

УДК 681.391.83

doi:10.31799/1684-8853-2020-1-44-53

## Поиск бинарных кодовых последовательностей с низким уровнем боковых лепестков эволюционным способом

С. Н. Шаров<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-9634-155X](https://orcid.org/0000-0002-9634-155X)С. Г. Толмачев<sup>а</sup>, канд. техн. наук, [orcid.org/0000-0001-9434-1268, tsg17@yandex.ru](mailto:tsg17@yandex.ru)<sup>а</sup>АО «Концерн «Гранит-Электрон», Госпитальная ул., 3, Санкт-Петербург, 191014, РФ

**Введение:** выбор параметров сложных кодированных сигналов, используемых в активных радиолокационных системах летательных аппаратов для обнаружения объектов, во многом определяет их качественные характеристики и возможность скрытой работы. Актуальной задачей при проектировании систем подобного типа является формирование ансамблей шумоподобных бинарных кодовых последовательностей фиксированной длины с заданными характеристиками. **Цель:** поиск шумоподобных бинарных кодовых последовательностей заданной длины, оптимальных по критерию минимального уровня боковых лепестков апериодической автокорреляционной функции. **Результаты:** предложена процедура поиска бинарных кодовых последовательностей с заданными параметрами, основанная на эволюционном подходе. В качестве критерия отбора кодовых последовательностей используется минимальный уровень положительных боковых лепестков автокорреляционной функции. Дополнительное ограничение накладывается на длину подстроки из кодов одного знака. На примере 31-разрядных кодовых последовательностей показана возможность формирования представительного массива последовательностей с наилучшим отношением главного пика апериодической автокорреляционной функции к ее максимальному положительному боковому лепестку. Предложен алгоритм формирования шумоподобной серии сигналов, использующий найденные кодовые последовательности. В качестве меры отличия двух бинарных кодовых последовательностей в серии используется расстояние Хемминга. Показаны преимущества предложенного подхода в сравнении с известным способом формирования шумоподобных сигналов на основе псевдослучайных  $m$ -последовательностей. **Практическая значимость:** полученные результаты целесообразно использовать в алгоритмах радиолокационных систем автономных летательных аппаратов с высокой разрешающей способностью по дальности для обнаружения физических объектов на фоне подстилающей поверхности, например, надводных объектов.

**Ключевые слова** – кодовая последовательность, боковой лепесток, автокорреляционная функция, генетический алгоритм, рекомбинация, отбор.

**Для цитирования:** Шаров С. Н., Толмачев С. Г. Поиск бинарных кодовых последовательностей с низким уровнем боковых лепестков эволюционным способом. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 1, с. 44–53. doi:10.31799/1684-8853-2020-1-44-53

**For citation:** Sharov S. N., Tolmachev S. G. Search for binary code sequences with low autocorrelation sidelobes by the evolutionary method. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 1, pp. 44–53 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-1-44-53

### Введение

При разработке радиолокационных систем (РЛС) обнаружения активного типа, устанавливаемых на борту летательных аппаратов, наряду с обеспечением требований помехоустойчивости и скрытности их функционирования большое внимание уделяется формированию определенных свойств зондирующих сигналов, с помощью которых выделяются информативные признаки обнаруживаемых объектов. На практике широко применяются сложные шумоподобные сигналы, использующие дискретные кодовые последовательности (КП) для модуляции излучения РЛС [1]. Алгоритм формирования сигналов бортовых РЛС должен задействовать только те последовательности, которые имеют требуемые показатели качества. Примером кодированных сигналов являются фазоманипулированные сигналы. Последовательность фаз (0 или  $\pi$ ) в отдельных временных квантах можно представить в виде со-

ответствующей последовательности чисел (кодов) «+1» или «-1»:  $\{a_N\} = \{a_i, i = 1, \dots, N\}, a_i = \pm 1$ .

Одной из актуальных задач практического использования кодированных сигналов является задача синтеза ансамблей бинарных КП с требуемыми свойствами их автокорреляционной функции (АКФ) [2, 3]. Представительная выборка КП позволяет формировать с их помощью псевдослучайные (шумоподобные) последовательности зондирующих сигналов, затрудняющие их обнаружение и постановку им искусственных помех.

Значения АКФ бинарной КП в дискретные моменты времени определяются выражением [4]

$$R_k = \sum_{i=1}^{N-k} a_i a_{i+k}. \text{ Для бортовых РЛС большое зна-}$$

чение имеет вид апериодической АКФ КП, так как их зондирующие сигналы, как правило, не являются непрерывными. Апериодическая АКФ бинарной КП имеет ярко выраженный центральный пик  $R_0$ , величина которого равна длине КП,

и боковые лепестки (БЛ)  $R_{k \neq 0}$ . Большие БЛ АКФ являются нежелательными и могут приводить к появлению ложных целей и пропуску реальных целей. Для оценки АКФ по уровню БЛ используют две характеристики [5]: мерит-фактор  $MF$  — отношение уровня главного пика к суммарной «энергии» БЛ и уровень максимального БЛ (*peak sidelobe*)  $PSL = \max(R_{k \neq 0})$ .

Минимизация параметра  $PSL$  важна при обнаружении целей на фоне подстилающей поверхности, когда объект и фон порождают отклики с высокой амплитудой БЛ, которые в зависимости от уровня срабатывания порогового устройства могут быть восприняты как ложные цели. Чем меньше уровень БЛ, тем меньше вероятность ложного срабатывания.

Постановка задачи построения бинарных КП, оптимальных по минимаксному критерию —  $MPS$  (*minimum peak sidelobe*) кодов ( $\min(PSL)$ ), известна с начала 50-х годов прошлого столетия. В большинстве случаев эта задача решается методом полного перебора [6]. Использование переборных алгоритмов для поиска КП большой длины  $N$  представляет большие трудности. Основные усилия разработчиков направлены на поиск возможностей сокращения вычислительной сложности переборных алгоритмов [7]. Основные результаты синтеза  $MPS$ -последовательностей приведены в работе [1]. На сегодня известны оптимальные бинарные  $MPS$ -последовательности с минимальным уровнем БЛ — бинарные КП Баркера до длины  $N = 13$ . Существуют методы синтеза бинарных КП с достаточно малым уровнем БЛ: КП Лежандра, Якоби, Холла, Зингера,  $m$ -последовательности и т. д. [8].

Простым способом, не требующим больших аппаратных и программных затрат, является рекуррентная процедура формирования бинарных КП максимальной длины, так называемых  $m$ -последовательностей, имеющих приемлемый уровень БЛ АКФ [6]. Для реализации КП задается произвольный набор чисел  $x_j \in \{0, 1\}$ ,  $j = 1 \dots n$  и начальная подстрока последовательности  $a_1, \dots, a_j, \dots, a_n$ , где  $a_j \in \{+1, -1\}$ . Каждый следующий элемент последовательности  $a_{i+1}$  вычисляется по

рекуррентной формуле:  $a_{i+1} = \prod_{j=1}^n a_{i-j+1}^{x_j}$ , где  $i > n$ .

Образуется бесконечная повторяющаяся последовательность чисел  $a_i$ , причем максимальный период повторения составляет  $N = 2^n - 1$ . Первые  $n$  элементов последовательности выбираются произвольным образом, кроме запрещенной комбинации из всех единиц. Известно [9, 10], что для любого  $n$  существует  $s = \varphi(N)/n$  различных вариантов рекуррентной формулы, отличающихся значениями  $x_j$  и формирующих КП максимального периода  $N$ , где  $\varphi(N)$  — функ-

ция Эйлера, т. е. число целых чисел, взаимно простых с  $N$  и меньших, чем  $N$ . Значения  $x_j \neq 0$  в рекуррентной формуле определяют вид образующего полинома и обратные связи в генераторе  $m$ -последовательности.

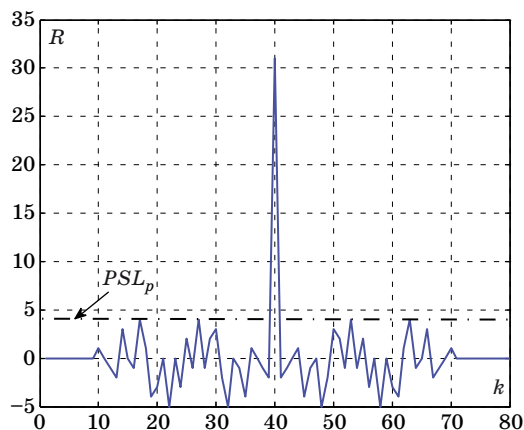
Преимущества  $m$ -последовательностей, имеющие существенное значение для бортовых РЛС автономных летательных аппаратов, заключаются в следующем [4].

1. Рекуррентная формула просто реализуется с помощью  $n$  регистров сдвига. Могут быть построены  $m$ -последовательности, период которых больше любого наперед заданного значения  $N$ .

2. Апериодическая АКФ сигнала, модулированного одним периодом  $m$ -последовательности, имеет уровень БЛ не более  $\sqrt{N}$ .

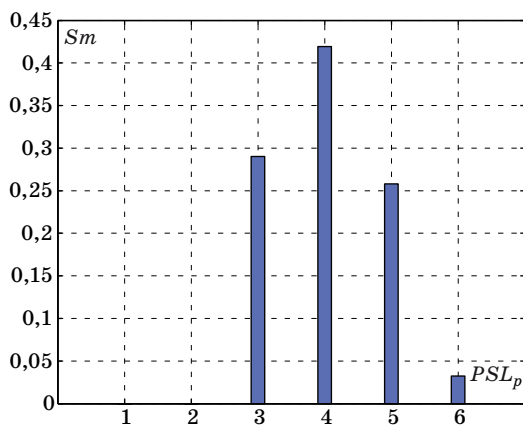
3.  $m$ -последовательности позволяют сформировать шумоподобный зондирующий сигнал за счет свойства ее «хаотичности». Если из периода последовательности выбрать все возможные группы кодов длиной  $n$ , то среди них найдутся любые не повторяющиеся комбинации из символов  $+1$  и  $-1$ .

Например, для КП длины  $N = 31$  значения  $n = 5$ ,  $s = 6$ , т. е., используя 30 различных комбинаций первых  $n$  элементов, можно получить 180 различных вариантов  $m$ -последовательностей разного качества, причем эти последовательности будут попарно зеркальными. Иначе говоря, оригинальными можно признать только половину из них. Типовой вид АКФ  $m$ -последовательности длины  $N = 31$  приведен на рис. 1. Величины максимальных положительных БЛ (*peak sidelobe positive*  $PSL_p$ ) в этом ансамбле КП принимают значения в интервале от трех до шести. Количественное распределение значений  $PSL_p$  в массиве генерируемых КП в отношении ко всему его объему,  $Sm$ , показано на рис. 2. Очевидно, что менее 30 % КП имеют наименьший уровень БЛ  $PSL_p = 3$ . Таким



■ **Рис. 1.** Пример АКФ 31-разрядной  $m$ -последовательности

■ **Fig. 1.** An example of ACF 31-bit  $m$ -sequences



■ Рис. 2. Распределение значений  $PSL_p$  в массиве 31-разрядных  $m$ -последовательностей

■ Fig. 2. Distribution of values peak sidelobe an array 31-bit  $m$ -sequences

образом, к недостаткам  $m$ -последовательностей можно отнести ограниченное количество генерируемых КП и достаточно большие значения БЛ их АКФ, превышающие минимально достижимый уровень в 1,5–3 раза.

Необходимо отметить, что оценка бинарных КП по критерию минимума максимальных положительных БЛ АКФ может применяться для приема сигналов с известной начальной фазой.

Еще одним способом формирования бинарных КП являются бинарные последовательности Лежандра [8]. За основу берется простое число  $p$ , значения  $0, 1, \dots, p - 1$  отождествляются с номерами позиций  $i$  символов  $a_i$  периодической КП  $\{a_i\}$  периода  $N = p$ . Тогда правило формирования периодической КП Лежандра определяется в виде

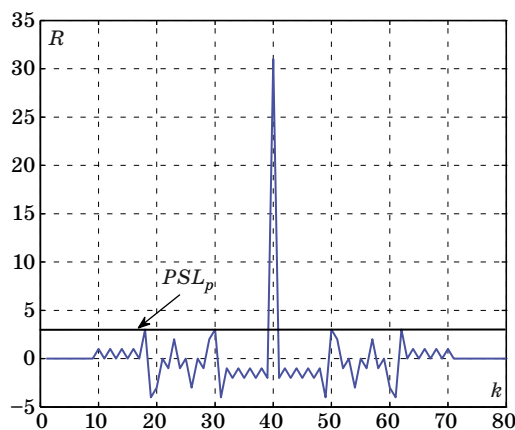
$$a_i = \begin{cases} +1, & i = 0 \pmod{p}; \\ \psi(i), & i \neq 0 \pmod{p}, \end{cases}$$

где  $\psi(i)$  — функция, принимающая значения +1 или -1 в зависимости от принадлежности элемента  $i$  к категории вычетов (символ Лежандра):

$$\psi(i) = \begin{cases} +1, & i - \text{вычет} \pmod{p}; \\ -1, & i - \text{невычет} \pmod{p}. \end{cases}$$

Число  $i$  такое, что наибольший общий делитель  $(i, p) = 1$ , называется вычетом степени  $n$ , если  $\exists(x) : x^n \equiv i \pmod{p}$ . Например, для  $N = 31$  и  $n = 2$  АКФ КП Лежандра имеет вид как на рис. 3.

В общем случае КП Лежандра образуют более мощный, чем  $m$ -последовательности, класс бинарных КП с минимаксной периодической АКФ за счет того, что они определены для большего количества значений  $N$ . Но при использовании КП одной длины  $N$ , для которой определены оба варианта последовательностей, количество последова-



■ Рис. 3. АКФ 31-разрядной последовательности Лежандра

■ Fig. 3. ACF 31-bit Legendre sequence

тельств, формируемых методом Лежандра, меньше, чем  $m$ -последовательностей. Свойство минимальности уровня  $PSL_p$  не соблюдается как для аperiodической АКФ КП Лежандра, так и для АКФ  $m$ -последовательностей.

В настоящее время не известны регулярные правила построения MPS-последовательностей произвольной длины [1]. Различные способы локального компьютерного поиска позволяют синтезировать бинарные последовательности с приемлемым уровнем БЛ для практически значимых значений  $N$ .

Вместе с тем при проектировании радиолокационных систем обнаружения и самонаведения летательных аппаратов актуальной задачей является формирование представительного ансамбля MPS-последовательностей заданной длины  $N$  [11]. Массив этих КП записывается в память бортового компьютера и используется для формирования шумоподобной серии зондирующих сигналов РЛС. Для поиска нужного количества КП нет необходимости использовать вычислительно сложные алгоритмы полного перебора. Альтернативой полному перебору вариантов КП являются алгоритмы псевдослучайного целенаправленного поиска, относящиеся к классу генетических алгоритмов (ГА) [12].

### Генетический алгоритм формирования ансамбля бинарных КП с требуемым уровнем боковых лепестков

Генетический алгоритм — эвристический способ поиска квазиоптимальных вариантов решений, являющийся разновидностью эволюционных вычислений. В основе ГА лежит итерационная стохастическая процедура комбинирования свободных параметров проектируемого объекта

с последующим целенаправленным отбором вариантов, лучших с точки зрения заданного критерия — функционала качества [13–15].

Задача оптимизации функционала качества в терминологии ГА формулируется как задача поиска экстремума функции приспособленности (*fitness function* — *FFn*) особей, образующих популяцию. Каждая особь, представляющая один из вариантов решения задачи, кодируется строкой символов, называемой хромосомой. Более приспособленные особи — это более приемлемые решения, имеющие лучшие значения *FFn*. В рассматриваемой задаче особь — это один из возможных вариантов КП. Последовательность символов +1 и -1 в бинарной КП может использоваться в ГА в качестве хромосомы особи. Функцию приспособленности целесообразно определить в виде отношения максимума АКФ (основного лепестка) к максимальному положительному значению ее БЛ. Поскольку максимум АКФ равен длине КП,  $N$ , то приспособленность  $k$ -й КП  $FFn(k) = N/PSLp(k)$ .

Генетический алгоритм запускает несколько циклов эволюции популяции особей. Начальная популяция формируется случайным образом. В каждом цикле ГА поочередно реализуются три операции [16]:

— рекомбинация особей текущей популяции путем скрещивания (кроссовера) пар КП-родителей для формирования новых вариантов КП-потомков;

— мутация (инвертирование) некоторых символов в хромосомах КП-потомков по произвольному правилу;

— отбор (селекция) в следующее поколение наиболее приспособленных особей из текущей популяции.

За счет целенаправленного отбора средняя приспособленность особей должна возрастать от поколения к поколению. Из последнего поколения отбираются  $k$ -е КП с требуемыми значениями  $FFn(k) > FFnm$ , где  $FFnm$  — пороговый уровень приспособленности. Сформировать выборку  $MPS$  последовательностей нужного объема можно путем многократного запуска поисковой процедуры [17–20].

Исходными данными для алгоритма являются: размер исходной популяции — количество изначально генерируемых КП,  $P$ ; допустимый максимальный уровень положительных боковых лепестков,  $PSLp$ , и допустимая длина подстроки из одинаковых символов (-1 или +1) внутри КП,  $LenMax$ .

Предлагаемый алгоритм в виде псевдокода выглядит следующим образом [21]:

```
procedure MakeBestKod
// Алгоритм реализует эвристический поиск бинарных КП
// фиксированной длины с
// требуемым уровнем положительных БЛ апериодической АКФ.
```

```
// Input: N – длина КП, Pslp – требуемый уровень БЛ АКФ,
// NumMax – предельный размер массива КП,
// LenMax – максимальная длина одинаковых символов в КП,
// Nga – предельное количество циклов ГА,
// P – количество особей в популяции
// Output: Mn – массив найденных бинарных КП
Nkod <- 0 // обнуление счетчика найденных КП
Mn <- {} // пустой массив КП
while Nkod < NumMax // основной цикл алгоритма
  M <- PopulationBegin(P,N) // формирование начальной
  // популяции бинарных КП
  for n=1:Nga // цикл генетического алгоритма
    for p=1:P step 2 // цикл перебора особей
      // в популяции
      // кроссовер
      Par1 <- M(p, N) // первая родительская КП
      Par2 <- M(p+1, N) // вторая родительская КП
      r=random(N-1) // случайное место разрыва КП
      child1(Par1(1:r)&Par2(r+1:N)) // формирование КП-потомка 1
      child2(Par2(1:r)&Par1(r+1:N)) // формирование КП-потомка 2
      // мутация
      child1 <- Mutat(child1)
      child2 <- Mutat(child2)
      M <- (child1, child2) // добавить КП-потомки в текущую
      // популяцию
    end for p
    PeakSidelob(M) // вычисление значений PSLp
    // для каждой КП
    M <- Selection(M) // отбор P лучших КП
  end for n
  for k=1:P // выбор КП из последней
  популяции
    if PeakSidelob(M(k)) >= Pslp and NotDubl(M(k), Mn)
      // если k-я КП имеет требуемый уровень БЛ и отсутствует
      // в массиве Mn
      Mn <- M(k) // перенос КП в массив Mn
      Nkod=Nkod+1
    endif
  end for k
end while
return Mn
```

В качестве примера рассмотрим реализацию ГА для поиска бинарных КП длины  $N = 31$  для следующих условий:  $PSLp = 2$  ( $FFnm > 15$ ),  $LenMax \leq 5$ ,  $P = 50$  и  $Nga = 20$ . При отсутствии априорной информации начальная популяция КП может быть сформирована путем генерации последовательности псевдослучайных чисел  $a_i$ , где  $i \in [1, \dots, N]$  по правилу

$$a_i = \begin{cases} +1, & r_i > 0,5 \\ -1, & r_i \leq 0,5 \end{cases}$$

где  $r_i$  — псевдослучайное значение из интервала  $[0, 1]$ .

Рекомбинация КП начальной популяции производится разбиением массива КП на пары с последующим применением к ним оператора одноточечного кроссовера, в котором точка разрыва родительских хромосом выбирается случайно. Например, пара родительских КП представлена в табл. 1, где значения +1 и -1 для более компактного представления заменены знаками «+» и «-» соответственно.

■ Таблица 1. Родительские КП  
 ■ Table 1. Parent code sequences

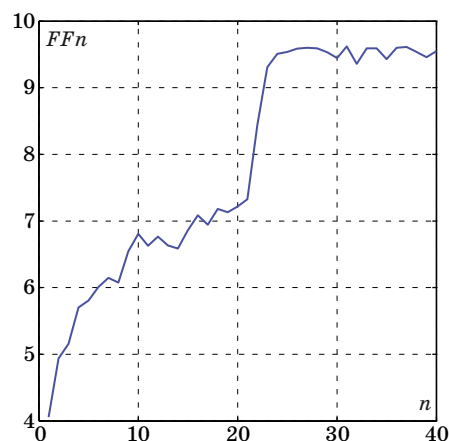
№	A	B	№	A	B	№	A	B
1	+	+	11	+	-	21	-	+
2	+	+	12	+	-	22	+	-
3	+	-	13	+	-	23	-	-
4	+	+	14	-	-	24	-	+
5	+	+	15	-	+	25	+	+
6	-	-	16	+	+	26	+	-
7	-	+	17	+	+	27	-	-
8	-	-	18	+	-	28	+	+
9	-	+	19	+	+	29	+	-
10	-	-	20	+	+	30	+	+
						31	+	-

■ Таблица 2. КП-потомки  
 ■ Table 2. Code sequence-childrens

№	C	D	№	C	D	№	C	D
1	+	+	11	+	-	21	+	-
2	+	+	12	+	-	22	-	+
3	+	-	13	+	-	23	-	-
4	+	+	14	-	-	24	+	-
5	+	+	15	-	+	25	+	+
6	-	-	16	+	+	26	-	+
7	-	+	17	+	+	27	-	-
8	-	-	18	-	+	28	+	+
9	-	+	19	+	+	29	-	+
10	-	-	20	+	+	30	+	+
						31	-	+

■ Таблица 3. КП-потомок D после мутации  
 ■ Table 3. Code sequence D after mutation

№	E	№	E	№	E
1	+	11	-	21	-
2	+	12	-	22	+
3	-	13	-	23	-
4	+	14	-	24	-
5	+	15	+	25	+
6	-	16	+	26	+
7	+	17	+	27	-
8	-	18	+	28	+
9	+	19	+	29	+
10	-	20	-	30	+
				31	+



■ Рис. 4. Изменение средней приспособленности популяции  
 ■ Fig. 4. Change in average fitness-function

Приспособленность родительских КП  $FFn(A) = 3,1$ ,  $FFn(B) = 5,2$ .

Допустим, что оператор кроссовера генерирует точку разрыва хромосом после 17-го элемента КП, тогда образуются новые дочерние КП (табл. 2), частично наследующие свойства родительских КП.

Приспособленность КП-потомков  $FFn(C) = 3,4$ ,  $FFn(D) = 3,9$ .

Вторая КП-потомок содержит запрещенную подстроку из шести значений +1 подряд и подвергается точечной мутации (табл. 3).

Приспособленность КП-потомка после мутации  $FFn(E) = 5,2$ .

Массив КП-родителей и потомков образует расширенную популяцию. Этот массив сортируется по уменьшению значения приспособленности  $FFn$ , и первая половина массива переносится в следующее поколение (элитный отбор). Типовой

график роста средней приспособленности особей от поколения к поколению представлен на рис. 4.

### Результаты моделирования

При отборе КП использовались два значения, ограничивающих длину подстроки из одинаковых элементов внутри КП:  $LenMax = 4$  и  $LenMax = 5$ , — в целях экспериментального определения размера массивов КП с разными показателями шумоподобности. Количество циклов поиска составило 10000. В результате было сформировано два массива бинарных КП. Для показателя  $LenMax = 4$  найдено 126 КП и для  $LenMax = 5$  — 519 КП.

Результаты моделирования показывают, что рост приспособленности популяции завершает-

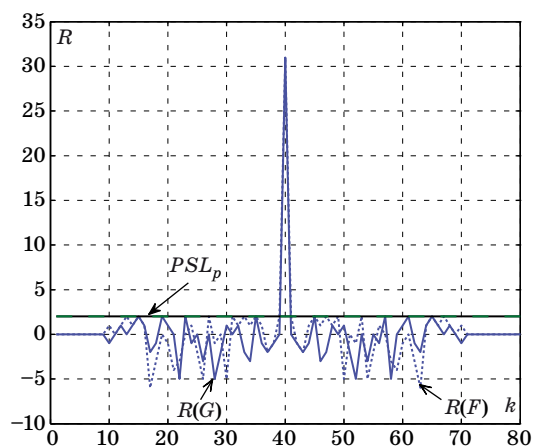
ся за 10–20 поколений. Из последнего поколения отбираются и заносятся в базу КП со значением  $FFn > 15$ . В силу локального характера эволюционного поиска за один запуск алгоритма может быть найдено ограниченное количество КП, удовлетворяющих заданным условиям. Для формирования представительного массива КП необходимо запустить несколько циклов эволюционного поиска с разными начальными данными. После каждого цикла поиска в результирующий массив добавляются новые КП, они проверяются на предмет дублирования с уже имеющимися КП. Также дубликатами с одинаковыми значениями  $FFn$  считаются КП, полученные из исходной КП инвертированием всех ее символов, и зеркальные КП с обратным порядком символов.

В качестве примера приведены две найденные КП (табл. 4) и соответствующие им АКФ (рис. 5).

■ Таблица 4. Пример оптимальных 31-разрядных КП

■ Table 4. Two optimal 31-bit code sequence

№	F	G	№	F	G	№	F	G
1	-	+	11	+	+	21	-	-
2	+	-	12	+	-	22	-	+
3	-	+	13	+	-	23	+	+
4	-	-	14	-	-	24	+	+
5	-	-	15	+	-	25	-	+
6	+	-	16	-	+	26	+	-
7	+	-	17	+	-	27	+	-
8	+	+	18	+	+	28	-	+
9	-	+	19	+	+	29	-	+
10	+	-	20	+	+	30	-	-
						31	-	-



■ Рис. 5. АКФ кодовых последовательностей F и G

■ Fig. 5. ACF code sequences F and G

При формировании радиолокационных сигналов, модулированных бинарными КП, важно придать им шумоподобный характер для обеспечения скрытности работы РЛС [22]. К шумоподобным относятся серии сигналов, отвечающие следующим основным требованиям [8]:

— кодовые последовательности, используемые для формирования сигналов, должны быть уравновешенными, т. е. появление любого символа в КП должно быть равновероятным ( $P(\langle 1 \rangle) = P(\langle -1 \rangle)$ );

— АКФ КП должна быть близка к дельта-функции;

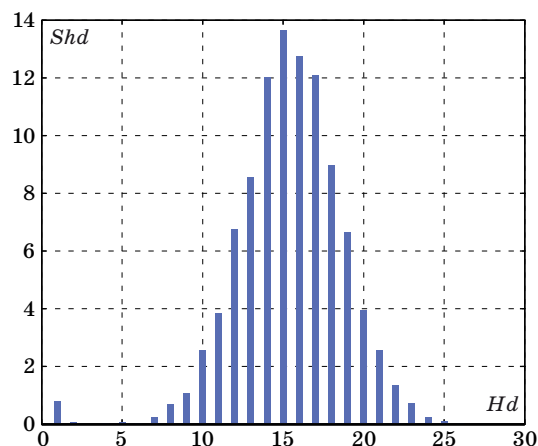
— вероятность появления строки из  $n$  символов в КП должна быть обратно пропорциональна длине строки;

— значения функции кросс-корреляции пары КП, входящих в шумоподобный ансамбль, должны быть минимизированы.

Таким образом, при формировании шумоподобной серии нужно обеспечить случайный выбор КП из массива, причем следующая КП должна существенно отличаться от предыдущей. Степень различия двух бинарных КП  $i$  и  $j$  характеризуется расстоянием Хемминга —  $Hd(i, j)$ . На рис. 6 представлена гистограмма распределения количества ( $Shd$ ) каждого из значений  $Hd(i, j)$ , полученных при попарном сравнении 126 КП из массива.

Очередная КП выбирается в массиве случайным образом из списка КП, удовлетворяющих условию  $Hd(i, j) > Hmax$ , где  $Hmax$  — пороговое значение хеммингова расстояния между предыдущей КП  $i$  и следующей КП  $j$ . Значение  $Hmax$  выбирается на основе анализа гистограммы рис. 6 и требуемой длины серии.

Алгоритм формирования шумоподобной серии КП в виде псевдокода выглядит следующим образом:



■ Рис. 6. Распределение значений  $Hd(i, j)$  в массиве КП

■ Fig. 6. Distribution of values  $Hd(i, j)$  an array code sequences

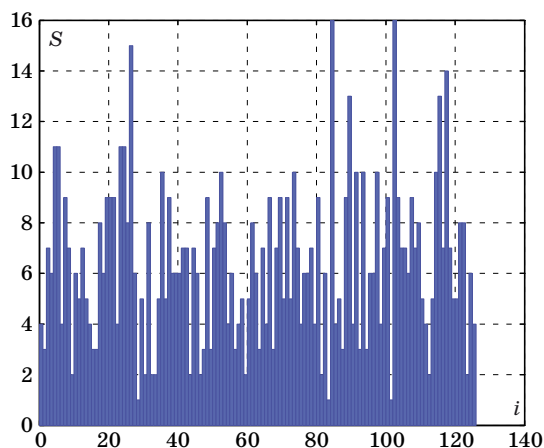
```

procedure FormKP
// Алгоритм формирует шумоподобную серию из массива
// бинарных КП
// Input: массив КП в табличной форме: (id_кп – номер КП, Mn –
// бинарная КП)
// Output: KP – очередность КП, образующих серию

P=len(Mn) // количество КП в исходном массиве
Hd(P, P) = {} // обнуление двумерного массива расстояний
// по Хеммингу
for i=1:P for j=1:P
    Hd(i, j)=Hamming(Mn(i), Mn(j)) // двумерный массив
// расстояний по Хеммингу между парами КП (i, j)
end end
KPh={} // вспомогательный массив
for i=1:P for j=1:P
    if Hd(i, j)>Hmax
        KPh=KPh+(Mn(i), Mn(j), n=0) // массив пар КП (i, j),
// различающихся по Хеммингу на величину большую, чем Hmax
end end
L=len(KPh) // количество пар в массиве
k1=rand*L // случайный выбор первой КП
k2=KPh(k1,2) // номер следующей КП
for k=1:L
    k1= find(KPh(j)==k2 & KPh(i)<>k1 & KPh(n)=0); // поиск
// не использованных ранее строк в массиве пар КП
s=len(k1) // количество пар КП, удовлетворяющих
// условию поиска
k1=k1(rand*s) // случайный выбор номера пары
KP=KP +KPh(k1) // добавление найденной КП
// в формируемый массив KP
KPh(n)=KPh(n)+1 // увеличение счетчика использований
// выбранной КП
k2=KPh(k1,2) // номер следующей КП в паре
end
return KP
    
```

Результат применения алгоритма для формирования шумоподобной серии из 800 сигналов из исходного массива в 126 КП при  $H_{max} = 20$  проиллюстрирован на рис. 7. Для каждой КП ( $i$ ) показано, сколько раз ( $S$ ) она выбиралась алгоритмом в процессе формирования серии.

Сравнительные параметры шумоподобности серии сигналов, образованной  $m$ -последователь-



■ **Рис. 7.** Серия из 800 сигналов  
 ■ **Fig. 7.** Series of 800 signals

■ **Таблица 5.** Сравнительные характеристики шумоподобных серий  
 ■ **Table 5.** Comparative characteristics pseudorandom noise series

Параметр	$m$ -последовательность	Предлагаемый алгоритм
Мощность массива КП	90	>126
Уравновешенность (вероятность появления символа в КП)	$P(\langle -1 \rangle) = 0,516$ $P(\langle 1 \rangle) = 0,484$	$P(\langle -1 \rangle) = 0,499$ $P(\langle 1 \rangle) = 0,501$
Значения $PSLp$ КП	6–3	2
Среднее значение БЛ функции кросс-корреляции	25	10

ностью и предлагаемым алгоритмом из КП длины  $N = 31$ , приведены в табл. 5. Последовательность Лежандра для  $N = 31$  существует в единственном числе и поэтому не может быть использована для формирования серии сигналов.

### Заключение

В статье предложен алгоритм формирования массива бинарных КП, отвечающих требованиям, предъявляемым к максимальным значениям БЛ их апериодической АКФ. Рассматриваемый подход имеет ряд преимуществ по сравнению с известными алгоритмическими способами формирования бинарных КП, таких как  $m$ -последовательности и последовательности Лежандра. Предлагаемый алгоритм позволяет получить массив КП большей мощности с меньшими значениями БЛ апериодической АКФ. Серия зондирующих сигналов, сформированная предлагаемым алгоритмом, имеет лучшие характеристики шумоподобности по сравнению с серией  $m$ -последовательностей. Алгоритм целесообразно использовать в некоторых режимах функционирования радиолокационных систем летательных аппаратов для обнаружения объектов на фоне подстилающей поверхности.

### Литература

1. **Levanon N., Mozeson E.** *Radar Signals*. Chichester, John Wiley & Sons, 2005. 411 p.
2. **Сергеев М. Б., Ненашев В. А., Сергеев А. М.** Вложенные кодовые конструкции Баркера — Мерсенна — Рагхаварао. *Информационно-управляющие*

- системы, 2019, № 3, с. 71–81. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-71-81
3. **Чепруков Ю. В., Соколов М. А.** Квазидополнительные бинарные кодовые последовательности. *Информационно-управляющие системы*, 2016, № 3, с. 72–78. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.72
  4. **Ипатов В. П.** Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. *Принципы и приложения*. М., Техносфера, 2007. 486 с.
  5. **Хасанов М. С., Курганов В. В.** Методы определения коэффициентов квазиоптимального КИХ-фильтра свертки псевдослучайной бинарной последовательности. Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем — 2014: сб. тр. / под общ. ред. акад. РАН А. Л. Стемпковского. М., ИППМ РАН, 2014. Ч. IV. С. 133–136. <http://www.mes-conference.ru/data/year2014/pdf/d145.pdf> (дата обращения: 28.08.2019).
  6. **Леухин А. Н., Шувалов А. С.** Аналитический подход к решению задачи синтеза импульсных последовательностей. [http://www.mivlgu.ru/section1/3-Leuhin\\_Shupalov.pdf](http://www.mivlgu.ru/section1/3-Leuhin_Shupalov.pdf) (дата обращения: 28.08.2019).
  7. **Потехин Е. Н., Леухин А. Н.** Методы оптимизации задачи полного поиска бинарных аperiodических оптимальных последовательностей. *Программные системы и вычислительные методы*, 2013, № 2, с. 192–198. doi: 10.7256/2305-6061.2013.2.7600
  8. **Гантмахер В. Е., Быстров Н. Е., Чеботарев Д. В.** Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб., Наука и техника, 2005. 400 с.
  9. **Skolnik M.** Radar handbook. 3rd edition. Mc Graw-Hill, 2008. 1352 p.
  10. **Cook C., Bernfeld V.** Radar signals. An introduction to theory and application. Academic Press, 1967. 568 p.
  11. **Шаров С. Н., Соловьева В. В.** Особенности использования бинарного квантования по времени и бинарного фазового детектора для синтеза и обработки сложных радиолокационных сигналов. *Морская радиоэлектроника*, 2018, № 3(65), с. 48–53.
  12. **Михайлов В. Н.** Эвристические алгоритмы синтеза сигналов с малыми боковыми лепестками автокорреляционной функции. «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов»: материалы международного конгресса. Т. 1. Научно-практическая конференция «Наукоемкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий», Санкт-Петербург, 12–13 ноября 2010 г., СПб., 2010, с. 92–95. [Arcticas.ru/docs/kongress\\_tisyacheletie2010\\_tom1.pdf](http://Arcticas.ru/docs/kongress_tisyacheletie2010_tom1.pdf) (дата обращения: 12.09.2019).
  13. **Ali W. T.** Detraction the clutter for the best binary phase codes that begot by genetic algorithm using wiener filter. *European Journal of Engineering Research and Science (EJERS)*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 9–14.
  14. **Lellouch G., Mishra A. K., Inggs M.** Design of OFDM radar pulses using genetic algorithm based techniques. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, vol. 52, iss. 4, pp. 1953–1966. doi:10.1109/TAES.2016.140671
  15. **Purna Chandra Rao E. N. V., Singh S. P.** One twenty phase code design for radar. *International Journal of Advanced Computer Research*, 2013, vol. 3, iss. 13, no. 4, pp. 230–235.
  16. **Brest J., Boskovic B.** A heuristic algorithm for a low autocorrelation binary sequence problem with odd length and high merit factor. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 4127–4134. doi:10.1109/ACCESS.2018.2789916
  17. **Song J., Babu P., Palomar D. P.** Optimization methods for designing sequences with low autocorrelation sidelobes. *IEEE Transaction Signal Process*, 2015, vol. 63, no. 15, pp. 3998–4009.
  18. **Mow W. H., Du K. L., Wu W. H.** New evolutionary search for long low autocorrelation binary sequences. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic, 2015, syst.* 51(1), pp. 290–303.
  19. **Biskin O. T., Akay O.** Design of sequences with low autocorrelation sidelobes using genetic algorithms. *10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2017. [ieeexplore.ieee.org/document/8266285](http://ieeexplore.ieee.org/document/8266285) (дата обращения: 12.09.2019).
  20. **Yankevych R., Prudyus I., Miskiv V. M.** Use of genetic algorithm for optimal codes search. *IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, 2019. doi:10.1109/CADSM.2019.8779239
  21. **Толмачев С. Г., Шаров С. Н., Соловьева В. В.** Программа формирования массива кодов бинарного квантования произвольной длины с заданным уровнем «боковых лепестков»: свидетельство о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ. Заявка № 2019617108 от 14 июня 2019 г. Дата гос. регистрации 02.07.2019 г.
  22. **Савельев С. В., Морозова Л. А.** Метод построения хаотических бинарных кодов: сб. тр. II Всероссийской научной конференции по проблемам радиофизики и дистанционного зондирования сред, 2018, Муром, с. 637–641.



UDC 681.391.83

doi:10.31799/1684-8853-2020-1-44-53

## Search for binary code sequences with low autocorrelation sidelobes by the evolutionary method

S. N. Sharov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-9634-155XS. G. Tolmachev<sup>a</sup>, PhD, Tech., orcid.org/0000-0001-9434-1268, tsg17@yandex.ru<sup>a</sup>Joint Stock Company «Concern «Granit-Electron», 3, Gospitalnaia St., 191014, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The parameters chosen for complex coded signals used in active radar systems of aircraft for detecting objects largely determines their qualitative characteristics and the possibility of covert operation. An important task in the design of such on-board systems is the formation of ensembles of pseudorandom-noise binary code sequences of a fixed length with predefined characteristics. **Purpose:** Search for PRN binary code sequences of a given length, optimal by the criterion of the minimum level of the sidelobes of the aperiodic autocorrelation function. **Results:** A procedure of search for binary code sequences with specified parameters based on the evolutionary approach is proposed. The minimum level of positive sidelobes of the autocorrelation function is used as a criterion for the selection of code sequences. An additional restriction is imposed on the length of a substring of codes of the same character. The possibility of forming a representative array of sequences with the best ratio of the main peak of the aperiodic autocorrelation function to its maximum positive sidelobe is shown on the example of 31-bit code sequences. An algorithm is proposed for generating a PRN series of signals using the code sequences found. The Hamming distance is used as a measure of the difference between two binary code sequences in the series. The proposed approach is advantageous as compared to the well-known method of generating PRN signals based on pseudorandom m-sequences. **Practical relevance:** The results obtained can be used in algorithms of airborne radar systems with a high range resolution to detect physical objects on the background of an underlying surface, for example, objects on the water surface.

**Keywords** — code sequence, sidelobe, autocorrelation function, genetic algorithm, recombination, selection.

**For citation:** Sharov S. N., Tolmachev S. G. Search for binary code sequences with low autocorrelation sidelobes by the evolutionary method. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 1, pp. 44–53 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-1-44-53

## References

- Levanon N., Mozeson E. *Radar Signals*. John Wiley & Sons, Chichester, 2005. 411 p.
- Sergeev M. B., Nenashev V. A., Sergeev A. M. Nested code sequences of Barker — Mersenne — Raghavarao. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 71–81 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-71-81
- Cheprukov Yu. V., Socolov M. A. Quasiadditional binary code sequences. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 3, pp. 72–78 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.72
- Ipatov V. P. *Shirokopolosnye sistemy i kodovoe razdelenie signalov. Principy i prilozheniya* [Broadband systems and code division of signals. Principles and applications]. Moscow, Technosfera Publ., 2007. 486 p. (In Russian).
- Khasanov M. S., Kurganov V. V. *Metody opredeleniya koefitsientov kvazioptimal'nogo KIH-fil'tra svertki psevdosluchajnoj binarnoj posledovatel'nosti*. In: *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem — 2014* [Methods of determination the coefficients of quasi-optimal FIR-filter for convolution of pseudorandom binary sequence. In: Collection of Proceedings “Problems of perspective micro- and nanoelectronic systems development — 2014”]. Edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAN Publ., 2014. Part 4. Pp. 133–136 (In Russian).
- Leukhin A. N., Chuvalov A. S. Analiticheskij podhod k resheniyu zadachi sinteza impul'snyh posledovatel'nostej [Analytical approach to solving the problem of pulse sequences synthesis]. Available at: [http://www.mivlgu.ru/section1/3-Leukhin\\_Shuvalov.pdf](http://www.mivlgu.ru/section1/3-Leukhin_Shuvalov.pdf) (accessed: 28 August 2019).
- Potekhin E. N., Leukhin A. N. Optimization methods for the complete search problem for binary aperiodic optimal sequences. *Software Systems and Computational Methods*, 2013, no. 2, pp. 192–198 (In Russian). doi:10.7256/2305-6061.2013.2.7600
- Gantmakher V. E., Bistrov N. E., Chebotarev D. V. *Chumopodobnye signali. Analiz, sintez, obrabotka* [Pseudorandom noise signals. Analysis, synthesis, processing]. Saint-Petersburg, Nauka i tehnika Publ., 2005. 400 p. (In Russian).
- Skolnik M. *Radar handbook*. 3rd edition. Mc Graw-Hill, 2008. 1352 p.
- Cook C., Bernfeld V. *Radar signals. An introduction to theory and application*. Academic Press, 1967. 568 p.
- Sharov S. N., Soloveva V. V. And processing binary time quantization and binary phase detector: effects for waveform radar signal synthesis. *Marine Radio electronics*, 2018, no. 3(65), pp. 48–53 (In Russian).
- Mikhailov V. N. Heuristic algorithms for signal synthesis with small sidelobe of autocorrelation function. *Trudy III Mezhdunarodnogo kongressa “Tseli razvitiia tsiyacheletii” i innovatsionnye printsipy ustoychivogo razvitiia arkticheskikh regionov. Tom 1 “Naukoemkie i innovatsionnye tehnologii v rechenii problem prognozirovaniia i predotvrachenii chrezvychaynykh situatsii i ikh posledstviia”* [Proceedings of the International Congress “Millennium Development Goals” and innovative principles of sustainable development of the Arctic regions”. Vol. 1. Scientific-Practical Conference “High-tech and innovative technologies in solving the problems of forecasting and prevention of emergency situations and their consequences”]. Saint-Petersburg, 2010, pp. 92–95 (In Russian). Available at: [arcticas.ru/docs/Kongress\\_tsiyacheletie2010\\_tom1.pdf](http://arcticas.ru/docs/Kongress_tsiyacheletie2010_tom1.pdf) (accessed 12 September 2019).
- Ali W. T. Detraction the clutter for the best binary phase codes that begot by genetic algorithm using wiener filter. *European Journal of Engineering Research and Science (EJERS)*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 9–14.
- Lellouch G., Mishra A. K., Inggs M. Design of OFDM radar pulses using genetic algorithm based techniques. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, vol. 52, iss. 4, pp. 1953–1966. doi:10.1109/TAES.2016.140671
- Purna Chandra Rao E. N. V., Singh S. P. One twenty phase code design for radar. *International Journal of Advanced Computer Research*, 2013, vol. 3, no. 4, iss. 13, pp. 230–235.
- Brest J., Boskovic B. A heuristic algorithm for a low autocorrelation binary sequence problem with odd length and high merit factor. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 4127–4134. doi:10.1109/ACCESS.2018.2789916
- Song J., Babu P., Palomar D. P. Optimization methods for designing sequences with low autocorrelation sidelobes. *IEEE Transaction Signal Process*, 2015, vol. 63, no. 15, pp. 3998–4009.
- Mow W. H., Du K. L., Wu W. H. New evolutionary search for long low autocorrelation binary sequences. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic*, 2015, syst. 51(1), pp. 290–303.
- Biskin O. T., Akay O. Design of sequences with low autocorrelation sidelobes using genetic algorithms. *10th Interna-*

- tional Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2017. Available at: [ieeexplore.ieee.org/document/8266285](http://ieeexplore.ieee.org/document/8266285) (accessed 12 September 2019).*
20. Yankevych R., Prudyus I., Miskiv V. M. Use of genetic algorithm for optimal codes search. *IEEE 15<sup>th</sup> International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), 2019. doi:10.1109/CADSM.2019.8779239*
  21. Tolmachev S. G., Sharov S. N., Soloveva V. V. Program of formation of an array of binary quantization codes of arbitrary length with a given level of “sidelobes”. Certificate of state registration in the Register of computer programs. Application No. 2019617108 June 14, 2019. Date of state registration 02.07.2019.
  22. Savelyev S. V., Morozova L. A. Method of construction of chaotic binary codes. *Trudy II Vserossijskoj nauchnoj konferencii po problemam radiofiziki i distancionnogo zondirovaniya sred* [Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference on Radiophysics and Remote Sensing of Environments], 2018, Murom, pp. 637–641.

---

---

### ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail ([ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*

---

---