

Выбор зондирующего сигнала для радиолокационного комплекса в режиме синтезированной апертуры антенны

А.Н. Леухин^а, Н.В. Парсаев^а, В.И. Безродный^а, В.А. Карпов^а

^аФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», 424000, пл. Ленина 1, Йошкар-Ола, Россия

Аннотация

В работе рассмотрены методы формирования зондирующего сигнала для радиолокационной станции в режиме синтезированной апертуры антенны, обеспечивающие минимальный уровень боковых лепестков в плоскости дальность-азимут. Показано, что наилучшим по указанным критериям является фазоманипулированный сигнал с минимально возможным уровнем боковых лепестков импульсной автокорреляционной функции.

Ключевые слова: укажите режим синтезированной апертуры антенны; импульсная автокорреляционная функция; боковой лепесток; минимаксный критерий оптимальности; многофазная последовательность; разрешение по дальности и по азимуту; обобщенные коды Баркера

1. Введение

Принцип действия радиолокационной системы в режиме синтезированной апертуры антенны (РСА) основан на когерентном суммировании отраженных сигналов во время перемещения антенны на борту летательного аппарата. Проблема получения высокого разрешения по дальности решается путем использования широкополосных сигналов. Разрешение по азимуту зависит от расстояния, в течение которого точка поверхности является видимой при полете летательного аппарата по определенной точно известной траектории.

Обеспечение заданного динамического диапазона сжатого по дальности сигнала возможно с помощью применения в качестве зондирующего импульса сложного сигнала с большой базой

$$B = \Delta F_u \cdot T_u, \quad (1)$$

где ΔF_u и T_u - ширина спектра и длительность сигнала $u(t)$.

После обработки сигнала согласованным фильтром длина сжатого импульса будет равна:

$$\tau_{сж} = \frac{1}{\Delta F_u}. \quad (2)$$

При этом уровень боковых лепестков импульсной автокорреляционной функции (ИАКФ) широкополосных сигналов должен быть минимальным. После детекторной обработки можно перейти от рассмотрения радиосигнала к его комплексной огибающей

$$\mathbf{U} = \{ \dot{u}_n \}_{0, N-1} = \{ \dot{u}_0, \dot{u}_1, \dots, \dot{u}_{N-1} \}. \quad (3)$$

Комплексную огибающую принято называть модулирующей (кодовой) последовательностью длины N .

Определим ИАКФ кодовой последовательности $\mathbf{U} = \{ \dot{u}_n \}_{0, N-1}$ длины N на основании выражения:

$$\dot{r}_\tau = \sum_{n=0}^{N-\tau-1} \dot{u}_n \cdot \dot{u}_{n+\tau}^*, \quad \tau = 0, 1, \dots, N-1, \quad (4)$$

где \dot{u}_n^* - комплексно-сопряженная величина к кодовому элементу \dot{u}_n .

По виду ИАКФ кодовой последовательности вводится два критерия качества.

Первый критерий качества – минимаксный критерий. Определим максимальный боковой лепесток кодовой последовательности $\mathbf{U} = \{ \dot{u}_n \}_{0, N-1}$ как

$$M(\mathbf{U}) = \max_{0 < \tau < N} | \dot{r}_\tau(\mathbf{U}) |, \quad (5)$$

Пусть $\mu(N) = \min_{\mathbf{U}} M(\mathbf{U})$ будет минимальным среди $M(\mathbf{U})$ вычисленных для всех кодовых последовательностей \mathbf{U} длины N . Для оптимальных по минимаксному критерию последовательностей уровень максимального бокового лепестка (PSL - peaksidelobe) соответствует:

$$PSL = \mu(N), \quad (6)$$

Второй критерия качества – критерий минимума энергии боковых лепестков, который можно сформулировать через отношение энергии главного отчета к энергии боковых лепестков:

$$MF(\mathbf{U}) = \frac{N^2}{2 \sum_{\tau=1}^{N-1} |r_{\tau}(\mathbf{U})|^2}, \quad (7)$$

Данное отношение принято называть коэффициентом MF (merit factor). Пусть $\nu(N) = \max MF(\mathbf{U})$ будет максимальным среди $MF(\mathbf{U})$ вычисленных для всех последовательностей \mathbf{U} длины N . Для оптимальных последовательностей по критерию минимума энергии боковых лепестков коэффициент MF соответствует:

$$MF_{opt} = \nu(N). \quad (8)$$

Отношение сигнал/корреляционный шум (в дБ) определим в соответствии с выражением

$$SNR = 20 \log \left(\frac{N}{PSL} \right). \quad (9)$$

Среди известных широкополосных сигналов [1-5] с низким уровнем боковых лепестков ИАКФ можно выделить следующие: сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), M-последовательности, многофазные коды Френка и троичные последовательности.

Особый интерес представляют последовательности Баркера, так как они обладают потенциально возможным минимальным уровнем боковых лепестков ИАКФ $PSL=1$. К сожалению, на сегодняшний день известны бинарные последовательности Баркера [6] лишь для длин $N = \{2,3,4,5,7,11,13\}$. В работе [7] было показано, что бинарных последовательностей других нечетных длин не существует, и высказано предположение, что бинарных последовательностей других четных длин также не существует. В работе [8] было показано, что если бинарные последовательности Баркера длин $N > 13$ существуют, то только либо для длины $N = 3979\ 201\ 339\ 721\ 749\ 133\ 016\ 171\ 583\ 224\ 100$, либо для длин $N > 4 \cdot 10^{23}$, что не представляет практического интереса. Следующим шагом в поиске последовательностей Баркера является увеличение объема алфавита. Тернарные коды Баркера (с тремя фазами) были найдены в работе [9] до длин $N \leq 9$. Четырехфазные последовательности Баркера были найдены до длины $N = 15$ [10], шестифазные последовательности Баркера были найдены до длины $N = 18$ [11]. Голомб и Шольц в работе [12] назвали многофазные последовательности с уровнем боковых лепестков ИАКФ $PSL=1$ обобщенными последовательностями Баркера.

В работе [12] были найдены обобщенные последовательности Баркера до длин $N = 31$, в работе [13] список обобщенных последовательностей Баркера был увеличен до длины $N = 36$, в работе Brenner [14] до длины $N = 45$, в работе [15] до длины $N = 63$, в работе [16] было найдено 4 многофазных последовательностей Баркера для длины $N = 64$, в работе [17] были найдены обобщенные последовательности Баркера из диапазона длин $N = [65,70]$ и для длин $N = 72,76,77$. Это до сих пор наибольшие на сегодняшний день длины, для которых были найдены многофазные последовательности Баркера.

В авторских работах [18-22] было построено большое количество многофазных последовательностей Баркера. В данной работе рассмотрим метод построения многофазных последовательностей с низким уровнем боковых лепестков ИАКФ практически значимых длин $N = 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096$, приведем пример многофазной последовательности для длины $N = 512$ с $PSL=1.7$ и выполним сравнительный анализ по оценке максимального уровня боковых лепестков боковых лепестков по дальности от СКО ошибки оценки начальной фазы при сжатии по азимуту для различных видов сигналов и способов обработки в режиме РСА.

2. Методы подавления боковых лепестков ИАКФ за счет когерентного накопления отчетов корреляционных функций при сжатии по азимуту

Основными методами подавления боковых лепестков импульсной АКФ являются:

1. Излучение ЛЧМ сигнала с последующей весовой обработкой, обеспечивающей подавление боковых лепестков импульсной АКФ.
2. Излучение многофазных последовательностей, имеющих минимально возможный уровень боковых лепестков импульсной АКФ (коды Баркера).
3. Излучение в каждом новом периоде последовательно всех циклически сдвинутых последовательностей, полученных из исходной последовательности длины N и суммирование отсчетов импульсных автокорреляционных функций всех циклически сдвинутых копий излученного сигнала:

$$u_n^{(k)} = u_{n+k \bmod N}, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad \bar{r}_\tau = \sum_{k=0}^{N-1} r_\tau^{(k)}, \quad r_\tau^{(k)} = \sum_{n=\tau+1}^N u_n^{(k)} \cdot (u_{n-\tau}^{(k)})^*, \quad \tau = -N+1, \dots, N-1 \quad (10)$$

4. Излучение в каждом новом периоде последовательностей, полученных из исходной последовательности длины N введением дополнительной модуляции ортогональными последовательностями по закону:

$$u_n^{(k)} = u_n \cdot \exp\left(i \frac{2\pi}{N} n \cdot k\right), \quad k = 0, \dots, N-1, \quad \bar{r}_\tau = \sum_{k=0}^{N-1} r_\tau^{(k)}, \quad R_\tau^{(k)} = \sum_{n=\tau+1}^N u_n^{(k)} \cdot (u_{n-\tau}^{(k)})^*, \quad \tau = -N+1, \dots, N-1 \quad (11)$$

и суммирование отсчетов импульсных автокорреляционных функций всех промодулированных копий излученного сигнала.

5. Излучение в каждом новом периоде последовательно пары дополнительных последовательностей, для которых суммарная импульсная корреляционная функция имеет вид:

$$r_\tau + \bar{R}_\tau = \begin{cases} 2 & \tau = 0; \\ 0 & \tau = \pm 1, \dots, \pm(N-1). \end{cases} \quad (12)$$

3. Известные широкополосные последовательности с низким уровнем боковых лепестков ИАКФ

3.1. Сигнал с линейной частотной модуляцией

Сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) может быть описан выражением:

$$u(t) = A \cos\left(\varphi_0 + 2\pi\left(f_0 t + \frac{b}{2} t^2\right)\right), \quad -T_u/2 \leq t \leq T_u/2, \quad (13)$$

где $f_0 = (F_{\max} + F_{\min})/2$ - центральное значение несущей частоты, $b = (F_{\max} - F_{\min})/T_u$, T_u - длительность сигнала, F_{\max} и F_{\min} - максимальное и минимальное значение частоты радиосигнала.

Максимальный уровень бокового лепестка ИАКФ ЛЧМ сигнала имеет значение 0.212 (-13.473 дБ) от высоты центрального пика, поэтому использование ЛЧМ сигнала в РСА требует применения дополнительных методов подавления боковых лепестков

Применение весовой оконной функции Хемминга размером N вида:

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \quad n = -N/2 \dots N/2 - 1, \quad (14)$$

при вычислении ИАКФ ЛЧМ сигнала приводит к снижению уровня боковых лепестков до значения -42.8 дБ и потере в отношении сигнал/шум в 1.34 дБ, при этом разрешающая способность сжатого сигнала ухудшается в 2 раза

3.2. М-последовательности

Отношение центрального пика импульсной автокорреляционной функции к максимальному значению ее боковых лепестков для М-последовательности равно [1]:

$$PSL = 0.7 \dots 1.25 \sqrt{B}. \quad (15)$$

Однако в системе РСА данный недостаток может быть снижен за счет усреднения по $N = B$, обрабатываемым на этапе сжатия по азимуту, циклическим сдвигам одной М-последовательности, излучаемым в каждом новом периоде за время синтеза апертуры. Значения отсчетов ИАКФ, усредненного по B циклическим сдвигам М-последовательности, при условии равномерности диаграммы направленности антенны в области азимутального синтеза будут равны:

$$\bar{r}_\tau = \sum_{n=0}^{B-1} r_{n,\tau}, \quad \bar{R}_0 = B^2, \quad \bar{R}_\tau = (-1)^{B-\tau}, \quad \tau = -B+1 \dots B-1, \quad \tau \neq 0, \quad (16)$$

где $R_{n,\tau}$ - τ -й отчет ИАКФ циклически сдвинутой на n кодовых интервалов исходной последовательности.

Отношение максимального бокового лепестка к главному лепестку после усреднения по B сдвигам имеет вид:

$$\left| \frac{\bar{R}_{\max}}{R_0} \right| = \frac{(B-1)}{B^2} \quad (17)$$

и оказывается лучшим, чем $1/B$, т.е. сравнимо с результатом сжатия в синхронном режиме.

3.3. Многофазные коды Френка

Многофазные коды Френка имеют длину $N = k^2$, где k - целое число. Элементы кода Френка определяются следующим образом:

$$\dot{u}_{n \cdot k + m} = \exp\left(i \frac{2\pi p}{k} mm\right), \quad n = 0 \dots k-1, \quad m = 0 \dots k-1, \quad (18)$$

где p - число, взаимно простое с k .

Максимальный боковой лепесток ИАКФ кодов Френка равен

$$PSL = \sqrt{N}/\pi. \quad (19)$$

Периодическая автокорреляционная функция (ПАКФ) кодов Френка имеет нулевые боковые лепестки, поэтому метод сжатия М-последовательностей (15) может быть использован и для кодов Френка.

3.4. Троичные последовательности

Троичные последовательности состоят из элементов $0, \pm 1$. Из-за наличия пропусков пик фактор троичной последовательности $\{a_n\}$ длины N :

$$\nu = N / \|a\|^2, \quad (20)$$

превышает единицу. Однако дополнение бинарного алфавита $\{\pm 1\}$ нулевым элементом позволяет синтезировать последовательности с идеальной ПАКФ.

Правила построения троичных последовательностей с идеальной периодической АКФ длины $N = (q^m - 1)/(q - 1)$ и значением пик-фактора $\nu = (q^m - 1)/(q^m - q^{m-1})$ над расширением $GF(q^m)$ нечетной степени m основного поля $GF(q)$ характеристики p ($q = p^w$), представлены в работе [3].

Оценка значения пик-фактора:

$$\nu = \frac{q^m - 1}{q^m - q^{m-1}} = \frac{q - q^{1-m}}{q - 1} < \frac{q}{q - 1} \quad (21)$$

показывает, что пик-фактор рассматриваемых троичных последовательностей можно сделать произвольно близким к единице выбором достаточно большого q и минимального значения $m = 3$.

4. Метод построения многофазные последовательностей с низким уровнем боковых лепестков ИАКФ

При построении многофазных последовательностей с низким уровнем боковых лепестков ИАКФ будем использовать метод, предложенный в авторских работах [18-22]. Выполняя элементарные тригонометрические преобразования получим следующую систему нелинейных неравенств для построения многофазных последовательностей с уровнем боковых лепестков $PSL \leq a$, где a - вещественное положительное значение стремящееся к 1.

$$2 \sum_{n=0}^{N-2-\tau} \sum_{k=n+1}^{N-1-\tau} \cos(\varphi_{\tau+n} - \varphi_n - \varphi_{\tau+k} + \varphi_k) = \tau - N, \quad \tau = 1, \dots, N-1. \quad (22)$$

где $\varphi_n = [0; 2\pi]$ - значение фазы n -го кодового элемента многофазной последовательности $\mathbf{U} = \{u_n\} = \{\exp(i\varphi_n)\}$.

Искомый вектор распределения фаз на кодовых интервалах определим в виде

$$\Psi = (\varphi_0 = 0, \varphi_1 = 0, \varphi_2, \dots, \varphi_{N-3}, \varphi_{N-1}, \varphi_{N-1}). \quad (23)$$

Для решения системы уравнений (21) можно использовать итерационные численные методы.

В начале работы алгоритма выбирается начальное приближение: вектор Ψ . На каждом шаге итерации вектор заменяется на градиентное приращение:

$$\Psi_{i+1} = \Psi_i + \Delta\Psi. \quad (24)$$

В качестве приращения начального вектора выбирается метод Левенберга-Марквардта:

$$\Delta\Psi = [\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda_k \text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})]^{-1} \mathbf{J}^T (y - f(\Psi_i)), \quad (25)$$

где \mathbf{J} - это якобиан функции $f(\Psi)_i$, λ_k - параметр регуляризации, y - значение функции.

Матрицу якобиана \mathbf{J} размером $N \times R$ можно представить в виде:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(\Psi)_1}{\partial \Psi_1} & \dots & \frac{\partial f(\Psi)_1}{\partial \Psi_R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(\Psi)_N}{\partial \Psi_1} & \dots & \frac{\partial f(\Psi)_N}{\partial \Psi_R} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Для оптимизации вычислений произведем конечно-разностную аппроксимацию частных производных по формуле:

$$\frac{\partial f(\Psi)_i}{\partial \Psi_r} = \frac{f(\Psi+h)_i - f(\Psi)_i}{h}, \quad (27)$$

где h - разностный интервал функции. Разностный интервал определим в диапазоне $100 \cdot \varepsilon_M < h < 1000 \cdot \varepsilon_M$, где ε_M - машинная точность.

В качестве оценки результата итерации делается проверка на минимум функции, которую можно представить в виде суммы квадратов:

$$F(\Psi) = \sum_{i=0}^{N-1} f^2(\Psi)_i, \quad (28)$$

где

$$F(\Psi) \leq \varepsilon, \quad (29)$$

критерий по невязке ε , по которому происходит определение результата, как итерации, так и всего итерационного метода, ε - точность определения результатов.

$$F(\Psi) = \sum_{i=0}^{N-1} f^2(\Psi)_i, \quad (30)$$

Для построения многофазных последовательностей с уровнем боковых лепестков, не превышающим значения $PSL \leq a$ определим следующую систему неравенств:

$$\begin{cases} f(\Psi)_1 \leq a_1, \\ f(\Psi)_2 \leq a_2, \\ \vdots \\ f(\Psi)_N \leq a_N \end{cases}, \quad (31)$$

где a_i заданный уровень требуемых боковых лепестков,

$$f(\Psi)_\tau = 2 \sum_{n=0}^{N-2-\tau} \sum_{k=n+1}^{N-1-\tau} \cos(\varphi_{\tau+n} - \varphi_n - \varphi_{\tau+k} + \varphi_k) = \tau - N, \quad \tau = 1, 2, \dots, N-1., \quad (32)$$

Функция $F(\Psi)$, для решения системы нелинейных уравнений, определяется следующим образом:

$$F(\Psi) = \sum_{i=0}^{N-1} \begin{cases} k^2, & \text{если } f(\Psi)_i < a_i, k < \varepsilon, \\ f^2(\Psi)_i, & \text{иначе.} \end{cases}, \quad (33)$$

где k любой параметр, который обязательно должен быть меньше точности вычисления ε системы нелинейных уравнений.

Суть метода состоит в управлении направлении градиента поиска. В случае, когда уровень бокового лепестка конкретного уравнения удовлетворяет условию уравнения, отмечаем, что данное уравнение находится в 0 функции с точностью по невязке. При увеличении a_i резко увеличивается вероятность нахождения решения и, соответственно, число найденных решений. В результате работы численного метода либо находится решение, либо находится локальный минимум, из которого необходимо искать выход. Во втором случае в полученном векторе Ψ необходимо пересчитать левую или правую половину (или часть) корней системы уравнений согласно выбранному решению.

5. Новые многофазные последовательности с низким уровнем боковых лепестков ИАКФ

В таблице 1 приведем результат синтеза многофазной последовательности длины $N=512$ с уровнем боковых лепестков ИАКФ $PSL=1.764$, близким к потенциально достижимому $PSL=1$.

Таблица 1. Результаты построения многофазных последовательностей

Фазовый вектор многофазной последовательности длины $N = 512$
0; 0; 5.7883063; 5.1739255; 4.5167149; 3.8330026; 3.1176368; 2.366521; 1.6017367; 0.8696185; 0.1420339; 5.682221; 4.9938505; 4.1362928; 3.4872857; 2.3446407; 1.6970622; 1.0712468; 0.2449831; 5.7493498; 5.1335391; 4.1917097; 3.6377025; 2.8596543; 2.2366183; 1.5104197; 0.816226; 0.1211675; 6.0570257; 5.7246083; 5.6445612; 5.4256179; 5.0633408; 4.703201; 4.2405725; 3.669763; 3.1149335; 2.5755923; 2.0550043; 1.5519707; 0.8090582; 0.1877588; 5.9594145; 5.6361323; 5.35245; 5.2963679; 5.157242; 4.8398759; 4.4244801; 4.2505549; 3.7615352; 3.3760665; 3.1571137; 3.2100493; 3.4592494; 3.6250838; 3.5394004; 3.4003274; 2.7645502; 2.3931485; 1.9550903; 1.7143779; 1.4182818; 1.305566; 0.9589005; 1.0058236; 0.6545454; 0.427026; 0.2501113; 6.1990605; 0.1188505; 0.3479861; 0.7492138; 1.0018059; 1.1169529; 0.9315866; 0.6574591; 0.596323; 0.5550772; 0.8063646; 0.9531673; 1.0446743; 1.1397265; 1.2753779; 1.5176246; 1.6748972; 1.8354235; 1.9611823; 1.7477468; 1.7222076; 1.6318428; 2.0850158; 2.4585171; 2.6507957; 2.7454; 2.8887258; 3.1913044; 3.923272; 4.6758808; 5.181855; 5.3853264; 5.698399; 6.1495545; 0.1091533; 0.0946627; 0.2360993; 0.62643; 1.2602859; 1.7477532; 2.0341336; 2.2372929; 2.712726; 3.2347684; 3.5863749; 3.8517555; 4.3918427; 5.2778719; 6.0340897; 0.3656127; 0.6149938; 1.1313659; 1.9327219; 2.5031973; 3.0124374; 3.9774853; 5.0260043; 5.5090589; 6.0464746; 0.2267555; 0.793995; 1.3113231; 1.8887424; 2.6369181; 3.5757712; 4.4373984; 5.3314221; 6.1412699; 0.5670573; 1.2945201; 2.1239245; 3.1970741; 4.1433265; 4.9914611; 5.9376428; 0.6674341; 1.6512086; 2.6224821; 3.6436392; 4.518489; 5.3393155; 6.0033037; 0.5057278; 1.1669705; 2.0923901; 3.5553638; 4.7525283; 5.6784626; 0.309756; 1.1536333; 2.0139249; 3.5002964; 4.9564169; 6.1131093; 0.9733677; 2.3371429; 3.5039108; 4.8269573; 6.0260498; 6.2132372; 0.963858; 2.2422606; 3.645273; 5.3360035; 0.7885012; 1.6769635; 2.8269728; 3.9632712; 4.63369; 5.7432231; 0.857655; 2.2155133; 4.0767619; 5.5700123; 6.0598332; 1.8047702; 3.7555268; 5.7465242; 1.3845479; 3.4735293; 2.8107558; 4.4715068; 5.9464177; 0.7934869; 2.064354; 3.6695192; 5.1857964; 0.1735419; 1.5800863; 3.0700899; 4.3810107; 5.8175907; 1.1757179; 2.7656917; 4.4898983; 6.1131681; 1.5260508; 3.1825018; 4.6681714; 0.1327131; 2.019356; 4.1235221; 5.5865265; 0.6622297; 2.2259767; 4.2483409; 6.0740818; 1.440802; 3.190669; 4.8881492; 0.2093074; 2.0727777; 3.8236788; 5.711961; 1.0870434; 3.2168162; 5.1306858; 0.539775; 2.4672459; 4.5916975; 0.5925268; 2.6355701; 4.6703178; 6.2115647; 1.8034495; 3.7960629; 0.0057649; 2.3577135; 4.3700272; 6.0598332; 1.8047702; 3.7555268; 5.7465242; 1.3845479; 3.4735293; 5.5227835; 1.0185792; 3.4879245; 5.6198158; 1.7297632; 3.9256492; 0.1621324; 2.3988039; 4.8722645; 0.9906504; 3.330096; 5.3875992; 1.394745; 3.3501139; 5.2706118; 1.0623894; 3.6862579; 6.1714264; 2.4407772; 4.6611613; 0.7161979; 2.8812853; 5.4634078; 1.4709234; 3.7840403; 6.0793049; 2.1902186; 4.5738507; 1.0579827; 4.0017864; 0.1305172; 2.502497; 4.8409032; 0.9325935; 3.2089261; 6.0349617; 2.8190952; 5.5594979; 1.9347132; 4.5335518; 0.7967411; 3.0580483; 5.1903278; 1.0765588; 3.9065278; 0.2734338; 3.1051688; 5.9377771; 2.5097308; 5.5159391; 1.8535707; 4.4634971; 0.4755522; 2.9073997; 6.2436323; 3.1262993; 6.2058723; 2.7558576; 5.2172316; 1.7742162; 4.5709204; 1.2883272; 3.7759782; 0.1650624; 3.0166741; 5.8982443; 2.6445657; 5.3815913; 1.9626557; 4.7168428; 1.2407484; 4.3737666; 1.0544932; 4.1618535; 1.357249; 4.7404197; 1.4089552; 4.0155996; 0.4028873; 3.6697074; 0.7636826; 3.8254753; 0.6357104; 3.7081936; 0.5413859; 3.5965926; 0.183501; 3.6138021; 0.627065; 3.7442722; 0.6577286; 3.7326433; 0.4757099; 3.7489717; 0.6815719; 3.7349892; 0.9494101; 4.582336; 1.6570621; 5.4609887; 2.5020947; 5.7509055; 3.0086043; 0.1151122; 3.4093971; 0.5192481; 3.5199714; 6.1067594; 3.3582886; 0.734432; 4.3209332; 1.6392939; 5.0451983; 1.978921; 5.889531; 3.062601; 0.4389263; 4.0966252; 1.3696488; 4.9769236; 2.1514454; 5.7195779; 3.0584119; 0.2820246; 3.7242847; 1.1945479; 4.8787354; 1.9756873; 5.8866357; 3.529575; 0.9710895; 4.667576; 2.0217096; 5.411082; 2.543658; 6.1115623; 3.6068681; 1.4726991; 5.5978603; 3.2390356; 0.8578905; 4.8891574; 2.3552912; 5.985278; 3.4355226; 1.1468732; 5.2638645; 3.0535749; 0.9369732; 4.9868378; 2.7029147; 0.0726743; 3.4905886; 1.0848363; 5.1074038; 2.6584481; 0.2723464; 4.5081577; 2.4154876; 0.4621637; 4.5131806; 2.0991592; 6.2004227; 4.1232178; 2.3929383; 0.3038032; 4.6231415; 2.6300038; 0.4631242; 4.5941001; 1.8583175; 5.4747268; 3.2906659; 1.4257018; 6.0490192; 3.9186864; 1.6729693; 5.8444197; 4.0471396; 2.260519; 4.0163051; 4.8510975; 2.7410424; 0.822112; 5.1411485; 3.15607; 1.3095668; 5.5052987; 3.3857276; 1.5336745; 5.9728328; 4.6073974; 3.1568273; 1.7080844; 6.132969; 3.8466093; 1.6982211; 5.9255819; 4.3863751; 2.6222703; 0.8957192; 5.464031; 3.7538034; 1.859675; 0.3637726; 5.2977626; 3.7852013; 2.5005471; 1.2863578; 6.1851869; 4.814582; 3.1701307; 1.2148571; 5.5193492; 3.7199705; 2.0391939; 0.4196969; 5.3906625; 3.6657722; 2.1550958; 0.3489941; 4.9837194; 3.3247783; 1.9389913; 0.5778377; 5.6571828; 4.3256705; 3.2161713; 1.8840545; 0.6815944; 5.7823839; 4.5361154; 3.1247676; 1.7434091; 0.3178853; 5.0644505; 3.5704186; 2.0207941; 0.534503; 5.5024053; 4.3081348; 3.1141028; 1.92378; 0.975603; 6.1459423; 5.0344748; 4.0041783; 3.046374; 1.7746187; 0.9774373; 6.2450097; 5.2098445; 4.1440132; 3.3184458; 2.1247841; 1.3070488; 0.1688736; 5.3908925; 4.4011755; 3.3331308; 2.1396629; 1.1299001; 6.2386043; 5.1371523; 3.9711394; 2.6021; 1.2709241; 5.4605585

В таблице 2 представим результаты оценки максимального уровня боковых лепестков ИАКФ, коэффициента MF и отношения сигнал/корреляционный шум синтезированных многофазных последовательностей длин с низким уровнем боковых лепестков ИАКФ $N = 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096$.

Таблица 2. Результаты построения многофазных последовательностей

N	128	256	512	1024	2048	4096
PSL	1.556	1.535	1.764	2.193	2.41	2.832
MF	31.083	62.181	96.964	123.016	185.675	266.059
SNR , дБ	38.302	44.441	49.255	53.385	58.586	63.205

6. Сравнительный анализ оценки максимального уровня боковых лепестков по дальности различных широкополосных сигналов при когерентной обработке в режиме РСА

В данном разделе представим результаты моделирования для оценки значения уровня максимального бокового лепестка при сжатии сигнала и когерентной обработке с накоплением в режиме РСА по дальности в зависимости от среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки оценки начальной фазы при сжатии по азимуту.

Для моделирования будем использовать 3 режима когерентного накопления сигналов:

- суммирование отсчетов импульсных автокорреляционных функций пачки многофазных последовательностей без дополнительных преобразований. Обозначение на рис.1 (импульс);
- суммирование отсчетов импульсных автокорреляционных функций пачки многофазных последовательностей, являющихся циклическими сдвинутыми копиями исходной последовательности, в соответствии с выражением (10). Обозначение на рис.1 (циклический сдвиг);
- суммирование отсчетов импульсных автокорреляционных функций пачки многофазных последовательностей, промодулированных ортогональными функциями, в соответствии с выражением (11). Обозначение на рис.1 (набег фазы).

Для сравнения рассмотрим следующие виды широкополосных сигналов приблизительно одинаковыми базами $B \approx 1024$: ЛЧМ сигнал, М-последовательность, многофазные коды Френка, троичные последовательности, дополнительные последовательности и многофазные последовательности с низким уровнем боковых лепестков ИАКФ.

Отношение максимального бокового лепестка к главному лепестку ИАКФ ($1/SNR$) для трех режимов когерентного накопления (в отсутствии ошибок оценки начальной фазы) рассмотренных последовательностей длины $N = B \approx 1024$ при 8-ми битном квантовании значений фазы представлено в таблице 3.

Таблица 3. Отношение максимального бокового лепестка к главному лепестку ИАКФ для трех режимов когерентного накопления

Сигнал	B	$1/SNR$, дБ (импульс)	$1/SNR$, дБ (циклический сдвиг)	$1/SNR$, дБ (набег фазы)
ЛЧМ	1024	-42.8		
М-последовательность	1023		-58.545	-86.24
Многофазные коды Френка	1024	-40	-65.771	-75
Троичные последовательности	1057		-63.357	-90
Дополнительные последовательности	1024	-58.478		
Многофазные последовательности с низким уровнем боковых лепестков ИАКФ	1024	-49.755		-87.93

На рис. 1 приведены графики зависимостей уровня боковых лепестков по дальности от СКО ошибки оценки начальной фазы при сжатии по азимуту для трех режимов накопления. Из рисунка 1 следует, что для наилучшими с позиций минимума уровня боковых лепестков является режим накопления, при котором выполняется суммирование отсчетов импульсных автокорреляционных функций пачки многофазных последовательностей, промодулированных ортогональными функциями в соответствии с выражением (11). При этом многофазный сигнал с низким уровнем боковых лепестков ИАКФ является наиболее устойчивым к воздействию ошибки оценки начальной фазы при сжатии сигнала по азимуту в режиме РСА.

Таким образом, наиболее предпочтительным для обеспечения низкого уровня боковых лепестков в радиолокационном изображении, формируемом радаром в режиме РСА является применение синтезированных в данной работе многофазных последовательностей с низким уровнем боковых лепестков при когерентном накоплении пачки многофазных последовательностей, промодулированных ортогональными функциями в соответствии с выражением (11).

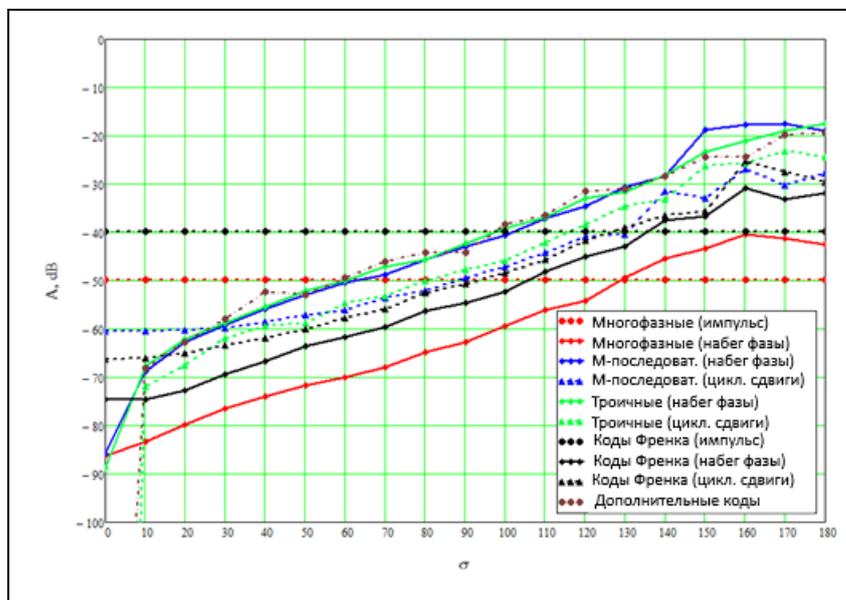


Рис. 1. Зависимость максимального уровня боковых лепестков по дальности от СКО ошибки оценки начальной фазы при сжатии по азимуту.

7. Заключение

Использование в радиолокационных станциях, работающих в режиме синтезированной апертуры антенны, синтезированных многофазных последовательностей с низким уровнем боковых лепестков ИАКФ позволит улучшить отношение сигнал/корреляционный шум формируемых радиолокационных изображений более чем на 10 дБ, что является принципиально важным с позиций повышения разрешающей способности.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственных контрактов №02.G25.31.0204, №2.9140.2017/БЧ, №2.2226.2017/ПЧ и гранта РФФИ №15-07-99514а.

Литература

- [1] Варакин, Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М.: «Радио и связь», 1985. – 267 с.
- [2] Levanon, N. Radar Signals/ Levanon N., Mozeson E. – New York: John Wiley & Sons Inc., 2004. – 458 p.
- [3] Ипатов, В.П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами / В.П. Ипатов – М.: Радио и связь, 1992. – 152 с.
- [4] Гантмахер, В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка / В.Е. Гантмахер, Н.Е. Быстров, Д.В. Чеботарев – СПб.: Наука и техника, 2005. – 400 с.
- [5] Ипатов, В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / В.П. Ипатов – М.: Техносфера, 2007. – 488 с.
- [6] Barker, R.H. Group Synchronizing of Binary Digital Systems / R.H. Barker// Comm. Theory. – London: Butterworth, 1953. – P. 273-287.
- [7] Turin, R. Sequences with small correlation. Error correcting codes/ R. Turin. – New York, John Wiley and Sones, 1968.
- [8] Borwein, P. Wieferich pairs and Barker sequences/ P. Borwein, M.J. Mossinghoff //LMS J. Comput. Math 2014. – Vol. 17(1). – P. 24-32.
- [9] Jr de Long, D.F. Three-Phase Codes/ D.F. Jr de Long// MIT Lincoln Laboratory.Group Report. – Lexington: Massachusetts, 1959 – P. 47-48.
- [10] Welti, G.R. Quaternary Codes for Pulsed Radar/ G.R. Welti// IRE Transaction on Information Theory. – 1960. – Vol. IT-6(3).
- [11] Golomb, S.W. Generalized barker sequences/ S W. Golomb, R.A. Scholtz.// Trans. on Inf. Theory. – 1965. – Vol. 11(4). – P. 533-537.
- [12] Friese, M. Polyphase Barker sequences up to length 31/ M. Friese, H. Zottmann// Electronics Letters. – 1994. – Vol. 30(23). – P. 1930-1931.
- [13] Friese, M. Polyphase Barker sequences up to length 36/ M. Friese // IEEE Transactions on Information Theory. – 1996. – Vol. 42(4). – P. 1248-1250.
- [14] Brenner, A.R. Polyphase Barker sequences up to length 45 with small alphabets/ A.R. Brenner// Electronics Letters. – 1998. – Vol. 34(16) – P. 1576-1577.
- [15] Borwein, P.B. Polyphase sequences with low autocorrelation/ P.B. Borwein, R.A. Ferguson // IEEE Trans. Inform. Theory. – 2005. – Vol. 51. – P. 1564-1567.
- [16] Nunn, C.J. Constrained optimization applied to pulse compression codes, and filters/ C.J. Nunn //Proceedings of the 2005 IEEE International Radar Conference. – 2005. – P. 190-194.
- [17] Nunn, C.J. Polyphase pulse compression codes with optimal peak and integrated sidelobes/ C.J. Nunn, G.E. Coxson // IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems. – 2009. – Vol.45(45). – P. 775-781.
- [18] Леухин, А.Н. Импульсные фазокодированные последовательности с единичным уровнем боковых лепестков/ А.Н. Леухин// Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2009. – №6. – С.13-18.
- [19] Леухин, А.Н. Многофазные импульсные последовательности с одноуровневой автокорреляцией/ А.Н. Леухин, А.С. Шувалов, А.С. Петухов // Вестник Мар. гос. тех. университета: серия радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – №2, С. 77-90.
- [20] Леухин, А.Н. Оптимальные импульсные последовательности/ А.Н. Леухин, А.С. Шувалов, Е.Н. Потехин, А.В. Харитонов //Вестник Мар. гос. тех. университета: серия радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – №1. – С. 37 – 46.
- [21] Шувалов, А.С., А.Н. Леухин, Д.В. Гайворонский. Новый алгоритм поиска многофазных последовательностей Баркера/ А.С. Шувалов, А.Н. Леухин, Д.В. Гайворонский // Вестник Поволжского гос. технолог. унив. Серия: Радиотех. и инфокоммуникационные системы. – 2012. Том 16(2). – С. 19-23.
- [22] Потехин, Е.Н. Методы и результаты синтеза аperiodических бинарных последовательностей и многофазных последовательностей Баркера/ Е.Н. Потехин, А.С. Шувалов, А.Н. Леухин / Цифровая обработка сигналов. – 2013. – №4. – С. 45-54.