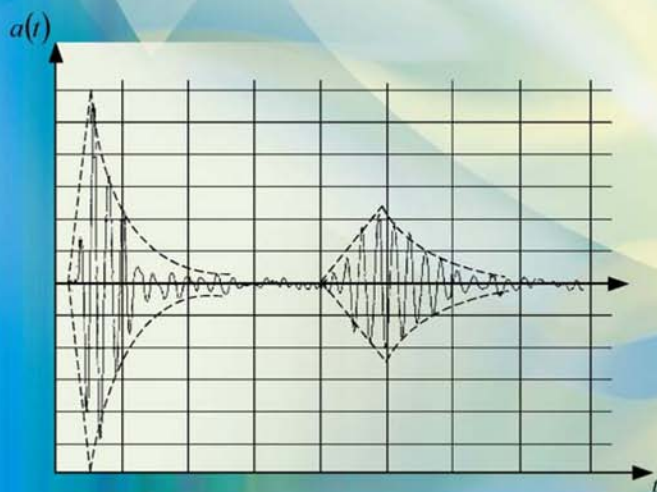


А. И. Астайкин

# ИЗЛУЧЕНИЕ И ПРИЕМ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ



**ФГУП**

**«Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ»**

***А. И. Астайкин***

**ИЗЛУЧЕНИЕ И ПРИЕМ  
СВЕРХКОРОТКИХ  
ИМПУЛЬСОВ**

Монография

Саров  
2008

ББК 32.841

А 91

УДК 621.396.1

**Астайкин А. И.** Излучение и прием сверхкоротких импульсов: Монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008, 475 с.

ISBN 978-5-9515-0098-4

Рассмотрены физические процессы и модели для описания законов излучения и приема сверхкоротких импульсов без несущей частоты. Такие сигналы широко применяются в радиолокации, радиотомографии, геолокации, акустике и связи. Рассмотрены законы электромагнетизма, формы представления квазигармонических и импульсных сигналов на временной и частотной шкалах представления сигналов. Выбраны и обоснованы физические и математические модели систем связи с импульсными сигналами, схемы замещения и ее составляющие. Рассмотрены переходные процессы в частотно-избирательных цепях и микроволновых структурах, приведены экспериментальные данные по скин-эффекту и экранированию импульсных сигналов. Особое внимание уделено импульсным характеристикам линейных и апертурных антенн в режиме передачи и приема, законам межсимвольной и деструктивной интерференции.

Книга предназначена для инженеров, научных сотрудников, аспирантов и студентов радиотехнических специальностей.

#### **Рецензенты:**

доктор физико-математических наук В. А. Терехин, РФЯЦ-ВНИИЭФ;  
доктор физико-математических наук, профессор, декан радиофизического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского А. В. Якимов

ISBN 978-5-9515-0098-4

© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008

Моей верной помощнице  
дочери Юлии

# СОДЕРЖАНИЕ

Список условных обозначений . . . . .	10
<b>1. Законы электромагнетизма . . . . .</b>	<b>13</b>
1.1. Заряды, токи и поля . . . . .	13
1.2. Силовые линии и эквипотенциальные поверхности . . . . .	19
1.3. Электрический ток и магнитное поле. . . . .	22
1.4. Закон электромагнитной индукции . . . . .	25
1.5. Токи проводимости и токи смещения. Система уравнений Максвелла . . . . .	29
1.6. Энергия и мощность электромагнитного поля . . . . .	32
1.7. Емкость, индуктивность и сопротивление . . . . .	38
1.8. Некоторые задачи электро- и магнитостатики . . . . .	48
1.8.1. Теорема взаимности (принцип обратимости) в электростатике . . . . .	48
1.8.2. Электрический диполь . . . . .	50
1.8.3. Проводящий шар в электрическом поле . . . . .	55
1.8.4. Принцип взаимозаменяемости электрических и магнитных диполей . . . . .	57
<b>2. Импульсные и гармонические сигналы . . . . .</b>	<b>59</b>
2.1. Силовые, энергетические и информационные ресурсы электромагнитных полей и волн . . . . .	59
2.2. Сигналы и сообщения . . . . .	64
2.3. Представление сигналов во временной области. Временная селекция. . . . .	66
2.4. Спектральное представление сигналов . . . . .	72
2.5. Гармонические колебания . . . . .	76
2.6. Использование функций комплексного переменного . . . . .	80
2.7. Элементы спектрального анализа . . . . .	83
2.7.1. Преобразования Фурье . . . . .	83
2.7.2. Основные теоремы спектрального анализа . . . . .	85
2.8. Спектры импульсных сигналов . . . . .	90

2.8.1. Прямоугольные импульсы . . . . .	90
2.8.2. Импульсные сигналы фиксированной длительности . . . . .	96
2.8.3. Импульсы «бесконечной» длительности . . . . .	100
2.8.4. Интерференция когерентных и импульсных сигналов . . . . .	103
2.9. Амплитудная модуляция и биения гармонических сигналов . . . . .	108
2.10. Временная и частотная селекция. Теоремы Котельникова . . . . .	113

### **3. Моделирование импульсной системы связи**

<b>и ее компонентов . . . . .</b>	<b>116</b>
3.1. Постановка задачи . . . . .	116
3.2. Физическая модель системы связи . . . . .	119
3.3. Каскадная схема замещения системы связи . . . . .	123
3.4. Пассивные линейные четырехполюсники . . . . .	132
3.5. Селективные фильтры . . . . .	143
3.6. Колебательные контуры . . . . .	162

### **4. Переходные процессы в частотно-избирательных цепях . . 182**

4.1. Законы коммутации цепей. Вынужденные и свободные колебания . . . . .	182
4.2. Методы решения задач о переходных процессах . . . . .	186
4.2.1. Классический метод . . . . .	187
4.2.2. Операторный метод . . . . .	189
4.2.3. Спектральный метод анализа переходных процессов . . . . .	194
4.3. Особые точки в характеристиках многорезонансных цепей . . . . .	195
4.4. Переходные процессы в цепях с одним энергоемким элементом . . . . .	201
4.4.1. Свободный разряд конденсатора и катушки индуктивности через резистор . . . . .	202
4.4.2. Переходные (вынужденные и свободные) процессы в $RC$ - и $RL$ - цепях . . . . .	206
4.4.3. Включение в $RC$ -цепь прямоугольного импульса . . . . .	208

4.4.4. Включение в $RC$ -цепь экспоненциального импульса	216
4.4.5. Включение гармонического сигнала в $RC$ -цепь	219
4.5. Переходные процессы в цепях с двумя энергоемкими элементами	220
4.6. Свободные процессы в колебательных контурах	223
4.6.1. Идеальный контур	223
4.6.2. Реальный контур	228
4.6.3. Влияние избирательности и добротности контура на характеристики свободного процесса	234
4.6.4. Разряд конденсатора на $RLC$ -контур	240
4.7. Резонанс в колебательном контуре	242
4.8. Общие свойства узкополосных сигналов	244

<b>5. Связанные волны в закрытых микроволновых структурах</b>	257
5.1. Цепи с распределенными параметрами	257
5.2. Телеграфные и волновые уравнения длинной линии. Их решения	258
5.3. Уравнения Гельмгольца для волноводов. Быстрые волны и критические частоты	274
5.4. Микроволновые структуры из отрезков линий передачи	281
5.5. Частотная селекция импульсных сигналов	294
5.5.1. Биения равноамплитудных колебаний	296
5.5.2. Амплитудная и частотная модуляция	297
5.5.3. Линейная частотная модуляция	300
5.5.4. Частотная селекция широкополосных сигналов	303
5.6. Прохождение шумовых сигналов через линейные частотно-избирательные цепи	312
5.6.1. Задачи расчета случайных выходных сигналов	312
5.6.2. Спектральный метод анализа прохождения случайных сигналов	315

5.6.3. Метод импульсной характеристики . . . . .	320
5.6.4. Прохождение широкополосных случайных сигналов через узкополосные линейные цепи . . . . .	322
5.6.5. Воздействие белого шума на дифференцирующие и интегрирующие цепи . . . . .	326
5.6.6. Воздействие белого шума на последовательный колебательный контур . . . . .	328
5.6.7. Источники шумов в радиотехнических устройствах . . . . .	330
5.7. Эффективность экранирования связанных волн. Скин-эффект и низкочастотная селекция импульсных сигналов . . . . .	334
5.7.1. ЭМС-номограмма и спектральный КПД . . . . .	334
5.7.2. Явление скин-эффекта в проводниках. Экранирование волн . . . . .	339
5.7.3. Низкочастотная селекция. Фильтр-имитатор скин-эффекта . . . . .	349
5.7.4. Излучение через оплетку стандартного кабеля . . . . .	364

## 6. Излучение, распространение

<b>и прием импульсных сигналов . . . . .</b>	<b>372</b>
6.1. Формулы идеальной радиопередачи и эффективная площадь антенн . . . . .	372
6.2. Теорема взаимности в антенных задачах . . . . .	385
6.3. Энергетические соотношения в простейших электротехнических цепях . . . . .	406
6.4. Поле обратного излучения и его роль в формировании характеристик приемных антенн . . . . .	415
6.4.1. Симметричный электрический вибратор в режиме передачи . . . . .	416
6.4.2. Вибратор в режиме приема . . . . .	427
6.4.3. Апертурные антенны в режиме передачи и приема . . . . .	440



---

6.5. К вопросу о точности антенных измерений . . . . .	443
6.6. Импульсные характеристики линейных и апертурных антенн . . . . .	446
6.7. Интерференция импульсных сигналов . . . . .	460
6.7.1. Законы межсимвольной интерференции . . . . .	460
6.7.2. Деструктивная интерференция . . . . .	467
Список литературы . . . . .	472

тивную интерференцию, а уже под углами к горизонту  $\sim 10 \div 20^\circ$   $\Delta t_{\text{зад}} > \Delta t_c$  и мы переходим к межсимвольной интерференции.

Если высоту  $h_1$  уменьшить до 5 м, то угловая зона деструктивной интерференции расширится до  $\theta \sim \pi/4$  (для сигналов, показанных на рис. 6.36, 6.37).

Особый интерес имеет зона первого, ближайшего к земной поверхности лепестка, в котором в соответствии с интерференционной формулой Введенского поле убывает пропорционально  $r^{-2}$ , а мощность –  $r^{-4}$ .

Напомним вкратце вывод формулы Введенского. В СВЧ-диапазоне модель земной поверхности в виде металлической плоскости целесообразнее заменить моделью диэлектрика с потерями, поскольку в комплексной диэлектрической проницаемости земных

покровов  $\hat{\epsilon} = \epsilon\epsilon_0 \left( 1 - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon\epsilon_0} \right)$  мнимая составляющая обычно неве-

лика. В этом случае для обоих видов поляризации – и вертикальной, и горизонтальной – коэффициент отражения от земли  $\Gamma \rightarrow -1$ . В силу этого для обоих видов поляризации в скользящих лучах справедлива формула (6.131), в которой без большой погрешности функцию синуса можно заменить ее аргументом.

При выполнении условий  $h_1/r \ll 1$  и  $h_2/r \ll 1$  из геометрии рис. 6.40 нетрудно получить

$$\Delta r = \frac{2h_1h_2}{r}; \quad \Delta t_{\text{зад}} = \frac{2h_1h_2}{rc}. \quad (6.134)$$

Для замены синуса его аргументом достаточно потребовать выполнения условия

$$\frac{2\pi h_1h_2}{\lambda r} < \frac{\pi}{9}$$

или

$$\frac{h_1h_2}{cr} < \frac{T}{9}, \quad (6.135)$$

где  $T$  – период колебаний на центральной частоте спектра излучаемого сигнала.

При выполнении условия (6.135) множитель ослабления (6.131) (формула Введенского) запишется в виде

$$F(h_1, h_2, \lambda) = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r^2}. \quad (6.136)$$

Однако на практике условие (6.135) часто нарушается. При  $f = 100$  МГц  $T = 10$  нс, при  $f = 1000$  МГц  $T = 1$  нс. Максимальное время задержки  $\Delta t_{\text{зад}}^{\text{max}}$  при  $h_1 = 3$  м составляет 20 нс. При  $h_2/r \sim 0,1 \div 0,2$  время задержки сопоставимо с временем существования сигнала, и от учета эффектов деструктивной интерференции надо переходить к учету эффектов межсимвольной интерференции. Аналитическая форма представления суммарного сигнала на временной шкале несложна, но она ненаглядна и в обязательном порядке содержит элементы субъективизма. Гораздо проще и нагляднее проделать операции сложения прямых и отраженных сигналов как на временной, так и частотной шкалах численными методами после конкретизации исходных данных задачи.

## Список литературы

1. Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983.
2. Рамо С., Уиннери Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. М.: Гостехиздат, 1949.
3. Матвеев А. Н.. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
4. Сена Л. А.. Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1988.
5. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.. Справочник по математике. М.: Наука, 1988.
6. Никольский В. В.. Теория электромагнитного поля. М.: Высшая школа, 1964.
7. Астайкин А. И., Помазков А. П.. Теоретические основы радиотехники. В 3 томах. Саров.: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
8. Астайкин А. И., Астайкин М. А., Вертей С. В., Пашко И. В.. Отклик частотно-избирательных систем на короткоимпульсное воздействие// Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2007. Вып. 11. С. 502–515.
9. Вопросы подповерхностной радиолокации/ Под ред. А. Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2005.
10. Астайкин А. И., Профе В. Б.. Техническая электродинамика. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999.
11. Иммореев И. Я.. Сверхширокополосная радиолокация – настоящее и будущее// Труды Второй всероссийской научной конференции-семинара. Муром, 2006.
12. Нейман М.С. Принцип взаимности в теории антенн// Известия электропромышленности слабого тока. 1935, №8.
13. Марков Г. Г. Антенны. М.: Госэнергоиздат, 1960.
14. Марков Г. Г., Сазонов Д. М. Антенны. М.: Энергия, 1975.
15. Шваб А.. Электромагнитная совместимость. М.: Энергоатомиздат, 1998.
16. Вайнштейн Л. А.. Распространение импульсов. Методические заметки// УФН. 1976. Т.118. Вып. 2.

17. Слэтер Дж. Передача ультракоротких радиоволн. М.-Л.: Гостехтеоретиздат, 1946.

18. Справочник по антенной технике/ Под ред. Л. Д. Бахраха и Е. Г. Зелкина. Т.1. М.: Радиотехника, 1997.

19. Хармут Х. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. М.: Радио и связь, 1985.

20. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов/ Под ред. проф. Г. В. Глебовича. М.: Радио и связь, 1984.

21. Беннет С. Л., Росс Д. Ф. Время-импульсные электромагнитные процессы и их применение. Т. 66. ТИИЭР, 1978.

22. Хармут Х.. Теория секвентного анализа. М.: Мир, 1980.

23. Астайкин А. И., Вертей С. В., Пашко И. В., Профе В. Б., Терехин В. А. Прохождение сверхкоротких импульсов через частотно-избирательные цепи// Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. Вып. 9. С. 362–369.

24. Ерохин Г. А., Кочержевский В. Г. Обобщение оптической теоремы в электродинамических задачах рассеяния// РЭ. 1995. Т. 40, №2.

25. Кинбер Б. Е., Попов М. П. Обобщение оптической теоремы на случай антенн// ДАН СССР. 1989. Т. 308, №3.

26. Зайцев А. В., Иванов Д. Н.. Линейные антенны в режиме приема сверхширокополосных сигналов// Труды Второй всероссийской научной конференции-семинара «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Муром, 2006.

27. Астайкин А. И., Астайкина Ю. А., Вертей С. В., Пашко И. В., Рылкин А. И.. Частотно-временные характеристики приземного канала связи на сверхкоротких импульсах// Труды Второй всероссийской научной конференции-семинара «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Муром, 2006.

28. Астайкин А. И., Астайкина Ю. А., Вертей С. В., Мигачев М. И., Осипова Е. А., Пашко И. В., Фильчагина Е. Г.. Экспериментальные результаты по излучению и приему сверхкоротких импульсов в антенном зале// Труды Второй всероссийской научной конференции-семинара «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Муром, 2006.

29. Астайкин М. А.. Математическая модель антенны с уголко-вым отражателем// Межвузовский сборник. Саранск, 2000.

30. Астайкин А. И., Фомченко В. Н.. Защита цифровой информации от утечки по побочным каналам связи. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2004.

31. Schantz H.. *Ultrawideband antennas. USA*, 2004.

32. Астайкин М. А.. Расчет частотного коэффициента передачи модели системы радиосвязи// Межвузовский сборник. Вып 6. Саранск, 2000.

33. Грудинская Г. П.. Распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1975.

34. Потехин А. И.. Некоторые задачи дифракции электромагнитных волн. М.: Сов. радио, 1948.

35. Васильев Е. Н., Сурков В. И.. Радиоволноводы. М.: МЭИ, 1990.

36. Большаков И. А., Гуткин Л. С., Левин Б. Р., Стратонович Р. Л.. Математические основы современной радиоэлектроники. М.: Сов. радио, 1968.

37. Методы и устройства приема и обработки радиосигналов. Сборник научных трудов №237. М.: МЭИ, 1990.

**А. И. Астайкин**

***Излучение и прием сверхкоротких импульсов***

Монография

Редактор *Н. П. Мишкина*

Корректор *М. В. Кривова*

Компьютерная подготовка оригинала-макета

*Н. В. Мишкина*

---

Подписано в печать 23.10.08 Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 29,7. Уч. изд. л. 24,3. Тираж 350 экз. Зак. тип. 917-2008.

---

Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

607188, г. Саров Нижегородской обл.