

# ВЕКТОРНО-МАТРИЧНИЙ ОПИС ВІДГУКІВ ДВОКАНАЛЬНОГО ДЕМОДУЛЯТОРА ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЙ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ 6G

*Слюсар В.І., Бігун Н.С.  
ЦНДІ ОБТ ЗС України  
E-mail: swadim@ukr.net  
bigun0714@ukr.net*

Розвиток технологій стільникового зв'язку 6G ґрунтується на використанні спектрально ефективних сигналів, таких як неортогональне частотне дискретне мультиплексування сигналів (N-OFDM). Однією з важливих вимог для ефективного використання N-OFDM є зменшення позасмугових завад і придушення позасмугових каналів прийому радіосигналів. Цього можна досягти шляхом цифрової фільтрації основних каналів прийому за допомогою цифрових фільтрів або I/Q демодуляторів, які поєднують функції квадратурної демодуляції з цифровою фільтрацією. З урахуванням зазначеного, актуальним завданням є дослідження характеристик цифрових квадратурних демодуляторів, які можуть призвести до покращення завадостійкості в системах зв'язку 6G.

Найпростішим методом цифрової квадратурної демодуляції гармонійних сигналів є їхнє оцифрування через непарну кількість чвертей періоду носійного електромагнітного коливання з подальшим поділом потоку відліків на парні та непарні за номером слідування. При цьому сусідні у часі відліки в парі можна вважати косинусною та синусною складовими. Математичний опис найпростішого квадратурного демодулятора легко отримати на основі використання пари одиничних вагових коефіцієнтів з протилежними знаками.

Більш складні варіанти квадратурної демодуляції вимагають залучення  $2P$  відліків АЦП, де  $P$  - порядок (розмір) демодулятора. Опис відгуків квадратурного демодулятора ускладнюється зі збільшенням порядку демодулятора, що ускладнює візуальне сприйняття та аналіз відповідних операцій над сигналами. Тому для отримання більш компактних записів процедур квадратурної демодуляції пропонується їх векторно-матричне представлення.

Матричний опис відгуку квадратурного демодулятора може бути отриманий з математичної моделі демодулятора, яка передбачає використання набору одиничних вагових коефіцієнтів. Матричне представлення складається з рядків і стовпців, де кожен рядок представляє відгук певного каналу демодулятора. Використовуючи це матричне представлення, нескладно описати відгук складніших демодуляторів, розширюючи матрицю, щоб врахувати демодулятори вищого порядку.

Спираючись на такий підхід, було отримано нові версії 8-відлікового I/Q-демодулятора з ваговими коефіцієнтами  $\{1; 5; 7; 3\}$  і  $\{2; 7; 10; 5\}$ , які показали більш ефективне придушення позасмугових завад, ніж відомий демодулятор з

коефіцієнтами {1; 11; 15; 5}. Графіки амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) для двох зазначених нових наборів коефіцієнтів {1; 5; 7; 3} і {2; 7; 10; 5} підтверджують цю ефективність (рис. 1).

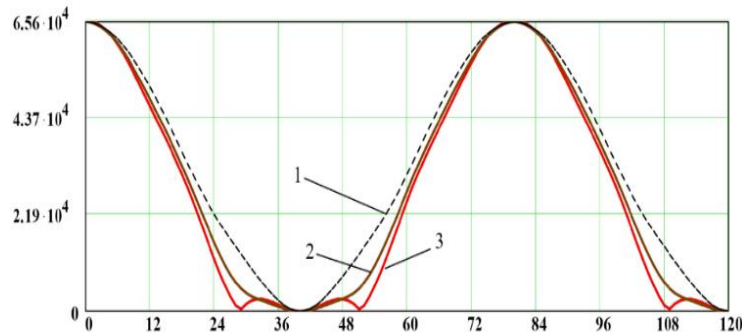


Рисунок 1. Графіки АЧХ 8-відлікового I/Q демодулятора з коефіцієнтами {1; 11; 15; 5} - лінія 1; лінія 2 - для коефіцієнтів {1; 5; 7; 3}; лінія 3 - для коефіцієнтів {2; 7; 10; 5}

Для подальшого покращення роботи демодулятора було проведено розширений пошук оптимальних вагових коефіцієнтів для демодуляторів вищих порядків. Було використано алгоритм оптимізації, який оновлював коефіцієнти, оцінюючи частотну характеристику, щоб мінімізувати рівні бічних пелюсток.

Дослідження були розпочаті з синтезу коефіцієнтів 15-розрядного демодулятора, еквівалентного двом каскадам 8-розрядних I/Q-демодуляторів з коефіцієнтами {1; 5; 7; 3}. В результаті вдалося отримати набори з 8 та 7 вагових коефіцієнтів для відповідних квадратурних складових:

$$(1\ 5\ 7\ 3\ 1\ 5\ 7\ 3) = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 7 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 5 & 7 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 5 & 7 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 5 & 7 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 7 & 5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 7 & 5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 7 & 5 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 7 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = (1\ 19\ 81\ 155\ 155\ 81\ 19\ 1), \quad (1)$$

$$(1\ 5\ 7\ 3\ 1\ 5\ 7\ 3) = \begin{pmatrix} 3 & 7 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 7 & 5 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 7 & 5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 7 & 5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 5 & 7 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 5 & 7 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 5 & 7 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 5 & 7 & 3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = (6\ 44\ 122\ 168\ 122\ 44\ 6). \quad (2)$$

За допомогою ітераційного процесу послідовного наближення в пакеті Mathcad було розраховано комбінацію вагових коефіцієнтів для 10-канального

I/Q-демодулятора з коефіцієнтами  $\{1; 6; 12; 10; 3\}$  та 6-канального I/Q-демодулятора з коефіцієнтами  $\{1; 4; 3\}$ .

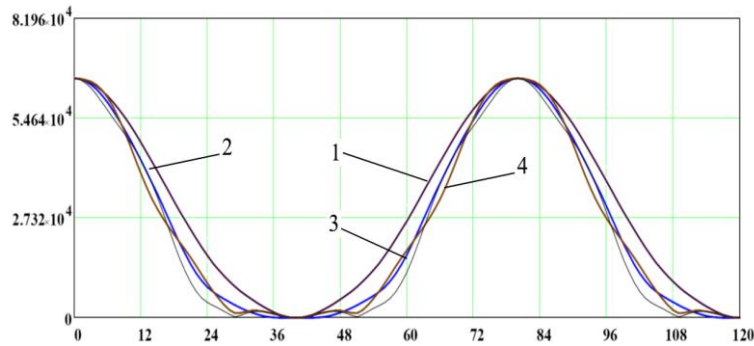


Рисунок 2. Графіки АЧХ 10-відлікового I/Q демодулятора з коефіцієнтами  $\{1; 22; 56; 42; 7\}$  – лінія 1,  $\{1; 6; 12; 10; 3\}$  - 2,  $\{1; 6; 11; 10; 4\}$  - 3;  $\{1; 7; 12; 9; 3\}$  - 4

Новий набір коефіцієнтів для 10-позиційного демодулятора дав криву АЧХ з гладкою формою (рис. 2), без суттєвих переваг над вихідними коефіцієнтами. Однак при послідовному з'єднанні з 6-тактним I/Q демодулятором з коефіцієнтами  $\{1; 4; 3\}$  отриманий 15-тактний демодулятор демонструє покращені характеристики АЧХ.

Для практичної реалізації запропонованих I/Q-демодуляторів можуть бути використані програмовані користувачем вентильні матриці (ПКВМ), оскільки вони дозволяють ефективно виконувати завдання цифрової обробки сигналів. Запропонована векторно-матрична форма на основі клиноподібних матриць з обернено симетричними елементами дозволяє компактно представити відгуки двоканального I/Q-демодулятора і спрощує процес його синтезу. Придушення бічних пелюсток АЧХ, досягнуте цим методом, робить його придатним для демодуляції сигналів N-OFDM, що в кінцевому підсумку підвищить спектральну ефективність таких сигналів в технологіях стільникового зв'язку 6G.

**Ключові слова:** відліковий фільтр, цифровий квадратурний демодулятор, вагові коефіцієнти, амплітудно-частотна характеристика.

### Література

- [1] Z. E. Ankarali, B. Pekoz, and H. Arslan, "Flexible radio access beyond 5G: A future projection on waveform, numerology, and frame design principles," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18295–18309, 2017.
- [2] I. Sliusar, S. Voloshko, V. Smolyar, and V. Slyusar, "Next generation optical access based on N-OFDM with decimation," *2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Oct. 2016.
- [3] M. Mfana and A. N. Hasan, "Soft-core architecture for odd/even order sampling I/Q Demodulator with dual-port block memory considerations," Sep. 2019.
- [4] V. Slyusar and N. Bihun, "Forming the response of two-channel demodulators," *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, Nov. 2022.
- [5] V. Slyusar and P. Serdiuk, "Synthesis method of procedure for odd-order I/Q demodulation based on replacing multistage with equivalent single-stage demodulation schemes," *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 63, no. 5, pp. 273–280, May 2020.