

Оценка влияния параметров приемо-передающего тракта РЛС на результаты обработки фазокодированных сигналов с равномерным энергетическим спектром

А.А.Роженцов, Я.А.Фурман, Р.Г.Хафизов, А.В.Казаринов.

ФБГОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет».
г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д.3. E-mail: krtmbs@volgatech.net

В статье рассмотрены кодирующие последовательности с корреляционной функцией, не обладающей краевыми эффектами, обеспечивающие повышенную разрешающую способность РЛС по дальности. Показана возможность формирования циклической корреляционной функции между принятым и эталонным сигналом в импульсной РЛС. Предложен подход к оценке параметров эхо-сигналов с задержками более одного периода повторения. Исследовано влияние доплеровского сдвига и шумов квантования на эффективность обработки предложенных кодирующих последовательностей.

The article describes coding sequences with low correlation noise and providing increased radar resolution. Ability to form cyclic correlation function of etalon and received signals, and to separate echo-signals which delays makes up more than one recurrence period is presented. The dependence of the efficiency of processing of coding sequences on the Doppler shift and the quantization noise is investigated.

Введение

Вопросы синтеза и обработки кодирующих последовательностей, обеспечивающих совместное решение важных радиотехнических задач, являются актуальными ввиду противоречивости предъявляемых к ним требований. Кодирующие последовательности, эффективные для разрешения по дальности, должны обладать равномерным энергетическим спектром. Кодирующие последовательности, эффективные для различения, должны обладать непересекающимися амплитудными спектрами. Для совместного разрешения по дальности и частоте Доплера необходимы последовательности с кнопочной функцией неопределенности. Для повышения устойчивости РЛС к ответным уводящим помехам необходимо изменять параметры кодирующей последовательности, например, использовать в каждом периоде излучения новую последовательность, но при этом должно обеспечиваться эффективное решение уже упоминавшейся задачи различения.

В большинстве работ, посвященных синтезу кодирующих последовательностей, основными критериями качества, как правило, являются либо уровень боковых лепестков корреляционной функции, либо форма и уровень боковых лепестков функции неопределенности сигнала, высокий пик-фактор и т.п. [1-5] Однако, синтез последовательностей чаще всего ведется с учетом одного-двух из этих факторов.

Решение перечисленных проблем возможно при использовании последовательностей, структурные компоненты которых эффективны для решения одних задач, например, различения, а последовательности в целом – для других, например, обнаружения и разрешения. Одним из видов таких последовательностей являются композиционные контуры [6].

Целью данной работы является разработка подходов к обработке кодирующих последовательностей с равномерным энергетическим спектром в РЛС с обновляемым в каждом периоде излучения сигналом и оценка их эффективности.

Кодирующие последовательности на базе композиционных контуров

В работах [6,7] рассмотрены кодирующие последовательности на базе композиционных контуров с равномерным энергетическим спектром, обладающие дельтовидной одномерной автокорреляционной функцией, эффективные для решения задачи разрешения сигналов по дальности. Составляющие их элементарные контуры обладают дельтовидными непересекающимися спектрами и образуют алфавит ортогональных сигналов, эффективных для распознавания.

Элементарный контур $\Gamma_m = \{\gamma_m(n)\}_{0,s-1}$ размерностью s и порядка m задается следующим соотношением:

$$\gamma_m(n) = \exp\left\{i \frac{2\pi}{s} mn\right\}, \quad n = 0, 1, \dots, s-1.$$

Базовый композиционный контур размерностью $K = s^2$ образуется конкатенацией элементарных контуров:

$$\Gamma_{\sigma} = \{\Gamma_m\}_{m=0}^{s-1}.$$

На рис.1 приведен пример элементарных контуров $\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2$ размерности $s = 3$, составленный из них композиционный контур и его ациклическая и циклическая корреляционные функции.

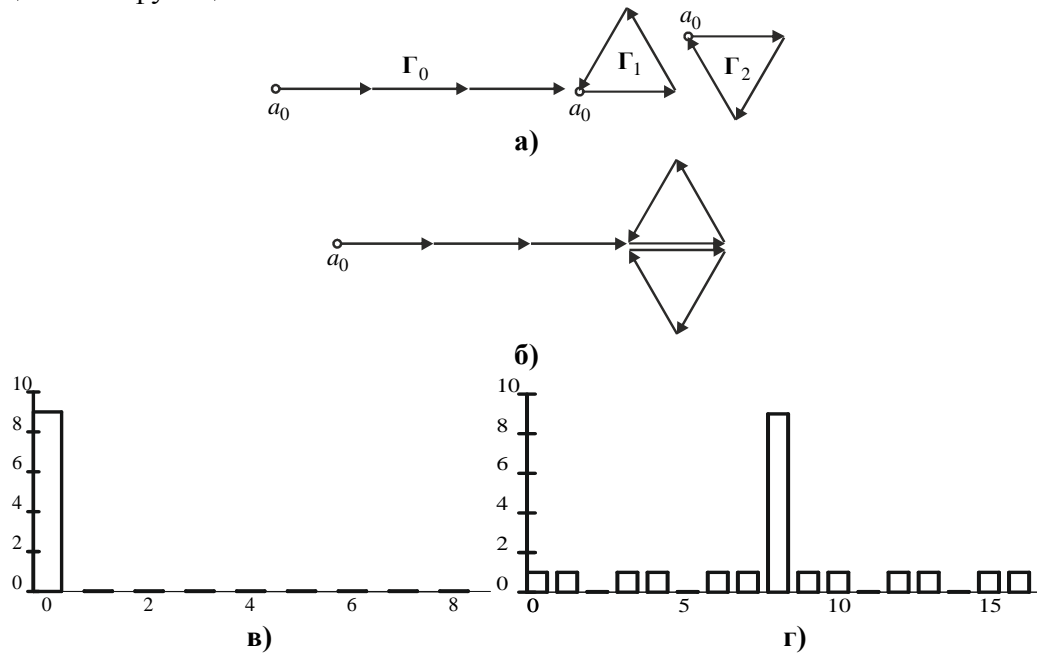


Рис.1. Пример формирования композиционного контура:
 а) элементарные контуры $\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2$; б) композиционный контур Γ_{σ} ;
 в) ациклическая АКФ композиционного контура; г) циклическая АКФ композиционного контура

В работе [6] рассмотрены вопросы обработки сигналов на базе композиционных контуров. Показано, что отсчеты циклической корреляционной функции могут быть получены по результатам ациклической обработки сигнала, за счет чего обеспечивается режим повышенной разрешающей способности по дальности. Платой за этот эффект является увеличение уровня флуктуационных шумов, поскольку необходимо выполнять суммирование отсчетов АКФ в пределах некоторого локуса. В связи с этим

возникает задача разработки алгоритмов формирования и обработки сигналов на базе композиционных контуров, свободных от этих недостатков.

Рассмотрим РЛС, которая в каждом m -м периоде повторения длительностью T излучает сигнал на базе элементарного контура Γ_m , $m=0,1,\dots,s-1$, $s=3$ (рис.2). В течение одного полного цикла длительностью $T_u = sT$ РЛС излучается набор сигналов на базе всего алфавита элементарных контуров. Сформированный в течение полного цикла работы РЛС сигнал, состоящий из элементарных контуров, можно рассматривать как композиционный контур, у которого между элементарными контурами произведена вставка нулей. Назовем такой контур модифицированным композиционным контуром. В работе [8] показано, что дополнение отсчетов композиционного контура нулями между элементарными контурами таким образом, чтобы количество нулей l удовлетворяло условию

$$l = rs, r = 0,1,2,\dots \quad (1)$$

не нарушает равномерность энергетического спектра кодирующей последовательности и дельтовидность ее АКФ. Следовательно, если период повторения T в РЛС удовлетворяет условию (1), то кодирующая последовательность на интервале T_u будет иметь автокорреляционную функцию, не обладающую краевыми эффектами.

Обновление сигнала в каждом периоде повторения обеспечивает расширение диапазона однозначно измеряемых задержек сигнала от величины T до T_u . Кроме того, появляется возможность эффективной борьбы с уведящими помехами, поскольку одновременное появление сигналов с задержками $\tau = \tau_0 + mT$, где τ_0 - истинная задержка прихода сигнала от цели, $m = 1,2,\dots,s-1$, является маловероятным событием и такие сигналы могут быть легко выявлены при использовании предлагаемых кодирующих последовательностей.

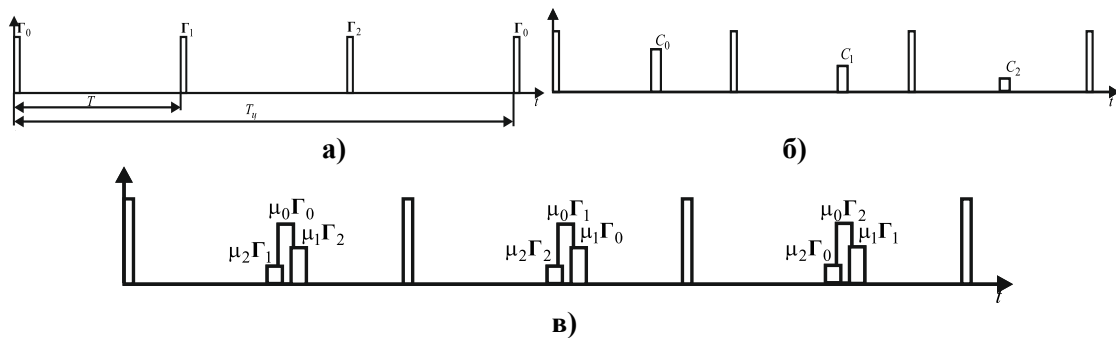


Рис.2. Пример формирования отраженных сигналов в РЛС с обновляемым в каждом периоде сигналом: а) порядок излучения сигналов; б) расположение целей на дистанции; в) взаимное расположение отраженных сигналов в различных периодах повторения

Рассмотрим пример обработки сигнала на базе модифицированного композиционного контура. Положение сигналов на дистанции представлено на рис.2,б. На рис.2,в показана смесь сигналов, поступающих на вход приемника. Сигнал, отраженный от цели C_0 будет повторять сигнал, излучаемый в данном периоде работе РЛС, сигнал, отраженный от цели C_1 будет задержан на один период, относительно излучаемого в данном периоде сигнала, сигнал от цели C_2 будет иметь задержку на два периода повторения (рис.3, а). Распределение отсчетов суммарного сигнала и его амплитуды по дистанции показано на рис.3,б и рис.3,в. Поскольку РЛС излучает периодический сигнал с периодом равным T_u , то обработка принятого сигнала может

базироваться на вычислении циклической взаимокорреляционной функции принятого и эталонного сигналов. Так как циклическая АКФ модифицированного композиционного контура является дельтовидной, то и результат обработки сигналов будет содержать ненулевые отсчеты корреляционной функции при тех сдвигах, которые соответствуют времени задержки одного из отраженных сигналов (рис.3,в).

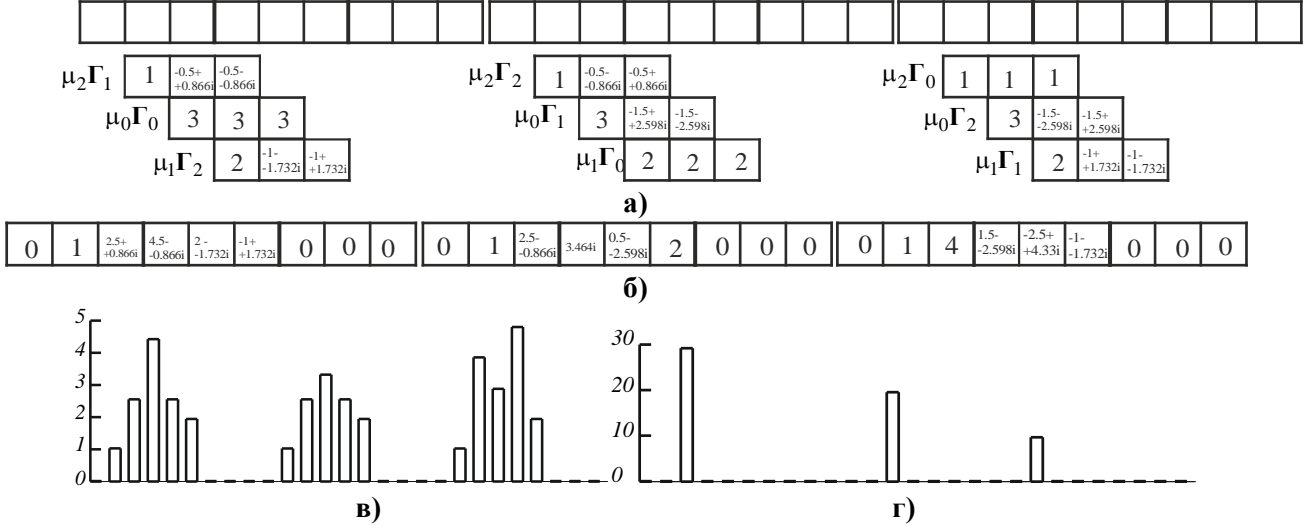


Рис.3. Пример формирования и обработки отраженного сигнала: а) положение отсчетов сигнала на дистанции; б) отсчеты суммарного сигнала; в) график модулей отсчетов суммарного сигнала; г) результат вычисления циклической ВКФ

Данный пример показывает возможность однозначного измерения дальностей до целей, отраженные сигналы от которых запаздывают более чем на один период повторения сигнала.

Рассмотрим влияние доплеровского сдвига на возможность обработки кодирующих последовательностей на базе композиционных контуров. Потенциальные возможности разрешения сигналов с различными доплеровскими сдвигами определяются формой функции неопределенности сигнала, отсчеты которой для контурного сигнала задаются соотношением

$$\eta(s, \Delta\varphi_D) = \left| \sum_{n=0}^{K-1} v(n) \gamma^*(n-s) \right| = \left| \sum_{n=0}^{K-1} \gamma(n) \exp\{jn\Delta\varphi_D\} \gamma^*(n-s) \right|,$$

где $\Delta\varphi_D = F_D \tau_{ку}$ - доплеровский набег фазы на одном кодовом интервале,

F_D - частота Доплера,

$\tau_{ку}$ - длительность кодового интервала.

На рис.4 приведены примеры функции неопределенности для базового композиционного контура размерностью $K=9$ и для образованного на его базе модифицированного композиционного контура со значением $l=6$ размерностью $K=27$.

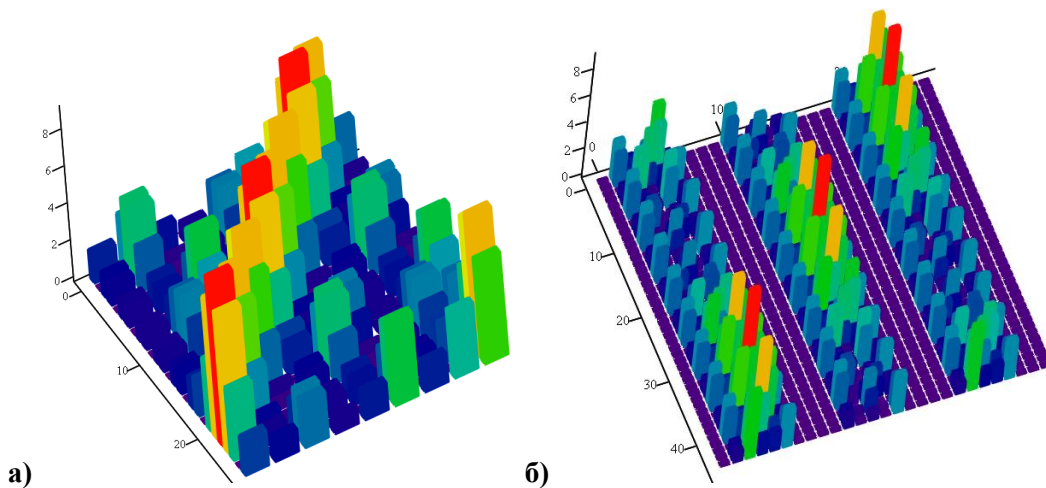


Рис.4. Функция неопределенности сигнала на базе композиционного контура: а) для сигнала без вставки нулей; б) для сигнала со вставкой нулей

Как показывает анализ формы функции неопределенности, увеличение длительности сигнала за счет вставки нулевых интервалов приводит к группировке боковых лепестков функции неопределенности вокруг оси нулевых временных сдвигов и формированию нескольких областей низкой корреляции

Оценка влияния шумов квантования на результаты обработки фазокодированных сигналов с равномерным энергетическим спектром

При обработке фазокодированных последовательностей одним из главных вопросов является влияние искажений, вносимых приемо-передающим трактом на результаты обработки. Значительное влияние на точность оценки фазы и амплитуды текущего вектора оказывают параметры аналого-цифрового преобразователя, используемого для преобразования в цифровую форму отсчетов сигнала на выходе квадратурного детектора, в частности, разрядность его шкалы квантования. При решении задачи разрешения сигналов критериями качества обработки сигналов могут служить либо максимальный уровень боковых лепестков корреляционной функции, либо их средняя энергия. В связи с этим, оценку влияния параметров АЦП на результаты обработки кодовых последовательностей с РЭС будем проводить на основе указанных критериев. Исследования проводились на основе компьютерного моделирования в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Задается размерность композиционного контура $K = s^2$.
2. Задается разрядность шкалы квантования (с учетом знакового разряда) n .
3. Вычисляются округленные отсчеты композиционного контура:

$$\gamma^{(окр)}(m) = \text{round}(\text{Re}(\gamma(m)) \cdot 2^{n-1}) + i \cdot \text{round}(\text{Im}(\gamma(m)) \cdot 2^{n-1}), \quad m = 0, 1, \dots, K-1.$$

4. Вычисляется циклическая АКФ контура.
5. Определяется относительный максимальный уровень бокового лепестка

$$p_{\max} = 20 \lg \frac{|\eta_{\max}|}{|\eta(0)|} \text{ и средний нормированный уровень энергии боковых лепестков}$$

$$p_{cp} = 10 \lg \frac{\sum_{m=1}^{K-1} |\eta(m)|^2}{|\eta(0)|^2 (K-1)}.$$

6. Пп.2-5 повторяются для различных разрядностей шкалы квантования.

На рис.5-7 приведены результаты моделирования воздействия шумов квантования на результаты обработки композиционных контуров различной размерности.

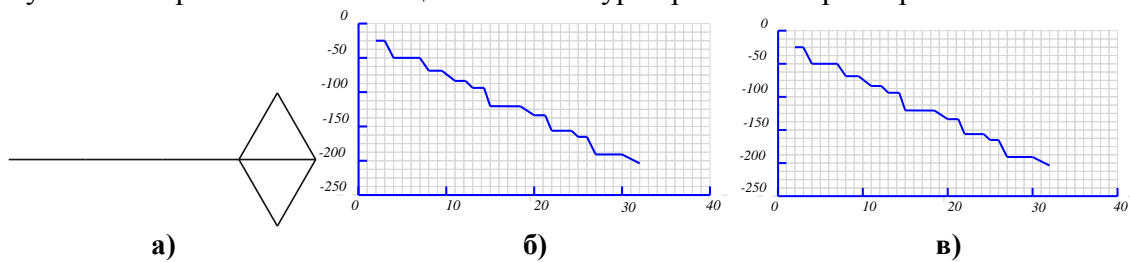


Рис.5. Результат моделирования воздействия шумов квантования на обработку композиционного контура размерностью $s = 3$: а) вид контура; б) график зависимости максимального уровня боковых лепестков циклической корреляционной функции от разрядности шкалы квантования; в) график зависимости средней энергии боковых лепестков циклической корреляционной функции от разрядности шкалы квантования

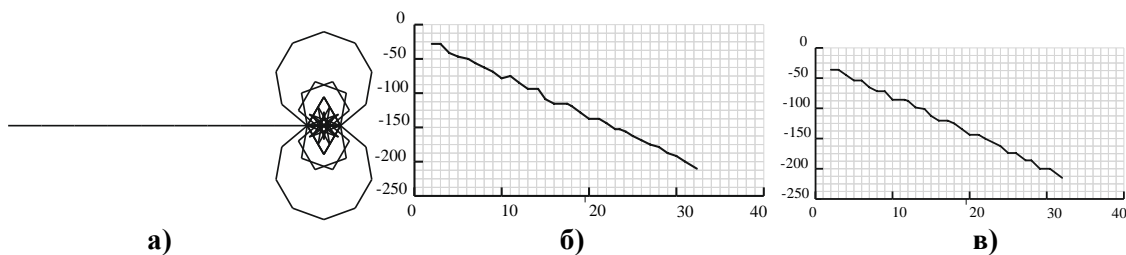


Рис.6. Результат моделирования воздействия шумов квантования на обработку композиционного контура размерностью $s = 9$: а) вид контура; б) график зависимости максимального уровня боковых лепестков циклической корреляционной функции от разрядности шкалы квантования; в) график зависимости средней энергии боковых лепестков циклической корреляционной функции от разрядности шкалы квантования

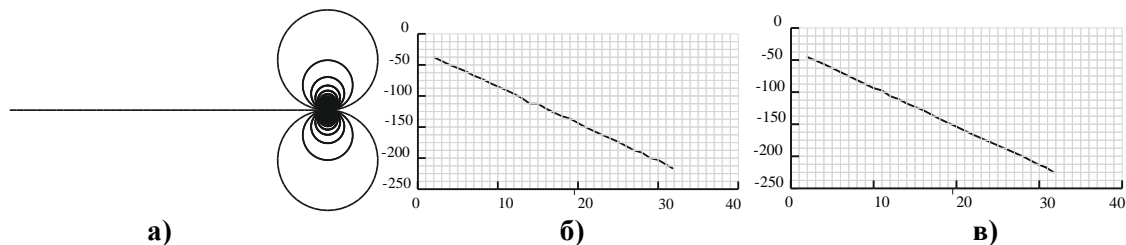


Рис.7. Результат моделирования воздействия шумов квантования на обработку композиционного контура размерностью $s = 47$: а) вид контура; б) график зависимости максимального уровня боковых лепестков циклической корреляционной функции от разрядности шкалы квантования; в) график зависимости средней энергии боковых лепестков циклической корреляционной функции от разрядности шкалы квантования

Как показывает анализ полученных результатов, приемлемый уровень боковых лепестков на уровне ниже -100 дБ достигается уже при 12-16 разрядах шкалы квантования в зависимости от размерности контура.

Заключение

Рассмотренные в работе подходы к формированию и обработке кодирующих последовательностей с хорошими корреляционными свойствами позволяют реализовать циклическую обработку сигнала в РЛС, работающих в импульсном режиме. Исследована возможность однозначного измерения задержек эхо-сигналов, превышающих период повторения зондирующих сигналов, или подавления уводящих помех при работе РЛС в диапазоне дальностей, определяемых одним периодом

повторения. Показано, что для достижения уровня корреляционных шумов, обусловленных квантованием квадратурных составляющих ниже -100 дБ, разрядность АЦП должна составлять 12-16 разрядов, причем с увеличением размерности композиционного контура требования к разрядности АЦП снижаются.

Литература

1. Вакман Д.Е. Регулярный метод синтеза фазоманипулированных сигналов.-М.: Сов. радио, 1967.
2. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов.-М.: Сов. радио, 1970.
3. Ипатов В.П. Тройные последовательности с идеальными периодическими автокорреляционными свойствами// Радиотехника и электроника.- 1979.- №10.
4. Леухин, А.Н. Бесконечные множества фазокодированных последовательностей с одноуровневой периодической автокорреляционной функцией/ А.Н.Леухин, Н.В. Парсаев// Радиотехника. 2009. № 12. С. 6-11.
5. Golomb Solomon W. Two-valued sequences with perfect periodic autocorrelation// IEEE Trans.Aerosp. and Electron. Syst.-1992.- №2.-P.383-386.
6. Фурман, Я.А. Класс кодирующих последовательностей, не приводящих к корреляционным шумам / Я.А.Фурман, А.А.Роженцов //Радиотехника.– 2000. – №5. – С.38-43.
7. Фурман, Я.А. Дискретно-кодированные сигналы на базе композиционных контуров / Я.А.Фурман, А.А.Роженцов, Р.Г.Хафизов // Автометрия. – 1996. №1. С. 72-79.
8. Хафизов Р.Г., Роженцов А.А., Скулкин К.В. Композиционные контуры с расширенным энергетическим спектром. Марийск. гос. техн. ун-т. – Йошкар-Ола, 2000. Деп. в ВИНТИ 22.02.00, №425-В00.