

УДК 621.396.94 EDN ESPWRH

Выбор структуры сигналов для группового управления космическими аппаратами многоспутниковой космической системы с кодовым разделением каналов

А. С. Гарагуля, к. т. н., доцент, vka@mil.ru

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация

И. А. Козин, д. т. н., доцент, vka@mil.ru

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация

В. С. Куликов, vka@mil.ru

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье анализируется задача выбора сигнальных конструкций (СК), которые могут использоваться при реализации группового управления космическими аппаратами многоспутниковой космической системы с кодовым разделением каналов (КРК). Проведено исследование минимаксных ансамблей дискретных псевдослучайных последовательностей Голда, Касами (малого и большого множества), Камалетдинова, бент-последовательностей, объединения Касами и бент-последовательностей. Авторами показано, что ни один из ансамблей последовательностей не удовлетворяет в полной мере требованиям к объему, длине, корреляционным характеристикам, предъявляемым к сигнальным конструкциям для реализации управления множеством объектов одновременно.

Авторами предложен алгоритм формирования и получен ансамбль последовательностей с заданными свойствами на основе объединения последовательностей Голда длины 127 и сегментов последовательностей Камалетдинова равной размерности, выделенных из последовательностей Камалетдинова длины 930. Проведена коррекция полученного ансамбля, исключены последовательности с неудовлетворительными значениями боковыми корреляционными пиками R_{\max} автокорреляционных и взаимокорреляционных функций (АКФ и ВКФ). Исключение последовательностей, с АКФ $R_{\max} \geq 0,2$ и ВКФ $R_{\max} \geq 0,23$, позволило снизить уровень максимальных пиков АКФ на 52,6% и ВКФ на 56,1%, что улучшило корреляционные свойства в целом, при этом сократило ансамбль сформированных последовательностей с 28 896 до 15 272. Полученный ансамбль обладает уровнем максимальных пиков АКФ на 10% ниже и объемом в 118 раз большим, чем ансамбль последовательностей Голда той же длины.

Сделан вывод о целесообразности применения сформированного ансамбля при реализации группового управления космическими аппаратами многоспутниковой космической системы с КРК.

Ключевые слова: групповое управление космическими аппаратами, многоспутниковые космические системы, сигнальные конструкции, минимаксные псевдослучайные последовательности, корреляционные свойства

Signal Structure for Group Control of Space Vehicles of a Multi-Satellite Space System with Code Division of Channels

A. S. Garagulya, *Cand. Sci. (Engineering), Associate Prof., vka@mil.ru*
Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation

I. A. Kozinov, *Dr. Sci. (Engineering), Associate Prof., vka@mil.ru*
Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation

V. S. Kulikov, *vka@mil.ru*
Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article addresses the challenge of selecting signal structures (SS) for group control of spacecraft in a multi-satellite space system utilizing code division of channels (CDC). A comprehensive analysis of minimax ensembles of discrete pseudo-random sequences, including Gold, Kasami (small and large sets), Kamaletdinov sequences, bent-sequences, the combination of Kasami and bent-sequences, is conducted. However, none of these ensembles fully meet the requirements for volume, length, and correlation characteristics necessary for simultaneous control of multiple objects.

To overcome this limitation, the authors propose a formation algorithm that combines Gold sequences of length 127 and segments of the Kamaletdinov sequences, extracted from the Kamaletdinov sequences of length 930, using autocorrelation function (ACF) and mutual correlation function (MCF). By excluding sequences with ACF $R_{\max} \geq 0.2$ and MCF $R_{\max} \geq 0.23$, the maximum peaks of ACF and MCF are reduced by 52.6% and 56.1%, respectively. This leads to an overall improvement in correlation properties while reducing the ensemble of formatted sequences from 28 896 to 15 272. The resulting ensemble exhibits a 10% lower maximum ACF peak level and a 118-fold increase in volume compared to an ensemble of Gold sequences of the same length.

Based on these findings, it is concluded that the formatted ensemble is well-suited for the implementation of group control of spacecraft in a multi-satellite space system with code division of channels.

Keywords: spacecraft group control, multi-satellite space systems, signal-code constructions, minimax pseudo-random sequences, correlation properties

Введение

В настоящее время одной из ведущих тенденцией развития коммерческих космических систем является развертывание в космическом пространстве многоспутниковых орбитальных группировок (МОГ) на основе малых космических аппаратов (КА) [1, 2]. Эта тенденция обусловлена достоинствами малых КА, такими как низкая стоимость, малое время изготовления, возможность организации серийного производства, групповое выведение на орбиту. Наибольшая эффективность эксплуатации малых КА достигается при их применении в составе многоспутниковых космических систем, численность КА которых превышает несколько сотен. Наибольшее развитие в настоящее время получили зарубежные проекты Starlink (около 4400 КА) и OneWeb (более 600 КА). В Российской Федерации на этапе разработки в рамках проекта «Сфера» находится МОГ «Марафон IoT», предназначенная для формирования глобально-распределенной сети информационного обмена IoT («Интернета вещей»). Предполагается, что в МОГ будут входить 264 КА, расположенных в 12 плоскостях на высоте 700–750 км [3, 4].

Эффективное применение по назначению МОГ малых КА обеспечивается наземными комплексами управления (НКУ), средства которых реализуют управляющие функции на этапе выведения и орбитального полета. Основным недостатком существующих НКУ применительно к МОГ является неудовлетворительная пропускная способность радиоэлектронных средств (РЭС) управления КА, характеризуемая количеством КА, которыми может управлять РЭС с заданным качеством, за определенный промежуток времени. Нахождение в зоне радиовидимости РЭС управления сразу нескольких КА требует разработки такой технологии управления, при которой будет возможно осуществление одновременного управления несколькими космическими аппаратами МОГ. Перспективной является технология группового управления КА, при которой информационный обмен осуществляется сразу с несколькими КА за счет множественного доступа с КРК. Это обуславливает актуальность решения задачи выбора класса и формирования ансамблей минимаксных двоичных последовательностей,

СК на основе которых позволит осуществить передачу управляющих воздействий РЭС на множество управляемых объектов.

Общая постановка задачи

Повышение пропускной способности НКУ требует создания РЭС, реализующих одновременное управление группой КА, так называемых РЭС группового управления. Одним из вариантов реализации группового управления является использование технологии множественного доступа с КРК. Реализованные в настоящее время алгоритмы формирования двоичных последовательностей обладают ограниченным объемом ансамбля последовательностей и неудовлетворительными корреляционными свойствами, что приводит к повышению вероятности ошибки различения сигналов при передаче информации. Это обуславливает актуальность решения задачи формирования новых ансамблей двоичных последовательностей.

Целью работы является формирование и выбор ансамбля двоичных последовательностей с заданными характеристиками для реализации группового управления космическими аппаратами многоспутниковой космической системы с КРК. Для достижения поставленной цели последовательно решаются задачи: обоснованного выбора наилучших для обеспечения КРК ансамблей двоичных последовательностей; формирования ансамбля двоичных последовательностей с заданными характеристиками; исследования корреляционных свойств сформированного ансамбля двоичных последовательностей.

Для формальной постановки задачи и последующего ее решения в работе используются обозначения, представленные в табл. 1.

На формальном уровне постановка задачи исследования выглядит следующим образом.

Дано: максимальное количество одновременно управляемых КА $N_{\text{упр}}$, диапазон допустимых длин двоичных последовательностей $[L_{\text{min}}, L_{\text{max}}]$, критерии ортогональности O последовательностей ансамбля и минимизации максимальных значений боковых пиков АКФ и пиков ВКФ ρ_{max}^2 .

Найти: ансамбль двоичных последовательностей A , определяемый элементами $a_{v,l}$, с учетом

Таблица 1. Используемые обозначения и их физический смысл

Обозначение	Физический смысл обозначения
$N_{\text{упр}}$	– количество одновременно управляемых КА
V	– объем ансамбля двоичных последовательностей A
L	– длина двоичных последовательностей ансамбля A
$[L_{\min}, L_{\max}]$	– диапазон допустимых длин двоичных последовательностей
$a_{v,l} \in \{-1; 1\}, v \in V, l \in L$	– значения элементов двоичных последовательностей ансамбля A
$\mathbf{a}_v = (a_{v,1}, a_{v,2}, \dots, a_{v,L}), v \in V$	– двоичная последовательность, входящая в ансамбль A
$A = \ \ a_{v,l} v = \overline{1, V}, l = \overline{1, L}\ = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \dots \\ \mathbf{a}_k \\ \mathbf{a}_l \\ \mathbf{a}_V \end{pmatrix}$	– ансамбль двоичных последовательностей \mathbf{a}_v , определяемый элементами $a_{v,l}$, входящими в него, объемом V и длиной последовательностей L
$O = [0, L]$	– значение ортогональности двух последовательностей, входящих в ансамбль
ρ_{\max}^2	– квадрат максимума корреляции, равный максимальному значению боковых пиков АКФ и пиков ВКФ

заданных характеристик требуемой длины L и объема V последовательностей и предъявляемых к ансамблю критериев ортогональности $O(\mathbf{a}_k, \mathbf{a}_l) > 0$ при $k \neq l$ и $O(\mathbf{a}_k, \mathbf{a}_l) > L$ при $k = l$ и минимизации максимальных значений боковых пиков АКФ и пиков ВКФ $\rho_{\max}^2(\mathbf{a}_k, \mathbf{a}_l) \rightarrow 1/L$.

$$\begin{aligned}
 A: \|\|a_{v,l} | v = \overline{1, V}, l = \overline{1, L}\| &= \\
 &= \begin{pmatrix} a_{1,0}, a_{1,1}, \dots, a_{1,L} \\ a_{2,0}, a_{2,1}, \dots, a_{2,L} \\ \dots \\ a_{k,0}, a_{k,1}, \dots, a_{k,L} \\ a_{l,0}, a_{l,1}, \dots, a_{l,L} \\ a_{V,0}, a_{V,1}, \dots, a_{V,L} \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \dots \\ \mathbf{a}_k \\ \mathbf{a}_l \\ \mathbf{a}_V \end{pmatrix} \left| \begin{array}{l} O(\mathbf{a}_k, \mathbf{a}_l) \rightarrow \begin{cases} 0, k \neq l, \\ L, k = l, \end{cases} \\ \rho_{\max}^2(\mathbf{a}_k, \mathbf{a}_l) \rightarrow 1/L, \\ V \geq N_{\text{упр}}, \\ L \in [L_{\min}, L_{\max}]. \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Выбор ансамблей минимаксных двоичных последовательностей для реализации группового управления

Критериями выбора ансамблей двоичных последовательностей для реализации группового управления космическими аппаратами многоспутниковой космической системы с КРК являются: хорошие корреляционные характеристики; ортогональность; объем ансамбля, позволяющий обеспечить каждый управляемый объект уникальной последовательностью; и длительность, обеспечивающая достаточную скорость передачи информации.

Эффективное КРК осуществляется при использовании ортогональных минимаксных последовательностей, основным достоинством которых являются низкие пики периодической ВКФ и низкие боковые пики периодической АКФ, значения которых находятся или стремятся к границе Велча [5]:

$$\rho_{\max}^2 \geq \frac{V-1}{VL-1} \approx \frac{1}{L},$$

где ρ_{\max} — значение максимального корреляционного пика, L — длина двоичной последовательности, V — объем ансамбля последовательностей,

Максимальный корреляционный пик определяется как наибольшая из величин: максимального бокового пика АКФ среди всех последовательностей ρ_{\max}^a и максимального пика ВКФ среди всех пар последовательностей ρ_{\max}^c [5]:

$$\begin{aligned}\rho_{\max} &= \max \{ \rho_{\max}^a, \rho_{\max}^c \}, \\ \rho_{\max}^a &= \max_{k, m \neq 0} | \rho_{p, kk}(m) |, \\ \rho_{\max}^c &= \max_{\substack{k, l, m \\ k \neq l}} | \rho_{p, kl}(m) |,\end{aligned}$$

где k, l — номера последовательности ансамбля; m — сдвиг последовательности; $\rho_{p, kk}(m)$ — значения боковых пиков АКФ; $\rho_{p, kl}(m)$ — значения пиков ВКФ, определяемые следующим образом:

$$\begin{aligned}\rho_{p, kk}(m) &= \frac{1}{\|\mathbf{a}\|^2} \sum_{i=0}^{L-1} a_i a_{i-m}^*, \\ \rho_{p, kl}(m) &= \frac{1}{\|\mathbf{a}_k\| \cdot \|\mathbf{a}_l\|} \sum_{i=0}^{L-1} a_{k,i} a_{l,i-m}^*,\end{aligned}$$

где \mathbf{a} — вектор двоичной последовательности, a_i — амплитуда элементов двоичной последовательности [5].

В настоящее время в системах, реализующих множественный доступ с КРК, используются ансамбли последовательностей Голда и большие множества Касами [5, 6]. Главным недостатком данных ансамблей последовательностей являются относительно высокое значение квадрата максимума корреляции на фоне некоторых других ансамблей минимаксных последовательностей. Требования к формированию последовательностей ориентированы на минимаксный критерий, при котором обеспечивается минимизация максимальной из нежелательных корреляций. Так, у последовательностей Голда при $n = 2 \bmod 4$ значение стремится к $\rho_{\max}^2 \rightarrow 4/L$, а при $n \neq 0 \bmod 2$ значение стремится к $2/L$, большое множество Касами имеет значение $\rho_{\max}^2 \rightarrow 4/L$.

Лучшими значениями квадрата максимума корреляции обладает малое множество Касами ($1/L$),

но, в отличие от ансамблей, описанных выше, количество формируемых последовательностей значительно меньше. Также существуют и другие бинарные минимаксные ансамбли псевдослучайных последовательностей, у которых значение квадрата максимума корреляции стремится к границе Велча: ансамбль последовательностей на основе бент-функций [5, 7], которые можно объединить с малым множеством Касами для увеличения объема ансамбля, и ансамбль последовательностей Камалетдинова [5, 8]. Характеристики перечисленных бинарных минимаксных ансамблей псевдослучайных последовательностей представлены в табл. 2.

На рис. 1 представлены зависимости объема ансамбля от длины последовательности, приведенные в табл. 2.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 1 позволяет разделить ансамбли последовательностей на три типа:

- ансамбли, отношения объема к длине у которых много меньше единицы;
- ансамбли, отношения объема к длине у которых приблизительно равны единице;
- ансамбли, отношения объема к длине у которых много больше единицы.

Так как для реализации множественного доступа с КРК управляемым объектам присваиваются уникальные двоичные последовательности, то наилучшими из представленных являются ансамбли последовательностей Голда и большое множество Касами, которые обладают наибольшим объемом V , позволяющим сопоставить большее количество комбинаций соответствующему числу объектов при равных длинах L .

На рис. 2 представлены зависимости отношения квадрата максимума корреляции двоичных последовательностей от их длины.

Исследования зависимости квадрата максимума корреляции двоичных последовательностей ансамблей от их длины позволяют сделать вывод, что наилучшие показатели достигаются у ансамблей Камалетдинова, бент-функций и малого множества Касами. Несмотря на различные достоинства последовательностей на основе бент-функций, значения исследуемых параметров отличаются от аналогичных у последовательностей Камалетдинова и малого множества последовательностей Касами

Таблица 2. Основные характеристики бинарных минимаксных ансамблей псевдослучайных последовательностей

Ансамбль последовательностей	Длина, L	Объем, V	Квадрат максимума корреляции, ρ_{\max}^2
Голда	$2^n - 1$	$L + 2$	$\frac{(\sqrt{2(L+1)} + 1)^2}{L^2} \rightarrow \frac{2}{L}, n \neq 0 \pmod{2}$ $\frac{(2\sqrt{(L+1)} + 1)^2}{L^2} \rightarrow \frac{4}{L}, n = 2 \pmod{4}$
Касами (малое множество)	$2^n - 1$	$\sqrt{L+1}$	$\frac{(\sqrt{(L+1)} + 1)^2}{L^2} \rightarrow \frac{1}{L}$
Касами (большое множество)	$2^n - 1$	$(L+2)\sqrt{L+1}$	$\frac{(2\sqrt{(L+1)} + 1)^2}{L^2} \rightarrow \frac{4}{L}$
Бент-последовательности	$2^n - 1$	$\sqrt{L+1}$	$\frac{(\sqrt{(L+1)} + 1)^2}{L^2} \rightarrow \frac{1}{L}$
Объединение Касами и бент-последовательностей	$2^n - 1$	$2\sqrt{L+1} - 1$	$\frac{(\sqrt{(L+1)} + 1)^2}{L^2} \rightarrow \frac{1}{L}$
Камалетдинова	$p(p-1)$	$\frac{\sqrt{4L+1} + 3}{2}$	$\frac{(p+3)^2}{L^2} \rightarrow \frac{1}{L}$

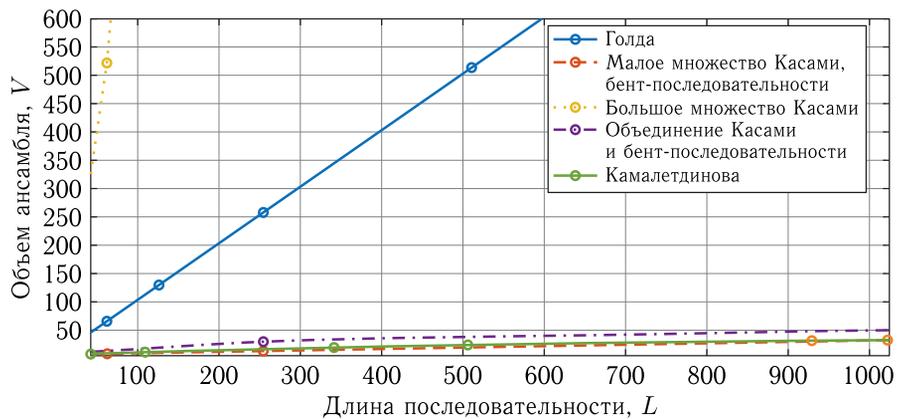


Рис. 1. Зависимости объема ансамбля от длины двоичных последовательностей

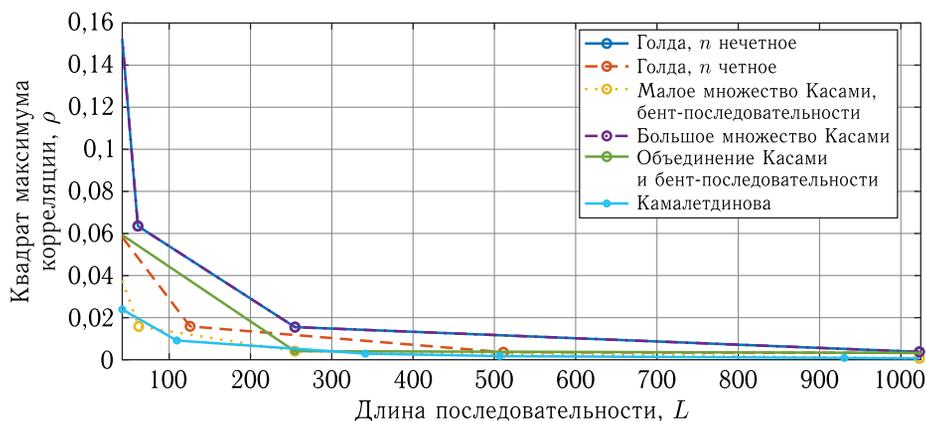


Рис. 2. Зависимости квадрата максимума корреляции двоичных последовательностей ансамбля от их длины

незначительно, при этом их реализация технически сложнее. Поэтому ансамбль Камалетдинова является более предпочтительным в диапазоне длин последовательностей $600 \leq L \leq 1024$.

Таким образом, разные классы последовательностей обладают противоположными свойствами, необходимыми для реализации КРК. Большое множество Касами и последовательности Голда имеют значительные объемы ансамблей последовательностей при умеренной длине, но при этом значения квадрата максимума корреляции по сравнению с другими значительно выше. Ансамбли Камалетдинова, бент-функций и малого множества Касами обладают значительно меньшими боковыми корреляционными пиками, но их недостатком является неудовлетворительный объем. Поэтому для решения задачи обеспечения множественного доступа с КРК необходимо формирование нового ансамбля двоичных последовательностей. Формирование ансамбля последовательностей с необходимыми характеристиками осуществляется путем сложения ансамбля последовательностей Голда с равными им по длине сегментами, полученными из ансамбля последовательностей Камалетдинова большей длины.

Предполагается, что объем сформированного ансамбля двоичных последовательностей будет значительно выше при лучших значениях корреляционных пиков, чем у последовательностей Голда той же длины.

Формирование ансамбля двоичных последовательностей с заданными характеристиками

При формировании ансамбля двоичных последовательностей с заданными характеристиками необходимо придерживаться следующего алгоритма:

1. Определить требуемое соотношение S длин двоичных последовательностей Голда L_Γ и Камалетдинова L_K , при котором будут выполняться условия: $L_K > SL_\Gamma$, $V_\Gamma V_K S > N_{\text{упр}}$.

2. Сформировать ансамбль двоичных последовательностей Голда с длиной L_Γ и объемом V_Γ .

3. Сформировать ансамбль двоичных последовательностей Камалетдинова объемом V_K и дли-

ной L_K , в S раз превышающей длину последовательностей Голда.

4. Выделить из всех последовательностей Камалетдинова S сегментов длины L_{KC} так, чтобы выполнялось равенство $L_{KC} = L_\Gamma$.

5. Сложить по модулю два элемента полученных последовательностей Голда и сегментов последовательностей Камалетдинова.

Так как выполнение равенства $L_K = SL_\Gamma$ невозможно, то при выполнении пункта 4 представленного алгоритма символы, не вошедшие в сегменты, исключаются.

Ансамбль двоичных последовательностей Голда формируется в соответствии со следующим выражением [5, 6]:

$$d_{\Gamma k,i} = \begin{cases} w_i v_{i-k}, & k = 1, 2, \dots, L_\Gamma, \\ w_i, & k = L_\Gamma + 1, \\ v_{i-k}, & k = L_\Gamma + 2, \end{cases}$$

где k — номер последовательности, w_i — первая формирующая M -последовательность, v_i — вторая формирующая M -последовательность, i — тактовый сдвиг последовательности.

В общем случае ансамбль последовательностей Камалетдинова формируется в соответствии с принципом, изложенным в [5]. Необходимо отождествить номер i символа в последовательности с элементом поля Галуа $GF(p)$, оперируя с ним по модулю p , образовать $p+1$ p -ичных последовательностей $d_{Kk,i}$ над $GF(p)$ по правилу:

$$d_{Kk,i} = \begin{cases} i + \alpha^{i+k} + \alpha^{-i}, & k = 1, 2, \dots, p-1, \\ i + \alpha^i, & k = p, \\ i + \alpha^{-i}, & k = p+1, \end{cases} \quad (1)$$

где α — примитивный элемент $GF(p)$, $i = \dots, -1, 0, 1, \dots$.

Так как выражение (1) рассчитывается для p -ичной системы счисления в соответствующем поле Галуа, необходим переход к бинарному алфавиту $\{\pm 1\}$ [5, 8]:

$$a_{Kk,i} = \psi(d_{Kk,i}), \\ k = 1, 2, \dots, p+1; \quad i = \dots, -1, 0, 1, \dots,$$

где $\psi(x)$ — двузначный характер единицы поля $GF(p)$, определяемый следующим образом [5]:

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & \log_{\alpha} x = 0 \pmod{2} \\ -1, & \log_{\alpha} x \neq 0 \pmod{2} \end{cases} = (-1)^{\log_{\alpha} x}.$$

Определение соотношений длин последовательностей Голда и Камалетдинова является нетривиальной задачей. В результате моделирования было установлено, что удовлетворительные результаты получаются при формировании ансамблей последовательностей Голда длины 127 и Камалетдинова длины 930. Для формирования ансамбля последовательностей Камалетдинова длины 930 примитивным элементом α в поле Галуа $GF(31)$ является число 13. Каждая из сформированного ансамбля последовательностей Камалетдинова длины 930 делится на 6 сегментов по 133 и один 132 символа. В дальнейшем для получения сегментов последовательностей Камалетдинова, равных длине последовательностей Голда (127), отбрасываются последние шесть и пять символов соответственно.

Элементы полученных сегментов последовательностей Камалетдинова длины 127 складываются с последовательностями Голда по модулю два:

$$a_{Ck,i} = a_{Kk1,i} \oplus d_{\Gamma k2,i},$$

где $k1$ — объем ансамбля сегментов последовательностей Камалетдинова (224 последовательности), $k2$ — объем ансамбля сегментов последовательностей Голда (129 последовательностей).

Таким образом, формируется ансамбль последовательностей объемом, равным 28 896, с длиной 127 символов. Это позволяет организовать 14 448 пар последовательностей, что существенно превышает объемы исходных ансамблей.

Исследование корреляционных свойств сформированного ансамбля двоичных последовательностей

Для исследования свойств сформированного ансамбля двоичных последовательностей и определения соответствия требуемым корреляционным характеристикам необходим расчет следующих основных параметров [6]:

1. Максимального значения боковых пиков (R_{\max}).

2. Среднего значения модулей боковых пиков:

$$m_{|R|} = \frac{1}{2L} \sum_{i=-(L-1)}^{L-1} |R_i|, \quad (2)$$

где R_i — значения боковых корреляционных пиков.

3. Среднеквадратичного значения боковых пиков:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{2L} \sum_{i=-(L-1)}^{L-1} R_i^2. \quad (3)$$

4. Среднеквадратичного значения модулей боковых пиков:

$$\sigma_{|R|}^2 = \sigma_R^2 - m_{|R|}^2. \quad (4)$$

Для оценки сформированного ансамбля осуществлено сравнение его корреляционных свойств с исходными последовательностями Голда и Камалетдинова, а также с полученными сегментами Камалетдинова. Результаты расчета значений корреляционных параметров двоичных последовательностей (2)–(4), нормированных к длине, представлены в табл. 3.

Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет сделать вывод, что из-за высоких значений боковых пиков АКФ и пиков ВКФ сегментов последовательностей Камалетдинова (0,34 и 0,5) первичные значения максимумов боковых пиков корреляционных функций сформированных последовательностей (0,38 и 0,41) почти в два раза хуже, чем у исходного ансамбля последовательностей Голда (0,22 и 0,23), который предполагалось улучшить. Однако количество сформированных последовательностей увеличилось в 224 раза относительно объема ансамбля последовательностей Голда (129), до 28 896. Такой объем ансамбля является избыточным, что позволяет исключить последовательности с наихудшими корреляционными характеристиками для улучшения свойств всего ансамбля. В качестве порога выбрано значение боковых корреляционных пиков АКФ, равное 0,2, и ВКФ, равное 0,23. Последовательности с параметрами R_{\max} , превышающими порог, исключаются. Значения корреляционных параметров сформированного и полученного в результате коррекции ансамблей двоичных последовательностей приведены в табл. 4.

Таблица 3. Корреляционные параметры исследуемых ансамблей дискретных псевдослучайных последовательностей

Ансамбль	АКФ				ВКФ			
	R_{\max}	$m_{ r }$	σ_r	$\sigma_{ r }$	R_{\max}	$m_{ r }$	σ_r	$\sigma_{ r }$
Последовательности Голда $L = 127, V = 129$	0,22	0,06	0,08	0,05	0,23	0,06	0,07	0,05
Последовательности Камалетдинова $L = 930, V = 32$	0,08	0,02	0,03	0,02	0,08	0,02	0,02	0,01
Сегмент последовательностей Камалетдинова $L = 127, V = 224$	0,34	0,07	0,10	0,07	0,5	0,06	0,09	0,06
Сформированные последовательности $L = 127, V = 28\ 896$	0,38	0,09	0,12	0,08	0,41	0,06	0,08	0,05

Таблица 4. Корреляционные параметры ансамблей дискретных псевдослучайных последовательностей до и после коррекции

Ансамбль	АКФ				ВКФ			
	R_{\max}	$m_{ r }$	σ_r	$\sigma_{ r }$	R_{\max}	$m_{ r }$	σ_r	$\sigma_{ r }$
Сформированные последовательности до коррекции $L = 127, V = 28\ 896$	0,38	0,09	0,12	0,08	0,41	0,06	0,08	0,05
Последовательности после коррекции $L = 127, V = 15\ 272$	0,2	0,06	0,08	0,05	0,23	0,06	0,07	0,05

На рис. 3 и 4 представлены максимальные значения пиков АКФ и ВКФ последовательностей Голда, сегментов последовательностей Камалетдинова и сформированного ансамбля двоичных последовательностей до и после коррекции. Графическое представление позволяет оценить снижение значений боковых пиков полученного ансамбля последовательностей, подвергнутых коррекции.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что исключение неудовлетворительных последовательностей с максимальным значением боковых пиков АКФ $R_{\max} \geq 0,2$ и ВКФ $R_{\max} \geq 0,23$ сокращает объем сформированных последовательностей с 28 896 до 15 272, при этом уровень максимальных пиков АКФ — на 52,6% и ВКФ — на 56,1% ниже, чем до коррекции. Предлагаемый ансамбль сформированных двоичных последовательностей обладает лучшими автокорреляционными свойствами относительно ансамбля после-

довательностей Голда (уровень максимальных пиков АКФ на 10% ниже) и позволяет сформировать ансамбль, объем которого выше в 118 раз, чем объем ансамбля последовательностей Голда той же длины.

Заключение

В работе решена актуальная задача выбора класса и формирования ансамблей минимаксных двоичных последовательностей для СК группового управления. Проведено исследование ряда известных минимаксных дискретных псевдослучайных последовательностей (Голда, Касами, бент-последовательности, Камалетдинова), установлено, что они не удовлетворяют требованиям к объему ансамблей, длине и корреляционным характеристикам для решения задачи управления множеством объектов одновременно.

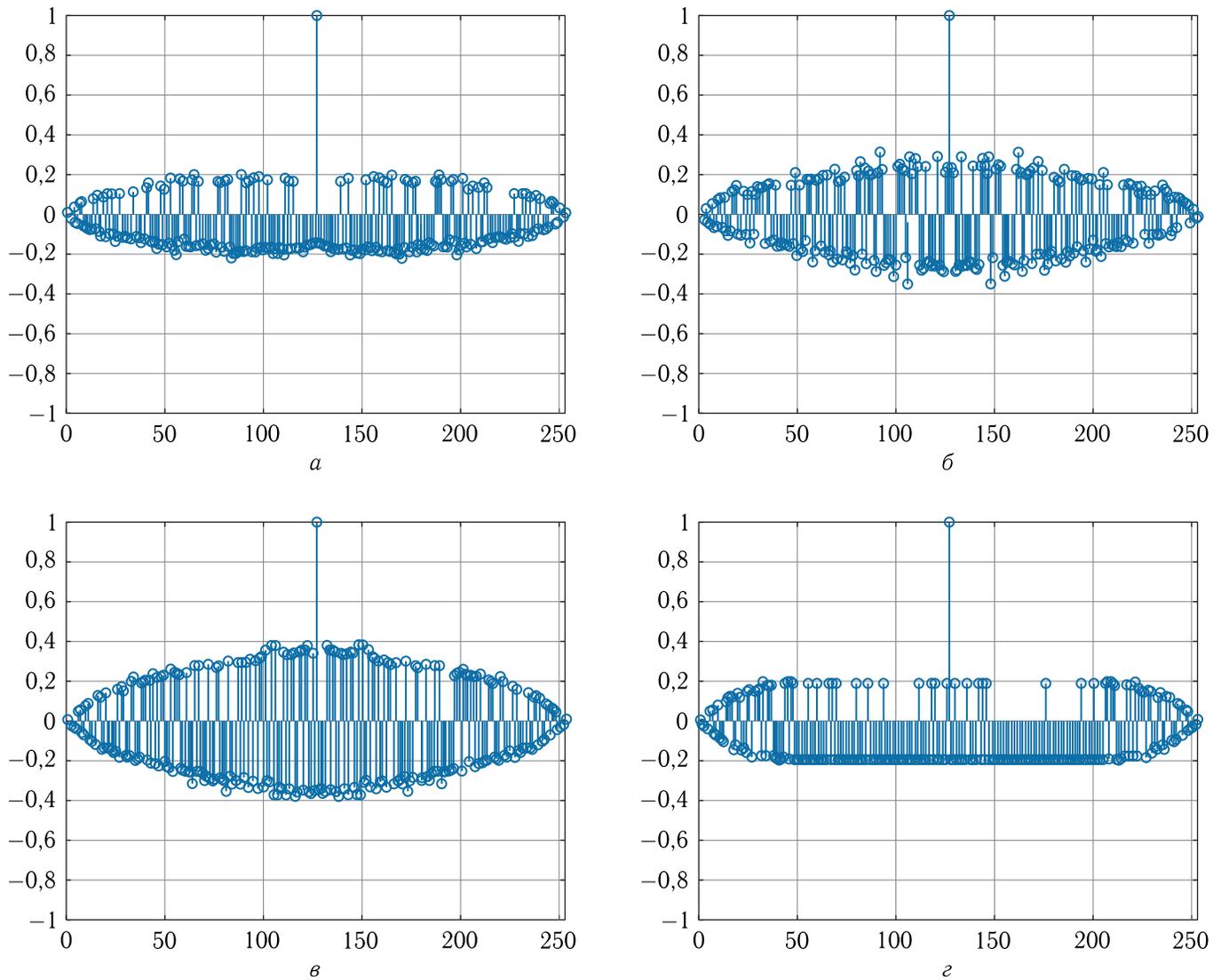


Рис. 3. Максимальные значения боковых пиков АКФ: а) последовательностей Голда; б) сегментов последовательностей Камалетдинова; в) сформированных последовательностей до коррекции; г) сформированных последовательностей после коррекции

Предложен алгоритм формирования и на его основе получен ансамбль двоичных последовательностей с заданными свойствами на базе объединения последовательностей Голда длины 127 и сегментов последовательностей Камалетдинова равной размерности, выделенных из последовательностей Камалетдинова длины 930. Проведена коррекция полученного ансамбля, исключены последовательности с неудовлетворительными значениями боковыми корреляционными пиками R_{\max} АКФ и ВКФ. Исключение двоичных последовательностей с АКФ $R_{\max} \geq 0,2$ и ВКФ $R_{\max} \geq 0,23$ позволило сни-

зить уровень максимальных боковых пиков АКФ на 52,6% и пиков ВКФ на 56,1%, что улучшило корреляционные свойства в целом, при этом сократило ансамбль сформированных последовательностей с 28 896 до 15 272. Полученный ансамбль обладает уровнем максимальных пиков АКФ на 10% ниже и объемом в 118 раз большим, чем ансамбль последовательностей Голда той же длины.

Сделан вывод о целесообразности применения сформированного ансамбля при реализации группового управления космическими аппаратами многоспутниковой космической системы с КРК.

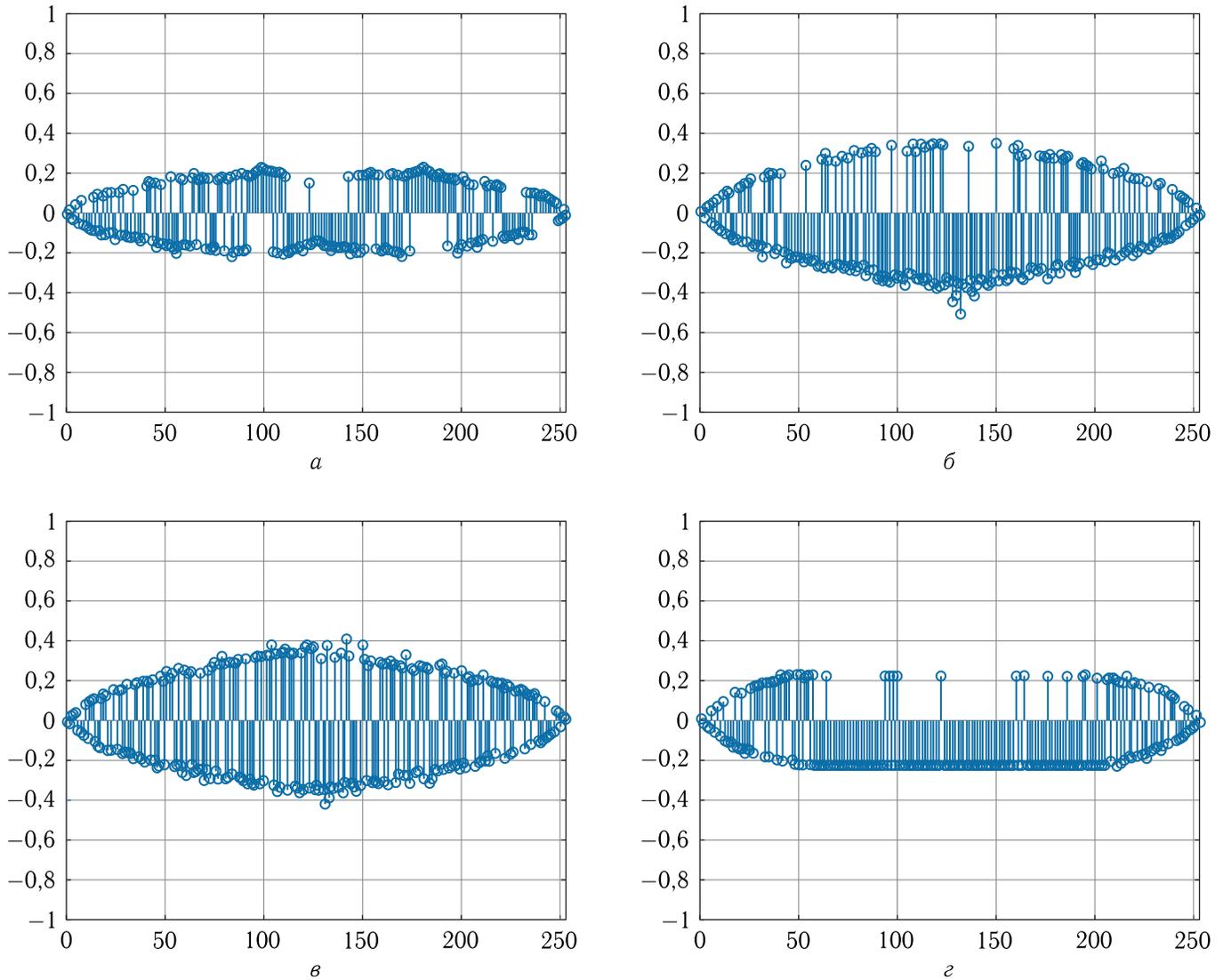


Рис. 4. Максимальные значения пиков ВКФ: а) последовательностей Голда; б) сегментов последовательностей Камалетдинова; в) сформированных последовательностей до коррекции; г) сформированных последовательностей после коррекции

Список литературы

1. Наумочкин Д. В., Петухов А. И., Полуян М. М. Анализ тенденций развития сверхмалых космических аппаратов // Вооружение и экономика, 2019, вып. 4. С. 37–43.
2. Бетанов В. В., Волков С. А., Данилин Н. С. и др. Проблемные вопросы создания многоспутниковых орбитальных группировок на базе малоразмерных космических аппаратов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 3. С. 57–65.
3. Байгутлина И. А., Замятин П. А., Дыбля А. Ю. и др. Создание нового поколения терминального оборудования для спутниковых систем связи по программе «Сфера» // Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию полетов в космос Ю. А. Гагарина и Г. С. Титова, 2021, т. 2. С. 116–129.
4. Потюпкин А. Ю., Волков С. А., Тимофеев Ю. А. Перспективные сервисы многоспутниковых космических систем // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2021, т. 8, вып. 1. С. 59–68.

5. *Ипатов В.П.* Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М.: Техносфера, 2007. 488 с.
6. *Ряховский Е.П., Харченко А.В.* Шумоподобные сигналы в каналах управления космическими аппаратами. Часть 1. Свойства и принципы формирования. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. 146 с.
7. *Тараненко П.Г.* Псевдослучайные и кодовые последовательности: методы синтеза и анализа. СПб.: ВИКУ имени А.Ф. Можайского, 1999. 112 с.
8. *Камалетдинов Ж.Б.* Оптимальные множества бинарных последовательностей // Проблемы передачи информации, 1996, т. 32, вып. 2. С. 39–44.

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.05.2023
Дата принятия рукописи
в печать 01.08.2023