

2. Шкарлет Ю. М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1974.
3. Буденков Г. А., Гуревич С. Ю. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля (обзор) // Дефектоскопия. 1981. № 5. С. 5—33.
4. Чесаков Л. И. К вопросу о согласовании импедансов электроакустического преобразователя и газовой среды в приборах контроля уровня // Труды НИИТеплоприбор, 1973. № 80. С. 111—117.
5. Горбатов А. А., Рудашевский Г. Е. Акустические методы измерения расстояний и управления. М.: Энергоиздат, 1981.
6. Волосский В. П. Разработка бесконтактной ультразвуковой эхолокации пластмассовых сред: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. наук. М., 1985.
7. Patankar V. H. Chaurasia Reetesh and Nair Pradeep. Design and Development of Instrumentation for Air-Coupled Ultrasonics // Proc. National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation, NDE 2009. P. 185—189.
8. Бражников Н. И., Скрипалев В. С. Неразрушающий контроль материалов, изделий и сварных соединений. М.: НИИИН, 1974. С. 109—110.
9. Козлов И. Н. и др. Бесконтактный ультразвуковой контроль многослойных конструкций // Неразрушающие методы и средства контроля изделий и конструкций из неметаллов. Л., 1978. С. 18—21.
10. Автоматизированная бесконтактная ультразвуковая дефектоскопия крупногабаритных объектов из ПКМ (в том числе с сотовым наполнителем) [Офиц. сайт]. <http://6212.ua.all.biz/avtomatizirovannaya-beskontaktnaya-ultrazvukovaya-g1374493> (дата обращения 12.09.2014 г.).
11. Заклюковский В. И., Карцев Г. Т. Применение пьезоэлектрических преобразователей для бесконтактного ультразвукового контроля изделий // Дефектоскопия. 1978. № 3. С. 28—33.
12. Жданкин В. К. Ультразвуковые датчики для систем управления // Современные технологии автоматизации. 2003. № 1. С. 68—79.
13. Качанов В. К. и др. Синтез ультразвуковых низкочастотных широкополосных мозаичных преобразователей с неискажающими пространственно-временными характеристиками // Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 3—20.
14. Newnham R. E. et al. Composite piezoelectric transducers // Mater. Eng. 1980. V. 2. P. 93—106.
15. Качанов В. К. и др. Сравнение свойств композитных и мозаичных пьезопреобразователей для УЗ контроля изделий с большим уровнем затухания УЗ сигналов // Дефектоскопия. 2011. № 8. С. 39—53.
16. Качанов В. К. и др. Пространственно-временные характеристики УЗ широкополосных преобразователей // Дефектоскопия. 2010. № 10. С. 11—25.
17. Караваев М. А., Соколов И. В. Широкополосные электроакустические пьезопреобразователи для бесконтактного УЗ-контроля // Радиотехника, электротехника и энергетика: Тез. докл. 19 Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. С. 113.

Дата принятия 12.09.2014 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

965.539.1.08

Новый класс псевдослучайных бинарных конфигураций для кодирующих коллиматоров ионизирующих излучений

Г. А. ФЕДОРОВ¹, С. А. ТЕРЕЩЕНКО², М. А. АНТАКОВ²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия, e-mail: GAFyodorov@mephi.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ» Москва, Россия,
e-mail: tsa@miee.ru

Рассмотрены новые способы построения двумерных псевдослучайных бинарных конфигураций на основе псевдослучайных и расширенных псевдослучайных последовательностей, что позволяет использовать их для создания многопинhole кодирующих коллиматоров при регистрации ионизирующих излучений. Приведены четыре вида предлагаемых конфигураций.

Ключевые слова: интегрально-кодовая система измерений, кодирующий коллиматор, псевдослучайная последовательность, двумерная псевдослучайная бинарная конфигурация.

The new ways of creating the 2D pseudorandom binary configurations based on pseudorandom and extended pseudorandom sequences are considered. That allows to use the proposed configurations for creating the multi-pinhole coding collimators during registration of an ionizing radiation. The four types of proposed configurations are presented.

Key words: multiplexed measurement system, coding collimator, pseudorandom sequence, 2D pseudorandom binary arrays.

Интегрально-кодowymi (мультиплексными) называют системы измерений, в которых информация, поступающая от прибора (установки), имеет вид интегрального образа ис-

следуемой функциональной зависимости. На выходе мультиплексного прибора регистрируются линейные комбинации дискретных отсчетов, характеризующих искомую функцию (на-

пример, пространственное распределение радионуклида), а не сами отсчеты, как в традиционном приборе. Поэтому полученные на мультимплексных приборах данные необходимо подвергнуть обратному преобразованию (декодированию), например путем решения системы линейных алгебраических уравнений, чтобы представить искомую информацию в традиционной форме.

Интегрально-кодовые системы измерений (ИКСИ) нашли применение в рентгеновской и гамма-астрономии [1, 2], спектрометрии нейтронов по времени пролета [3], радиационной интроскопии [4, 5], радиационной безопасности [6] и других областях [7].

В ИКСИ ионизирующих излучений можно использовать многопинхольные коллиматоры с различным расположением пинхолов: случайным, регулярным, минимально избыточным, геометрическим, псевдослучайным, модифицированным псевдослучайным и расширенным псевдослучайным, самоподдерживающимся, когерентным, троичным, расширенным троичным и др. [8]. Кроме многопинхольных коллиматоров, в ИКСИ применяли и другие типы кодирующих коллиматоров (КК). Наиболее исследованные среди них — КК в виде зонной пластины Френеля (ЗПФ) и ее различных модификаций [9].

Первоначально кодирующие устройства применяли для помехо- и шумоподавления [10]. Затем была решена задача оптимизации среднего пропускания кодирующих коллиматоров в зависимости от квантовой статистики, вида распределения полезного сигнала и значения некодируемого фона [11]. Дальнейшие исследования ИКСИ во многом сопряжены с использованием КК для томографической реконструкции трехмерных пространственных распределений радионуклидов без вращения массивной детектирующей системы вокруг объекта исследования [8, 11].

Развитие ИКСИ связано с поиском оригинальных кодирующих устройств (см., например, [12, 13]), представляющих интерес как новые математические объекты с желательными свойствами, так и по практическим приложениям. Среди известных разработок можно выделить открытие расширенных псевдослучайных последовательностей (РПСР) [13], имеющих те же основные математические свойства, что и наиболее применяемые псевдослучайные последовательности (ПСП), но многократно превосходящие их как по количеству, так и по возможности построения большого числа двумерных КК с разными размерностями и коэффициентами пропуска. Среди кодирующих устройств наибольшее распространение получили двумерные многопихольные КК квадратной или прямоугольной формы на основе псевдослучайных таблиц (ПСТ), построенных по принципу одномерных псевдослучайных последовательностей [14].

Проще всего ПСП определить на языке теории матриц. Любая строка или столбец (v, k, λ) -матрицы-циркулянта размерности $v \times v$ является ПСП длиной v , причем k равно количеству единиц, а $(v - k)$ — количеству нулей в каждой строке и в каждом столбце (v, k, λ) -матрицы (или в ПСП) [8, 15]. Известные ПСП объединяют в семейства (типы), например, по классификации Холла [15]. Существует компьютерная программа, генерирующая все

известные ПСП длиной $v \leq 10000$ [16]. Явный вид ПСП для не очень больших v приведен, например, в [8], а для некоторых больших значений — в [16].

Анализ существующих ПСП показывает ограниченность набора значений $v = m \times n$, для которых можно построить двумерную ПСТ. Количество же ПСП, удовлетворяющих условию $m \cong n$, необходимому для построения практически значимых ПСТ, близких к квадратным, совсем мало. Для $v \leq 10000$ существуют всего 52 значения v , являющихся составными числами, для которых ПСП известны. Однако только для 18 из них выполняется условие $m \cong n$: $15 = 3 \times 5$, $35 = 5 \times 7$, $40 = 5 \times 8$, $63 = 7 \times 9$, $121 = 11 \times 11$, $143 = 11 \times 13$, $156 = 12 \times 13$, $255 = 15 \times 17$, $323 = 17 \times 19$, $400 = 20 \times 20$, $899 = 29 \times 31$, $1023 = 31 \times 33$, $1763 = 41 \times 43$, $3599 = 59 \times 61$, $3906 = 62 \times 63$, $4095 = 63 \times 65$, $4161 = 57 \times 73$, $5183 = 71 \times 73$. Для этих значений можно построить 18 ПСТ прострочным и 16 ПСТ диагональным способами. Фактически их еще меньше, так как ПСТ небольших размерностей не представляют интереса для практики.

Еще меньше выбор значений k , необходимых для оптимизации радиационного эксперимента. Только 6 из приведенных 18 ПСТ имеют $k < (v-1)/2$, а именно: $(v, k) = (40, 13); (121, 40); (156, 31); (400, 57); (3906, 781)$ и $(4161, 65)$.

Псевдо-прямоугольные равномерные конфигурации. С целью увеличения количества возможных псевдослучайных двумерных кодирующих конфигураций посредством охвата не используемых ранее ПСП можно предложить новый вариант их построения построчным способом. Он основан на добавлении дополнительных элементов к исходной прямоугольной конфигурации или исключении из нее некоторых элементов. При этом необходимо, чтобы построение мозаичной конфигурации (мозаики) оставалось возможным, а добавление (исключение) дополнительных элементов сохраняло периодичность конфигурации.

Первый способ модификации, названный «равномерно периодическим», заключается в добавлении в строку (или исключении из нее) прямоугольной таблицы одинакового числа элементов через равные периоды по одной из сторон прямоугольника. Таким образом, этот способ модификации можно характеризовать параметром Q — числом добавляемых ($Q>0$) (равномерная положительная конфигурация) или

4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
12	13	14	15	16	17	18	19	1	2	3
16	17	18	19	1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
13	14	15	16	17	18	19	1	2	3	4
17	18	19	1	2	3	4	5	6	7	8
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
15	16	17	18	19	20	21	1	2	3	4
19	20	21	1	2	3	4	5	6	7	8
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
14	15	16	17	18	19	20	21	1	2	3
18	19	20	21	1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Рис. 1. Базовая часть (затемнена) и мозаика (рабочая часть мозаики выделена полужирной линией) Q-конфигурации:

a — положительная РПКК $m \times n = 3 \times 5$, $Q = +1$ на основе ПСП с $v = 19$; b — отрицательная РПКК $m \times n = 5 \times 5$, $Q = -1$ на основе ПСП с $v = 21$

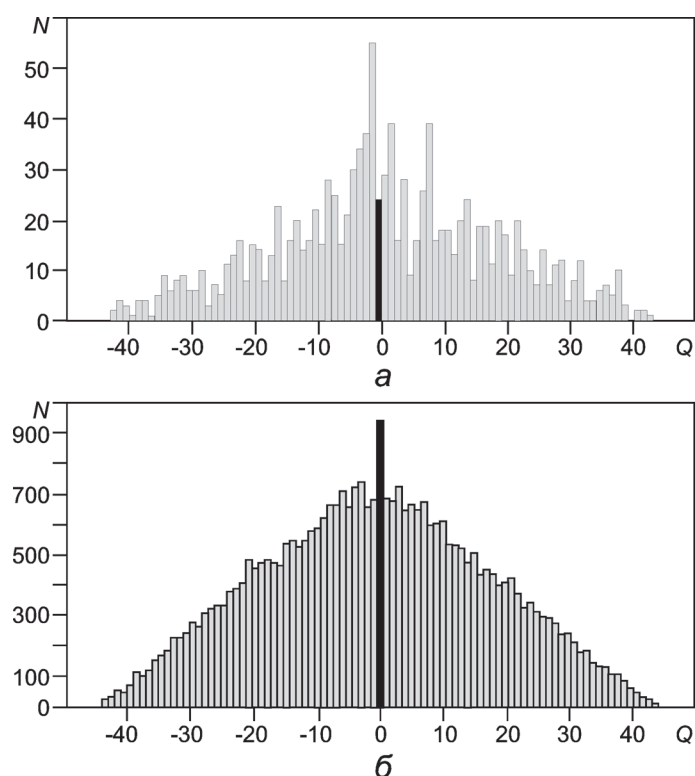


Рис. 2. Гистограммы распределения числа N возможных Q -конфигураций от значения Q для ПСП (а) и РПСП (б)

удаляемых ($Q < 0$) (равномерная отрицательная конфигурация) элементов в строках прямоугольной таблицы. Поскольку конфигурации с добавленными элементами в четных рядах совпадают с конфигурациями, в которых исключаются элементы из нечетных рядов, и наоборот, далее модификации подвергаются только четные ряды.

Количество элементов в такой модифицированной равномерно периодической кодирующей конфигурации (РПКК) или Q -конфигурации составляет

$$v = m \times n + 2Q \lfloor n/2 \rfloor,$$

где $m \times n$ — размерность исходного прямоугольника (m, n — соответственно количество столбцов и строк); $\lfloor \cdot \rfloor$ — целая часть числа. При этом параметр Q может изменяться в пределах $[-\lfloor m/2 \rfloor, \dots, -1, 0, +1, \dots, +\infty)$.

Примеры мозаичных двумерных таблиц для Q -конфигураций приведены на рис. 1. В первой конфигурации (см. рис. 1, а) к прямоугольнику размерностью 3×5 добавлены в четных строках элементы 4, 8, 12, 16, а во второй (см. рис. 1, б) из прямоугольника размерностью 5×5 исключены элементы 5, 9, 13, 17.

Основным достоинством предложенных РПКК является охват большого количества ранее не используемых ПСП, что приводит к значительному увеличению числа новых конфигураций. Если ранее для построения КК можно было использовать 5 % существующих ПСП, то РПКК позволяют охватить 85 %.

Из практических соображений целесообразно рассмотреть конфигурации со следующими соотношениями:

$$\min(m, n) \geq 11, |m - n| \leq 2, v \leq 10000 \text{ и } |Q| \leq 2. \quad (1)$$

При выполнении этих условий для построения КК можно использовать 24 построчных классических ПСТ с $k < v/2$ размерностями $m \times n$ и $n \times m$, тогда как количество пригодных новых РПКК равно 1171.

Гистограмма распределения количества возможных Q -конфигураций для ПСП и условий (1) показана на рис. 2, а. Черным цветом выделены конфигурации при $Q = 0$, т. е. обычные построчные ПСТ, построенные из ПСП.

Как отмечено ранее, РПСП имеют те же основные математические свойства, что и ПСП. Алгоритм построения РПСП заключается в добавлении к каждому элементу ПСП любого одинакового числа нулей b ($b = 1, 2, \dots$) [13]. Таким образом, каждой исходной ПСП можно сопоставить бесконечное семейство расширенных последовательностей порядка b и длины $V = v(b + 1)$. Расширенные ПСП также можно использовать для построения РПКК. Гистограмма распределения количества возможных Q -конфигураций для РПСП и условий (1) показана на рис. 2, б. Черным цветом выделены 920 конфигураций при $Q = 0$, т. е. обычные построчные ПСТ, построенные из РПСП. Общее количество возможных Q -конфигураций при условиях (1) составляет 33667.

Результаты расчетов количества возможных РПКК приведены в табл. 1.

При условиях (1) и $m, n \gg 1$ отношение рабочей площади детектора к прямоугольной огибающей рабочей части мозаики при одинаковом масштабе близко к единице.

Таблица 1

Количество равномерных периодических кодирующих конфигураций

РПКК	$Q = 0$	$ Q = 1$	$ Q = 2$	Остальные значения Q
РПКК на основе ПСП и для условий (1)	24	84	76	987
РПКК на основе ПСП и для условий (1), но без ограничения $ m - n \leq 2$	88	779	751	10781
РПКК на основе РПСП и для условий (1)	920	1285	1263	29229
РПКК на основе РПСП и для условий (1), но без ограничения $ m - n \leq 2$	16018	23017	22391	451304
Всего для условий (1)	944	1369	1339	30216
Всего для условий (1), но без ограничения $ m - n \leq 2$	16106	23796	23142	462085

Псевдопрямоугольные неравномерные конфигурации.

Можно предложить еще два способа модификации прямоугольной конфигурации, названные условно «неравномерными». Первый способ для положительной неравномерной кодирующей конфигурации (НРПКК) (рис. 3, а) заключается в добавлении одного элемента с каждой стороны ко второй строке, двух элементов к третьей и т. д., пока в центральной строке не будет добавлено $\lfloor n/2 \rfloor$ элементов. Затем количество добавляемых элементов уменьшается на единицу, пока к $(n-1)$ -й строке не будет добавлен один элемент. Предло-

женную модификацию можно использовать для измерительных систем с круглыми детекторами. Для этого способа модификации подходят только такие КК, в которых число строк нечетно. При этом становятся интересными для изучения ранее считавшиеся непрактичными конфигурации с малым числом столбцов. Количество элементов в положительной НРКК

$$v = m \times n + (n-1)^2/2.$$

Аналогично можно ввести отрицательную НРКК, когда элементы не добавляются, а исключают в тех же количествах (рис. 3, б). Для этой модификации годятся только те конфигурации, в которых $m \geq n$ и число строк нечетно. Тогда в такой конфигурации число элементов (длина ПСП)

$$v = m \times n - (n-1)^2/2.$$

Общее достоинство «неравномерных» способов модификации заключается в охвате ранее не используемых ПСП. Положительные и отрицательные НРКК позволяют охватить 16 и 20 % существующих ПСП, соответственно. Как и равномерные конфигурации, неравномерные можно построить из расширенных ПСП. Количество возможных НРКК указано в табл. 2.

Таблица 2

Количество неравномерных конфигураций для $v \leq 10000$

НРКК на основе	Положительные	Отрицательные
ПСП	126	197
РПСП	26789	26787

Выводы. Рассмотрены способы построения двумерных положительных и отрицательных, равномерных и неравномерных кодирующих конфигураций путем добавления или исключения элементов прямоугольной таблицы. Предложенные кодирующие конфигурации можно создать на основе как псевдослучайных, так и расширенных псевдослучайных последовательностей. Определены ранее не используемые псевдослучайные последовательности и расширенные псевдослучайные последовательности, которые могут стать основой таких кодирующих конфигураций. Так как указанные кодирующие конфигурации при существенном увеличении их числа сохраняют свойства традиционных двумерных псевдослучайных таблиц, их можно применить для разработки кодирующих коллиматоров в интегрально-кодовых системах получения изображений радиоактивных объектов.

Литература

1. **Caroly J. e a.** Coded aperture imaging in X-and Gamma-ray astronomy // Space Sci. Rev. 1987. V. 45. N. 3/4. P. 349—403.
2. **Jean in 't Zand.** Coded aperture imaging [Электрон. ресурс]. http://astrophysics.gsfc.nasa.gov/cai/coded_inss.html (дата обращения 14.05.2014 г.).

а

б

Рис. 3. Базовая часть (затемнена) и мозаика (рабочая часть мозаики выделена полужирной линией) неравномерной конфигурации:

а — положительная НРКК $m \times n = 3 \times 5$ на основе ПСП с $v = 23$; б — отрицательная НРКК $m \times n = 5 \times 5$ на основе ПСП с $v = 31$

3. **Новопольцев М. И., Покотиловский Ю. П.** Корреляционная времяпролетная спектрометрия ультрахолодных нейтронов // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 5. С. 19—27.

4. **Немчинов В. М. и др.** Гамма-регистратор на основе кодированной апертуры для эмиссионной томографии с уменьшенной дозой облучения // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 5. С. 64—65.

5. **Уткин В. М. и др.** Мобильная гамма-камера «МиниСкан» и результаты ее испытаний // Медицинская физика. 2007. № 1(33). С. 42—53.

6. **Gmar M. e a.** Development of coded-aperture imaging with a compact gamma camera // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. V. 51. N. 4. P. 1682—1687.

7. **Артемьев А. С.** Корреляционный метод невозмущающей диагностики пучков ионов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2001. Т. 32. Вып. 1. С. 189—211.

8. **Федоров Г. А.** Интегрально-кодовые системы измерений в радиационной физике. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.

9. **Barrett H. H.** Fresnel zone plate in nuclear medicine // J. Nucl. Med. 1972. V. 13. N. 6. P. 382—385.

10. **Dicke R. H.** Scatter-Hole Cameras for X-Rays and Gamma Rays // The Astrophys. J. 1968. V. 153. P. L101—L106.

11. **Федоров Г. А., Терещенко С. А.** Вычислительная эмиссионная томография. М.: Энергоатомиздат, 1990.

12. **Gottesman S. R., Fenimore E. E.** New family of binary arrays for coded aperture imaging // Appl. Opt. 1989. V. 28. N. 20. P. 4344—4352.

13. **Федоров Г. А., Терещенко С. А.** Расширенные псевдослучайные последовательности и двумерные кодирующие коллиматоры на их основе // Измерительная техника. 2007. № 6. С. 66—71; **Fedorov G. A., Tereshchenko S. A.** Extended pseudorandom sequences and two-dimensional coding collimators based on them // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N. 6. P. 681—689.

14. **Макуильямс Ф. Дж., Слоан Н. Дж. А.** Псевдослучайные последовательности и таблицы // ТИИЭР. 1976. Т. 64. № 12. С. 80—95.

15. **Холл М.** Комбинаторика / Пер. с англ. М.: Мир, 1970.

16. **Терещенко С. А.** Методы вычислительной томографии. М.: Физматлит, 2004.

Дата принятия 17.11.2014 г.