

УДК 621.396

Експериментальна оцінка ефективності побудови багатоканальних приймачів сигналів за технологією SDR

✉ Романов О. М., Котюбин В. Ю.

Науково-дослідний інститут Міністерства оборони України

E-mail: rolex@i.ua

Технологія радіосистем, які програмно конфігуруються, у поєднанні з паралельними обчисленнями дає змогу будувати багатоканальні приймачі сигналів. Гнучкість таких систем дозволяє для кожного із приймальних каналів побудувати свій тракт подальшої обробки, конфігурація якого залежить від задач, які повинні бути вирішені, та може включати: фільтрацію, демодуляцію, декодування тощо. Такий підхід до побудови багатоканальних приймачів призводить до збільшення кількості обчислень в режимі реального часу. Теоретичне оцінювання ефективності побудови таких приймачів не враховує багатьох чинників, зокрема: обчислювальних можливостей апаратної платформи, використання методів паралельних обчислень, методів цифрової обробки та їх програмної реалізації, оптимальності коду тощо. У статті наведено експериментальне оцінювання ефективності побудови багатоканальних приймачів сигналів за технологією радіосистем, які програмно конфігуруються, на конкретній апаратній платформі. Для збільшення обчислюваних можливостей апаратної платформи цифрова обробка здійснювалась ресурсами графічного процесора. Спеціальне програмне забезпечення для досліджень розроблялось мовою програмування C# і складалось із функціонально завершених модулів обробки сигналів, об'єднаних у ланцюг, які працювали під управлінням єдиної серверної оболонки. У результаті дослідження отримано експериментальні залежності максимальної кількості каналів від параметрів сформованих каналів приймання і залежності якості фільтрації каналів від заданих параметрів при програмній реалізації обробки сигналів. Отримані результати дозволяють визначити кількість каналів одночасного приймання при заданому коефіцієнті децимації з використанням різних порядків фільтра, а також здійснити оцінку кількості каналів приймання із заданою якістю фільтрації. При обмежених обчислювальних ресурсах кількість програмно реалізованих каналів у багатоканальному приймачі є компромісним значенням, яке залежить від апаратних ресурсів обчислювальної платформи, обраного порядку та параметрів фільтра при заданому коефіцієнті децимації.

Ключові слова: багатоканальний приймач; програмно визначені радіосистеми; експериментальна оцінка ефективності; паралельні обчислення; порядок цифрового фільтра; коефіцієнт децимації

DOI: [10.20535/RADAP.2019.78.19-26](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.78.19-26)

Вступ

Постановка проблеми. Класичні приймачі сигналів забезпечують одночасне приймання одного каналу одним приймачем. Для сигналів, ширина спектру яких значно менша смуги пропускання приймача, використання одноканальних приймачів є малоефективним, оскільки значна частина смуги пропускання приймача при цьому не використовується [1].

Застосування технології радіосистем, які програмно конфігуруються (SDR), суть якої полягає у визначенні базових параметрів приймально-передавального пристрою не апаратною конфігурацією, а програмним забезпеченням [2], дає змогу приймати і здійснювати аналогово-цифрове пере-

творення всього групового сигналу, який потрапляє до широкої смуги пропускання, а подальшу його обробку проводити програмно. У такому випадку одночасно приймаються всі канали, що потрапляють до смуги приймання SDR приймача. Для кожного із цих каналів можливо побудувати програмний тракт подальшої обробки, конфігурація якого залежить від задач, які повинні бути вирішені, та може включати: фільтрацію, демодуляцію, декодування тощо. При цьому обсяг обчислень, які слід здійснювати в режимі реального часу, зростає пропорційно кількості каналів. Тоді наявні обчислювальні ресурси виступають обмежувальним фактором нарощування кількості каналів одночасного приймання. Ефективним способом нарощування обчислювальних ресурсів є застосування технологій

паралельних обчислень на основі багатоядерності центрального та графічних процесорів.

Таким чином, застосування технології SDR у поєднанні із технологіями паралельних обчислень дає змогу будувати багатоканальні приймачі сигналів на заміну одноканальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що існують як фундаментальні роботи щодо застосування SDR технології у цифровій обробці сигналів [3] та використання багатоядерності центрального [4] і графічних [5] процесорів, так і прикладні роботи щодо побудови приймачів сигналів із використанням зазначених технологій [6–10].

При оцінюванні ефективності застосування технологій паралельних обчислень [11] отриманий вигравш досліджується тільки для відомих числових методів [12]. Наприклад, множення матриць і розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь методом Гауса [13], моделювання і навчання штучних нейронних мереж [14] тощо. Вигравш, отриманий при побудові апаратно-програмних систем із застосуванням технологій SDR та паралельних обчислень, не досліджено. У деяких роботах вказано лише орієнтовні значення [10].

Водночас, ефективність побудови багатоканальних приймачів сигналів за технологією SDR залежить від сукупності факторів: апаратної платформи SDR, апаратної платформи, на якій здійснюються паралельні обчислення, методів цифрової обробки сигналів, що застосовуються, алгоритмів їх програмної реалізації, оптимальності коду тощо, а також від параметрів сформованих каналів приймання. Результати практичних і теоретичних досліджень їх комплексного впливу на ефективність побудови конкретних багатоканальних приймачів сигналів за технологією SDR в літературі не висвітлені.

Метою статті є експериментальне оцінювання ефективності побудови багатоканальних приймачів сигналів за технологією SDR на конкретній апаратній платформі.

Результати, висвітлені у статті, дозволяють отримати уявлення про реальну кількість каналів, яка може бути реалізована практично у конкретному приймачі.

Експериментальне і теоретичне дослідження ефективності побудови багатоканальних приймачів сигналів за технологією SDR, яке охоплює всі етапи обробки сигналу і всі варіанти апаратних платформ, виходить за рамки досліджень, викладених у статті.

Виклад основного матеріалу

Ефективність приймача сигналів оцінимо максимальною кількістю каналів, приймання яких забезпечується (кількістю сигналів, які виділяються).

Теоретично розрахувати максимальну кількість приймальних каналів M , які можуть бути сформовані в приймачі, можна в такий спосіб:

обрати вид віконної функції $w(n)$, що використовується для отримання частотної характеристики фільтра, де n – номер відліку сигналу;

на основі віконної функції обрати необхідний порядок фільтра N :

$$N = k/\Delta f_n, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт для обраного виду віконної функції, Δf_n – нормована ширина перехідної смуги фільтра [15];

обрахувати кількість операцій для отримання одного відліку виділеного сигналу;

обрахувати кількість операцій для виділення одного сигналу за одиницю часу;

перерахувати отримане значення в кількість елементарних операцій за одиницю часу;

розділивши обчислювальну потужність процесора на кількість операцій за одиницю часу для виділення одного сигналу, отримати приблизну максимальну кількість приймальних каналів.

Слід зазначити, що теоретичне обчислення кількості приймальних каналів у такий спосіб не враховує багатьох чинників, серед яких:

коефіцієнт ефективності застосування багатоядерності центрального процесора;

ступінь оптимальності коду для його виконання на графічному процесорі;

ефективність та якість програмної реалізації обраного алгоритму оброблення;

витрати часу на передачу даних, виконання службових процедур тощо.

На основі зазначеного вище здійснимо експериментальне оцінювання максимальної кількості каналів, приймання яких забезпечується.

Умови проведення експерименту. Під час проведення дослідження на SDR приймачі встановлювалася частота дискретизації 10 МГц. Отримані IQ-відліки сигналу передавались через інтерфейс USB 3.0 на електронно-обчислювальну машину (ЕОМ) з операційною системою Windows 7. Оброблення отриманих відліків широкосмугового групового сигналу здійснювалося програмно ресурсами ЕОМ, побудованої на базі чотириядерного центрального процесора Intel Core i7-4790K з тактовою частотою 4 ГГц і продуктивністю 432 GFLOPS та графічного процесора GeForce GT740 із 2 ГБ пам'яті, частотою ядра 933 МГц, 384 ядрами CUDA і продуктивністю обчислень із плаваючою точкою 762,6 GFLOPS. Розрахунки здійснювалися за допомогою графічного процесора. Спеціальне програмне забезпечення (СПЗ) розроблялось у Visual Studio 2010 мовою програмування C# і складалось із функціонально завершених модулів обробки сигналів, об'єднаних у ланцюг, які працювали під управлінням єдиної серверної оболонки.

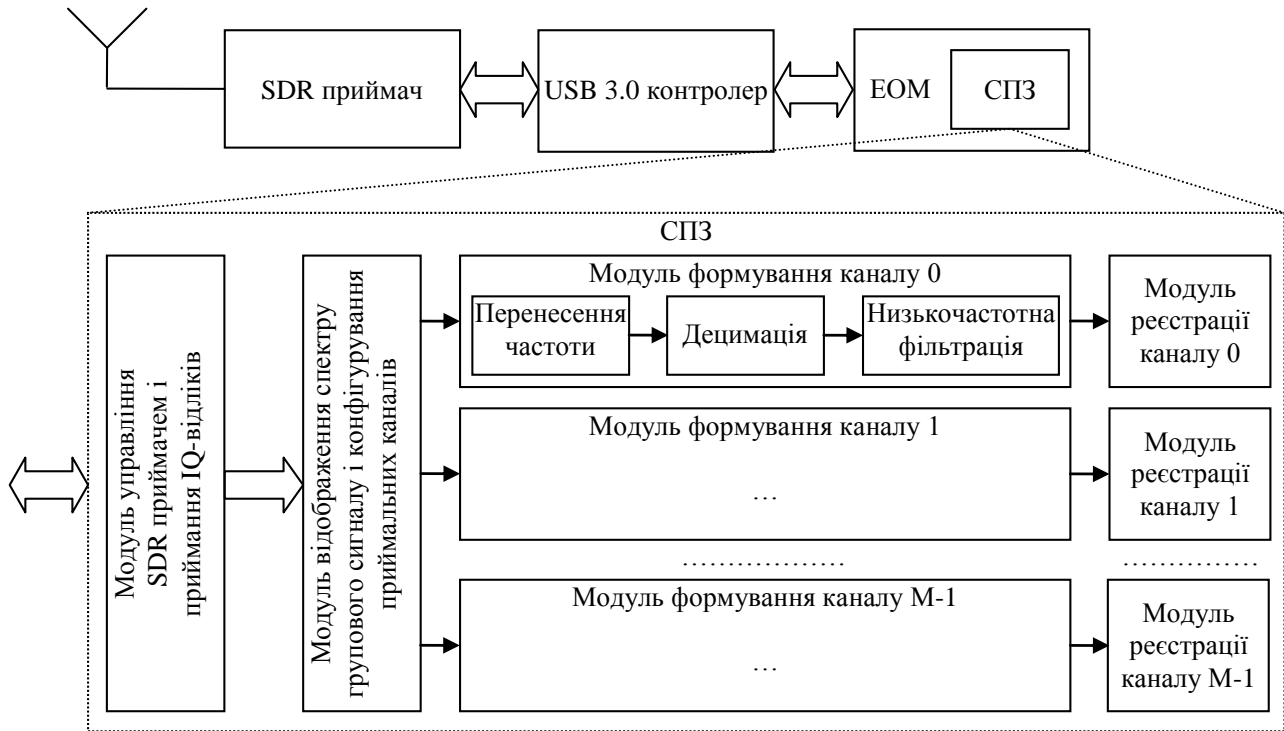


Рис. 1. Структурна схема побудованого багатоканального апаратно-програмного приймача

Під час проведення експерименту з групового сигналу виділялися сигнали від 1 кГц до 0,5 МГц.

Структурну схему побудованого багатоканального апаратно-програмного приймача, на якому проводилось дослідження, представлено на рис. 1.

Було розроблено програмні модулі, які забезпечували управління SDR приймачем і приймання від нього IQ-відліків, відображення спектру групового сигналу і конфігурування приймальних каналів, виділення сигналів із групового (формування каналів), реєстрацію виділених сигналів.

Для формування приймальних каналів з широкосмугового групового сигналу, що приймався SDR приймачем, програмні модулі забезпечували перенесення IQ-відліків на нульову частоту і низькочастотну фільтрацію з децимацією отриманих відліків.

Для оцінювання потрібного порядку фільтра N при виділенні сигналу із групового спектра застосуємо коефіцієнт децимації R , який визначається відношенням $R = \frac{f_r}{f_b}$, де f_r – частота дискретизації групового сигналу, f_b – частота дискретизації сигналу, який слід виділити. Виразимо нормовану ширину перехідної смуги фільтра через відношення ширини перехідної смуги фільтра $\Delta f_{п.с.}$ до частоти дискретизації групового сигналу f_r : $\Delta f_n = \frac{\Delta f_{п.с.}}{f_b}$. Ширину перехідної смуги фільтра покладемо рівною $\Delta f_{п.с.} = 0,2\Delta f_b$, де Δf_b – смуга пропускання фільтра. Вираз (1) для розрахунку порядку фільтра набуває такого вигляду:

$$N = \frac{k}{\Delta f_n} = \frac{k f_r}{\Delta f_{п.с.}} = \frac{k R f_b}{0,2 \Delta f_b} = 5kR \frac{f_b}{\Delta f_b} \geq 5kR. \quad (2)$$

З (2) випливає, що порядок фільтра лінійно залежить від коефіцієнта децимації R , тому для отримання залежності кількості каналів одночасного приймання від параметрів виділених каналів з групового спектру спиратимемося на нього. Це дасть змогу застосувати експериментальні залежності, отримані при фіксованій частоті дискретизації, для обчислення кількості каналів і вибору порядку фільтра за умови інших значень частоти дискретизації та ширини спектра сигналу, який слід виділити.

У ході дослідження фільтрація здійснювалася фільтром низьких частот із кінцевою імпульсною характеристикою з використанням віконної функції Кайзера [15] при затуханні в смузі загородження $A = 50$ дБ. Для віконної функції Кайзера формула (1) з урахуванням (2) приймає вид: $N \geq \frac{A-7,95}{2,872} R$.

Максимальна кількість приймальних каналів, що можуть бути одночасно сформовані, визначалась спостереженням за завантаженістю графічного процесора та переповненнями буфера, що інформував про втрату даних, прийнятих від USB контролера.

Результати експерименту. Отриману експериментальну залежність максимальної кількості приймальних каналів M від коефіцієнта децимації R у логарифмічному масштабі представлено на рис. 2. З рисунку видно, що на ділянці з коефіцієнтом децимації 20 – 100 залежність має гіперболічний характер, а на ділянці 100 – 10000 – прямопропорційний, який описується функцією [16]:

$$M(R) = aR + b, \quad (3)$$

де a – коефіцієнт пропорційності, який визначає ступінь нахилу прямих до осі абсцис, b – коефіцієнт, що визначає зсув прямих по осі ординат.

Отримані експериментально залежності апроксимовано методом найменших квадратів (МНК) [12]. Згідно з МНК задача зводиться до пошуку коефіцієнтів a та b в (3) у результаті розв'язання системи рівнянь:

$$\begin{cases} bL + a \sum_{i=1}^L R_i = \sum_{i=1}^L M_i \\ b \sum_{i=1}^L R_i + a \sum_{i=1}^L R_i^2 = \sum_{i=1}^L M_i R_i, \end{cases} \quad (4)$$

де L – кількість експериментальних вибірок.

Знайдені в результаті розв'язання системи рівнянь (4) значення коефіцієнту пропорційності функції (3) становить: $a = 6,1$ – для $N = 61 \dots 1001$ і $a = 0,8$ – для $N = 1001 \dots 3901$. Апроксимовану відповідно до МНК залежність максимальної кількості каналів від коефіцієнта децимації в діапазоні від 100 до 10 000 представлено на рис. 3.

Середня похибка апроксимації, розрахована за формулою $\bar{A} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \left| \frac{M_i - \hat{M}_i}{M_i} \right| \cdot 100\%$, не перевищує 15%, що свідчить про вдало підібрану функцію (3).

Зміна апаратної платформи ЕОМ та зміна параметрів фільтра (коефіцієнт k) впливають на зміну коефіцієнтів a і b та, відповідно, зміну коефіцієнта пропорційності і зміщення отриманих залежностей по осі ординат.

Із рис. 2, 3 випливає, що досягти збільшення кількості приймальних каналів можна:

збільшенням коефіцієнта децимації. Це обумовлено зменшенням кількості відліків, над якими здійснюються обчислення, і, відповідно, зменшенням кількості обчислень при збільшенні коефіцієнта децимації. У зв'язку з тим, що ширина спектра групового сигналу і смуги приймальних каналів є вихідними даними, можливості впливу на коефіцієнт децимації для збільшення кількості приймальних каналів немає;

зменшенням порядку фільтра. Це обумовлено зменшенням обчислень на один відлік при зменшенні порядку фільтра. З іншого боку, від вибору порядку фільтра безпосередньо залежить якість фільтрації (результати експериментального дослідження наведено далі). Тому вибір порядку фільтра потребує компромісного налаштування.

Оцінювання якості фільтрації. Достатність обраного порядку фільтра для забезпечення якісної фільтрації при заданому коефіцієнті децимації оцінимо відношенням заданої смуги фільтрації до отриманої. Отриману експериментально залежність відношення заданої смуги фільтрації до отриманої, виражену у відсотках, від коефіцієнта децимації при різних порядках фільтра представлено на рис. 4.

Представлені на рис. 4 отримані залежності підтверджують теоретичні дані: із збільшенням коефіцієнта децимації для забезпечення якісної фільтрації порядок фільтра слід збільшувати.

Графіки, подані на рис. 2 – 4, можуть бути використані для оцінювання максимальної кількості приймальних каналів, сформованих одночасно, при різних коефіцієнтах децимації та необхідній якості фільтрації. Так, наприклад, із рис. 4 видно, що для фільтрації сигналу з коефіцієнтом децимації 1000 та якістю фільтрації не гірш, ніж 80%, слід використовувати фільтри із порядком 900 – 1000. Далі, з рис. 3 видно, що максимальна кількість приймальних каналів для коефіцієнта децимації 1000 при порядках фільтра 900 – 1000 становить 3.

Аналіз отриманих даних. Порівнюючи графіки, представлені на рис. 3 і 4, переконуємося, що при фіксованому коефіцієнті децимації для досягнення якісної фільтрації порядок фільтра слід збільшувати, що призведе до зменшення кількості приймальних каналів. І навпаки – для збільшення кількості приймальних каналів слід зменшувати порядок фільтра, що призведе до погіршення якості фільтрації. Для вибору компромісного значення порядку фільтра можуть застосовуватися відомі методи оптимізації.

Висновки

У результаті дослідження отримано експериментальну оцінку ефективності побудови багатоканальних приймачів сигналів за технологією SDR при проведенні паралельних обчислень над відліками сигналу ресурсами графічного процесора ЕОМ. Ефективність оцінювалася максимальною кількістю каналів, приймання яких забезпечувалося.

Визначення залежності кількості каналів одночасного приймання при фіксованій частоті дискретизації групового сигналу відносно коефіцієнта децимації дало змогу використовувати отримані експериментальні залежності при інших значеннях частоти дискретизації.

Показано, що максимальна кількість каналів багатоканального приймача сигналів пропорційна коефіцієнту децимації. При обраній апаратній платформі значення коефіцієнта пропорційності становить 6,1 для фільтрів від 61 до 1001 порядку і 0,8 – для фільтрів від 1001 до 3901 порядку.

Достатність обраного порядку фільтра при заданому коефіцієнті децимації оцінено відношенням заданої до отриманої смуг пропускання. Отримані експериментально залежності збігаються із теоретичними даними.

При проектуванні та розробці SDR приймача для отримання бажаної кількості приймальних каналів при заданій смузі приймання необхідно передбачити достатній запас обчислювальних ресурсів, який може бути визначений за допомогою результа-

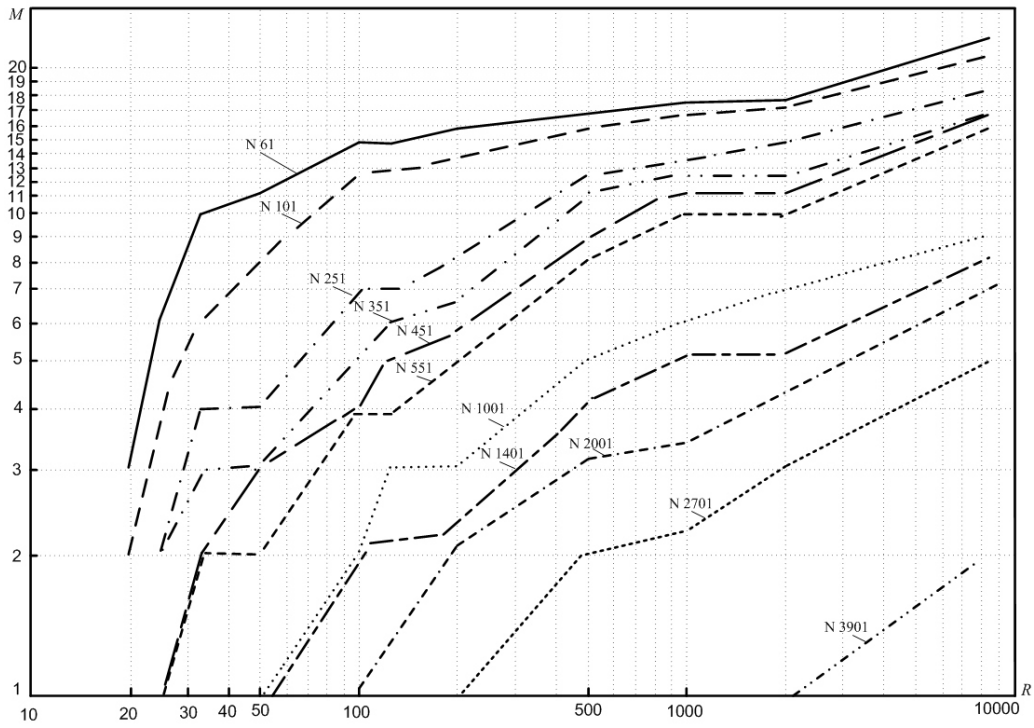


Рис. 2. Отримана експериментально залежність максимальної кількості каналів від коефіцієнта децимації при різних порядках фільтрів

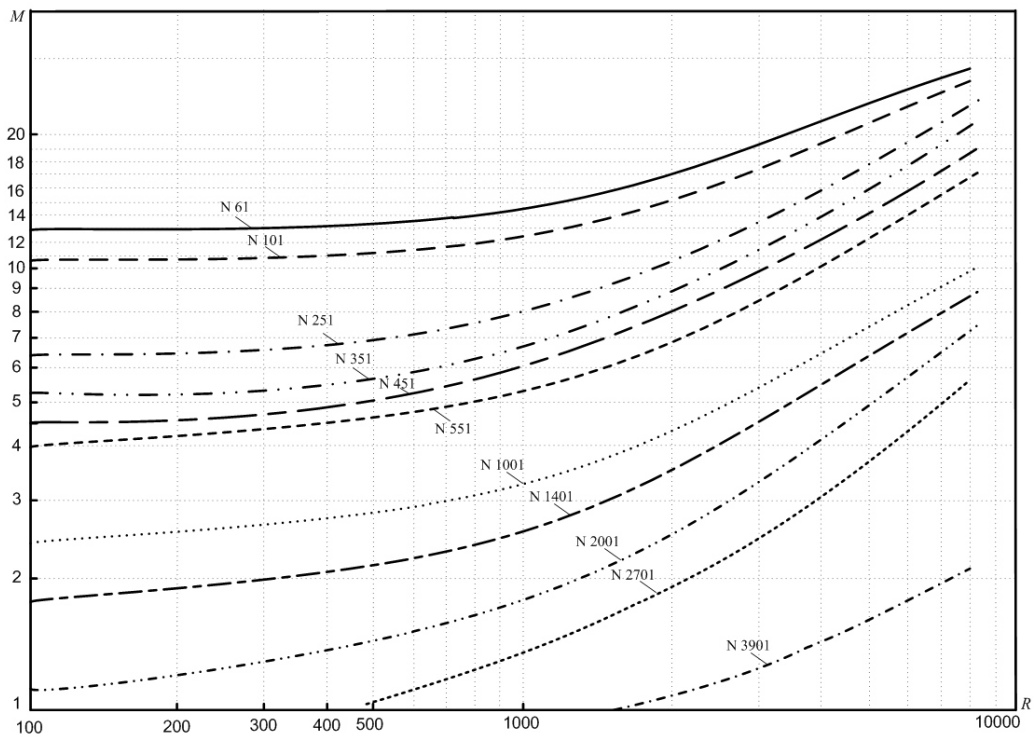


Рис. 3. Апроксимована залежність максимальної кількості приймальних каналів від коефіцієнта децимації при різних порядках фільтра

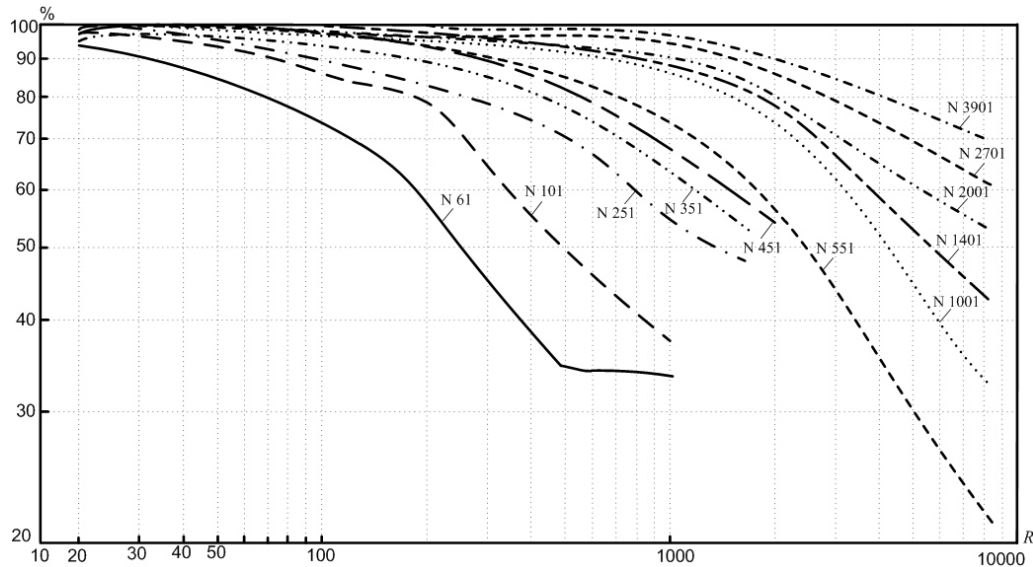


Рис. 4. Експериментально отримана залежність якості фільтрації від коефіцієнта децимації при різних порядках фільтра

тів, викладених у цій статті. Також слід врахувати потребу у додаткових обчислювальних ресурсах при необхідності подальшої обробки виділених каналів: демодуляції, декодуванні тощо.

При обмежених обчислювальних ресурсах кількість програмно реалізованих каналів у багатоканальному приймачі, побудованому за технологією SDR, є компромісним значенням, яке залежить від апаратних ресурсів ЕОМ, обраного порядку та параметрів фільтра при заданому коефіцієнті децимації.

Перелік посилань

1. Романов О. М. Застосування SDR технології для моніторингу супутникових каналів зв'язку / О.М. Романов, Р.Л. Ставісюк // Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції. – 2016. – Житомир: ЖВІ. – С. 73–74.
2. Силян А. Технология Software Defined Radio. Теория, принципы и примеры аппаратных платформ / А. Силян // Беспроводные технологии. – 2007. – № 7. С. 22–27.
3. Software-Defined Radio for Engineers [Електронний ресурс] / Т. F. Collins, R. Getz, D. Pu, A. M. Wyglinski. – Norwood : Artech House, 2018. – 352 p.
4. Richter J. CLR via C# / Jeffrey Richter, Fourth edition. – Redmond : Microsoft Press, 2012. – 862 p.
5. Gregory K. C++ AMP : Accelerated Massive Parallelism with Microsoft Visual C++ / K. Gregory, A. Miller. – Sebastopol : O'Reilly Media, 2012. – 326 p.
6. Будко П. А. SDR-технологии и новые принципы приема сообщений в симплексных радиолниях / П.А. Будко, С.Е. Жолдасов, Г.А. Жуков, Н.П. Будко // Научные технологии в космических исследованиях земли. – 2013. – № 1. – С. 34–38.
7. Николашин Ю. Л. SDR радиоустройства и когнитивная радиосвязь в декаметровом диапазоне частот [Електронний ресурс] / Ю.Л. Николашин, И.А. Кулешов, П.А. Будко та ін. // Научные технологии в космических исследованиях земли. – 2015. – № 1. – С. 20–31.
8. Романов О. М. Перспективы развития средств мониторингу спутниковых сетей связи / О.М. Романов, Д.Ю. Бурлак, Д.В. Коросташов // Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки, Київ, 12–13 жовт. 2016 р. – К. : ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2016. – С. 299–301.
9. Романов О. М. Підходи до створення багатоканальних апаратно-програмних засобів обробки сигналів / О.М. Романов, Д.Ю. Бурлак, Д.В. Коросташов // Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи. – Одеса : Військова академія, 2017. – С. 125–127.
10. Павлюк В. В. Підходи до побудови багатоканальних програмно-визначених комплексів радіоконтролю телекомунікаційних мереж / В.В. Павлюк // Системи обробки інформації. – 2018. – № 2(153). – С. 144–151.
11. Погорелый С. Д. Анализ методов повышения производительности компьютеров с использованием графических процессоров и программно-аппаратной платформы CUDA / С.Д. Погорелый, Ю.В. Бойко, М.И. Трибрат, Д.Б. Грязнов // Математичні машини і системи. – 2010. – № 1. С. 40–54.
12. Hamming R. W. Numerical methods for scientists and engineers / R. W. Hamming. – New York : Dover Publications, 1973. – 721 p.
13. Буза М. К. Анализ эффективности параллельных технологий / М. К. Буза // Штучний інтелект. – 2015. – № 1–2. – С. 71–78.
14. Симонов В. В. Оценка эффективности параллельных алгоритмов для моделирования многослойного перцептрона [Електронний ресурс] / В. В. Симонов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 1 (21), часть 2. С. 166–171.

15. Ifeachor E. C. Digital Signal Processing : a practical approach / E. C. Ifeachor, B. W. Jervis, – 2-d edition. – New York : Addison-Wesley Publishing Company, 1993. – 760 p.
16. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1974. – 832 с.

References

- [1] Romanov O. M. and Stavisyuk R. L. (2016) Zastosuvannya tekhnolohiy SDR dlya monitorynhu suputnykovykh kanaliv zv'yazku [Using SDR technology to monitoring satellite communication channels]. *Problems of creation, development and application of high-tech special purpose systems taking into account the experience of antiterrorist operation*, pp. 73–74.
- [2] Silin A. (2007) Tekhnologiya Software Defined Radio. Teoriya, printsipy i primery apparatnykh platform [Software Defined Radio Technology: Theory, Principles and Examples of Hardware Platforms], *Besprovodnye tekhnologii*, no 7., pp. 22–27.
- [3] Collins T. F., Getz R., Pu D. and Wyglinski A.M. (2018) *Software-Defined Radio for Engineers*. Artech House, Norwood, 352 p.
- [4] Richter J. (2010) *CLR via C#: 3-d edition*. Microsoft Press, Redmond, 873 p.
- [5] Gregory K. and Miller A. (2012) *C++ AMP: Accelerated Massive Parallelism with Microsoft Visual C++*. O'Reilly Media, 326 p.
- [6] Budko P. A., Zholdasov S. E., Zhukov G. A. and Budko N. P. (2013) SDR-tekhnologii i novye printsipy priema soobshchenii v simpleksnykh radioliniyakh [SDR-technologies and new principles of receiving messages in simplex radiolines]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh zemli*, No 1, pp. 34–38.
- [7] Nikolashin Yu. L., Kuleshov I. A., Budko P. A., Zholdasov E. S. and Zhukov G. A. (2015) SDR of the radio device and cognitive radio communication in the decimeter range of frequencies. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh zemli*, No 1, pp. 20–31.
- [8] Romanov O. M., Burlak D. Yu. and Korostashov D. V. (2016) Perspektivy rozvytku zasobiv monitorynhu suputny-kovykh mrezh zvyazku [Prospects for the development of monitoring facilities for satellite communication networks]. *Challenges of coordination of military technical and defense industry policies. Prospects of development of armament and military equipment*, pp. 299–301.
- [9] Romanov O. M., Burlak D. Yu. and Korostashov D. V. (2017) Pidkhody do stvorennia bahatokanal'nykh aparatno-prohrannykh zasobiv obrobky syhnaliv [Approaches of multichannel hardware and software signal processing creation]. *Joint actions of military formations and law enforcement agencies of the state: problems and perspectives*, pp. 125–127.
- [10] Pavliuk V. V. (2018) Pidkhody do pobudovy bahatokanal'nykh prohrannovyznachenyykh kompleksiv radiokontroliu telekomunikatsiynykh mrezh [Approaches to the construction of multi-channel software defined radio control system for the telecommunication networks]. *Systemy obrobky informatsii*, No 2(153), pp. 144–151. DOI: 10.30748/soi.2018.153.18
- [11] Pogorely S. D., Boyko Yu. V., Tribat M. I. and Gryaznov D. B. (2010) The analysis of methods of increase of the productivity computers with use of graphic processors and hardware software platform CUDA. *Matematychni mashyny i systemy*, No 1, pp. 40–54.
- [12] Hamming R. (1973) *Numerical methods for scientists and engineers: 2-d edition*. Dover Publications, New York, 721 p.
- [13] Buza M. K. (2015) Analysis of the effectiveness of parallel technologies. *Shtuchnyi intelekt*, No 1–2, pp. 71–78.
- [14] Simonov V. V. (2010) Efficiency estimation of parallel algorithms for multilayer perceptron modeling. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, No 1 (21), part 2, pp. 166–171.
- [15] Ifeachor E. C. and Jervis B. W. (1993) *Digital Signal Processing: a practical approach, 2-d edition*. Addison-Wesley, 760 p.
- [16] Korn G. and Korn T. (1974) *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Nauka, Moscow, 832 p.

Экспериментальная оценка эффективности построения многоканальных приемников сигналов по технологии SDR

Романов А. Н., Котюбин В.Ю.

Технология программно обусловленного радио в сочетании с параллельными вычислениями позволяет строить многоканальные приемники сигналов. Теоретическая оценка эффективности построения таких приемников не учитывает ряда факторов. В статье приведены экспериментально полученные зависимости максимального количества каналов от параметров сформированных каналов приема при программной реализации обработки сигналов. Также приведены зависимости качества выделения каналов от заданных параметров.

Ключевые слова: multichannel receiver; software defined radio; experimental evaluation of efficiency; parallel calculations; digital filter order; decimation coefficient

Experimental Evaluation of Multiple Channel SDR Signal Receivers Effectiveness

Romanov O. M., Kotiubin V. Yu.

Introduction. The SDR technology makes it possible to build multichannel signal receivers for replacing single-channel devices. In this the amount of real time calculations grows considerably. For these calculations it is expedient to apply parallel computations based on the multi-core central and graphic processors. The theoretical efficiency evaluation of the such receivers ignores many factors. The purpose of the article is an experimental efficiency evaluation of the SDR multichannel signal receivers' construction.

Modeling, analysis and testing. The multichannel research firmware receiver consisted of an SDR receiver, a USB controller and a computer. On a computer in a single server shell worked functionally completed software

signal processing modules. They provided reception of IQ-samples from the SDR receiver, their transfer to zero frequency, low-frequency filtration with decimation of the received samples. The experimental dependences of the maximum number of receiving channels from the decimation coefficient are obtained. At a decimation coefficient from 20 to 100 dependencies are hyperbolic, and from 100 to 10000 dependencies are directly proportional. The obtained dependences on the direct proportional section are approximated by the method of least squares. For a selected hardware platform, the proportionality coefficient is 6,1 for filters from 61 to 1001 order and 0,8 for filters from 1001 to 3901 order.

Conclusions. It's possible to increase the number of receiving channels by: increasing the decimation coefficient. The group signal and receiving channel spectrum bandwidth are the source data. Therefore, there is no possibility to increase the number of receiving channels by the decimati-

on coefficient; decreasing filter order. The signal filtering quality depends from the filter order. Therefore, the choice of the filter order requires a compromise. The adequacy of the selected filter order to ensure a qualitative filtration with a given decimation coefficient is experimentally evaluated by the ratio of the given filtration band to the received. The obtained dependencies confirm the theoretical data: to ensure a high-quality filter with the increase of the decimation coefficient the order of the filter should be increased. With a fixed decimation coefficient, in order to achieve qualitative filtration, the order of the filter should be increased. It's will reduce the number of receiving channels. To increase the number of receiving channels it's necessary to reduce the order of the filter, which will lead to deterioration of the filtration quality.

Key words: multichannel receiver; software defined radio; experimental evaluation of efficiency; parallel calculations; digital filter order; decimation coefficient