

УДК 621.396

Характеристики ансамблей линейных псевдослучайных последовательностей для системы связи множественного доступа с кодовым разделением каналов

А. Ю. Сизякова*, Ю. В. Семина

Исследованы вопросы выбора ансамблей псевдослучайных последовательностей (ПСП) разного объема для формирования шумоподобных сигналов (ШПС) в системах связи множественного доступа с кодовым разделением (МДКР). Системам МДКР свойственны взаимные и собственные помехи. Взаимные помехи возникают при поступлении на приемник системы радиосигнала, модулированного «чужой» ПСП, собственные — при запаздывании радиосигнала, модулированного ПСП, относительно его копии в приемнике. Уровни помех определяются значениями, которые принимают взаимнокорреляционные функции (ВКФ) и боковые лепестки автокорреляционных функций (АКФ). Для выбора ансамбля ПСП критерии выбора были сформированы таким образом, чтобы снизить уровень взаимных и собственных помех в системе связи с МДКР. Предпочтительнее выглядит критерий, определяющий уровни взаимных помех. В соответствии с выбранными критериями в ансамбль включаются ПСП, обладающие наименьшими значениями наибольшего значения модулей ВКФ и наименьшими значениями боковых лепестков модуля АКФ. Рассмотрены подклассы Касами с периодом 1023, Лежандра с периодом 1031 и Холла с периодом 1051, а также усеченные до периода 1023 ПСП подклассов Лежандра и Холла. Для сравнения приведены подклассы *M*-последовательностей и ПСП Голда с периодом 1023. В соответствии со стандартами, определяющими характеристики систем МДКР, *M*-последовательности и ПСП Голда нашли широкое применение в подобных системах связи. Были проанализированы АКФ и ВКФ всех ПСП каждого из рассматриваемых подклассов. Выявлены конкретные ПСП рассматриваемых подклассов с наименьшими уровнями наибольших значений модуля ВКФ и боковых лепестков модуля АКФ. Уточнены верхние граничные значения для ВКФ и боковых лепестков АКФ ПСП, рассматриваемых подклассов. На основании полученных результатов выбраны ПСП подкласса Касами, удовлетворяющие выбранным критериям. Составлено несколько ансамблей ПСП Касами разного объема, обеспечивающих наименьший уровень взаимных помех в системе.

Ключевые слова: МДКР, ПСП, корреляционные характеристики.

* anna_u_s@mail.ru

Введение

Концепция обеспечения помехозащищенной связи для одновременной передачи команд управления по нескольким каналам связи получила широкое применение при работе связанных систем на основе космических аппаратов «Радуга», «Радуга-1», «Молния-3» единой спутниковой системы связи. Для перспективных систем спутниковой связи требуется существенное повышение помехоустойчивости, например, за счет использования множественного доступа с кодовым разделением каналов (МДКР) и шумоподобными сигналами (ШПС) с прямым расширением спектра (ПРС) псевдослучайными последовательностями (ПСП).

Каждая ПСП периода N задается последовательностью элементов: $y_i = \{a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,N}\}$; $a_{i,n} = \{+1, -1\}$; $i = 1, 2, \dots, L$; $n = 1, \dots, N$. Множество (ансамбль) ПСП объемом L , которые одновременно могут быть применены в системе с МДКР, обозначим Y , где $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_L\}$.

Для систем с МДКР характерны взаимные помехи [6, 13, 19], которые возникают при поступлении j -го радиосигнала, модулированного «чужой» j -й ПСП y_j , на i -й приемник системы. Для обеспечения достоверного функционирования системы с МДКР необходимо так выбрать ансамбль модулирующих ПСП Y , чтобы взаимные помехи не ухудшали помехоустойчивость каждого канала приемника.

Мощность взаимных помех зависит от уровня взаимокорреляционных функций (ВКФ) $R_{\text{ВКФ}}^{i,j}(\tau)$ всех пар ПСП ансамбля Y [11, 13]:

$$R_{\text{ВКФ}}^{i,j}(\tau) = \sum_{n=1}^N a_{i,n} a_{j,(n+\tau-1,N)+1},$$

где τ — произвольное целое число, задающее смещение ПСП y_i и y_j на целое число элементов ПСП, $i \neq j$, $i, j \in [1, L]$, N — период ПСП.

Для систем с МДКР характерны собственные помехи [6, 12]. Эти помехи возникают при запаздывании i -го радиосигнала, модулированного i -й ПСП y_i , относительно его копии в приемнике. Мощность собственных помех зависит от уровней боковых лепестков автокорреляционных функций (АКФ) $R_{\text{АКФ}}^i(\tau)$ при $\tau \neq 0$: ААКФ — аperiodической $R_{\text{ААКФ}}^i(\tau)$ и ПАКФ — периодической $R_{\text{ПАКФ}}^i(\tau)$ [1, 12, 13].

ААКФ ПСП y_i с периодом N рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{ААКФ}}^i(\tau) = \sum_{n=1}^{N-|\tau|} a_{i,n} a_{i,(n+|\tau|)},$$

где τ — целое число ($-(N-1) \leq \tau \leq (N-1)$), $i \in [1, L]$.

ПАКФ ПСП y_i рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{ПАКФ}}^i(\tau) = \sum_{n=1}^N a_{i,n} a_{i,(n+\tau-1,N)+1},$$

где τ — произвольное целое число, $i \in [1, L]$.

Известны соотношения [7], определяющие нижние граничные значения $(r_{\text{ВКФ}})_{\text{max}}$ и $(r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}}$ уровней ВКФ $R_{\text{ВКФ}}^{i,j}(\tau)$ и боковых лепестков ПАКФ $R_{\text{ПАКФ}}^i(\tau)$ для ПСП периода N полного набора объемом K . Значения $(r_{\text{ВКФ}})_{\text{max}}$ и $(r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}}$ определены границами Велча для $K \gg 1$ или Сидельникова для $K \geq N/2$:

$$\begin{aligned} (r_{\text{ВКФ}})_{\text{max}}^2 &= (r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}}^2 = 1/N, \quad (K \gg 1); \\ (r_{\text{ВКФ}})_{\text{max}}^2 &= (r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}}^2 = 2/N, \quad (K \geq N/2). \end{aligned} \quad (1)$$

Соотношения (1) позволяют оценить наименьшие уровни взаимных и собственных помех, определяемые значениями $R_{\text{ВКФ}}^{i,j}(\tau)$ и $R_{\text{ПАКФ}}^i(\tau)$.

Для уменьшения мощности взаимных и собственных помех необходимо использовать ПСП, у которых наибольшие значения модуля ВКФ $(R_{\text{ВКФ}}^{i,j})_{\text{max}}$ и боковых лепестков модуля ПАКФ $(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}}$ близки к $(r_{\text{ВКФ}})_{\text{max}}$ и $(r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}}$ (1).

В статье рассматриваются подклассы линейных ПСП: Касами, Лежандра, Холла. В соответствии со стандартом [15], определяющим характеристики систем МДКР, для разделения каналов связи широко используются M -последовательности (M -ПСП) и ПСП Голда. Характеристики M -ПСП и ПСП Голда используются для сравнения.

В современной радиотехнической литературе преобладают вопросы теории синтеза и формирования ПСП [1, 2, 9] и мало исследованы вопросы выбора ансамблей ПСП для ШПС ПРС в системах связи с МДКР.

Цель работы:

выявить конкретные ПСП подклассов Касами, Лежандра, Холла с периодом 1023, для которых значения $(R_{\text{ВКФ}}^{i,j})_{\text{max}}$ и $(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}}$ близки к $(r_{\text{ВКФ}})_{\text{max}}$ и $(r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}}$, рассчитанным по (1);

из этих ПСП составить один или несколько ансамблей Y объема L , $L \geq 3$.

Критерии выбора ПСП

Выбор ПСП для включения в ансамбль Y производится среди полного набора ПСП объемом K каждого из рассматриваемых подклассов в соответствии с критериями:

число L ПСП в ансамбле не меньше трех, $L \geq 3$:

$$\frac{\min}{y_i \Big|_{i=1}^K} \left[(R_{\text{ВКФ}}^{i,j})_{\text{max}} - (r_{\text{ВКФ}})_{\text{max}} \right]; \quad (2)$$

$$\frac{\min}{y_i \Big|_{i=1}^K} \left[(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}} - (r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}} \right]; \quad (3)$$

$$\frac{\min}{y_i \Big|_{i=1}^K} \left[(R_{\text{ААКФ}}^i)_{\text{max}} - (r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}} \right], \quad (4)$$

где $(r_{\text{ВКФ}})_{\text{max}}$ и $(r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}}$ заданы формулами (1).

При решении задачи выбран предпочтительный критерий (2). Тогда для включения ПСП y_i , $i \in [1, K]$ в ансамбль Y требуется, чтобы значения $(R_{\text{ВКФ}}^{i,j})_{\text{max}}$ мо-

дуля ВКФ каждой пары ПСП были близки к $(r_{\text{ВКФ}})_{\text{max}}^i$, а значения $(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}}$ и $(R_{\text{ААКФ}}^i)_{\text{max}}$ каждой ПСП были близки к $(r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}}$.

В табл. 1 приведены рассчитанные по формуле (1) теоретические нижние граничные значения ВКФ $(r_{\text{ВКФ}})_{\text{max}}$ и ПАКФ $(r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}}$ для рассматриваемых подклассов ПСП.

В статье приведены результаты выбора L ансамблей ПСП указанных подклассов ($L \geq 3$), одновременно удовлетворяющие критериям (2) — (4). Алгоритмы формирования полных наборов K рассматриваемых подклассов ПСП подробно описаны в [16].

Для получения искомого ансамбля ПСП Y объемом L необходимо рассчитать наибольшие значения $(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}}$, $(R_{\text{ААКФ}}^i)_{\text{max}}$ боковых лепестков модуля АКФ и наибольшие значения $(R_{\text{ВКФ}}^{i,j})_{\text{max}}$ модуля ВКФ для всех ПСП каждого подкласса.

Показатели корреляционных функций АКФ и ВКФ

В литературе [3 — 5, 7 — 9, 11] приведены уровни корреляционных функций для ПСП рассматриваемых подклассов, все они перечислены ниже.

ПСП Голда порождаются М-ПСП [7, 16] с периодом $N = 2^n - 1$, где n — разрядность регистра сдвига. ВКФ ПСП Голда имеет три значения [8]:

$$R_{\text{ВКФ}}^{i,j}(\tau) = \begin{cases} \left\{ \pm 2^{\frac{n+1}{2}} - 1; -1 \right\} & \text{при } n - \text{нечетном;} \\ \left\{ \pm 2^{\frac{n+2}{2}} - 1; -1 \right\} & \text{при } n - \text{четном.} \end{cases} \quad (5)$$

Значения боковых лепестков ПАКФ ПСП Голда ограничены сверху [8]:

$$(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}} \leq 2^{\frac{n+2}{2}} + 1. \quad (6)$$

ПСП Касами порождаются М-ПСП [4, 7, 16] с периодом $N = 2^n - 1$, где n — четное. ВКФ ПСП Касами совпадает с (5) и имеет три значения [9]:

$$R_{\text{ВКФ}}^{i,j}(\tau) = \left\{ \pm 2^{n/2} - 1; -1 \right\} \quad (7)$$

Значения боковых лепестков ПАКФ ПСП Касами ограничены сверху [4]:

$$(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}} \leq 2^{n/2} + 1. \quad (8)$$

Значения ВКФ ПСП Лежандра, порождаемых простым числом p [3, 5, 8, 16], ограничены сверху [11]:

$$(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}} \leq \frac{2,6}{\sqrt{p}}. \quad (9)$$

Информация об ограничениях на значениях боковых лепестков ААКФ ПСП Голда, Касами, Лежандра, ПАКФ ПСП Лежандра, АКФ и граничных значениях ВКФ ПСП Холла в литературе отсутствует. Эти характеристики получены авторами.

Далее проанализированы АКФ и ВКФ для всех ПСП Голда ($N = 1023$), Касами ($N = 1023$), Лежандра ($N = 1031$) и Холла ($N = 1051$). Периоды ПСП Лежандра и Холла задаются выбором простого порождающего числа p [14], выбранного наиболее близким к $N = 1023$. Также рассмотрены характеристики ПСП Лежандра и Холла, усеченных до периода $N = 1023 = 3 \cdot 11 \cdot 31$, равного периоду остальных рассматриваемых ПСП.

В [16] показано, что для $N = 1023$, $n = 10$ объем полного набора ПСП Голда, полученных из каждой порождающей М-ПСП, составляет $K = 1025$. На рис. 1, 2 представлен типичный вид АКФ ПСП Голда на примере ПСП, сформированной из М-ПСП, заданной порождающим полиномом $a(x) = x^9 + x^4 + 1$ [13].

Анализ показал, что уровни $(R_{\text{ААКФ}}^i)_{\text{max}}$ различаются для разных ПСП Голда общим числом $K = 1025$ и имеют значения от -10 до $-11,6$ дБ.

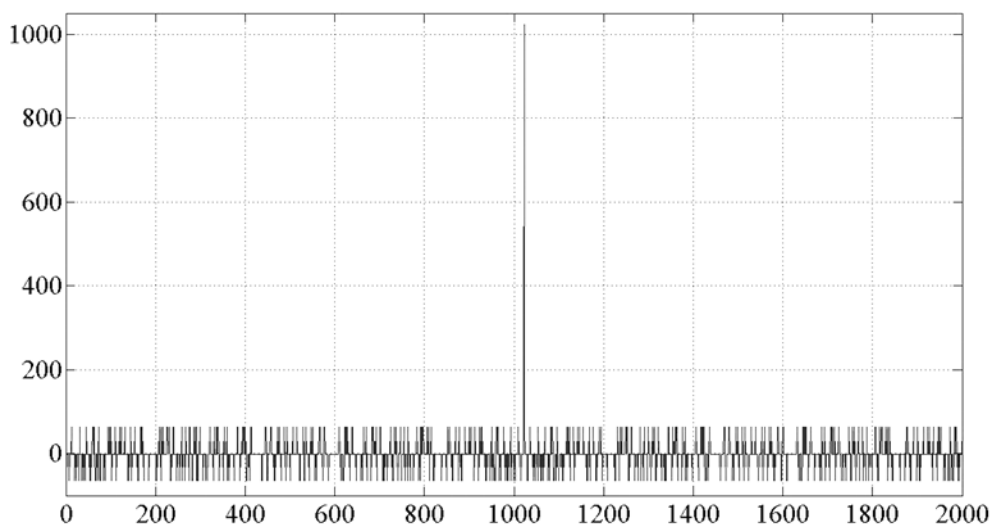
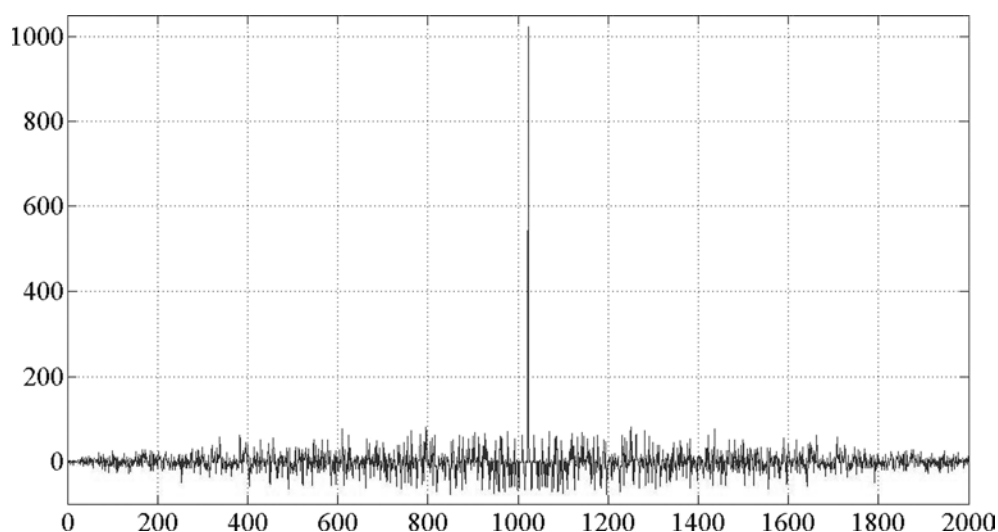
Известно, что ВКФ ПСП Голда трехуровневая, вид ВКФ можно найти в [13]. Наибольшее значение модуля ВКФ равно $-12,1$ дБ (6).

В [16] показано, что для $N = 1023$ объем полного набора ПСП Касами, полученных из каждой порождающей М-ПСП, составляет $K = 32$. Типичный вид АКФ ПСП Касами аналогичен графикам, представленным на рис. 1, 2. Для всех ПСП Касами этого периода уровни $(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}}$ одинаковы (12) и равны $-14,9$ дБ. Анализ показал, что уровни $(R_{\text{ААКФ}}^i)_{\text{max}}$ различаются для разных ПСП Касами и имеют значения от $-11,5$ до $-12,7$ дБ. ВКФ ПСП Касами трехуровневые (8). Модуль наибольшего значения ВКФ равен $-14,9$ дБ.

Таблица 1

Теоретические граничные значения ВКФ и ПАКФ

Тип ПСП	Период ПСП N	Число ПСП K	$(r_{\text{ВКФ}})_{\text{max}}, (r_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}}, \text{дБ}$
М-ПСП; Касами	1023	$\gg 1$	-15
Голда	1023	$\geq N/2$	$-13,5$
Лежандра	1031	$\geq N/2$	$-13,6$
Холла	1051	$\geq N/2$	$-13,6$

Рис. 1 Пример ПАКФ ПСП Голда, $(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}} = 65$ Рис. 2. Пример ААКФ ПСП Голда, $(R_{\text{ААКФ}}^i)_{\text{max}} = 81$

В [16] показано, что объем полного набора ПСП Лежандра с периодом $N = 1031$, полученных из порождающего числа $p = 1031$, равен $K = 1031$; объем полного набора ПСП Холла с периодом $N = 1051$, полученных из порождающего числа $p = 1051$, равен $K = 1051$.

На рис. 3 — 5 представлен типичный вид АКФ и ВКФ ПСП Лежандра.

Для ПСП Лежандра с периодом $N = 1031$ уровни $(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}}$ и $(R_{\text{ААКФ}}^i)_{\text{max}}$ различаются и имеют значения от -12 до -30 дБ для ПАКФ и от -10 до -13 дБ — для ААКФ. Следует отметить, что значение $(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}} = -30$ дБ имеет лишь одна ПСП Лежандра. Наибольшее значение модуля ВКФ ПСП Лежандра равно -12 дБ (формула (10)).

Типичный вид АКФ и ВКФ ПСП Холла аналогичен графикам, представленным на рис. 3 — 5 и отдельно не приводится.

Для всех ПСП Холла с периодом $N = 1051$ уровни $(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}}$ имеют значения от -12 до -30 дБ для разных

ПСП; $(R_{\text{ААКФ}}^i)_{\text{max}}$ от -10 до $-12,7$ дБ. Наибольшее значение модуля ВКФ ПСП Холла равно $-11,8$ дБ.

Рассчитанные значения $(R_{\text{ПАКФ}}^i)_{\text{max}}$, $(R_{\text{ААКФ}}^i)_{\text{max}}$, $(R_{\text{ВКФ}}^j)_{\text{max}}$ приведены в табл. 2, где указаны только те значения, которые имеют не менее 3 ПСП подкласса. Характеристики М-ПСП и ПСП Голда приведены для сравнения.

Также проведен расчет корреляционных характеристик для укороченных ПСП Лежандра и Холла с периодом, равным периоду ПСП Голда и Касами $N = 1023$. Оказалось, что ВКФ этих ПСП имеют высокий уровень (до 0 дБ), поэтому укороченные ПСП Лежандра и Холла ниже не рассматриваются.

По результатам анализа всех АКФ и ВКФ полных наборов ПСП рассматриваемых подклассов авторами дополнены характеристики (5) — (9) и получены отсутствующие в литературе граничные значения боковых лепестков ААКФ ПСП подклассов Голда (10),

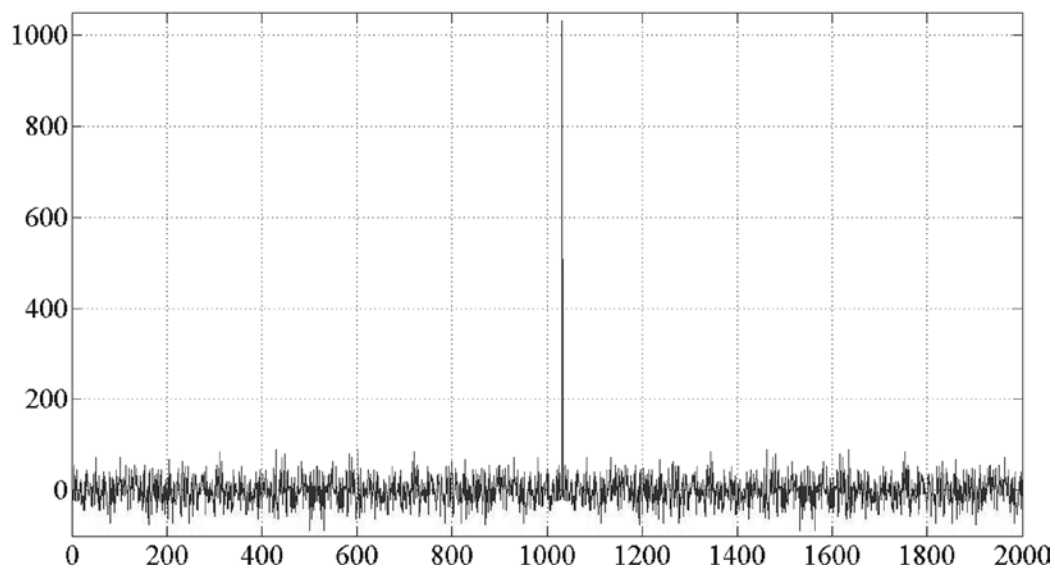


Рис. 3. Пример ПАКФ ПСП Лежандра, $(R_{\text{ПАКФ}})_{\text{max}} = 64,4$

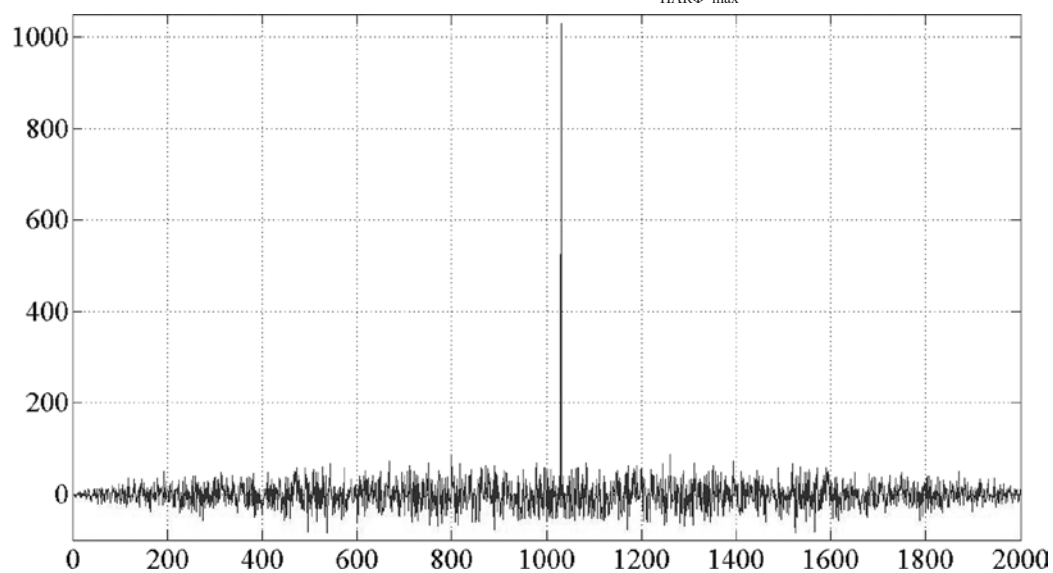


Рис. 4. Пример ААКФ ПСП Лежандра, $(R_{\text{ААКФ}})_{\text{max}} = 87$

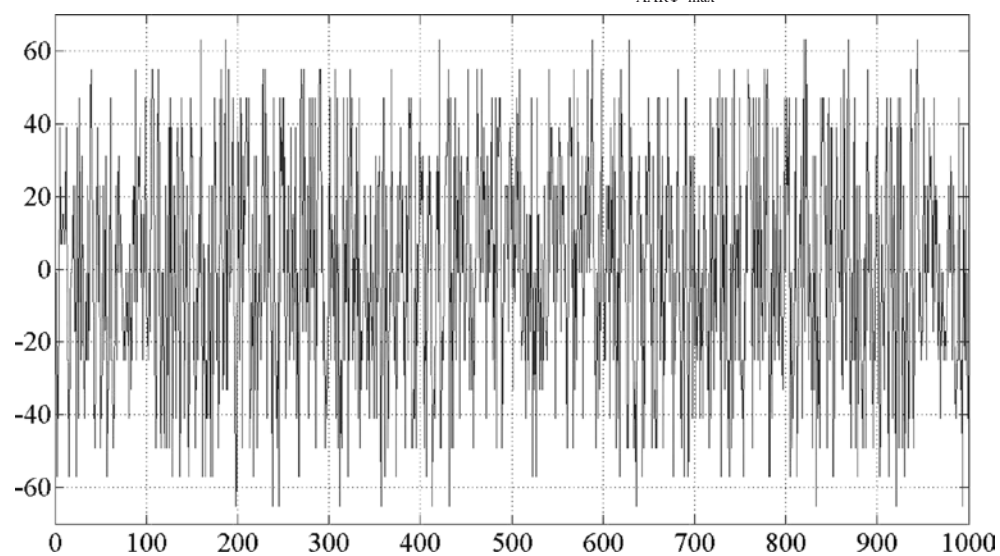


Рис. 5. Пример ВКФ ПСП Лежандра, $(R_{\text{ВКФ}})_{\text{max}} = 63$

Касами (11), ПАКФ ПСП Лежандра (12), граничные значения ВКФ ПСП Холла (13):

ААКФ ПСП Голда:

$$(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max} \leq \frac{n^2}{N}; \quad (13)$$

ААКФ ПСП Касами:

$$(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max} \leq \frac{2^{n-4} + n - 1}{N}; \quad (14)$$

ПАКФ ПСП Лежандра:

$$(R^i_{\text{ПАКФ}})_{\max} \leq 2\sqrt{p} + 1; \quad (15)$$

ВКФ ПСП Холла:

$$(R^{i,j}_{\text{ВКФ}})_{\max} \leq 2\sqrt{p}. \quad (16)$$

Ансамбли ПСП с требуемыми характеристиками

Из табл. 2 видно, что для рассматриваемых подклассов ПСП все ПСП подкласса Касами достигают границ, заданных (1). Для остальных подклассов ПСП значения ВКФ выше границы (1) на 3 дБ и более.

Учитывая, что предпочтительным выбран критерий (3), вначале рассмотрены значения $(R^{ij}_{\text{ВКФ}})_{\max}$ модуля ВКФ ПСП каждого подкласса. Из табл. 2 следует, что наименьшее значение $(R^{ij}_{\text{ВКФ}})_{\max}$ достигается только для ВКФ ПСП подкласса Касами. Поэтому для формирования искомого ансамбля Y использованы ПСП Касами.

Далее проанализированы свойства ПСП Касами по критериям (4) и (5).

Из табл. 2 очевидно, что по критерию (4) значения $(R^i_{\text{ПАКФ}})_{\max}$ для ПСП Касами выше значений $(R^i_{\text{ПАКФ}})_{\max}$ для М-ПСП на 15 дБ. По критерию (5) значения $(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max}$ для ПСП Касами на 1 — 2 дБ больше значений $(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max}$ для М-ПСП. Наименьшее значение $(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max}$, позволяющее сформировать ансамбль из четырех М-ПСП, составляет $(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max} = -15$ дБ. Однако уровни $(R^{ij}_{\text{ВКФ}})_{\max}$ для этих четырех М-ПСП достаточно большие (от -12 до $-4,3$ дБ).

Значения $(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max}$ для ПСП подклассов Касами, Голда, Лежандра и Холла отличаются между собой не более, чем на 1,5 дБ.

Искомый ансамбль Y составлен из ПСП Касами с $(R^{ij}_{\text{ВКФ}})_{\max} = -14,9$ дБ и наименьшими значениями $(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max}$.

В табл. 3 приведены номера ПСП Касами, которые образуют 4 ансамбля разного объема L . Ограничивая $(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max}$ значениями от $-12,5$ до $-12,2$ дБ, можно получить ансамбли ПСП объема $L = 3, 6, 9$ и 16 . Показано, что при ослаблении на 0,3 дБ требований к $(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max}$ объем ансамбля можно увеличить более чем в 5 раз.

Номер i (см. столбец 3, табл. 3) определяет ПСП Касами u_i ; децимированная М-ПСП задерживается на i символов относительно исходной и поэлементно суммируется с ней [16]. Все ПСП Касами сформированы из М-ПСП с порождающим полиномом $a(x) = x^9 + x^4 + 1$ [13].

На основании полученных результатов для использования в системах связи с МДКР рекомендуется использовать ансамбли ПСП Касами, перечисленные в табл. 3.

Таблица 2

Значения $(R^i_{\text{ПАКФ}})_{\max}$, $(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max}$, $(R^{i,j}_{\text{ВКФ}})_{\max}$

Подкласс	М-ПСП	Голда	Касами	Лежандра	Холла
Объем K	60	1025	32	1031	1051
Период N	1023	1023	1023	1031	1051
$(R^i_{\text{ПАКФ}})_{\max}$, дБ	-30	-12	-14,9	[-12]	[-12]
$(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max}$, дБ	[-15; -13,7]	[-11,6; -10]	[-12,7; -11,5]	[-13; -10]	[-12,7; -10]
$(R^{i,j}_{\text{ВКФ}})_{\max}$, дБ	[-12,1; -4,3]	-12,1	-14,9	-12	-11,8

Таблица 3

Ансамбли ПСП Касами

$(R^i_{\text{ААКФ}})_{\max}$	Объем L ансамбля Y	Номера i последовательностей, входящих в полученный ансамбль
1	2	3
-12,2	16	4, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 16, 17, 19, 21, 24, 25, 26, 28, 30
-12,3	9	4, 8, 9, 19, 21, 25, 26, 28, 30
-12,4	6	4, 25, 26, 28, 30, 11
-12,5	3	4, 28, 30

Выводы

В статье рассмотрены АКФ и ВКФ ПСП подклассов Голда, Касами, Лежандра, Холла. Уточнены верхние граничные значения для ВКФ и боковых лепестков АКФ ПСП. Сформированы критерии выбора ансамблей ПСП, используемых для ШПС ПРС в системах связи с МДКР. На основании полученных результатов проведен выбор ансамблей ПСП Касами, обеспечивающих наименьший уровень взаимных помех в системе.

Литература

1. **Гайворонский Д.В.** Разработка предложений по модернизации пользовательского радиointерфейса спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС // Дисс. ... канд. техн. наук. М.: Московский технический университет связи и информатики, 2010.
2. **Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В.** Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб.: Наука и Техника, 2005.
3. **Варакин Л.Е.** Теория сложных сигналов. М.: Советское радио, 1970.
4. **Ипатов В.П.** Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992.
5. **Свердлик М.Б.** Оптимальные дискретные сигналы. М.: Советское радио, 1975.
6. **Диксон Р.К.** Широкополосные системы. М.: Связь, 1979.

7. **Ипатов В.П.** Широкополосные сигналы. Wiley, 2004.

8. **Gold R.** Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing // IEEE Trans. Inform. Theory. 1967. V. 13. P. 619 — 621.

9. **Xiang Q.** On balanced binary sequences with two-level autocorrelation functions. // IEEE Trans. Inform. Theory. 1998. V. 44. N 7. P. 975 — 986.

10. **Едемский В.А., Антонова О.В.** Линейная сложность обобщенных циклотометрических последовательностей с периодом $2^m p^n$ // Прикладная дискретная математика. Теоретические основы прикладной дискретной математики. 2012. № 3 (17). С. 5 — 12.

11. **Калмыков В.В., Юдачев С.С.** Ансамбли составных кодовых последовательностей. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 1994. № 4. С. 101 — 106.

12. **Пестряков В.В.** Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. М.: Советское радио, 1973.

13. **Варакин Л.Е.** Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Советское радио, 1985.

14. **Hall M.** A survey of Difference Sets // Proc. Am. Math. Soc. 1956. V. 7. P. 975 — 986.

15. **Cdma 2000 m2m numbering recommendations system requirements document.** Current. Telecommunications Industry Association (TIA), 2012.

16. **Сизякова А.Ю., Семина Ю.В.** Алгоритмы формирования ПСП для МДКР // Наука и образование. 2015. № 6 (13). С. 18 — 20.

Статья поступила в редакцию 14.01.2016