

ВПЛИВ НЕІДЕАЛЬНОСТЕЙ РАДІОЧАСТОТНОГО ІНТЕРФЕЙСУ НА ВЕКТОР ПОМИЛКИ (EVM) У СИСТЕМАХ LTE ТА 5G

¹Хмельницький політехнічний фаховий коледж
національного університету «Львівська політехніка»

²Хмельницький національний університет

Розвиток телекомунікацій іде шляхом збільшення швидкості передачі інформації, підвищення якості зв'язку, надання нових сервісів. Сучасні мобільні телефони мають передавач і приймач, що розміщуються в одному корпусі. Радіочастотний інтерфейс (RF Front End) відіграє важливу роль у забезпеченні якісного зв'язку, що оцінюється величиною вектора помилки (EVM). Зниження EVM дозволяє покращити швидкість передачі, зменшити втрати пакетів. Робота присвячена дослідженню впливу неідеальності радіочастотного інтерфейсу на рівень EVM в сучасних телекомунікаціях. На рівень EVM впливає синфазний та квадратурний дисбаланс, фазовий шум, нелінійності підсилювача потужності, а також наявність шуму в каналі зв'язку та завадостійкість сигнально-кодової конструкції. Дисбаланс I/Q виникає внаслідок невідповідності підсилення або фазового зсуву між паралельними ділянками перетворень сигналів у передавачі. Підсилювач з регульованим підсиленням (VGA) змінює рівень сигналу на вході підсилювача потужності (HPA), зменшуючи або збільшуючи його потужність. Таким чином, HPA працює в режимі насичення або з певним запасом (back-off). Чим більший IBO (вхідний запас підсилення), тим менша вхідна потужність сигналу до HPA і тим менше спотворень, але ефективність підсилювача при цьому знижується. При збільшенні підсилення VGA, вхідна потужність до HPA зростає, що зменшує IBO і призводить до нелінійних спотворень через насичення HPA. Фазовий шуму гетеродину розширює спектральну густину потужності сигналу, призводить до відхилення фази кожної підносійної, що порушує їх ортогональність і призводить до виникнення завад. Досліджені Simulink моделі передавача і приймача цифрової системи зв'язку з додатково введеними погіршеннями радіочастотних блоків, оцінені рівні EVM, потужність в каналі. При зміні IQ амплітудного дисбалансу від 0 до 3 дБ, величина EVM збільшується від -32 дБ до -15дБ для SNR=50 дБ. При зміні IQ фазового дисбалансу від 0 до 15°, величина EVM збільшується від -32 дБ до -17дБ для SNR=50 дБ при максимальному значенні -22 дБ для 64-QAM.

Ключові слова: радіочастотний інтерфейс (RF Front End), величина вектора помилки (EVM), LTE, 5G, IQ модулятор

Вступ

Радіочастотний інтерфейс (RF Front End) в сучасних мобільних телекомунікаціях відіграє важливу роль у забезпеченні якісного зв'язку та передачі даних [1]. Він забезпечує узгодження з антеною і перетворення сигналів до вигляду, придатного для подальшої обробки або випромінювання у вільний простір [2]. Для сумісності з різними стандартами зв'язку (3G, 4G, 5G, Wi-Fi, GPS) [3-6], радіочастотний інтерфейс надає окремий шлях передачі і перетворення сигналів для кожного стандарту [7, 8]. Однак, у вказаних роботах не проаналізована залежність якості зв'язку від відношення сигнал-шум, одним з показників якого є величина вектора помилки.

Метою роботи є дослідження впливу неідеальностей радіочастотного інтерфейсу на вектор помилки (EVM) у системах LTE та 5G. Величина вектора помилки є мірою різниці між ідеальними символами та вимірними символами після вирівнювання. Результат EVM визначається як квадратний корінь відношення середньої потужності вектора помилки до середньої опорної потужності, вираженої у відсотках. Потім значення EVM обчислюється як середнє квадратичне вимірних значень. Для зручності відображення залежностей, значення EVM на графіках приводиться у децибелах.

Результати дослідження

Сучасні мобільні телефони мають передавач і приймач, що розміщуються в одному корпусі. Для перенесення спектру сигналів з основної смуги частот на носійну частоту,

використовують подвійне перетворення частоти і радіочастотний інтерфейс потрібний для формування сигналу на антену для передавача, або початкового підсилення і формування сигналу приймача. На рис. 1 приведена структурна схема сучасного мобільного телефона.

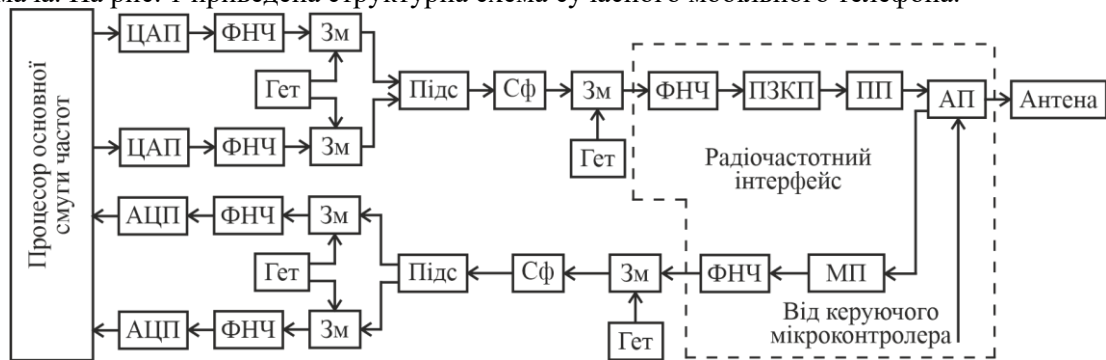


Рис. 1. Структурна схема мобільного телефона (ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, ФНЧ – фільтр нижніх частот, Зм – змішувач, Гет – гетеродин, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, Підс – підсилювач, Сф – смуговий фільтр, ПЗКП – підсилювач з змінним коефіцієнтом підсилення (driver), ПП – підсилювач потужності, АП – антенний перемикач)

Щоб покращити рівень вихідної потужності, використовують ПЗКП для попереднього підсилення радіочастотних сигналів перед підсилювачем потужності (рис. 1).

Основними цілями LTE, 5G є досягнення низької затримки та високої швидкості передачі даних. Пропускна здатність бездротової системи визначається за формулою Шеннона:

$$C = W \log_2(1 + S/N),$$

де C – пропускна здатність каналу зв'язку; S – середня потужність прийнятого сигналу; N – середня потужність шуму.

Розглянемо Simulink модель цифрової системи зв'язку LTE та 5G, яка приведена на рис. 2.

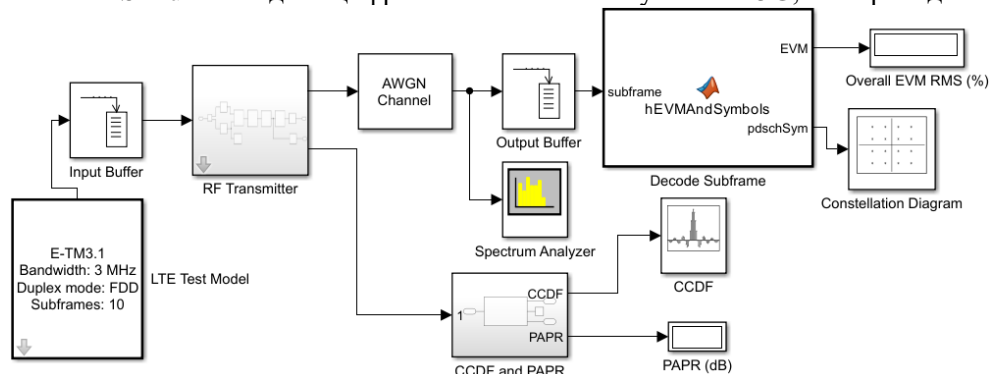


Рис. 2. Simulink модель цифрової системи зв'язку LTE та 5G

Проведемо дослідження впливу радіочастотних спотворень: синфазний та квадратурний дисбаланс, фазовий шум та нелінійності підсилювача потужності на продуктивність радіочастотного передавача LTE та 5G.

Спектр сигналу на виході передавача, що виділяє Spectrum Analyzer, приведений на рис. 3

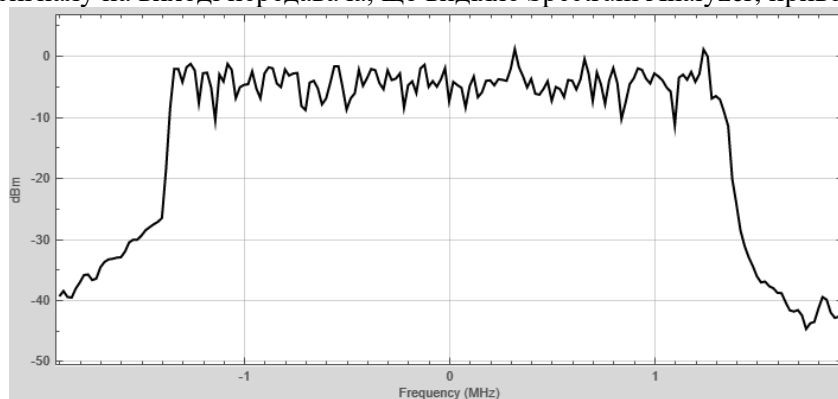


Рис. 3. Спектр сигналу на виході передавача

Сузір'я сигналу 64-QAM [9] на виході передавача приведена на рис. 4. На рис. 5 приведене сузір'я 64-QAM при наявності дисбалансу: I/Q gain mismatch = 3 dB; I/Q phase mismatch = 10°

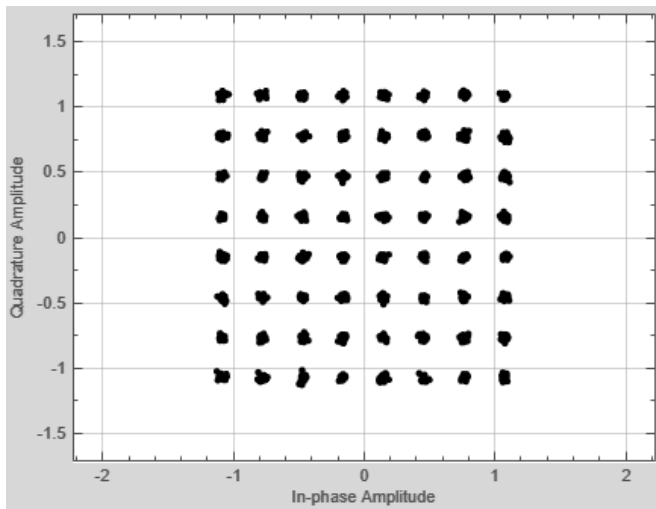


Рис. 4. Сузір'я 64-QAM на виході передавача

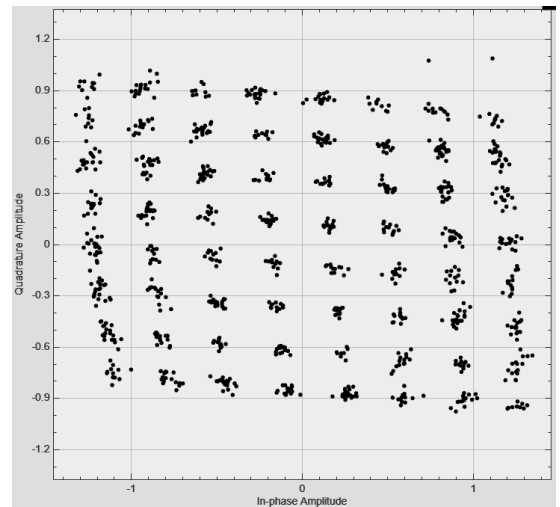


Рис. 5. Сузір'я 64-QAM при наявності дисбалансом: I/Q gain mismatch = 3 dB; I/Q phase mismatch = 10°

На рис. 6 показана Simulink модель блоку RF Transmitter, що складається з трьох основних частин: генератор сигналів основної смуги частот; радіочастотний передавач з перетворенням сигналу на носійну частоту; приймач та демодулятор сигналу з розрахунком EVM [10].

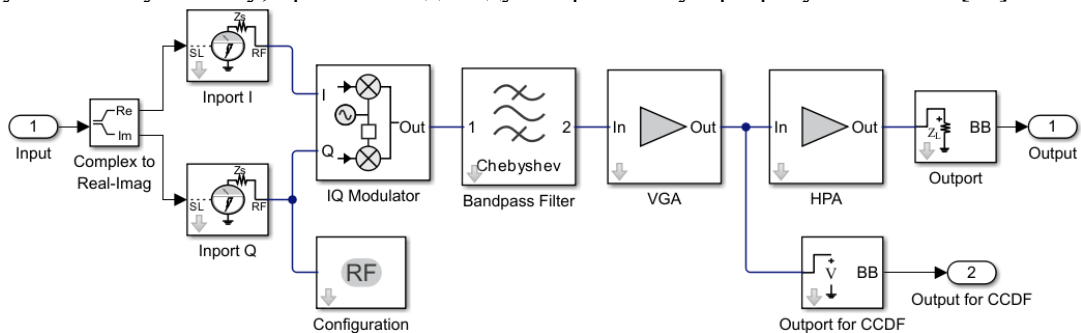


Рис. 6. Simulink модель блоку RF Transmitter

Блок Inport дозволяє вказати комплексні огинаючі входних сигналів та імпортувати їх як радіочастотні сигнали. Комплексні сигнали на вході квадратурного модулятора $I_{np}(t) + jQ_{np}(t)$ мають проміжну частоту f_{np} , а на виході – носійну, що визначається виразом:

$$out = \text{Re} \left(\sum_{k=1}^N (I_n(t) + jQ_n(t)) \cdot e^{j2\pi f_n t} \right)$$

Це відображено на рис. 7. Далі відбувається перетворення комплексних огинаючих сигналу: фільтрація, попереднє підсилення за допомогою VGA (ПЗКП) і підсилення потужності.

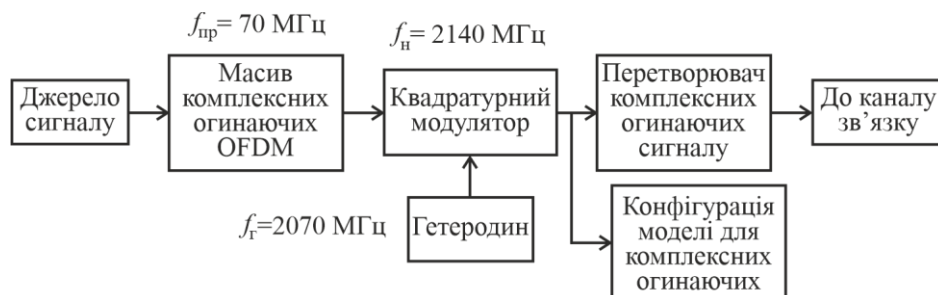


Рис. 7. Еквівалентна структурна схема Simulink моделі блоку RF Transmitter

Блок RF Transmitter Subsystem має наступні компоненти: модулятор IQ; смуговий фільтр; підсилювач потужності [11]. Передавач включає підсилювач зі змінним коефіцієнтом підсилення (VGA) для управління рівнем входного ослаблення (IBO) підсилювача високої потужності (HPA).

Модель радіочастотного приймача приведена на рис. 8.

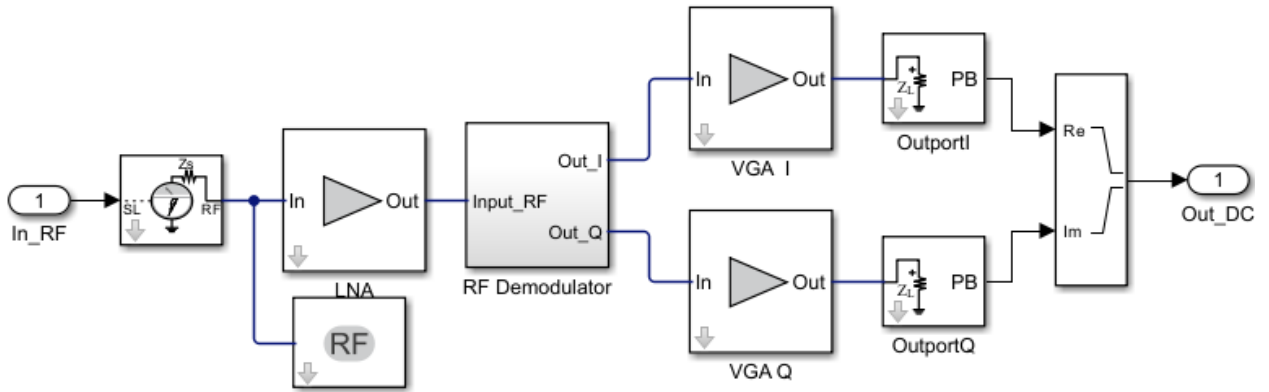


Рис. 8. Simulink модель блоку Decode Subframe

Дисбаланс I/Q виникає внаслідок невідповідності підсилення або фази між паралельними ділянками перетворень сигналів у передавачі. Залежність величини вектора помилки від SNR для рідної величини дисбалансу I/Q приведено на рис. 9. Залежність величини вектора помилки від SNR для різної фази дисбалансу I/Q приведено на рис. 10

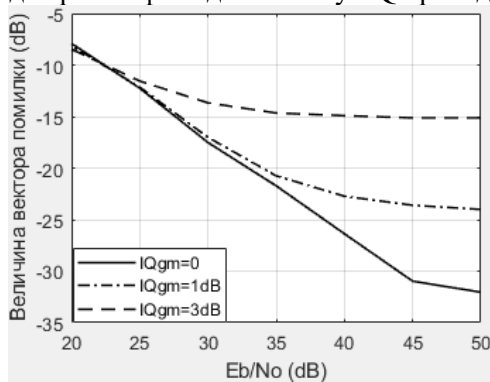


Рис. 9. Залежність величини вектора помилки від SNR для рідної величини дисбалансу I/Q

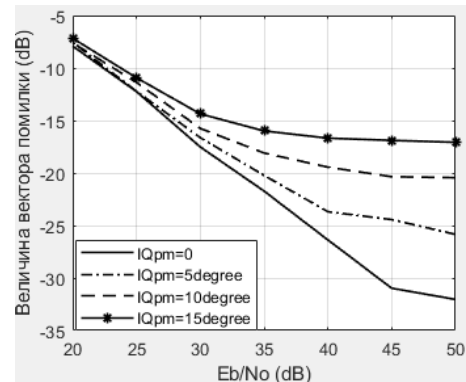


Рис. 10. Залежність величини вектора помилки від SNR для різної фази дисбалансу I/Q

Прийом та вимірювання сигналів основної смуги частот

Блок Decode Subframe виконує демодуляцію OFDM [12] прийнятого підфрейму, оцінку каналу та вирівнювання, щоб відновити та побудувати символи PDSCH у діаграмі сузір'я. EVM [9] вимірюються у двох точках у часі (низькому та високому), де низькі та високі значення відповідають вирівнюванню вікна ШПФ на початку та в кінці циклічного префікса.

Підсилювач потужності (ПП) може працювати як лінійний пристрій лише з обмеженою входною потужністю, і при її підвищенні сигнал спотворюється. Залежність EVM від відношення сигнал-шум для різних значень нелінійності третього порядку (IP3) ПЗКП показана на рис. 11. Залежність величини вектора помилки від відношення сигнал-шум для різних значень нелінійності третього порядку (IP3) НРА приведена на рис. 12

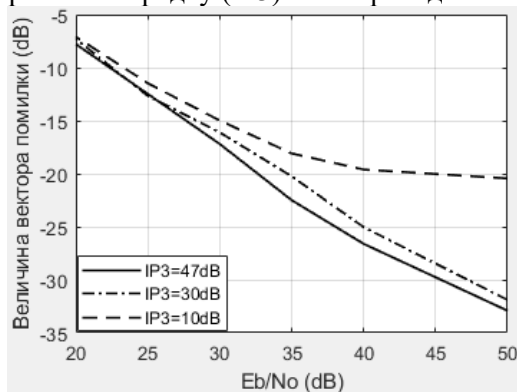


Рис. 11. Залежність величини вектора помилки від відношення сигнал-шум для різних значень нелінійності третього порядку (IP3) VGA (ПЗКП)

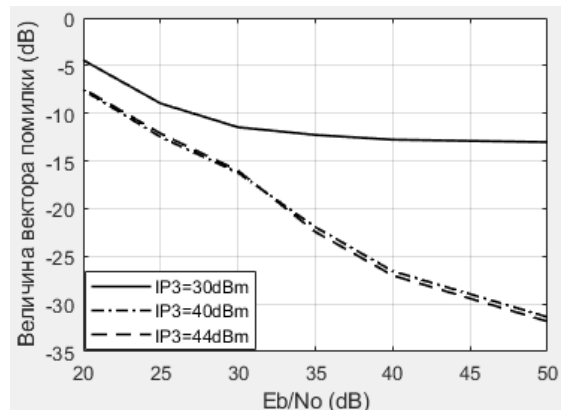


Рис. 12. Залежність величини вектора помилки від відношення сигнал-шум для різних значень нелінійності третього порядку (IP3) НРА

Підсилювач підтримує постійне підсилення для вхідних сигналів низького рівня. Однак при більш високих рівнях вхідного сигналу підсилювач насичується, і його підсилення зменшується. Точка стиснення підсилення 1 дБ (P_{1dB}) вказує на рівень потужності, який спричиняє падіння підсилення на 1 дБ від значення слабкого сигналу (лінійного підсилювача).

P_{1dB} - це потужність у точці стиснення 1 дБ, яка зазвичай використовується як зразок при виборі рівня ІВО НРА. Проаналізуємо випадок, коли ІВО = 12 дБ, що відповідає НРА, що працює в лінійній області і порівняємо його з випадком, коли ІВО = 6 дБ, що відповідає НРА, що починає працювати в нелінійній області. Підсилення VGA контролює рівень ІВО. Щоб зберегти лінійну поведінку VGA, необхідно вибирати значення підсилення нижче 20 дБ.

Лінійний ПП (ІВО = 12 дБ). Щоб працювати на рівні ІВО 12 дБ, підсилення VGA=0, що показано на рис. 13 Нелінійний НРА (ІВО = 6 дБ). Для роботи на рівні ІВО 6 дБ, підсилення VGA=6 дБ. Залежність потужності каналу для різних коефіцієнтів підсилення підсилювача з змінним коефіцієнтом підсилення від відношення сигнал-шум приведено на рис. 14

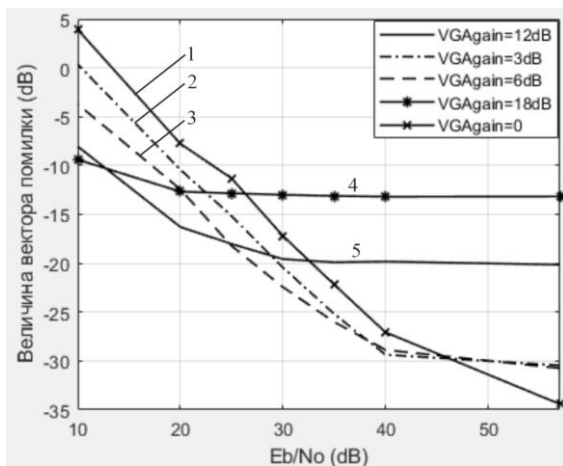


Рис. 13. Залежність EVM від відношення сигнал-шум для різних коефіцієнтів підсилення VGA

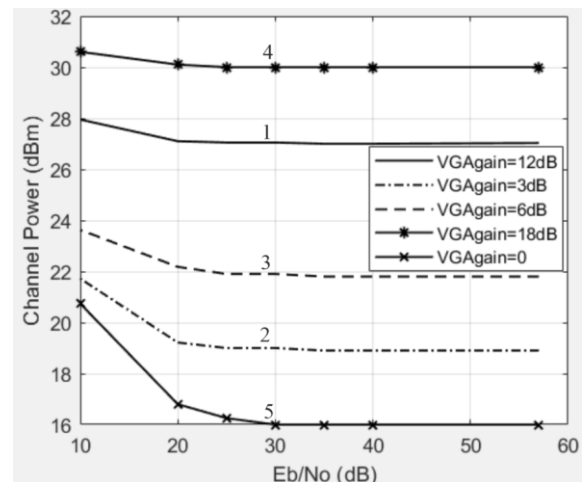


Рис. 14. Залежність потужності каналу для різних коефіцієнтів підсилення VGA від відношення сигнал-шум

Згідно з стандартами, максимальна EVM, для сузір'я 64 QAM, становить 8%. Оскільки загальна EVM становить близько 1,7%, ця архітектура відповідає вимогам стандартів.

Дослідження фазового шуму

Фазовий шум виникає, коли фаза високочастотного генератора має швидкі, короточасні, випадкові коливання фази. На рис. 15 показаний ідеальний гетеродин зі спектром Дірака у порівнянні з реальним осцилятором з PN.

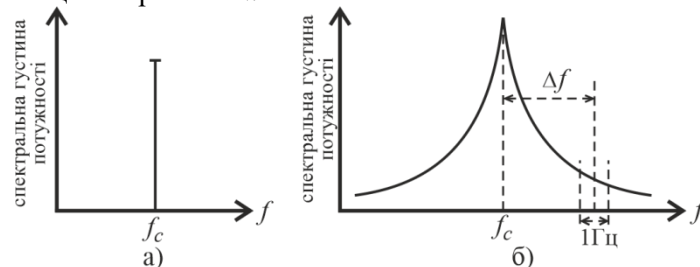


Рис. 15. Спектральна густина потужності ідеального гетеродину (а) і реального гетеродину (б)

Фазовий шум (PN) визначається частотною областю у смузі 1Гц зі зміщенням Δf від носійної. Потужність PN в цій смузі нормалізується щодо потужності носійної, дБн/Гц. Наприклад, у генераторах GSM PN повинен падати нижче 115 дБн/Гц при відбудові 600 кГц [3].

PN викликає різкі зміни в частотному спектрі та часових характеристиках вихідного сигналу генератора. Зокрема, PN розширює спектральну густина потужності (PSD) з обох боків від сигналу (рис. 17,б), що викликає завади в сусідньому каналі (ACI).

Залежність phase noise level від phase noise offset приведено на рис.16. Залежність EVM від SNR при різних phase noise level приведено на рис. 17. Через обмеження вартості локальні

генератори мають типовий допуск стабільності частоти ± 10 ppm. Генератор LTE (5G) на частоті 2,5 ГГц, при стабільності ± 10 ppm, генератор має зміщення частоти ± 25 кГц.

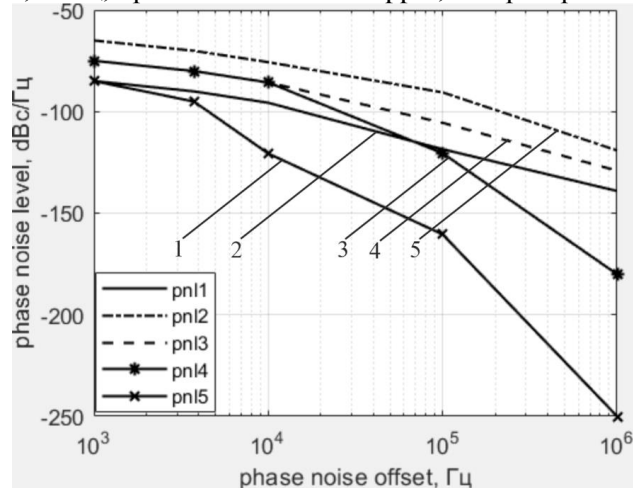


Рис. 16. Графіки залежностей phase noise level від phase noise offset гетеродина з різною стабільністю частоти

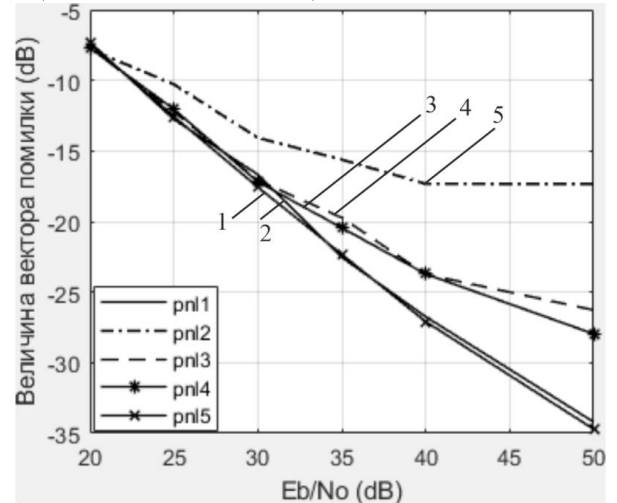


Рис. 17. Графіки залежностей EVM від SNR гетеродина з стабільністю частоти рівнем фазового шуму (phase noise level) за рис. 18

ВИСНОВКИ

За проведеними дослідженнями можна зробити наступні висновки: при зміні рівня амплітудного дисбалансу IQ від 0 до 3 дБ, величина EVM збільшується від -32 дБ до -15 дБ для SNR=50 дБ. При зміні IQ фазового дисбалансу від 0 до 15°, величина EVM збільшується від -32 дБ до -17 дБ для SNR=50 дБ. При дослідженні залежності EVM для різних значень нелінійності третього порядку (IP3) VGA можна зробити висновок, що зміна IP3 від 47 дБ до 10 дБ змінює EVM з 33 дБ до 20 дБ. Для підсилювача потужності (HPA) допустимий менший рівень нелінійностей: зміна IP3 від 44 дБ до 30 дБ приводить до зміни EVM з 32 дБ до 13,5 дБ для SNR=50 дБ. При дослідженні величини EVM від режиму роботи ПП можна сказати, що найкращий режим роботи – лінійний. При зміні підсилення VGA від 0 до 6 дБ, величина EVM змінюється з 35 дБ до 30 дБ, що лежить в межах норми (при цьому потужність в каналі зв'язку збільшується з 16 дБ до 22 дБ для SNR=57 дБ). Для нелінійного режиму роботи VGA (коефіцієнт підсилення 12 дБ і 18 дБ), величина EVM збільшується до 20 дБ і 12 дБ, що виходить за межі норми (при цьому потужність в каналі зв'язку збільшується з 27 дБ до 30 дБ для SNR=57 дБ). При дослідженні залежності EVM від рівня фазового шуму можна зробити висновок, що при дозволеному стандартом рівні фазового шуму -120 дБн/Гц при відстройці від носійної на 1e5 Гц, найгірший EVM, що дорівнює -17,5 дБ показує крива 5 з рівнем фазового шуму (pn1=-90,6 дБн/Гц). При подальшому покращенні стабільності частоти гетеродина до -160 дБн/Гц при відстройці від носійної на 1e5 Гц EVM понижується до -35 дБ

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. Mohammadian and C. Tellambura, "RF Impairments in Wireless Transceivers: Phase Noise, CFO, and IQ Imbalance – A Survey," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 111718-111791, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3101845.
- [2] F. Balteanu, "Circuits for 5G RF front-end modules," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, no. 15(6), pp. 909-924, 2023, doi:10.1017/S1759078722001295.
- [3] A. F. Demir, H. Arslan, "OFDM and alternative waveforms. Flexible and Cognitive Radio Access Technologies for 5G and Beyond içinde," Institution of Engineering and Technology, vol. 92, pp. 29-66, 2020, <https://acikerisim.medipol.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12511/8405>.
- [4] SKY68001-31: LTE universal multi-band front-end module, 2018. [Online]. Available: <http://surl.li/yhsaju>. Accessed on: September 26, 2024
- [5] I. Pyatin, J. Boiko and O. Eromenko, "Algorithmization and Hardware Implementation of Polar Coding for 5G Telecommunications." *Transport and Telecommunication Journal* vol. 25, no. 3, pp. 300-310, 2024, <https://doi.org/10.2478/tjt-2024-0022>.
- [6] J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko, L. Karpova, "Evaluation of the Capabilities of LDPC Codes for Network Applications in the 802.11ax Standard," in *IoT Based Control Networks and Intelligent Systems. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 789, pp. 369-383, Singapore: Springer, 2024, https://doi.org/10.1007/978-981-99-6586-1_25.
- [7] J. Wen, Z. Li, R. Wu, W. Xu and S. Wang, "Blind Frequency Offset Estimation Schemes Based on Mth-Power Spectral Feature," *Proc. 2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Hangzhou, China, 2024, pp. 1121-1126, doi: 10.1109/ICCC62479.2024.10681963.

[8] I. Pyatin, J. Boiko and O. Eromenko, "Design and Simulation of Synchronization Systems in Telecommunications with QPSK," *Proc. 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 98-103, doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349354.

[9] J. Boiko, *et al.* "Signal processing with frequency and phase shift keying modulation in telecommunications." *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 17, no.4, pp. 2025-2038, 2019, <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v17i4.12168>.

[10] K. V. Swamy, V. P. Kumar, Y. N. G. Naidu and B. P. Reddy, "Multi-Symbol Detection of QPSK Signal in Noisy Channel," *Proc. 2024 International Conference on Advances in Modern Age Technologies for Health and Engineering Science (AMATHE)*, Shivamogga, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/AMATHE61652.2024.10582079.

[11] K. -y. Lee and J. -S. Jang, "Novel method for synthesis of synchronization signal abstraction for 5G RF repeater," *Proc. 2022 IEEE 16th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, Washington DC, DC, USA, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/AICT55583.2022.10013649.

[12] I. Pyatin, J. Boiko and O. Eromenko, "Software HDL Modeling of a Coherent Telecommunication System With Digital Modulation," *Proc. 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 15-20, doi: 10.1109/PICST57299.2022.10238527.

Пятін Ілля Станіславович – канд. техн. наук, доцент, викладач циклової комісії комп'ютерної інженерії, e-mail: ilkhmel@ukr.net;

Хмельницький політехнічний фаховий коледж НУ «Львівська політехніка», Хмельницький;

Бойко Юлій Миколайович – д-р техн. наук, професор кафедри телекомунікації, медійних та інтелектуальних технологій, e-mail: boiko_julius@ukr.net;

Хмельницький національний університет, Хмельницький.

I.S. Pyatin¹
J.M. Boiko²

THE EFFECT OF RADIO FREQUENCY INTERFACE IMPERFECTIONS ON THE ERROR VECTOR MAGNITUDE (EVM) IN LTE AND 5G SYSTEMS

¹ Khmelnytskyi Polytechnic Professional College by Lviv Polytechnic National University

²Khmelnytskyi National University

The development of telecommunications proceeds by increasing the speed of information transmission, improving the quality of communication, and providing new services. Modern mobile phones have a transmitter and a receiver located in the same housing. Double frequency conversion is used to transfer the spectrum of signals from the main frequency band to the carrier frequency. The radio frequency interface (RF Front End) plays an important role in ensuring high-quality communication and data transmission. It is located between the antenna switch and the mixer and ensures matching with the antenna and converting the signals to a form suitable for further processing or radiation into free space. The quality of the connection can be estimated by the value of the error vector (EVM). EVM is a measure of the difference between the ideal transmitter symbols and the measured receiver symbols after equalization. Reducing EVM allows to improve transmission speed, reduce packet loss. The work is devoted to the study of the influence of the imperfection of the radio frequency interface on the level of EVM in modern telecommunications. The EVM level is affected by in-phase and quadrature imbalance, phase noise, power amplifier nonlinearities, as well as the presence of noise in the communication channel and the immunity of the signal-code design. An I/Q imbalance results from a gain mismatch or phase shift between parallel sections of signal conversions in the transmitter. A variable gain amplifier (VGA) changes the signal level at the input of a power amplifier (HPA), reducing or increasing its power. Thus, the HPA works in saturation mode or with a certain reserve (back-off). The larger the IBO (input back-off), the lower the input power of the signal to the HPA and the less distortion, but the efficiency of the amplifier is reduced. The lower the VGA gain, the greater the IBO margin. As the VGA gain increases, the input power to the HPA increases, which reduces the IBO and leads to an increased risk of nonlinear distortion due to saturation of the HPA. The phase noise of the local oscillator expands the spectral power density of the signal, leads to a deviation of the phase of each subcarrier, which violates their orthogonality. The Simulink models of the transmitter and receiver of the digital communication system with additionally introduced impairments of the radio frequency units were studied, the EVM levels, the power in the channel were estimated. An example of a 4G and 5G radio frequency interface is the QM78207 chip, which includes a high-frequency amplifier, filters, a switch and other components. With the provision of new services, the radio frequency interface becomes more complicated, which imposes higher requirements on the quality of its components. The maximum EVM for a 64-QAM constellation is 8% (-22 dB). When the amplitude imbalance IQ changes from 0 to 3 dB, the value of EVM increases from -32 dB to -15 dB for SNR=50 dB. When changing the phase imbalance IQ from 0 to 15°, the EVM value increases from -32 dB to -17 dB for SNR=50 dB.

Keywords: RF Front End, error vector magnitude (EVM), LTE, 5G, IQ modulator

Pyatin Ilya Stanislavovych - Cand. Sc (Eng.), Assistant Professor, Department of Computer Engineering, e-mail: ilkhmel@ukr.net;

Boiko Juliy Mykolaiovych – Dr. Sc. (Eng.), Professor Department of Telecommunications, Media and Intelligent Technologies, e-mail: boiko_julius@ukr.net.