

621.396

П 88

В. О. Пуляев, Є. В. Рогожкін, О. В. Богомаз

**ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ  
ПРОЦЕДУРИ  
ПРИ АНАЛІЗІ  
НЕКОГЕРЕНТНОГО  
РОЗСІЯННЯ  
В ІОНОСФЕРНІЙ  
ПЛАЗМІ**

**Монографія**

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ІОНОСФЕРИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«Харківський політехнічний інститут»

**В. О. Пуляєв, Є. В. Рогожкін, О. В. Богомаз**

**ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ПРОЦЕДУРИ  
ПРИ АНАЛІЗІ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ  
В ІОНОСФЕРНІЙ ПЛАЗМІ**

Монографія

Харків  
Підручник НТУ «ХПІ»  
2014

УДК 621.396:654.147

ББК 32.811.3:26.233

П88

**Р е ц е н з е н т и :**

*Т. О. Скворцов*, д-р. техн. наук, ст. наук. співр., НТУ “ХПІ”,

*Ю. О. Коваль*, д-р. техн. наук, проф., ХНУРЕ,

*О. Г. Андерс*, д-р. фіз.-мат. наук, проф., ХНУ ім. В. Н. Каразіна

Публікується за рішенням ученої ради НТУ “ХПІ”  
(протокол № 6 від 07.05.2013 р.)

**Пуляєв В. О.**

П88 Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі : монографія / В. О. Пуляєв, Є. В. Рогожкін, О. В. Богомаз. – Х : Вид-во «Підручник НТУ “ХПІ”», 2014. – 264 с.

ISBN 978-617-687-011-1

Розглянуто процедури розрахунку висотно-часових залежностей параметрів іоносфери за даними методу некогерентного розсіяння радіохвиль. Подано методики та алгоритми обчислювальних перетворень, які пов’язані з одержанням та аналізом статистичних характеристик сигналу розсіяння - його автокореляційних функцій та спектрів.

Для науково-технічних працівників і інженерів у галузі радіофізичних методів дослідження середовищ, фахівців з радіотехніки і радіолокації, а також для викладачів, аспірантів і студентів старших курсів.

Сл. 121. Табл. 7. Бібліогр.: 180 назв.

**УДК 621.396:654.147**

**ББК 32.811.3:26.233**

ISBN 978-617-687-011-1

© В. О. Пуляєв, Є. В. Рогожкін, О. В. Богомаз, 2014

© Вид-во «Підручник НТУ “ХПІ”», 2014

## ЗМІСТ

Передмова .....	3
Вступ .....	7
<b>Глава 1. ОСОБЛИВОСТІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕДУР РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРИ.....</b>	<b>17</b>
1.1. Короткі відомості про метод некогерентного розсіяння (НР).....	17
1.2. Особливості використання сигналів зондування у методі некогерентного розсіяння .....	22
1.2.1. Радіоімпульси прямокутної форми.....	24
1.2.2. Послідовності здвоєних радіоімпульсів прямокутної форми .....	25
1.2.3. Складені радіоімпульси зондування.....	27
1.2.4. Сигнали зондування з кодуванням їх параметрів.....	28
1.3. Особливості процесу оброблення сигналу некогерентного розсіяння.....	31
1.4. Пряма задача теорії некогерентного розсіяння.....	33
1.4.1. Однокомпонентна іоносферна плазма.....	36
1.4.2. Двокомпонентна іоносферна плазма.....	38
1.4.3. Багатокомпонентна іоносферна плазма .....	40
1.4.4. Врахування дебаївського радіуса екранування .....	44
1.5. Зворотна задача теорії некогерентного розсіяння .....	47
1.6. Аналіз шляхів підвищення точності оцінки іоносферних параметрів .....	51
<b>Глава 2. ПРОЦЕДУРИ РОЗРАХУНКУ СТАТИСТИЧНИХ (КОРЕЛЯЦІЙНИХ) ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ РОЗСІЯННЯ.....</b>	<b>61</b>
2.1. Особливості розрахунку автокореляційних функцій сигналу НР .....	61
2.2. Режим оброблення сигналу НР при випромінюванні радіоімпульсу зондування великої тривалості.....	64
2.3. Перша модифікація режиму оброблення при випромінюванні довгого радіоімпульсу.....	68
2.4. Друга модифікація режиму оброблення при випромінюванні довгого радіоімпульсу.....	71

2.5. Третя модифікація режиму оброблення при випромінюванні довгого радіоімпульсу .....	74
2.6. Режим оброблення при випромінюванні пар радіоімпульсів зі зміною відстані між ними .....	75
2.7. Моделювання процедур кореляційного оброблення сигналу НР .....	78
2.8. Розрахунок форми спектра за АКФ сигналу НР .....	82

**Глава 3. ПЕРЕТВОРЕННЯ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ СИГНАЛУ РОЗСІЯННЯ З УРАХУВАННЯМ АПАРАТУРНИХ І МЕТОДИЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ІМПУЛЬСНОГО ЗОНДУВАННЯ .....**

3.1. Особливості перетворень, пов'язаних зі стробуванням числових послідовностей .....	86
3.2. Особливості перетворень, пов'язаних з ефектом імпульсного зондування.....	87
3.2.1. Урахування спотворень, пов'язаних із тривалістю імпульсу зондування .....	87
3.2.2. Урахування спотворень, пов'язаних із ефектом імпульсного згладжування результатів .....	89
3.3. Урахування перехідної характеристики антенного комутатора радару НР .....	92
3.4. Урахування функціональних особливостей корелятора .....	93
3.5. Особливості перетворень, пов'язаних з урахуванням характеру висотного розподілу електронної концентрації.....	98
3.6. Урахування функціональних особливостей аналого-цифрового перетворення сигналу розсіяння.....	100
3.7. Урахування характеристики смугового фільтра приймальної системи радару.....	105
3.8. Залежність спектра флуктуацій електронної концентрації від характеристик імпульсу зондування .....	112

**Глава 4. МЕТОДИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ РОЗСІЯННЯ .....**

4.1. Особливості прийому сигналу НР в умовах завад.....	117
4.2. Процедури попереднього статистичного аналізу радіофізичних даних.....	121
4.3. Практична реалізація процедур статистичного оброблення даних .....	125

<b>Глава 5. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ ЗА ДОПОМОГОЮ КОЕФІЦІЄНТІВ КОРЕЛЯЦІЇ ФЛУКТУАЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ .....</b>	<b>135</b>
5.1. Розрахунок параметрів іоносферної плазми при однокомпонентному іонному складі (діапазон висот 250-500 км).....	136
5.1.1. Розрахунок параметрів при випромінюванні довгого радіоімпульсу .....	136
5.1.2. Розрахунок параметрів при випромінюванні пар коротких радіоімпульсів.....	141
5.2. Розрахунок параметрів іоносферної плазми при двокомпонентному іонному складі (діапазон висот 100-250 км).....	143
5.3. Розрахунок параметрів іоносферної плазми при трикомпонентному іонному складі (діапазон висот вище 500 км) .....	147
5.4. Визначення радіальної складової швидкості руху іоносферної плазми .....	150
<b>Глава 6. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОННОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ .....</b>	<b>158</b>
6.1. Розрахунок $N_e(h)$ з використанням профіля потужності сигналу НР .....	158
6.2. Використання інформації про $N_e(h)$ , отриманої з іонограм .....	161
6.3. Визначення $N_e(h)$ за кутом повороту площини поляризації зондувальної радіохвилі.....	166
6.4. Розрахунок повного вмісту електронної концентрації з використанням сигналів супутникових систем ГЛОНАСС і GPS.....	172
6.5. Особливості визначення $N_e(h)$ при використанні константи радару НР.....	174
6.5.1. Розрахунок значення константи радару НР .....	174
6.5.2. Аналіз характерних особливостей константи.....	176
6.5.3. Аналіз і використання складових рівня шуму на вході приймача радару НР .....	179
6.5.4. Уточнення розрахованих значень $N_e(h, t)$ при зміні стану приймальної системи радару НР .....	182
6.5.5. Уточнення значення $N_e(h, t)$ при зміні стану передавальної системи радару НР .....	187

<b>Глава 7. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗВОРотної ЗАДАЧІ ТЕОРІЇ РОЗСІЯННЯ.....</b>	<b>194</b>
7.1. Використання регуляризації при розв'язанні зворотної задачі розсіяння.....	194
7.1.1. Передумови неоднозначності розв'язків зворотної задачі .....	195
7.1.2. Врахування статистичної невизначеності оцінення ординат автокореляційних функцій.....	198
7.1.3. Врахування апіорної інформації про розподіл іоносферних параметрів.....	199
7.2. Використання статистичного аналізу розв'язків зворотної задачі розсіяння.....	202
7.3. Особливості використання процедур згладжування графічних ліній у вигляді висотно-часових залежностей іоносферних параметрів .....	207

**Глава 8. ОЦІНЕННЯ ПОХИБОК РОЗРАХУНКУ  
ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРИ У МЕТОДІ НР.....** 213

8.1. Модель статистичних випробувань процедур розв'язання зворотної задачі розсіянні .....	214
8.2. Довірчі інтервали обчислень температур заряджених часток іоносферної плазми з урахуванням розривлення за кореляційною затримкою .....	217
8.3. Ефективність процедур ідентифікації кореляційних функцій сигналу НР з урахуванням порядку розташування ординат уздовж осі затримок.....	219
8.4. Аналіз методів пошуку середньоквадратичного відхилення кореляційних функцій .....	221
8.4.1. Оцінення похибок розв'язків зворотної задачі розсіяння при реалізації покоординатного перебирання значень параметрів .....	221
8.4.2. Оцінення похибок розв'язків зворотної задачі розсіяння при використанні градієнтного спуску за параметрами .....	224
8.4.3. Оцінення похибок розв'язків зворотної задачі при використанні спуску по параметрах методом Монте-Карло .....	226
8.5. Ефективність розрахунку параметрів іоносфери залежно від ступеня спотворення АКФ сигналу НР .....	232

<b>Глава 9. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕДУР СИНТЕЗУ СИГНАЛУ НР З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ АДИТИВНОГО ШУМУ НА ВХОДІ ПРИЙМАЧА РАДАРА НР</b> .....	238
9.1. Синтез сигналу розсіяння за формою спектра флуктуацій електронної концентрації.....	238
9.2. Синтез сигналу НР з урахуванням відношення сигнал/шум.....	241
9.3. Синтез сигналу НР з урахуванням переміщень іонів і електронів у плазмі.....	246
9.4. Результати розрахунків параметрів іоносфери при використанні імітатора сигналу НР.....	249
Висновки .....	255



Наукове видання

ПУЛЯЄВ Валерій Олександрович  
РОГОЖКІН Євген Васильович  
БОГОМАЗ Олександр Вікторович

**ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ПРОЦЕДУРИ  
ПРИ АНАЛІЗІ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ  
В ІОНОСФЕРНІЙ ПЛАЗМІ**

Монографія

Роботу до видання рекомендував проф. *О. І. Рогачов*  
Редактор *О. І. Шпільова*  
Комп'ютерна верстка *С. В. Ткаченко*