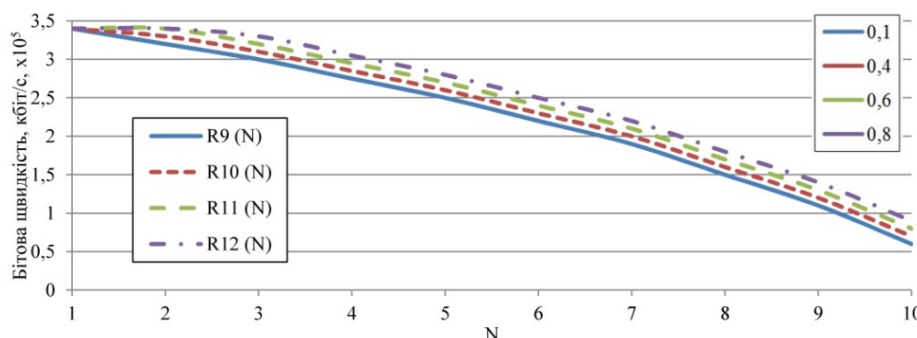


Рис. 5. Залежність бітової швидкості від кількості абонентів

З рис. 5 видно, що при збільшенні кількості активних абонентських терміналів бітова швидкість досліджуваного терміналу знижується. Даний ефект пов'язаний з тим, що збільшується коефіцієнт навантаження η_{DL} . При цьому зі збільшенням кількості абонентів, ефект від порушення ортогональності кодів збільшується, що веде до збільшення рівня перешкод.

У зв'язку з цим зміна коефіцієнта ортогональності каналізуючих кодів АТ, що обслуговуються одним передавачем базової станції, призводить до погіршення ефірної обстановки, і відповідно до зниження

бітової швидкості. Результати моделювання представлені на рис. 6.

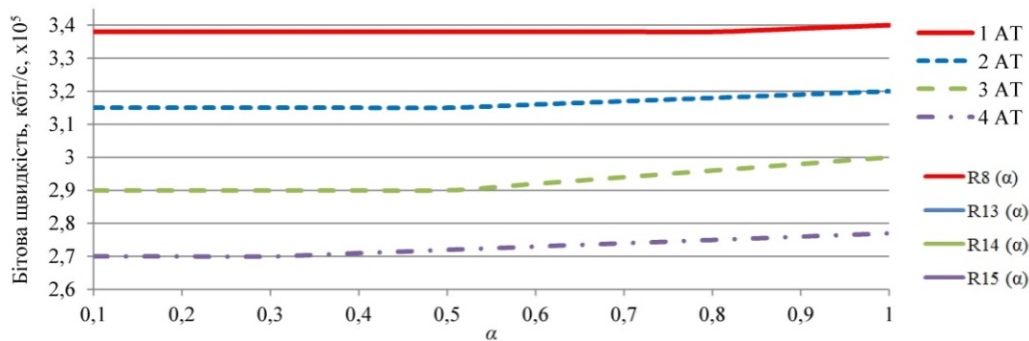


Рис. 6. Залежність бітової швидкості AT від ортогональності кодів

Бітова швидкість досліджуваного терміналу залежить від порушення ортогональності кодів досліджуваного терміналу, викликаного багатопроменевим поширенням сигналу, а також порушення ортогональності кодів інших абонентських терміналів, викликаного багаточисельним використанням частоти. При цьому порушення ортогональності кодів абонентських терміналів вносить додаткову складову перешкод в загальну ефірну обстановку досліджуваного сектору базової станції. Відповідно, якщо провести один раз в заданий проміжок часу моніторинг швидкості методом передачі файлу на ftp-сервер, встановити максимальну можливу швидкість для заданого місця, а потім проводити пасивний моніторинг швидкості з нормуванням отриманих результатів за максимальним значенням, то можна отримати добовий розподіл зміни швидкості Internet-з'єднання без витрати величезної кількості трафіку. Також даний спосіб дозволить не займати ресурси радіолінії та контролера, а також не вносити шумових перешкод в досліджуваний сектор, що при тривалих вимірюваннях істотно розвантажить стільникову мережу.

Порівняємо результати, отримані за допомогою активного та пасивного способів вимірювання швидкості Internet-з'єднання. На рис. 7 на одній діаграмі представлені результати добових вимірювань бітової швидкості та розрахункові значення бітової швидкості. З рисунка видно, що години максимального навантаження визначені активним і пасивним способом знаходяться в один час. Теж саме можна сказати і про години мінімального навантаження, вони також визначаються в однаковий час. Можна помітити, що характер поведінки залежностей збігається, точки перегину ділянки спадання і ділянки зростання збігаються на діаграмах, отриманих різними способами.

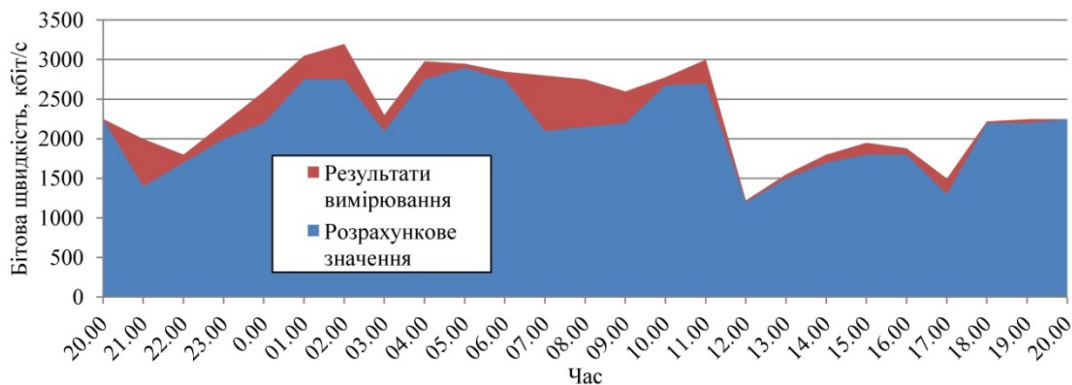


Рис. 7. Розрахункове та експериментальне значення бітової швидкості

Також варто відзначити, що даний спосіб призначений в основному для постійного моніторингу систем стільникового зв'язку в частині спостереження за бітовою швидкістю Internet-з'єднання.

Висновки

Основна задача дослідження бітової швидкості пасивним способом – це виявлення тенденцій в поведінці користувачів, а саме виявлення годин максимального та мінімального навантаження на базові станції.

При проведенні добових вимірювань в мережах стільникового зв'язку більш важлива динаміка досліджуваного процесу, ніж точність вимірювань. Важливо виявити моменти, коли бітова швидкість починає зменшуватися або зростати, це важливо для внесення корекції в роботу мережі, тим самим підтримуючи якість послуг на високому рівні. На основі даних про динаміку зміни бітової швидкості з'являється можливість динамічно перерозподіляти ресурси мережі. Наприклад протягом доби в години мінімального навантаження можна зменшувати потужність передавача, тим самим заощаджуючи електроенергію. При використанні динамічного режиму на одній базовій станції ефект економії електроенергії малопомітний, але при використанні динамічного режиму мережі в цілому дає значний економічний ефект. Наприклад енергоспоживання базової станції становить 500 Вт·год. Нехай при зниженні

потужності передавача в 2 рази загальне енергоспоживання керуючих і охолоджуючих систем складе 300 Вт·год. Розрахуємо загальну кількість спожитої електроенергії за місяць по дням, результати моделювання представимо у вигляді графіків на рис. 8.

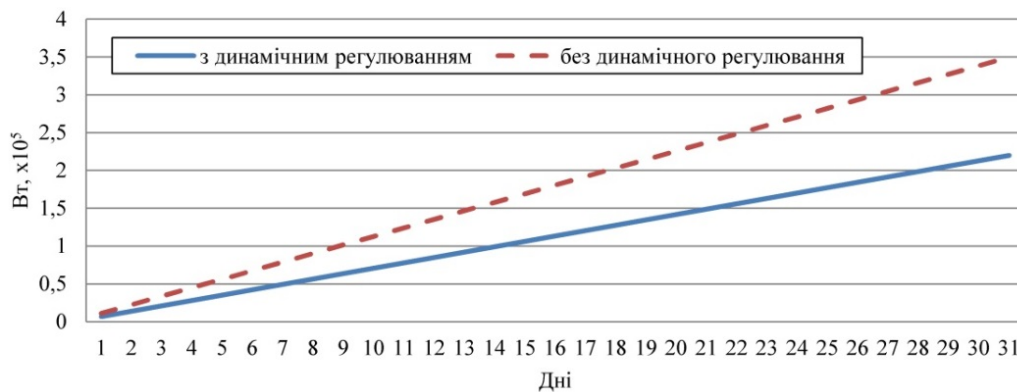


Рис. 8. Сумарне енергоспоживання базової станції

З рисунку видно, що сумарне енергоспоживання однієї базової станції без динамічного регулювання потужністю становить 0,35 МВт на добу, а з динамічним регулюванням становить 0,2 МВт на добу. Економія електроенергії від однієї базової станції може становити до 150 кВт на добу. У одного оператора стільникового зв'язку в регіоні нараховується близько 150–200 базових станцій. Таким чином сумарна економія електроенергії становить від 22,5 МВт до 30 МВт в місяць. Таким чином використання динамічного регулювання потужністю дозволяє знизити енергоспоживання, тим самим знизити тепловиділення та покращити умови експлуатації базових станцій операторів стільникового зв'язку.

Література

1. Holma N. W-CDMA for UMTS / N. Holma / John Wiley & Sons. – 2004. – 445 p.
2. Naworocki M. Understanding UMTS radio network. Modelling, planning and automated optimization / M. Naworocki, M. Dohler, A. Aghvami // John Wiley & Sons Ltd. – 2006. – 500 p.
3. Рерле Р. Д. Протоколи GPRS и их тестирование / Р. Д. Рерле, И. М. Ехриель И. В. Данилов // Сети и системы связи. – 2002. – № 12.
4. Якимчук Н. М. Кореляційно-регресійний аналіз інформаційних мереж з нестационарним трафіком / Н. М. Якимчук, П. О. Станко // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих учених «Актуальні проблеми інформаційних технологій: АРІТ-2018», 20-21 листопада 2018 р., м. Київ. – С. 128–130.
5. Якимчук Н. М. Характеристика системи тактової мережевої синхронізації для оцінки часу затримки мережі / Н. М. Якимчук, В. В. Оляньський // Дванадцята міжнародна конференція «Проблеми телекомунікацій» на базі Інституту телекомунікаційних систем і НДІТ НТУУ «КПІ», 16–20 квітня 2018 р., м. Київ. – С. 107–110.

References

1. Holma N. W-CDMA for UMTS / N. Holma / John Wiley & Sons. – 2004. – 445 p.
2. Naworocki M. Understanding UMTS radio network. Modelling, planning and automated optimization / M. Naworocki, M. Dohler, A. Aghvami // John Wiley & Sons Ltd. – 2006. – 500 p.
3. Rerle R. D. Protokoly GPRS i ih testirovanie / R. D. Rerle, I. M. Ehriel' I. V. Danilov // Seti i sistemy svjazi. – 2002. – № 12.
4. Yakymchuk N. M. Koreliatsiino-rehresiinyi analiz informatsiinykh merezh z nestatsionarnym trafikom / N. M. Yakymchuk, P. O. Stanko // Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsiia molodykh uchenykh «Aktualni problemy informatsiinykh tekhnolohii: ARIT-2018», 20-21 lystopada 2018 r., m. Kyiv. – S. 128–130.
5. Yakymchuk N. M. Kharakterystyka systemy taktovoi merezhevoi synkhronizatsii dlia otsinky chasu zatrymky merezhi / N. M. Yakymchuk, V. V. Olianskyi // Dvanadtsiata mizhnarodna konferentsiia «Problemy telekomunikatsiinykh system i NDIT NTUU «KPI», 16–20 kvitnia 2018 r., m. Kyiv. – S. 107–110.

Рецензія/Peer review : 19.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. ф.-м. наук., проф. Пастернак Я. М.