

БОРТНИК ГЕННАДІЙВінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0001-7083-2775>
e-mail: bgen88@gmail.com**БОРТНИК СЕРГІЙ**Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-4290-1750>
e-mail: sbortnyk@gmail.com**БРИЛЬ МИХАЙЛО**Вінницький національний технічний університет
e-mail: mishkabrill@gmail.com**БОРТНИК ОЛЕКСАНДР**Вінницький національний технічний університет
e-mail: alex.bortnik.it@gmail.com

ПАРАЛЕЛЬНИЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ З ВИПАДКОВИМ ПЕРЕМИКАННЯМ КАНАЛІВ

У роботі представлено метод покращення динамічного діапазону паралельних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Встановлено, що аналого-цифрове перетворення сигналу в багатоканальних АЦП паралельного типу супроводжується нестабільністю формування вихідних відліків сигналу у часовій області. Це призводить до появи у спектрі частот вихідного сигналу АЦП паразитних частотних складових, які звужують динамічний діапазон АЦП.

Запропоновано використання випадкового перемикання каналів перетворення з формуванням двох підгруп каналів та подальшим обробленням вихідного сигналу АЦП у частотній області. Розроблено структурну схему паралельного АЦП з випадковим перемиканням каналів. Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається розширити динамічний діапазон 10-розрядного паралельного АЦП на 6 – 13 дБ залежно від значення часової нестабільності вихідного сигналу перетворювача.

Ключові слова: паралельний аналого-цифровий перетворювач, похибка часової нестабільності, динамічний діапазон, випадкове перемикання каналів.

BORTNYK GENNADIY, BORTNYK SERHII, BRYL MYKHAILO, BORTNYK OLEKSANDR
Vinnytsia National Technical University

PARALLEL ANALOG-DIGITAL CONVERTER WITH RANDOM CHANNEL SWITCHING

The paper presents a method of improving the dynamic range of parallel analog-to-digital converters (ADCs). It was established that the analog-to-digital signal conversion in multi-channel ADCs of the parallel type is accompanied by the instability of the formation of the output readings of the signal in the time domain. As a result, there are errors in the time instability of the output signal of the parallel ADC. This leads to the appearance of parasitic frequency components in the spectrum of the output signal, which narrow the dynamic range of the ADC.

It was established that the digital spectrum of the output signal of a parallel ADC contains groups of frequency components that overlap each other and are evenly distributed along the frequency axis, and it is impossible to separate the components of the input signal and the parasitic components of the spectrum.

The use of random switching of conversion channels with the formation of two subgroups of channels and further processing of the ADC output signal in the frequency domain is proposed. From the entire group of available channels of the parallel ADC, two subgroups are constructed with the corresponding errors of time instabilities. The formation of subgroups requires an approximate estimation of the errors of temporal instabilities of the ADC channels, so the process of error estimation itself does not require significant time costs.

The structure of the process of analog-digital conversion with random switching of ADC channels is presented. The spectra of the output signal of the parallel ADC were analyzed for the mode of deterministic switching of channels and for the mode of random switching and formation of two subgroups of channels. For the random switching mode and the formation of two subgroups of ADC channels, the power of the parasitic components of the output signal decreases and becomes more evenly distributed along the frequency axis. To suppress these components, it is suggested to use a low-pass filter at the output of the parallel ADC.

A structural diagram of a parallel ADC with random channel switching has been developed. Analysis of the effectiveness of the proposed method confirmed that thanks to the developed method, it is possible to expand the dynamic range of a 10-bit parallel ADC by 6-13 dB, depending on the value of the time instability of the output signal of the converter.

Keywords: parallel analog-to-digital converter, temporal instability error, dynamic range, random channel switching.

Постановка проблеми

Швидкодійні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) сигналів знаходять широке використання в сучасних радіотехнічних і телекомунікаційних системах. Для підвищення швидкодії таких АЦП використовується метод розпаралелювання каналів аналого-цифрового перетворення з подальшим їх мультиплексуванням на вихідному ступені оброблення. Такий метод передбачає використання багатofазної дискретизації паралельно ввімкнених M каналів аналого-цифрового перетворення, що дає можливість підвищити частоту дискретизації паралельного АЦП в M разів [1-3].

В АЦП, що побудований на базі паралельно ввімкнених каналів аналого-цифрового перетворення, дискретизація вхідного сигналу супроводжується неконтрольованими часовими затримками в паралельних трактах АЦП. Нестабільність часових затримок у кожному з каналів аналого-цифрового перетворення відображається на погіршенні шумових властивостей такого АЦП. У кінцевому результаті такі похибки часової нестабільності вихідного сигналу АЦП призводять до звуження реального динамічного діапазону АЦП [4, 5]. Розробка цифрових радіотехнічних і телекомунікаційних систем, що обробляють високочастотні сигнали, обумовлює актуальність дослідження паралельних АЦП з розширеним динамічним діапазоном.

Аналіз останніх джерел

Дослідженню похибок часової нестабільності вихідного сигналу швидкодіючих АЦП паралельного типу присвячено роботи [6, 7], в яких зокрема доведено, що часова невизначеність вихідних сигналів впливає на ефективне число розрядів АЦП і з розширенням смуги робочих частот погіршується динамічний діапазон швидкодіючих перетворювачів аналог-код. У роботах [8, 9] наведено методи коригування похибок часової нестабільності вихідного сигналу АЦП. Слід зазначити, що точність коригування цих похибок обмежується часовим інтервалом, протягом якого здійснюється оцінювання значень часової нестабільності окремих каналів паралельних АЦП.

Для покращення динамічного діапазону паралельних АЦП в роботах [10, 11] пропонується використання режиму випадкового перемикання каналів аналого-цифрового перетворення. Натомість методологія коригування часової нестабільності вихідного сигналу у частотній області з використанням режиму випадкового перемикання каналів видається перспективнішою і може забезпечити ширший динамічний діапазон паралельних АЦП.

Метою роботи є розширення динамічного діапазону паралельних АЦП за рахунок використання випадкового перемикання каналів перетворення з подальшим обробленням вихідного сигналу у частотній області.

Виклад основного матеріалу

У класичній структурі паралельного АЦП використовується M каналів перетворення, що характеризуються періодом дискретизації MT_s . На вихідній шині АЦП формуються відліки вихідного сигналу $y[n]$ з періодом дискретизації T_s . При використанні випадкового перемикання каналів для збереження мінімального періоду дискретизації T_s в структуру АЦП потрібно ввести R додаткових каналів перетворення. Структура процесу аналого-цифрового перетворення, що демонструє принцип випадкового перемикання каналів АЦП, представлена на рис. 1. У цьому випадку $M = 2$, а $R = 1$, тобто використовується додатковий канал перетворення, щоб не обмежувався інтервал дискретизації T_s . У перших двох тактових інтервалах працюють послідовно: АЦП1, а потім канал АЦП2. На третьому інтервалі можливе під'єднання каналу АЦП1 чи АЦП3, а на четвертому інтервалі для випадку попереднього інтервалу роботи АЦП1 можливе під'єднання каналу АЦП2 чи АЦП3.

АЦП1	АЦП2	АЦП1	АЦП2
		АЦП3	АЦП2
1	2	3	4
Інтервали дискретизації			

Рис. 1. Структура процесу аналого-цифрового перетворення з випадковим перемиканням каналів АЦП

Для дослідження спектра вихідного сигналу АЦП з випадковим перемиканням каналів розглянемо відомий вираз для вихідного сигналу паралельного АЦП, що характеризується похибками часової нестабільності Δt_m у кожному каналі перетворення [12]

$$Y(e^{j\omega T_s}) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} F_k \left[j \left(\omega - \frac{k\omega_s}{M} \right) \right] X_a \left[j \left(\omega - \frac{k\omega_s}{M} \right) \right], \tag{1}$$

де $F_k(j\omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} e^{-j\omega \Delta t_m} e^{-jkm\omega \frac{2\pi}{M}}$.

Наведені вирази дозволяють стверджувати, що цифровий спектр вихідного сигналу паралельного АЦП містить M груп частотних складових, що накладаються між собою та рівномірно розподілені по осі частот і розділення складових вхідного сигналу та паразитних компонентів спектра неможливе.

АЦП з випадковим перемиканням каналів формує послідовність вибірок $z_n \in [0, 1, \dots, M + R - 1]$. Загальне число вибірок АЦП залежить від обсягу оперативного запам'ятовувального пристрою на виході та дорівнює

$$N = (M + R)L. \tag{2}$$

З урахуванням цього функція передачі АЦП у частотній області набуде такого вигляду:

$$F_k(j\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j\omega \Delta t_{z_n}} e^{-jkn\omega \frac{2\pi}{N}} \quad (3)$$

Потрібно так сформувати спектр вихідного сигналу паралельного АЦП, щоб при подальшому його обробленні у частотній області створились умови для подавлення груп паразитних складових спектра. Представимо вираз (3) на базі використання перших двох членів розкладання у ряд Тейлора:

$$F_k(j\omega) = \delta[k] - \frac{j\omega}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \Delta t_{z_n} e^{-jkn\omega \frac{2\pi}{N}}, \quad (4)$$

де $\delta[k]$ - дискретна імпульсна функція у частотній області.

Враховуючи симетричність цифрового спектра сигналу відносно центральної частоти, обсяг досліджуваного масиву можна зменшити вдвічі. Тоді вираз (4) можна записати у такому вигляді:

$$F_{N/2}(j\omega) = -\frac{j\omega}{N} \sum_{n=0}^{N/2-1} (\Delta t_{z_{2n}} - \Delta t_{z_{2n+1}}). \quad (5)$$

З усієї групи наявних каналів паралельного АЦП: $[0, 1, \dots, M + R - 1]$, будемо дві підгрупи з відповідними похибками часових нестабільностей Δt_{m_a} і Δt_{m_b} . Розмір кожної підгрупи дорівнює $0,5 \cdot (M + R)$. Вважаючи, що всі парні індекси z_{2n} є елементами підгрупи *a* та всі непарні індекси z_{2n+1} є елементами підгрупи *b*, вираз (6) можна представити у такому вигляді:

$$F_{N/2}(j\omega) = -\frac{j\omega}{N} \sum_{m=0}^{M+R-1} (\Delta t_{m_a} - \Delta t_{m_b}). \quad (6)$$

З виразів (5) і (6) видно, що $F_{N/2}(j\omega)$ визначається різницею сумарних похибок часових нестабільностей каналів підгрупи *a* та каналів підгрупи *b*. Слід зазначити, що для формування підгруп необхідна наближена оцінка похибок часових нестабільностей каналів АЦП, тому сам процес оцінювання похибок не вимагає суттєвих часових затрат. Структура процесу аналого-цифрового перетворення з випадковим перемиканням каналів АЦП та формуванням двох груп каналів з відповідними похибками часових нестабільностей, наведена на рис. 2.

АЦП1a	АЦП2b	АЦП1a	АЦП2b
			АЦП3b
		АЦП4a	АЦП2b
			АЦП3b
1	2	3	4
Інтервали дискретизації			

Рис. 2. Структура процесу аналого-цифрового перетворення з випадковим перемиканням та формуванням двох підгруп каналів АЦП

У даному випадку здійснюється почергова робота каналів АЦП: спочатку з підгрупи *a*, а потім з підгрупи *b*. На рис. 3,а наведено спектр вихідного сигналу паралельного АЦП для режиму детермінованого перемикання каналів, а на рис. 3,б – для режиму випадковим перемикання та формування двох підгруп каналів.

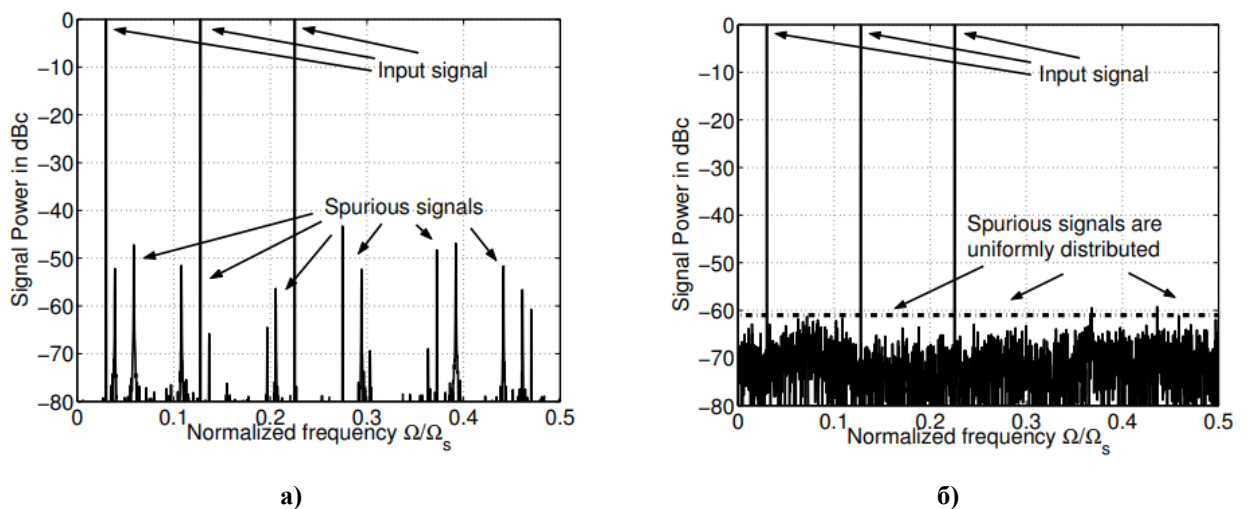


Рис. 3. Спектри вихідного сигналу паралельного АЦП

Спектр вихідного сигналу паралельного АЦП містить три гармонічні складові вхідного сигналу і ряд паразитних складових, що обумовлені наявністю похибок часової нестабільності (рис. 3,а). Вихідний

спектр сигналу АЦП буде містити N накладених груп частотних складових. Причому, центр однієї пари знаходиться на відстані T_s/N до центра наступної пари складових. Число пар складових спектра по осі частот від $\omega_{\min} = 0$ до $\omega_{\max} = 0,5\omega_s$ залежить від числа N каналів АЦП. Для режиму випадкового перемикавання та формування двох підгруп каналів АЦП потужність паразитних складових вихідного сигналу зменшується і стає рівномірніше розподіленою по осі частот. Для подавлення цих складових пропонується на виході паралельного АЦП використовувати фільтр нижніх частот.

На рис. 4 представлена структурна схема паралельного АЦП з випадковим перемиканням каналів.

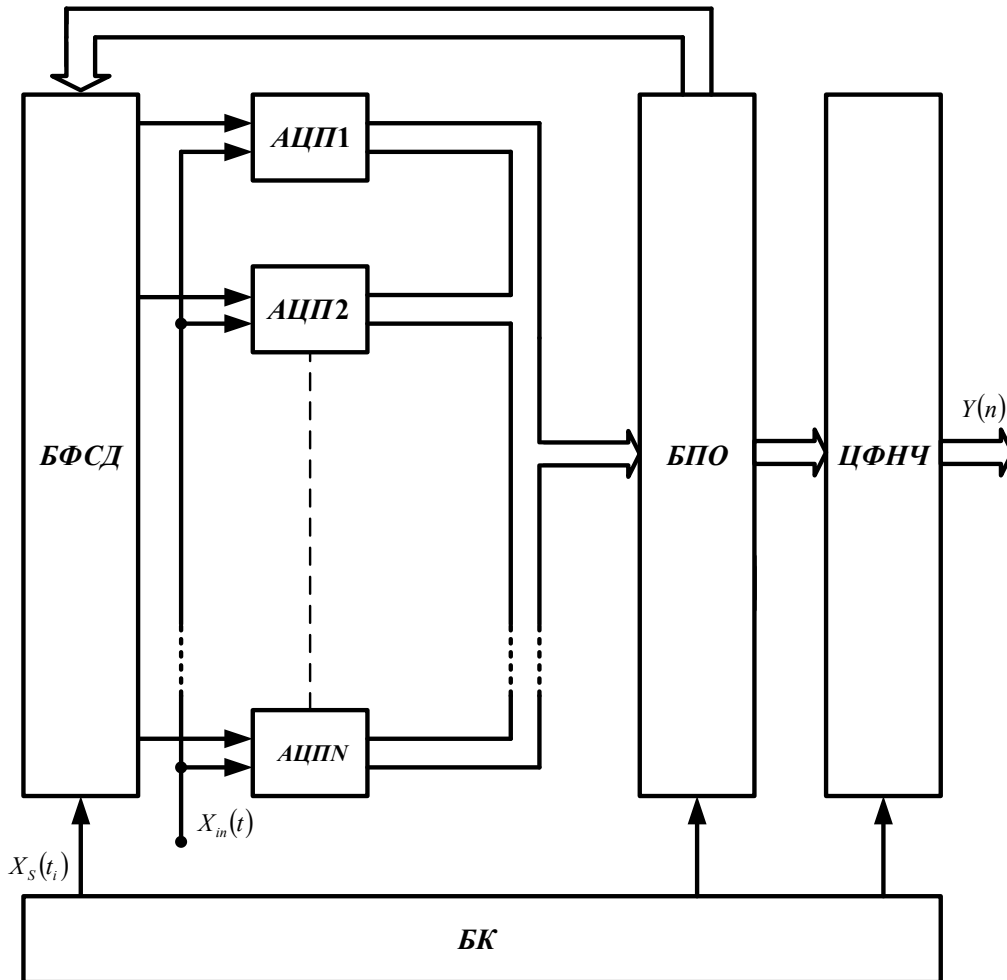


Рис. 4. Структурна схема паралельного АЦП з випадковим перемиканням каналів

Імпульси дискретизації $X_s(t_i)$ з виходу блоку керування (БК) надходять у блок формування сигналів дискретизації (БФСД), де згідно випадкового закону формуються імпульси дискретизації для кожного каналу АЦП. Вихідні сигнали з каналів аналого-цифрового перетворення (АЦП1...АЦПN) подаються на вхід блоку первинного оброблення (БПО), в якому виконується грубе оцінювання значень часової нестабільності, які колом зворотного зв'язку подаються на керувальний вхід БФСД. Кінцеве оброблення сигналу та формування його спектральної характеристики здійснюється за допомогою цифрового фільтра нижніх частот (ЦФНЧ).

Виконаємо аналіз динамічного діапазону запропонованого паралельного АЦП [13]. Відомо вираз для оцінювання динамічного діапазону n -розрядного АЦП з коригуванням часової нестабільності вибірок [14]:

$$D_T = 6,02n - 20 \lg \frac{1}{m_t} - 10 \lg \frac{4\pi^2(N-1)}{N} + 1,8, \tag{7}$$

де $m_t = \frac{\Delta t_s - \Delta t_m}{\Delta t_s}$ – відносна часова нестабільність вихідного сигналу АЦП;

Δt_s – номінальне значення часової затримки вихідного сигналу АЦП.

На базі отриманого виразу можна побудувати залежності динамічного діапазону 10-розрядного АЦП від числа N каналів для різних значень m_t . На рис. 5 наведено такі графіки для випадку, коли на вхід АЦП надходить синусоїдальний сигнал.

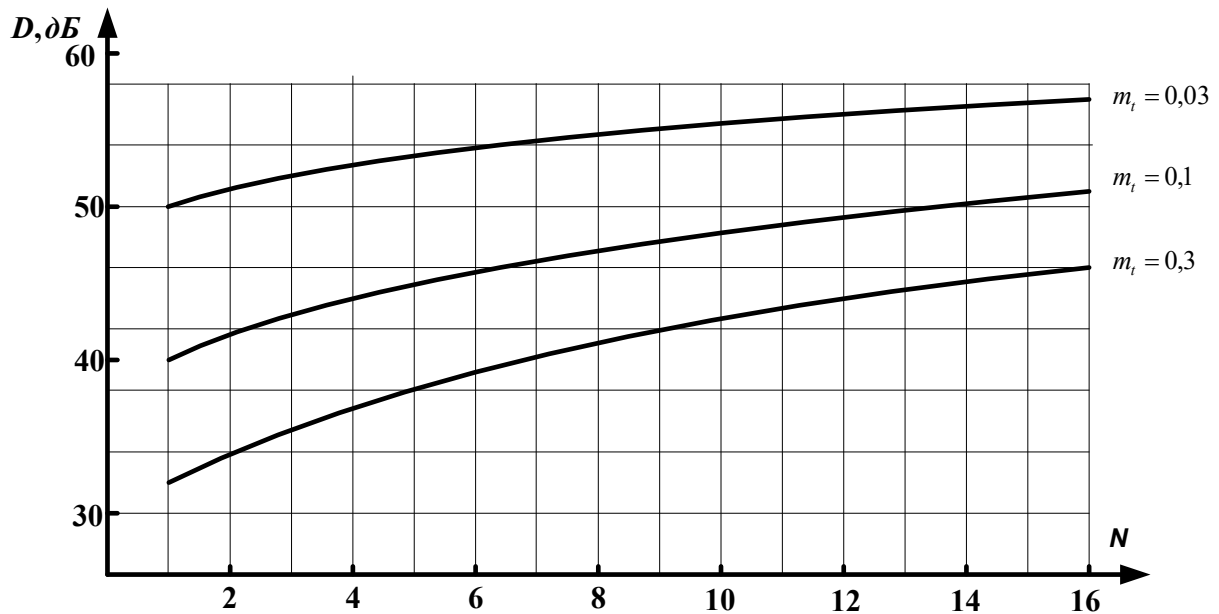


Рис.5. Залежність динамічного діапазону від числа каналів АЦП для синусоїдального вхідного сигналу

З рис. 4 видно, що зі збільшенням числа каналів АЦП динамічний діапазон покращується і для випадку, коли $m_t = 0,03$ цей параметр зростає з 51 дБ для 2-канального АЦП до 57 дБ для 16-канального АЦП. А для випадку, коли відносна часова нестабільність $m_t = 0,3$, спостерігається ще краща динаміка зростання динамічного діапазону, а саме: з 34 дБ до 47 дБ.

Висновки

У роботі представлено метод покращення динамічного діапазону паралельних АЦП. Встановлено, що аналого-цифрове перетворення сигналу в багатоканальних АЦП паралельного типу супроводжується нестабільністю формування вихідних відліків сигналу у часовій області. В результаті виникають похибки часової нестабільності вихідного сигналу паралельного АЦП. Це призводить до появи у спектрі частот вихідного сигналу АЦП паразитних частотних складових, які звужують динамічний діапазон АЦП.

Запропоновано використання випадкового перемикування каналів перетворення з формуванням двох підгруп каналів та подальшим обробленням вихідного сигналу АЦП у частотній області. Розроблено структурну схему паралельного АЦП з випадковим перемикуванням каналів.

Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається розширити динамічний діапазон 10-розрядного паралельного АЦП на 6 – 13 дБ залежно від значення часової нестабільності вихідного сигналу перетворювача.

Запропонований паралельний АЦП можна використовувати в аналого-цифрових трактах сучасних цифрових радіотехнічних систем.

Література

1. Бортник Г.Г. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, С.Г. Бортник, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 128 с.
2. Бортник Г. Г. Аналого-цифрові тракти комп'ютерних систем з цифровим обробленням високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В.М. Кичак, О.В. Стальченко. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 140 с.
3. Бортник Г.Г. [Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів : монографія](#) / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, В.М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 168 с.
4. Bortnyk, G., Vasylykivskyi, M., Kychak, V. The method of improving the dynamic range of analog-digital conversion of phase jitter signals in telecommunications systems / 2016 IEEE International Scientific Conference "Radio Electronics and Info Communications", UkrMiCo 2016 - Conference Proceedings. 2016, p. 1-7.
5. Bortnik, G., Vasylykivskyj, M., Cheloyan, V. Correction of clock jitter in analog-digital equipment of telecommunication system / Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science - Proceedings of the 10th International Conference, TCSET'2010.- p. 221.

6. 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.
7. 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.
8. Бортник Г.Г. Паралельний аналого-цифровий перетворювач з коригуванням часової невизначеності вихідного сигналу / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, С.О. Кирилюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2023. – № 4. – С. 46-52.
9. 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.
10. 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.*, October 2001, pp. 512–520.
11. K. El-Sankary, A. Assi, and M. Sawan, "New sampling method to improve the SFDR of time-interleaved ADCs," in *Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, 2003. ISCAS '03.*, vol. 1, May 2003, pp. 833–836.
12. C. Vogel, "The impact of combined channel mismatch effects in time-interleaved ADCs," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 1, February 2005, pp. 415–427.
13. Бортник Г.Г. Аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення сигналів у радіотехнічних комплексах / Г.Г. Бортник, М.Л. Мінов, О.В. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, 2011. – № 2. – С. 12-15.
14. Бортник Г.Г. Пристрій аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.В. Стальченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.–2013. – № 2. – С. 82-85.

References

1. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby analoho-tsyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv: monohrafiia / H. H. Bortnyk, S.H. Bortnyk, V. M. Kychak. – Vinnytsia: VNTU, 2013. – 128 s.
2. Bortnyk H. H. Analoho-tsyfrovi trakty kompiuternykh system z tsyfrovym obroblienniam vysokochastotnykh syhnaliv: monohrafiia / H. H. Bortnyk, V.M. Kychak, O.V. Stalchenko. – Vinnytsia: VNTU, 2016. – 140 s.
3. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby pervynnoho tsyfrovoho obrobliennia radiosyhnaliv : monohrafiia / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, V.M. Kychak. - Vinnytsia: VNTU, 2016. – 168 s.
4. Bortnyk, G., Vasylykivskiy, M., Kychak, V. The method of improving the dynamic range of analog-digital conversion of phase jitter signals in telecommunications systems / 2016 IEEE International Scientific Conference "Radio Electronics and Info Communications", UkrMiCo 2016 - Conference Proceedings. -2016, p. 1-7.
5. Bortnik, G., Vasylykivskiy, M., Cheloyan, V. Correction of clock jitter in analog-digital equipment of telecommunication system / *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science - Proceedings of the 10th International Conference, TCSET'2010.*- p. 221.
6. 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.
7. 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.
8. Bortnyk H.H. Paralelnyi analoho-tsyfrovoyi peretvoriuvach z koryhuvanniam chasovoi nevyznachenosti vykhidnoho syhnaliv / H.H. Bortnyk, S.H. Bortnyk, S.O. Kyryliuk // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky.* – 2023. – № 4. – S. 46-52.
9. 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.
10. 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.*, October 2001, pp. 512–520.
11. K. El-Sankary, A. Assi, and M. Sawan, "New sampling method to improve the SFDR of time-interleaved ADCs," in *Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, 2003. ISCAS '03.*, vol. 1, May 2003, pp. 833– 836.
12. C. Vogel, "The impact of combined channel mismatch effects in time-interleaved ADCs," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 1, February 2005, pp. 415–427.
13. Bortnyk H.H. Analiz efektyvnosti analoho-tsyfrovoho peretvorennia syhnaliv u radiotekhnichnykh kompleksakh / H.H. Bortnyk, M.L. Minov, O.V. Stalchenko. – *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia*, 2011, № 2. – S. 12-15.
14. Bortnyk H.H. Prystrii analoho-tsyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, O.V. Stalchenko. – *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh.* – 2013, № 2. – S. 82-85.