УДК 621.391.8
DOI https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-1/03

Михалевський Д.В.
Вінницький національний технічний університет

ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ РЕГРЕСІЇ В ОЦІНЮВАННІ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПРОВІДНИХ КАНАЛІВ СТАНДАРТУ 802.11

Аналіз сучасного стану досліджень показав, що безпровідне середовище, де працюють канали сімейства стандартів 802.11, характеризується значною кількістю різноманітних факторів впливу, які діють на основні показники ефективності. Найбільш достовірним підходом оцінювання параметрів безпровідних каналів є створення моделей і методів на базі емпіричних досліджень і статистичних зв'язків, що дає змогу враховувати велику кількість факторів впливу, але в такому разі виникає фактор, пов'язаний із рівнем адекватності моделей і статистичною достовірністю.

На основі проведених експериментальних і статистичних досліджень було встановлено, що коефіцієнт детермінації регресійного аналізу можна вважати ступенем адекватності моделей оцінювання основних параметрів безпровідного каналу стандарту 802.11. Тоді використання моделей оцінювання потужності сигналу на вході приймача й ефективної швидкості передачі інформації, побудованих на основі регресійного аналізу, має рівень адекватності моделей, не меншу за 0,95 та 0,9 відповідно.

Дослідження статистичної достовірності регресійного аналізу показали, що значення рівня флуктуацій основних параметрів каналу є наближеними до результатів, отриманих на основі довіркових інтервалів регресії. Отримано: довірковий інтервал при імовірності 0,95, який показує усереднене значення флуктуацій основних параметрів каналу для прямої видимості та з мінімальною кількістю завад; довірковий інтервал при імовірності 0,999, який показує флуктуації основних параметрів для умов приміщення де існує явище багатопроменевого поширення хвиль. Довірковим інтервалом коефіцієнтів спадання можна нехтувати, а відхилення оцінки рівня флуктуацій від середнього значення є незначним, що в найгірших випадках становитиме приблизно ±1,2 дбм та ±0,4 Мб/с.

Аналогічні результати можна отримати для інших значень імовірності за наявності інших факторів впливу.

Ключові слова: *безпровідний канал, стандарт 802.11, ефективна швидкість передачі інформації, потужність сигналу, адекватність моделі, статистичний достовірність.*

Постановка проблеми. Як відомо [1–4], безпровідне середовище, де працюють канали сімейства стандартів 802.11, характеризується значною кількістю різноманітних факторів впливу, які діють на основні показники ефективності. Для зменшення дії таких факторів при операціях технічної діагностики на етапах проектування й експлуатації мереж необхідно встановити їх зв'язок із основними параметрами каналу. Найбільш достовірним підходом оцінювання параметрів безпровідних каналів є створення моделей і методів на базі емпіричних досліджень і статистичних зв'язків, які отримуються із використанням методів регресії [5–7]. У свою чергу, моделі отримуються на основі регресійного аналізу зі знаходженням коефіцієнтів рівнянь регресії [8], але створення моделей базується на отриманні масивів із великою кількістю точкових вимірювань, які мають випадковий характер і піддаються впливу значної кількості факторів. Це приводить до виникнення флуктуацій основних параметрів каналу від середньостатистичних значень [9–10], рівень яких залежить від кількості таких факторів і їх коефіцієнт впливу. Тому для всіх моделей оцінювання параметрів безпровідних каналів стандарту 802.11 на основі регресійного аналізу існує проблема адекватності та статистичної достовірності масивів вимірювань, які необхідно враховувати.

Постановка завдання. Як відомо [1], безпровідні канали стандарту 802.11 мають три основні параметри, які визначають енергетичний та інформаційний коефіцієнти ефективності: потужність сигналу на вході приймача P_m, ефективну швидкість передачі інформації V_{eff}, пропускну здатність каналу V_{pl}. Перші два параметри найбільше підходять для операцій технічної діагностики та визначення можливостей каналу в реальних задачах. Параметр P_m досить просто вимірюється за допомогою алгоритмів моніторингу [5] та апаратних

можливостей абонентських пристроїв, на відміну від V_{eff}, де необхідно використовувати додатки прикладного рівня та створювати сеанси передачі інформації. Все це супроводжується досить великою кількість факторів впливу, які виникають як у фізичному середовищі, так і в програмному, а також на кінцевому етапі оцінювання результатів діагностики. Оскільки основні діагностичні параметри мають флуктуації, то для аналізу та побудови моделей оцінювання доцільно використовувати рівнянь регресій зі знаходженням відповідних коефіцієнтів. Внаслідок регресійного аналізу виконується пошук моделі, яка найбільш точно відповідатиме реальним значенням із високим коефіцієнтом детермінації [11]. Виникає неточність оцінювання діагностичних параметрів, що можна охарактеризувати як ще один фактор впливу на кінцевий результат. Такий фактор складається із двох складових частин, таких як: адекватність моделі на основі регресійного аналізу, що показує наскільки точно середньостатистичне значення описує отриманий масив вимірювань; статистична достовірність моделей регресії, що показує довірковий інтервал враховуючи розсіювання результатів вимірювання. Тому для врахування такого фактору необхідно виконати оцінку адекватності моделей регресії основних параметрів безпровідного каналу та визначити їх статистичну достовірність.

Постановка завдання. Метою статті є визначення ступеня адекватності наявних моделей оцінювання основних параметрів безпровідних каналів стандарту 802.11 з використанням методів регресії та встановлення їх статистичної достовірності.

Виклад основного матеріалу досліджень. Для прикладу візьмемо лінійну модель регресії для коротких каналів без перешкод і завад довжиною до 16 м [12]. Тоді, маємо такі моделі оцінювання:

$$P_m(l) \approx al + P_0 \qquad V_{eff}(l) \approx bl + V_0 \qquad (1)$$

де a і b – коефіцієнти спадання регресії; P_0 і V_0 – початкові значення регресії; l – довжина каналу.

Оцінку параметрів регресії можна визначити через випадкові точкові величини, які можна записати так:

$$a_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{m.i} \sum_{i=1}^{n} l_i^2 - \sum_{i=1}^{n} l_i \sum_{i=1}^{n} P_{m.i} l_i}{n\sum_{i=1}^{n} l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} l_i\right)^2}, \quad P_0^m = \frac{n\sum_{i=1}^{n} P_{m.i} l_i - \sum_{i=1}^{n} l_i \sum_{i=1}^{n} P_{m.i}}{n\sum_{i=1}^{n} l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} l_i\right)^2},$$

$$b_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{eff.i} \sum_{i=1}^{n} l_i^2 - \sum_{i=1}^{n} l_i \sum_{i=1}^{n} V_{eff.i} l_i}{n\sum_{i=1}^{n} l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} l_i\right)^2}, \quad V_0^m = \frac{n\sum_{i=1}^{n} V_{eff.i} l_i - \sum_{i=1}^{n} l_i \sum_{i=1}^{n} V_{eff.i}}{n\sum_{i=1}^{n} l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} l_i\right)^2},$$

де n – кількість вимірювань у вибірці.

Зв'язок між діагностичними параметрами можна визначити на основі функцій статистичного зв'язку, які можна отримати на основі ліній регресій. Отримаємо:

$$V_{eff} = m_{V_{eff}}(P_m), \quad P_m = m_{P_m}(V_{eff}). \qquad (2)$$

де m_{Veff} та m_{Pm} – коефіцієнти звязку регресії.

Враховуючи кореляційний зв'язок між двома випадковими величинами [11], можна стверджувати, що ступінь зв'язку між діагностичними параметрами безпровідного каналу стандарту 802.11 можна записати так:

$$r(V_{eff}, P_m) = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\left(V_{eff.i} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_{eff.i}\right)\left(P_{m.i} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_{m.i}\right)\right)}{\sigma_{V_{eff}}\sigma_{P_m}}, \qquad (3)$$

де $P_{m.i}$ і $V_{eff.i}$ – вибірки вимірювальних значень основних діагностичних параметрів P_m та V_{eff}; σ_{P_m} і $\sigma_{V_{eff}}$ – дисперсії діагностичних параметрів, що показують їх флуктуації.

Коефіцієнти регресії розраховуються як оцінка випадкових точкових величин $P_{m.i}$ і $V_{eff.i}$ [11]. Тоді, враховуючи оціночні й отримані значення діагностичних параметрів, основна регресійна залежність буде визначатися так:

$$\sum_{i=1}^{n}\left(P_{m.i} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_{m.i}\right)^2 = \sum_{i=1}^{n}\left(P_{m.i} - P_{m.i}^1\right)^2 + \sum_{i=1}^{n}\left(P_{m.i}^1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_{m.i}\right)^2,$$

$$\sum_{i=1}^{n}\left(V_{eff.i} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_{eff.i}\right)^2 = \sum_{i=1}^{n}\left(V_{eff.i} - V_{eff.i}^1\right)^2 + \sum_{i=1}^{n}\left(V_{eff.i}^1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_{eff.i}\right)^2,$$

де $P^l_{m.i}$ і $V^l_{eff.i}$ – передбачувані значення діагностичних параметрів;$(P_{m.i} - P^l_{m.i})$ та $(V_{eff.i} - V^l_{eff.i})$ – остатки регресії.

Оцінка якості моделі регресії можна оцінити залежністю передбачуваних значень від остатків, яка має назву коефіцієнт детермінації. Таким чином, можна отримати:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(P_{m.i}^1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_{m.i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(P_{m.i} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_{m.i}\right)}, \quad r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(V_{eff.i}^1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_{eff.i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(V_{eff.i} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_{eff.i}\right)^2}. \qquad (4)$$

Оскільки коефіцієнт детермінації вказує, наскільки отримана модель регресії відповідає емпіричним дослідженням, то її можна прийняти як ступінь адекватності моделей оцінювання основних параметрів безпровідного каналу стандарту 802.11.

Далі виконаємо аналіз отриманих емпіричних досліджень на основі моделей (1). Для цього скористаємося проведеними дослідженнями у роботі [12] для безпровідного каналу 802.11ac 40 МГц.

Діаграми розсіювання результатів вимірювання параметра P_m із використанням лінійної регресії наведена на рис. 1.

Модель регресії є усередненим значенням діаграми розсіювання, що проходить через середні значення таких точок. Коефіцієнти зв'язку регресії становлять: $r\approx$-0,975 та $r^2\approx$0,95. Розподіл параметра P_m по довжині каналу має виражені флуктуації, які в різні періоди спостереження можуть мати різні значення, але не більші, ніж в інтервалі між максимальним і мінімальним значеннями [1; 7]. Якщо встановити імовірність 0,999, то можна отримати діаграму розсіювання, де довірковий інтервал набуде розмаху, що буде еквівалентно флуктуаціям характеристик розподілу сигналу у просторі (див. рис. 1 б). Враховуючи таку закономірність, можна оцінювати рівень флуктуацій діагностичних параметрів на основі задання імовірності довіркових інтервалів регресії, нехтуючи довірковим інтервалом коефіцієнта спадання a [5; 6].

Далі розглянемо діаграму розсіювання для параметра V_{eff}, які наведено на рис. 2.

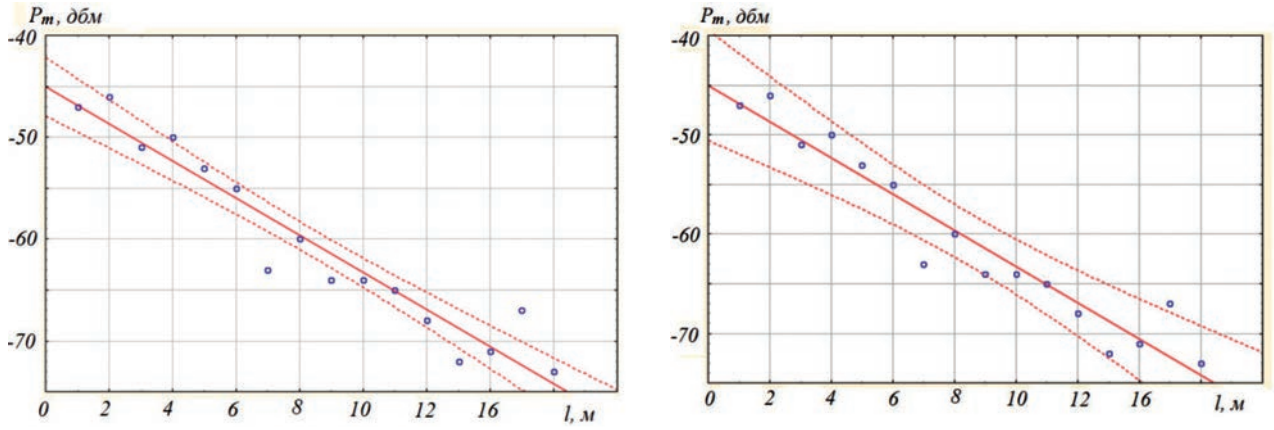
Коефіцієнти зв'язку регресії становлять: $r\approx$-0,95 та $r^2\approx$0,9. Такий результат підтверджує результати оцінювання достовірності емпіричних досліджень [12]. Достовірність є дещо меншою, ніж у P_m, через меншу кількість отриманих вимірювань і появу додаткових інформаційних дестабілізуючих факторів.

Враховуючи вирази (3), можна виконати регресійний аналіз між основними діагностичними параметрами. Враховуючи спільний параметр l, результати статистичного зв'язку для імовірності 0,95 можна представити на рис. 3.

Коефіцієнти зв'язку регресії становлять: $r(V_{eff}/P_m,l)\approx$0,95 та $r(V_{eff}/P_m,l)\approx$0,9.

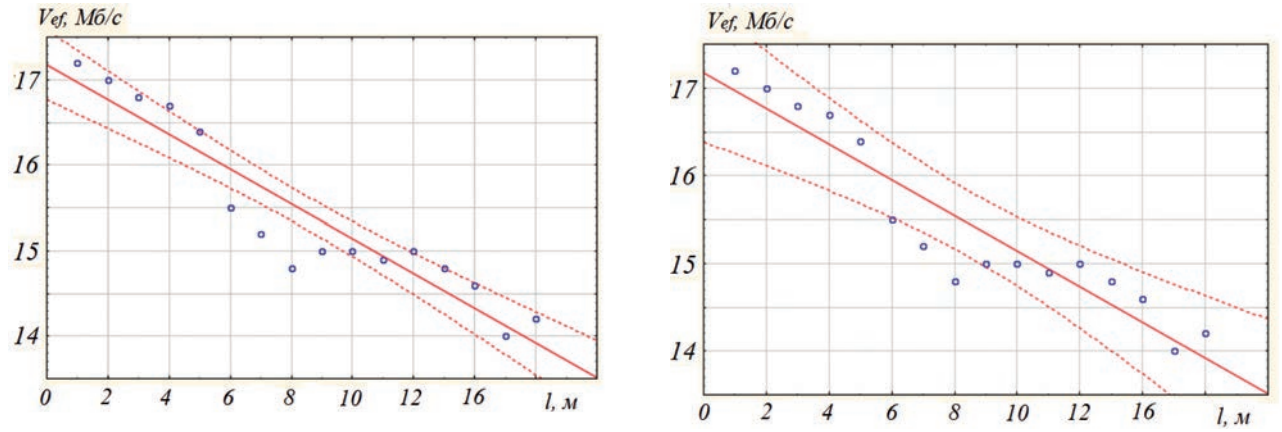
Наявність розсіювання результатів вимірювання визначає рівень статистичної достовірності основних параметрів безпровідного каналу. Тоді використання моделей, побудованих на основі регресійного аналізу, дасть адекватність моделей оцінювання потужності сигналу на вході приймача й ефективної швидкості передачі інформації, не меншою за 0,95 та 0,9 відповідно.

Використовуючи отримані результати, визначимо рівень флуктуацій основних діагностичних



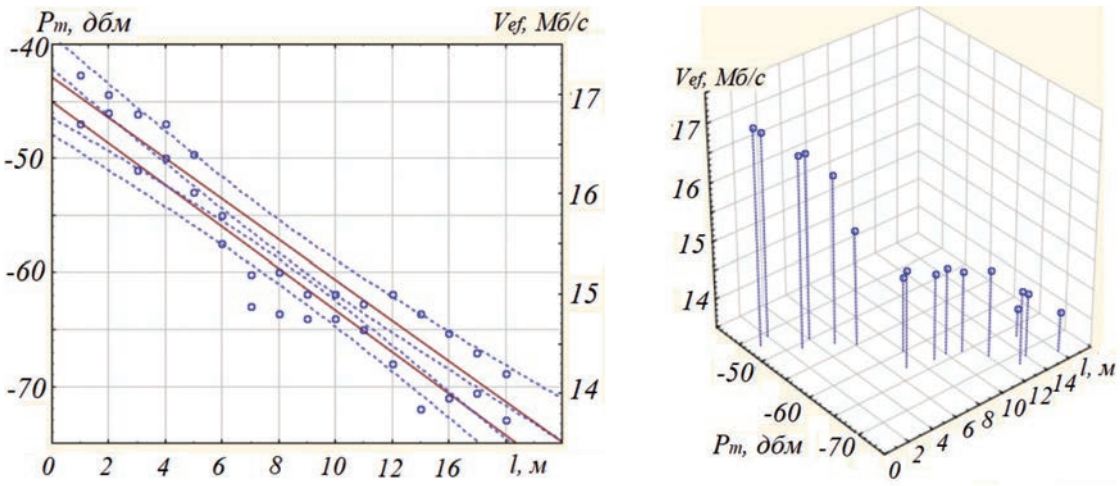
а) б)

Рис. 1. Діаграма розсіювання параметра P_m для: а – імовірності 0,95; б – імовірності 0,999



а) б)

Рис. 2. Діаграма розсіювання параметра V_{ef} для: а – імовірності 0,95; б – імовірності 0,999



а) б)

Рис. 3. Діаграми розсіювання діагностичних параметрів імовірності: а – 2 мірна; б – 3-мірна

параметрів ΔP і ΔV. Такі параметри є еквівалентом різниці між максимальним і мінімальним значенням довіркового інтервалу початкових значень регресії, які можна розрахувати так:

$$\Delta P \approx 2t\sigma_P^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^{n} l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^{n} \left(l_i - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} l_i \right)^2}},$$

$$\Delta V \approx 2t\sigma_V^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^{n} l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^{n} \left(l_i - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} l_i \right)^2}},$$

де t – аргумент функції Лапласа; l – довжина безпровідного каналу.

Після розрахунків отримаємо:

$$\Delta P(0,95) \approx \pm 2,5 \ \ дбм; \ \ \Delta V(0,95) \approx \pm 0,5 \ \ Мб/с; \quad (5)$$

$$\Delta P(0,999) \approx \pm 5 \ \ дбм; \quad \Delta V(0,999) \approx \pm 1 \ \ Мб/с.$$

Виконуючи аналіз отриманих результатів параметрів ΔP і ΔV, можна сказати, що вони є наближеними до результатів, які отримані на основі довіркових інтервалів регресії. Тому можливо задавати довірковим інтервалом рівень флуктуацій діагностичних параметрів. Із виразів (5) видно, що довірковий інтервал при імовірності 0,95 показує усереднене значення флуктуацій основних параметрів каналу для прямої видимості та з мінімальною кількістю завад. При імовірності 0,999 довірковий інтервал охоплює флуктуації для умов приміщення, де існує явище багатопроменевого поширення хвиль. Аналогічні результати для інших значень імовірності можна отримати за наявності інших факторів впливу. Відхилення параметрів ΔP і ΔV від середнього значення є незначним, що можна отримати приблизно $\Delta P \pm 1,2$ *дбм* та $\Delta V \pm 0,4$ *Мб*/с, що є досить незначним відхиленням відносно флуктуацій, отриманих емпіричним шляхом. Крім того, такі відхилення автоматично можуть враховуватися при встановленні певного запасу за умов контролю бітової швидкості.

Висновки. У роботі запропоновано спосіб визначення ступеня адекватності наявних моделей оцінювання основних параметрів безпровідних каналів стандарту 802.11, які побудовані на основі методів регресії. Встановлено, що для моделей оцінювання потужності сигналу на вході приймача й ефективної швидкості передачі інформації ступінь адекватності становить не менше за 0,95 та 0,9 відповідно. Використовуючи статистичну достовірність моделей регресії, можна задавати рівень флуктуацій основних параметрів каналу.

Список літератури:

1. Mykhalevskiy D.V. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences.* № 1. P. 41–51. 2019. DOI: 10.2478/lpts-2019-0004.

2. Rathod K., Vatti R., Nandre M. Optimization of Campus Wide WLAN. *International Journal of Electrical Electronics & Computer Science Engineering.* V. 4. I. 5. P. 1–6. 2017.

3. Sârbu A., Sârbu M. Şumălan C. Non Wi-Fi Devices Interference Testing in a 2.4 GHz Wi-Fi Home. *Land Forces Academy Review*. Vol. 23. I. 2 (90). P. 143–150. 2018. DOI: https://doi.org/10.2478/raft-2018-0017.

4. 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.* № 2. 2015. С. 155–159.

5. Mykhalevskiy D., Vasylkivskiy N., Horodetska O. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. № 4/9 (88). P. 38–43. 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191.

6. Mykhalevskiy D. Construction of mathematical models for the estimation of signal strength at the imput to the 802.11 standard receiver in a 5 GHz band. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. № 6/9 (96). P. 16–21. 2018. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983.

7. Mykhalevskiy D.V., Horodetska O.S. Investigation of wireless channels according to the standard 802.11 in the frequency range of 5 GHz for two subscribers. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERD)*. № 42 (2). P. 50–57. 2019. Doi: 10.26480/jmerd.02.2019.50.57.

8. Бакарджиєв Р.О., Комаров А.О., Особливості оцінки результатів регресійного аналізу. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* № 5. Вип. 28. 2015. С. 237–244.

9. Chapre Y., Mohapatra P., Jha S., Seneviratne A. Received Signal Strength Indicator and Its Analysis in a Typical WLAN System. *38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*. 2013. P. 304–307. DOI: 10.1109/LCN.2013.6761255.

10. Михалевський Д.В. Дослідження потужності сигналу приймачів сигналу WI-FI. Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "TPMSPS". Sep. 22-24, 2014, Dubai, Київ : Знання України. С. 29–31.

11. Літнарович Р.М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу : навчальний посібник. МЕГУ, Рівне, 2011, 140 с.

12. Mykhalevskiy D.V. Method for estimating the effective data rate in 802.11 channel with using monitoring algorithm. *Journal of Applied Research and Technology*. № 18 (3). 2020. P. 119–128. DOI: 10.22201/icat.24486736e.2020.18.3.1089.

Mykhalevskyi D.V. ASSESSMENT OF ADEQUACY OF REGRESSION MODELS IN EVALUATION OF MAIN PARAMETERS OF WIRELESS CHANNELS OF STANDARD 802.11

Analysis of the current state of research has shown that the wireless environment where the channels of the family of 802.11 standards operate is characterized by a significant number of different factors that affect the main performance indicators. The most reliable approach to estimating wireless parameters is to create models and methods based on empirical research and statistical relationships, which allows a large number of influencing factors to be taken into account. But in this case there is a factor related to the level of adequacy of the models and statistical reliability.

Based on experimental and statistical studies, it was found that the coefficient of determination of regression analysis, to some extent, can be considered as the degree of adequacy of models for estimating the basic parameters of the wireless channel standard 802.11. Then, the use of models for estimating the signal power at the input of the receiver and the effective data rate, built on the basis of regression analysis, has a level of adequacy of the models of not less than 0.95 and 0.9, respectively.

Studies of the statistical significance of regression analysis have shown that the values of the level of fluctuations of the main parameters of the channel are close to the results obtained on the basis of confidence intervals of regression. As a result, we obtained: a confidence interval with a probability of 0.95, which shows the average value of the fluctuations of the main parameters of the channel for direct visibility and with a minimum number of interferences; a confidence interval with a probability of 0.999, which shows the fluctuations of the main parameters for the conditions of the room where there is a phenomenon of multipath propagation. In this case, the confidence interval of the decay coefficients can be neglected, and the deviation of the estimation of the level of fluctuations from the average value is insignificant, which in the worst cases will be approximately ± 1.2 dBm and ± 0.4 Mb / s.

Similar results can be obtained for other probability values in the presence of other influencing factors.

Key words: *wireless channel, 802.11 standard, effective data rate, signal strength, model adequacy, statistical reliability, statistical relationship.*