УДК 621.396

О.А. ЗАМУЛА, д-р техн. наук, В.Л. МОРОЗОВ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Введение

Использование оптоволокна в широкополосных магистральных соединениях и создание технологии пассивных оптических сетей привело к бурному росту интереса к использованию множественного доступа с кодовым разделением абонентов. Для оптических сетей применяются оптические CDMA (optical CDMA – OCDMA), в которых двоичная последовательность отображает пользовательский адрес и соответствует каждому биту передаваемой информации.

В OCDMA основной целью является распознавание сигналов конкретного пользователя среди множества других сигналов. Также важной задачей является увеличение количества пользователей, одновременно работающих в системе. В этом случае необходимо использовать кодовые последовательности с улучшенными корреляционными, ансамблевыми, структурными характеристиками. Другими словами, последовательности, применяемые для расширения спектра, должны обладать малыми значениями боковых лепестков функций авто- и взаимной корреляции, значительным объемом (ансамблем), иметь сложный закон построения.

В статье рассмотрены различные классы дискретных последовательностей, которые могут найти применение в OCDMA системах.

Ортогональные последовательности

В [1 – 3] были представлены так называемые оптические ортогональные коды (последовательности) (ООС). Данный класс последовательностей имеет низкий кодовый вес. Более того, число таких последовательностей значительно меньше, чем количество доступных последовательностей той же длины последовательностей Уолша – Адамара, которые используются в радиокоммуникациях. Для увеличения числа кодовых последовательностей необходимо увеличить длину кода, для чего возможно использование источников с сверхкороткими импульсами, у которых ширина импульса значительно меньше чем длительность бита.

Искомые дискретные последовательности должны удовлетворять следующим условиям:

1) иметь максимальное пиковое значение автокорреляционной функции;

2) иметь минимальные значения боковых лепестков функции взаимной корреляции;

3) иметь минимальные значения боковых лепестков автокорреляционной функции.

При выполнении условий (1) и (2) помехи множественного доступа будут минимальны, в то время как выполнение условия (3) упрощает процедуру синхронизации процесса обработки сигналов.

Взаимная корреляция $R_{CiCj}(\tau)$ двух последовательностей $C_i(t)$ и $C_j(t)$ определяется как

$$R_{C_i C_j}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_i(t) C_j(t+\tau)\,dt\,, \tag{1}$$

где i, j = (1, 2, ...) и сигнатура сигнала $C_k(t)$ определена как

$$C_k(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_k(n) u_{T_c}(t - nT_c), \tag{2}$$

где k=(1,2,...), $C_k(n) \in \{1,0\}$, N – период последовательности, T_c – длительность чипа. Дискретная корреляционная функция любых двух кодовых последовательностей $C_i(n)$ и $C_j(n)$ может быть представлена как:

$$R_{C_i C_j}(m) - \sum_{n=0}^{N-1} C_i(n) C_j(n+m), \tag{3}$$

где m=(...,−1,0,1,...). Сумма в аргументе $C_j(n+m)$ рассчитывается по модулю N; $[x]_y$ следует читать как x по модулю y.

Оптические ортогональные последовательности (ООП) могут быть представлены четырьмя параметрами: N, w, λ_a, λ_c, где N – длина кода; w – кодовый вес (количество единиц в последовательности); λ_a – верхняя граница значения автокорреляционной функции для ненулевого сдвига и λ_c – верхняя граница для значения взаимной корреляции. Условия для ООП можно записать в виде

$$R_{C_i C_j}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} C_i(n) C_j(n+m) \le \lambda_c, \text{ для } \forall_m \tag{4}$$

и

$$R_{C_i C_j}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} C_i(n) C_j(n+m) \le \lambda_a, \text{для} [m]_n 0 \tag{5}$$

Представляет особый интерес случай, когда: $\lambda_a = \lambda_c\ \lambda$, т.е. когда ООП представлен как (N, w, λ) (так называемые оптимальные ООП). C – мощность множества ООП, т.е. размер ансамбля, который определяет количество кодовых слов, содержащихся в комбинации. Наибольший допустимый размер ансамбля при условии: (N, w, λ), равен φ(N,w,λ). С учетом границы Джонсона [1], φ(N, w, λ) должно удовлетворять условию [1]:

$$\phi(N, w, \lambda) \le \frac{(N-1)(N-2)\ldots(N-\lambda)}{w(w-1)(w-2)\ldots(w-\lambda)}. \tag{6}$$

Для случая, когда $\lambda_a = \lambda_c = 1$, мощность множества ограничена сверху значением

$$|C| \le \left\lfloor \frac{(N-1)}{w(w-1)} \right\rfloor, \tag{7}$$

где ⌊x⌋ означает наибольшее целое число меньшее или равное x.

Для параметров ООП: N=13, w=3, λ=1, кодовый набор $C_i \in$ {1100100000000, 1010000100000}. Очевидно, что автокорреляционная функция такого сигнала равна кодовому весу w = 3. Тот же кодовый набор может быть представлен в виде: $C_i \in \{(1,2,5),(1,3,8)\} \mathrm{mod}(13)$, где элементы в наборе представляют позиции символов 1 в кодовой последовательности с длиной кодовой комбинации равной 13.

Для создания ООП используют различные подходы. Одним из подходов является так называемый комбинаторный подход, основным достоинством которого является возможность генерировать оптимальный кодовый набор с минимальным значением взаимной корреляцией и необходимой мощностью ансамбля сигналов для заданного алгоритма. При этом значительно упрощается процесс создания сигнатур последовательностей. Для ООС при условии: (N, w, λ), где λ – наибольшее значение функции взаимной корреляции, N – пользовательская длина кода, w – вес кода, генерируются так называемые соответствующие последовательности индексов {a,b,c,d} с соответствующей мощностью множества:

$$\phi(N, w, 1) = |C|_{(n,w,1)} = \left\lfloor \frac{(N-1)}{w(w-1)} \right\rfloor. \tag{8}$$

На рис. 1 изображена модель создания ООС на основе индексационных терминов последовательности {a,b,c,d}.

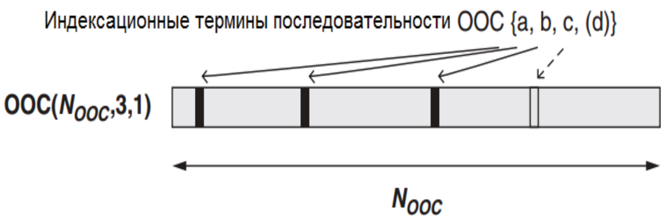


Рис. 1. Модель создания ООП

Простые последовательности

Простые последовательности разрабатывались для асинхронных OCDMA, и были впервые предложены в [4]. Генерация простых последовательностей включает два этапа.

Первый этап заключается в генерации набора простых последовательностей $S_x=(S_{x0},S_{x1},...,S_{xj},...,S_{xP-1})$ Sx_j, в полях Галуа, GF(P) = (0, 1, 2,... , j,... , P−1), где $P \geq 3$ – простое число. Последовательность S_x может быть получена умножением каждого элемента на j: $x,j \in GF(P) \leftrightarrow x,j \in \{0,1,2,...,P-1\}$, по модулю P в соответствии с (9). Следовательно, получим P различных простых последовательностей S_x:

$$S_{x_j} = (x \times j) mod(P). \tag{9}$$

На втором этапе каждый простой код S_x преобразуется в бинарную последовательность $C_x=(C_{x0},C_{x1},...,C_{xj},...,C_{xP2-1})$ с кодовой длиной P^2 в соответствии с правилом

$$C_{x_i} - \begin{cases} 1, \text{при } i = S_{x_j} + jP, j = 0,1, \dots, P-1 \\ 0 \end{cases} \tag{10}$$

Кодовые комбинации с длиной кода P^2 и кодовым весом P имеют P различных последовательностей.

Аналитическая запись функций авто- и взаимной корреляции для любой пары кодовых последовательностей C_n и C_m имеет вид

$$C_n C_m = \begin{cases} P, \text{при } m = n; \\ 1, \text{при } m \neq n; \end{cases} \tag{11}$$

где m, n ∊ {1,2,...,P}.

Очевидно, что в соответствии с (11) пиковое значение функции автокорреляции (при m = n) равно P. Значение функции взаимной корреляции равно «1», в каждый момент синхронизации T.

Основным недостатком простых кодовых последовательностей является ограниченное число допустимых кодов (малая мощность набора последовательностей), что ограничивает возможность обслуживания большого числа пользователей телекоммуникационной системы.

Модифицированные простые последовательности

Для преодоления недостатка простых кодов в [4] предложены модифицированные простые последовательности (МПП). Применение данных последовательностей дает возможность поддерживать большее количество пользователей в системе и обеспечить низкий уровень помех множественного доступа.

Кодовой набор модифицированных последовательностей может быть получен посредством P−1 сдвигов простых последовательностей. Вследствие этого доступное количество сигнатур последовательностей может быть расширено до P^2 с P группами и P кодами, где $P \geq 3$ – простое число [6].

Сдвиг исходной последовательности S_{xj} влево (или вправо) осуществляют с помощью генератора. Таким образом, получают новую последовательность с временным сдвигом на t тактов: $S_{xt} = (S_{xt0}, S_{xt1}, ..., S_{xtj}, ..., S_{xt(P-1)})$. Указанные операции позволяют на основе увеличения объема системы последовательностей значительно увеличить число пользователей телекоммуникационной системы. Подобная технология отображения используется при создании бинарных последовательностей:

Данный метод позволяет синтезировать набор кодовых комбинаций – МПП. Таким образом, объем системы модифицированных последовательностей с кодовой длиной P^2 и кодовым весом P составляет P^2 различных кодовых последовательностей. В системах OCDMA с использованием МПП количество возможных пользователей возрастет до P^2, что в P раз больше чем для случая простых кодов.

Аналитический вид функций авто- и взаимной корреляции для любой пары МПП последовательностей C_n и C_m имеет вид [4]:

$$C_n C_m = \begin{cases} P, \text{для } m = n \\ 0, \text{для } m \neq n, \text{для одной группы,} \\ 1, \text{для } m \neq n, \text{для разных групп} \end{cases} \quad (13)$$

где m, n ∈ $\{1,2,...,P^2\}$. Следует отметить, что значения взаимной корреляции для двух последовательностей внутри одной группы строго ортогональны. Однако для последовательностей, расположенных в двух различных группах, значение взаимной корреляции равно единице, а пиковое значение автокорреляционной равно P.

Предположим, что есть три последовательности вида:

$S_{1,0}$ = {10000 01000 00100 00010 00001},

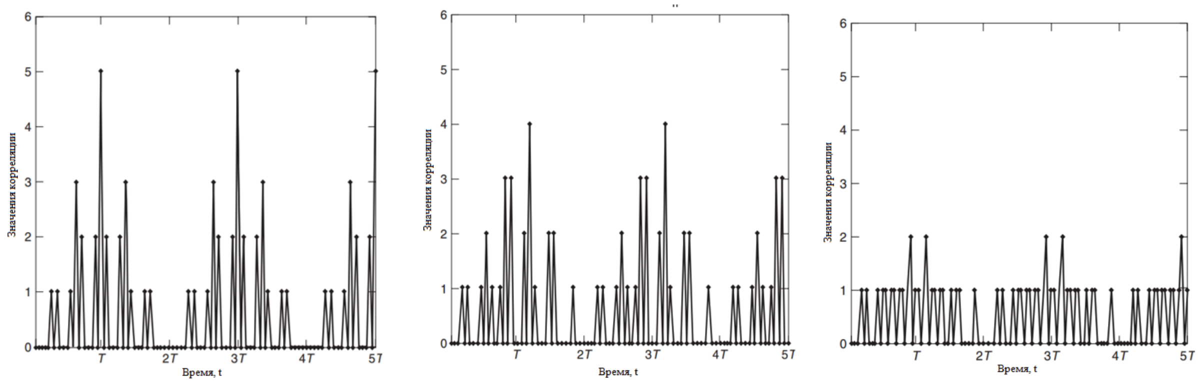
$S_{2,0}$ = {10000 00100 00001 01000 00010},

$S_{2,1}$ = {00100 00001 01000 00010 10000}.

На рис. 2, *а* представлены автокорреляционные свойства модифицированной последовательности $S_{2,1}$. Максимальное пиковое значение функции равно 5 в каждой момент синхронизации T, для информационной последовательности 10101. Значения взаимной корреляции последовательностей МПП, расположенных в одной группе, $S_{2,0}$ и $S_{2,1}$, для одного информационного потока, представлено на рис. 2, *б*. Как видно из рисунка, значение функции взаимной корреляции равно нулю в каждый момент синхронизации T.

Наконец, рис. 2, *в* иллюстрирует значение взаимной корреляции $S_{1,0}$ и $S_{2,1}$ (две модифицированные последовательности из различных групп). В этом случае значение взаимной корреляции равно «1» в каждый момент синхронизации T, что свидетельствует об уменьшении значения взаимной корреляции между указанными кодовыми последовательностями и, таким образом, уменьшении уровня взаимных помех.

Благодаря хорошим свойствам синфазной корреляции модифицированные последовательности являются подходящим вариантом для синхронных OCDMA с большим числом допустимых кодовых последовательностей и, следовательно, большим числом пользователей (при той же пропускной способности). При этом имеют место малые значения боковых лепестков функции взаимной корреляции. С другой стороны, длина кода играет значительную роль для повышения показателей системной эффективности телекоммуникационной системы с точки зрения помех множественного доступа, вероятности ошибок на бит и корреляционных свойств.



а *б* *в*

Рис. 2. Значение функции авто- и взаимной корреляции
для модифицированных простых последовательностей

Новые модифицированные простые последовательности

Новые модифицированные последовательности, представленные в [1], генерируются повторением последней потоковой последовательности предыдущей модифицированной последовательности и сдвигом той же группы при помощи субпоследовательности длиной P. Кодовый ансамбль имеет P групп, каждая из которых имеет P кодов. Длина каждого кода $P^2 + P$ и вес: P + 1, где P ≥ 3 простое число. Следовательно, общее число допустимых последовательностей – P^2. Имеем новые МПП для P = 5:

$S_{1,1}$ = {01000 00100 00100 00001 10000},
$S_{1,3}$ = {00010 00001 10000 01000 00100},
$S_{2,2}$ = {00001 01000 00010 10000 00100},
$S_{2,3}$ = {01000 00010 10000 00100 00001},
$S_{3,2}$ = {01000 00001 00100 10000 00010}.

Функции авто- и взаимной корреляции для любой пары МПП C_n и C_m в дискретной форме [1] имеют вид:

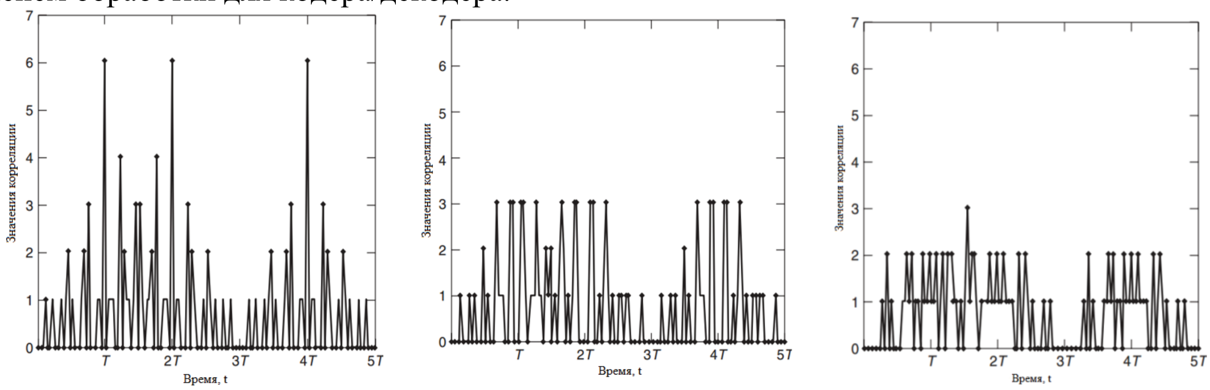
$$C_nC_m = \begin{cases} P+1, \text{для } m=n \\ 0, \text{для } m \neq n, \text{одна группа} \\ \leq 2, \text{для } m \neq n, \text{разные группы} \end{cases}, \quad (14)$$

где m, n ∈ {1, 2, ..., P^2}.

Свойства автокорреляции и взаимной корреляции МПП для информационного потока 11010 и P = 5 проиллюстрированы на рис. 3, *а* – *в* соответственно. Рис. 3, *а* демонстрирует автокорреляционные свойства последовательности, $S_{2,3}$, – для значения P=6 в каждый момент синхронизации T.

На рис. 3, *б* значение взаимной корреляции $S_{1,1}$ и $S_{1,3}$ последовательностей в одной группе равно нулю в каждый момент синхронизации T. Рис. 3, *в* иллюстрирует свойства корреляции для $S_{3,2}$ и $S_{2,2}$ последовательностей, которые относятся к различным группам. Как следует из рисунка, значения взаимной корреляции меньше или равны 2 в каждый момент синхронизации T.

В результате, увеличение кодовой длины приводит к улучшению корреляционных свойств последовательностей и, следовательно, к повышению производительности OCDMA систем в процессе детектирования. Однако увеличение кодовой длины в целях повышения производительность системы, снижает скорость передачи данных в системах. Следовательно, кодовая длина не может увеличиваться до бесконечности из-за ограничений, связанных с временем обработки для кодера/декодера.



а *б* *в*

Рис. 3. Значение функции авто- и взаимной корреляции для новых модифицированных простых последовательностей

Основными факторами, негативно влияющими на производительность сетей OCDMA, являются ограничения, вызванные значениями боковых лепестков функций авто(λ_a)- и взаимной корреляции λ_c и помехи множественного доступа. Отметим, что значение взаимной корреляции подразумевает влияние пользовательских сигналов друг на друга. Соответственно, для OCDMA коммуникаций предпочтительны последовательности с минимальным значением взаимной корреляции λ. С другой стороны, значения боковых лепестков функций автокорреляции связаны с ансамблевыми свойствами (объемом системы сигналов). Данные аспекты ограничивают пропускную способность системы.

Сравнив ООС (λ_c=1) с семейством простых последовательностей ($\lambda_c \leq 2$), можно сделать вывод о том, что простые последовательности по-прежнему предпочтительнее благодаря тому факту, что кодер/декодер для простых кодов может легко быть реализован, например на оптических линиях с задержкой.

Уплотненные модифицированные простые последовательности

За прошедшие два десятилетия были приложены большие усилия для исследования новых оптических адресных кодов, которые имеют оптимальные ортогональные свойства или идеальными значениями взаимной корреляции. Мотивация по созданию новых семей оптических последовательностей для приложений OCDMA исходит из необходимости корректно различать искомые пользовательские сигналы среди множества остальных. В [1, 5] представлены уплотненные модифицированные простые последовательности (УМПП).

УМПП генерируют при помощи уплотнения МПП с использованием субпоследовательности длиной P. Следовательно, кодовая длина будет расширена до P^2+P и кодовый вес также увеличится до P+1, где P≥ 3 – простое число. Для генерации УМПП информационная последовательность каждой группы уплотняется в МПС последовательности той же группы. Для УМПС с P = 5 имеем:

$S_{1,1}$ = {01000 00100 00010 00001 10000},

$S_{2,3}$ = {01000 00010 10000 00100 00001}.

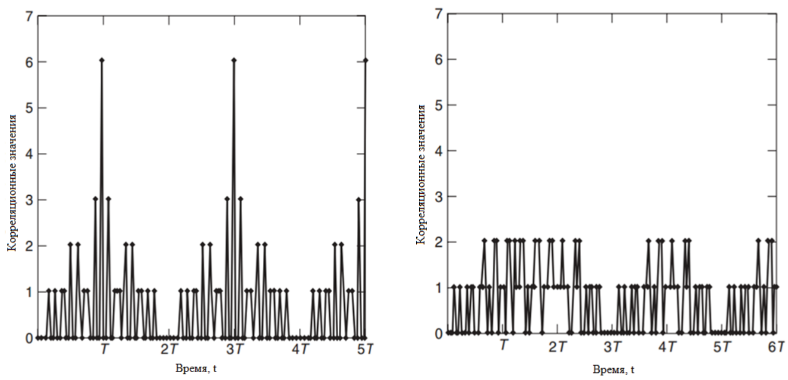
Функции автокорреляции и взаимной корреляции для любой пары УМПП последовательностей C_n и C_m в дискретном виде могут быть представлены в виде [1, 5]:

$$C_n C_m = \begin{cases} P+1 \; m = n; \text{ автокорреляция} \\ 1 \; m \neq n; \text{ взаимная корреляция} \end{cases} \qquad (15)$$

где m, n ∈ {1, 2, ..., P2}.

Выражение (15) показывает, что УМПП имеют значение взаимной корреляции, равное единице, в то время как значение автокорреляционной функции равно P+1. Значения авто- и взаимной корреляционных функций УМПП приведены на рис. 4, *а* и *б* соответственно.

На рис. 4, *а* приведены значения автокорреляционной функции УМПП последовательности $S_{1,1}$. Очевидно, что максимальное пиковое значение равно шести, что и ожидалось от информационного потока 10101. В то же время рис. 4, *б* демонстрирует значение взаимной корреляции $S_{1,1}$ и $S_{2,3}$ УМПП для одного и того же информационного потока. Как видно из рис. 4, *б*, в большинстве случаев значения взаимной корреляции равны единице. Следовательно, последовательности с низкими значениями взаимной корреляции могут быть использованы в системах OCDMA с прямым расширением спектра для ограничения многопользовательских помех.



а *б*

Рис. 4. Значения функции авто- и взаимной корреляции для УМПП

Групповые уплотненные модифицированные простые последовательности

Групповые уплотненные модифицированные последовательности (ГУМПП) генерируются путем уплотнения описанных выше двух информационных последовательностей со сдвигом в той же группе. При этом необходимо соблюдать порядок уплотнения, иначе это приведет к увеличению значения взаимной корреляции. Две последовательности объединяются в одну последовательность, и при этом длина кода увеличивается. Указанное приводит к увеличению скорости передачи чипов, что делает данное семейство простых последовательностей более защищенным, т.е. снижает вероятность перехвата данных. Важно отметить, что уплотненные последовательности могут создаваться не только из последних двух информационных последовательностей МПП, но также из любых двух информационных последовательностей МПП. Это возможно благодаря уникальности каждой информационной последовательности МПП, что делает уникальной каждую кодовую последовательность. Данное кодовое семейство также имеет P групп, в каждой их которых есть P кодов. Длина каждого кода составляет P^2+2P, а вес – P + 2 с общим числом доступных последовательностей – P^2. Для P=5 имеем ГУМПП следующего вида:

$S_{1,0}$ = {10000 01000 00100 00010 00001}{00100 00010},
$S_{1,2}$ = {00100 00010 00001 10000 01000}{00001 10000},
$S_{3,2}$ = {01000 00001 00100 10000 00010}{00100 10000},
$S_{3,3}$ = {00001 00100 10000 00010 01000}{10000 00010},
$S_{4,0}$ = {10000 00001 00010 00100 01000}{00010 00100},
$S_{4,1}$ = {00001 00010 00100 01000 10000}{00100 01000},
$S_{4,4}$ = {01000 10000 00001 00010 00100}{00001 00010}.

Каждый код состоит из двух частей: МПП и групповой информационной последовательности (ГИП). К примеру, для кода $S_{4,0}$, МПП часть – {10000 00001 00010 00100 01000} и ГИП часть – {00010 00100}, которые являются последними двумя информационными последовательностями $S_{4,4}$ в той же группе. Таким образом, уплотняя последние две информационные последовательности $S_{4,4}$ МПП, которые {00010 00100} в $S_{4,1}$ МПП, генерируется $S_{4,1}$ ГУМПП.

Функции автокорреляции и взаимной корреляции для любой пары ГУМПП последовательностей (например, C_n и C_m) имеют вид

$$C_n C_m = \begin{cases} P \mid 2 & m = n \\ 0 & m \neq n, m \text{ и } n \text{ в одной группе} \\ \leq 2 & m \neq n, m \text{ и } n \text{ в разных группах} \end{cases}. \tag{16}$$

где m, n ∈ {1, 2, ..., P^2}.

Рис. 5 иллюстрирует автокорреляционную функцию для $S_{4,0}$ ГУМПП. Как следует из рисунка, P+2=5+2=7 – является максимумом автокорреляционного значения для информационной последовательности 11010. На рис. 6, *а* представлен вид функции взаимной корреляции для кодов $S_{1,0}$ и $S_{1,2}$. Как следует из рисунка, имеют место нулевые значения боковых лепестков функции взаимной корреляции, поскольку указанные коды принадлежат одной группе. Значения взаимной корреляции $S_{3,2}$ и $S_{4,0}$ приведены на рис. 6, *б*. Очевидно, что значение синфазной взаимной корреляции равно единице в каждый момент синхронизации T, так как последовательности не относятся к одной группе. Отметим, что максимум синфазной функции взаимной корреляции двух последовательностей из разных групп ($S_{3,3}$ и $S_{4,4}$ и информационной последовательности 11010) не превышает значения 2 (рис. 6, *в*). Значение функции взаимной корреляции в момент синхронизации (как видно из рис. 6, *в*) – значительно, а значения функции корреляции внутри длительности бита т.е. $nT<t<(n+1)T$ – невелико.

ГУМПП увеличивают длину кода, сохраняя хорошие корреляционные свойства семейства простых кодов, что обеспечивает безопасность передачи данных в OCDMA. Отметим, что длина кода – важное свойство кодовых последовательностей, применяемых для расширения спектра, которое влияет на производительность системы, уменьшение влияния помех множественного доступа и, соответственно, вероятность ошибок.

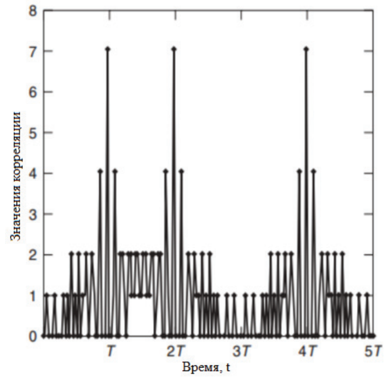
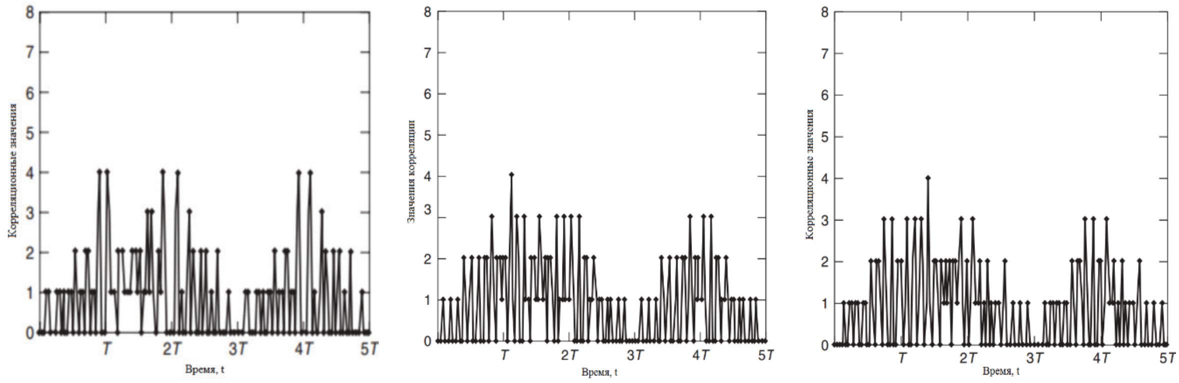


Рис. 5. Автокорреляционные значения для ГУМПП



а *б* *в*

Рис. 6. Значения взаимной корреляции для ГУМПП

Выводы

Рассмотрены некоторые классы двоичных последовательностей (простые последовательности, модифицированные простые последовательности, новые модифицированные простые последовательности, уплотненные модифицированные последовательности, групповые уплотненные модифицированные последовательности), которые вследствие хороших корреляционных и ансамблевых свойств могут найти применение в информационных технологиях передачи данных в современных телекоммуникационных системах. Результаты исследований показали, что наиболее предпочтительными (из представленных для использования в OCDMA системах) являются групповые уплотненные модифицированные последовательности. Указанное обусловлено, прежде всего, улучшенными ансамблевыми и корреляционными свойствами данного класса последовательностей, что позволяет повысить помехоустойчивость приема сигналов и скрытность функционирования телекоммуникационной системы.

Список литературы: 1. *Hooshang* Ghafouri-Shiraz, M. Massoud Karbassian. (2012) Optical CDMA networks: principles, analysis and applications John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, UK. 2. *Maric, S.V.* New family of algebraically designed optical orthogonal codes for use in CDMA fiber optic networks / Maric. // Electronics Letters. – 1993. – №29. – С. 538–539. 3. *Gu F.* Construction of two-dimensional wavelength/time optical orthogonal codes using difference family / F. Gu, J. Wu. // Journal of Lightwave Technology. – 2005. – №23. – С. 3642–3652. 4. *Kwong W.C.* Performance comparison of asynchronous and synchronous code-division multiple-access techniques for fiber-optic local area networks / W.C.Kwong, P.A. Perrier, P.R. Prucnal // IEEE Transactions on Communications. – 1991. – №39. – С. 1625–1634. 5. *Liu, M.Y.* Cochannel interference cancellation via employing a reference correlator for synchronous optical CDMA system / M. Y. Liu, H. W. Tsao // J. Microw. & Opt. Tech. Let. – 2000. – №25. – С. 390–392. 6. *Griner, U.N.* A novel bipolar wavelength–time coding scheme for optical CDMA systems / Griner U.N., Arnon S. // IEEE Photonics Tech. Letters. – 2004. – №16. – С. 332–334. 7. *Yang, G.C.* Performance analysis of optical CDMA with prime codes / Yang G. C., Kwong W. C. // Electronics Letters. – 1995. – №31. – С. 569–570.

Харьковский национальный
университет имени В.Н. Каразина
Поступила в редколлегию 11.09.2016