

УДК 621.396

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА МОДУЛЯЦИИ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СТЕПЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ И АНАЛИЗА СПЕКТРА

А. А. Логинов, О. А. Морозов, С. Л. Хмелев

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В работе предложен алгоритм определения типа фазоманипулированных сигналов по короткой выборке в условиях отсутствия информации о центральной частоте и скорости модуляции. Алгоритм основан на анализе усреднённых характеристик спектра сигнала и его чётных степеней.

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения типа модуляции является важным этапом обработки сигналов в ряде практических приложений. Актуальность данной задачи значительно возросла в последние несколько десятков лет в связи с бурным развитием систем широкополосной связи и появлением быстродействующих цифровых вычислительных устройств. В частности, алгоритмы определения типа модуляции являются неотъемлемой частью универсальных демодуляторов, а также широко используются в задачах, связанных с обнаружением и идентификацией неизвестных источников сигнала.

Задача определения типа модуляции, как правило, решается для ограниченного набора модуляций, который определяется конкретным приложением. При этом распространённым подходом является построение древовидного алгоритма, когда на каждой из стадий принимается решение о принадлежности сигнала к тому или иному классу модуляций (например, на первом этапе могут быть выделены сигналы с амплитудной модуляцией, на втором — с частотной модуляцией, и так далее вплоть до определения конкретного типа модуляции). В данной работе предполагается, что наличие в сигнале цифровой фазовой модуляции определено на предыдущей стадии, либо является априорной информацией, а задачей является определение типа фазовой модуляции (порядок модуляции 2; 4 или 8).

Оптимальные алгоритмы определения типа модуляции (см., например, [1, 2]) основаны на использовании принципа максимального правдоподобия, однако их практическая применимость ограничивается резким ростом вычислительной сложности при увеличении числа неизвестных параметров исследуемого сигнала. Применение метода обобщённого максимального правдоподобия (подстановка предварительно оценённых параметров вместо точных значений) позволяет отчасти преодолеть данный недостаток, однако точность оценок существенно влияет на итоговый результат. С другой стороны, применение алгоритмов, основанных на использовании некоторых характерных признаков, позволяет организовать работу в режиме реального времени, повысить устойчивость к воздействию неучтённых погрешностей, а также добиться более высокой помехоустойчивости [3]. В частности, для получения оценки типа модуляции предложены методы на основе статистических моментов чётных порядков, рассчитанных по сигналу [4], на основе среднего и других статистических характеристик мгновенной амплитуды, фазы и частоты сигнала [5], на основе использования вейвлет-преобразований [6] и других методов, в том числе комбинирующих перечисленные. Следует, однако, отметить, что большинство предлагаемых методов предполагают работу в условиях, когда многие важные параметры сигнала (центральная

частота, скорость модуляции, ширина спектра, а иногда и начальная фаза сигнала) известны с высокой точностью. Вместе с тем при работе по коротким реализациям сигналов с высоким уровнем шумов погрешность оценки отдельных параметров будет существенно влиять на вероятность верного определения типа модуляции. В частности, в работе [7] учтены данные ограничения и предложен алгоритм определения типа модуляции, основанный на вычислении среднеквадратичной разницы гистограмм мгновенной амплитуды, дифференциальной фазы, частоты и скорости изменения частоты исследуемого сигнала с заранее сохранёнными эталонными гистограммами соответствующих типов модуляции. Перед этапом построения гистограмм проводится предварительная оценка центральной частоты, скорости модуляции и ширины спектра сигнала, которые используются для фильтрации шума, компенсации частотного сдвига и оценки шага для вычисления дифференциальной фазы.

В данной работе предлагается алгоритм определения типа модуляции, предназначенный для идентификации фазоманипулированных сигналов с порядком модуляции 2; 4 и 8, основанный, аналогично [8], на использовании свойств спектра чётных степеней обрабатываемого сигнала. Спецификой предлагаемого алгоритма является возможность работы в условиях отсутствия информации о центральной частоте, скорости модуляции, амплитуде и начальной фазе.

1. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

В работе предполагается, что сигнал принимается цифровым приёмником в условиях неточного знания несущей частоты, вследствие чего при переносе спектра возникает частотный сдвиг f_0 . Узкополосная комплексная огибающая фазоманипулированного сигнала в I , Q компонентах может быть представлена в следующем виде:

$$S_{\text{ФМ-М}} = A \exp[i(2\pi f_0 t + \varphi_0)] \Phi_M(t), \quad (1)$$

где M — порядок модуляции (определяет число фиксированных значений фазы, которыми кодируется информация), i — мнимая единица, f_0 — центральная частота сигнала, φ_0 — случайная начальная фаза сигнала,

$$\Phi_M(t) = \exp\left(\frac{i 2\pi k}{M} \left[\frac{t}{T}\right]\right), \quad (2)$$

где $k = 0, 1, \dots, M-1$ — целое число, кодирующее информационную составляющую сигнала, T — длительность информационного символа, квадратные скобки означают выделение целой части.

Можно показать справедливость следующих выражений:

$$\Phi_8(t) \Phi_8^H(t) = \frac{\Phi_8(t)}{\Phi_8^H(t)} = \exp\left(2 \frac{i 2\pi k}{8} \left[\frac{t}{T}\right]\right) = \exp\left(\frac{i 2\pi k}{4} \left[\frac{t}{T}\right]\right) = \Phi_4(t), \quad (3)$$

$$\Phi_4(t) \Phi_4^H(t) = \frac{\Phi_4(t)}{\Phi_4^H(t)} = \exp\left(2 \frac{i 2\pi k}{4} \left[\frac{t}{T}\right]\right) = \exp\left(\frac{i 2\pi k}{2} \left[\frac{t}{T}\right]\right) = \Phi_2(t), \quad (4)$$

$$\Phi_2(t) \Phi_2^H(t) = \frac{\Phi_2(t)}{\Phi_2^H(t)} = \exp\left(2 \frac{i 2\pi k}{2} \left[\frac{t}{T}\right]\right) = 1, \quad (5)$$

где символ H означает комплексное сопряжение.

Из формул (3)–(5) следует, что при возведении (1) в степень M получим:

$$(S_{\text{ФМ-М}})^M = \exp[iM(2\pi f_0 t + \varphi_0)] A^M \Phi_M^M = \exp[iM(2\pi f_0 t + \varphi_0)] A^M. \quad (6)$$

Поскольку при возведении сигнала в степень его спектр смещается на соответствующую величину в частотном пространстве, дальнейший анализ проводится с учётом данного смещения.

Спектр сигнала (6) будет иметь вид дельта-функции на частоте Mf_0 , в то время как ширина спектра исходного сигнала (1) приблизительно равна $B = 2/T$ [9]. Вместе с тем, в соответствии с (3)–(5), возведение фазоманипулированного сигнала с порядком модуляции M (ФМ- M) в степень меньше M практически не будет приводить к уменьшению ширины спектра, а возведение сигнала (6) в чётную степень не будет изменять характер спектра, а только изменять его положение.

Отличить спектры фазоманипулированного сигнала и сигнала (6) можно различными способами. Причём можно ожидать, что выбор способа построения спектра и метода сравнения будут оказывать существенное влияние на помехоустойчивость и быстродействие полученного алгоритма. В данной работе предлагается использовать в качестве характеристики дисперсию d нормированного на единицу модуля спектра сигнала, полученного с помощью быстрого преобразования Фурье:

$$d = \varepsilon\{(x - \varepsilon\{x\})^2\}, \quad (7)$$

где x — величина, для которой вычисляется дисперсия, $\varepsilon\{z\}$ — среднее значение величины z .

Вычисление быстрого преобразования Фурье в этом случае позволяет существенно сократить время вычислений, нормировка позволяет работать независимо от энергии сигнала, а вычисление дисперсии — косвенно оценить равномерность распределения спектра и избежать необходимости точно оценивать центральную частоту спектра сигнала. Характерным признаком того, что значение M оценено верно, будет резкое уменьшение дисперсии. В итоге можно сформулировать следующий алгоритм определения типа модуляции:

- 1) вычисляется модуль фурье-спектра сигнала (1) в степени $m = 1; 2; 4; 8$;
- 2) вычисляются значения дисперсии d_1, d_2, d_4, d_8 нормированных модулей фурье-спектра, полученных на шаге 1;
- 3) вычисляются отношения $r_m = d_m/d_{m/2}$ для $m = 2; 4; 8$;
- 4) тип модуляции фазоманипулированного сигнала определяется индексом m минимального отношения r_m .

На рис. 1 приведён типичный вид нормированных модулей фурье-спектра (частота f выражена в долях частоты дискретизации) сигналов ФМ-2, ФМ-4 и ФМ-8 и их степенных функций при отношении сигнал/шум (ОСШ) +20 дБ, а соответствующие им значения d_m и r_m приведены в табл. 1. Анализ рис. 1 и табл. 1 показывает, что увеличение m приводит к росту относительного уровня шума и увеличивает значение r_m при $m = M$.

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛА

Воздействие шума на результат определения типа модуляции предложенным методом тем больше, чем больше значение параметра M , поскольку операция возведения сигнала в степень приводит к уменьшению отношения сигнал/шум. Чтобы снизить влияние данного эффекта, предлагается использовать предварительную фильтрацию сигнала. Фильтрация может быть проведена различными способами, которые, вообще говоря, могут включать в себя использование априорной информации (при её наличии) о сигнале и шуме. Следует отметить, что выбор конкретного метода фильтрации следует осуществлять с учётом предположений о характере помехи и канале распространения (см., например, [10]), поскольку он будет оказывать непосредственное воздействие на помехоустойчивость алгоритма определения типа модуляции.

В работе полагается, что параметры сигнала априорно неизвестны, шум $n_0(t)$ является белым гауссовым, а энергия полезного сигнала локализована вокруг центральной частоты. В этом случае предпочтительнее проводить фильтрацию в спектральной области, предварительно оценив центральную частоту и ширину спектра. Центральная частота может быть оценена, например, как местоположение энергетического центра тяжести модуля фурье-преобразования исходного

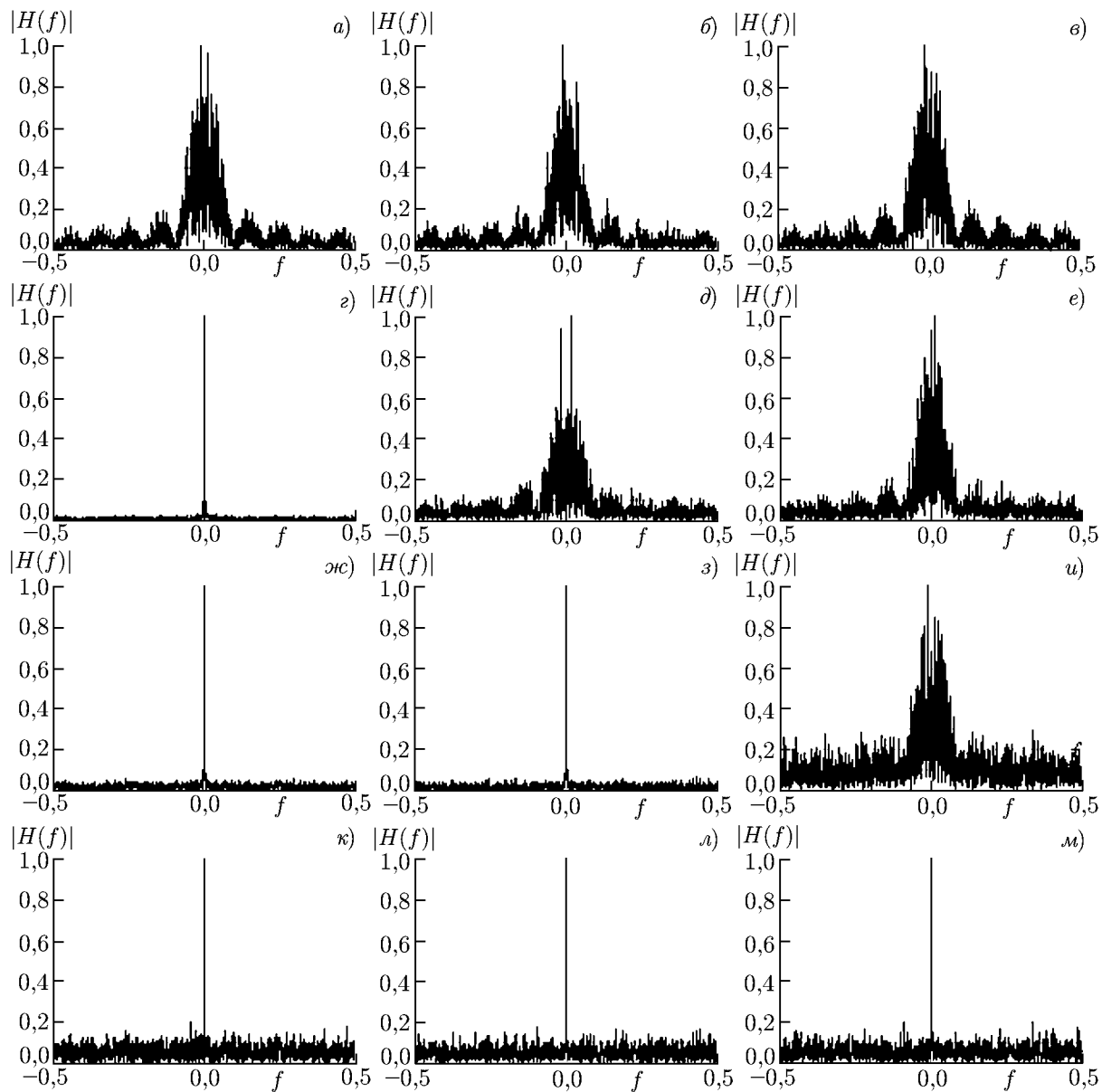


Рис. 1. Нормированные модули фурье-преобразования сигналов ФМ-2 (а, з, жс, κ), ФМ-4 (б, д, з, л) и ФМ-8 (в, е, у, м) в степени $m = 1$ (а, б, в), $m = 2$ (з, д, е), $m = 4$ (жс, з, у) и $m = 8$ (κ, л, м)

Таблица 1. Значения критериев d_m , r_m для нормированных модулей фурье-преобразований, приведённых на рис. 1

m	ФМ-2		ФМ-4		ФМ-8	
	d_m	r_m	d_m	r_m	d_m	r_m
1	13,80	—	14,10	—	15,50	—
2	0,97	0,07	9,72	0,69	11,40	0,73
4	1,02	1,05	1,02	0,10	12,40	1,08
8	1,73	1,69	1,66	1,62	1,73	0,14

сигнала:

$$\tilde{f}_0 = \left(\int f F(f) df \right) / \left(\int F(f) df \right), \quad (8)$$

где $F(f)$ — модуль спектра, а интеграл берётся по всей исследуемой частотной полосе. Ширина спектра $\tilde{W}$ может быть получена на основе анализа функционала

$$D(\tilde{W}) = d_f \{ F^-(f, \tilde{f}_0, \tilde{W}) \}, \quad (9)$$

где d_f — операция вычисления дисперсии по формуле (7) с усреднением по переменной f , $F^-(f, \tilde{f}_0, \tilde{W})$ — модуль спектра сигнала, из которого вырезаны отсчёты в диапазоне частот $[\tilde{f}_0 \pm \tilde{W}/2]$. После того, как оценены параметры $\tilde{f}_0, \tilde{W}$, проводится фильтрация сигнала в частотной области. Отфильтрованный сигнал обрабатывается на следующих этапах алгоритма.

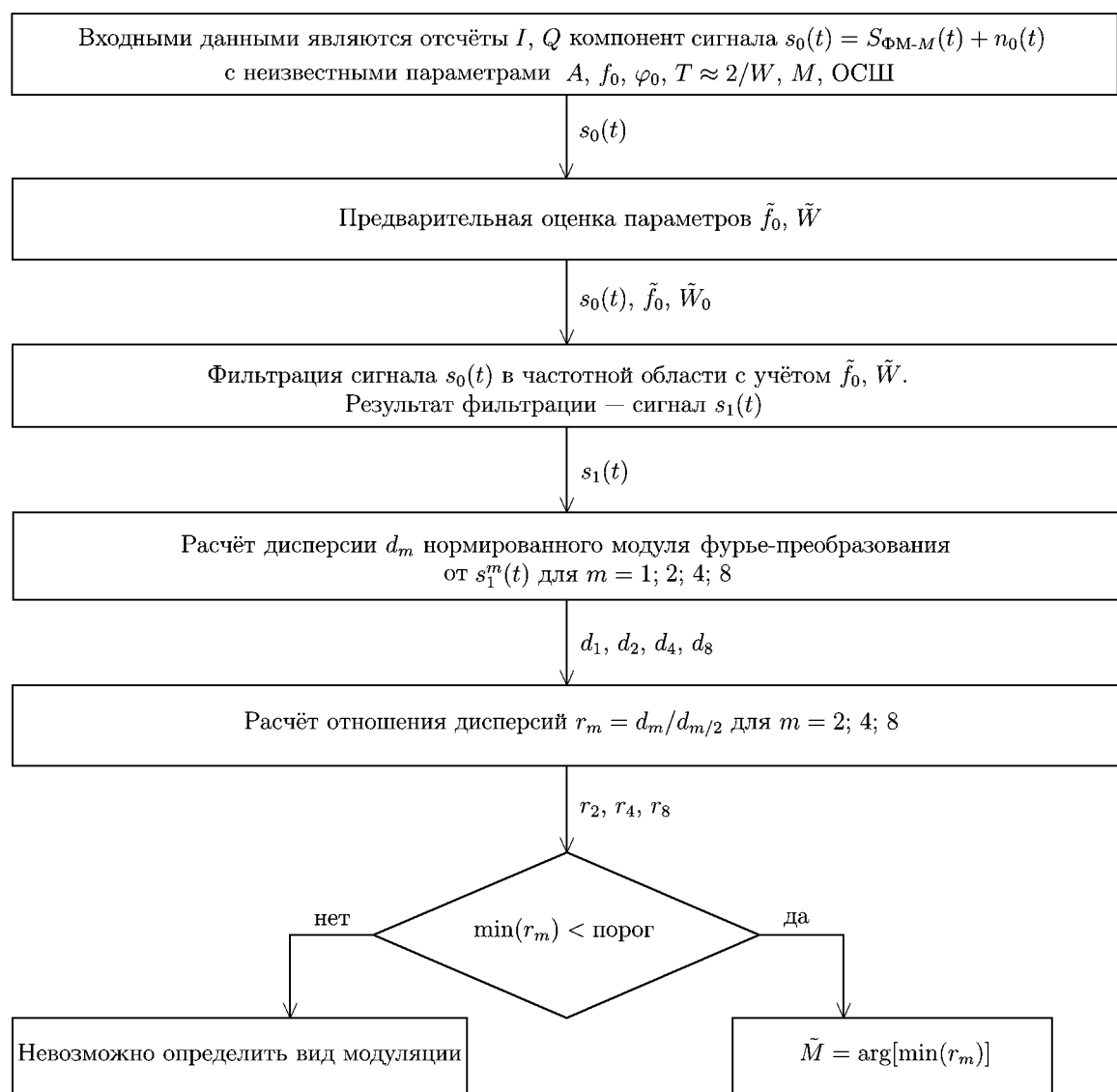


Рис. 2. Блок-схема предлагаемого алгоритма

При низком отношении сигнал/шум может возникать ситуация, когда характерного изменения вида спектра (как на рис. 1) не происходит ни при каком значении m . Отследить данную ситуацию можно пороговым методом, установив порог для значения $\min(r_m)$, при превышении которого принимается решение о невозможности определить вид модуляции фазоманипулированного сигнала. Значение порога подбирается экспериментально. Итоговый алгоритм определения типа модуляции представлен в виде блок-схемы на рис. 2.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМА

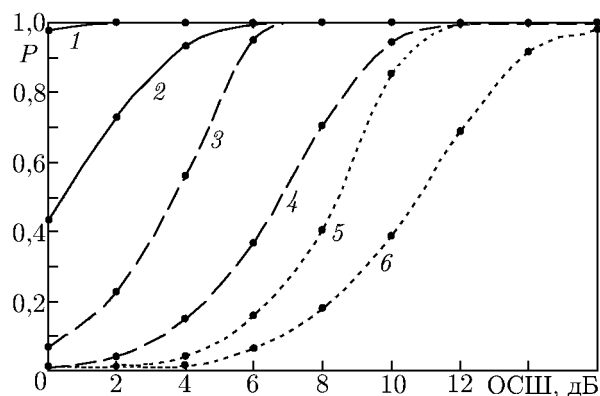


Рис. 3. Зависимость вероятности правильного определения типа модуляции от отношения сигнал/шум для сигналов ФМ-2 (кривые 1, 2), ФМ-4 (кривые 3, 4) и ФМ-8 (кривые 5, 6) с длиной 100 символов (кривые 1, 3, 5) и 25 символов (кривые 2, 4, 6)

по 10 000 реализациям сигнала, при этом скорость модуляции менялась в пределах от 0,01 до 0,1, а центральная частота сигнала — от $-0,025$ до $0,025$ частоты дискретизации.

При длине сигнала 100 символов вероятность верного определения типа модуляции сигналов ФМ-2 выше 0,99 при ОСШ = 2 дБ и выше, для сигналов ФМ-4 — при ОСШ = 8 дБ и выше, для сигналов ФМ-8 — при ОСШ = 12 дБ и выше. Уменьшение длины исследуемого сигнала до 25 символов снижает вероятность верного определения типа модуляции при этих значениях ОСШ приблизительно до 0,7. Сравнение полученных результатов с представленными в [7] позволяет сделать вывод о том, что предложенный в данной работе алгоритм обеспечивает более высокую помехоустойчивость при анализе фазоманипулированных сигналов меньшей длины. Следует отметить, что меньшая помехоустойчивость представленного в [7] алгоритма объясняется его универсальностью (возможностью применения для других видов модуляции без существенных изменений).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен алгоритм определения типа модуляции, предназначенный для идентификации фазоманипулированных сигналов с порядками модуляции 2; 4 и 8. Алгоритм основан на анализе модуля спектра обрабатываемого сигнала и его чётных степеней и в широких пределах не зависит от центральной частоты, скорости модуляции и энергии анализируемого сигнала. Для повышения помехоустойчивости алгоритма используется предварительная фильтрация в

Исследование устойчивости предложенного алгоритма проводилось методом компьютерного моделирования с усреднением по центральной частоте, начальной фазе, скорости модуляции, информационному наполнению сигнала и выборкам шума. Моделирование включало формирование заданного числа отсчётов сигнала (в компонентах I и Q) с выбранным типом модуляции и псевдослучайной последовательностью в качестве модулирующей функции, наложение шума с заданным отношением сигнал/шум (в полосе сигнала), процедуру определения типа модуляции. Отношение сигнал/шум менялось в пределах от 0 дБ до 16 дБ для двух длительностей сигнала: 100 и 25 символов. Зависимости вероятности правильного определения типа модуляции P от отношения сигнал/шум приведены на рис. 3. Каждая точка на графиках получена путём усреднения

спектральной области. Проведено исследование помехоустойчивости предложенного алгоритма. Исследование, включающее в себя усреднение по центральной частоте и частоте модуляции, показало, что вероятность верного определения типа модуляции выше 0,99 достигается при отношении сигнал/шум более 2 дБ для сигналов ФМ-2, более 8 дБ для сигналов ФМ-4, более 12 дБ для сигналов ФМ-8 при длительности сигналов не менее 100 символов. При существенном уменьшении длины выборки (до 25 символов) вероятность правильного определения типа модуляции при указанных выше отношениях сигнал/шум остаётся около 0,7. Вероятность правильного определения типа модуляции превышает значения, приведённые для универсального алгоритма в работе [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sapiano P. C., Martin J. D. // Proc. ICASSP. 1996. P. 1010.
2. Panagiotou P., Anastasopoulos A., Polydoros A. // Proc. IEEE MILCOM. 2000. P. 670.
3. Dobre O. A., Abdi A., Bar-Ness Y., Su W. // Commun. IET. 2007. V. 1, No. 2. P. 137.
4. Shermeh A. E., Ghazalian R. // Digital Signal Proc. 2010. V. 20. P. 1748.
5. Hossen A., Al-Wadahi F., Jervase J. A. // Engineering Appl. Artificial Intelligence. 2007. V. 20 P. 463.
6. Hassan K., Dayoub I., Hamouda W., Berbineau M. // EURASIP J. Adv. Signal Proc. 2010. Art. no. 532898.
7. Liedtke F. // J. Telecommun. Inform. Techn. 2004. No. 4. P. 91.
8. Schreyogg C., Kittel C., Kressel U., Reichert J. // Proc. IEEE MILCOM. 1997. P. 1377.
9. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
10. Мальцев А. А., Масленников Р. О., Хоряев А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 8. С. 528.

Поступила в редакцию 25 декабря 2012 г.; принята в печать 28 декабря 2012 г.

DETERMINATION OF THE TYPE OF PSK SIGNALS ON THE BASIS OF POWER TRANSFORMATIONS AND SPECTRUM ANALYSIS

S. L. Khmelev, A. A. Loginov, and O. A. Morozov

In this paper, we propose an algorithm for determining the PSK-signal type by a short sample under the conditions of absence of information on the central frequency and modulation rate. The algorithm is based on the analysis of the averaged characteristics of the signal spectrum and its even powers.