

**БАГАТОКАСКАДНА I/Q-ДЕМОДУЛЯЦІЯ OFDM-СИГНАЛІВ ПРИ ЇХ
ОДНОКАНАЛЬНОМУ АНАЛОГО-ЦИФРОВОМУ ПЕРЕТВОРЕННІ**

В статті запропоновані багатокаскадні варіанти включення I/Q-демоделюляторів, що дозволяє забезпечити додаткову перешкодозахищеність каналу зв'язку.

Слюсар В.І., Сердюк П.Є. Многокаскадная I/Q-демодуляция OFDM сигналов – при их одноканальном аналого-цифровом преобразовании. В статье предложены многокаскадные варианты включения I/Q-демодуляторов, позволяющие обеспечить помехозащищенность канала связи.

V.Slysar, P.Serdjuk Multistage I/Q-demodulate OFDM signals at their one channel analog-digital transformation. Multistage versions of I/Q-demodulate OFDM signals which allow to secure noise-immunity to the communication chanal are offered in this article.

Ключові слова: I/Q-демоделюляція, стробування відліків, комплексно-сполучена складова.

Актуальність досліджень. Потреба у застосуванні заводозахищених засобів зв'язку спонукає до пошуку відповідних за властивостями методів цифрової обробки сигналів. Серед таких методів важливе місце займають квадратурні демодулятори (I/Q-демоделюлятори), що мають покращені частотно-селективні властивості при обробці відліків аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) [1].

Аналіз останніх публікацій [1-3] показує, що багатокаскадне включення кількох I/Q-демоделюляторів парного порядку в [1] дозволяє розширити смугу частот, в якій якість формування квадратурних складових сигналів задовольняє потребам [2], а також збільшити позасмугове пригнічення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), що позитивно впливає на заводозахищеність приймального пристрою. При цьому зменшується динамічний діапазон вагових коефіцієнтів.

В [2] було зазначено, що багатокаскадний I/Q-демоделюлятор може бути замінений майже еквівалентним за формою АЧХ однокаскадним демодулятором парного порядку, однак пропоновані в [2] варіанти забезпечують таку заміну лише з певним наближенням.

В сучасних аналого-цифрових перетворювачах (АЦП) високі частоти дискретизації аналогових сигналів накладають жорсткі вимоги до апаратури цифрової обробки даних. Формування квадратурних складових OFDM сигналів в приймальному пристрої доцільно поєднувати з попередньою частотною селекцією, що дозволяє забезпечити додаткову перешкодозахищеність каналу зв'язку. У статті запропоновано багатокаскадні варіанти включення I/Q-демоделюляторів, що дозволяють поєднувати виконання зазначених функцій.

Однак, реалізація таких фільтрів стикається з проблемою великих за величиною динамічних діапазонів зміни коефіцієнтів фільтрації. Її прояв позначається і при менших порядках фільтрів, тому для вирішення проблеми високого динамічного діапазону коефіцієнтів можливе використання багатокаскадного включення I/Q-демоделюляторів.

Метою статті є розробка багатокаскадного включення I/Q-демоделюляторів при їх одноканальньому АЦП, що дозволить зменшити розмірність I/Q-демоделюляторів, а також знизити динамічний діапазон вагових коефіцієнтів.

За основу запропонованого підходу до обробки сигналів взятий один з варіантів способу додаткового стробування (децимації) цифрових відліків АЦП, приведених в [4]. Принцип реалізації методу пояснений на рис. 1 для 2-каскадного варіанту I/Q-демоделюляції. При цьому використовуються наступні позначення:

U^t – відліки напруг сигналів по виходу АЦП; $U^{c(s)}$ – квадратурні складові напруг на виході першого каскаду I/Q-демоделюляції; $U1^{c(s)}$ – квадратурні складові напруг на виході першого підканалу другого каскаду I/Q-демоделюляції; $U2^{c(s)}$ – квадратурні складові напруг на виході другого підканалу другого каскаду I/Q-демоделюляції; C, S – косинусна и синусна

складова вихідного відгуку пристрою. На вхід другого каскаду подаються сформовані першим каскадом квадратурні складові напруг сигналів U^c , U^s . Вихідні сигнали другого каскаду формуються за формулами:

$$C = U1^c + U2^s, S = U1^s - U2^c. \quad (1)$$

Отримані таким чином результати I/Q -демодуляції далі можуть використовуватися в якості вхідних відліків сигналів для наступного каскаду, який за схемою ідентичний структурі каскаду № 2.

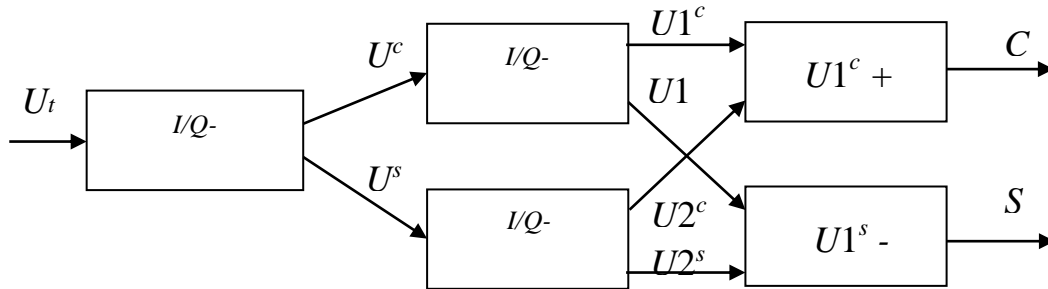


Рис. 1. 2-каскадний I/Q -демодулятор

Для ілюстрації ефекту, що досягається послідовним включенням двох каскадів I/Q -демодулятора, на рис. 2 суцільною лінією представлена АЧХ 2-каскадної схеми I/Q -демодуляції при 8-відліковому ковзному вікні в обох каскадах (пунктирна лінія відповідає однокаскадній схемі).

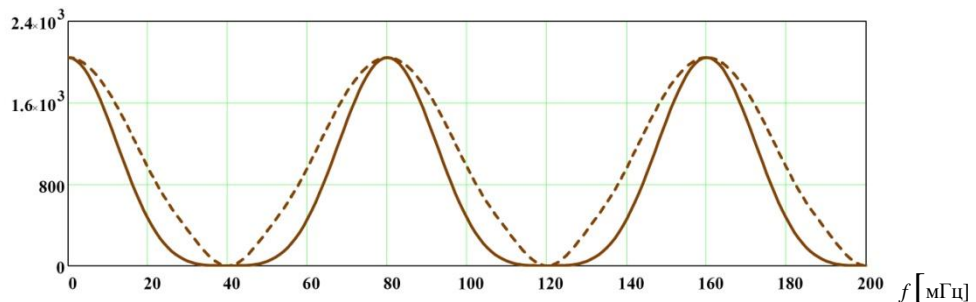


Рис. 2. АЧХ 2-каскадної схеми I/Q -демодуляції

Як можемо побачити, даний варіант обробки не усуває дифракційний максимум в АЧХ, але збільшує крутизну її пелюсток і провал між ними завдяки подвійній фільтрації сигналів в I/Q -демодуляторі.

Для підвищення частотної вибіркової процедури I/Q -демодуляції слід використовувати багатокаскадні включення I/Q -демодуляторів.

Принцип формування структури багатокаскадних схем демодуляції сигналів з виходу одноканального приймача пояснений на рис. 3 на прикладі 4-каскадного включення I/Q -демодуляторів.

Для вибору конкретних варіантів реалізації I/Q -демодулятора для початку представляє цікавість порівняння ефективності частотної селекції однокаскадний (рис. 4) і двокаскадних структур (рис. 1) демодуляторів.

Основним завданням проведених досліджень з'явився пошук відповіді на питання, ідентичні чи амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) двох послідовно включених 8-відлікових каскадів I/Q -демодулятора за схемою рис. 1 і однокаскадного демодулятора (рис. 4), 16-відліковим ковзним вікном I/Q -фільтрації сигналів. Зазначена задача вирішувалася шляхом математичного моделювання в пакеті *Mathcad*. Для розрахунку коефіцієнтів I/Q -

демодуляції використовувалася методика, представлена в [5]. При цьому 8-відлікові I/Q -демодулятори, що входять до складу двокаскадної схеми (рис. 1), функціонували з ваговими коефіцієнтами, вираженими через одну незалежну змінну у вигляді: $a = C$, $b = 11C$, $c = 15C$, $d = 5C$, де C – ціле число.

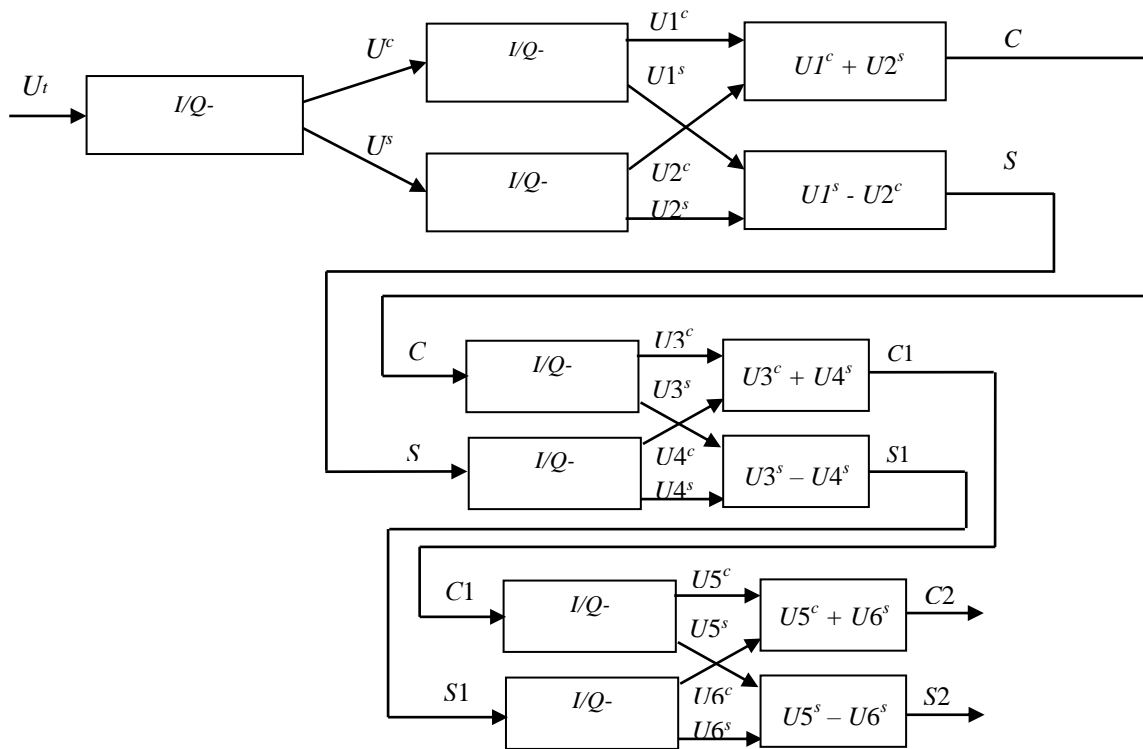


Рис. 3. 4-каскадний варіант I/Q -демодулятора [4], в якому вихідний сигнал визначається виразами: $C2 = U5^c + U6^s$ та $S2 = U5^s - U6^c$

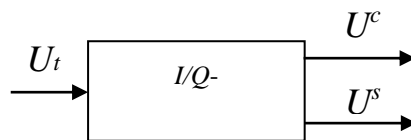


Рис. 4. Однокаскадний варіант I/Q -демодулятора

Аналогічно розраховувалися ваги і для 16-відлікового ковзного вікна однокаскадного I/Q -демодулятора, які в моделі були представлені послідовністю $a = C$, $b = 79C$, $c = 793C$, $d = 2431C$, $e = 3003C$, $f = 1573C$, $g = 299C$, $h = 13C$.

На рис. 5 представлений результат розрахунку АЧХ однокаскадного 8-відлікового I/Q -демодулятора (позиція „1”), однокаскадного 16-відлікового I/Q -демодулятора (позиція „2”) з зазначеним набором вагових коефіцієнтів, а також двокаскадної схеми (рис. 1) з 8-відліковими I/Q -демодулятор (позиція „3”). У всіх зазначених випадках незалежна змінна при розрахунку вагових коефіцієнтів $C = 1$. Аналогічний результат, виражений в логарифмічному масштабі, наведено на рис.6. Як показало моделювання, при використанні однакового принципу розрахунку вагових коефіцієнтів, виражених через незалежну змінну, форма АЧХ однокаскадного 16-відлікового I/Q -демодулятора (позиція „2”) і двокаскадної схеми (рис. 1) з 8-відліковими I/Q -демодулятор (позиція „3”) практично збігається. При цьому двокаскадна схема має вигреш в глибині придушення позасмугових сигналів, що досягає від 2 до 3 [дБ] по краях смуги (див. рис. 6). Істотна перевага двокаскадної схеми полягає у використанні більш ніж на 2 порядки меншого динамічного діапазону вагових коефіцієнтів, що знижує вимоги до апаратної реалізації помножувачів та інших елементів демодулятора.

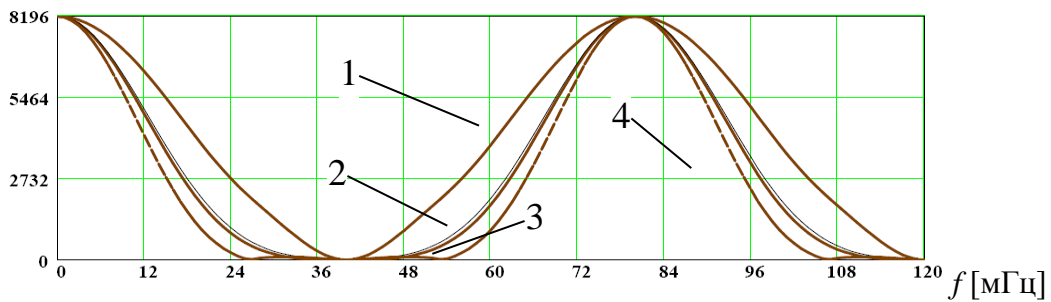


Рис. 5. АЧХ одно- та двохкаскадних I/Q-демодуляторів

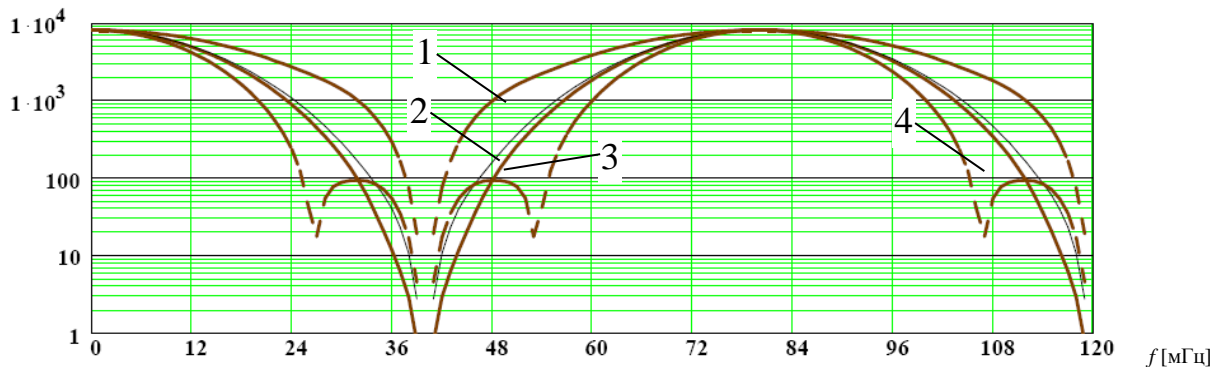


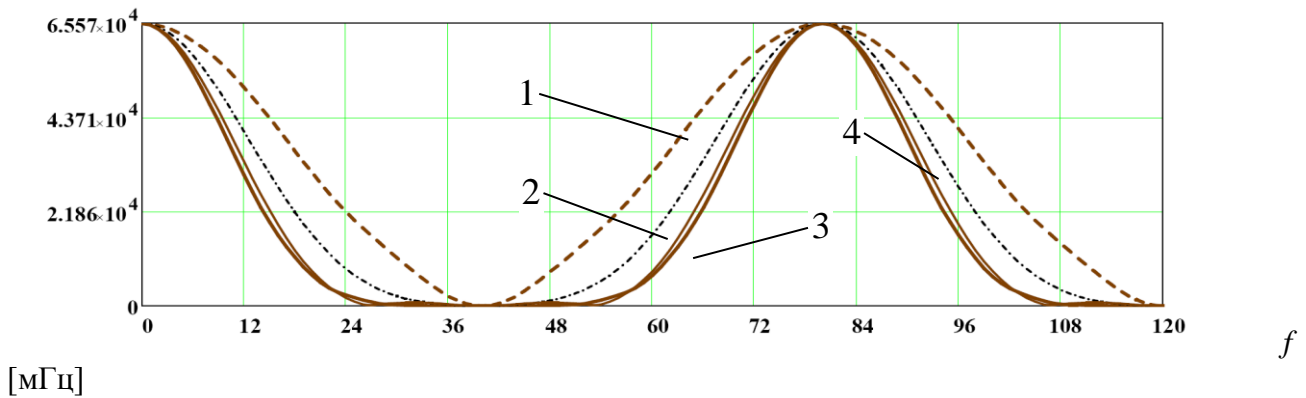
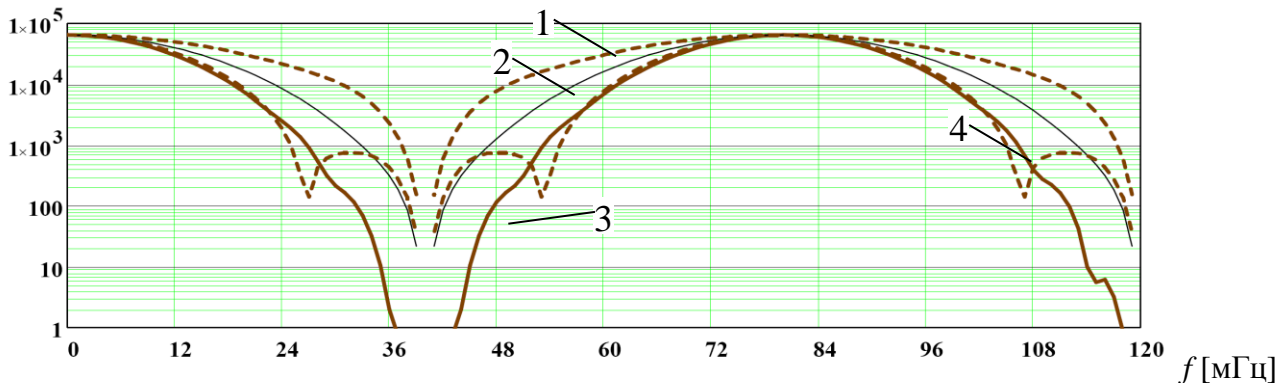
Рис. 6. АЧХ одно- та двохкаскадних I/Q-демодуляторів у логарифмічному масштабі

Висновки. У загальному випадку зроблені висновки будуть справедливі щодо зіставлення двохкаскадних M -відлікових і однокаскадних $2M$ -відлікових I/Q-демодуляторів з однаковим методом розрахунку коефіцієнтів. Це відкриває можливості для заміни многокаскадної схеми еквівалентної однокаскадної.

Слід також зазначити, що згідно [2] для однокаскадного 16-відлікового демодулятора на відміну від 8-відлікового може бути отриманий 2-й набір вагових коефіцієнтів, синтезованих на основі двох незалежних змінних, наприклад, $a = 1$, $b = 46$, $c = 265$, $d = 550$, $e = 627$, $f = 418$, $g = 131$, $h = 10$. АЧХ такого демодулятора, представлена на рис. 5, 6 в позиції „4”, характеризується значним придушенням позасмугових сигналів.

Отже, підбравши вдало коефіцієнти, можна замінити двохкаскадний фільтр однокаскадні меншого порядку більш ефективно, ніж у випадку використання однотипного розрахунку вагових множників. У той же час цілком очевидно, що повинна існувати еквівалентна заміна і такого виграшного варіанту однокаскадний фільтрації на двохкаскадний схему меншого порядку. Проте в даному випадку питання можливості отримання цілочисельного набору коефіцієнтів фільтрації для двохкаскадного еквівалента однокаскадний схеми залишається відкритим. У той же час в результаті досліджень вдалося встановити, що АЧХ зазначеного 16-відлікового I/Q-демодулятора з коефіцієнтами $a = 1$, $b = 46$, $c = 265$, $d = 550$, $e = 627$, $f = 418$, $g = 131$, $h = 10$ практично збігається з АЧХ трьохкаскадного схеми включення розглянутих вище 8-відлікових демодуляторів.

Сказане ілюструють рис. 7, 8, де цифрами „3” позначена АЧХ трьох послідовно включених каскадів 8-відлікових I/Q-демодуляторів, а цифрою „4” – АЧХ зазначеного однокаскадного варіанта 16-відлікового демодулятора. При цьому лінії „1”, „2” в адаптованому масштабі відображення відповідають графіками, представленим на рис. 5, 6. Неважко помітити, що АЧХ трьохкаскадного I/Q-демодулятора в межах майже всього головної пелюстки проходить на 1 – 2 [дБ] нижче АЧХ 16-ти відлікового демодулятора.

Рис. 7. АЧХ одно- та трьохкаскадних I/Q -демоделюляторівРис. 8. АЧХ одно та трьохкаскадних I/Q -демоделюляторів в логарифмічному масштабі

Використання багатокаскадного включення дозволяє зменшити розмірність I/Q -демоделюляторів для досягнення заданого рівня перешкодозахищеності, а також знизити динамічний діапазон вагових коефіцієнтів. В подальшому необхідно узагальнити запис відгуку демодулятора нечіткого порядку, що дозволить прогнозувати значення коефіцієнтів при довільній розмірності каскадів двокаскадної схеми.

ЛІТЕРАТУРА

1. Слюсар В.І., Сердюк П.Є. Метод багатокаскадної I/Q -демоделюляції сигналів // VI-й науково-практичний семінар “Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” (20 жовтня 2011 р., доповіді та тези доповідей). – Київ: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2011. – С. 181.
 2. Слюсар В.И., Сердюк П.Е. Сравнение одно- и двухкаскадной схемы цифровой I/Q -демоделюляции. // V Международный научно-технический симпозиум «Новые технологии в телекоммуникациях» (ГУИКТ-Карпаты '2012). 17 – 21 января 2012 г. – Карпаты, Вышков. – С. 29 – 31.
 3. Слюсар В.І., Сердюк П.Є. I/Q -демоделюлятори непарного порядку // VII-й науково-практичний семінар “Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” (24 – 26 жовтня 2012 р., доповіді та тези доповідей). – Київ: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2011. – С. 181.
 4. Jan-Erik Eklund and Ragnar Arvidsson. A Multiple Sampling, Single A/D Conversion Technique for Demodulation in CMOS.// IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 31, No. 12, December 1996. – pp 1987 –1994. – http://iroi.seu.edu.cn/jssc9697/data/31_12_08.pdf.
- Слюсар В.И., Методика синтеза I/Q -демоделюляторов произвольной размерности. /Слюсар В.И., Малярчук М.В., Бондаренко М.В.// III-й Міжнародний науково-технічний симпозиум “Нові технології в телекомунікаціях” – (ДУИКТ-КАРПАТИ '2010, с. Вишків). – Київ: Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій.– 2 – 5 лютого 2010. – С. 53 – 55.