

УДК 621.391

В.І. Слюсар, І.І. Слюсарь, Р.В. Кулик, О.В. Миронов

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

## ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕІДЕНТИЧНОСТІ ДЖІТЕРА В КВАДРАТУРНИХ КАНАЛАХ НА ЯКІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З ЦИФРОВИМ ДІАГРАМОУТВОРЕННЯМ

В роботі проведений аналіз впливу джітера на результати оцінювання параметрів сигналів в цифрових антенних решітках (ЦАР). При цьому основний акцент зроблено на дослідженні якості роботи телекомунікаційних систем передачі (ТкСП) з цифровим діаграмоутворенням (ЦДУ) у разі неможливості досягнення ідентичної величини джітера у квадратурних каналах схеми аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналів. З цієї метою виконувався аналітичний розрахунок відношення амплітуд основної та комплексно-сполученої складових сигнальних відгуків при неідентичних дисперсіях джітера у квадратурних каналах прийому. Результати розрахунків дозволяють сформулювати вимоги до відносної величини неідентичностей дисперсії джітера квадратурних каналів АЦП, якщо визначено допустимий рівень величини комплексно-сполученої компоненти на виході цифрового фазового детектора у смузі частот.

**Ключові слова:** джітер, ТкСП, ЦДУ, ЦАР, МІМО.

### Вступ

На даний час, поки що не існує стандартизованих вимог до телекомунікаційних систем передачі (ТкСП) 5G (ІМТ-2020). Це обумовлено тим, що, якщо раніше вимоги були в основному зосереджені навколо швидкості доступу, то зараз значна увага приділяється якості, особливо, питанням якості покриття на краях зон обслуговування.

Для такого підходу доцільно використовувати цифрове діаграмоутворення (ЦДУ) на основі цифрових антенних решіток (ЦАР) [1]. Це дозволяє збільшити відношення сигнал/шум (ВСШ) у радіоканалі; зменшити рівні потужності передавачів; використовувати програмну конфігурацію обладнання; підвищити завадозахищеність і живучість, а також виконувати цифрову обробку сигналів (ЦОС) на основі методів надрозрізнення.

В свою чергу, підвищити ВСШ можливо за рахунок зменшення кількості проміжних частотних перетворень між антенним елементом ЦАР і аналого-цифровим або цифро-аналоговим перетворювачем (АЦП/ЦАП). При цьому, головним чинником, який визначає якість функціонування ТкСП з ЦАР в умовах підвищення частоти складових спектру сигналів, що підлягають перетворенню, є джітер АЦП/ЦАП [2].

Систематизація існуючих підходів щодо визначення впливу зазначеного чинника на якість роботи антенних систем свідчить про їх малу придатність для контролю параметрів джітера в ЦАР [3]. Це обумовлено орієнтацією на оцінку джітера окремих компонентів (АЦП, генератори та ін.), відсутністю формалізації статистичних характеристик. Як наслідок, необхідно розширити існуючий базис оціню-

вання впливу джітера шляхом аналізу якості функціонування систем на базі ЦАР.

**Мета роботи:** підвищити якість ЦОС в ТкСП з ЦДУ на базі ЦАР за рахунок оцінки ступеню впливу джітера на ВСШ.

### Основна частина

Згідно [4], побудова систем 5G ґрунтується на розширенні спектральних діапазонів сигналів до міліметрових довжин хвиль, агрегації різних ділянок спектра, впровадженні нових технологій когнітивного радіо, цифрового формування променя в антенних решітках, масштабованого МІМО (антенні системи радіозасобів і базових станцій (БС) будуть оснащуватися 2-вимірними решітками розмірності 8x2; 8x4; 16x4 елементів), реалізації безпосередньої передачі даних від пристрою до пристрою (Device to Device, D2D), минаючи базові станції (БС), що є посередниками у маршрутизації трафіка. Крім того, при розробці 5G передбачається зробити ставку на реалізацію фізичного рівня на неортогональних сигналах (Methodology for 5G Physical Layer Based on Non-orthogonal Waveforms) [5].

Для цих технологічних нововведень базовими слід вважати квадратурні схеми приймальних каналів ТкСП з АЦП  $\cos$ - і  $\sin$ -складових сигнальної суміші (рис. 1). В свою чергу, це потребує високої ідентичності характеристик передачі квадратурних каналів прийому. Відмінності в комплексних коефіцієнтах передачі зазначених підканалів призводять до виникнення комплексно-сполучених компонентів (КСК) сигнальних відгуків, ефект від впливу яких аналогічний впливу активних завод.

Як відомо, джітер – це флуктуації положення в часі моменту формування відліку АЦП, що викли-

кані нестабільною роботою генератора тактових імпульсів (ГТІ) і шумами в ланцюгах синхронізації АЦП.

Якщо представити ЦАР у вигляді  $N$ -канальної системи АЦП, то слід вважати, що для сигналу ГТІ

(з певними джітером і періодом  $T$ ) за рахунок буферизації, транспортування та розгалуження, його джітер додатково збільшується. Також, в процесі дискретизації вхідного сигналу в результаті внутрішніх шумів АЦП джітер зростає ще більше.

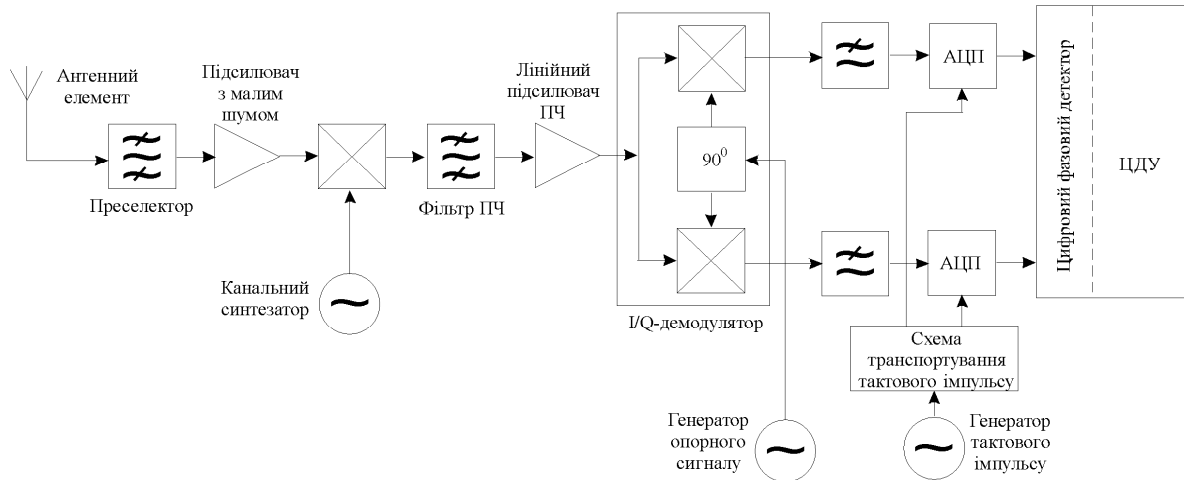


Рис. 1. Спрощений варіант квадратурного каналу ТкСП з ЦАР

В цілому, дані ефекти призводять до викривлення результатів дискретизації аналогового сигналу [6-9], що проявляється в розбіжності значень необхідного та реально взятого відліків сигналу. Очевидно, що для аналогових НЧ-трактів дане викривлення не відіграє істотної ролі та ним можна знехтувати. Однак, для аналогових ВЧ-сигналів таке викривлення може суттєво впливати на результати дискретизації, і тому його необхідно враховувати.

Слід зауважити, що аналогічні ефекти мають місце і передавальному тракту ЦАР у разі цифро-аналогового перетворення сигналів за квадратурною схемою, яка є оптимальною для запобігання появи зеркальної за частотою завади. Однак у даній статті увагу буде приділено лише проявам джітера в приймальному сегменті ЦАР.

В ідеальній ТкСП з ЦАР КСК має нульове значення, що відповідає повній ідентичності квадратурних коефіцієнтів передачі та однаковим дисперсіям джітера у квадратурах. Розширюючи номенклатуру варіантів ЦОС у приймальному тракту ТкСП з ЦАР, слід також передбачити виконання процедури децимації на основі, наприклад, цифрових фазових детекторів. Результат роботи такого цифрового фазового детектора з додатковим стробуванням [10] можна представити у формі:

$$U_m = \sum_{k=0}^{N-1} u_{k+mN} \exp(j\omega_0 T(k + Nm)), \quad (1)$$

де  $\omega_0$  – частота опорного сигналу на виході цифрового гетеродину,  $u_{k+mN}$  – відліки дискретизованого з джітером гармонійного комплексного сигналу вигляду:

$$u(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + jA \cos(\omega t + \varphi). \quad (2)$$

Як відомо, середнє значення напруги відліку на виході цифрового фазового детектора можна записати за виразом [11]:

$$E\{U_m\} = B(2 + \alpha) \frac{\sin(2^{-1}NT(\omega - \omega_0))}{\sin(2^{-1}T(\omega - \omega_0))} \times \exp(j2^{-1}(\omega - \omega_0)T(2Nm + N - 1) + \varphi) + B\alpha \frac{\sin(2^{-1}NT(\omega + \omega_0))}{\sin(2^{-1}T(\omega + \omega_0))} \times \exp(-j2^{-1}(\omega + \omega_0)T(2Nm + N - 1) + \varphi), \quad (3)$$

$$\text{де } B(1 + \alpha) = \frac{A}{2} \exp(-2^{-1}\omega^2\sigma_{C,\tau}^2)$$

$$\text{і } B = \frac{A}{2} \exp(-2^{-1}\omega^2\sigma_{K,\tau}^2). \quad (4)$$

В даному випадку, перший доданок відповідає основній складовій сигналу, а другий – комплексно-сполучений. Надалі, інтерес матиме відношення амплітуд основної та комплексно-сполученої складових при неідентичних дисперсіях джітера у квадратурних каналах АЦП [11]:

$$S = \frac{(2 + \alpha) \frac{\sin(2^{-1} \cdot NT \cdot (\omega - \omega_0))}{\sin(2^{-1} \cdot T \cdot (\omega - \omega_0))}}{\alpha \frac{\sin(2^{-1} \cdot NT \cdot (\omega + \omega_0))}{\sin(2^{-1} \cdot T \cdot (\omega + \omega_0))}}, \quad (5)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{\exp(-2^{-1}\omega^2\sigma_{C,\tau}^2)}{\exp(-2^{-1}\omega^2\sigma_{K,\tau}^2)} - 1.$$

При однакових дисперсіях джітера у квадратурах  $\sigma_{C,\tau}^2 = \sigma_{K,\tau}^2$ , і  $\alpha = 0$  відношення  $S$  (5) буде прямувати до нескінченності, що відповідає нульовому значенню КСК [11].

Якщо розглядати в якості показника неідентичності джітера у квадратурах величину  $\alpha$ , то за умови  $\sigma_{C,\tau}^2 + \sigma_{K,\tau}^2 = \text{const}$ , нескінченне збільшення  $\alpha$  дозволяє одержати вираз для межі  $S$  (5), яка при фіксованій частоті сигналу визначається значенням [11]:

$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} S = \left( \frac{\sin\left(\frac{NT}{2}(\omega - \omega_0)\right)}{\sin\left(\frac{T}{2}(\omega - \omega_0)\right)} \right) \left( \frac{\sin\left(\frac{NT}{2}(\omega + \omega_0)\right)}{\sin\left(\frac{T}{2}(\omega + \omega_0)\right)} \right)^{-1}$$

Для оцінки ступеню впливу неідентичності джітера у квадратурних каналах АЦП на вказану величину  $S$  були проведені розрахунки співвідношення (5) в пакеті Mathcad для різних вихідних даних при зміні частоти вхідного сигналу в межах основного «пелюстка» амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) цифрового фазового детектора з додатковим стробуванням.

Приклад результатів розрахунків представлений у логарифмічному масштабі на рис. 2. По горизонтальній осі відкладений зсув вхідного сигналу (амплітудою 10 квантів АЦП) за частотою відносно центральної частоти цифрового фазового детектора, яка дорівнює 100 МГц, з дискретом в 1/250 ширини основної «пелюстки» АЧХ (у даному випадку, крок за частотою становить 10 кГц). По вертикальній осі представлено розрахункове значення величини  $S$  (5).

Частота дискретизації дорівнює 400 МГц (відповідає 0,25 періоду центральної частоти фазового детектора, тобто 2,5 нс. У процесі розрахунків фіксувалася сума дисперсій  $\sigma_{C,\tau}^2 + \sigma_{K,\tau}^2$ . В результаті, достатньо було варіювати величиною дисперсії джітера лише в одній з квадратурних складових сигналу, тоді як значення для дисперсії в іншій квадратурі розраховувалося за теоремою Піфагора.

Рис. 2 відповідає випадку

$$\sigma_{C,\tau}^2 + \sigma_{K,\tau}^2 = 10^{-24} \text{ с.}$$

Штрихова (нижня) лінія на рис. 2 отримана за умови СКВ джітера

$\sigma_{C,\tau} = 0,01 \text{ пс}$  і  $\sigma_{K,\tau} = \sqrt{1 - 0,01^2} \approx 0,99995 \text{ пс}$  (неідентичність СКВ джітера у квадратурах становить приблизно  $\approx 99,995$  разів), а суцільна (верхня) лінія –

$\sigma_{C,\tau} = 0,707 \text{ пс}$  і  $\sigma_{K,\tau} = \sqrt{1 - 0,707^2} \approx 0,70721 \text{ пс}$  (дисперсія джітера у квадратурах близька до рівності, а неідентичність СКВ дорівнює приблизно 1,000302 рази).

Як видно, суцільна лінія проходить вище пунктирної. Це значить, що відношення рівнів основної та комплексно-сполученої складових  $S$  зменшується зі збільшенням неідентичності джітера у квадратурах АЦП. Однак, це зниження обмежується за рівнем зазначеною вище межею. У такому випадку, як показують результати моделювання, ця межа майже збігається зі штриховою лінією рис. 2.

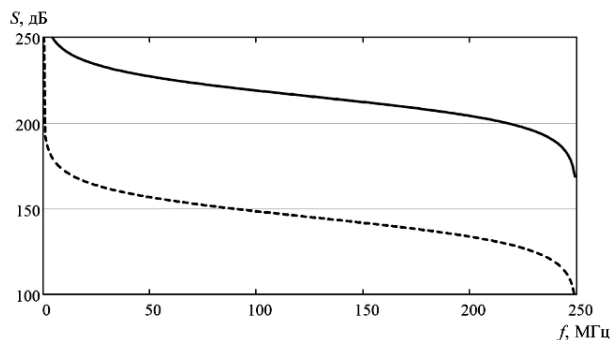


Рис. 2. Відношення амплітуд основної та комплексно-сполученої складових при неідентичних дисперсіях джітера в квадратурних каналах АЦП ( $\sigma_{C,\tau}^2 + \sigma_{K,\tau}^2 = 10^{-24} \text{ с}$ )

Зазначене співвідношення  $S$  (5) також зменшується в міру відхилення частоти сигналу від центральної частоти цифрового фазового детектора. Суттєво, що різниця між значеннями ординат суцільної та штрихової лінії в дБ є фіксованою для всіх частотних зсувів. Стосовно рис. 2, ця різниця складає 70,398 дБ. Якщо підвищити неідентичність СКВ джітера у квадратурах, задавши СКВ джітера  $\sigma_{C,\tau} = 0,000001 \text{ пс}$ , при цьому:

$$\frac{\sigma_{C,\tau}}{\sigma_{K,\tau}} = 1,0 \cdot 10^5,$$

то зазначена різниця дорівнює 70,4 дБ, що є граничним для даних умов.

На рис. 3 представлені результати моделювання, що відповідають незмінному положенню верхньої суцільної лінії (як на рис. 2), і умові для нижньої лінії у вигляді СКВ джітера  $\sigma_{C,\tau} = 0,7 \text{ пс}$  і  $\sigma_{K,\tau} = \sqrt{1 - 0,7^2} \approx 0,7141 \text{ пс}$  (неідентичність СКВ джітера у квадратурах становить  $\approx 1,02$  разів або 2 %). При цьому різниця в співвідношенні  $S$  для двох зазначених кривих фіксується на рівні 36,42 дБ.

У табл. 1 представлені величини втрат відносно рівнів основної та комплексно-сполученої складових в залежності від неідентичності СКВ джітера у квадратурних каналах прийому.

Таким чином, використовуючи вираз (5), можна сформулювати вимоги до відносної величини неідентичностей  $\alpha$  дисперсій джітера квадратурних АЦП, задавшись припустимим рівнем величини

комплексно-сполученої компоненти на виході цифрового фазового детектора у смузі частот.

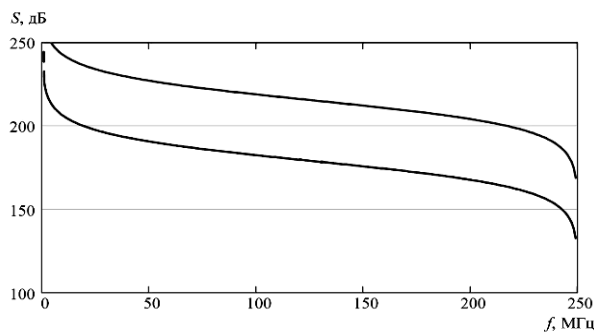


Рис. 3. Відношення амплітуд основної та комплексно-сполученої складових при неідентичних дисперсіях джітера в квадратурних каналах АЦП ( $\sigma_{C,\tau} = 0,7$  пс

$$\text{и } \sigma_{K,\tau} = \sqrt{1 - 0,7^2} \approx 0,7141 \text{ пс})$$

Під час досліджень встановлено, що відношення рівнів основної та комплексно-сполученої складових зменшується зі збільшенням неідентичності

джітера у квадратурах АЦП, однак це зниження обмежується деяким рівнем.

Результати розрахунків визначають допустимий рівень величини КСК на виході цифрового фазового детектора у визначеній смузі частот.

В свою чергу, вони дозволяють сформулювати вимоги до відносної величини неідентичностей дисперсій джітера квадратурних каналів АЦП.

Серед них слід виділити наступні:

- ефективне число бітів АЦП;
- середньоквадратичний рівень бічних променів ДС;
- дисперсія та максимальний зсув оцінки напрямку приходу сигналу;
- максимально припустимий розкид дисперсій джітера АЦП у квадратурних каналах.

Чисельні показники вимог до джітеру АЦП і ЦАП в ТкСП з ЦДУ на базі ЦАР можуть бути отримані на підставі значення сигнал/шум на виході АЦП при формуванні за допомогою ЦАП сигналу з відомими параметрами при заданому значенні потужності адитивного шуму.

Таблиця 1

Залежність втрат у відношенні рівнів основної компоненти та КСК сигналів від СКВ джітера порівняно з випадком ідентичних квадратурних каналів

СКВ джітера однієї з квадратурних складових сигналів, пс	Неідентичність СКВ джітера в квадратурах, %	Втрати у відношенні рівнів основної та комплексно-сполученої складових сигналів, дБ
0,7030	1,165	31,676
0,7040	0,8807	29,258
0,7050	0,597	25,89
0,7060	0,3133	20,305
0,7061	0,285	19,483
0,7062	0,2566	18,575
0,7063	0,2283	17,561
0,7064	0,2	16,412
0,7065	0,1717	15,088
0,7066	0,1434	13,524
0,7067	0,116	11,615
0,7068	0,087	9,165
0,7069	0,0585	5,74
0,70695	0,04435	3,336

### Висновки

Таким чином, в роботі виконана оцінка впливу неідентичності джітера в квадратурних каналах ЦАР на якість функціонування ТкСП з ЦДУ. При цьому, основний акцент зроблено на дослідженні якості роботи ТкСП з ЦДУ у разі неможливості досягнення ідентичної величини джітера у квадратурних каналах схеми аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналів. Відзначена принципова неможливість

усунути вплив джиттера підвищенням амплітуди вхідного сигналу. Результати розрахунків дозволяють сформулювати вимоги до відносної величини неідентичностей дисперсій джітера квадратурних каналів АЦП, якщо визначено допустимий рівень величини комплексно-сполученої компоненти на виході цифрового фазового детектора у смузі частот. На основі систематизації результатів існуючих прогнозів щодо подальших напрямків розвитку ТкСП 5G, можливо визначити їх базові характеристики:

завадозахищеність; висока швидкість передачі даних; криптозахищеність даних; адаптивне формування діаграм спрямованості антен базових станцій (БС); впровадження неортогональних багаточастотних сигналів (наприклад, N-OFDM); забезпечення режимів MIMO, MANET, VANET, у т. ч. для БПЛА; адаптивний вибір і використання IP та ін. мережних протоколів; вбудований перекладач (мультимовність), розширене голосове меню керування смартфоном; наявність режиму радіолокації повітряних об'єктів (БПЛА та ін.) за допомогою БС; багатодіапазонність і мультистандартність.

## Список літератури

1. Слюсар В.И. Основные понятия теории и техники антенн. Антенные системы евклидовой геометрии. Фрактальные антенны. SMART-антенны. Цифровые антенные решетки (ЦАР). MIMO-системы на базе ЦАР. Особенности построения суперлинейных усилителей // Разделы 9.3-9.9 в книге «Широкополосные беспроводные сети передачи информации». [Текст] / В.И. Слюсар. – М.: Техносфера, 2005. – С. 498-569.
2. Слюсар В.И. Влияние нестабильности такта АЦП на угловую точность линейной цифровой антенной решетки [Текст] / В.И. Слюсар // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1998. – Том 41. – № 6. – С. 77-80.
3. Слюсар В.И. Влияние джиттера АЦП на точность пеленгации цифровыми антенными решетками [Текст] / В.И. Слюсар, М.В. Бондаренко // Радиоэлектроника. – 2011. – Том 54. – № 8. – С. 41-49. (Изв.вузов).
4. 5G Wireless Ecosystem: 2015-2025 – Technologies, Applications, Verticals, Strategies & Forecasts [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.reportsnreports.com/reports/323028-the-5g-wireless-ecosystem-2015-2025-technologies-applications-verticals-strategies-forecasts.html> – Дата доступу: 16.04.2016.
5. Project 5th Generation Non-Orthogonal Waveforms for Asynchronous Signalling [Электронный ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.5gnow.eu/> – Дата доступу: 16.04.2016.
6. Бахтияров Г.Д. Аналого-цифровые преобразователи [Текст] / Г.Д. Бахтияров, В.В. Малинин, В.П. Школин; под ред. Г.Д. Бахтиярова. – М.: Советское радио, 1980. – 280 с.
7. Маковий В.А. Динамический диапазон дискретизатора [Текст] / Маковий В.А. // Радиотехника. – 1991. – N 7. – С. 40-42.
8. Вострецов А.Г. Эффект дрожания отсчетов в системах дискретной обработки сигналов [Текст] / А.Г. Вострецов, В.Н. Васюков // Радиотехника и электроника, 2003. – Том 48. – N 5. – С. 584-589.
9. Brannon B. Aperture Uncertainty and ADC System Performance / B. Brannon // Analog Devices Application Note AN-501, [Электронный ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.analog.com> – Дата доступу: 16.04.2016.
10. Слюсар В.И. Синтез алгоритмов измерения дальности M источников при дополнительном стробировании отсчетов АЦП [Текст] / В.И. Слюсар // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника, 1996. – Том 39. – № 5. – С. 55-62.
11. Бондаренко М.В. Комплексно-сопряженная компонента сигнала при неидентичности джиттера АЦП в квадратурных каналах фазового детектора с дополнительным стробированием [Текст] / М.В. Бондаренко, В.С. Копиевская, В.И. Слюсар // Четвертый международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). – Х.: ХНУРЭ, 18-21 октября 2011.

Надійшла до редколегії 21.04.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаєв, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕИДЕНТИЧНОСТЕЙ ДЖИТТЕРА В КВАДРАТУРНЫХ КАНАЛАХ НА КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ЦИФРОВЫМ ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЕМ

В.И. Слюсар, И.И. Слюсарь, Р.В. Кулик, А.В. Мионов

В работе проведен анализ влияния джиттера на результаты оценивания параметров сигналов в цифровых антенных решетках (ЦАР). При этом основной акцент сделан на исследовании качества работы ТкСП с ЦДО в случае невозможности достижения идентичной величины джиттера в квадратурных каналах схемы аналого-цифрового преобразования сигналов. С этой целью выполнялся аналитический расчет отношения амплитуд основной и комплексно-сопряженных составляющих сигнальных откликов при неидентичных дисперсиях джиттера в квадратурных каналах приема. Результаты расчетов позволяют сформулировать требования к относительной величине неидентичностей дисперсий джиттера квадратурных каналов АЦП, если определен допустимый уровень величины комплексно-сопряженной компоненты на выходе цифрового фазового детектора в полосе частот.

**Ключевые слова:** джиттер, ТкСП, ЦДО, ЦАР, MIMO.

## EVALUATION OF THE INFLUENCE OF NEODENTICULA JITTER IN THE QUADRATURE CHANNELS ON THE QUALITY OF FUNCTIONING OF TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS WITH DIGITAL BEAMFORMING

V.I. Slyusar, I.I. Sliusar, R.V. Kulyck, A.V. Myronov

This paper analyzes the impact of jitter on the results of the estimation of parameters of signals in a digital antenna array. While the main emphasis is on the study of the quality of work with telecommunications systems to the DBF in case of impossibility to achieve the same magnitude of the jitter in the quadrature channel circuit analog-to-digital signal conversion. With this purpose we performed an analytical calculation of the ratio of amplitudes of the main and the complex-conjugate of the signal components of the responses with non-identical variances jitter in quadrature reception channels. The calculation results allow to formulate requirements to the relative values of neodenticula of jitter variances of the quadrature channels of the ADC, if it is determined acceptable level the magnitude of the complex conjugate components of the output of the digital phase detector in the frequency band.

**Keywords:** Jitter, digital telecommunications systems, beamforming, MIMO.