

РАДИОТЕХНИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Научная статья

УДК 629.052.3

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186310>

EDN: <https://www.elibrary.ru/PWBDWV>

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ КОДОВ ГОЛЕЯ В РАДИОЛОКАТОРАХ С
СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ**

**Илья Александрович Кузьмин¹, Юрий Михайлович Мелёшин^{2✉}, Вадим
Николаевич Карпов³, Максим Олегович Гончаров⁴, Вадим Константинович
Цветков⁵**

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной
техники»

Москва, Зеленоград, Россия

¹kuzmin.ilya.al@gmail.com

^{2✉}i@imym.ru

³vadimkarpov@icloud.com

⁴maxim.mgoncharov2001@gmail.com

⁵tsvetkov_vk@mail.ru

Аннотация. В работе представлено исследование возможности использования
комплементарных кодов Голея в качестве модулирующего сигнала в радиолокации с
синтезированной апертурой. В работе определено влияние амплитудного разбаланса
и фазового сдвиг между последовательностями, фазового набег внутри

последовательности и влияние низкочастотной цифровой фильтрации на такие параметры автокорреляционной функции последовательности, как мерит-фактор и пиковый уровень боковых лепестков. В работе представлены результаты экспериментальных исследований, полученные с использованием малогабаритного радиолокатора с синтезированной апертурой, размещаемого на беспилотном летательном аппарате (БПЛА). В результате эксперимента выполнено сравнение радиолокационных изображений, полученных с использованием кодов Голя и М-последовательностей.

Ключевые слова: РСА, комплементарные последовательности Голя, М-последовательности, мерит-фактор, фазокодовая манипуляция

Для цитирования: Кузьмин И.А., Мелёшин Ю.М., Карпов В.Н., Гончаров М.О., Цветков В.К. Исследование возможности использования комплементарных кодов Голя в РСА // Труды МАИ. 2025. № 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186310>

RADIO ENGINEERING, COMPUTER ENGINEERING, INSTRUMENTATION AND COMMUNICATIONS

Original article

STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING GOLAY'S COMPLEMENTARY CODES IN SYNTHESIS APERTURE RADAR.

**Ilya A. Kuzmin¹, Yuri M. Meleshin^{2✉}, Vadim N. Karpov³, Maxim O. Goncharov⁴,
Vadim K. Tsvetkov⁵**

National Research University of Electronic Technology,
Moscow, Zelenograd, Russia

¹kuzmin.ilya.al@gmail.com

²i@imym.ru✉

³vadimkarpov@icloud.com

⁴maxim.mgoncharov2001@gmail.com

⁵tsvetkov_vk@mail.ru

Abstract. The article presents a study of the possibility of using complementary Golay codes as a modulating signal in synthetic aperture radar. The paper determines the influence of the amplitude imbalance and phase shift between sequences, phase incursion within a sequence, and the influence of low-frequency digital filtering on such parameters of the autocorrelation function of a sequence as the merit factor and the peak level of side lobes. The paper presents the results of experimental studies obtained using a small-sized synthetic aperture radar placed on an unmanned aerial vehicle (UAV). As a result of the experiment, a comparison of radar images obtained using Golay codes and M-sequences was performed.

Keywords: SAR, Golay complementary sequences, M-sequences, merit factor, phase-code manipulation

For citation: Kuzmin I.A., Meleshin Y.M., Karpov V.N., Goncharov M.O., Tsvetkov V.K. Study of the possibility of using complementary Golay codes in SAR. // Trudy MAI. 2025. № 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186310>

Постановка задачи

В настоящее время радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) используются для решения большого количества задач – картография, сельское хозяйство, ледовая разведка, контроль трубопроводов и нефтепроводов. Ведутся

непрерывные работы по усовершенствованию как аппаратной, так и алгоритмической части РСА.

Важным вопросом является выбор излучаемой последовательности [1], поскольку от этого зависит эффективность подавления боковых лепестков и снижение чувствительности системы к многолучевым интерференциям. Особую роль в этом контексте играют последовательности с низким уровнем боковых лепестков автокорреляционной функции последовательности (АКФ). Чем выше пиковый уровень боковых лепестков (ПУБЛ), тем выше вероятность ложных обнаружений: сигнал, отражённый от стороннего объекта или многолучевой копии, может попасть в зону бокового лепестка, породив ложный пик на выходе коррелятора. Поэтому для задач высокой точности принципиально важно использовать такие последовательности, у которых максимум автокорреляционной функции (главный лепесток) резко выделяется на фоне боковых.

На сегодняшний день активно используются сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [2-5] и сигналы с фазокодовой модуляцией (ФКМ) [6-8]. Использование ЛЧМ сигналов считается более классическим подходом в связи с хорошими автокорреляционными свойствами ЛЧМ сигналов и низким интегральным уровнем боковых лепестков АКФ. Однако использование циклических сдвигов [9-10] и квазиоптимальной фильтрации [11] для ФКМ сигналов позволяют достичь сопоставимого качества радиолокационных изображений (РЛИ). В [12] продемонстрировано, что в зависимости от целей радиолокационной съемки, допускается использование как ЛЧМ, так и ФКМ сигналов. Использование ФКМ сигналов позволяет упростить аппаратную реализацию радиолокатора – отказаться от

цифро-аналогового преобразователя, использовать аналого-цифровой преобразователь с меньшим количеством разрядом, что приводит к снижению цены и энергопотребления радиолокатора [13-14]. Важным преимуществом ФКМ сигналов является возможность генерации большого количества квазиортогональных сигналов, что позволяет использовать различные алгоритмы, для повышения качества РЛИ и оптимизации ресурсов радиолокатора [15-16]

Для модуляции ФКМ сигнала широко используются М-последовательности и последовательности Лежандра с циклическими сдвигами. Известны также комплементарные, генерируемые парами последовательности, в теории обеспечивающие значительное подавление боковых лепестков, например, последовательности Голея [17-22].

Целью работы является исследование обоснованности и потенциальной возможности применения комплементарных последовательностей Голея в системах радиолокации с синтезированной апертурой. В процессе выполнения работы проведена оценка влияния различных искажающих факторов на характеристики АКФ последовательностей, проведен эксперимент с реальным РСА, подтверждающий математическое моделирование.

Комплементарные последовательности Голея

Пусть имеются две автокорреляционные функции последовательностей А и В длиной $N - j$:

$$R_A(j) = \sum_{i=1}^N a_i a_{i+j}$$

$$R_B(j) = \sum_{i=1}^N b_i b_{i+j}$$

Тогда, если А и В – комплементарные последовательности, то

$$R_A(j) + R_B(j) = 2N, \text{ если } j = 0$$

$$R_A(j) + R_B(j) = 0, \text{ если } j \neq 0$$

Таким образом, благодаря использованию комплементарных последовательностей Голя теоретически можно достичь нулевого уровня ПУБЛ, что привело бы к существенному увеличению качества изображения, получаемого с помощью РСА. На рисунке 1 представлена циклограмма работы РСА с комплементарными последовательностями.

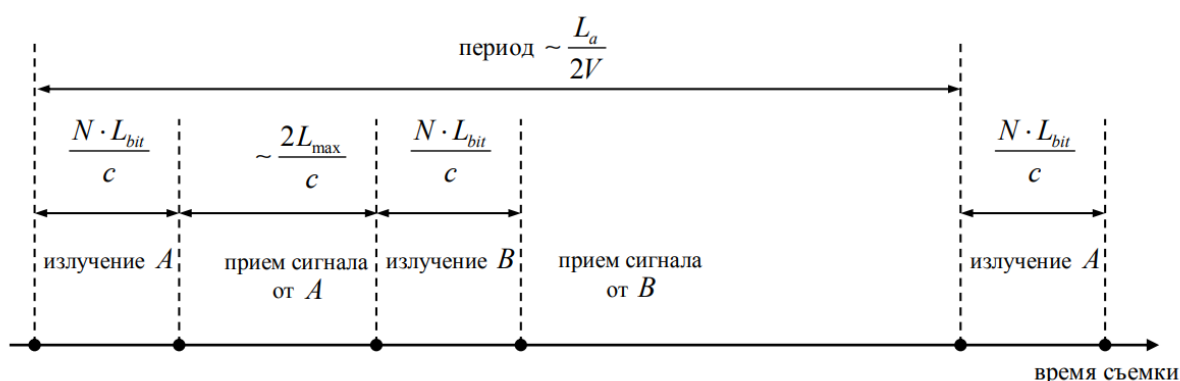


Рисунок 1 – Циклограмма работы РСА с комплементарными последовательностями

При таком режиме работы неизбежно возникают искажающие факторы, обусловленные перемещением летательного аппарата между излучениями последовательностей, а также возникающим в это время боковым сносом. В таком случае, могут возникнуть такие искажения как амплитудный разбаланс между

последовательностями, фазовый сдвиг между последовательностями и фазовый набег внутри последовательней, обусловленный доплеровским сдвигом частоты.

Для оценки характеристик АКФ комплементарной последовательности будем использовать такие критерии как мерит-фактор (англ. *merit factor*) и пиковый уровень боковых лепестков (ПУБЛ). Математически, для бинарной последовательности $A = (a_0, a_1, \dots, a_{N-1})$, где $a_i \in \{+1, -1\}$, аперiodическая автокорреляционная функция определяется как:

$$C_k = \sum_{i=0}^{N-k-1} a_i a_{i+k}, \quad k = 1, 2, \dots, N-1$$

Значение при нулевом сдвиге, $C_0 = N$, соответствует полной энергии последовательности. Мерит-фактор определяется отношением квадрата этой энергии к удвоенной сумме квадратов значений автокорреляции боковых лепестков:

$$MF(A) = C_0^2 / 2 \sum_{k=1}^{N-1} C_k^2$$

Суммарная аперiodическая автокорреляция в этом случае:

$$C_k = \sum_{i=0}^{N-1-k} a_i a_{i+k} + b_i b_{i+k}, \quad k = 1, 2, \dots, N-1$$

Комплементарный мерит-фактор CMF определяется как мерит-фактор суммарной аперiodической автокорреляционной функции бинарных комплементарных последовательностей.

ПУБЛ характеризует наиболее высокий побочный лепесток, этот критерий важен в задачах радиолокации, т.к. даже один побочный лепесток с высоким уровнем может привести к ложному определению цели и искажению РЛИ.

ПУБЛ бинарных последовательностей определяется следующим образом:

$$PSL_A = \frac{\max_{k \neq 0}(|C_A(k)|)}{C_A(0)}, PSL_B = \frac{\max_{k \neq 0}(|C_B(k)|)}{C_B(0)}$$

Тогда ПУБЛ комплементарной последовательности:

$$\text{ПУБЛ} = \frac{\max_{k \neq 0}(|C_A(k) + C_B(k)|)}{|C_A(0) + C_B(0)|}$$

Для генерации последовательностей используется генератор и коррелятор, приведенные в работе [23]. Их схемы представлены на рисунках 2 и 3 соответственно

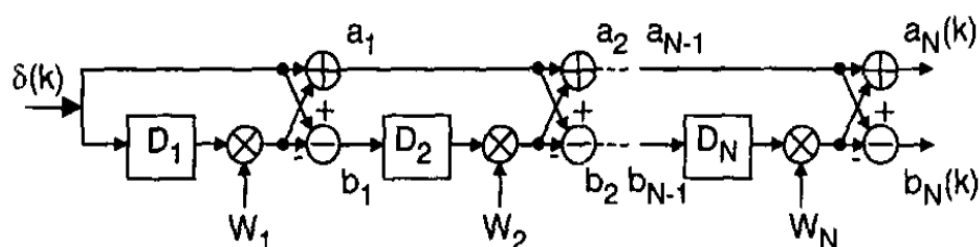


Рисунок 2 – Рекурсивный генератор комплементарных пар последовательностей Голея

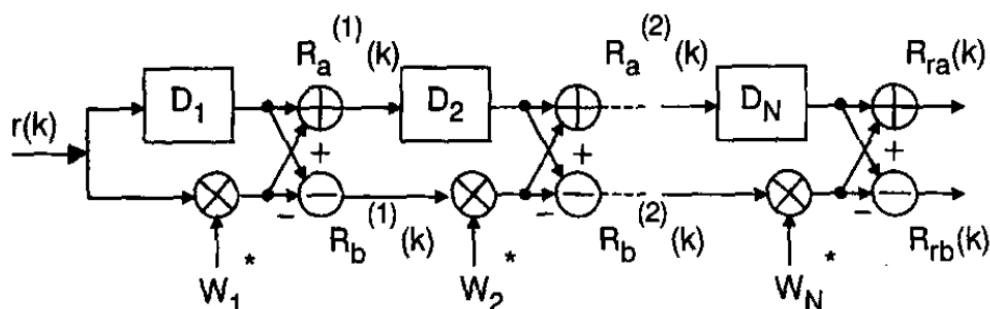


Рисунок 3 – Коррелятор комплементарных пар последовательностей Голея

В работе использованы последовательности Голея длиной 1024.

Последовательности такой длины подходят для использования в РСА X-диапазона с высокой разрешающей способностью при полетах на высотах от 500 до 3000 м.

Влияние амплитудного разбаланса между последовательностями

Исследуем влияние амплитудного разбаланса между последовательностями на мерит-фактор и ПУБЛ. Амплитудный разбаланс определяется по формуле:

$$R_A(k) = r_a(k), R_B(k) = r_b(k) * \alpha,$$

где α – коэффициент разбаланса.

В таком случае, автокорреляция последовательности $R_B(k)$ принимает следующий вид:

$$C_{R_B}(k) = \sum_{i=0}^{N-k-1} \alpha B(k) * (\alpha B[n+k]) = \alpha^2 * R_B(k),$$

Тогда функция суммарной автокорреляции двух последовательностей принимает вид:

$$C(k; \alpha) = R_A(k) + R_B(k) = R_A(k) + \alpha^2 * R_B(k)$$

Результаты математического моделирования мерит-факторов и ПУБЛ для различных значений амплитудного разбаланса представлены на рисунке 4.

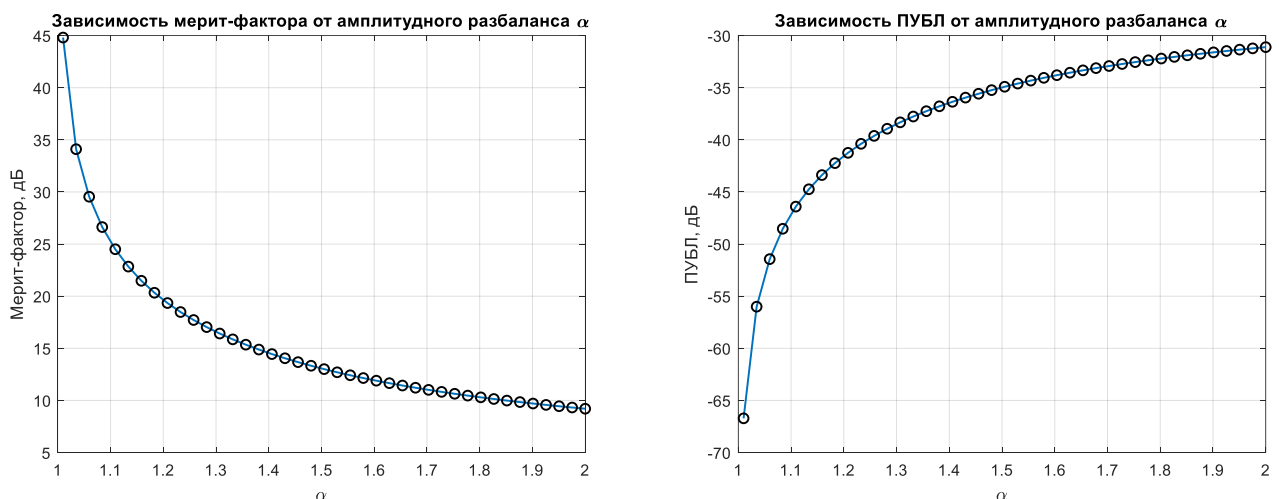


Рисунок 4 – Зависимости мерит-фактора (слева) и ПУБЛ (справа) от амплитудного разбаланса между последовательностями

Из результатов моделирования видно, что при амплитудном разбалансе между последовательностями $\alpha < 5\%$, мерит-фактор составит больше 30 дБ, а ПУБЛ составит меньше минус 50 дБ. Численные значения амплитудного разбаланса между последовательностями зависят от параметров съемки. Например, при типовых параметрах съемки (таблица 1), амплитудный разбаланс составит не более 1%, что можно считать несущественным.

Таблица 1 – Типовые параметры съемки.

Параметр:	Значение:
Длина волны, м	0,03
Высота носителя h , км	3
Угол визирования θ_0 , °	45
Скорость полета носителя v , м/с	40
Задержка между импульсами T , мс	1
Модель радиолокационной цели	$\sigma_0 \cos^4(\theta)$
Угол сноса летательного аппарата $\theta_{\text{сн}}$, °	3
Ширина диаграммы направленности антенны в плоскости направления движения носителя $\theta_{\text{ант}}$, °	6

Влияние фазового сдвига между последовательностями

Необходимо оценить влияние фазового сдвига между последовательностями вследствие бокового сноса летательного аппарата на характеристики. Фазовый сдвиг между последовательностями описывается следующим образом:

$$R_A(k) = r_a(k), R_B(k) = r_b(k) * \exp j\varphi,$$

где φ – фазовый сдвиг между последовательностями.

В таком случае, автокорреляция суммарного сигнала принимает следующий вид:

$$C(k) = \sum_{i=0}^{N-k-1} C_A(k) + \exp j\varphi C_B(k)$$

Таким образом, вычисление амплитуды главного лепестка можно произвести следующим образом:

$$|C(0)| = |N + N \exp j\varphi| = 2N|\cos(\varphi/2)|$$

Приведем также вычисления для ПУБЛ. Так как, по свойству комплементарности:

$$r_a = -r_b, \text{ то}$$

$$CPLS = PSL - PSL * \exp(j\varphi) = PSL * 2(|\sin \frac{\varphi}{2}|)$$

При этом, для единичной последовательности Голея ПУБЛ равен:

$$PSL = \frac{1}{3\sqrt{N}}$$

На рисунке 5 представлены зависимости мерит-фактора и ПУБЛ от фазового сдвига между последовательностями.

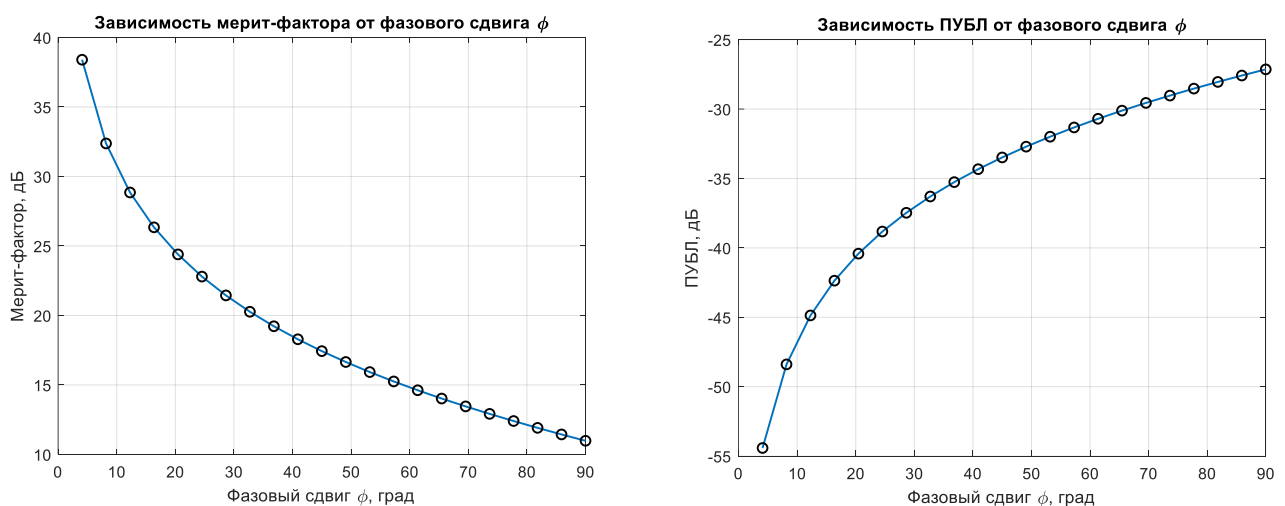


Рисунок 5 – Зависимости мерит-фактора (слева) и ПУБЛ (справа) от фазового сдвига между последовательностями

Если фазовый сдвиг происходит исключительно вследствие сноса летательного аппарата, численно оценить сдвиг фазы можно следующим образом:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} * 2v * T * \sin \theta_{\text{сн}} = 0,438 \text{ рад} \approx 25^\circ$$

Для типового случая (таблица 1) мерит-фактор составит ≈ 22 дБ, а уровень боковых лепестков будет близок к значению -36,4 дБ. Однако, при больших скоростях летательного аппарата искажения носят более существенный характер.

Влияние фазового набег внутри последовательности

Необходимо также определить влияние набег фазы на всей длине последовательности за счет доплеровского смещения частоты на исследуемые характеристики.

Фазовый набег в последовательностях описывается следующим образом:

$$R_A(k) = r_a(k) * \exp j \frac{\Phi * n}{N}, R_B(k) = r_b(k) * \exp j \frac{\Phi * n}{N},$$

Где Φ – полный набег фазы на всей длине последовательности, $n = 0, 1, \dots (N - 1)$.

С учетом этого, рассчитывается энергия основного пика:

$$|R_A(0) + R_B(0)|^2 = \left| 2 \frac{N}{j\Phi} (\exp(j\Phi) - 1) \right|^2 = 8N^2 * \frac{\sin(\frac{\Phi}{2})}{\Phi}$$

Суммарная энергия боковых лепестков определяется по формуле:

$$\begin{aligned} R_A(i) &= \sum_{n=0}^{N-1-i} A[n]A[n+i] \left(\exp \frac{j(n+i)\Phi}{N} \right) = \\ &= r_A(i) + \sum_{n=0}^{N-1-i} A[n]A[n+i] \left(\left(\exp \frac{j(n+i)\Phi}{N} \right) - 1 \right) \end{aligned}$$

Полная энергия боковых лепестков выглядит следующим образом:

$$2 \sum_{i=1}^{N-1} |R_A(i) + R_B(i)|^2 = \frac{8N}{\Phi} \sum_{i=1}^{N-1} \left[\left(1 - \frac{i}{N} \right) \Phi - (\sin(\Phi) - \sin\left(\frac{i\Phi}{N}\right)) \right]^2$$

Результаты моделирования представлены на рисунке 6.

После всех преобразований, получаем выражение для комплементарного мерит-фактора в случае набега фазы:

$$CMF \approx \frac{\text{Sinc}\left(\frac{\Phi}{2}\right)}{2[1 - \text{Sinc}(\Phi) - \frac{1}{2}(1 - \text{Sinc}^2(\frac{\Phi}{2}))]}$$

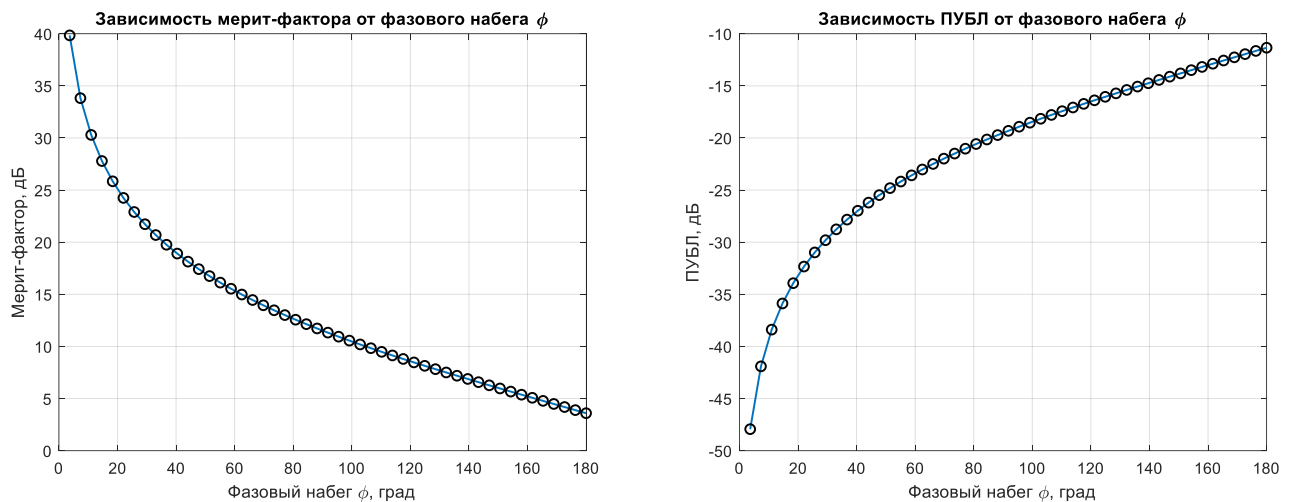


Рисунок 6 – Зависимости мерит-фактора (слева) и ПУБЛ (справа) от фазового набега внутри последовательности

При фазовом набеге, возникающем вследствие движения летательного аппарата, численно оценить набег фазы можно следующим образом:

$$|\Phi| = \frac{2\pi}{\lambda} * \left(\frac{2V * N * l_{bit}}{c} * \sin \theta_{CH} \right) = 0,008 \text{ градуса}$$

При данных параметрах комплементарный мерит-фактор составляет более, чем 40 дБ, а пиковый уровень боковых лепестков находится ниже -50 дБ, ввиду этого

искажения можно считать незначительными.

Влияние низкочастотной фильтрации

Была выполнена оценка влияния цифровой низкочастотной фильтрации на значения мерит-фактора и МУБЛ методом математического моделирования. Свертку каждой из последовательностей с характеристикой фильтра выглядит следующим образом:

$$A[n] = a[n/k_{ADC}] \otimes H[k]$$

$$B[n] = b[n/k_{ADC}] \otimes H[k]$$

Где k_{ADC} – отношение частоты дискретизации сигнала АЦП к битовой (символьной) частоте последовательности;

n/k_{ADC} – операция целочисленного деления n на k_{ADC} ;

$\otimes$ – операция дискретной свертки.

Было выполнено исследование влияния фильтра типа приподнятого косинуса (англ. Raised-Cosine). Идеальному фильтру этого типа соответствует следующее ядро $h(\tau)$:

$$h(\tau) = \text{Sinc}(2\pi * \tau f_c) * \frac{\cos(2\pi * \alpha \tau * f_c)}{1 - (4\alpha \tau f_c)^2}$$

При моделировании дискретное ядро задавалось в форме массива из 52 элементов со следующей характеристикой:

$$H[k] = \text{Sinc}(\pi f_c * (k + 0,5)) * \frac{\cos(\pi \alpha f_c * (k + 0,5))}{1 - (2\alpha f_c * (k + 0,5))^2}$$

$$k = -26, -25, \dots, +25;$$

Где f_c – полоса пропускания фильтра.

На рисунке 7 представлена частотная характеристика фильтра с дискретным ядром при $f_c = 0,125$.

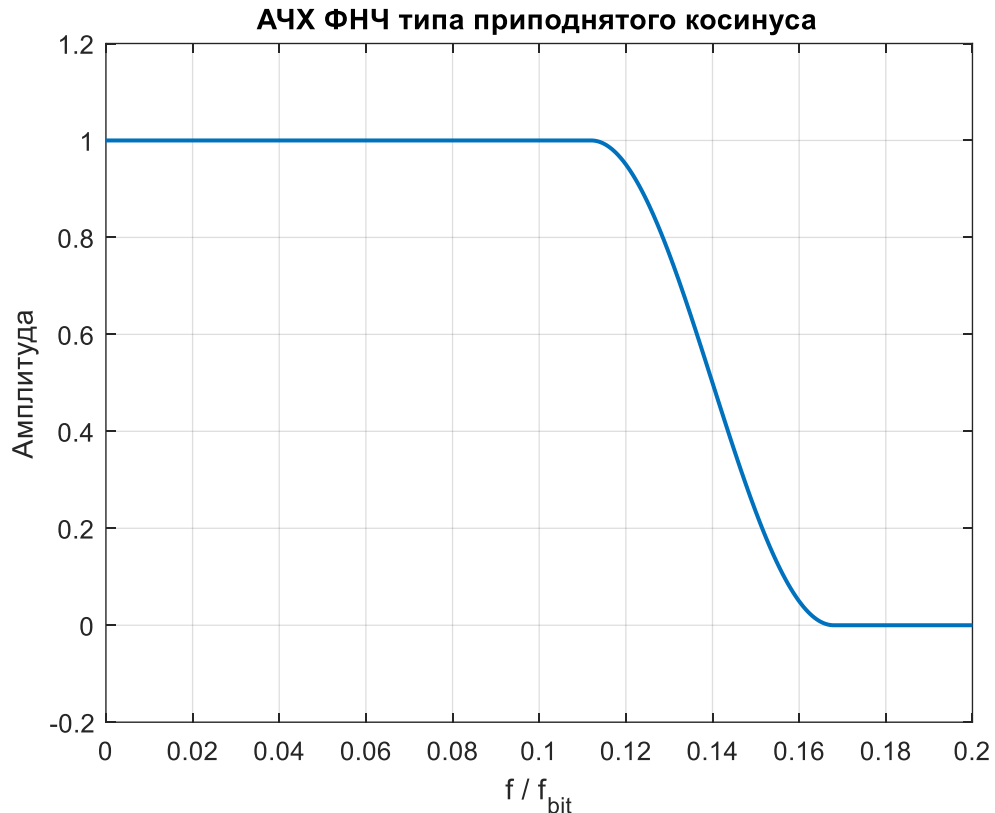


Рисунок 7 – Частотная характеристика фильтра типа приподнятого косинуса

На рисунке 8 представлены зависимости мерит-фактора и ПУБЛ от коэффициента сглаживания α фильтра типа приподнятого косинуса. Кривые отличаются по нормированной полосе пропускания f_c/f_{bit} .

Для каждой из величин нормированной полосы пропускания имеется оптимальное значение коэффициента сглаживания, при котором комплементарный мерит-фактор CMF достигает максимума.

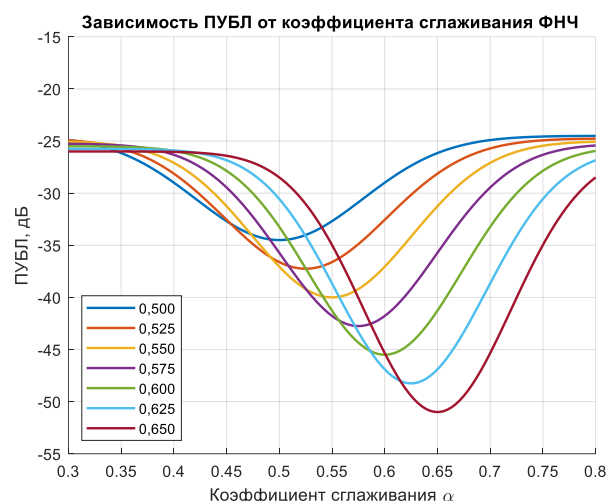
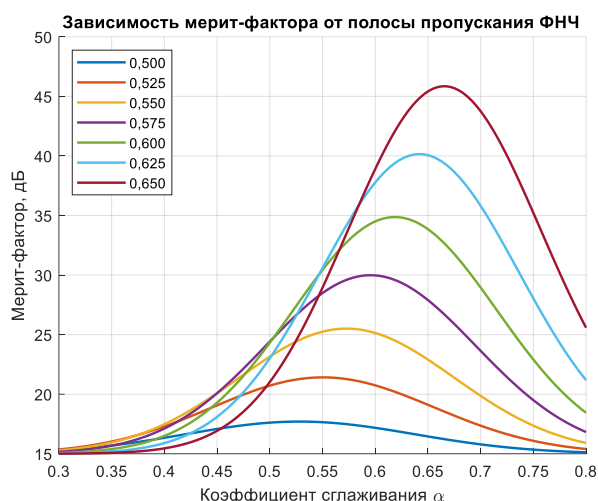


Рисунок 8 – Зависимости мерит-фактора (слева) и МУБЛ (справа) коэффициента сглаживания ФНЧ

При оптимальных значениях коэффициента сглаживания, мерит-фактор будет больше 45 дБ, а уровень пиковых боковых лепестков будет меньше минус 50 дБ. Из этого можно сделать вывод, что при оптимально подобранных коэффициентах сглаживания фильтра типа приподнятого косинуса влияние низкочастотной цифровой фильтрации на характеристики АКФ комплементарной последовательности Голея можно считать несущественным.

Эксперимент с РСА

Был проведен эксперимент с использованием РСА (рисунок 8)

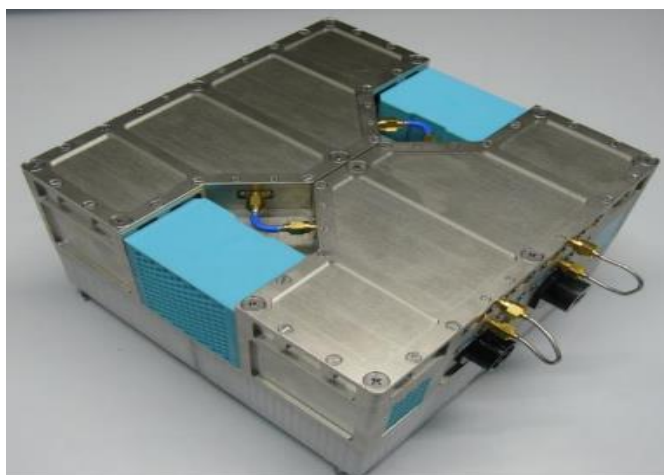


Рисунок 8 – Малогабаритный радиолокатор с синтезированной аппаратурой Х-диапазона

Параметры проведения радиолокационной съемки представлены в таблице 2.

Таблица 2 –Параметры радиолокационной съемки

Параметр:	Значение:
Частотный диапазон	Х-диапазон
Ширина диаграммы направленности	6х30 градусов (азимут х дальность)
Угол визирования	45 градусов
Излучаемый сигнал	М-последовательность с циклическим сдвигом длиной 1023 Последовательность Голея длиной 1024
Частота повторения импульсов	2 кГц
Высота полета носителя	1000 метров
Скорость полета носителя	~45 м/с

На рисунке 9 приведен фрагмент РЛИ с точечными целями в виде уголковых отражателей.

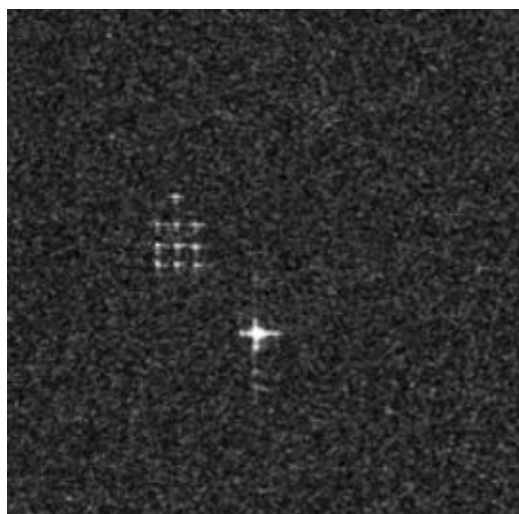


Рисунок 9 – Фрагмент радиоизображения, уголковые отражатели (дальность по горизонтали, азимут по вертикали)

На рисунке 10 представлены отклики от ярких точечных целей при использовании М-последовательности длиной 1023 и комплементарных последовательностей Голея длиной 1024.

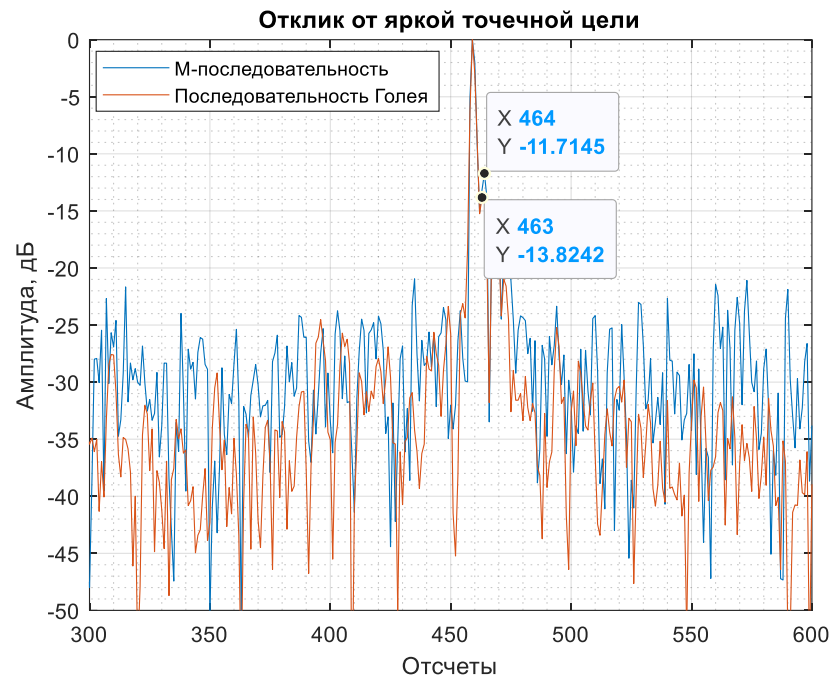


Рисунок 10 – Отклики от ярких точечных целей

По результатам экспериментального исследования были вычислены мерит-факторы и пиковые уровни боковых лепестков АКФ для М-последовательности и последовательности Голея. Для М-последовательности пиковый уровень боковых лепестков равен минус 11,7 дБ, для последовательности Голея минус 13,8 дБ. Вычисленный мерит-фактор составил 13 дБ для последовательности Голея и 3 дБ для М-последовательности. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что при заданных параметрах радиолокационной съемки, параметры изображения, полученные с использованием последовательностей Голея, соответствуют теоретическим оценкам. При сравнении откликов от точечной цели (угловых отражателей) установлено, что ПУБЛ на 2,1 дБ и мерит-фактор на 10 дБ лучше при использовании последовательностей Голея лучше, чем у М-последовательности. Таким образом, по результатам эксперимента можно сделать вывод о возможности и целесообразности использования последовательностей Голея при описанной схеме радиолокационной съемки.

Заключение

Проведенная работа посвящена исследованию возможности использования последовательностей Голея в качестве модулирующего сигнала в радиолокационных системах с синтезированной апертурой. В ходе исследований была проведена всесторонняя оценка влияния различных дестабилизирующих факторов на ключевые характеристики сигнала.

Оценка амплитудного разбаланса между последовательностями показала, что его уровень, характерный для типовых параметров радиолокационной съемки с борта БПЛА или пилотируемых летательных аппаратов составляет не более 1% и не оказывает существенного влияния на мерит-фактор и МУБЛ. Анализ фазового сдвига между последовательностями установил, что в при типовых параметрах радиолокационной съемки он не приводит к заметному ухудшению ПУБЛ и мерит-фактора, однако с увеличением скорости носителя его влияние становится более существенным. Влияние же фазового набегу внутри самой последовательности при типовых параметрах съемки признано незначительным.

Исследование воздействия низкочастотной фильтрации, в частности, с использованием фильтра типа приподнятого косинуса, выявило, что при оптимальном выборе коэффициентов сглаживания ее влияние на характеристики АКФ комплементарных последовательностей Голея является несущественным и не ухудшает значения мерит-фактора и ПУБЛ.

Натурный эксперимент с использованием РСА подтвердил теоретические выводы: при заданных параметрах съемки последовательности Голея обеспечили

формирование радиолокационных изображений с более высокими характеристиками качества по сравнению с классическими М-последовательностями.

Таким образом, результаты работы доказывают перспективность и эффективность использования последовательностей Голя в качестве модулирующего сигнала в РСА воздушного базирования при типовых параметрах радиолокационной съемки.

Финансирование

Работа выполнена при использовании инфраструктуры Центра коллективного проектирования электронной компонентной базы и радиоэлектронной аппаратуры НИУ МИЭТ

Funding

The work was carried out using the infrastructure of the Center for Collective Design of Electronic Component Base and Radioelectronic Equipment of the National Research University MIET

Список источников

1. Зюзин А.В., Захаров А.С., Перлов А.Ю., Тимошенко А.В. Методика выбора оптимальных параметров зондирующего сигнала при работе в режиме с повышенным разрешением // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182681>
2. Мухтаров Э.И., Петров А.С. Анализ искажений, возникающих при фильтрации сигналов с линейной частотной модуляцией // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179690>

3. K. Shahin, K. Artin and J. Mobin, "Novel continuous phase DDS model for linear Chirp Signal Simulation in Pulse Compression Radar," 2021 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, Islamic Republic of, 2021, pp. 798-804, doi: 10.1109/ICEE52715.2021.9544243.
4. Лихачев В.П., Сидоренко С.В. Помехоустойчивость алгоритма автофокусировки изображений по минимуму энтропии при сложной фоновой обстановке // Труды МАИ. – 2018. – № 99. – С. 27. – EDN XOGNSH.
5. Моделирование радиолокатора с синтезированной апертурой при решении задач его внутреннего и внешнего проектирования / А. П. Брызгалов, И. В. Ковальчук, А. В. Хныкин [и др.] // Труды МАИ. – 2011. – № 43. – С. 25. – EDN NEBZIN.
6. R. Suzuki, A. Hirose and R. Natsuaki, "Optimizing PN-Sequences with Genetic Algorithm for SAR Waveform Diversity," IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024, pp. 11161-11164, doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10641712.
7. K. Khramov, S. Zhiganov and M. Smirnov, "Choosing Sets of BPSK-Signals Based on Cycle Sequences for Low Orbit SAR with Multibeam Antenna Array," 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/DSPA60853.2024.10510096.
8. K. S. Lyalin, V. K. Tsvetkov, A. Y. Sheremet, P. Y. Vatskov and A. A. Biryuk, "The study of RF frontend characteristics influence to SAR image quality," 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2017, pp. 1255-1256, doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910792.

9. S. A. Kislyy, I. A. Pchenikin, I. A. Kuzmin, M. S. Khasanov, E. L. Akashkin and K. S. Lyalin, "Research of the M-sequence Autocorrelation Function Side Lobe Suppression Due to the Cyclic Accumulation," 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, Russian Federation, 2022, pp. 2150-2154, doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017030.
10. A. A. Biryuk, M. S. Khasanov, A. A. Zatonskaya and A. A. Airapetian, "Research into the Effect of Circular Shift Parameters on the ACF of Noise-like Binary Sequences," 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 2240-2242, doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039170
11. Спектральный метод подавления боковых лепестков автокорреляционной функции длинных псевдослучайных бинарных последовательностей / К. С. Лялин, М. С. Хасанов, Ю. М. Мелешин, И. А. Кузьмин // Труды МАИ. – 2018. – № 103. – С. 23. – EDN YWWYUP.
12. S. A. Kislyy, I. A. Kuzmin, M. O. Goncharov, V. K. Tsvetkov, Y. M. Meleshin and K. S. Lyalin, "Cyclically Shifted Phase-Coded Signal Advancement in Synthetic Aperture Radar Visual & Quantitative Assessments Against Traditional Chirp," 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, 2024, pp. 670-673, doi: 10.1109/EDM61683.2024.10614958.
13. Компактный мультдиапазонный радар с синтезированной апертурой / А. Л. Переверзев, К. С. Лялин, Ю. М. Мелешин [и др.] // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S4(99). – С. 154-156. – DOI 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.154.156. – EDN CZEJIV.

14. Малогабаритная модульная платформа многодиапазонного радиолокационного комплекса дистанционного зондирования Земли для БПЛА / К. С. Лялин, А. Л. Переверзев, И. А. Кузьмин [и др.] // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14, № S7(107). – С. 150-152. – DOI 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.150.152. – EDN GIDTGG.
15. G. Jin, A. Aubry, A. De Maio, R. Wang and W. Wang, "Quasi-Orthogonal Waveforms for Ambiguity Suppression in Spaceborne Quad-Pol SAR," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-17, 2022, Art no. 5204617, doi: 10.1109/TGRS.2021.3066590.
16. D. Gleich, P. Planinsic, B. Gergic and Z. Cucej, "Progressive space frequency quantization for SAR data compression," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 1, pp. 3-10, Jan. 2002, doi: 10.1109/36.981344.
17. Y. Li, W. Hu, H. Fan and X. Du, "Phase-Coded Sequence Design for Local Shaping of Complete Second-Order Correlation," in IEEE Signal Processing Letters, vol. 31, pp. 571-575, 2024, doi: 10.1109/LSP.2024.3359575.
18. Z. Yao, G. Li, S. Wang and Y. Zheng, "Channel estimation of sparse multipath based on compressed sensing using Golay sequences," 2015 IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP), Singapore, 2015, pp. 976-980, doi: 10.1109/ICDSP.2015.7252023.
19. T. Yao, X. Wang, H. Zhou, S. Tang and C. Xu, "A Method of Phase Noise Estimation and Compensation Based on Golay Sequence in Time Domain for SC-FDE Millimeter-Wave Communication Systems," 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2020, pp. 278-282, doi: 10.1109/ICCC51575.2020.9344982.

20. Z. Gu, Z. Zhou, A. R. Adhikary, Y. Feng and P. Fan, "Construction of Golay-ZCZ Sequences with New Lengths," 2021 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Melbourne, Australia, 2021, pp. 1802-1805, doi: 10.1109/ISIT45174.2021.9518058.
21. Q. Zhang, Y. Zhang, X. Qi and H. Li, "A Novel Phase Coding Design for MIMO SAR Based on Golay Complementary Sequences," IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia, 2022, pp. 563-566, doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9884757.
22. S. Nagaraj and M. Sarkar, "Orthogonal Channelization of Backscattering Tags using Golay Complementary Sequences," 2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), Indore, India, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ANTS.2018.8710103.
23. Popović B. M. Efficient Golay correlator // Electronics Letters. 1999. Vol. 35, No. 17. P. 1427. DOI: 10.1049/el:19991019.

References

1. Zyuzin A.V., Zakharov A.S., Perlov A.Yu., Timoshenko A.V. Methodology for selecting optimal parameters of the probing signal when operating in a high-resolution mode // Trudy MAI. 2024. No. 138.
2. Mukhtarov E.I., Petrov A.S. Analysis of distortions arising during filtering of signals with linear frequency modulation // Trudy MAI. 2024. No. 135.
3. K. Shahin, K. Artin and J. Mobin, "Novel continuous phase DDS model for linear Chirp Signal Simulation in Pulse Compression Radar," 2021 29th Iranian Conference on Electrical

Engineering (ICEE), Tehran, Iran, Islamic Republic of, 2021, pp. 798-804, doi: 10.1109/ICEE52715.2021.9544243.

4. Likhachev V.P., Sidorenko S.V. Noise immunity of the algorithm for autofocusing images based on minimum entropy in a complex background environment // Trudy MAI. – 2018. – № 99. – PP. 27. – EDN XOGNSH.

5. Modeling of a synthetic aperture radar when solving problems of its internal and external design / A. P. Bryzgalov, I. V. Kovalchuk, A. V. Khnykin [et al.] // Trudy MAI. – 2011. – № 43. – PP. 25. – EDN NEBZIN.

6. R. Suzuki, A. Hirose and R. Natsuaki, "Optimizing PN-Sequences with Genetic Algorithm for SAR Waveform Diversity," IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024, pp. 11161-11164, doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10641712.

7. K. Khramov, S. Zhiganov and M. Smirnov, "Choosing Sets of BPSK-Signals Based on Cycle Sequences for Low Orbit SAR with Multibeam Antenna Array," 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/DSPA60853.2024.10510096.

8. K. S. Lyalin, V. K. Tsvetkov, A. Y. Sheremet, P. Y. Vatskov and A. A. Biryuk, "The study of RF frontend characteristics influence to SAR image quality," 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2017, pp. 1255-1256, doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910792.

9. S. A. Kislyy, I. A. Pchenikin, I. A. Kuzmin, M. S. Khasanov, E. L. Akashkin and K. S. Lyalin, "Research of the M-sequence Autocorrelation Function Side Lobe Suppression Due

to the Cyclic Accumulation," 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, Russian Federation, 2022, pp. 2150-2154, doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017030.

10. A. A. Biryuk, M. S. Khasanov, A. A. Zatonskaya and A. A. Airapetian, "Research into the Effect of Circular Shift Parameters on the ACF of Noise-like Binary Sequences," 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 2240-2242, doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039170

11. Spectral method for suppressing sidelobes of the autocorrelation function of long pseudorandom binary sequences / K. S. Lyalin, M. S. Khasanov, Yu. M. Meleshin, I. A. Kuzmin // Trudy MAI. - 2018. - No. 103. - P. 23.

12. S. A. Kislyy, I. A. Kuzmin, M. O. Goncharov, V. K. Tsvetkov, Y. M. Meleshin and K. S. Lyalin, "Cyclically Shifted Phase-Coded Signal Advancement in Synthetic Aperture Radar Visual & Quantitative Assessments Against Traditional Chirp," 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, 2024, pp. 670-673, doi: 10.1109/EDM61683.2024.10614958.

13. Compact multi-band synthetic aperture radar / A. L. Pereverzev, K. S. Lyalin, Y. M. Meleshin [et al.] // Nanoindustry. - 2020. – V. 13, № S4(99). – PP. 154-156.

14. Small-sized modular platform of a multi-band radar complex for remote sensing of the Earth for UAVs / K. S. Lyalin, A. L. Pereverzev, I. A. Kuzmin [et al.] // Nanoindustry. - 2021. - Vol. 14, No. S7(107). - P. 150-152.

15. G. Jin, A. Aubry, A. De Maio, R. Wang and W. Wang, "Quasi-Orthogonal Waveforms for Ambiguity Suppression in Spaceborne Quad-Pol SAR," in IEEE Transactions on

Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-17, 2022, Art no. 5204617, doi: 10.1109/TGRS.2021.3066590.

16. D. Gleich, P. Planinsic, B. Gergic and Z. Cucej, "Progressive space frequency quantization for SAR data compression," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 1, pp. 3-10, Jan. 2002, doi: 10.1109/36.981344.

17. Y. Li, W. Hu, H. Fan and X. Du, "Phase-Coded Sequence Design for Local Shaping of Complete Second-Order Correlation," in IEEE Signal Processing Letters, vol. 31, pp. 571-575, 2024, doi: 10.1109/LSP.2024.3359575.

18. Z. Yao, G. Li, S. Wang and Y. Zheng, "Channel estimation of sparse multipath based on compressed sensing using Golay sequences," 2015 IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP), Singapore, 2015, pp. 976-980, doi: 10.1109/ICDSP.2015.7252023.

19. T. Yao, X. Wang, H. Zhou, S. Tang and C. Xu, "A Method of Phase Noise Estimation and Compensation Based on Golay Sequence in Time Domain for SC-FDE Millimeter-Wave Communication Systems," 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2020, pp. 278-282, doi: 10.1109/ICCC51575.2020.9344982.

20. Z. Gu, Z. Zhou, A. R. Adhikary, Y. Feng and P. Fan, "Construction of Golay-ZCZ Sequences with New Lengths," 2021 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Melbourne, Australia, 2021, pp. 1802-1805, doi: 10.1109/ISIT45174.2021.9518058.

21. Q. Zhang, Y. Zhang, X. Qi and H. Li, "A Novel Phase Coding Design for MIMO SAR Based on Golay Complementary Sequences," IGARSS 2022 - 2022 IEEE International

Geoscience and Remote Sensing Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia, 2022, pp. 563-566, doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9884757.

22. S. Nagaraj and M. Sarkar, "Orthogonal Channelization of Backscattering Tags using Golay Complementary Sequences," 2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), Indore, India, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ANTS.2018.8710103.

23. Popović B. M. Efficient Golay correlator // Electronics Letters. 1999. Vol. 35, No. 17. P. 1427. DOI: 10.1049/el:19991019.