

Б.М. БЕЛІМЕНКО • Ю.Н. БУЯНОВ • В.И. КОШЕЛЕВ

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ
ИМПУЛЬСНЫЕ
РАДИОСИСТЕМЫ



МОСКОВСКИЙ
«НАУКА»

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В.П. БЕЛИЧЕНКО • Ю.И. БУЯНОВ • В.И. КОШЕЛЕВ

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ

Под общей редакцией
доктора физико-математических наук *В.И. Кошелева*



НОВОСИБИРСК
“НАУКА”
2015

УДК 621.396
ББК 32.845
Б43

Беличенко В.П. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы / В.П. Беличенко, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев; под общ. ред. В.И. Кошелева. — Новосибирск: Наука, 2015. — 483 с.

ISBN 978-5-02-019197-6.

В монографии кратко рассмотрены история развития сверхширокополосных (СШП) радиосистем и области применения коротких импульсов СШП излучения. Даны определения и характеристики СШП импульсов. Изложены основные положения и методы решения задач электродинамики нестационарных процессов применительно к излучению, распространению и рассеянию СШП импульсов на проводящих и диэлектрических объектах. Рассмотрены импульсные характеристики объектов рассеяния и каналов распространения сигналов, а также методы их восстановления. На основе метода наложения бегущих волн исследованы характеристики приемных и передающих антенн. Обобщены результаты исследований активных приемных антенн и двухполяризационных антенных решеток, векторных приемных антенн для измерения поляризационной структуры излученных и рассеянных объектами СШП импульсов и определения направления их прихода. Особое внимание уделено передающим комбинированным антеннам, решеткам и мощным источникам СШП излучения с мегавольтным эффективным потенциалом.

Книга предназначена для специалистов в области генерации, излучения, распространения и приема СШП электромагнитных импульсов, а также может быть полезна аспирантам и студентам вузов, изучающим электродинамику нестационарных процессов.

Табл. 6. Ил. 346. Библиогр. 574.

Рецензенты

доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН

В.А. Черепенин

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН

М.И. Яландин

Утверждено к печати Ученым советом Института сильноточной электроники СО РАН



*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 15-08-07003*

Издание РФФИ не подлежит продаже

ISBN 978-5-02-019197-6

© В.П. Беличенко, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев,
2015
© Институт сильноточной электроники СО РАН,
2015
© Редакционно-издательское оформление. "Наука".
Сибирская издательская фирма, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	9
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	10
СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	14
ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ	15
1.1. История развития сверхширокополосных радиосистем	16
1.2. Сверхширокополосная радиолокация	23
1.2.1. Обнаружение радиолокационных объектов	26
1.2.2. Распознавание радиолокационных объектов	32
1.3. Сверхширокополосные системы связи	40
1.3.1. Однополосная сверхширокополосная связь	40
1.3.2. Многополосная сверхширокополосная связь	42
1.3.3. Сверхширокополосная прямохаотическая связь	42
1.4. Восприимчивость электронных систем к воздействию сверхширокополосных электромагнитных импульсов	43
Заключение	46
Задачи и контрольные вопросы	47
Библиографический список	47
ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ	54
Введение	54
2.1. Основные определения	54
2.2. Параметры электрических импульсов	55
2.3. Характеристики импульсов сверхширокополосного излучения	56
2.4. Формы представления импульсного электромагнитного излучения	59
2.4.1. Временное представление	59
2.4.2. Спектральное представление	62
2.4.3. Представление с помощью показательных функций	66
2.4.4. Вейвлеты	67
Заключение	71
Задачи и контрольные вопросы	71
Библиографический список	73
ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ	74
Введение	74
3.1. Уравнения Максвелла и волновые уравнения	74

3.2. Уравнения баланса энергии и однозначность решений уравнений Максвелла	77
3.3. Электродинамические потенциалы	79
3.4. Обобщенные леммы типа леммы Лоренца	82
3.5. Теоремы взаимности	83
3.6. Краевые задачи электродинамики нестационарных процессов	88
Заключение	90
Задачи и контрольные вопросы	91
Библиографический список	91
ГЛАВА 4. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ	93
Введение	93
4.1. Строгие аналитические и аналитико-численные методы	94
4.1.1. Метод Римана	94
4.1.2. Эволюционный подход во внутренних и внешних задачах электродинамики	97
4.1.3. Метод нестационарных волноводных уравнений	99
4.2. Метод пространственно-временного интегрального уравнения	100
4.2.1. Основные уравнения	100
4.2.2. Расчет поля в дальней зоне	104
4.3. Метод конечных разностей	105
Заключение	111
Задачи и контрольные вопросы	112
Библиографический список	112
ГЛАВА 5. ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ	118
Введение	118
5.1. Излучение сверхширокополосных импульсов элементарными источниками	119
5.1.1. Электрический диполь Герца	119
5.1.2. Щелевой излучатель	123
5.1.3. Магнитный диполь Герца	123
5.2. Поля излучателей сверхширокополосных импульсов конечных размеров	124
5.2.1. Излучение кольцевых источников	124
5.2.2. Излучение дисковых и круговых апертурных источников	129
5.3. Структура поля сверхширокополосных излучателей	132
5.3.1. Границы зон поля коротких излучателей	132
5.3.2. Границы зон поля апертурных излучателей	138
5.4. Эффективность излучения электромагнитных импульсов	140
5.4.1. Диаграммы направленности	140
5.4.2. Эффективность излучателя по энергии, пиковой мощности и пиковой напряженности поля	141
Заключение	143
Задачи и контрольные вопросы	143
Библиографический список	144
ГЛАВА 6. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ	147
Введение	147
6.1. Проводящие среды	148
6.1.1. Неограниченные среды	148

6.1.2. Атмосфера Земли	157
6.1.3. Искажения мощных импульсов в нижней атмосфере Земли	162
6.2. Плоскостойкие среды	167
6.2.1. Прохождение сверхширокополосных импульсов через границу раздела двух сред	167
6.2.2. Прохождение импульсного излучения через однородный плоскопараллельный слой	174
6.2.3. Прохождение сверхширокополосного импульса через неоднородный плоскопараллельный слой	179
6.2.4. Распространение импульсов, возбуждаемых точечным источником, в плоскостойкой среде	187
Заключение	196
Задачи и контрольные вопросы	197
Библиографический список	198
ГЛАВА 7. РАССЕЯНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРОВОДЯЩИМИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ	201
Введение	201
7.1. Рассеяние импульсной электромагнитной волны проводящими объектами	202
7.1.1. Постановка задачи. Вывод расчетных соотношений	202
7.1.2. Рассеяние прямоугольной идеально проводящей пластиной	205
7.1.3. Рассеяние идеально проводящими эллипсоидом и сферой	206
7.1.4. Рассеяние идеально проводящим конечным круговым конусом	207
7.1.5. Ползущие волны	208
7.2. Рассеяние плоской импульсной электромагнитной волны диэлектрическими объектами	210
7.2.1. Вейвлет-анализ рассеяния диэлектрической сферой	210
7.2.2. Численные результаты и их обсуждение	212
Заключение	214
Задачи и контрольные вопросы	215
Библиографический список	217
ГЛАВА 8. ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТОВ И КАНАЛОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ	219
Введение	219
8.1. Импульсная характеристика. Модели сигналов и их спектральных характеристик	219
8.1.1. Понятие импульсной характеристики: их виды и свойства	219
8.1.2. Огибающая, мгновенная фаза и мгновенная частота сигнала. Аналитический сигнал	220
8.1.3. Соотношения типа Крамерса — Кронига	221
8.1.4. Полюсная модель экспоненциально затухающего сигнала	223
8.1.5. Метод сингулярного разложения в задачах оценки и восстановления импульсной характеристики	224
8.2. Использование регуляризации и соотношения типа Крамерса — Кронига для оценки передаточных функций и импульсных характеристик	226
8.2.1. Общие соотношения	226

8.2.2. Восстановление передаточных функций и импульсных характеристик с использованием регуляризации и соотношений типа Крамерса — Кронига	228
8.2.3. Сравнение оценок импульсной характеристики для двух моделей фазовых спектров	232
8.3. Полосная модель сигнала в задаче оценки импульсной характеристики канала распространения	233
8.3.1. Представление сигналов и оценка импульсных характеристик с помощью полюсных функций	233
8.3.2. Оценка импульсной характеристики линии передачи в виде коаксиального кабеля	236
8.3.3. Устойчивость восстановления импульсных характеристик к форме зондирующих импульсов и шумам измерений	238
8.4. Полосная модель сигнала в задаче оценки импульсных характеристик проводящих сферы и цилиндра	239
8.5. Восстановление сверхширокополосных импульсов после прохождения в каналах с линейными искажениями	241
8.5.1. Решение задачи восстановления импульсов	242
8.5.2. Численное моделирование	244
8.5.3. Экспериментальное исследование метода восстановления сверхширокополосных импульсов	245
Заключение	247
Задачи и контрольные вопросы	247
Библиографический список	248
ГЛАВА 9. ПРИЕМНЫЕ АНТЕННЫ	250
Введение	250
9.1. Передаточная функция приемной антенны	251
9.1.1. Определение передаточной функции антенны в режиме приема	252
9.1.2. Распределение тока в приемном проводе	254
9.1.3. Электродинамические параметры приемной линейной антенны	260
9.1.4. Передаточная функция прямолинейного приемного провода	264
9.1.5. Передаточная функция криволинейного приемного провода	267
9.2. Искажение сверхширокополосных электромагнитных импульсов приемной антенной	271
9.2.1. Прием сверхширокополосных электромагнитных импульсов диполем	272
9.2.2. Прием сверхширокополосных электромагнитных импульсов рамочной антенной	275
9.2.3. Соотношение между принимаемой и рассеянной мощностью	276
9.3. Способы уменьшения искажений принимаемого сигнала	278
9.3.1. Длинные диполи с несоосными плечами	278
9.3.2. Короткие диполи в рассогласованном режиме	284
9.3.3. Активные антенны	287
9.4. Векторные антенны для регистрации пространственно-временной структуры сверхширокополосных электромагнитных импульсов	295
9.4.1. Принципы построения приемных векторных антенн	295
9.4.2. Исследование поляризационной структуры импульсного электромагнитного поля	306
9.4.3. Определение направления прихода сверхширокополосных электромагнитных импульсов	309

Заключение	311
Задачи и контрольные вопросы	311
Библиографический список	312
ГЛАВА 10. ПЕРЕДАЮЩИЕ АНТЕННЫ	315
Введение	315
10.1. Передаточная функция передающей антенны	316
10.1.1. Передаточная функция источника излучения	317
10.1.2. Распределение тока в линейном излучателе	319
10.1.3. Передаточная функция линейного излучателя	322
10.2. Искажение сверхширокополосных электромагнитных импульсов при излучении	327
10.2.1. Форма импульса, излученного монополюсом и соосным диполем	327
10.2.2. Форма импульса, излученного V-образным излучателем	330
10.2.3. Форма импульса, излученного кольцевым излучателем	335
10.3. Способы расширения полосы пропускания передающей антенны	337
10.3.1. Энергетические соотношения, определяющие полосу согласования излучателя	338
10.3.2. Добротность линейных излучателей	341
10.3.3. Полоса пропускания комбинированных излучателей	347
10.4. Плоские комбинированные антенны	351
10.4.1. Несимметричные комбинированные антенны	351
10.4.2. Симметричные комбинированные антенны	360
10.5. Объемные комбинированные антенны	363
10.5.1. Излучение импульсов малой мощности	363
10.5.2. Антенны для излучения мощных импульсов	370
Заключение	373
Задачи и контрольные вопросы	374
Библиографический список	374
ГЛАВА 11. АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ	377
Введение	377
11.1. Направленные свойства антенных решеток	378
11.1.1. Численные расчеты	378
11.1.2. Экспериментальные исследования	381
11.2. Энергетические характеристики решеток	386
11.2.1. Распределительные системы	386
11.2.2. Структура излучающей системы	392
11.3. Антенные решетки для излучения импульсов с ортогональными поляризациями	397
11.4. Характеристики линейных решеток в режиме сканирования волновым пучком	401
11.4.1. Возбуждение решеток наносекундными импульсами	401
11.4.2. Возбуждение решеток пикосекундными импульсами	405
11.5. Активные приемные антенные решетки	413
11.5.1. Плоская двухполяризационная решетка	413
11.5.2. Линейная двухполяризационная решетка с дискретным сканированием	420
Заключение	424
Задачи и контрольные вопросы	424

Библиографический список	425
ГЛАВА 12. МОЩНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	428
Введение	428
12.1. Предельный эффективный потенциал излучения источников	429
12.2. Генераторы высоковольтных биполярных импульсов	435
12.2.1. Генератор монополярных импульсов напряжения	435
12.2.2. Формирователи биполярных импульсов с разомкнутой линией	438
12.3. Источники излучения с одиночной антенной	446
12.4. Источники излучения с синхронным возбуждением многоэлементных решеток	450
12.4.1. Источник излучения с четырехэлементной решеткой	450
12.4.2. Источники излучения с 16-элементными решетками	454
12.4.3. Источник излучения с 64-элементной решеткой	460
12.5. Излучение импульсов с ортогональными поляризациями	464
12.6. Четырехканальный источник с управлением направления излучения	466
12.7. Источник с управляемым спектром излучения	473
Заключение	478
Задачи и контрольные вопросы	479
Библиографический список	479