

ЕЛЕКТРОНІКА, ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ, ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА РАДІОТЕХНІКА

<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2026-187-4-171-177>

УДК 621.335

Г. Г. Бортник¹

О. Г. Бортник¹

В. М. Кичак¹

С. В. Чубатюк¹

БАГАТОКАНАЛЬНИЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ТРАКТ ПРОГРАМНО КЕРОВАНИХ РАДІОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ З КОРИГУВАННЯМ НЕІДЕНТИЧНОСТІ ЧАСОВИХ ЗСУВІВ КАНАЛЬНИХ СИГНАЛІВ

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано метод розширення динамічного діапазону багатоканальних аналого-цифрових трактів (АЦТ) програмно керованих радіоприймальних пристроїв (ПКРП). Встановлено, що динамічний діапазон багатоканального АЦТ залежить від ідентичності часових параметрів схем вибірки та зберігання (СВЗ) і аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) у кожному каналі та відносного розкиду цих параметрів. Наявність апертурної невизначеності в i -му каналі АЦТ призводить до часового зсуву точок дискретизації між реальними фронтами тактових імпульсів та ідеальними фронтами імпульсів. Будь-яка неідентичність між апертурними затримками в каналах спричиняє появу додаткових частотних компонентів у вихідному сигналі АЦТ, що призводить до погіршення динамічного діапазону АЦТ.

Доведено, що компенсацію часової неідентичності можна здійснювати шляхом коригування передавальних характеристик каналів АЦТ. Тобто, пропонується виконувати ідентифікацію часової неідентичності у цифровій частині каналу АЦТ, а здійснювати компенсацію цієї неідентичності шляхом керування передавальною характеристикою на аналоговій частині каналу АЦТ. Компенсація часової неідентичності каналу здійснюється за допомогою керування передавальною характеристикою відповідного каналу АЦТ шляхом комутації опору у колі вибірки сигналу СВЗ.

Розроблено структурну схему багатоканального АЦТ з коригуванням неідентичності часових затримок каналних сигналів. АЦТ працює у двох режимах: ідентифікації та у робочому режимі з коригуванням часових затримок каналних сигналів.

Для дослідження ефективності методу коригування неідентичності часових затримок каналних сигналів АЦТ розроблено імітаційну модель багатоканального АЦТ. Розроблена модель багатоканального АЦТ містить 8 каналів паралельно ввімкнених 16-розрядних АЦП зі схемами вибірки та зберігання, мультиплексор, буферний регістр, блок коригування часових затримок каналних сигналів та 8 цифроаналогових перетворювачів, що керують коефіцієнтами передачі СВЗ у кожному каналі АЦТ.

Аналіз ефективності розробленого методу підтвердив, що запропонований метод дає змогу розширити динамічний діапазон 16-розрядного АЦТ на 37 дБ.

Ключові слова: багатоканальний аналого-цифровий тракт, аналого-цифровий перетворювач, мультиплексор, неідентичність часових затримок, каналні сигнали, динамічний діапазон.

Вступ

Розвиток програмно керованих радіоприймальних пристроїв (ПКРП) неможливий без покращення характеристик аналого-цифрового тракту (АЦТ), що є одним з найважливіших складових сучасних ПКРП. АЦТ встановлює граничні можливості смуги робочих частот та динамічного діапазону ПКРП [1]. Метод побудови АЦТ, що базується на багатоканальній архітектурі, забезпечує необхідні частотні характеристики ПКРП [2]. Водночас реалізація цього методу побудови АЦТ



© Г. Г. Бортник, О. Г. Бортник, В. М. Кичак, С. В. Чубатюк, 2026. Ця стаття відкритого доступу та поширюється на умовах ліцензії [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ускладнюється, тому що окремі канали АЦТ характеризуються неідентичністю параметрів. Це стосується неідентичності часових затримок каналних сигналів АЦТ. В результаті це призводить до звуження динамічного діапазону як АЦТ, так і в цілому ПКРП. Для зниження похибок неідентичності часових затримок каналних сигналів АЦТ використовують різноманітні методи коригування параметрів АЦТ [3], [4].

Створення ПКРП, призначених для приймання радіосигналів у широкому динамічному діапазоні, зумовлює актуальність розроблення методів коригування неідентичності часових затримок каналних сигналів багатоканальних АЦТ.

У роботах [5], [6], доведено, що реальний динамічний діапазон багатоканальних АЦТ не досягає своїх потенційних можливостей внаслідок впливу неідентичності часових затримок каналних сигналів. Методи коригування неідентичності часових затримок на базі статистичного оброблення вхідних сигналів АЦТ характеризуються обмеженнями у використанні, тому що вони є коректними лише для певного класу оброблюваних сигналів. У роботах [7]—[9] описано аналогові та комбіновані методи коригування часової неузгодженості у багатоканальних АЦТ. Варто зазначити, що точність коригування часових затримок в аналоговій формі є недостатньо високою. Натомість цифрова методологія коригування неідентичності часових затримок видається перспективнішою і може забезпечити вищу ефективність аналого-цифрового перетворення радіосигналів у широкому динамічному діапазоні.

Метою роботи є розширення динамічного діапазону багатоканальних АЦТ за рахунок коригування неідентичності часових затримок каналних сигналів.

Результати дослідження

Аналого-цифровий тракт ПКРП містить N паралельних каналів, в яких використовуються аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) зі схемами вибірки та зберігання (СВЗ) на вході (рис. 1). Аналоговий сигнал U_{in} через фільтр нижніх частот (LPF) підводиться на входи всіх каналів АЦТ (SHS-ADC1... SHS-ADC N). На виходах блока керування (CU) АЦТ формуються імпульсні сигнали з періодом дискретизації NT_s , що подаються на тактові входи кожного каналу АЦТ з відповідним фазовим зсувом. Цифрові еквіваленти аналогового сигналу подаються на вхідну шину мультиплексора (MP), а на вихідній шині мультиплексора формується вихідний сигнал АЦТ D_{out} з частотою дискретизації, що в N разів вища частоти дискретизації в окремому каналі АЦТ. Це дозволяє застосовувати в окремих каналах АЦТ зразки АЦП і СВЗ з відносно низькими показниками швидкодії [10].

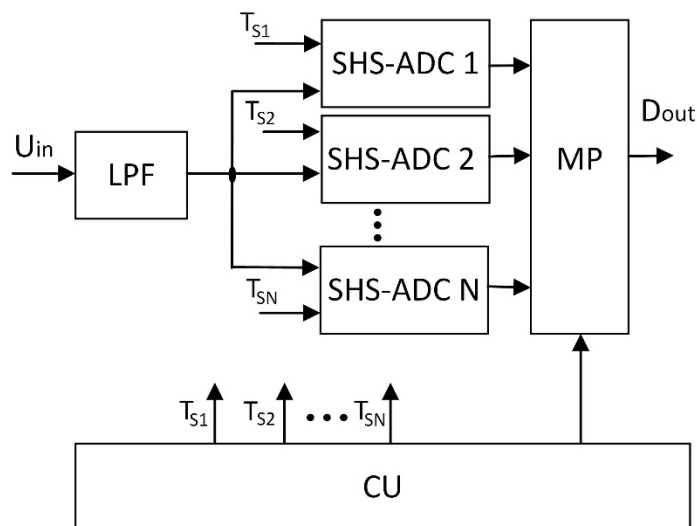


Рис. 1. Структурна схема багатоканального АЦТ

Динамічний діапазон багатоканального АЦТ залежить від ідентичності часових параметрів СВЗ і АЦП у кожному каналі та відносного розкиду цих параметрів. Наявність апертурної невизначеності в i -му каналі АЦТ призводить до часового зсуву точок дискретизації між реальними фронтами тактових імпульсів та ідеальними фронтами імпульсів

$$t_i = t_r + \Delta t_i, \quad (1)$$

де t_r — опорне значення апертурної затримки; Δt_i — неідентичність апертурної затримки i -го каналу відносно опорного значення апертурної затримки.

Опорне значення апертурної затримки знаходиться шляхом усереднення апертурних затримок усіх N каналів АЦТ. Якщо не враховувати нелінійні ефекти від процесу квантування в АЦП, вихідний сигнал АЦТ для випадку вхідного сигналу синусоїдальної форми $U_{in}(t) = U_m \sin(\omega_{in}t)$, буде мати такий вигляд [7]:

$$Y(e^{j\omega T_s}) = \frac{2\pi}{T_s} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \left[\alpha_p \delta\left(\omega - \omega_{in} - \frac{p\omega_s}{N}\right) - \alpha_{N-p}^* \delta\left(\omega + \omega_{in} - \frac{p\omega_s}{N}\right) \right], \quad (2)$$

$$\alpha_p = \frac{U_m}{j2N} e^{-j\omega_{in}t_r} \sum_{i=0}^{N-1} e^{-j\omega_{in}\Delta t_i} H_i(j\omega_{in}) e^{-jp\frac{2\pi i}{N}}. \quad (3)$$

З виразу (2) видно, що для p -го члена вхідний сигнал АЦТ зважується частотно-залежним ваговим коефіцієнтом α_p та зсувається по частоті на значення $\frac{p\omega_s}{N}$. Коефіцієнт α_p є дискретним перетворенням Фур'є часової неідентичності каналів АЦТ та визначає спектр вихідного сигналу АЦТ. З виразів (2) і (3) зрозуміло, що будь-яка неідентичність між апертурними затримками в каналах спричиняє появу додаткових частотних компонентів у вихідному сигналі АЦТ, що призводить до погіршення динамічного діапазону АЦТ.

Для подальшого аналізу впливу неідентичностей апертурних затримок вважаємо, що передавальна характеристика i -го каналу АЦТ еквівалентна характеристиці фільтра нижніх частот 1-го порядку

$$H_i(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau_i}, \quad (4)$$

де τ_i — постійна часу, що є оберненою величиною до частоти зрізання i -го каналу АЦТ на рівні -3 дБ.

Постійна часу τ_i визначається опором R_i та ємністю C_i i -го каналу в режимі вибірки сигналу

$$\tau_i = R_i C_i. \quad (5)$$

Після підстановки (4) в (3), отримаємо

$$\alpha_p = \frac{U_m}{j2N} e^{-j\omega_{in}t_r} \sum_{i=0}^{N-1} K_i(\omega_{in}) e^{-j\omega_{in}\Delta t_i} e^{-j\phi_i(\omega_{in})} e^{-jp\frac{2\pi i}{N}}, \quad (6)$$

$$K_i(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (j\omega\tau_i)^2}} \quad (7)$$

є амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) i -го каналу АЦТ, а

$$\phi_i(\omega) = -\arctg(\omega\tau_i) \quad (8)$$

є фазо-частотною характеристикою (ФЧХ) i -го каналу АЦТ.

Для аналізу зв'язку між частотою вхідного сигналу АЦТ та постійною часу τ_i виконаємо розкладання виразів (7) і (8) у ряд Тейлора

$$T[K_i(\omega)] = 1 - \frac{1}{2}(\omega\tau_i)^2 + \frac{3}{8}(\omega\tau_i)^4 - \dots; \quad (9)$$

$$T[\phi_i(\omega)] = -\omega\tau_i + \frac{1}{3}(\omega\tau_i)^3 - \frac{1}{5}(\omega\tau_i)^5 + \dots. \quad (10)$$

Для низьких значень частот та малих значень τ_i АЧХ каналів АЦТ майже постійна, водночас ФЧХ лінійно залежить від частоти вхідного сигналу. Таким чином, фазова неідентичність каналів має набагато більший вплив на динамічний діапазон АЦТ, ніж неідентичність АЧХ каналів АЦТ. Тому розглянемо неідентичність апертурних затримок каналів АЦТ. Використовуючи опорне значення апертурної затримки t_r , вираз (10) можна записати так:

$$T[\phi_i(\omega)] = -\omega\tau_r - \omega\Delta\tau_i + \hat{\phi}_i(\omega), \quad (11)$$

де

$$\hat{\phi}_i(\omega) = \frac{1}{3}(\omega\tau_i)^3 - \frac{1}{5}(\omega\tau_i)^5 + \dots \quad (12)$$

Підставивши (11) в (6), отримаємо

$$\alpha_p = \frac{U_m}{j2N} e^{-j\omega_{in}(\tau_r + t_r)} \sum_{i=0}^{N-1} K_i(\omega_{in}) e^{-j\omega_{in}(\Delta\tau_i + \Delta t_i)} e^{-j\hat{\phi}_i(\omega_{in})} e^{-jp\frac{2\pi}{N}}. \quad (13)$$

Отже, ФЧХ будь-якого каналу АЦТ містить базову фазову складову $-\omega\tau_r$, лінійну фазову неідентичність $-\omega\Delta\tau_i$ та нелінійну фазову неідентичність $\hat{\phi}_i(\omega)$. Фазові неідентичності в кожному каналі об'єднуються в одну лінійну фазову неідентичність $-\omega(\Delta\tau_i + \Delta t_i)$, тобто в загальну часову неідентичність каналу.

Один з відомих методів коригування часової неідентичності полягає в цифровій ідентифікації значень часових затримок в каналах з подальшим коригуванням часової неідентичності за допомогою перемикання елементів затримки в трактах формування сигналів дискретизації АЦП [8]. Проте з отриманих вище результатів випливає, що компенсацію часової неідентичності можна здійснювати шляхом коригування передавальних характеристик каналів АЦТ. Тобто, пропонується виконувати ідентифікацію часової неідентичності у цифровій частині каналу АЦТ та здійснювати цифрову компенсацію цієї неідентичності шляхом керування передавальною характеристикою на аналоговій частині каналу АЦТ.

На базі відомих ФЧХ опорного каналу $\phi_r(\omega)$ та i -го каналу $\phi_i(\omega)$ можна знайти неідентичність апертурної затримки

$$\omega\Delta t_i = -\omega\Delta\tau_i + \phi_i(\omega) - \phi_r(\omega). \quad (14)$$

Підставивши (14) у вираз (13), отримаємо

$$\alpha_p = \frac{U_m}{j2N} e^{j\phi_r(\omega_{in})} \sum_{i=0}^{N-1} K_i(\omega_{in}) e^{j(\phi_i(\omega_{in}) - \hat{\phi}_i(\omega_{in}))} e^{-jp\frac{2\pi}{N}}. \quad (15)$$

Компенсація часової неідентичності каналу здійснюється за допомогою керування передавальною характеристикою відповідного каналу АЦТ шляхом цифрової комутації опору у колі вибірки сигналу СВЗ. При цьому значення опору у колі вибірки СВЗ для коефіцієнта передачі K_{R_i} можна знайти як

$$R_i = K_{R_i} R_{st}, \quad (16)$$

де R_{st} — значення кроку зміни опору у колі вибірки СВЗ.

На рис. 2 показано структурну схему багатоканального АЦТ з коригуванням неідентичності часових затримок каналних сигналів.

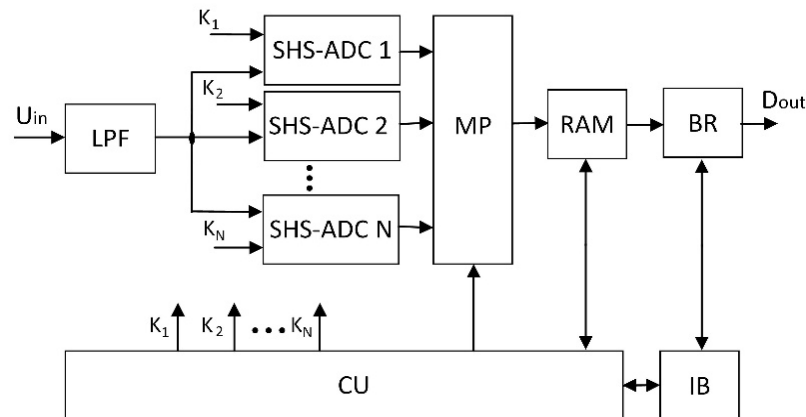


Рис. 2. Структурна схема багатоканального АЦТ з коригуванням неідентичності часових затримок каналних сигналів

АЦТ працює у двох режимах: ідентифікації та у робочому режимі з коригуванням часових затримок каналних сигналів. У режимі ідентифікації через фільтр нижніх частот на аналогові входи всіх каналів АЦТ подається випробувальний синусоїдальний сигнал. Цифрові еквіваленти вхідного сигналу з виходу мультиплексора запам'ятовуються в оперативному запам'ятовувальному пристрої (RAM). Сформований масив цифрових сигналів обробляється в блоці ідентифікації (IB), де виконується визначення часових затримок каналних сигналів АЦТ. Кожен канал АЦТ містить на вході СВЗ цифроаналоговий перетворювач, що виконує функцію цифрового коригування передавальної характеристики каналу. Цифрові коди коефіцієнтів передачі K_{R_i} з виходів блока керування (CU) подаються на відповідні керувальні входи СВЗ в каналах (SHS-ADC). У робочому режимі вихідний сигнал D_{out} АЦТ формується на виході буферного регістра (BR).

АЦТ працює у двох режимах: ідентифікації та у робочому режимі з коригуванням часових затримок каналних сигналів. У режимі ідентифікації через фільтр нижніх частот на аналогові входи всіх каналів АЦТ подається випробувальний синусоїдальний сигнал. Цифрові еквіваленти вхідного сигналу з виходу мультиплексора запам'ятовуються в оперативному запам'ятовувальному пристрої (RAM). Сформований масив цифрових сигналів обробляється в блоці ідентифікації (IB), де виконується визначення часових затримок каналних сигналів АЦТ. Кожен канал АЦТ містить на вході СВЗ цифроаналоговий перетворювач, що виконує функцію цифрового коригування передавальної характеристики каналу. Цифрові коди коефіцієнтів передачі K_{R_i} з виходів блока керування (CU) подаються на відповідні керувальні входи СВЗ в каналах (SHS-ADC). У робочому режимі вихідний сигнал D_{out} АЦТ формується на виході буферного регістра (BR).

Для дослідження ефективності методу коригування неідентичності часових затримок каналних сигналів АЦТ розроблено імітаційну модель багатоканального АЦТ. Розроблена модель багатоканального АЦТ містить вісім каналів паралельно ввімкнених 16-розрядних АЦП зі схемами вибірки та зберігання, мультиплексор, буферний регістр, блок коригування часових затримок каналних сигналів та вісім 12-розрядних цифроаналогових перетворювачів (ЦАП), що керують коефіцієнтами передачі СВЗ у кожному каналі АЦТ.

Вхідним сигналом досліджуваного АЦТ вибрано чотири тональний сигнал, який містить чотири синусоїдальні складові. Такий сигнал є оптимальним тестовим сигналом багатоканального АЦТ, що з одного боку дає змогу забезпечити умови функціонування АЦТ наближені до реальних, а з іншого — такий сигнал можна досить просто реалізувати за допомогою стандартних генераторів сигналів синусоїдальної форми [10].

На рис. 3 показано спектри потужності вихідного сигналу багатоканального АЦТ без коригування для значень відносного показника неідентичності затримок 0,4 (верхній рисунок) та з коригуванням часових затримок каналних сигналів (нижній рисунок).

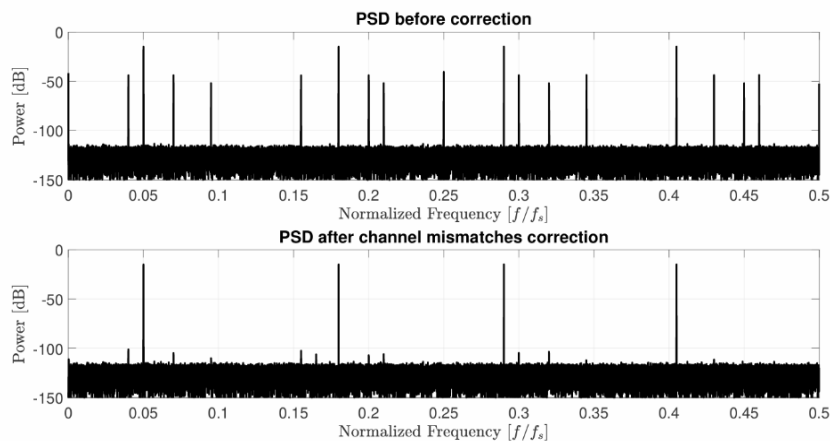


Рис. 3. Спектри потужності вихідного сигналу багатоканального АЦТ

Як впливає з верхньої спектрограми рис. 3 у спектрі потужності вихідного сигналу присутні бічні складові, що погіршують динамічний діапазон АЦТ. Як видно з нижньої спектрограми рис. 3 рівень бічних складових у спектрі потужності вихідного сигналу АЦТ, що функціонує в режимі з коригуванням часових затримок каналних сигналів, став значно нижчим.

Виконаємо дослідження динамічного діапазону запропонованого багатоканального АЦТ, який у частотній області знаходиться так [10]:

$$D = 20 \lg \left(\frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{\sum_{l=1}^L U_l} \right), \text{ дБ}, \quad (17)$$

де U_1, U_2, U_3, U_4 — амплітуди основних гармонік спектра сигналу на виході АЦТ; U_l — амплітуди усіх складових спектра вихідного сигналу АЦТ, окрім основних гармонік.

Підставивши у вираз (17) результати моделювання АЦТ, отримаємо динамічний діапазон багатоканального 16-розрядного АЦТ без коригування 47 дБ, а з коригуванням 84 дБ. Зауважимо, що зі збільшенням розрядності ЦАП, що керують передавальними характеристиками каналних АЦП ефективність коригування зростає, водночас це звужує смугу робочих частот АЦТ.

Висновки

У роботі запропоновано метод розширення динамічного діапазону багатоканальних АЦТ програмно керованих радіоприймальних пристроїв. Встановлено, що аналого-цифрове перетворення сигналів в АЦТ ПКРП виконується в окремих каналах з неідентичними часовими зсувами. Це призводить до звуження динамічного діапазону багатоканальних АЦТ.

Запропоновано здійснювати компенсацію часової неідентичності шляхом коригування передавальних характеристик каналів АЦТ. При цьому виконується ідентифікація часової неідентичності у цифровій частині каналу АЦТ, а компенсація цієї неідентичності здійснюється шляхом керування передавальною характеристикою на аналоговій частині каналу АЦТ.

Розроблено структурну схему багатоканального АЦТ з коригуванням неідентичності часових затримок каналних сигналів.

Аналіз ефективності розробленого методу підтвердив, що запропонований метод дає змогу розширити динамічний діапазон 16-розрядного АЦТ на 37 дБ.

Запропонований багатоканальний АЦТ можна використовувати в сучасних програмно керованих радіоприймальних пристроях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, і В. М. Кичак. *Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2016. ISBN 978-966-641-678-3. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Bortnyk_2020_126.pdf.
- [2] Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, і О. В. Стальченко. *Аналого-цифрові тракти комп'ютерних систем з цифровим обробленням високочастотних сигналів*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2016. ISBN 978-966-641-662-2. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/43829/163555.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- [3] H. Mafi, M. Yargholi, and M. Yavari, "Digital Blind Background Calibration of Imperfections in Time-Interleaved ADCs", *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 64, no. 6, pp. 1504-1514, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2017.2647758>.
- [4] B. T. Reyes, R. M. Sanchez, A. L. Pola, and M. R. Hueda, "Design and Experimental Evaluation of a Time-Interleaved ADC Calibration Algorithm for Application in High-Speed Communication Systems," *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 64, no. 5, pp. 1019-1030, May 2017. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2016.2636209>.
- [5] M. Tamba, A. Shimizu, H. Munakata, and T. Komuro, "A method to improve SFDR with random interleaved sampling method," in *International Test Conference*, 2001, Proceedings., pp. 512-520, October 2001. <https://doi.org/10.1109/TEST.2001.966669>.
- [6] A. Salib, M. F. Flanagan, and B. Cardiff, "A High-Precision Time Skew Estimation and Correction Technique for Time-Interleaved ADCs," *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 66, no. 10, pp. 3747-3760, Oct. 2019. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2019.2915282>.
- [7] C. Vogel, "The impact of combined channel mismatch effects in time-interleaved ADCs," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 1, pp. 415-427, February 2005. <https://doi.org/10.1109/TIM.2004.834046>.
- [8] Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, М. Р. Бриль, і О. Г. Бортник. «Паралельний аналого-цифровий перетворювач з часовим ущільненням сигналів», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. № 6, с. 83-88. 2025. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-7>.
- [9] Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, і С. О. Кирилюк. «Швидкодієний пристрій аналого-цифрового перетворення сигналів з коригуванням часової нестабільності у частотній області», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 6, с. 70-76. 2023. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-70-76>.
- [10] Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, і В. М. Кичак. *Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2013. ISBN 978-966-641-537-3. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/168/301/332-1?inline=1>.

Рекомендована кафедрою інфокомунікаційних систем і технологій ВНТУ

Дата надходження 15.04.2026

Дата прийняття після доопрацювання 16.05.2026

Дата прийняття до друку після рецензування 13.06.2026

Дата публікації 2.10.2026

Бортник Геннадій Григорович — канд. техн. наук, професор, професор кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, e-mail: bgen88@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0001-7083-2775>;

Бортник Олександр Геннадійович — аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, e-mail: alex.bortnik.it@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0007-2315-0043>;

Кичак Василь Мартинович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, e-mail: vmkychak@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0002-1991-9012>;

Чубатюк Сергій Васильович — аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, e-mail: ppifox-trot@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0008-4071-3247>.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

G. G. Bortnyk¹
O. G. Bortnyk¹
V. M. Kychak¹
S. V. Chubatiuk¹

Multichannel Analog-to-Digital Path of Software-Controlled Radio Receivers with Correction of Unequal Time Shifts of Channel Signals

¹Vinnitsia National Technical University

The paper presents the method for expanding the dynamic range of multi-channel analog-digital paths (ADP) of software-controlled radio receivers. It is established that the dynamic range of a multi-channel ADP depends on the identity of the time parameters of the sample-and-store circuits (SSC) and analog-to-digital converters (ADC) in each channel and the relative spread of these parameters. The presence of aperture uncertainty in the i -th channel of the ADC leads to a time shift of the sampling points between the real edges of the clock pulses and the ideal edges of the pulses. Any non-identity between the aperture delays in the channels causes the appearance of the additional frequency components in the ADP output signal, which leads to a deterioration in the dynamic range of the ADP. It is proved that compensation of time non-identity can be carried out by adjusting the transmission characteristics of the ADP channels. That is, it is proposed to perform identification of time non-identity in the digital part of the ADP channel, and to compensate for this non-identity by controlling the transfer characteristic on the analog part of the ADP channel. Compensation of time non-identity of the channel is carried out by controlling the transfer characteristic of the corresponding ADP channel by switching the resistance in the signal sampling circuit of the SSC.

Structural diagram of a multi-channel ADP with correction of non-identity of time delays of channel signals has been developed. The ADP operates in two modes: identification and in the operating mode with correction of time delays of channel signals.

To study the efficiency of the method for correcting non-identity of time delays of the ADP channel signals, a simulation model of a multi-channel ADP has been developed. The developed model of a multi-channel ADP contains 8 channels of 16-bit ADC connected in parallel with sample-and-hold circuits, a multiplexer, a buffer register, a channel signal time delay correction unit and 8 digital-to-analog converters that control the transmission coefficients of the SSC in each ADP channel. Analysis of the efficiency of the developed method confirmed that the proposed method allows to expand the dynamic range of a 16-bit ADP by 37 dB.

Keywords: multichannel analog-to-digital path, analog-to-digital converter, multiplexer, non-identity of time delays, channel signals, dynamic range.

Bortnyk Gennadiy G. — Cand. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Infocommunication Systems and Technologies, e-mail: bgen88@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0001-7083-2775>;

Bortnyk Oleksandr G. — Post-Graduate Student the Chair of Infocommunication Systems and Technologies, e-mail: alex.bortnik.it@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-2315-0043>;

Kychak Vasyl M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Infocommunication Systems and Technologies, e-mail: vmkychak@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-1991-9012>;

Chubatiuk Serhiy V. — Post-Graduate Student the Chair of Infocommunication Systems and Technologies, e-mail: ppifox-trot@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0008-4071-3247>