

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ
ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ
ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2020

УДК 621.396

Б-21

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 28.05.2020 р.)

Рецензенти:

Ю. М. Бойко, доктор технічних наук, професор

О. В. Осадчук, доктор технічних наук, професор

Бортник, Г. Г.

Б-21 Методи та засоби цифрового оброблення радіосигналів для систем безпеки та моніторингу : монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 126 с.
ISBN 978-966-641-810-7

У монографії розглянуто методи та засоби оброблення радіосигналів (РС) для систем безпеки та моніторингу, що побудовані на базі методології цифрового оброблення високочастотних сигналів. Запропоновано метод аналого-цифрового перетворення РС, метод запам'ятовування та відтворення РС та цифровий метод спектрального аналізу широкосмугових РС. Наведено низку методів визначення параметрів радіосигналів. Представлено методи побудови пристроїв підсилення та перетворення радіосигналів і структури засобів первинного цифрового оброблення РС. Книга розрахована на науковців, аспірантів, студентів і фахівців, які займаються проектуванням і розробленням радіотехнічних систем, а також систем цифрового оброблення радіосигналів.

УДК 621.396

ISBN 978-966-641-810-7

© Г. Бортник, М. Васильківський, В. Кичак, 2020

ЗМІСТ

| | |
|--|-----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 4 |
| ВСТУП | 5 |
| 1 КОДОВАНІ РАДІОСИГНАЛИ | 8 |
| 1.1 Характеристики кодованих РС | 8 |
| 1.2 Амплітудно-кодовані РС | 10 |
| 1.3 Фазо-кодовані РС | 16 |
| 1.4 Частотно-кодовані РС..... | 28 |
| 2 МЕТОДИ ПЕРВИННОГО ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ | 32 |
| 2.1 Метод розширення динамічного діапазону аналого-цифрових перетворювачів засобів первинного цифрового оброблення РС..... | 32 |
| 2.2 Метод запам'ятовування та відтворення радіосигналів | 39 |
| 2.3 Цифровий метод спектрального аналізу широкосмугових радіосигналів..... | 47 |
| 3 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОСИГНАЛІВ..... | 54 |
| 3.1 Визначення амплітуди, частоти та фази радіосигналів..... | 54 |
| 3.2. Методи визначення типу та параметрів модуляції радіосигналів..... | 62 |
| 3.3 Метод визначення швидкості маніпуляції радіосигналів | 79 |
| 4 ЗАСОБИ ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ | 87 |
| 4.1 Принципи побудови засобів оброблення РС..... | 87 |
| 4.2 Методи побудови пристроїв підсилення та перетворення РС ... | 90 |
| 4.3 Вибір частотних режимів первинного оброблення РС | 94 |
| 4.4 Тракт підсилення та аналого-цифрового перетворення РС..... | 98 |
| 4.5 Процесор первинного цифрового оброблення радіосигналів .. | 103 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 115 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

| | | |
|--------|---|--|
| АК РС | – | амплітудно-кодований радіосигнал |
| АІМ | – | амплітудно-імпульсна модуляція |
| АЧХ | – | амплітудно-частотна характеристика |
| АЦП | – | аналого-цифровий перетворювач |
| АЦТ | – | аналого-цифровий тракт |
| БВО | – | блок вторинного оброблення |
| БЗП | – | буферний запам'ятовувальний пристрій |
| БШВС | – | блок швидкого визначення спектра |
| ВІС | – | велика інтегральна схема |
| ДПУ | – | дискретне перетворення Уолша |
| ДПФ | – | дискретне перетворення Фур'є |
| ЗП | – | запам'ятовувальний пристрій |
| МАРП | – | миттєве автоматичне регулювання підсилення |
| ОДПФ | – | обернене дискретне перетворення Фур'є |
| ОЗП | – | оперативний запам'ятовувальний пристрій |
| ОМ | – | обчислювальний модуль |
| ПАХ | – | поверхневі акустичні хвилі |
| ПЕ | – | процесорні елементи |
| ПЗП | – | постійний запам'ятовувальний пристрій |
| ПК | – | персональний комп'ютер |
| ПЛМ | – | програмована логічна матриця |
| ППО | – | процесор первинного оброблення |
| ППЦОРС | – | пристрій первинного цифрового оброблення радіосигналів |
| ПППС | – | пристрій підсилення і перетворення сигналів |
| РС | – | радіосигнал |
| СП | – | спектр потужності |
| ЧК РС | – | частотно-кодований радіосигнал |
| ЧМ | – | частотна модуляція |
| ФК РС | – | фазо-кодований радіосигнал |
| ФМ | – | фазова модуляція |
| ФНЧ | – | фільтр нижніх частот |
| ФСС | – | формувавач смуги сигналів |
| ФЧХ | – | фазо-частотна характеристика |
| ЦАП | – | цифро-аналоговий перетворювач |
| ЦЗЗВРС | – | цифровий засіб запам'ятовування та відтворення радіосигналів |
| ЦОС | – | цифрова обробка сигналів |
| ЦПОС | – | цифровий процесор обробки сигналів |
| ЦПС | – | цифровий процесор сигналів |
| ШАРП | – | шумове автоматичне регулювання підсилення |
| ШПУ | – | швидке перетворення Уолша |
| ШПФ | – | швидке перетворення Фур'є |

ВСТУП

Сучасні телекомунікаційні системи окрім надання послуг традиційного телефонного зв'язку дозволяють абонентам відправляти та приймати повідомлення передачі даних, обмінюватися факсимільними та відеозображеннями, проводити аудіо- та відео-конференції, а також реалізувати велику кількість інших телекомунікаційних технологій [1–4].

Організація інформаційних потоків і способи їх передачі в системах зв'язку за останні роки зазнали значних змін. Для сучасних телекомунікаційних систем характерне постійне зростання кількості корпоративних та індивідуальних абонентів. Збільшення обсягу переданої ними інформації приводить до необхідності використання дедалі більшого числа різних каналів радіо- і проводового зв'язку. Для забезпечення високої пропускної здатності каналів зв'язку приймаються спеціальні технічні рішення, що полягають [5–8]:

- у впровадженні складних видів модуляції та кодування, оптимально узгоджених з конкретними фізичними каналами за співвідношенням «швидкість передачі/допустимі втрати якості інформації»;
- у застосуванні систем багаторівневого статичного та динамічного ущільнення інформаційних потоків;
- у підтримці багаторівневих служб керування з можливістю динамічного обміну даними між ними;
- у широкому використанні різних методів адаптації, що дозволяють оптимізувати функціонування телекомунікаційних систем за маршрутами передачі повідомлень, несучою частотою сигналу, потужністю передавача, видом модуляції, швидкістю передачі, способом ущільнення та кодування тощо;
- у постійній модернізації окремих апаратних і програмних складових телекомунікаційних систем при появі нових вимог або комунікаційних технологій.

Значною мірою практична реалізація перерахованих методів вдосконалення телекомунікаційних систем стала можливою завдяки досягненням сучасної мікроелектроніки, особливо в галузі створення високопродуктивних обчислювальних пристроїв і розвитку методів цифрового оброблення сигналів (ЦОС).

Існуючі методи ЦОС дозволяють розв'язувати велику кількість різних прикладних задач у телекомунікаціях та радіотехніці, в яких колись домінували аналогові системи. Переваги цифрових систем оброблення радіосигналів (РС) обумовлені низкою чинників. Так аналогові засоби оброблення РС, як правило, програють цифровим за такими параметра-

ми, як точність, швидкодія, об'єм оброблюваних даних. Окрім того, засоби цифрового оброблення РС при нормальній експлуатації характеризуються відсутністю впливу зовнішніх дестабілізуючих чинників, таких як температурний і часовий дрейф параметрів, вплив завад та інше. І найголовніше, застосовуючи методи цифрового оброблення, можна створювати засоби, що дозволяють виконувати в принципі будь-яке перетворення РС за будь-яким складним алгоритмом із заданим ступенем точності [9–11].

Підтвердженням всього сказаного про переваги ЦОС є сучасна телекомунікаційна апаратура, в якій широко використовуються різні процедури аналізу, фільтрації, детектування, декодування та інше, що реалізовані цифровими методами.

У даний час опубліковано велику кількість робіт (Л. Р. Рабінера, Б. Гоулда, Р. В. Шафера, Е. Айфічера, Б. Джервіса, Д. Прокіса, С. Марпла та ін.), які висвітлюють різні теоретичні та практичні питання, пов'язані з цифровою обробкою сигналів [12–18]. Незважаючи на це автори вирішили ще раз звернутися до розгляду низки задач цифрового оброблення РС, що особливо часто виникають при розробці систем безпеки та радіомоніторингу [19–24].

Аналіз більшої частини публікацій щодо застосування методів ЦОС у системах безпеки та радіомоніторингу дозволяє стверджувати, що вони, в основному, розглядають питання синтезу оптимальних за тими чи іншими критеріями окремих їх елементів. Проте існує клас науково-технічних задач, при розв'язанні яких використання класичних методів ЦОС виявляється неефективним через апріорну невизначеність значення несучої частоти, виду модуляції, швидкості маніпуляції, характеру демодульованого сигналу, а також через неоптимальні умови приймання РС. Ця ситуація характерна для радіомоніторингу, при вирішенні завдань нагляду за роботою радіопередавальних засобів, в радіоаматорському зв'язку і в ряді інших випадків. При цьому в процесі радіоконтролю в загальному випадку необхідно виконувати такі операції: пошук і виявлення радіовипромінювань з апріорно невідомими параметрами, визначення виду і параметрів їх модуляції, вимірювання побічних складових радіовипромінювань з метою оцінювання індивідуальних параметрів радіопередавача, демодуляція та декодування сигналів [20, 25–28].

У цій роботі будуть наведені матеріали, що узагальнюють результати теоретичних досліджень та досвід практичної реалізації методів цифрового оброблення радіосигналів в умовах неповної інформації про значення їх параметрів.

В даний час існують різні способи практичної реалізації алгоритмів ЦПОС. Вони можуть бути реалізовані пристроями на жорсткій логіці, програмованими логічними інтегральними схемами і т. і. Але найбільшого розвитку набули програмовані обчислювальні пристрої – універсальні або мікропроцесори в поєднанні з персональними комп'ютерами. Сьогодні наявна широка номенклатура різноманітних пристроїв, що базуються на використанні цифрових процесорів обробки сигналів і призначені для застосування в телекомунікаційному устаткуванні. При цьому, незважаючи на безсумнівні переваги таких пристроїв, їх використання пов'язане з рядом проблем економічного та технічного характеру. До них відносяться:

- висока вартість первинного розроблення через необхідність придбання досить дорогого налаштувального обладнання та залучення програмістів вузького профілю для розроблення програмного забезпечення на цифрових процесорах обробки сигналів (ЦПОС);

- порівняно великі часові затрати на створення обладнання та його доведення до необхідних норм;

- висока вартість пристроїв, що містять ЦПОС, порівняно з вартістю сучасних персональних комп'ютерів;

- труднощі модернізації програмного забезпечення через обмеженість обчислювального ресурсу обраних моделей ЦПОС.

При цьому сучасні персональні комп'ютери (ПК), при порівняно невисокій вартості, мають швидкість обчислень, що наближається до швидкості ЦПОС. Існуючі ПК мають розвинені апаратні та програмні засоби взаємодії з оператором і різними технічними пристроями. Вони містять у своєму складі стандартні пристрої введення/виведення цифрових сигналів, дозволяють зберігати великі обсяги інформації та представляти їх в необхідному для користувача вигляді. Існує велика кількість розвинених інструментальних засобів програмування, що дозволяють порівняно швидко створювати необхідні програмні продукти. Все це у поєднанні дозволяє ефективно розв'язувати різноманітні задачі цифрового оброблення РС, спираючись на можливості сучасних ПК.

У розділі 1 зроблено аналіз кодованих радіосигналів, що підлягають обробленню в системах безпеки та моніторингу.

В розділі 2 описуються методи первинного цифрового оброблення широкосмугових радіосигналів у режимі реального масштабу часу.

В розділі 3 досліджено методи визначення параметрів радіосигналів.

Розділ 4 містить опис методів побудови програмованих процесорів оброблення радіосигналів, які є результатом роботи зі створення пристроїв оброблення широкого класу радіосигналів.

1 КОДОВАНІ РАДІОСИГНАЛИ

Особливу групу модульованих сигналів, що підлягають обробленню в системах безпеки та моніторингу складають кодовані РС. Вони утворюються шляхом модулювання гармонічного коливання впорядкованою послідовністю імпульсів. Залежно від параметру несучого гармонічного коливання, з яким взаємодіє кодовий сигнал, розрізняють амплітудно-кодовані, фазо-кодовані та частотно-кодовані сигнали.

Кодові послідовності використовуються в різних радіотехнічних системах безпеки та моніторингу.

1.1 Характеристики кодованих РС

Кодовані РС мають вигляд послідовності (пачки) радіоімпульсів однакової форми та тривалості, які відрізняються один від одного значеннями амплітуд, початкових фаз або частот гармонічного несучого коливання [29]

$$u_n(t) = \alpha_n r_n(t) \cos[(\omega_0 + \omega_n)t + \varphi_n] \quad (1.1)$$

де α_n , $\omega_0 + \omega_n$, φ_n – амплітуда, частота та початкова фаза гармонічного коливання тривалістю T на інтервалі часу $(n-1)T \leq t \leq nT$; ω_0 – центральна частота послідовності радіоімпульсів; $r_n(t)$ – функція, що характеризує форму імпульсу.

Зазвичай використовуються прямокутні імпульси, для яких [30]

$$r_n(t) = \text{rect}[t - (n-1)T] = \begin{cases} 1, & (n-1)T \leq t \leq nT, \\ 0, & \text{при інших значеннях } t. \end{cases} \quad (1.2)$$

Кодований РС можна записати у формі виразу

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n r_n(t) \cos[(\omega_0 + \omega_n)t + \varphi_n], \quad 0 \leq t \leq NT. \quad (1.3)$$

Послідовності символів амплітуд $\{\alpha_n\}$, фаз $\{\varphi_n\}$ та частот $\{\omega_n\}$ формують кодові послідовності; N – кількість символів (довжина)

кової послідовності. Кодові послідовності визначають закон зміни амплітуди, фази та частоти гармонічного несучого коливання.

Залежно від виду модуляції розрізняють: амплітудно-кодовані сигнали (змінюється α_n ; $\varphi_n = 0$, $\omega_n = 0$); фазо-кодовані сигнали (змінюється φ_n ; $\alpha_n = 1$, $\omega_n = 0$); частотно-кодовані сигнали (змінюється ω_n ; $\alpha_n = 1$, $\varphi_n = 0$); сигнали зі змішаними видами модуляції (одночасно змінюються декілька параметрів).

Кодований сигнал є вузькосмуговим. Формулу для нього можна записати в комплексній формі [31]

$$u(t) = \operatorname{Re}[\dot{V}(t)e^{i\omega_0 t}], \quad 0 \leq t \leq NT, \quad (1.4)$$

де

$$\dot{V}(t) = \sum_{n=1}^N \dot{V}_n(t) \quad (1.5)$$

– комплексна обвідна кодованого сигналу;

$$\dot{V}_n(t) = \alpha_n r_n(t) e^{i(\omega_n t + \varphi_n)} \quad (1.6)$$

– комплексна обвідна одиночного радіоімпульсу (1.1).

Таким чином, кодований РС описується як послідовність радіоімпульсів, які відрізняються один від одного лише комплексними амплітудами.

Основними характеристиками кодованих РС є спектр та кореляційна функція. Їх зручно визначати через відповідні характеристики комплексної обвідної сигналу. Для комплексної обвідної (1.5) ці характеристики описуються такими виразами [29]:

– спектральна густина

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{V}(t) e^{-i\omega t} dt = \sum_{n=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \dot{V}_n(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (1.7)$$

– кореляційна функція

$$R_V(\tau) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{V}(t) \dot{V}^*(t-\tau) dt = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \dot{V}_n(t) \dot{V}_k^*(t-\tau) dt. \quad (1.8)$$

З врахуванням очевидності переходу від $U(\omega)$ та $R_V(\tau)$ до спектральної густини та кореляційної функції кодованого РС, аналіз кодованих сигналів в подальшому обмежений розглядом характеристик лише комплексної обвідної. Вказані характеристики визначені для різних видів модуляції несучого коливання кодовою послідовністю.

1.2 Амплітудно-кодовані РС

Амплітудно-кодований (АК) РС утворюється в результаті амплітудної модуляції несучого гармонічного коливання кодовою послідовністю:

$$U_{AK}(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n r_n(t) \cos \omega_0 t, \quad 0 \leq t \leq NT. \quad (1.9)$$

Кодова послідовність $\{\alpha_n\}$ визначає закон стрибкоподібної зміни амплітуди сигналу. При двійковому коді α_n приймає лише два значення 0 та 1. Таким чином, АК сигнал (1.9) відображає послідовність радіоімпульсів, які відрізняються тільки значеннями амплітуд.

Комплексна обвідна сигналу

$$\dot{V}(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n r_n(t), \quad 0 \leq t \leq NT \quad (1.10)$$

збігається з його обвідною та відображає послідовність відеоімпульсів $r_n(t)$ з амплітудами α_n (0 або 1).

На рис. 1.1 наведено часові діаграми формування АК РС.

Спектральну густину комплексної обвідної АК РС можна визначити шляхом підстановки (1.10) в (1.7).

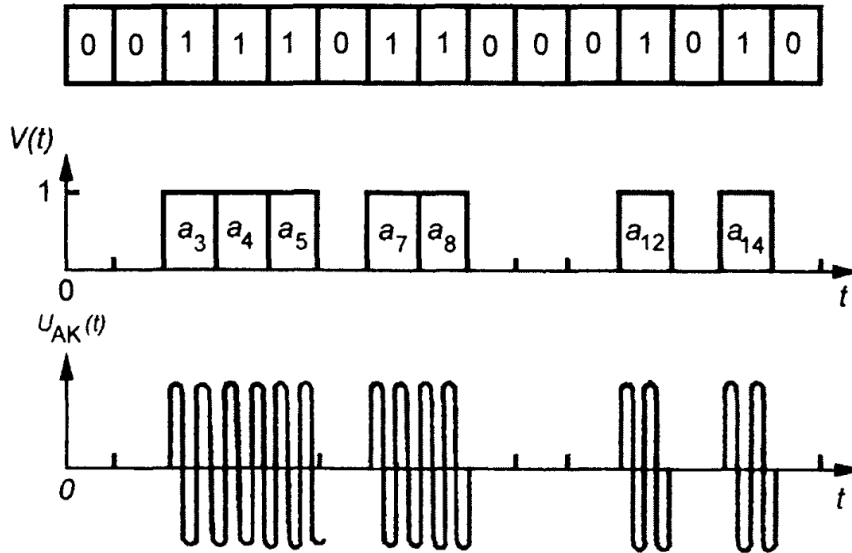


Рисунок 1.1 – Часові діаграми формування АК РС

$$U_{AK}(\omega) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \int_{(n-1)T}^{nT} r_n(t) e^{-i\omega t} dt = S_0(\omega) \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{-i(n-1)\omega T}, \quad (1.11)$$

де

$$S_0(\omega) = \int_0^T r_1(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1.12)$$

– спектральна густина першого імпульсу.

Для прямокутного імпульсу можна записати

$$S_0(\omega) = T \operatorname{sinc} \frac{\omega T}{2} e^{\frac{i\omega T}{2}}. \quad (1.13)$$

Вираз (1.11) запишемо у вигляді

$$U_{AK}(\omega) = S_0(\omega) S_A(\omega). \quad (1.14)$$

Звідси $S_A(\omega)$ описує спектральну густину кодової послідовності $\{\alpha_n\}$

$$S_A(\omega) = \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{-i(n-1)\omega T}. \quad (1.15)$$

Враховуючи (1.14), спектр сигналу визначається спектром першого імпульсу та спектром кодової послідовності з періодом $2\pi/T$.

Амплітудний та фазовий спектри комплексної обвідної АК сигналу можна визначити з (1.14) як

$$|U_{AK}(\omega)| = |S_0(\omega)| |S_A(\omega)|, \quad \varphi_{AK}(\omega) = \varphi_0(\omega) + \varphi_A(\omega), \quad (1.16)$$

де

$$S_0(\omega) = T \left| \sin c \frac{\omega T}{2} \right|; \quad \varphi_0(\omega) = -\frac{\omega T}{2} \pm \begin{cases} 0, & \sin c \frac{\omega T}{2} > 0 \\ \pi, & \sin c \frac{\omega T}{2} < 0 \end{cases}; \quad (1.17)$$

$$|S_A(\omega)| = \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N \alpha_n \alpha_k \cos(n-k)\omega T}, \quad (1.18)$$

$$\varphi_A(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\sum_{n=1}^N \alpha_n \sin(n-1)\omega T}{\sum_{n=1}^N \alpha_n \cos(n-1)\omega T}. \quad (1.19)$$

Графік амплітудного спектра $|S_A(\omega)|$ для кодової послідовності $\{\alpha_n\}$ (див. рис. 1.1) наведений на рис. 1.2. Графік відображений для $\omega \geq 0$, тому що амплітудний спектр симетричний відносно нульової частоти. Амплітудний спектр кодової послідовності $|S_A(\omega)|$ є періодичним з періодом $2\pi/T$ з осцилюючим характером. Спектр АК РС відображає результат накладання на спектр прямокутного імпульсу (штрихова лінія) спектра кодової послідовності.

Ширину спектра АК сигналу можна визначити як

$$\Delta\omega_{AK} = \frac{2\pi}{T}.$$

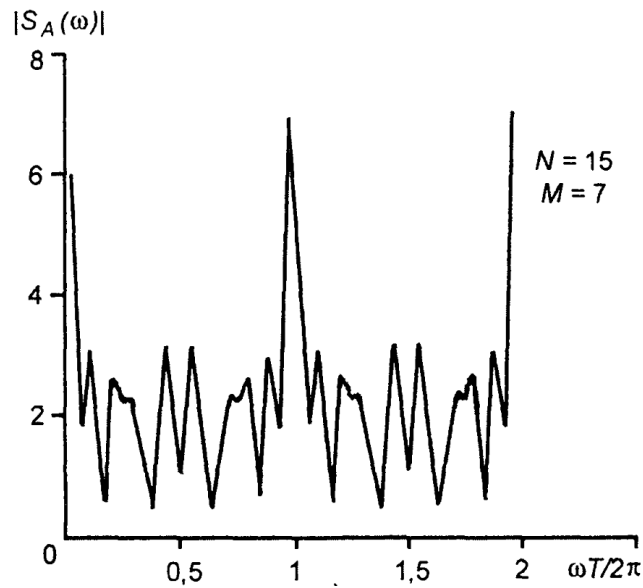


Рисунок 1.2 – Амплітудний спектр АК РС

Базу АК сигналу можна визначити як добуток тривалості сигналу NT та ширини спектра $\Delta\omega_{AK}$

$$B = NT \frac{\Delta\omega_{AK}}{2\pi} = N, \quad (1.20)$$

який дорівнює довжині кодової послідовності.

Кореляційну функцію комплексної обвідної АК РС можна визначити як

$$R_V(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N \alpha_n \alpha_k \int_{-\infty}^{\infty} r_n(t) r_k(t-\tau) dt. \quad (1.21)$$

Інтеграл у (1.21) з урахуванням (1.2) можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} r_n(t) r_k(t-\tau) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}[t - (n-1)T] \text{rect}[t - \tau - (k-1)T] dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(t) \text{rect}(t - \tau_1) dt, \end{aligned} \quad (1.22)$$

де

$$\tau_1 = [t - (n-1)T] - [t - \tau - (k-1)T] = \tau - (n-k)T. \quad (1.23)$$

Використавши кореляційну функцію одиночного імпульсу

$$R_0(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(t)\text{rect}(t-\tau)dt, \quad (1.24)$$

вираз (1.21) можна переписати у вигляді

$$R_V(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N \alpha_n \alpha_k R_0[\tau - (n-k)T], \quad (1.25)$$

де всі α_n та α_k , індекси яких знаходяться поза діапазоном $\{1, 2, \dots, N\}$, дорівнюють нулю.

Замінивши в (1.25) індекси суми на $m = n - 1$, перетворимо формулу для $R_V(\tau)$ до вигляду

$$R_V(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{m=-\infty}^N \sum_{n=-\infty}^N \alpha_n \alpha_{n-m} R_0(\tau - mT). \quad (1.26)$$

Величина

$$R_A(m) = \sum_{n=-\infty}^N \alpha_n \alpha_{n-m} \quad (1.27)$$

відображає кореляційну функцію кодової послідовності. В (1.27) всі α_n, α_{n-m} з індексами поза діапазоном $\{1, 2, \dots, N\}$ дорівнюють нулю. Підставивши (1.27) в (1.26), отримаємо

$$R_V(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{m=-\infty}^N R_A(m) R_0(\tau - mT). \quad (1.28)$$

Очевидно, що $R_A(m) = 0$ при $m \geq N$ та $m \leq -N$. Звідси вираз для кореляційної функції можна записати у вигляді

$$R_V(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} R_A(m) R_0(\tau - mT), \quad (1.29)$$

де

$$R_A(m) = \sum_{n=m+1}^N \alpha_n \alpha_{n-m}; \quad R_A(-m) = R_A(m). \quad (1.30)$$

Вирази (1.29) та (1.30) вказують, що кореляційна функція комплексної обвідної АК РС складається із суми повторюваних з інтервалом T кореляційних функцій одиночного імпульсу (1.24), максимальні значення яких визначаються кореляційною функцією кодової послідовності $R_A(m)$.

Для прямокутного імпульсу

$$R_0(\tau) = T \left(1 - \frac{|\tau|}{T} \right), \quad |\tau| \leq T. \quad (1.31)$$

При $\tau = 0$

$$R_V(0) = \frac{T}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n^2, \quad (1.32)$$

для двійкової кодової послідовності

$$R_V(0) = \frac{TM}{2}. \quad (1.33)$$

При значеннях $\tau = mT$

$$R_V(mT) = \frac{T}{2} R_A(m). \quad (1.34)$$

На рис. 1.3 наведено графік кореляційної функції $R_V(\tau)$ для АК РС, зображених на рис. 1.1 (для $\tau > 0$).

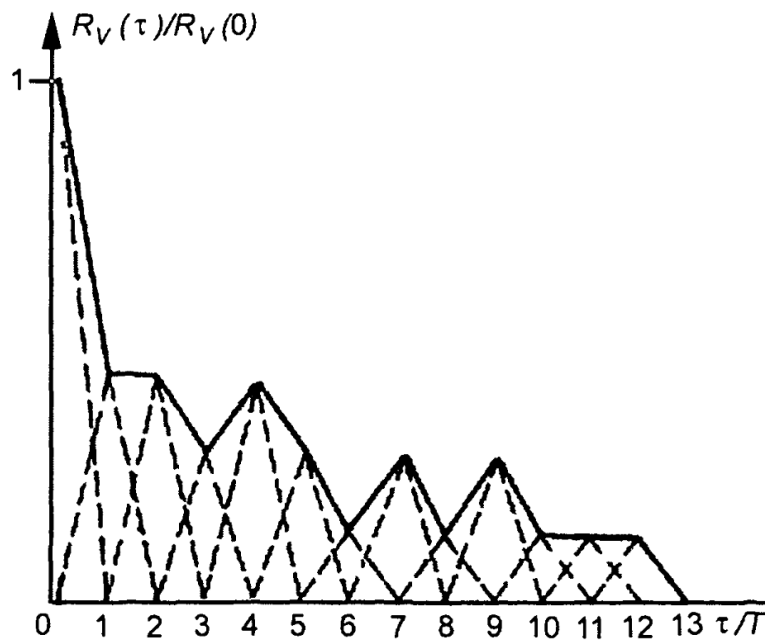


Рисунок 1.3 – Кореляційна функція АК РС

Кореляційні функції отримані в результаті накладання трикутних імпульсів (1.31), позначених на рисунку штриховими лініями, з амплітудами (1.34), тривалістю $2T$, інтервалом надходження T .

1.3 Фазо-кодовані РС

Фазо-кодований сигнал складається з послідовності прямокутних радіоімпульсів з однаковими амплітудами і його можна отримати в результаті модуляції фази гармонічного несучого коливання кодовим сигналом (послідовністю).

Вони можуть описуватись за виразом [29]

$$u(t) = V_0 \cos[\omega_0 t + \varphi(t)], \quad 0 \leq t \leq NT, \quad (1.35)$$

або в комплексній формі

$$u(t) = \text{Re}[\dot{V}(t)e^{-i\omega_0 t}], \quad 0 \leq t \leq NT, \quad (1.36)$$

де $\dot{V}(t) = V_0 e^{i\varphi(t)}$ – комплексна обвідна кодованого сигналу; V_0 , ω_0 , $\varphi(t)$ – амплітуда, частота та фаза несучого сигналу; T – тривалість одного імпульсу; N – кількість радіоімпульсів кодованого сигналу.

За час проходження одного імпульсу фаза може бути постійною, стрибкоподібно змінюватись від імпульсу до імпульсу. В цьому випадку кодований сигнал можна відобразити гармонічним коливанням з фазовою маніпуляцією (рис. 1.4).

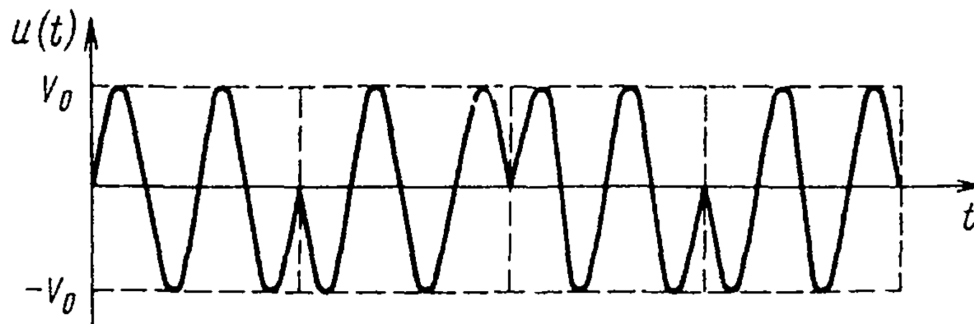


Рисунок 1.4 – Часова діаграма ФК РС

Сигнали з фазою, що неперервно змінюється протягом визначеного інтервалу часу називають сигналами з неперервною фазою. Присутність таких сигналів зумовлена бажанням покращити спектральні характеристики сигналу, які дозволять забезпечити підвищену якість передавання інформації та завадостійкість телекомунікаційної системи.

У загальному випадку для фази кодованого сигналу на одному інтервалі можна записати формулу у вигляді

$$\varphi(t) = 2\pi \sum_{k=0}^n c_k h_k q(t - kT), \quad nT < t \leq (n+1)T, \quad (1.37)$$

де $\{c_k\}$ – кодова послідовність; h_k – індекс модуляції на k -му інтервалі.

Розрізняють сигнали з постійним індексом модуляції та з циклічно змінним індексом модуляції. Функція $q(t)$ в (1.37) називається фазовим імпульсом. На інтервалі $[0, LT]$ вона змінюється від 0 до $1/2L$ –

тривалість фазового імпульсу (часто $L=1$). При цьому, фаза змінюється в межах $\pi c_k h_k$.

Формулу для визначення частоти сигналу можна записати у вигляді

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} [\omega_0 t + \varphi(t)] = \omega_0 + 2\pi \sum_{k=0}^n c_k h_k g(t - kT), \quad (1.38)$$

$$nT < t \leq (n+1)T.$$

Функція $g(t)$ описує частотний імпульс. Його тривалість дорівнює LT . Більш повільну зміну фази можна описати різними функціями. Прикладом такої залежності є тригонометрична функція [32]

$$q(t) = \frac{1}{4} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{T} \right). \quad (1.39)$$

Параметри ФК РС зручно визначати через характеристики їх комплексних обвідних [33]:
спектральна густина

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{V}(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (1.40)$$

кореляційна функція

$$R_v(\tau) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{V}(t) \dot{V}^*(t - \tau) dt. \quad (1.41)$$

В подальшому розглянемо характеристики ФК лише із стрибкоподібною зміною фази та частоти.

Сигнали із стрибкоподібною зміною фази знайшли практичне застосування в системах безпеки та моніторингу. Кодований РС складається з послідовності радіоімпульсів, в яких від імпульсу до імпульсу стрибкоподібно змінюється лише фаза φ_n .

$$u(t) = \sum_{n=1}^N r_n(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_n], \quad 0 \leq t \leq NT, \quad (1.42)$$

де $r_n(t)$ – обвідна одиночного, як правило, прямокутного імпульсу.

Кодова послідовність $\{\varphi_n\}$ характеризує закон зміни фази. Комплексну обвідну сигналу зручно відобразити у вигляді [34]

$$\dot{V}(t) \sum_{n=1}^N \dot{V}_n(t) = \sum_{n=1}^N r_n(t) e^{i\varphi_n} = \sum_{n=1}^N r_n(t) b_n, \quad (1.43)$$

де $b_n = e^{i\varphi_n} = e^{i\pi c_n}$.

При використанні бінарного коду фаза приймає значення 0 або π . В цьому випадку

$$b_n = \begin{cases} 1, & \varphi_n = 0 \\ -1, & \varphi_n = \pi \end{cases}$$

Спектральну густину комплексної обвідної ФК сигналу можна визначити із (1.40) шляхом підстановки (1.43). При $r_n(t) = 1$ маємо

$$U(\omega) = \sum_{n=1}^N b_n \int_{(n-1)T}^{nT} e^{-i\omega t} dt. \quad (1.44)$$

Спектральну густину послідовності імпульсів можна визначити як суму спектральних густин однакових за формою імпульсів, що зміщені в часі один відносно одного на інтервал T . Використовуючи властивості перетворення Фур'є (1.44) запишемо у вигляді

$$U(\omega) = S_0(\omega) \sum_{n=1}^N b_n e^{-i(n-1)\omega T}, \quad (1.45)$$

де

$$S_0(\omega) = \int_0^T e^{-i\omega t} dt$$

– спектральна густина першого імпульсу.

Для прямокутного імпульсу [35]:

$$S_0(\omega) = T \sin c \frac{\omega T}{2} e^{-\frac{i\omega T}{2}}. \quad (1.46)$$

Вираз для $U(\omega)$ перепишемо у вигляді

$$U(\omega) = S_0(\omega) S_k(\omega), \quad (1.47)$$

де

$$S_k(\omega) = \sum_{n=1}^N b_n e^{-i(n-1)\omega T} \quad (1.48)$$

– спектральна густина кодової послідовності.

Квадрат модуля кодової послідовності можна визначити з (1.48) як

$$|S_k(\omega)|^2 = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N b_n b_k e^{-i(n-k)\omega T}. \quad (1.49)$$

Використовуючи формулу Ейлера та враховуючи, що косинус є парною функцією, а синус – непарною, із (1.49) отримаємо

$$|S_k(\omega)| = \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N b_n b_k \cos((n-k)\omega T)}. \quad (1.50)$$

Вираз для фазового спектра визначимо з (1.48) у вигляді

$$\varphi_k(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\sum_{n=1}^N b_n \sin((n-1)\omega T)}{\sum_{n=1}^N b_n \cos((n-1)\omega T)}. \quad (1.51)$$

Амплітудний спектр комплексної обвідної можна отримати з (1.47) як добуток модулів $|S_0(\omega)|$ та $|S_k(\omega)|$:

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Довгий С. О. Сучасні телекомунікації / С. О. Довгий, О. Я. Савченко, П. П. Воробієнко. – К. : Український видавничий центр, 2002. – 520 с.
2. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Склад. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
3. Панфилов И. П. Цифровая связь. / И. П. Панфилов, В. К. Стеклов, Н. Л. Бирюков и др. – К. : Техніка, 1992. – 228 с.
4. Дансмор Б. Справочник по телекоммуникационным технологиям / Б. Дансмор, Т. Скандьер. – М. : Вильямс, 2004. – 640 с.
5. Хелд Г. Технологии передачи данных. / Г. Хелд. – СПб. : Питер, 2003. – 720 с.
6. Радзиевский В. Г. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех / В. Г. Радзиевский, П. А. Трифонов. – М. : Радиотехника, 2009. – 288 с.
7. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.
8. Деев В. В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи / В. В. Деев. – СПб. : Наука, 2007. – 267 с.
9. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів : монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 168 с.
10. Бортник Г. Г. Методи та засоби обробки високочастотних сигналів : монографія / Бортник Г. Г., Кичак В. М. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 132 с.
11. Волков Л. Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики : учеб. пособие / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2005. – 392 с.
12. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл-мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
13. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Айфичер Эммануил С., Джервис Барри У. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.

14. Гольденберг Л. М. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для вузов / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – М. : Радио и связь, 1990. – 256 с.
15. Лайонс Ричард. Цифровая обработка сигналов / Ричард Лайонс. – 2-е издание. – М.: Бинوم-Пресс, 2006. – 656 с.
16. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2003. – 604 с.
17. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. / С. Смит. – М. : Додэка XXI, 2008. – 720 с.
18. Лэй Э. Цифровая обработка сигналов для инженеров и технических специалистов. / Э. Лэй. – М. : Группа ИДТ, 2007. – 336 с.
19. Радзиевский В. Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки / В. Г. Радзиевский, А. А. Сирота. – М. : Радиотехника, 2004. – 432 с.
20. Рембовский А. М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин. – М. : Телеком, 2010. – 624 с.
21. Куприянов А. И. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / А. И. Куприянова, А. В. Сахаров. – М. : Вузовская книга, 2003. – 528 с.
22. Леньшин А. В. Бортовые системы и комплексы радиоэлектронного подавления / А. В. Леньшин. – Воронеж : Научная книга, 2014. – 590 с.
23. Цветнов В. В. Радиоэлектронная борьба: радиоразведка и радиопротиводействие / В. В. Цветнов, В. П. Демин, А. И. Куприянов. – М. : Изд-во МАИ, 1998. – 248 с.
24. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных войн / под ред. А. И. Куприянова. – М. : Вузовская книга, 2009. – 360 с.
25. Мартиросов В. Е. Теория и техника приема дискретных сигналов ЦСПИ / В. Е. Мартиросов. – М. : Радиотехника, 2005. – 136 с.
26. Бортник Г. Г. Дискретизація вузькосмугових сигналів / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 2. – С. 45–48.

27. Бортник Г. Г. Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах : монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 140 с.

28. Бортник Г. Г. Методи та пристрої оцінювання характеристик імпульсно-кодових модуляторів широкосмугових сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, Н. О. Пунченко. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 147 с.

29. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – 3-е изд. – М. : Высшая школа, 2000. – 462 с.

30. Волощук Ю. І. Сигнали та процеси у радіотехніці : підручник для студентів вищих навчальних закладів, том 2 / Ю. І. Волощук. – Харків : Компанія СМІТ, 2003. – 444 с.

31. Бабак В. П. Обробка сигналів : підручник / В. П. Бабак, В. С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К. : Либідь, 1996. – 392 с.

32. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.

33. Раушер К. Основы спектрального анализа / К. Раушер, Ф. Йанссен, Р. Минихольд. – М. : Горячая линия телеком, 2006. – 224 с.

34. Волощук Ю. І. Сигнали та процеси у радіотехніці : підручник для студентів вищих навчальних закладів, том 1 / Ю. І. Волощук. – Харків : Компанія СМІТ, 2003. – 580 с.

35. Гимпилевич Ю. Б. Сигналы и процессы в радиотехнике : учебное пособие / Ю. Б. Гимпилевич. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2003. – 272с.

36. Бакулев П. А. Радиолокационные и радионавигационные системы : учебное пособие для вузов / П. А. Бакулев, А. А. Сосновский. – М. : Радио и связь, 1994. – 296 с.

37. Бортник Г. Г. Основи теорії багатоканального зв'язку : навчальний посібник / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 146 с.

38. Бортник Г. Г. Основи теорії передачі інформації : навчальний посібник / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак. – Вінниця : ВДТУ, 2002. – 128 с.

39. Пенин П. И. Радиотехнические системы передачи информации: учебное пособие для вузов / П. И. Пенин., Л. И. Филиппов. – М. : Радио и связь, 1984. – 256 с.
40. Прокис Д. Цифровая связь / Д. Прокис ; пер. с англ. под ред. Д. Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
41. Скляр Д. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Д. ; пер. с англ. под ред. А. В. Назаренко. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
42. Бортник Г. Г. Системи доступу : підручник для вузів / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, О. В. Стальченко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 308 с.
43. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989. – 656 с.
44. Дьяконов В. П. Современные измерительные генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. – М. : Солон-пресс, 2011. – 378 с.
45. Информационные системы: Табличная обработка информации / Е. П. Балашов, В. Н. Негода, Д. В. Пузанков [и др.]; под ред. Е. П. Балашова и В. Б. Смолова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1985. – 184 с.
46. Информационные системы: Табличная обработка информации / Е. П. Балашов, В. Н. Негода, Д. В. Пузанков [и др.]; под ред. Е. П. Балашова и В. Б. Смолова. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1985. – 184 с.
47. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2010. – 328 с.
48. Бортник Г. Г. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, О. Г. Бортник, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 128 с.
49. Крупельницький Л. В. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія / Л. В. Крупельницький, О. Д. Азаров ; під. заг. ред. О. Д. Азарова. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005 – 167 с.
50. Грушвицкий Р. И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, В. Б. Смоллов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 160 с.

51. Lundin H. On external calibration of analog-to-digital converters. / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // IEEE Workshop on Statistical Signal Processing: proceedings of the conference, Singapore. – August 2001. – P. 377–380.

52. Lundin H. ADC post-correction using limited resolution correction values / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // IMEKO 10th Workshop on ADC Modeling and Testing: proceedings of the conference, Gdynia/Jurata, Poland, September 2005. – Vol.2. – P. 567–572.

53. Маковий В. А. Розширення динамічного діапазона реальних АЦП методами цифрової корекції / В. А. Маковий // Радіотехніка. – 1990. – № 6. – С. 24–27.

54. Lundin H. A criterion for optimizing bit-reduced post-correction of AD converters / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – August 2004. – P. 1159–1166.

55. Lundin H. A framework for external dynamic compensation of AD converters / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // 7th European Workshop on ADC Modeling and Testing: proceedings of the conference, Prague, Czech Republic. – June 2002. — P. 135–138.

56. Шахтарин Б. И. Методы спектрального оценивания случайных сигналов : учебное пособие / Б. И. Шахтарин, В. А. Ковригин. – М. : Гелиос АРВ, 2005. – 248 с.

57. Бортник Г. Г. Цифровий метод спектрального оцінювання випадкових сигналів / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 2. – С. 108–114.

58. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2007. – 1016 с.

59. Динамические параметры аналого-цифровых преобразователей и методы их измерений / П. И. Руднев, Б. А. Хаджи, В. Ю. Чернышев, С. Н. Шилов // Радіотехніка і електроніка. – 1993. – № 10. – С. 1868–1876.

60. Маковий В. А. Расчет аналого-цифрового тракта программно-определяемого радиосредства / В. А. Маковий// Теория и техника радиосвязи. –2010. – № 2. – С. 65–73.

61. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов / М. М. Гельман. – М. : Мир, 1999. – 559 с.

62. Брагин А. А. Основы метрологического обеспечения аналого-цифровых преобразователей электрических сигналов / А. А. Брагин, А. Л. Семенюк. – М. : Изд.-во стандартов, 1989.– 164 с.

63. Маковий В. А. Нелинейные искажения и интермодуляционная избирательность в аналого-цифровых трактах ДКМВ диапазона / В. А. Маковий // Теория и техника радиосвязи. – 2012 – № 2. – С. 83–94.

64. Маковий В. А. Цифровая коррекция комбинаций в SDR радиостанциях / В. А. Маковий // Теория и техника радиосвязи. – 2012. – № 3. – С. 25–34.

65. Бортник Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням похибок на основі фазо-площинної матриці / Г. Бортник, С. Бортник, О. Стальченко // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП-2006) : матеріали II Міжнар. науково-техніч. конф., Вінниця, 16–19 лист. 2006 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 53–54.

66. Бортник Г. Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням похибок на основі фазо-площинної матриці / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2007. – № 2. – С. 14–21.

67. Бортник Г. Г. Методи та засоби контролю динамічних параметрів аналого-цифрових перетворювачів / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, О. А. Семенюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1997. – № 2. – С. 19–28.

68. Кичак В. М. Дослідження тестових сигналів для контролю характеристик аналого-цифрових перетворювачів / В. М. Кичак, С. Г. Бортник, Н. О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 1. – С. 80–84

69. Бортник Г. Аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення сигналів у радіотехнічних комплексах спеціального призначення / Г. Бортник, В. Костецький, О. Стальченко // Сучасні проблеми радіотехніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011) : матер. V міжнар. наук.-техн. конф. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 13–14.

70. 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 (21). – С. 12–15.

71. Бортник Г. Г. Цифровий пристрій запам'ятовування та відтворення радіосигналів / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Р. М. Вітер // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2019. – № 4. – С. 87–93.

72. Петровский А. А. Методы и микропроцессорные средства обработки широкополосных и быстропротекающих процессов в реальном времени / А. А. Петровский ; под ред. Г. В. Римского. – Минск : Наука и техника. – 1988. – 272 с.

73. Бортник Г. Г. Пристрій первинного оброблення радіосигналів / Г. Г. Бортник, А. В. Коваленко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2017, – № 1. – С. 81–86.

74. Бортник Г. Г. Апаратно-програмний засіб первинного оброблення вузькосмугових радіосигналів / Г. Г. Бортник, А. В. Коваленко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2017. – № 2. – С. 87–90.

75. Бортник Г. Г. Пристрій первинного оброблення радіосигналів / Г. Г. Бортник, А. В. Коваленко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2017. – № 1. – С. 81–85.

76. Ахмед Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Н. Ахмед, К. Р. Рао. – М. : Связь, 1980. – 248 с.

77. Jenq Y. Digital spectra of nonuniformly sampled signals: theories and applications / Y. Jenq // IEEE Trans. on Instrum. and Measurement. – 1990. – № 6. – P. 969–971.

78. Bortnyk G. G. High-processing method of spectral analysis wide-signals / G. G. Bortnyk, V. M. Kychak, M. V. Vasytkivskiy // International Conference on Information and Tele-communication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo). – 2019.– P. 1–4.

79. Бортник Г. Г. Цифровий метод спектрального аналізу широко-смугових сигналів / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, А. В. Коваленко / Вісник Хмельницького національного університету. – 2019. – № 3. – С. 92–96.

80. Бортник Г. Г. Цифровий метод спектрального аналізу радіосигналів / Г. Г. Бортник, А. В. Коваленко // Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019) : матеріали I

Міжнародної науково-технічної конференції, 14–16 листопада 2019 р.
– Вінниця : ВНТУ. – С. 39–40.

81. Васильківський М. В. Оцінювання продуктивності каскадного кодування та цифрової модуляції в телекомунікаційних системах / М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019) : матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції, 14–16 листопада 2019р. – Вінниця : ВНТУ. – С. 88–89.

82. Бортник Г. Г. Метод цифрового спектрального аналізу вузько-смугових сигналів / Г. Г. Бортник, О. Г. Бортник, О. В. Стальченко / Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2016, № 4. – С. 97–101.

83. Бортник Г. Г. Спектральний метод оцінювання динамічних параметрів аналого-цифрових перетворювачів / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. Г. Бортник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – № 1. – С. 63–67.

84. Бортник Г. Г. Метод цифрового спектрального аналізу у реальному часі / Г. Г. Бортник, О. Г. Бортник, М. В. Васильківський / Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 6. – С. 96–100.

85. Бортник Г. Цифровий панорамний аналізатор спектра / Г. Бортник, С. Бортник, В. Костецький // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП-2006) : матеріали другої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 16–19 лист. 2006 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 55–56.

86. Бортник Г. Г. Аналого-цифровий тракт комп'ютерних систем з цифровим обробленням високочастотних сигналів / Г. Г. Бортник, О. В. Стальченко, О. І. Паламарчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 2 – С. 74–78.

87. 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. – № 1 – С. 102–105.

88. Бортник Г. Г. Цифровий аналізатор спектра радіосигналів / Г. Г. Бортник, А. В. Коваленко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2017. – № 3. – С. 83–86

89. Бортник Г. Г. Пристрій запам'ятовування та відтворення радіосигналів / Г. Г. Бортник, Р. М. Вітер // Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», (СПРН-2019) : матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції, 14–16 листопада 2019 р. – Вінниця : ВНТУ. – С. 66–67.

90. Лосев В. В. Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки / В. В. Лосев. – Минск : Выш. шк. – 1990. – 132 с.

91. Маковий В. А. Имитационное моделирование широкополосного аналого-цифрового тракта программно-определяемых радиоустройств / В. А. Маковий // Теория и техника радиосвязи. – 2011. – № 2. – С. 57 – 68.

92. Бортник Г. Г. Метод визначення динамічних характеристик аналого-цифрових перетворювачів на базі взаємних спектральних відображень / Г. Г. Бортник, А. В. Коваленко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – № 3. – С. 60–64.

93. 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.

94. Бортник Г. Г. Метод аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з додатковим шумоподібним сигналом / Г. Г. Бортник, О. В. Стальченко, К. О. Боярський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 1. – С. 100–105.

95. Афонский А. А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – М. : Солон-пресс, 2009. – 248 с.

96. Проектирование специализированных информационно-вычислительных систем / Ю. М. Смирнов, Г. Н. Воробьев, Е. С. Потапов, В. В. Сюзев ; под ред. Ю. М. Смирнова. – М. : Высш. шк., 1984. – 359 с.

97. Bortnyk G. G. Analog-digital path of radio-technical systems with digital processing of high-frequency signals / G. G. Bortnyk, M. V. Vasylykivskiy, V. M. Kychak // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2018) :

Proceedings of the Int. Conf., Lviv-Slavsko, Ukraine, February 20–24, 2018. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2018. – P. 1–4.

98. Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М. : Физматлит, 1963. – 1100 с.

99. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В. В. Поповський, С. О. Сабурова, В. Ф. Олійник, Ю. І. Лосєв, Д. В. Агєєв та ін. ; за загальною редакцією В. В. Поповського. – Харків : Компанія СМІТ, 2006. – 564 с.

100. Шинкарук О. М. Приймання та оброблення сигналів : навчальний посібник / О. М. Шинкарук, В. І. Правда, Ю. М. Бойко. – Хмельницький : ХНУ, 2013. – 366 с.

101. Васильківський М. В. Підвищення ефективності кодування та модуляції в цифрових системах передачі / М. В. Васильківський, Д. О. Жупанов // Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019) : матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції, 14–16 листопада 2019р. – Вінниця : ВНТУ. – С. 70–71.

102. Васильківський М. В. Оцінювання енергетичних характеристик радіоканалів міліметрового діапазону / М. В. Васильківський, О. І. Мельничук, О. В. Стальченко // Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019) : матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції, 14–16 листопада 2019 р. – Вінниця : ВНТУ. – С. 80–81.

103. Lundin H. On the estimation of quantizer reconstruction levels / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference: proceedings of the conference, Ottawa, Canada, May 2005. – Vol.1. – P. 144–149. – ISSN 0018-9456.

104. Giaquinto N. Detection, digital correction and global effect of A/D converters nonlinearities / N. Giaquinto, M. Savino, A. Trotta; in Daponte P. and Michaeli L., editors // International Workshop on ADC Modelling, Slovak Republic, May 1996. – P. 122–127.

105. Carbone P. Statistical efficiency of the ADC sinewave histogram test / P. Carbone, E. Nunzi, D. Petri // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, 2002. – P. 849–852.

106. Lundin H. Analog-to-digital converter error correction using frequency selective tables / H. Lundin, T. Andersson, M. Skoglund, P. Handel // Radio Vetenskap och Kommunikation (RVK): proceedings of the conference, Stockholm, Sweden. – June 2002. — P. 487–490.

107. Hummels D. Performance improvement of all-digital wide-bandwidth receivers by linearization of ADCs and DACs / D. Hummels // Measurement. – January 2002. – P. 35–45. – ISSN 0032-4140.

108. McNeill J. “Split ADC” Architecture for Deterministic digital background Calibration of a 16-bit 1-MS/s ADC / John McNeill, Michael C. W. Coln, Brian J. Larivee // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – Vol. 40, no. 12. – P. 2437–2445.

109. Мерзликин С. Сверхбыстродействующие АЦП: Особенности архитектуры / С. Мерзликин // Электроника: НТБ. – 2008. – № 1. – С. 30–33.

110. Дорофеев П. Современные быстродействующие АЦП с большим динамическим диапазоном / П. Дорофеев, П. Руднев // Электроника: НТБ. – 2006. – № 4. – С. 23–25.

111. Никамин В. А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи: справочник / В. А. Никамин. – СПб. : КОРОНА принт; М. : Альтекс-А, 2003. – 224 с.

112. Волович Г. И. Микросхемы АЦП и ЦАП: справочник / Г. И. Волович, В. Б. Ежов ; отв. ред. Т. Е. Брод. – М. : Додэка-XXI, 2005. – 432 с.

113. Мячев А. А. Интерфейсы средств вычислительной техники: справочник / А. А. Мячев. – М. : Радио и связь, 1993. – 352 с.

114. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия / М. Гук. – СПб. : Питер, 2003. – 528 с.

Наукове видання

**Бортник Геннадій Григорович
Васильківський Микола Володимирович
Кичак Василь Мартинович**

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ
ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ
ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Г. Бортником

Підписано до друку 23.07.2020 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 7,28.
Наклад 95 пр. Зам № В2020-08

Вінницький національний технічний університет,
ІРВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
press.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.