

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ

Часть II Основы теории сигналов

А. И. Астайкин, А. П. Помазков



ФГУП

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ

А.И. Астайкин, А.П. Помазков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ

Часть вторая

Основы теории сигналов

Под редакцией доктора технических наук,
профессора *А.И. Астайкина*

Саров 2004

ББК 32.841
А 91
УДК 621.396.1

Астайкин А.И., Помазков А.П. Теоретические основы радиотехники. Часть вторая. Основы теории сигналов. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004, 332 с.

ISBN 5-9515-0018-4

Во второй части курса «Теоретические основы радиотехники» излагаются основы теории радиотехнических сигналов. Здесь рассматриваются методы описания и изучения свойств различных сигналов на временной и частотной осях (во временной и частотной областях), корреляционный анализ детерминированных и случайных сигналов, теория модулированных сигналов, сигналов с ограниченным спектром и т.д.

Книга рассчитана на студентов, аспирантов, инженеров и научных сотрудников, работающих в области радиотехники.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой ННГУ им. Лобачевского *А.В. Якимов*; доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой МГУ им. Огарева *В.А. Горюнов*; доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой МЭИ *В.А. Пермяков*

Содержание

Список условных обозначений	11
1. Радиотехнические сигналы	13
1.1. Сигналы	13
1.1.1. Определения: сигнал, сообщение, информация	13
1.1.2. Математическая модель сигнала	14
1.1.3. Физические характеристики сигналов	14
1.2. Основные радиотехнические процессы при передаче сигналов	17
1.2.1. Порядок обработки сигналов	17
1.2.2. Преобразование сигналов в радиотехнических системах	18
1.2.3. Влияние длины волны на функционирование радиоканала	20
1.3. Классификация сигналов	23
1.3.1. Классификация сигналов	23
1.3.2. Комплексные и вещественные сигналы	23
1.3.3. Одномерные и многомерные сигналы	23
1.3.4. Детерминированные и случайные сигналы	23
1.3.5. Непрерывные и импульсные сигналы	24
1.3.6. Аналоговые и дискретные сигналы	25
1.3.7. Периодические и непериодические сигналы	26
1.3.8. Узкополосные и широкополосные сигналы	27
2. Представление сигналов во временной области	28
2.1. Принципы динамического представления сигналов	28
2.1.1. Способы описания сигналов	28
2.1.2. Принципы динамического представления сигналов во временной области	28
2.2. Представление произвольного сигнала с помощью функции включения Хэвисайда	30
2.2.1. Понятие функции включения Хэвисайда	30
2.2.2. Представление произвольного сигнала с помощью функции включения Хэвисайда	32
2.3. Представление произвольного сигнала посредством дельта-функции	33
2.3.1. Понятие дельта-функции	33
2.3.2. Представление произвольного сигнала с помощью дельта-функции	36
2.3.3. Энергетические характеристики сигналов	38

2.4. Представление сигналов с помощью ортогональных функций	39
2.4.1. Ортогональные функции	39
2.4.2. Представление сигналов с помощью ортонормированных функций	41
3. Спектральный анализ сигналов	44
3.1. Спектральное представление сигналов	44
3.1.1. Представление сигналов на временной и частотной осях	44
3.1.2. Спектральное представление сигналов	45
3.2. Преобразование Фурье периодических сигналов	47
3.2.1. Периодическая функция (периодический сигнал)	47
3.2.2. Условия существования преобразования Фурье	47
3.2.3. Представление периодического сигнала рядом Фурье	48
3.2.4. Переход к комплексной форме ряда Фурье	50
3.2.5. Распределение мощности в спектре периодического сигнала	54
3.3. Спектральное представление непериодических сигналов	55
3.3.1. Спектральная плотность непериодического сигнала	55
3.3.2. Физическая интерпретация спектральной плотности	57
3.3.3. Симметричные свойства амплитудного и фазового спектров	59
3.3.4. Сравнение спектров периодического и непериодического сигналов	60
3.4. Некоторые свойства интеграла Фурье	61
3.4.1. Комплекснозначность спектральной функции	61
3.4.2. Изменение пределов интегрирования	61
3.4.3. Свойства действительной и мнимой частей спектральной плотности	61
3.4.4. Спектры четных и нечетных функций	62
3.4.5. Теорема наложения (линейности)	63
3.4.6. Теорема запаздывания (смещения сигнала во времени)	64
3.4.7. Теорема смещения (переноса) спектра по частоте	64
3.4.8. Теорема об изменении масштаба времени (сжатие спектра)	65
3.4.9. Спектр производной сигнала	65
3.4.10. Спектр интеграла сигнала	66

3.4.11. Спектр скалярного произведения двух сигналов	66
3.4.12. Спектр произведения двух сигналов	67
3.4.13. Спектральная плотность свертки двух сигналов	68
3.4.14. Энергия непериодического сигнала	68
3.4.15. Симметрия аргументов t и ω	69
3.4.16. Спектр одиночного прямоугольного видеоимпульса	70
3.4.17. Спектральная плотность δ -функции	71
3.4.18. Спектр сигналов в области низких частот	72
3.5. Спектры некоторых сигналов	73
3.5.1. Спектр последовательности прямоугольных видеоимпульсов	73
3.5.2. Спектр последовательности знакопеременных прямоугольных видеоимпульсов	75
3.5.3. Спектр последовательности треугольных видеоимпульсов	76
3.5.4. Спектр двух видеоимпульсов одной полярности	79
3.5.5. Спектр двух разнополярных видеоимпульсов	80
3.5.6. Спектр одиночного видеоимпульса $\sin c(x)$	82
3.5.7. Спектр одиночного треугольного видеоимпульса	83
3.5.8. Спектр одиночного трапецеидального видеоимпульса	84
3.5.9. Спектр косинусоидального видеоимпульса	86
3.5.10. Спектр колоколообразного (Гауссова) видеоимпульса	87
3.5.11. Спектральная плотность функции включения	89
3.6. Спектры неинтегрируемых сигналов	91
3.6.1. Понятие спектра неинтегрируемых сигналов	91
3.6.2. Спектр постоянного напряжения	92
3.6.3. Спектр комплексного экспоненциального сигнала	94
3.6.4. Спектр гармонического колебания	94
3.6.5. Спектральная плотность радиоимпульса	96
3.6.6. Связь между спектром радиоимпульса и спектром его огибающей	97
3.6.7. Спектр промодулированного импульса	100
3.6.8. Спектр «обрывка» гармонического колебания («отрезка» синусоиды)	104
3.7. Соотношение между длительностью сигнала и шириной его спектра	106

3.7.1. Сущность вопроса	106
3.7.2. Общая закономерность	106
3.7.3. Определение длительности сигнала и ширины его спектра	108
3.8. Распределение энергии в спектрах одиночных видеоимпульсов	110
3.8.1. Расчетные соотношения	110
3.8.2. Расчет ширины первых лепестков спектра	113
3.8.3. Сравнение импульсов различной формы по энергиям в полосе частот первого лепестка	114
3.9. Преобразование Лапласа	115
3.9.1. Вводные замечания	115
3.9.2. Преобразование Лапласа	116
3.9.3. Условия существования изображения Лапласа	119
3.9.4. Преобразование Лапласа от производной сигнала по времени	120
3.9.5. Преобразование Лапласа для некоторых функций	121
4. Принципы корреляционного анализа. Энергетические спектры сигналов	122
4.1. Корреляционный анализ сигналов	122
4.1.1. Импульсные сигналы во временной области	122
4.1.2. Корреляционный анализ сигналов	124
4.2. Автокорреляционная функция	124
4.2.1. Автокорреляционная функция импульсных сигналов	124
4.2.2. АКФ прямоугольного видеоимпульса	128
4.2.3. АКФ пачки прямоугольных видеоимпульсов	129
4.2.4. АКФ треугольного видеоимпульса	130
4.2.5. АКФ экспоненциального видеоимпульса	133
4.2.6. АКФ гармонического колебания и периодической функции	135
4.2.7. АКФ прямоугольного радиоимпульса	138
4.2.8. Сравнение АКФ импульсного и периодического сигналов	139
4.3. Взаимная корреляционная функция	140
4.3.1. Взаимная корреляционная функция	140
4.3.2. ВКФ гармонических сигналов	142
4.4. Связь корреляционных функций с энергетическими спектрами сигналов	144
4.4.1. Энергетический спектр импульсного сигнала	144

4.4.2. Энергетический спектр периодического сигнала	146
4.4.3. Взаимный энергетический спектр двух сигналов	147
4.4.4. Связь АКФ с энергетическим спектром	148
4.4.5. Связь ВКФ с взаимным энергетическим спектром	151
5. Модулированные сигналы	154
5.1. Понятие несущей частоты и модуляции	154
5.1.1. Модуляция и демодуляция несущего колебания	154
5.1.2. Виды модуляции	156
5.1.3. Условия «медленности» модулирующих функций	158
5.2. Амплитудно-модулированные сигналы (амплитудно-модулированные колебания)	160
5.2.1. Понятия и определения	160
5.2.2. Спектральное представление АМК	163
5.2.3. Векторные диаграммы АМК	166
5.2.4. Автокорреляционная функция АМК	169
5.2.5. Энергетические характеристики АМК	171
5.2.6. Амплитудно-манипулированные сигналы	172
5.3. Сигналы с угловой модуляцией	176
5.3.1. Виды угловой модуляции	176
5.3.2. Сигналы с фазовой модуляцией	177
5.3.3. Сигналы с частотной модуляцией	178
5.3.4. Эквивалентность выражений для мгновенных значений ЧМК и ФМК	179
5.3.5. Сигналы с однотоновой УМ	179
5.3.6. Сигналы с многотоновой УМ	182
5.3.7. Спектральное представление сигналов с УМ	184
5.3.8. Спектры сигналов с однотоновой УМ	186
5.3.9. Спектр колебаний с УМ при малых индексах модуляции	187
5.3.10. Спектр колебаний с УМ при больших индексах модуляции	190
5.4. Сигналы с внутриимпульсной частотной модуляцией	191
5.4.1. Принципы линейной частотной модуляции (ЛЧМ)	191
5.4.2. Спектр прямоугольного ЛЧМ-импульса	194
5.4.3. Автокорреляционная функция ЛЧМ-импульса	198
6. Сигналы с ограниченным спектром	200
6.1. Сигналы с ограниченным спектром	200

6.1.1. Характеристики сигналов, простые и сложные сигналы	200
6.1.2. Сигналы с ограниченным спектром	201
6.1.3. Примеры сигналов с ограниченным спектром. Радиотелеграфный сигнал азбуки Морзе	202
6.2. Теорема Котельникова	206
6.2.1. Теорема Котельникова и ее физический смысл	206
6.2.2. Обратная задача дискретизации	208
6.2.3. Теорема Котельникова	209
6.3. Узкополосные сигналы	214
6.3.1. Определение	214
6.3.2. Математическая модель узкополосного сигнала	215
6.3.3. Преобразование Гильберта и его свойства	217
6.3.4. Огибающая, полная фаза и мгновенная частота узкополосного сигнала	220
6.3.5. Комплексная огибающая узкополосного сигнала	222
6.3.6. Спектр комплексной огибающей	224
6.3.7. Преобразование Гильберта узкополосного сигнала	225
6.4. Аналитический сигнал	226
6.4.1. Определение	226
6.4.2. Основные свойства аналитического сигнала и комплексной огибающей	229
6.4.3. Теорема Котельникова для узкополосного сигнала	233
7. Основы теории случайных сигналов	236
7.1. Элементы теории вероятностей	236
7.1.1. Случайные сигналы	236
7.1.2. Случайные события, вероятность события	237
7.1.3. Классификация случайных событий	238
7.1.4. Аксиомы теории вероятностей	239
7.1.5. Действия над вероятностями	239
7.2. Случайные величины и их характеристики	241
7.2.1. Случайная величина (СВ)	241
7.2.2. Вероятностные (статистические) характеристики СВ	242
7.2.3. Функции распределения вероятностей	242
7.2.4. Плотность вероятности	243
7.2.5. Многомерные функции распределения	245
7.2.6. Независимость случайных величин	248
7.2.7. Усреднение случайных величин и функций	248

7.2.8. Числовые (моментные) характеристики случайной величины	248
7.2.9. Дисперсия случайной величины	250
7.2.10. Моменты совокупности двух случайных величин	251
7.2.11. Некоторые законы распределения	254
7.2.12. Комплексная случайная величина	258
7.2.13. Центральная предельная теорема	258
7.3. Функции от случайных величин	259
7.3.1. Функции от случайных величин	259
7.3.2. Характеристическая функция	259
7.3.3. Преобразование одномерных функций распределения	260
7.3.4. Преобразование двумерных функций распределения	261
7.3.5. Преобразование многомерных функций распределения	262
7.3.6. Среднее значение функции от случайных величин	263
7.3.7. Среднее значение и дисперсия суммы случайных величин	264
7.3.8. Функция распределения модуля и фазы случайного вектора	264
7.4. Случайные процессы	267
7.4.1. Сигналы как случайные процессы	267
7.4.2. Реализации, ансамбль реализаций, сечение ансамбля	269
7.4.3. Интегральные функции распределения	270
7.4.4. Плотность вероятности	271
7.4.5. Некоторые свойства вероятностных характеристик	272
7.4.6. Моментные и корреляционные функции случайных процессов	273
7.4.7. Классификация случайных процессов	276
7.4.8. Нормальные случайные процессы	281
7.5. Основы корреляционной теории стационарных случайных процессов	282
7.5.1. Корреляционная теория стационарных СП	282
7.5.2. Моментные и корреляционные функции стационарных СП	282
7.5.3. Некоторые свойства корреляционной функции	286
7.5.4. Теорема Винера – Хинчина	287
7.5.5. Интервал корреляции и эффективная ширина спектра	294

7.6. Аналитические случайные процессы	296
7.6.1. Комплексное представление СП	296
7.6.2. Некоторые свойства аналитических СП	298
7.6.3. Распределения огибающей и фазы аналитического СП	301
7.7. Некоторые примеры стационарных случайных процессов.	304
7.7.1. Случайный модулированный сигнал	304
7.7.2. Квазибелый шум	306
7.7.3. Белый шум	306
7.7.4. Высокочастотный квазибелый шум	308
7.7.5. Гармонический процесс со случайной начальной фазой	309
7.8. Узкополосные стационарные случайные процессы	310
7.8.1. Определения	310
7.8.2. Некоторые примеры узкополосных СП	311
7.8.3. Математическая модель узкополосного СП	314
7.8.4. Статистическая задача описания узкополосного СП	317
7.8.5. Порядок решения задачи	318
7.8.6. Определение огибающей и фазы	318
7.8.7. Свойства сопряженного СП	319
7.8.8. Представление огибающей квадратурными составляющими	322
7.8.9. Распределение квадратурных составляющих	323
7.8.10. Совместное распределение огибающей и фазы	325
7.8.11. Одномерные плотности вероятности огибающей и фазы	326
7.8.12. Одномерное распределение фазы	326
7.8.13. Одномерное распределение огибающей	327
7.8.14. Огибающая и фаза суммы гармонического сигнала и шума	328
Список литературы	333

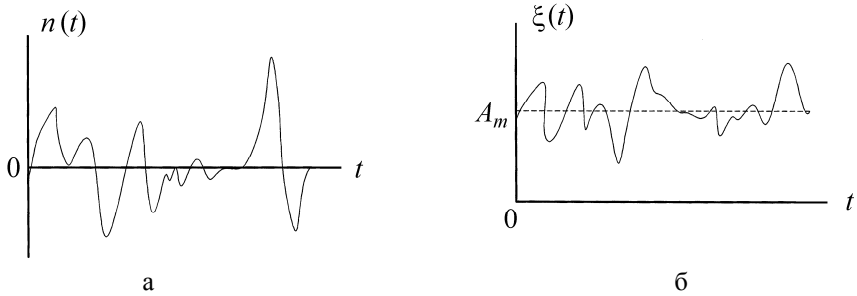


Рис. 7.33

Пусть на выходе избирательной цепи действуют узкополосный нормальный шум $n(t)$ и гармонический сигнал $s(t)$

$$s(t) = A_m \cos \omega_0 t; \quad (7.8.74)$$

$$\left. \begin{aligned} n(t) &= A(t) \cos[\omega_0 t + \varphi] = A_C(t) \cos \omega_0 t - A_S(t) \sin \omega_0 t; \\ A_C(t) &= A(t) \cos \varphi; \quad A_S(t) = A(t) \sin \varphi; \end{aligned} \right\} \quad (7.8.75)$$

$$\xi(t) = s(t) + n(t) = (A_m + A_C(t)) \cos \omega_0 t - A_S(t) \sin \omega_0 t, \quad (7.8.76)$$

где $\xi(t)$ – узкополосный нормальный СП, представляющий собой сумму гармонического сигнала $s(t)$ и узкополосного нормального шума $\theta(t)$.

Ставится задача определений огибающей и начальной фазы узкополосного нормального СП $\xi(t)$ (7.8.76).

Переобозначим в $\xi(t)$ (7.8.76) медленные функции следующим образом:

$$\xi(t) = U(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)] = U(t) \cos \psi(t); \quad (7.8.77a)$$

$$\psi(t) = \omega_0 t + \varphi = \omega_0 t + \theta(t); \quad (7.8.77б)$$

$$U(t) = \sqrt{U_C^2(t) + U_S^2(t)}; \quad (7.8.78a)$$

$$U_C(t) = U(t) \cos \theta(t); \quad U_S(t) = U(t) \sin \theta(t); \quad (7.8.78б)$$

$$U_C(t) = (A_C(t) + A_m) = U(t) \cos \theta(t); \quad U_S(t) = A_S(t) = U(t) \sin \theta(t); \quad (7.8.79)$$

$$A_C(t) = U(t) \cos \theta(t) - A_m; \quad (7.8.80a)$$

$$A_S(t) = U(t) \sin \theta(t), \quad (7.8.80б)$$

где $U(t) = \sqrt{(A_C(t) + A_m)^2 + A_S^2(t)}$ – огибающая СП $\xi(t)$ (7.8.77); $\theta(t)$ – его начальная фаза; $A_C(t)$ и $A_S(t)$ – квадратурные составляющие СП $n(t)$ и $\xi(t)$.

Совместное распределение огибающей $U(t)$ и начальной фазы $\theta(t)$. Совместная двумерная ПВ $p_2(A_C, A_S)$ квадратурных составляющих (7.8.62) равна

$$p_2(A_C, A_S) = \frac{1}{2\pi\sigma_\xi^2} e^{-\left(A_C^2 + A_S^2\right)/2\sigma^2}. \quad (7.8.81)$$

Подставляя сюда $A_C(t) = U \cos \theta - A_m$, $A_S(t) = U \sin \theta$, найдем совместную двумерную ПВ $p_2(A_C, A_S)$, выраженную в координатах $\{U, \theta\}$

$$p_2(A_C, A_S) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{U^2 + A_m^2 - 2A_m U \cos \theta}{2\sigma^2}}, \quad (7.8.82)$$

где U – огибающая; θ – начальная фаза; σ^2 – дисперсия шума $n(t)$.

Совместное двумерное распределение $p_2(U, \theta)$ огибающей $U(t)$ и фазы $\theta(t)$ в координатах U, θ равно

$$p_2(U, \theta) = p_2(A_C, A_S) |D|, \quad (7.8.83)$$

где D – якобиан перехода к новым координатам $\{U, \theta\}$. Используя формулы перехода (7.8.80), найдем D

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\partial A_C}{\partial U} & \frac{\partial A_C}{\partial \theta} \\ \frac{\partial A_S}{\partial U} & \frac{\partial A_S}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial(U \cos \theta - A_m)}{\partial U} & \frac{\partial(U \cos \theta - A_m)}{\partial \theta} \\ \frac{\partial(U \sin \theta)}{\partial U} & \frac{\partial(U \sin \theta)}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \theta & -U \sin \theta \\ \sin \theta & U \cos \theta \end{vmatrix} = U. \quad (7.8.84)$$

Следовательно, совместная двумерная ПВ $p_2(U, \theta)$ равна

$$p_2(U, \theta) = \frac{U}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{U^2 + A_m^2 - 2A_m U \cos \theta}{2\sigma^2}}. \quad (7.8.85)$$

Одномерное распределение огибающей $U(t)$, закон Райса. В результате интегрирования распределения $p_2(U, \theta)$ (7.8.85) по формуле (7.8.64) получаем одномерное распределение огибающей $p_1(U)$, называемое законом Райса

$$p_1(U) = \frac{U}{\sigma^2} e^{-\frac{U^2 + A_m^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{UA_m}{2\sigma^2}\right); \quad U \geq 0, \quad (7.8.86)$$

где $I_0(UA_m/2\sigma^2)$ – модифицированная функция Бесселя (функция от мнимого аргумента) нулевого порядка. Графики $p_1(U)$ закона Райса приведены на рис. 7.34 в координатах $\{p_1(U), U/\sigma\}$, где $U = \sqrt{(A_S + A_m)^2 + A_S^2}$ – огибающая СП $\xi(t)$, σ^2 – дисперсия СП $n(t)$. ПВ (7.8.86) верны только для $U \geq 0$ (как и закон Релея (7.8.66)). Параметрами на графиках рис. 7.34 является отношение $\alpha = \frac{U_C}{U_{uu}} = \frac{A_m}{\sigma}$. При $\alpha = 0$, когда $A_m = 0$ (отсутствует регулярный сигнал (7.8.74)), закон Райса автоматически переходит в закон Релея (7.8.66).

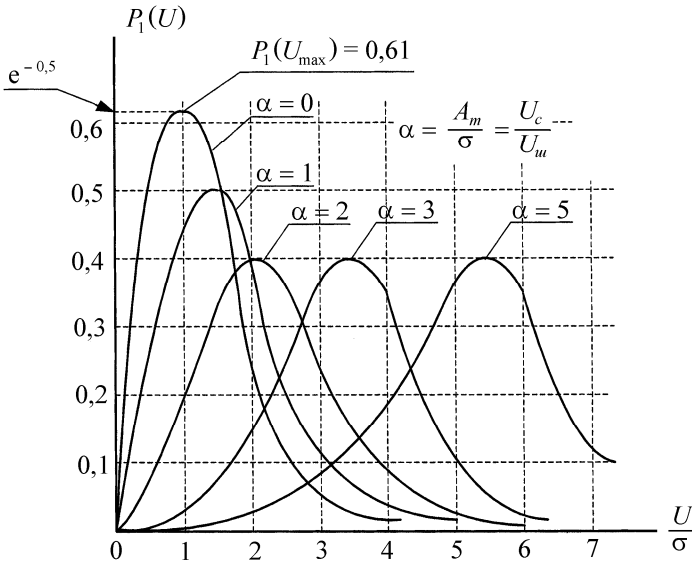


Рис. 7.34

Рассмотрим интересный случай большого сигнала $U \gg \sigma$ или $A_m \gg \sigma$ ($\frac{U_c}{U_{uu}} \gg 1$). В этом случае $U = \sqrt{(A_m + A_c^2) + A_s^2} \approx A_m$ и $A_m \gg \sigma$. При этом аргумент модифицированной функции Бесселя $I_0(UA_m/2\sigma^2)$ становится большим, $UA_m/2\sigma^2 \gg 1$. Можно воспользоваться асимптотическим представлением функции $I_0(x)$ при больших $x_0 \gg 1$

$$I_0\left(\frac{A_m U}{2\sigma^2}\right) = \frac{\exp(A_m U / \sigma^2)}{\sqrt{2\pi U A_m / \sigma^2}} = \frac{e^{A_m U / \sigma^2}}{\sqrt{2\pi U / \sigma}}. \quad (7.8.87)$$

При этом закон Райса переходит в нормальный закон

$$p(U) \sim \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(U-A_m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (7.8.88)$$

где A_m – среднее значение амплитуды.

Закон Райса (7.8.86) при больших значениях $A_m = U \gg \sigma$ нормализуется в закон (7.8.88). Здесь A_m – среднее значение СП $\xi(t)$ (7.8.77) (или математическое ожидание этого СП).

Из формулы (7.8.88) видно, что при больших амплитудах регулярного сигнала $s(t)$, $A_m > \sigma_\xi = \sigma_n$, огибающая $U(t)$ результирующего процесса $\xi(t)$ (7.8.77) распределена нормально со средним значением $m_\xi = A_m$ и дисперсией $\sigma_\xi^2 = \sigma_n^2$ шума $n(t)$. Из этого следует, что закон Райса (7.8.86) для огибающей $U(t)$ с ростом отношения $\alpha = A_m / \sigma_\xi = A_m / \sigma_n = U_c / U_{uu}$ нормализуется и уже

при $\alpha > 3$ этот закон можно считать нормальным (рис. 7.34). В связи с этим полезно отметить, что для закона Рэлея $\sigma_A^2 = 0,429\sigma_\xi^2$, а для нормального закона, в том числе и для закона Райса при больших $A_m > \sigma_n$ и $\sigma_A^2 = \sigma_n^2$, т.е. наложение большого гармонического сигнала с амплитудой A_m приводит к росту дисперсии огибающей σ_A^2 суммарного сигнала (7.8.77) примерно в 2,5 раза, но тем не менее флуктуации шума падают и оказывают малое влияние на регулярный сигнал $s(t)$. Действительно, для одного шума $\frac{\sigma_A^2}{\xi^2(t)} = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_\xi^2} = 0,429$.

Для нормального же процесса (7.8.88) $\sigma_A^2 = \sigma_\xi^2$, поэтому $\sigma_A^2 = 1/0,429 = 2,33$. Однако при больших A_m отношение $\sigma_\xi / A_m = \sigma_A / A_m \rightarrow 0$, все флуктуации происходят возле среднего значения A_m и составляют малую долю на фоне амплитуды A_m регулярного сигнала $s(t)$.

Одномерное распределение фазы $p_1(\theta)$. Одномерное распределение фазы $p_1(\theta)$ получится путем подстановки совместного двухмерного распределения

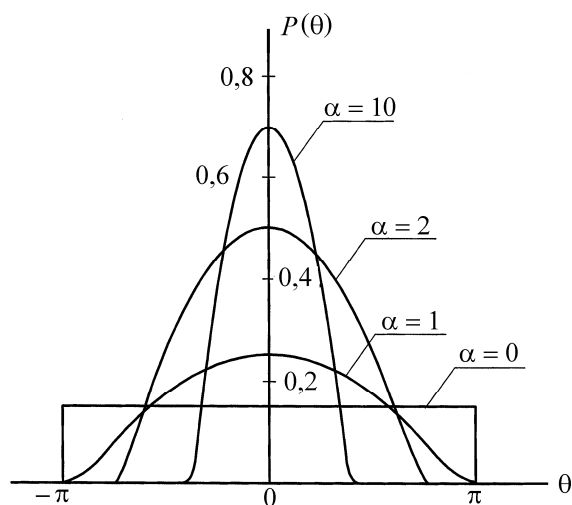


Рис. 7.35

(7.8.85) в формулу (7.8.63). Распределение $p_1(\theta)$ при различных отношениях $\alpha = A_m / \sigma_n = U_C / U_{ш}$, где $U_C = A_m$, $U_{ш}$ — СКО шума $n(t)$, приведено на рис. 7.35. Это распределение меняется от равномерного при $\alpha = 0$, $U_C = 0$ до распределения типа δ -функции при больших $\alpha \gg 1$, т.е. при большом регулярном сигнале $s(t)$ с амплитудой $A_m = U_C$ (так называемая мерцающая точка). В этом случае начальная фаза колебаний $\theta(t)$ случайного

процесса $\xi(t)$ (7.8.77) целиком и полностью определяется начальной фазой φ_0 большого гармонического сигнала $s(t)$ [12] (на рис. 7.35 принято $\varphi_0 = 0$).

Список литературы

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1988.
2. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. Теория передачи сигналов. М.: Связь, 1980.
3. Харкевич А.А. Основы радиотехники. М.: Радио и связь, 1962.
4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986.
5. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Том 1. Основные принципы и классические методы. М.: Мир, 1983.
6. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Том 2. Техника обработки сигналов. М.: Мир, 1983.
7. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1962.
8. Хармут Х. Теория секвентного анализа. Основы применения. М.: Мир, 1980.
9. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. Л.: Энергия, 1972.
10. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Том 2. М.: Наука. 1974.
11. Иццоки Я.С. Импульсные устройства. М.: Сов. радио, 1959.
12. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962.
13. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1971.
14. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Часть 1. М.: Сов. радио, 1966.
15. Гуревич М.С. Спектры радиосигналов. М.: Связьиздат, 1963.
16. Математический энциклопедический словарь. М.: Сов. Энциклопедия, 1983.
17. Жуков В.П., Иванова Н.Н., Николаев А.Н. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебное пособие. М: МЭИ, 1977.
18. Зиновьев А.Л., Филиппов Л.И. Введение в теорию сигналов и цепей. М.: Высшая школа, 1975.
19. Варакин Л.В. Теория сложных сигналов. М.: Сов. радио, 1970.
20. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1966.
21. Агранович М.Г., Лунц Г.Л., Эсгольц А.Э. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. М.: Наука, 1966.
22. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966.
23. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1972.
24. Мирский Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. Л.: Энергия, 1972.
25. Радиотехнические цепи и сигналы. Примеры и задачи. Учебное пособие для вузов / Под ред. И.С. Гоноровского. М.: Радио и связь, 1989.

26. Евсиков Ю.А., Обрезков Г.В., Разевич В.Д., Чапурский В.В., Чиликин В.М. Прикладные математические методы анализа в радиотехнике / Под ред. Г.В. Обрезкова. М.: Высшая школа, 1985.

27. Евсиков Ю.А., Чапурский В.В. Преобразование случайных процессов в радиотехнических устройствах. М.: Высшая школа, 1977.

Теоретические основы радиотехники

А.И. Астайкин, А.П. Помазков

Часть вторая

Основы теории сигналов

Редактор *Н.П. Мишкина*

Корректор *Н.Ю. Костюничева*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *Н.Ю. Солук*

Подписано в печать 12.03.2003 Формат 70х108/16
Усл. печ. л. 29 Уч. изд. л. 21 Тираж 300 экз. Зак. тип. 1110-2003
ПД № 00568 от 22.05.2000

Отпечатано в ИПК ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ
607190, г. Саров Нижегородской обл.