

## Результаты исследования радиолокационной системы с положительной обратной связью через пространство и цель

С.П. Калениченко, В.А. Сокольников

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
“Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”им. В.И.  
Ульянова(Ленина)”, 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф.Попова, 5, skalenichenko@yandex.ru

*Исследованы два варианта построения блока цифровой обработки сигналов в системе с обратной связью через цель. В первом варианте возможна последовательная корреляционная обработка сигнала от цели, во втором – параллельная. Когда цель отсутствует (система не замкнута), выходная мощность шумового сигнала незначительна, что затрудняет обнаружение излучения.*

*Two digital signal processing block designs for systems with spatial feedback were considered in that issue. The first design is based on the sequential processing the second one uses the parallel processing. If there is no target in the space the output signal has very low power that means that it's coming harder to detect the signal radiation by the radar system.*

Малая вероятность перехвата излучения радиолокационной станции достигается при достаточно низкой мощности зондирующего сигнала. При этом необходимы высокие вероятности обнаружения целей на больших дальностях. Если время облучения цели ограничено, то высокие вероятности обнаружения малоразмерных целей можно получить за счет увеличения излучаемой мощности, что ухудшает скрытность системы. Значительное снижение среднего значения излучаемой мощности передатчика РЛС возможно при использовании принципа автоколебательной системы с положительной запаздывающей обратной связью через трассу распространения сигнала и цель [1,2,4]. Другая возможность повышения скрытности системы существует при применении широкополосных сигналов.

Физической моделью РЛС с положительной обратной связью через пространство-цель является автогенератор с запаздывающей обратной связью. В переходном режиме установление автоколебаний описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка с запаздывающим аргументом [2]:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \alpha \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0 x(t) = \alpha K_y \frac{dx(t - T_3)}{dt} \quad (1)$$

где:  $x(t)$  - переходный процесс в неустойчивой автоколебательной системе,  $\alpha$  и  $\omega_0$  - соответственно полоса пропускания, определяемая постоянной времени, и резонансная частота колебательного контура в цепи обратной связи автогенератора,  $K_y$  - коэффициент усиления петли обратной связи,  $T_3$  - величина общей задержки сигнала на трассе и в приемо-передающем тракте РЛС. Предполагают, что контур в цепи обратной связи имеет импульсную переходную характеристику вида:

$$h(t) = \alpha \exp\{-\alpha t\} \cos \omega_0 t . \quad (2)$$

Показано [3], что решение уравнения (1) описывается узкополосной функцией вида  $A(t) \cos \omega_0 t$ , причем  $\omega_0 = 2\pi n / T_3$ , ( $n=1,2,3...$ ).

Понизив порядок дифференциального уравнения, перейдя от мгновенных значений к огибающей  $A(t)$  получим

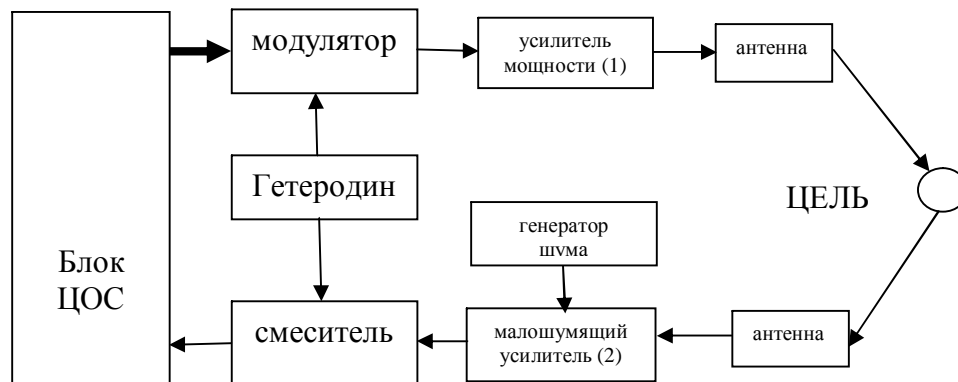
$$\frac{dA(t)}{dt} + \frac{\omega_0}{2} A(t) = \alpha K_y A(t - T_3) . \quad (3)$$

Решение уравнения (1), приближенно описывается экспоненциальным процессом вида:

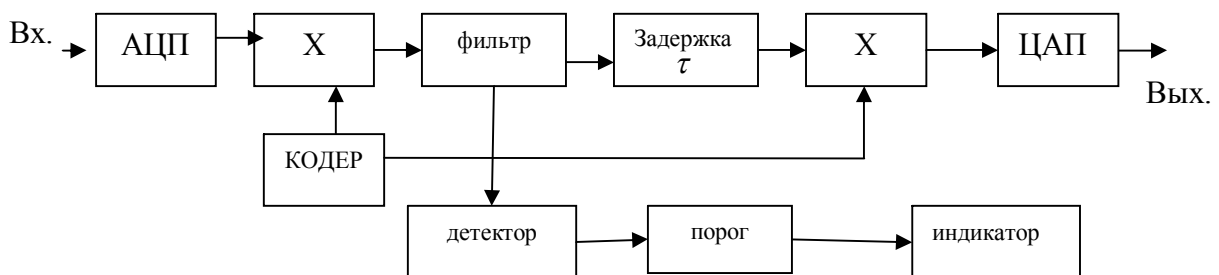
$$A(t) = \gamma \exp\{\gamma t\}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  - показатель экспоненты, определяющий скорость нарастания колебаний при выполнении баланса фаз и баланса амплитуд. Таким образом, в РЛС с положительной обратной связью через пространство и цель при компенсации потерь энергии сигнала на трассе распространения в линейном режиме усиления возникают нарастающие по амплитуде циркуляции сигнала, при сравнении амплитуд которых с установленным напряжением порога может быть принято решение об обнаружении цели.

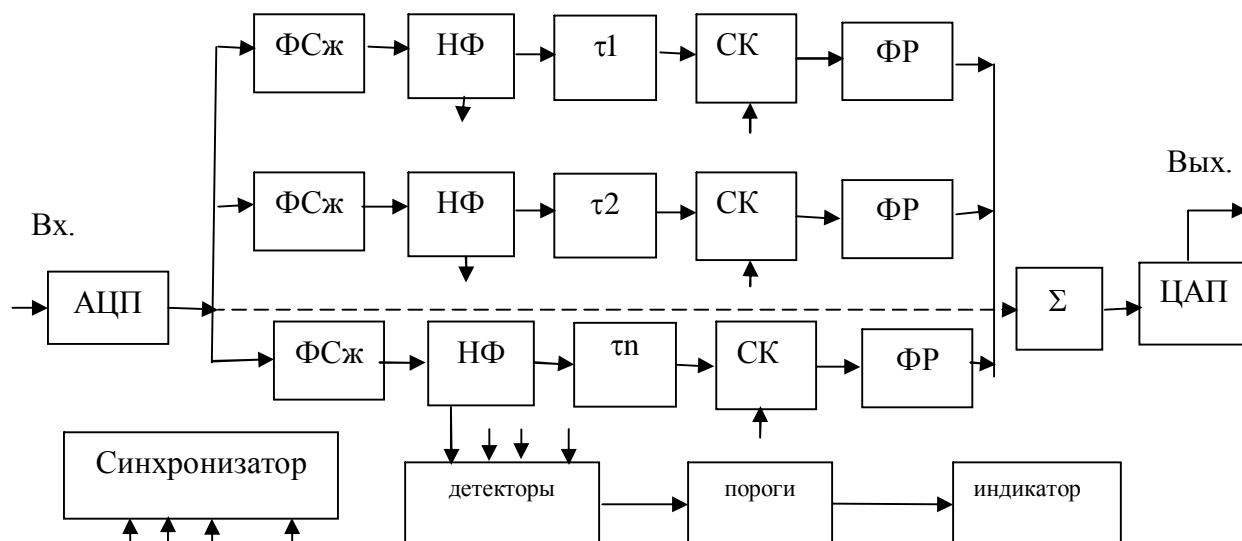
Исследованы две схемы формирования сигнала: последовательная и параллельная. На рис. 1,2,3 показаны обобщенная, последовательная и параллельные схемы просмотра элементов дистанции, реализованные в виде программы на языке MatLab. Дальность разбивается на  $N$  разрешаемых по дистанции элементов, на которых расположены цели. В первой схеме цифровой обработки информации (рис. 2) просмотр элементов дистанции производят последовательно во времени, поэтому время обработки равно произведению числа элементов на время просмотра одного элемента. Во второй схеме (рис. 3) просмотр элементов дистанции осуществляется одновременно, за время анализа, равного времени просмотра одного элемента.



**Рис. 1. Обобщенная схема РЛС с положительной обратной связью через пространство и цель и цифровой обработкой информации**



**Рис. 2. Блок цифровой обработки сигнала в РЛС с положительной обратной связью и последовательной обработкой информации по дальности.**



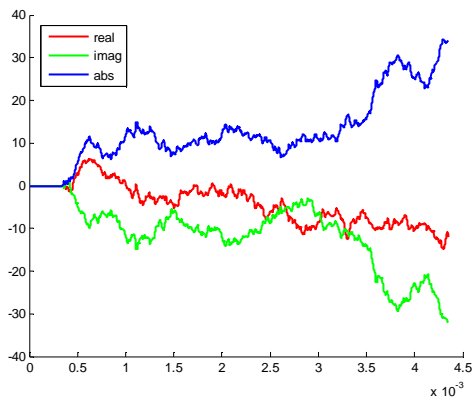
**Рис. 3. Блок цифровой обработки сигнала в РЛС с положительной обратной связью и параллельной обработкой информации по дальности**

На схеме рис. 1 обозначено: блок цифровой обработки информации – блок ЦОС; с блока ЦОС сигнал в виде квадратур поступает на модулятор, в котором осуществляют перенос на СВЧ (частота гетеродина 10000МГц) и излучается в пространство. С выхода смесителя СВЧ сигнал поступает в блок ЦОС, где преобразуется в квадратуры. В отличие от обычных усилительных схем РЛС усилитель мощности должен иметь линейную характеристику с большим размахом линейного участка (до 80-90 дБ). На схеме рис. 2 обозначено: АЦП – аналого-цифровой преобразователь,  $X$  – перемножитель коррелятора, НФ – накопительный фильтр,  $\tau$  - задержка (300 мкс),  $X$  – перемножитель модулятора, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь. На рис. 3 обозначено: ФСЖ – фильтр сжатия сигнала,  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  - задержки в каналах дальности, СК – строб-каскад, запускаемый от синхронизатора, ФР – фильтр растяжения сигнала,  $\Sigma$  - сумматор напряжений каналов.

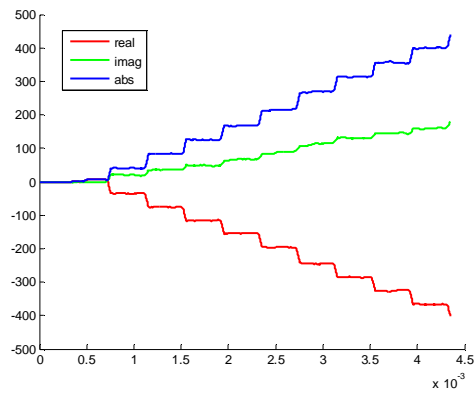
Принцип работы обеих схем основан на положительной обратной связи через цель, т.е. при отсутствии цели в пространстве на вход системы поступает только маломощный шум. При появлении цели в пространстве цепь замыкается, отраженный от цели сигнал поступает на вход приемного тракта РЛС, в которой производится обработка принятого сигнала, принятие решения о наличии цели в пространстве и генерация излучаемого сигнала.

На рис. 2 изображена схема модели РЛС, работающей по принципу последовательного анализа информации по дальности. Входной сигнал после АЦП поступает на перемножитель коррелятора, где он сворачивается с эталонным сигналом кодера, далее он поступает на накопитель, на основании уровня сигнала на выходе которого детектором принимается решение о наличии цели в пространстве. После накопителя сигнал поступает на линию задержки и на перемножитель с эталонным сигналом с кодера, в последствие этот сигнал излучается в пространство. Сигнал на выходе накопителя стробируют и запоминают (значения амплитуды и фазы сохраняются в течение одного периода до поступления нового сигнала, когда они когерентно суммируются и продолжается накопление). Графики, отображающие принцип работы схемы приведены ниже на рисунке 4. На данных графиках отображены результаты обработки импульсного сигнала для различных ситуаций при наличии одной цели. Параметры системы при этом составили: длительность кванта – 1 мкс, длительность отсчета – 0.2 мкс, коэффициент усиления – 1.0, число циркуляций –

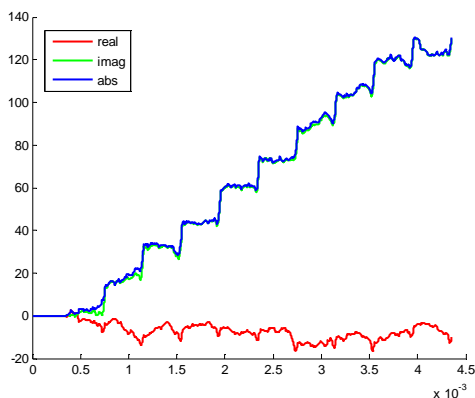
10, период – 400 мкс (включает 100 мкс – анализируемое время, 300 мкс – системная задержка).



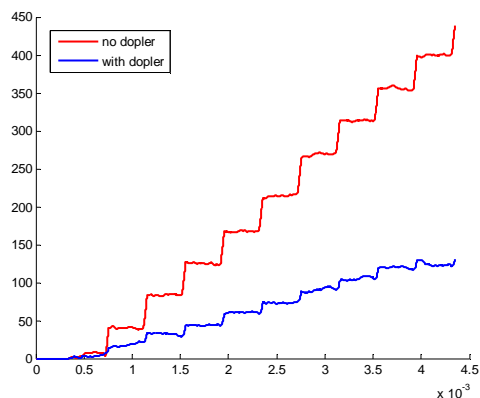
Цепь разомкнута (цель отсутствует)



Цепь замкнута (цель неподвижна)



Цель движется



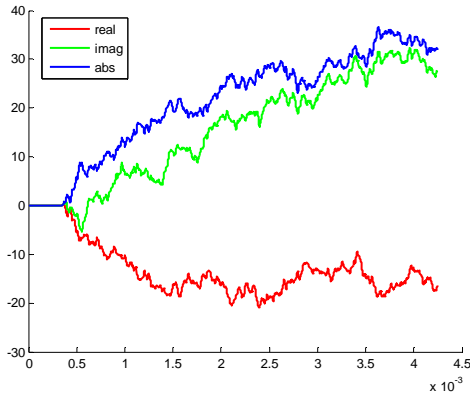
Сопоставление результатов для неподвижной и подвижной цели

**Рис. 4. Результаты моделирования обработки при последовательном режиме работы для импульсного сигнала**

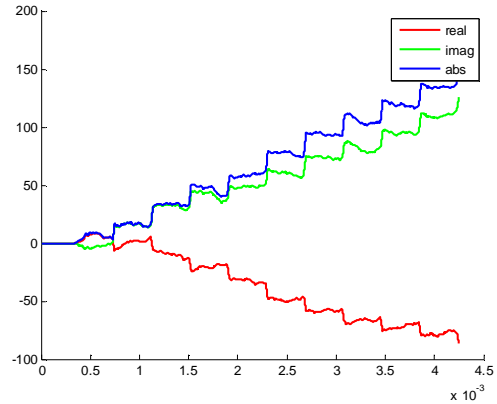
В качестве сигнала в системе возможно использование также сложных сигналов. Графики, отображающие результаты обработки сигнала, при используемом сложном сигнале – коде Баркера 13, приведены на рис. 5. Параметры системы были сохранены такими же как и в предыдущем случае.

Достоинством одноканальной последовательной модели РЛС с ПОС является простота построения, при этом использование этого варианта обработки требует достаточно больших затрат времени на выполнение анализа всех дальностей.

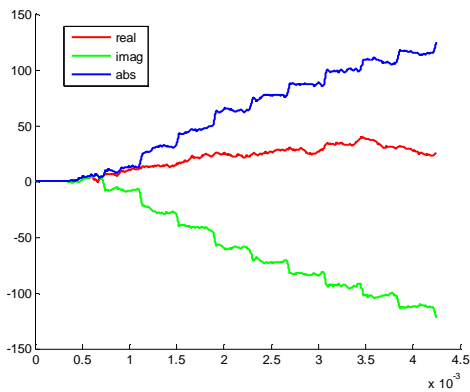
Выходом, позволяющим добиться значительного снижения затрат времени на вычисления, может служить использование многоканальной модели обработки, которая изображена на рис.3. В данной схеме принципиальным отличием является разбиение поступающего сигнала на дальностные каналы, в которых накапливаются значения сигнала, соответствующие определенным дальностям, на основании накопленного сигнала на определенной дальности принимается решение о наличии сигнала на этой дальности. При этом для формирования излучаемого сигнала используется импульс, формируемый путем суммирования задержанных с разных каналов на соответствующее время откликов. Данный импульс подается на фильтр расширения, суть которого заключается в формировании сложного сигнала с амплитудой, определяемой на основании полученного импульса.



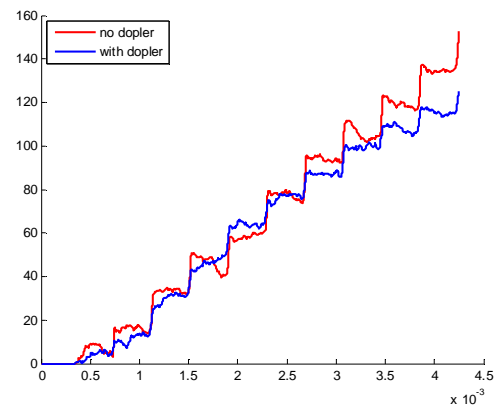
Цепь разомкнута (цель отсутствует)



Цепь замкнута (цель неподвижна)



Цель движется



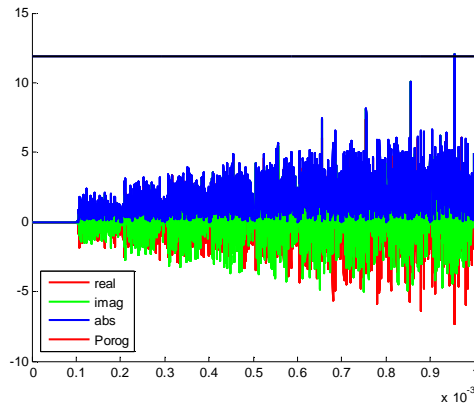
Сопоставление результатов для неподвижной и подвижной цели

**Рис. 5. Результаты моделирования обработки при последовательном режиме работы для сложного сигнала типа Баркер 13**

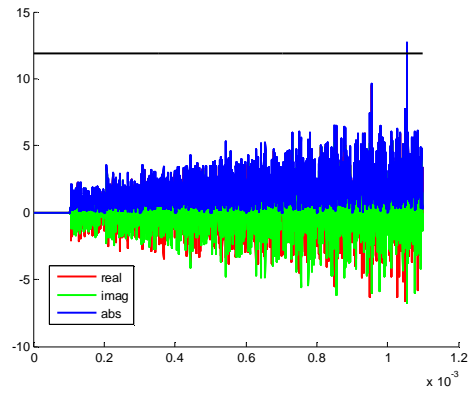
Графики, отображающие принцип работы многоканальной системы, приведены на рис. 6. Параметры системы при этом следующие: длительность кванта – 1 мкс, длительность отсчета – 0.2 мкс, коэффициент усиления – 5.0, число циркуляций – 20, анализируемый период – 100 мкс.

Как видно, при выставлении порога, в зависимости от различных условий скорость достижения накапливаемого сигнала порогового значения в достаточной степени меняется, что говорит о достаточно хорошей частотной избирательности схемы.

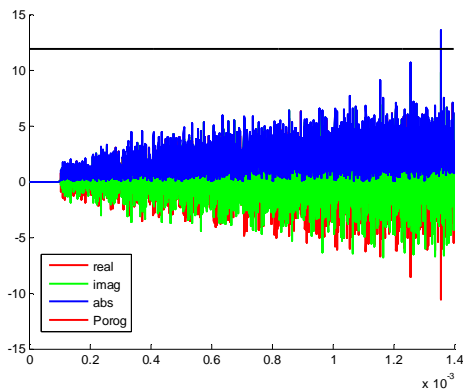
Таким образом, обе рассмотренные схемы позволяют произвести поиск цели в пространстве. Они позволяют в значительной степени повысить скрытность РЛС, т.к. большую часть времени РЛС излучает маломощный шумоподобный сигнал и только при появлении цели мощность излучаемого в пространство сигнала начинает возрастать, до тех пор, пока не будет принято решение о наличии цели, затем происходит сброс накопленного значения сигнала.



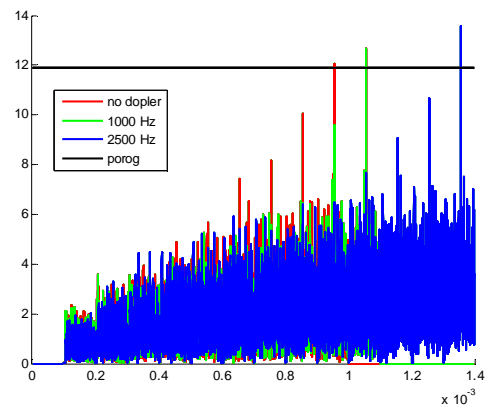
Цель замкнута (цель неподвижна)



Цель движется 1 кГц



Цель движется 2.5 кГц



Сопоставление результатов для неподвижной и подвижной цели

**Рис. 6. Результаты моделирования обработки при многоканальном режиме работы для импульсного сигнала**

### Литература

1. Морская радиолокация. Под редакцией проф. В.И. Винокурова. Изд. Судостроение, Л. 1986, С. 256 с ил.
2. Кутузов В.М. Применение регрессионных моделей в РЛС с положительной обратной связью. // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Серия "Радиоэлектроника и телекоммуникации", Выпуск 1, 2005. С. 37-40.
3. Попов В.Н., Щербак В.И. Линейный этап установления автоколебания в генераторе с запаздыванием.// Известия ЛЭТИ. 1977. Вып. 215. С. 22-24.
4. Fedorov A.A. Clutter suppression in quasi-continuous-wave nontraditional architecture radar// 1966 CIE Int. Conference of Radar 'CICR-96' Proceeding, Beijing, China, 8-10 October, 1996 p.p. 234-237