УДК 621.391.8
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/17

Михалевський Д. В.
Вінницький національний технічний університет

Василишин В. І.
Харківський національний університет
повітряних сил імені Івана Кожедуба

Макогон В. І.
Вінницький національний технічний університет

Макогон О. С.
Вінницький національний технічний університет

АНАЛІЗ ТРАФІКУ У БЕЗПРОВІДНИХ КАНАЛАХ СТАНДАРТУ WI-FI НА БАЗІ ЦИКЛІВ ПЕРЕДАЧІ КАДРІВ

У роботі проведено дослідження випадкових закономірностей сеансів передачі трафіку в безпровідних каналах стандарту Wi-Fi, які залежать від великої кількості факторів впливу. Така особливість створює певні обмеження існуючих методів аналізу трафіку при проектуванні та оптимізації сучасних корпоративних телекомунікаційних мереж. Для вирішення такого недоліку, проведено аналіз процесу передачі трафіку на канальному рівні та узгоджено із статистичними характеристиками циклів передачі й прийому кадрів на базі алгоритмів моніторингу стандарту Wi-Fi. Встановлено, що такий процес характеризується довготривалим зменшенням значень автокореляційної функції та випадковим розподілом інтервалів між циклами передачі кадрів, що може приводити до максимального завантаження ресурсів мережі. Особливо це спостерігається при існуванні факторів впливу та виникнення значної кількості помилок із створенням сеансів перезапиту або втрати кадрів.

Отримано, вирази циклів передачі та прийому кадрів на основі стаціонарного випадкового процесу із використанням алгоритму моніторингу, що дозволяє визначати основні статистичні параметри та передбачати виникнення певного роду випадкових подій. Запропоновано визначати основні закономірності циклів передачі кадрів на основі коефіцієнта квадратичної або лінійної функції регресійного аналізу результатів експериментальних досліджень. Отримано аналітичні вирази, які пов'язують взаємозв'язок фактору самоподібності з процесами передачі та прийому кадрів, як випадкового розподілу інтервалів. Це дає змогу значно спростити виявлення випадкових подій в певні інтервали часу та виконання над ними дій статистичного аналізу незалежно, як на вхідному, так і на вихідному трафіках. Практична реалізація такого підходу не потребує використання додаткових вузлів та засобів машинного навчання, що значно спрощує аналіз та збільшує швидкість отримання результату. Достовірність результатів за отриманими виразами залежить від періоду оцінювання або кількості циклів моніторингу, а також врахування факторів впливу.

Ключові слова: *аналіз трафіку, безпровідні канали, мережі стандарту Wi-Fi, самоподібний процес, статистичний аналіз.*

Постановка проблеми. Як відомо, трафік який передається у сучасних теле- та інфокомунікаційних мережах характеризується особливими випадковими закономірностями, які досить складно передбачити та оцінити із високою достовірністю [1]. В першу чергу, це зумовлено значним розвитком інформаційних технології та постійним ростом потреб користувачів у підвищенні якості послуг. Тенденція значного збільшення об'ємів інформації приводить до необхідності збільшення пропускної здатності каналів передачі та застосування нових методів розподілу й оптимізації сеансів передачі пакетів. Це необхідно враховувати при проектуванні сучасних корпоративних телекомунікаційних мереж, створюючи додаткові вузли для покращення покриття та ефективного розподілу потоків інформації.

Процес передачі трафіку, як правило, можна представити як функцію, яка залежить від часу [2]. На практиці таку залежність можна отримати на базі засобів моніторингу із фіксованими циклами вимірювання. В такому випадку, визначається

часовий ряд статистичного оцінювання параметрів функції. Аналіз швидкої чи повільної зміни властивостей функції в певні періоди дозволяє встановлювати міру випадковості. Проте, у безпровідних каналах існують різного роду фактори, які змінюють характеристики процесів передачі трафіку [3]. Такі фактори мають безпосередній вплив на отримання математичних моделей систем та процесів передачі трафіку, особливо систем із самоподібністю. Тому, врахування імовірності появи факторів впливу, в будь-який момент часу, в процесі сеансів передачі трафіку, є обов'язковим, що приведе до змін наближених характеристик функції розподілу процесу передачі трафіку та підвищить достовірність кінцевого результату.

Таким чином, для встановлення реальних характеристик процесів передачі трафіку у безпровідних мережах, необхідно дослідити процеси передачі трафіку на відповідність законам самоподібності та визначити вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на достовірність оцінювання, що є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо [3], сеанси передачі трафіку у безпровідних мережах стандарту Wi-Fi характеризуються існуванням інформаційних втрат на канальному та фізичному рівні. Це приводить до виникнення затримок і перевантажень службовою інформацією та зниження якості послуг для кінцевих пристроїв. Такі недоліки виникають із-за існування різноманітних факторів впливу у середовищі передачі. В такому випадку, керування ресурсами мережі, моніторинг та технічне обслуговування вимагає додаткових методів та засобів для забезпечення оптимального доступу до мережі та підвищення ефективності сеансів передачі кадрів [4]. В якості засобу аналізу можна використовувати Raspberry Pi, як окремий моніторинговий пристрій для оцінювання енергетичних та інформаційних параметрів мережі.

Для задач аналізу трафіку широкого поширення отримали складні моделі на базі машинного навчання [5]. Однак у мережах із високою пропускною здатністю потоки можуть надходити набагато швидше, ніж параметри результатів аналізу, особливо для складних моделей із високими затратами обчислювальних ресурсів. В такому випадку, доцільно застосовувати системи адаптивного обслуговування із використанням масштабування. Це передбачає використання додаткових механізмів балансування між високою швидкістю обслуговування та високою точністю із мінімальними затримками.

Використання додаткових апаратних та програмних засобів аналізу має вплив на часові характеристики передачі інформації у мережі та вносить похибки при оцінюванні інформаційних параметрів. З іншого боку, у середовищі постійно присутні джерела інтерференційних завад [6, 7], кількість яких збільшується із щільністю населення. Дію таких завад неможливо компенсувати та досить складно передбачити, але їх можна враховувати під час коригування сеансів передачі кадрів. Встановлено, що використання каналів із вузькою смугою підвищує ефективність сеансів передачі кадрів в умовах існування значної кількості факторів впливу та інтерференційних завад, особливо зі збільшенням відстані між абонентом та точкою доступу. Найбільш неприйнятний фактор – існування суміщеного інтерференційного каналу, де механізм боротьби за частотний ресурс буде працювати максимально, в результаті чого значно підвищується імовірність появи колізій та помилок у циклах передачі кадрів.

Наведені вище фактори впливу, необхідно враховувати під час виконання задач аналізу параметрів і характеристик безпровідних мереж на етапах проектування та експлуатації. Аналізуючи процеси передачі кадрів, які є механізмом передачі пакетів [8], можна визначати пропускну здатність, можливість забезпечення доступу до високоякісних послуг, особливості розподілу трафіку, оцінювання параметрів якості обслуговування та ін. Тому, оцінювання параметрів процесів передачі та прийому кадрів можна звести до визначення показника Херста. Враховуючи, що такий показний не завжди дає точні результати, в роботі [9] було запропоновано використовувати опис інтервалу часу між пакетами на основі розподілів Парето або Вейбулла та визначення циклів передачі пакетів у системі на базі формули Норроса. Це дало можливість підвищення достовірності отриманих результатів параметра Херста.

В роботі [10] запропоновано використання квадратичних та кубічних інтерполяційних функцій для підвищення точності прогнозування трафіку для автоматичного керування буферними пристроями. Це дає можливість простого та ефективного прогнозування піків трафіку з використанням методів екстраполяції.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності оцінювання трафіку у безпровідних каналах стандарту Wi-Fi на основі базових закономірностей, що пов'язують цикли передачі кадрів та процеси самоподібності.

Виклад основного матеріалу. В більшості випадків, аналіз трафіку в сучасних телекомунікаційних мережах є складним і важким завданням. Найбільш оптимальним та узагальненим способом опису сеансів передачі трафіку, можна вважати процес самоподібності, який можна описати імовірнісними характеристиками. В нашому випадку, розглядається трафік який передається у безпровідних мережах стандарту WI-FI, тому доцільно розглянути процес передачі трафіку виходячи із параметрів переданих N_{T_x} та прийнятих N_{R_x} кадрів [1]. Для спрощення, іншими параметрами та факторами знехтуємо. Використовуючи засоби моніторингу, фрагмент середньостатистичної інтенсивності трафіку у безпровідній мережі стандарту Wi-Fi 6 можна представити як на рис. 1.

Як видно із рис. 1, параметри N_{T_x} та N_{R_x} мають випадковий характер. Тоді, враховуючи [1], процес передачі та прийому кадрів, можна записати як стаціонарний випадковий процес, який можна узгодити із циклами моніторингу:

$$N_{T_x}(t) \approx N_{T_x}(nT), \quad N_{R_x}(t) \approx N_{R_x}(nT). \qquad (1)$$

Сумарна кількість кадрів за цикл моніторингу становить:

$$N = N_{T_x}(nT) + N_{R_x}(nT) = (N_{T_x} + N_{R_x})(nT), \qquad (2)$$

де T – період циклу моніторингу; n – кількість циклів моніторингу для отримання відповідної достовірності процесу.

Кореляційна функція запишеться так:

$$r(k) = \frac{\overline{(N(nT+k)-\overline{N})(N(nT)-\overline{N})}}{\sigma^2}, \qquad (3)$$

де $\overline{N}$ – середньостатистичне значення стаціонарного процесу, яке можна розрахувати за виразом:

$$\overline{N} = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} N_{T_x}(nT) + N_{R_x}(nT)\right), \qquad (4)$$

σ – дисперсія стаціонарного процесу, яка визначається як

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(N_{T_x}(nT) + N_{R_x}(nT) - \overline{N})^2.$$

Враховуючи [11], самоподібний процес характеризується довготривалим зменшенням значень автокореляційної функції та випадковим розподілом інтервалів між сеансами передачі кадрів. Якщо, в одному і тому ж інтервалі часу, виникають певного роду випадкові події, то це приводить до максимального завантаження ресурсів мережі. Для каналу стандарту Wi-Fi, поява таких подій показано на рис. 2, окремо для переданих та прийнятих кадрів

Такі піки трафіку можуть виникати в будь-який момент часу, передбачення яких, дає можливість підвищити ефективність керування ресурсами мережі, розвантажуючи відповідні вузли і канали. Тоді, для такого випадкового процесу кореляційна функція може мати наступний вигляд [12]:

$$r_H(k) = \frac{\sigma^2((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H})}{2}, \qquad (6)$$

де H – показник Херста, який показує ступінь самоподібності та визначається так:

$$H = 1 - \frac{m}{2}, \quad \text{де} \quad 0 < m < 1. \qquad (7)$$

Найбільш поширеним визначенням коефіцієнту Херста є метод нормованого розмаху [13], який базується на статистичному аналізі. Згідно методу, відношення відхилення трафіку від середньостатистичного значення до стандартного відхилення має вигляд квадратичної функції. Врахо-

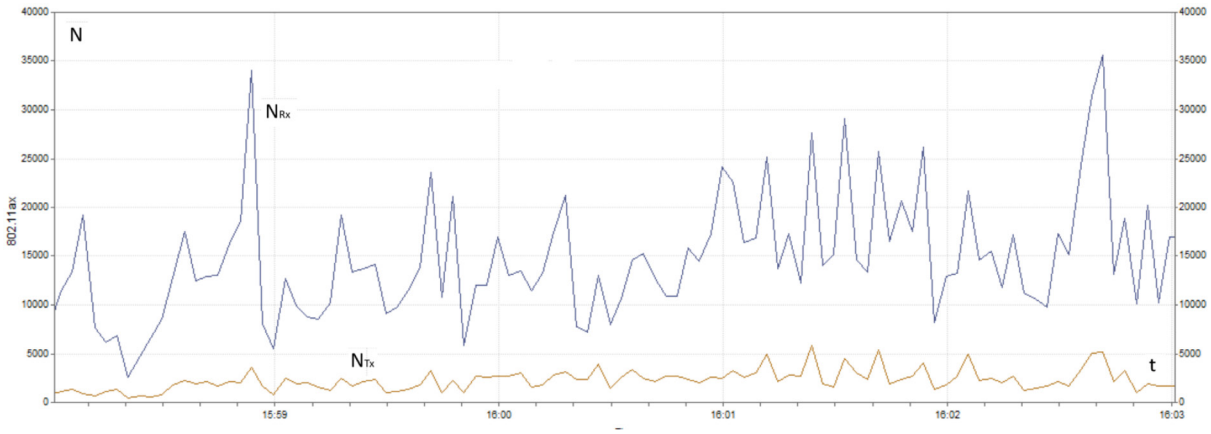
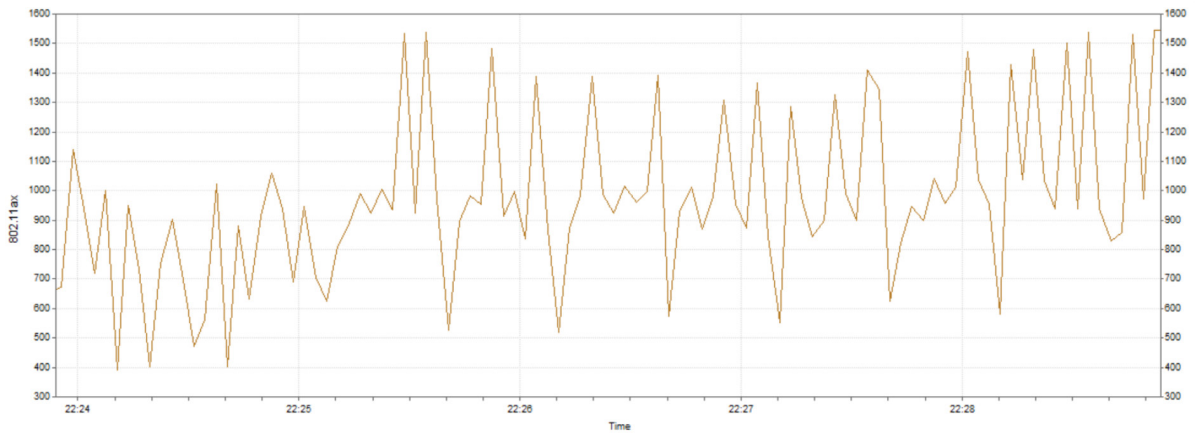
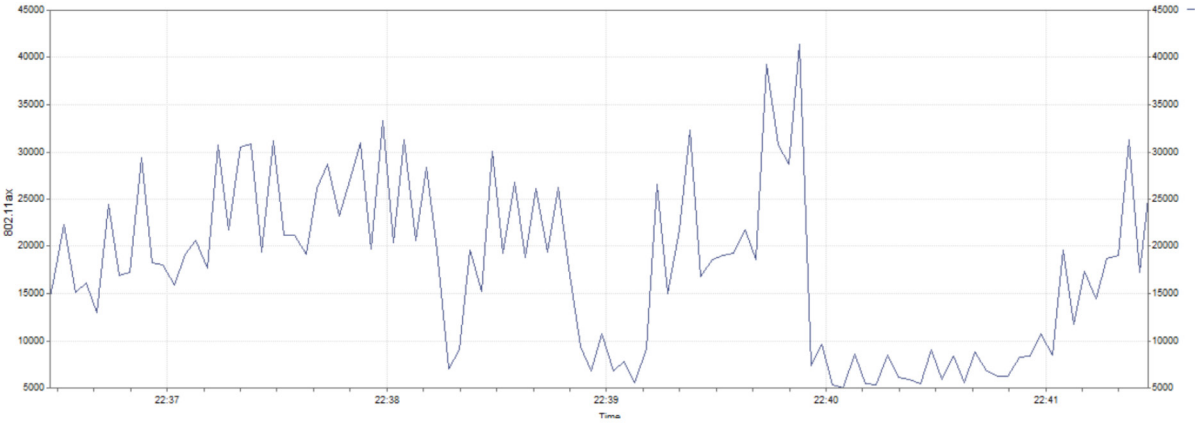


Рис. 1. Середньо-статистична інтенсивність сеансів передачі та прийому кадрів у безпровідній мережі стандарту Wi-Fi



а



б

Рис. 2. Фрагмент пікового завантаження ресурсів мережі для параметра N_{T_x} (а) та параметра N_{R_x} (б)

вуючи вирази (2), (4) і (5), для сеансів передачі та прийому кадрів можна записати наступне співвідношення нормованого розмаху:

$$\frac{\max(N(nT)-\overline{N})-\min(N(nT)-\overline{N})}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(N_{T_x}(nT)+N_{R_x}(nT)-\overline{N})^2}\approx a(nT)^H. \quad (8)$$

Звідки визначається коефіцієнт Херста як:

$$H\approx\log_{nT}\left(\frac{\max(N(nT)-\overline{N})-\min(N(nT)-\overline{N})}{a\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(N_{T_x}(nT)+N_{R_x}(nT)-\overline{N})^2}\right). \quad (9)$$

Враховуючи флуктуації трафіку в безпровідному каналі, як на рис. 2, середньостатистичне значення піку можна розрахувати так:

$$N_{\max}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\max_i\left(\sum_{j=1}^{k}N_{Rx}(kT)\right)+\max_i\left(\sum_{j=1}^{k}N_{Tx}(kT)\right)\right), \quad 10)$$

де m – кількість піків, отриманих під час моніторингу; k – кількість циклів моніторингу під час тривалості піку.

В результаті задача визначення основних закономірностей, що пов'язують цикли передачі кадрів та процеси самоподібності зводиться до визначення коефіцієнта квадратичної або лінійної функції на основі регресійного аналізу результатів експериментальних досліджень рядів $N_{T_x}(nT)$ і $N_{R_x}(nT)$ із використанням власних засобів моніторингу абонентських пристроїв. Достовірність оцінювання за співвідношеннями (9) і (10) залежить від періоду оцінювання або кількості циклів моніторингу nT, а також врахування факторів впливу. Для процесів передачі та прийому кадрів у безпровідному каналі стандарту Wi-Fi отримання достовірності 0.98, передбачає мінімальну кількість циклів моніторингу 360 і більше, що відповідає границям більше 0,5 для параметра Херста. Це видно і на базі експериментальних досліджень, якщо порівнювати рис. 1 та рис. 2. На рис. 2, за рахунок певних випадкових подій з'явилось значне відхилення від середньостатистичного значення, тому, в подальшому такі відхилення із високою імовірністю будуть повто-

рюватись, завантажуючи ресурси мережі до максимуму.

Висновки. Таким чином, аналіз трафіку у безпровідних мережах стандарту Wi-Fi, показує, поряд із зовнішніми та зовнішніми факторами впливу необхідно розглядати випадкові процеси, які пов'язані із явищами самоподібності. Для цього, отримано аналітичні вирази, які пов'язують взаємозв'язок фактору самоподібності з циклами передачі та прийому кадрів. Це дає змогу значно спростити виявлення випадкових подій в певні інтервали часу та виконання над ними дій статистичного аналізу незалежно, як на вхідному, так і на вихідному трафіках. Підвищення ефективності оцінювання трафіку досягається за рахунок використання статистичного аналізу параметрів циклів передачі та прийому кадрів, без використання додаткових вузлів та засобів машинного навчання, що значно спрощує аналіз та збільшує швидкість отримання результату.

Список літератури:

1. Mykhalevskiy D. V., Kychak V. M. Development of Information Models for Increasing the Evaluation Efficiency of Wireless Channel Parameters of 802.11 Standard. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2019. 56(5), Pp. 22–32. DOI: 10.2478/lpts-2019-0028

2. Habib M. A., Iturria-Rivera P. E., Ozcan Y., Elsayed M., Bavand M., Gaigalas R., Erol-Kantarci M. Transformer-Based Wireless Traffic Prediction and Network Optimization in O-RAN. WS03 ICC 2024 Workshop, IEEE 2023. Pp. 1–6 DOI: 10.48550/arXiv.2403.10808

3. Mykhalevskiy D., Vasylkivskyi N., Horodetska O. Development of a mathematical model for estimating signal streng that the input of the 802.11 standard receiver. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, Issue 9 (90). Pp. 38–43. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191

4. Safri M. N. H. M., Nik W. N. S. W., Mohamad Z., Mohama M. Wireless Network Traffic Analysis and Troubleshootingusing Raspberry Pi. International Journal of Engineering & Technology. 2018, № 7(2.15). Pp. 58–60. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.15.11213

5. Liu S., Shaowang T., Wan G., Chae J., Marques J., Krishnan S., Feamster N., ServeFlow: A Fast-Slow Model Architecture for Network Traffic Analysis. arXiv: 2402.03694. 2024. Pp. 1–26. DOI: 10.48550/arXiv.2402.03694

6. Михалевський Д. В., Красота Р. О., Гузь М. Д. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при дії інтерференційних завад. Sword. 2014. № 4(37) Том 5. С. 13–16.

7. Михалевський Д. В., Номировська В. В., Постернак О. М. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного та сусіднього інтерференційного каналів для стандарту 802.11n. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2015. № 2. С. 155–159.

8. Михалевський Д. В., Городецька О. С. Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для сімейства стандартів 802.11х у діапазоні 2.4 ГГц. Sword. 2015. В. 3(40). Том 3. С. 43–47.

9. Лєвєнберг Є. В. Точність розрахунку показника Херста та імовірності очікування обслуговування пакетів само подібного трафіка. Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. 2019. № 1. С. 80–86.

10. Стрелковська І. В., Соловська І. М., Макоганюк А. О., Северин М. В. Прогнозування характеристик самоподібного трафіку за допомогою сплайн-екстраполяції. Вісник Унівеситету «Україна». 2019. № 1(22), С. 188–195. DOI 10.36994/2707-4110-2019-1-22-21

11. Андрієнко В. М. Інструменти моніторингу фондових ринків. Причорноморські економічні студії. 2016. Вип. 9(1). С. 131–134.

12. Стрихалюк Б. М. Фрактальний спосіб прогнозування потоків у мультисервісних мережах. Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». 2009. № 645. С. 88–94.

13. Шуллє Ю. А. Аналіз графіків електричних навантажень промислових підприємств методом нормованого розмаху (R/S-аналіз) Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2015. № 2. С. 50–56.

Mikhalevsky D. V., Vasylyshyn V. I., Makogon O. S., Makogon V. I. ANALYSIS OF TRAFFIC IN WIRELESS CHANNELS OF THE WI-FI STANDARD

In this paper studies the random patterns of traffic transmission sessions in wireless channels of the Wi-Fi standard, which depend on a large number of influencing factors. This feature creates certain limitations of existing methods of traffic analysis in the design and optimization of modern corporate telecommunications networks. To solve this drawback, the traffic transmission process was analyzed at the channel level and coordinated with the statistical characteristics of the frame transmission and reception cycles based on the Wi-Fi standard monitoring algorithms. It was found that such a process is characterized by a long-term decrease in the values of the autocorrelation function and a random distribution of intervals between frame transmission cycles, which can lead to maximum load on network resources. This is especially observed in the presence of influencing factors and the occurrence of a significant number of errors with the creation of re-query sessions or frame loss.

Expressions of frame transmission and reception cycles based on a stationary random process using a monitoring algorithm were obtained, which allows determining the main statistical parameters and predicting the occurrence of a certain type of random events. It is proposed to determine the main patterns of frame transmission cycles based on the coefficient of the quadratic or linear function of the regression analysis of the results of experimental studies. Analytical expressions were obtained that relate the relationship of the self-similarity factor to the processes of frame transmission and reception, as a random distribution of intervals. This makes it possible to significantly simplify the detection of random events in certain time intervals and perform statistical analysis on them independently, both on the incoming and outgoing traffic. The practical implementation of such an approach does not require the use of additional nodes and machine learning tools, which significantly simplifies the analysis and increases the speed of obtaining the result. The reliability of the results according to the obtained expressions depends on the evaluation period or the number of monitoring cycles, as well as taking into account the influence factors.

Key words: *traffic analysis, wireless channels, Wi-Fi networks, self-similar process, statistic alanalysis.*