

И. Д. ГОРБЕНКО, д-р техн. наук, А. А. ЗАМУЛА, В. Л. КУЛЕШОВ

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ

Применение сложных сигналов позволяет повысить защищенность систем связи при воздействии структурных и некоторых других типов помех в пределах полосы частот, занимаемой сигналом. В связи с этим важной задачей является выбор сигналов, обеспечивающих минимально возможный уровень взаимных помех, который в основном определяется допустимым уровнем максимальных пиков взаимокорреляционных функций (ВКФ).

Для режима обнаружения важно иметь систему, составленную из сигналов, обладающих малыми пиками периодических и апериодических автокорреляционных функций (ПФАК) и (АФАК).

В многоканальных системах связи в качестве манипулирующих (расширяющих спектр) широко используются m -последовательности, т. е. последовательности максимального периода $L = 2^m - 1$ (1) или немаксимального периода с трехуровневой функцией корреляции (последовательности Голда), генерируемые m -каскадным двоичным или $2m$ -каскадным регистрами сдвига с линейной обратной связью. Объем системы, составленной из m -последовательностей, $M = \varphi(L)/m$ (2), где $\varphi(L)$ — функция Эйлера.

Расчеты, проведенные с использованием (2), показывают, что объем системы, составленной из m -последовательностей, ограничен. Например, количество различных сигналов (изоморфизмов), которые можно синтезировать с использованием линейного регистра для $m = 10$, составляет $M = 60$. Максимум модуля взаимокорреляционных функций у таких систем больше, чем у ряда других систем сигналов [1]. Использование в многоканальных системах связи последовательностей Голда позволяет увеличить объем системы, однако такие системы обладают значительным частотным пик-фактором и относительно большим уровнем боковых лепестков ПФАК и АФАК.

Названные линейные последовательности существуют только для значений длительностей $L = 2^m - 1$. При усечении числа символов последовательностей их авто- и взаимокорреляционные свойства значительно ухудшаются [2]. Кроме того, линейные последовательности обладают низкой кодовой устойчивостью [3], причем закон формирования на периоде $L = 2^m - 1$ определяется по любым $2m$ для m -по-

следовательностей и $4m$ для последовательностей Голда подряд следующим символам. По этим причинам применение линейных сигналов в многоканальных системах связи ограничено.

Актуальной задачей является выбор систем сигналов, свободных от указанных недостатков. К числу таких систем прежде всего следует отнести системы характеристических дискретных сигналов (ХДС) [4]. Известно, что указанная система сигналов существует для значений длительностей $L = 4x = P^n - 1$ и $L = 4x + 2 = P^n - 1$ (3), где x, n — натуральные числа; P — простое число. Объем системы характеристических сигналов определяется из соотношения [4]: $M = \varphi(L)/n$ (4), причем n — степень расширения поля Галуа $GF(P^n)$. Анализ (1), (3) показывает, что ХДС существуют для значительно больших значений длительностей L . Объем системы ХДС при $n = 1$, как следует из (2), (4), больше объема системы, составленной из m -последовательностей, примерно в m раз. В то же время ХДС, как и m -последовательности, — оптимальные по ПФАК и близки к оптимальным по АФАК. Значения боковых выбросов ПФАК ХДС определяются из выражения

$$R_{\mu}(\tau) = \sum_{i=0}^{L-1} \mu_i \mu_{i+\tau}, \quad (5)$$

где μ_i — значение кода (символа) последовательности, и принимают значения $R_{\mu}(\tau) = \{2, -2\}$ для сигналов вида $L = 4x + 2$ и $R_{\mu}(\tau) = \{0, -4\}$ для сигналов вида $L = 4x$.

В некоторых практических приложениях важными являются взаимокорреляционные функции в периодическом и апериодическом режимах (ПФВК и АФВК), функции автокорреляции (ФАК) в апериодическом режиме (АФАК), стыковые (СФВК) и меандро-инвертированные функции корреляции (МИФАК). Однако статистические характеристики этих функций и возможные значения максимальных боковых пиков названных функций корреляции ХДС не исследованы.

Известно [1], что оценка качества обнаружения и различения выполняется с использованием следующих статистических характеристик ФАК и ФВК: математическое ожидание выбросов (m_R); математическое ожидание максимальных боковых выбросов ($m_{R_{\max}}$); математическое ожидание модулей максимальных боковых выбросов ($m_{|R_{\max}|}$); среднееквадратичное отклонение боковых выбросов ($D_R^{1/2}$); среднееквадратичное отклонение модулей боковых выбросов ($D_{|R|}^{1/2}$), а также значение максимального бокового выброса R_{\max} . В табл. 1, 2, 3 приведены результаты расчетов с использованием ЭВМ статистических характеристик ПФВК, АФАК и АФВК соответственно для различных значений длительностей L . В табл. 4 представлены средние значения исследуемых характеристик ВКФ и АКФ характеристических сигналов. Расчеты проводились для значений длительностей в интервале $\Delta L = 16 - 1023$. Здесь для сравнения помещены значения статистических характеристик корреляционных функций других типов последовательностей: m -последовательностей, сегментов m -последовательностей, а также случайных последовательностей.

Анализ данных табл. 1—4 показывает, что значения максимальных боковых выбросов АФАК, ПФВК, АФВК, СФВК, МИФВК и МИФАК меньше максимальных боковых пиков случайных последовательностей, сегментов m -последовательностей и практически совпадают со значениями максимальных боковых выбросов m -последовательностей; статистические характеристики близки к статистическим характеристикам m -последовательностей, в то же время они лучше, чем у сегментов m -последовательностей и последовательностей Голда [2].

Таблица 1

L	$\frac{m_R}{L}$	$\frac{D_1^{1/2} R }{\sqrt{L}}$	$\frac{m_{R_{\max}}}{\sqrt{L}}$	$\frac{m_1 R_{\max}}{\sqrt{L}}$
52	0	0,53	1,38	0,78
66	0	0,60	1,72	0,79
88	0	0,57	2,13	0,79
100	0,20	0,54	1,61	0,84
502	0,09	0,68	2,59	0,88
4000	0,01	0,95	2,53	0,96

Таблица 2

L	$\frac{m_{R_{\max}}}{\sqrt{L}}$	$\frac{m_1 R_{\max}}{\sqrt{L}}$	$\frac{D_R^{1/2}}{\sqrt{L}}$	$\frac{D_1^{1/2} R }{\sqrt{L}}$
36	2,24	0,49	0,48	0,41
52	2,33	0,47	0,51	0,39
66	0,99	0,47	0,49	0,37
88	2,63	0,47	0,50	0,38
136	2,80	0,46	0,47	0,37
256	2,82	0,46	0,46	0,36

Таблица 3

L	$\frac{m_{R_{\max}}}{\sqrt{L}}$	$\frac{m_1 R_{\max}}{\sqrt{L}}$	$\frac{D_R^{1/2}}{\sqrt{L}}$	$\frac{D_1^{1/2} R }{\sqrt{L}}$
36	1,98	0,69	0,78	0,54
52	1,96	0,66	0,80	0,53
66	1,60	1,21	1,02	0,83
88	1,98	0,66	0,80	0,56
136	2,23	0,62	0,76	0,51
256	2,71	0,63	0,77	0,51

Последовательности Голда и Касами — по существующему предположению — наиболее плотно упакованные по ПФАК, т. е. они обладают наилучшими среди других систем (с объемом, приблизительно равным базе) взаимокорреляционными свойствами [1]. В табл. 5 приведены значения максимальных боковых выбросов ПФАК ($R_{a, \max}$), ПФВК ($R_{b, \max}$) для указанных систем

в зависимости от значений длительностей сигналов. Символ G означает, что сигнал выбран из системы (множества) Голда, символ K — из множества Касами. Проведенные исследования ПФВК ХДС опровергли это предположение. В табл. 6 представлены значения $|R_{a, \max}|$, $|R_{b, \max}|$ для ХДС, рассчитанные с использованием ЭВМ для значений длительностей, близких к указанным в табл. 5. Здесь θ_1 , θ_2 — значения первообразных элементов, по которым синтезированы пары ХДС.

Из анализа данных табл. 5, 6 следует, что существуют пары ХДС, для которых нормированные значения максимальных боковых выбросов ПФВК меньше максимальных боковых выбросов ПФВК последовательностей Голда и Касами. Например, для пары ХДС длительностью $L = 1060$, построенных с использованием первообразных элементов $\theta_1 = 2$, $\theta_2 = 8$, максимальные значения боковых выбросов ПФВК не превышает значения $|R_{b, \max}| = 64$, в то время как для последовательностей Голда длительностью $L = 1023$, $|R_{b, \max}| = 65$. Таким образом, даже при больших значениях длительностей ХДС обеспечиваются меньшие значения максимальных боковых пиков ПФВК, чем

Таблица 4

Характеристики	$\frac{R_{\max}}{\sqrt{L}}$	$\frac{m R_{\max} }{\sqrt{L}}$	$\frac{D R ^{1/2}}{\sqrt{L}}$	$\frac{D_R^{1/2}}{\sqrt{L}}$
<i>Характеристические дискретные сигналы</i>				
АФАК	0,7—1,30	0,47	0,40	0,50
ПФАК	$4/\sqrt{L}$	0,20	0,10	0,20
Меандро-инвертированные ФАК	1,3—2,35	0,60	0,50	0,80
АФВК	1,4—5,1	0,74	0,76	0,91
ПФВК	1,9—5,9	0,84	0,64	1,10
Стыковые ФВК	1,9—5,6	0,90	0,70	1,10
<i>m-последовательности</i>				
АФАК	0,7—1,25	0,32	0,26	0,41
ПФАК	$1/\sqrt{L}$	$1/\sqrt{L}$	0	0
Меандро-инвертированные ФАК	1,3—2,3	0,66	0,49	0,82
АФВК	1,4—5	0,54	0,48	0,73
ПФВК	1,9—6	0,80	0,62	1
Стыковые ФВК	2,0—5,1	0,83	0,62	1
<i>Случайные последовательности</i>				
АФАК	1,5—3,1	0,51	0,65	0,70
ПФАК	2—4	0,83	0,68	1
АФВК	2,4—4,3	0,54	0,48	0,70
ПФВК	2,75—4,5	0,82	0,62	1
<i>Сегменты m-последовательностей</i>				
АФАК	1,45—4,1	0,52	0,90	0,71
ПФАК	1,6—4,3	0,79	0,58	1
АФВК	1,4—4,3	0,52	0,49	0,72
ПФВК	1,6—5,0	0,80	0,60	1

Таблица 5

L	m	$ R_{a. \max} $	$ R_{b. \max} $
63G	6	17	17
127G	7	17	17
255K	8	33	33
1023G	10	65	65

Таблица 6

L	θ_1, θ_2	$ R_{a. \max} $	$ R_{b. \max} $
66	2,10	4	14
256	3,27	4	32
1060	2,90	4	64

у систем Голда, т. е. значение $|R_{b. \max}| = 65$ нельзя считать, как полагали, достигнутой границей плотной упакованности, поскольку получено значение $|R_{b. \max}| = 64$. Далее для ХДС длительностью $L = 256$ $|R_{b. \max}| = 32$, в то время как для последовательностей, выбранных из большого множества Касами, $|R_{b. \max}| = 33$. Кроме того, данные табл. 5, 6 показывают, что максимальные боковые пики ПФАК ХДС значительно меньше максимальных боковых выбросов ПФАК систем Голда и Касами.

Характеристические сигналы ввиду нелинейности закона формирования символов [4] $W = \psi(a_i) = \exp(j\pi U_i)$ (6), где $a_i = \Theta^i + 1 =$

$= \Theta^{U_i}(\text{mod } P)$ (7), обладают лучшей кодовой устойчивостью, т. е. лучшими структурными свойствами.

Приведенные результаты исследований корреляционных свойств ХДС указывают на целесообразность применения ХДС в многоадресных системах связи.

Список литературы: 1. *Варакин Л. Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами.— М. : Радио и связь, 1985.— 384 с. 2. *Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / В. Б. Пестряков, В. П. Афанасьев, В. Л. Гурвич и др.; Под ред. В. Б. Пестрякова.*— М. : Сов. радио, 1973.— 424 с. 3. *Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Г. И. Тузов, В. А. Сивов, В. И. Прытков и др.; Под ред. Г. И. Тузова.*— М. : Радио и связь, 1985.— 254 с. 4. *Свердлов М. Б.* Оптимальные дискретные сигналы.— М. : Сов. радио, 1975.— 200 с.

Поступила в редколлегию 13.11.86