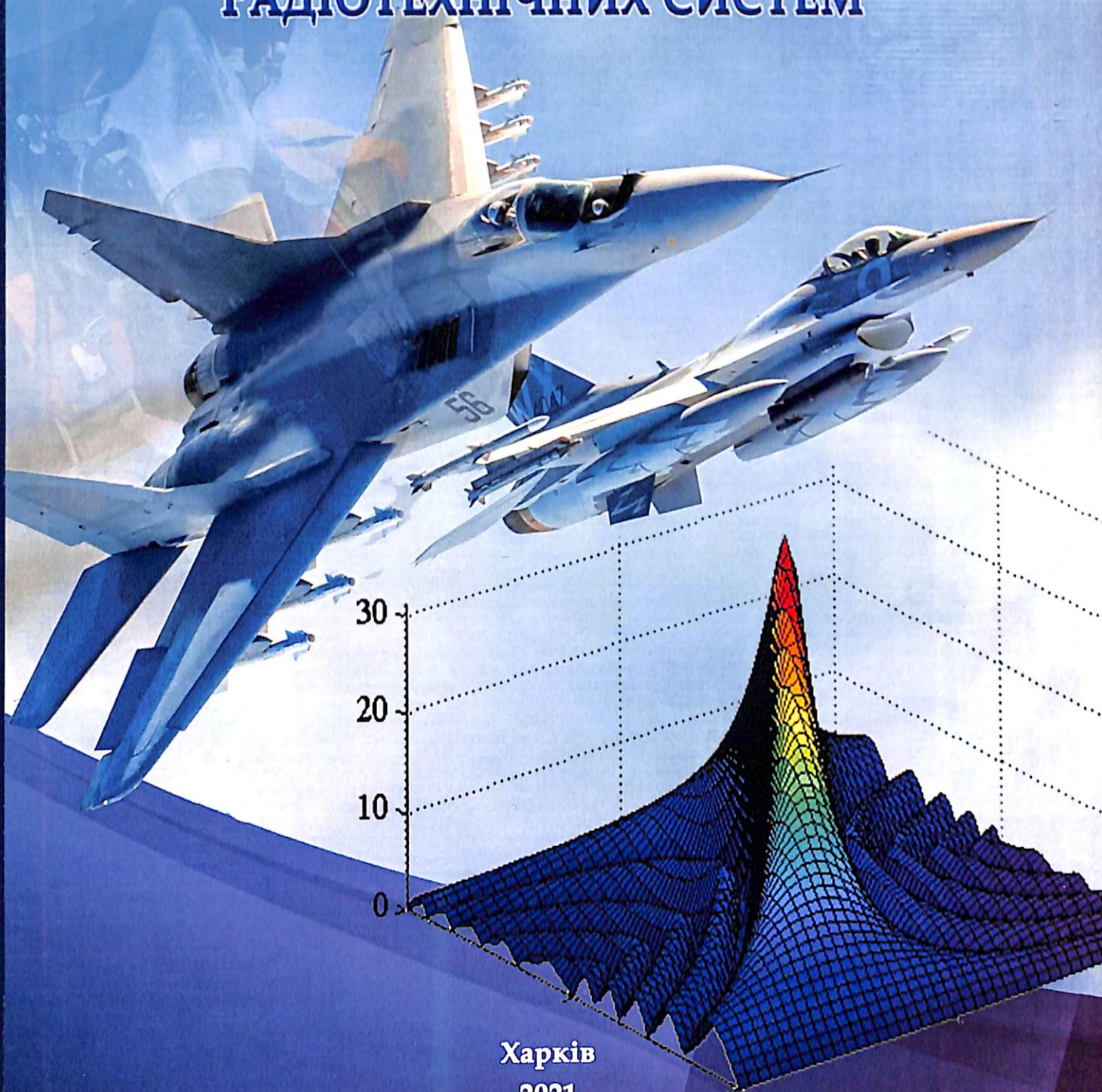


080386
K78

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПОВІТРЯНИХ СИЛ імені ІВАНА КОЖЕДУБА

ОСНОВИ СТАТИСТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ



Харків
2021

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПОВІТРЯНИХ СИЛ імені ІВАНА КОЖЕДУБА

П. Ю. Костенко, С. Я. Фалькович

**ОСНОВИ СТАТИСТИЧНОЇ ТЕОРІЇ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ
РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

Підручник



Харків
2021

УДК 621.391.83 (075.8)
К72.

*Затверджено до видання вченою
радою Харківського національного
університету Повітряних Сил імені
Івана Кожедуба як підручник
(протокол № 15 від 17.09. 2019 р.)*

Рецензенти: К. С. Василюта, доктор техн. наук, професор (ХНУІС);
М. А. Павленко, доктор техн. наук, професор (ХНУІС);
В. В. Павликов, доктор техн. наук, старший науковий
співробітник (НАУ ім. М. С. Жуковського).

Костенко П. Ю.

К72 Основи статистичної теорії інформаційно-вимірювальних
радіотехнічних систем : підручник / П. Ю. Костенко, С. Я. Фалькович.
– Х. : ХНУІС. – 2021. – 612 с.

ISBN 978-966-468-099-5

Наведені моделі детермінованих сигналів і випадкових процесів. З єдиних статистичних позицій викладені теоретичні основи розрізнення, виявлення, розділення сигналів та оцінки їх параметрів. Розглянуто питання фільтрації процесів та просторово-часової обробки сигналів. Викладено елементи теорії хаотичної динаміки й фракталів і пов'язані з ними основні поняття про хаотичні, детерміновані та випадкові самоподібні процеси, а також можливості їх застосування в інформаційно-вимірювальних системах для вирішення задач оцінки скритності хаотичних сигналів та її підвищення. Розглянуті питання виявлення й класифікація хаотичних процесів зі структурованими атрactorами, а також можливості конструювання хаотичних процесів з неструктурованими атрactorами. Викладений підхід до використання непараметричної BDS-статистики для вирішення задач виявлення сигналів та оцінки їх параметрів в умовах дефіциту апріорної інформації про ймовірнісні розподіли завад, що впливають на спостереження сигналів.

Призначений для курсантів та студентів вузів радіотехнічного профілю. Може бути корисним ад'юнктам, аспірантам, розроблювачам радіоелектронної апаратури, інженерам і науковцям, які спеціалізуються в галузі локації, навігації й зв'язку.

УДК 621.391.83 (075.8)

© Костенко П. Ю., Фалькович С. Я., 2021
© Харківський національний університет
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2021

ISBN 978-966-468-099-5

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ І СИМВОЛІВ ОПЕРАЦІЙ	9
ПЕРЕДМОВА	13
Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАДІОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ	16
1.1. Основні визначення	16
1.2. Структурні схеми радіотехнічних систем	17
1.3. Задачі статистичної теорії радіотехнічних систем	20
1.4. Основні відомості про радіолокаційні та радіонавігаційні РТС	21
1.4.1. Фізичні основи виявлення і визначення місцеположення об'єктів	24
1.4.2. Методи визначення місцеположення об'єктів	27
1.4.3. Основні тактико-технічні характеристики РЛС і РНС	34
Розділ 2. МОДЕЛІ ДЕТЕРМІНОВАНИХ СИГНАЛІВ	43
2.1. Класифікація моделей сигналів	43
2.2. Спектральне представлення сигналів	44
2.3. Дельта-функція	51
2.4. Аналітичний сигнал	55
2.5. Лінійні інваріантні за часом системи	60
2.6. Часова дискретизація сигналів	63
2.6.1. Теорема Котельникова	63
2.6.2. Властивості функцій відліку	66
2.6.3. Наслідок теореми Котельникова	68
2.6.4. Практичні питання часової дискретизації	69
2.6.5. Часова дискретизація вузькосмугових сигналів	71
2.7. Геометричне представлення сигналів (елементи функціонального аналізу)	72
2.8. Квантування повідомлень	77
2.9. Радіосигнали зв'язкового типу	79
2.9.1. Неперервні сигнали	79
2.9.2. Дискретні радіосигнали. Імпульсні аналогові сигнали	81
2.9.3. Цифрові радіосигнали	84
2.10. Радіосигнали вимірювального типу	88
Питання і завдання для самоконтролю	91
Розділ 3. МОДЕЛІ ВИПАДКОВИХ СИГНАЛІВ	92
3.1. Загальні відомості	92
3.2. Основні характеристики випадкових процесів	98
3.3. Гауссівські випадкові процеси	100
3.4. Стаціонарні випадкові процеси	102
3.5. Спектральне представлення стаціонарних випадкових процесів	111

3.6. Математична модель завад.....	118
3.7. Функція правдоподібності	125
Питання і завдання для самоконтролю.....	128
Розділ 4. РОЗРІЗНЕННЯ СИГНАЛІВ.....	130
4.1. Статистична теорія рішень.....	130
4.2. Загальне розв'язання задачі оптимального розрізнення двох сигналів	132
4.3. Розрізнення двох цілком відомих сигналів	137
4.4. Схемні методи формування кореляційного інтеграла.....	141
4.4.1. Метод кореляції.....	142
4.4.2. Метод оптимальної фільтрації	142
4.4.3. Проходження сигналу і завади через ОФ.....	146
4.4.4. Частотна характеристика ОФ	150
4.5. Розрахунок показників якості оптимальної системи простого розрізнення двох сигналів.....	151
4.5.1. Розрізнення нульового і ненульового сигналів	151
4.5.2. Розрізнення двох сигналів з однаковими енергіями	156
4.5.3. Загальний випадок розрізнення двох цілком відомих сигналів s_1 і s_2	158
4.5.4. Обговорення результатів розрахунку і висновки.....	159
4.6. Розрізнення двох сигналів із невідомою початковою фазою	163
4.6.1. Обговорення задачі розрізнення двох сигналів із невідомою початковою фазою	163
4.6.2. Усунення випадкової фази з функції правдоподібності.....	164
4.6.3. Розрізнення нульового і ненульового сигналів з випадковою початковою фазою.....	167
4.6.4. Розрізнення сигналів з випадковою початковою фазою та однаковими енергіями ($E_1 = E_2 = E$).....	168
4.7. Схемні методи формування модульного значення комплексного кореляційного інтеграла	169
4.7.1. Метод комплексної кореляції.....	169
4.7.2. Метод оптимальної фільтрації сигналів з невідомою фазою..	171
4.8. Розрахунок показників якості оптимальної системи розрізнення двох сигналів із випадковою початковою фазою.....	174
4.8.1. Показники якості розрізнення нульового і ненульового сигналів	175
4.8.2. Розрізнення ортогональних сигналів з однаковими енергіями.....	179

4.8.3. Обговорення результатів розрахунку розрізнення двох сигналів з випадковою початковою фазою і висновки.....	183
4.9. Розрізнення двох сигналів із невідомими початковими фазами та інтенсивностями.....	185
4.10. Розрізнення M сигналів.....	188
4.10.1. Недолік сигналів КІМ.....	188
4.10.2. Фазоманіпульовані шумоподібні сигнали.....	190
4.10.3. Оптимальні алгоритми розрізнення M сигналів.....	196
4.10.4. Розрахунки якості оптимальної системи розрізнення M сигналів.....	202
4.10.5. Порівняння сигналів КІМ із ФМШС.....	205
Питання і завдання для самоконтролю.....	207
Розділ 5. ВИЯВЛЕННЯ І РОЗДІЛЕННЯ СИГНАЛІВ.....	210
5.1. Математичні моделі радіолокаційної задачі.....	210
5.2. Загальне розв'язання задачі виявлення.....	213
5.3. Виявлення цілком відомого сигналу.....	216
5.4. Виявлення сигналів із невідомими початковою фазою та інтенсивністю.....	221
5.5. Виявлення послідовності імпульсів.....	229
5.5.1. Виявлення когерентної “пачки” імпульсів.....	230
5.5.2. Виявлення некогерентної флукутуювальної “пачки” імпульсів.....	232
5.6. Виявлення на фоні загальної гауссівської завади.....	234
5.6.1. Виявлення цілком відомого сигналу.....	234
5.6.2. Виявлення сигналу з невідомою початковою фазою.....	237
5.7. Оптимальна обробка радіолокаційних сигналів.....	239
5.7.1. Вимірювання часу затримки τ	239
5.7.2. Спільне вимірювання часу затримки і доплерівського зсуву частоти.....	242
5.8. Роздільна здатність за дальністю. Вибір форми радіолокаційних сигналів.....	244
5.9. Складні радіолокаційні сигнали.....	248
5.9.1. Радіоімпульси з лінійною частотною модуляцією.....	248
5.9.2. Фазоманіпульовані радіоімпульси.....	250
5.9.3. Неперервні фазоманіпульовані шумоподібні сигнали.....	253
5.9.4. Механізм розділення складних сигналів.....	254
5.10. Спільна роздільна здатність за часом і частотою.....	256
5.10.1. Функція невизначеності за часом та частотою.....	256
5.10.2. Функція невизначеності простого радіоімпульсу.....	261

5.10.3. Функція невизначеності ЛЧМ радіоімпульсу	262
5.10.4. Функція невизначеності ФМ радіоімпульсу	263
Питання і завдання для самоконтролю	265
Розділ 6. ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ	267
6.1. Формулювання й обговорення задачі	267
6.2. Показники якості оцінок	268
6.3. Загальна статистична теорія рішень.....	271
6.4. Визначення оптимального алгоритму оцінювання.....	274
6.5. Теоретично гранична точність вимірювань	279
6.6. Умова надійних вимірювань.....	288
6.7. Схемна реалізація оптимальних вимірювачів.....	295
6.8. Практичні приклади визначення оптимальних вимірювачів і розрахунку їхніх показників якості.....	298
6.8.1. Вимірювання амплітуди сигналу	299
6.8.2. Вимірювання фази сигналу	300
6.8.3. Спільне оцінювання амплітуди і фази сигналу	301
6.8.4. Оцінювання частоти сигналу при невідомій фазі	303
6.8.5. Оцінювання часу затримки сигналу з невідомою початковою фазою	307
6.8.6. Спільне оцінювання часу затримки і доплерівської частоти сигналу з невідомою початковою фазою.....	310
Питання і завдання для самоконтролю	316
Розділ 7. ФІЛЬТРАЦІЯ ПРОЦЕСІВ	317
7.1. Загальні відомості	317
7.2. Моделі повідомлень на основі стохастичних диференціальних рівнянь першого порядку	320
7.3. Моделі повідомлень на основі стохастичних диференціальних рівнянь вищих порядків	325
7.4. Часова дискретизація рівнянь спостереження і повідомлення	330
7.5. Загальне розв'язання задачі фільтрації в дискретному часі	334
7.6. Лінійна фільтрація в дискретному часі. Дискретний фільтр Калмана.....	337
7.7. Лінійна фільтрація в неперервному часі. Аналоговий фільтр Калмана.....	346
7.8. Нелінійна фільтрація (лінійне наближення).....	358
7.8.1. Розширений фільтр Калмана	358
7.8.2. Векторно-матричне рівняння розширеного фільтра Калмана	361
7.9. Порівняння оптимальних і квазіоптимальних систем демодуляції аналогових сигналів.....	369

7.10. Фільтр Вінера	374
Питання і завдання для самоконтролю	381
Розділ 8. ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ	382
8.1. Обговорення задачі й вихідні співвідношення	382
8.2. Модель просторово-часового радіосигналу вимірювального типу	390
8.3. Теоретичні граничні показники якості вимірювальних РТС.....	396
8.4. Структура оптимальної оглядової системи целенування.....	401
8.5. Адаптивні антенні решітки	406
8.6. Радіотехнічні системи із синтезуванням апертури антени	414
Питання і завдання для самоконтролю	424
Розділ 9. МЕТОДИ ХАОТИЧНОЇ ДИНАМІКИ В ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ РТС	426
9.1. Динамічні системи	427
9.2. Характеристики хаотичного руху (коливання).....	434
9.3. Фрактальна розмірність дивних атракторів	438
9.4. Елементи теорії дискретних динамічних систем	442
9.5. Імовірнісний опис нелінійних динамічних систем	449
9.6. Самоподібні (фрактальні) детерміновані й випадкові процеси	457
9.7. Методи оптимального оцінювання хаотичних процесів та їх параметрів	478
9.8. Оцінювання структурної скритності хаотичних сигналів	489
9.9. Виявлення й класифікація хаотичних процесів зі структурованими атракторами	498
9.9.1. Аналіз процесів у псевдофазовому просторі	498
9.9.2. Виявлення процесів із використанням <i>BDS</i> -статистики.....	503
9.9.3. Сурогатні дані. <i>ATS</i> -алгоритм формування сурогатних сигналів для емпіричного оцінювання відношення правдоподібності.....	516
9.9.4. Непараметричний <i>BDS</i> -виявник сигналу зі структурованим атрактором і невідомою щільністю розподілу його значень за наявності білого шуму.....	523
9.9.5. Порівняльний аналіз ефективності енергетичного та <i>BDS</i> -виявника сигналів.....	526
9.9.6. Використання <i>BDS</i> -статистик для оцінювання параметрів хаотичних відображень і регулярних сигналів за наявності шуму	531
9.9.7. Розділення-виявлення хаотичних зондувальних сигналів	544
9.10. Методи формування сигналів з ускладненою структурою атракторів	557

9.10.1. Підвищення скритності сигналів на основі ускладнення атрактора хаотичного процесу з використанням лінійних перетворень	557
9.10.2. Метод формування сигналів хаотичним перемішуванням породжувального процесу. Передача бінарних повідомлень	567
9.10.3. Оцінювання скритності <i>CPSK</i> сигналу з використанням <i>BDS</i> -статистик	572
9.11. Конструювання хаотичних послідовностей з характеристиками, близькими до білого шуму	575
9.11.1. Скритність аналітичних хаотичних сигналів	575
9.11.2. Метод підвищення скритності хаотичних сигналів і передача їх по радіоканалу	583
ПІСЛЯМОВА	597
ДОДАТОК	599
ЛІТЕРАТУРА	603
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	608

ПЕРЕДМОВА

Стрімке впровадження статистичних методів в усі галузі радіотехніки й електроніки привело до введення в підручники і навчальні посібники з радіонавігації, радіолокації та систем радіозв'язку відомостей зі статистичної теорії й відповідних методів в обсязі, необхідному для сучасного викладу предмета. Водночас виникла доцільність у викладанні самотійних курсів з основ статистичної теорії радіоелектронних систем, на якій базуються сучасні радіотехнічні системи. Такі курси з різними назвами були поставлені в ряді вищих навчальних закладів. Так, 2005 року у Харківському аерокосмічному університеті "ХАІ" був виданий навчальний посібник "Основы статистической теории радиотехнических систем". Пропонований підручник написаний на основі цього посібника з урахуванням сучасних вимог до радіотехнічних систем та досягнень у хаотичній динаміці.

Призначенням підручника є формування сдиної теоретичної бази для спеціальних курсів радіотехнічних факультетів вищих навчальних закладів: радіотехнічні системи (РТС) передачі інформації (ПІ), радіолокація і радіонавігація, радіотелеуправління, переддипломні спецкурси та ін. З єдиних позицій статистичної теорії рішень, яку широко використовують у різних галузях науки і техніки, розглянуті аналіз та синтез РТС різного призначення, установлені характерні для них загальні закономірності й виведені основні співвідношення.

Привабливість статистичної теорії рішень полягає в тому, що вона дозволяє без усяких упереджених ідей визначати оптимальні за вибраним критерієм якості алгоритми (відповідно до структури) радіосистем. Статистична теорія дозволяє також визначати теоретично граничні показники якості систем. Це, зокрема, дає можливість судити про ступінь досконалості конкретних практичних систем за допомогою аналізу показників якості й порівняння їх із теоретично граничними. Автори підручника прагнули до того, щоб при вивченні матеріалу видання читач не тільки усвідомив основні закономірності, але й опанував сучасні ймовірнісно-інформаційні методи аналізу і синтезу радіосистем настільки, щоб ці методи стали робочим інструментом при вивченні наступних курсів та при подальшій практичній діяльності.

Підручник складається з дев'яти розділів. Перший розділ містить у собі класифікацію РТС, їх структурні схеми, постановку задач статистичної теорії РТС. Також у цьому розділі наведені основні відомості про радіолокаційні й радіонавігаційні РТС.

Другий і третій розділи присвячені математичним моделям сигналів та завад. У них наведено основні характеристики і співвідношення, використовувані при подальшому викладі матеріалу; введено визначення функціонала щільності ймовірності завади, спостереження (коливання, що надходить на вхід радіоприймального пристрою) і функції правдоподібності.

У четвертому розділі “Розрізнення сигналів” розглянуто теорію прийому цифрових сигналів РТС ПІ, зокрема сигналів із кодово-імпульсною модуляцією та сигналів із псевдовипадковою фазовою маніпуляцією.

Виявленню і розділенню радіолокаційних сигналів присвячений п'ятий розділ. У цьому розділі викладено традиційну небасівську оптимізацію виявлення; визначено характеристики виявлення та порогів сигналів; введено і детально розглянуто функції невизначеності за часом та частотою різних сигналів, що дають якісну (за критерієм Релея) оцінку роздільній здатності.

Шостий розділ присвячений вимірюванню незмінюваних у часі параметрів сигналу. Він охоплює вимірювання параметрів розташування і руху об'єктів на порівняно коротких інтервалах спостереження в радіолокації та радіонавігації, а також прийом дискретизованих за часом повідомлень у РТС ПІ, зокрема, імпульсних сигналів з амплітудною, широтною і часовою модуляціями.

У сьомому розділі розглянуто фільтрацію повідомлень (змінюваних у часі параметрів сигналу). Теорія, що викладена в пропонованому розділі, стосується аналогових сигналів РТС ПІ, а також дискретних сигналів РТС ПІ та РТС витягання інформації на порівняно великих інтервалах спостереження. Основну увагу приділено дискретному і аналоговому фільтрам Калмана. Результати, отримані для лінійної фільтрації, поширені на нелінійну фільтрацію сильних сигналів. Оптимальні системи фільтрації АМ та ЧМ сигналів порівнюються з традиційними системами прийому, які використовують детектори АМ і ЧМ сигналів.

У восьмому розділі “Просторово-часова обробка сигналів” автори звертають увагу на те, що первинним джерелом інформації є не коливання (напруга) на вході радіоприймального пристрою, а електромагнітне поле на розкритті приймальної антени. Також у розділі розглянуто можливості, пов'язані з використанням поряд із часовою просторовою обробкою сигналів (спостережень), вимірюваних кутових координат та розділення за ними сигналів і завад; викладено теорію РТС дистанційного зондування Землі із синтезуванням апертури антени та основні співвідношення в цих системах.

Дев'ятий розділ присвячений застосуванню методів і алгоритмів хаотичної динаміки в інформаційно-вимірювальних РТС. Мета розділу – повернути увагу читачів до нового та перспективного напрямку в обробці й

передачі сигналів, який отримав інтенсивний розвиток в останні роки. У розділі викладені основні питання хаотичної динаміки загального характеру, а також моделі хаотичних і самоподібних процесів, якими можуть описуватися реальні сигнали та завади: розглянуті деякі питання оптимальної обробки таких процесів й можливості побудови радіотехнічних систем, в основі функціонування яких суттєво використовуються досягнення хаотичної динаміки; проведено аналіз скритності хаотичного процесу як часу, потрібного для оцінювання його параметра з відповідною точністю, що дозволить відновити процес на заданому часовому інтервалі. Крім того, розглянуто скритність хаотичного процесу з точки зору його схожості з білим шумом у відповідному фазовому просторі сигналу, досліджено задачі виявлення та оцінки параметрів сигналів за допомогою непараметричної статистики, яка спирається на поняття фазового простору відповідного сигналу, а також розділення хаотичних сигналів із невідомим часом їх взаємної затримки.

