

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОЙ МНОГОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА В ЗАДАЧАХ РАДИОВИДЕНИЯ

*Андреев Н.А., начальник отдела НТЦ ФГУП «Государственный рязанский приборный завод»,
Витязев С.В., научный сотрудник Рязанского государственного радиотехнического университета,
e-mail: tor@rgta.ryazan.ru,*

*Витязев В.В., д.т.н., зав. кафедрой ТОР Рязанского государственного радиотехнического университета,
e-mail: tor@rgta.ryazan.ru*

Ключевые слова: радиовидение, траекторный сигнал, многоскоростная адаптивная обработка, доплеровский, частота, метод, алгоритм, автофокусировка, фильтр.

Введение

Проблема формирования радиолокационного изображения (РЛИ) земной поверхности в реальном времени остается одной из актуальных при решении задач радиовидения [1,2]. В работах [3,4,5] рассмотрены способы и алгоритмы формирования РЛИ в различных режимах обзора и картографирования земной поверхности, а также селекции наземных движущихся целей, отличающихся значительным уменьшением вычислительных затрат и памяти данных при переднем и передне-боковом обзорах. Введение блока предварительной обработки, выполняющей функцию согласования полосы пропускания цифрового приемника траекторного сигнала с шириной его полосы частот, и последующее понижение частоты дискретизации пропорционально отношению частоты повторения зондирующих импульсов к ширине полосы частот траекторного сигнала, позволяет вести формирование и обработку РЛИ при более низкой скорости потока входных данных. Как следствие, уменьшаются общие вычислительные затраты, память данных и коэффициентов, увеличивается соотношение сигнал/шум.

Вместе с тем, вследствие траекторных нестабильностей, обусловленных изменением параметров движения носителя бортового радиолокационного комплекса (БРЛК), и различных возмущающих воздействий, наблюдается уход доплеровских частот траекторного сигнала, что приводит к пропорциональному смещению его полосы частот (в случае секторного обзора) и дополнительной нелинейной трансформации частот (в случае панорамного обзора) [3].

В том и другом случае требуется введение блока адаптации, отслеживающего все изменения полосы частот траекторного сигнала и выполняющего адекватную настройку параметров цифрового приемника в реальном времени.

В настоящей работе рассматриваются методы и алгоритмы адаптивной многоскоростной обработки траекторного сигнала в различных режимах работы БРЛК, отличающиеся значительным уменьшением вычислительных за-

Представлены алгоритмы адаптации узкополосного фильтра-дециматора к уходу (смещению) доплеровских частот траекторного сигнала на основе набора формирующих фильтров и автофокусировки в частотной области. Рассмотрены два подхода к построению схем адаптивной обработки широкополосного траекторного сигнала в режиме панорамного обзора. Показано, что наибольшей скоростью и точностью настройки обладает структура цифрового приемника, использующая предварительное субполосное разбиение спектра траекторного сигнала. Проведено моделирование алгоритмов многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала, иллюстрирующее работоспособность и эффективность предложенного способа построения цифрового приемника траекторного сигнала на конкретных примерах.

трат, высокой скоростью и точностью настройки параметров цифрового приемника.

Адаптивная многоскоростная обработка узкополосного траекторного сигнала

Наличие этапа предварительной фильтрации в алгоритме обработки узкополосного траекторного сигнала в режиме секторного обзора оказывается эффективным не только с точки зрения понижения частоты дискретизации перед основной обработкой, но и с позиции возможности предварительной компенсации фазовых искажений за счет применения адаптивных методов настройки фильтра-дециматора.

Возможны различные структуры построения адаптивного цифрового фильтра-дециматора (АЦФД). Приведем некоторые из них. В простейшем случае схема адаптации включается в структуру самого фильтра-дециматора (рис.1).

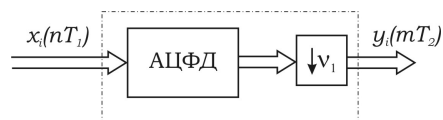


Рис.1. Структура фильтра-дециматора с «внутренней» адаптацией параметров

Здесь полоса пропускания ЦФД смещается вдоль оси частот в поисках ушедшей полосы траекторного сигнала. Сам алгоритм слежения за полосой – алгоритм адаптации, будет предложен ниже. Отметим только, что преобразования сигнала идут на исходной высокой частоте дискретизации, что является недостатком метода. Однако адап-

тация, совмещенная с фильтром-демодулятором, упрощает реализацию системы.

Другим вариантом построения структуры АЦФД является выделение этапа адаптации в отдельную процедуру и выполнение подстройки к полосе частот уже прореженного входного сигнала (рис.2). Этот подход отличается уменьшенными вычислительными затратами на адаптацию, однако усложняет структуру алгоритма и в некоторых случаях может давать менее эффективный результат подстройки к уходу частот.

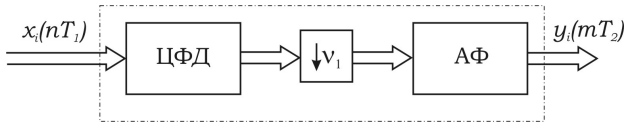


Рис. 2. Структура адаптивного фильтра-дециматора с предварительным понижением частоты дискретизации

Перейдем к рассмотрению непосредственно алгоритмов подстройки к полосе траекторного сигнала. Здесь также возможен ряд подходов. Рассмотрим два из них: слежение за полосой по максимуму мощности и адаптация с корреляцией в частотной области.

Метод слежения за полосой по максимуму мощности сигнала (рис.3) подразумевает наличие набора каналов обработки. В примере на рис.3 показано 3 канала, но их число может быть расширено как вверх (смещение полосы сигнала влево), так и вниз (смещение полосы сигнала вправо).

Структура фильтра-дециматора в каждом канале остается аналогичной структуре, не использующей адаптацию к полосе. Различие состоит в том, что в каждом канале смещение спектра на нулевую частоту осуществляется с различных центральных частот. Если 0-ой канал, соответствующий каналу обработки сигнала при отсутствии смещения полосы, по-прежнему, использует в качестве центральной частоты величину ω_0 , то соседние каналы принимают за центральные частоты величины ω_i , отстоящие от исходной частоты на $i \times \Delta\omega_0$. Шаг $\Delta\omega_0$ определяет точность настройки на частоту, а количество каналов – диапазон частот, в котором схема остается работоспособной.

К достоинствам рассмотренной структуры следует

отнести простоту проектирования и надежность работы. Кроме того, адаптация здесь происходит независимо от предыдущих состояний системы и без задержек. Недостатком можно считать избыточность схемы и, как следствие, повышенную вычислительную сложность.

Альтернативным подходом является метод на основе корреляции в частотной области. Этот метод похож на известные в радиовидении способы так называемой автофокусировки. Однако при автофокусировке фазовые искажения компенсируются в пределах одного интервала синтезирования уже в процессе фокусировки. В нашей же задаче осуществляется предварительная компенсация ухода всей полосы частот траекторного сигнала, имеющая место от одного интервала синтезирования к другому. Это может быть полезно, когда наблюдения в одном направлении повторяются многократно с целью некогерентного накопления и повышения отношения сигнал/шум и борьбе со спекл-шумом.

Структура адаптации с корреляцией в частотной области приведена на рис. 4. Опишем принцип ее функционирования. Будем по-прежнему считать, что при очередном наблюдении полоса частот траекторного сигнала сместилась так, что центральная частота стала равной $\omega_0 + \Delta\omega$. Структуру адаптации к полосе можно разделить на две части: схему оценки смещения спектра $\Delta\omega$ и схему компенсации этого смещения. Первая часть включает блоки БПФ и корреляции. БПФ переводит сигнал в частотную область и показывает его спектр. Если осуществляется первое наблюдение, то считается, что полоса частот еще не сместилась, и спектр на этом этапе принимается за эталонный. Выход БПФ записывается в буфер (начальный спектр). При последующих зондированиях выход БПФ сравнивается с эталонным спектром, и процедура корреляции в частотной области показывает величину смещения полосы траекторного сигнала относительно исходного положения $\Delta\omega$. Эта поправка вносится в блок демодулятора, который и составляет основу компенсирующей части схемы адаптации, работая во временной области. Остальные блоки структуры работают точно так же, как и в случае отсутствия адаптации к полосе.

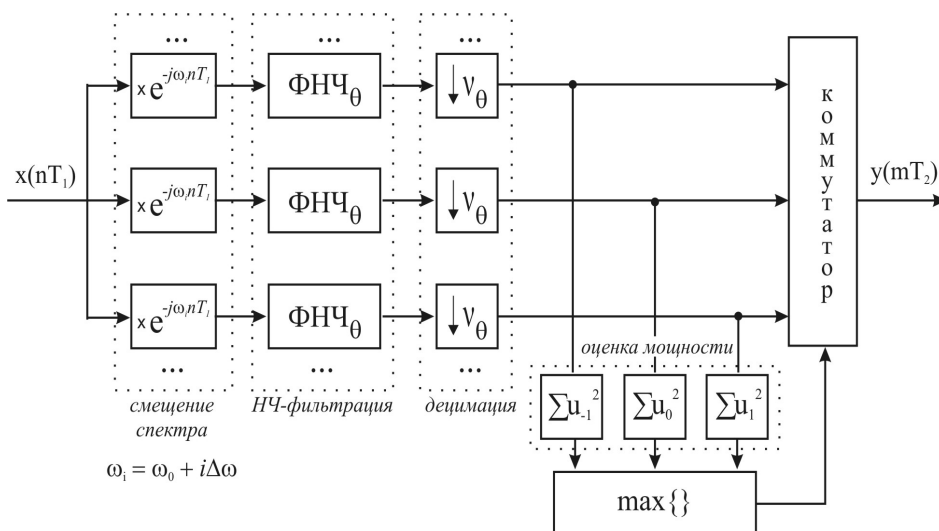


Рис.3. Трехканальная структура адаптивного узкополосного фильтра-дециматора с перестройкой центральной частоты по максимуму мощности

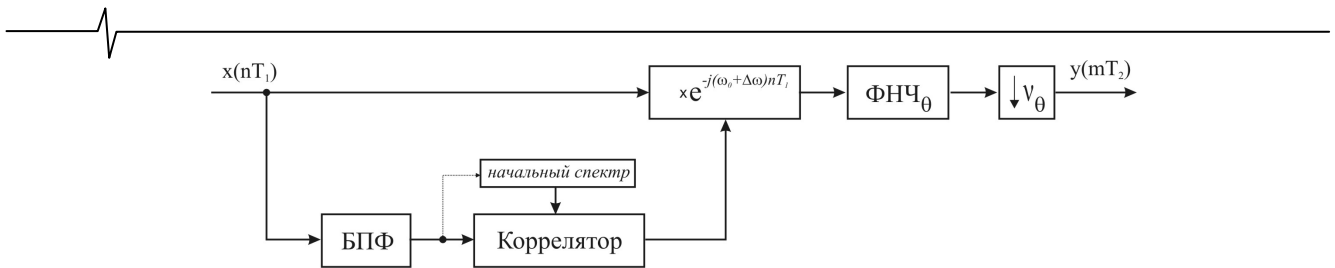


Рис. 4. Структура адаптивного фильтра-дециматора с корреляцией в частотной области

Достоинством рассмотренного подхода можно считать относительно небольшой уровень вычислительной сложности и более высокую точность настройки за счет процедуры корреляции, работающей по принципу максимума «схожести» формы спектра, а не максимума мощности. В качестве недостатка можно отметить необходимость знания эталонного спектра. Такая схема может применяться только при многократно повторяющихся наблюдениях в одном направлении в режиме слежения.

Представляет интерес сочетание «грубой» и «точной» настройки узкополосного ЦФД. На первом этапе адаптации, когда не известен амплитудный спектр траекторного сигнала, можно воспользоваться «грубой» оценкой ухода доплеровских частот по максимуму мощности сигнала на выходе набора полосовых фильтров. Реализация блока оценивания ухода полосы частот траекторного сигнала с помощью набора обычных полосовых фильтров целесообразна и в дальнейшем, чтобы не допустить срывов слежения при «точной» настройке.

На втором этапе адаптации, по информации об амплитудном спектре траекторного сигнала, полученной с выхода устройства формирования РЛИ, или с помощью дополнительного БПФ-преобразования, производится «точная» подстройка полосы пропускания цифрового приемника. С этой целью используется набор из M формирующих фильтров (рис. 5), перекрывающих диапазон частот, выделенный входным фильтром-дециматором. Предполагается, что АЧХ формирующих фильтров (ФФ) совпадают с амплитудным спектром принимаемого траекторного сигнала и отличаются только значением центральных частот.

Как известно [6], с целью значительного уменьшения вычислительных затрат и памяти данных используют многоступенчатую реализацию узкополосного фильтра-дециматора. Поэтому общая структурная схема устройства предварительной обработки траекторного сигнала включает m ступеней децимации, обеспечивающих понижение частоты дискретизации в

$$V = \prod_{i=1}^m V_i$$

раз, и набора из M формирующих фильтров, работающих на предельно низкой частоте дискретизации и обеспечивающих согласование со спектральной структурой траекторного сигнала [7].

Ставится задача оптимального синтеза многоступенчатой структуры адаптивного узкополосного фильтра-дециматора. Цель оптимизации – минимизация общих вычислительных затрат при заданном числе ФФ и коэффициенте перекрытия АЧХ соседних частотных каналов. Методика оптимального проектирования на цифровых сигнальных процессорах многоступенчатой структуры узкополосного фильтра-дециматора в классе КИХ-цепей предложена в [6].

Адаптивная многоскоростная обработка широкополосного траекторного сигнала

С целью значительного уменьшения времени формирования РЛИ в [3] рекомендуется использовать режим панорамного обзора, который фактически имитирует обработку множества узкополосных траекторных сигналов режима секторного обзора, но выполняет ее одновременно для всех азимутальных каналов, отличаясь лишь разделением на отдельные азимутальные каналы в частотной, а не во временной области. Для обеспечения частотной селекции азимутальных каналов в режиме панорамного обзора требуется набор адаптивных фильтров-дециматоров предварительной обработки, перестраиваемых по центральной частоте и ширине полосы пропускания, в соответствии с уходом доплеровских частот, вследствие траекторных нестабильностей принимаемого широкополосного сигнала [3,4].

Ставится задача построения набора адаптивных цифровых фильтров-дециматоров (ЦФД) устройства предварительной обработки траекторного сигнала в режиме панорамного обзора и картографирования земной поверхности. Предполагается, что набор адаптивных ЦФД устройства предварительной обработки используется для обеспечения

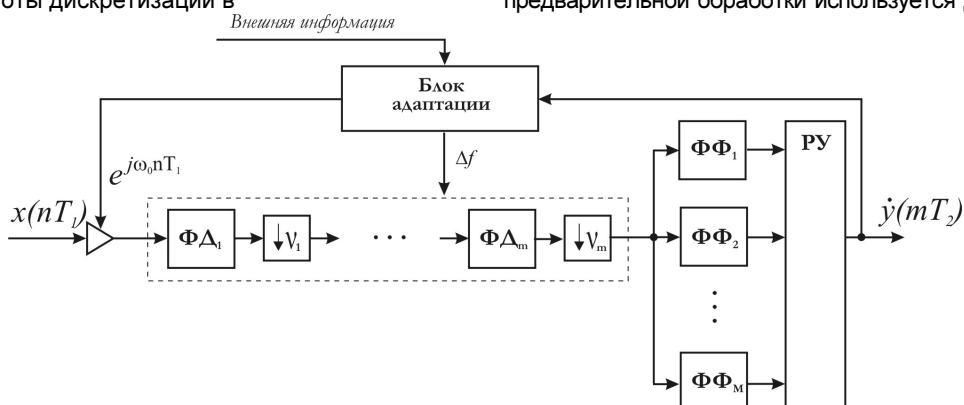


Рис. 5. Структурная схема устройства предварительной обработки узкополосного траекторного сигнала

равной угловой разрешающей способности вне зависимости от азимутального направления полосы обзора, а также автоматической фокусировки синтезируемого радиоизображения земной поверхности при уходе доплеровских частот траекторного сигнала. Задача оптимизации структуры и параметров цифрового приемника преследует целью минимизацию общих вычислительных затрат при заданных ограничениях на выделенные ресурсы памяти данных и программ.

Известно [3], что при переходе от бокового обзора к передне-боковому и, в особенности, к переднему обзорам многократно увеличивается требуемая спектральная избирательность цифрового приемника. Это потенциально возможно, так как с уменьшением азимутального направления полосы обзора относительно направления полета носителя БРЛК уход доплеровских частот проявляется в значительно меньшей степени, а значит временной интервал синтеза РЛИ также многократно увеличивается, что и позволяет пропорционально увеличить разрешающую способность. Кроме того, увеличение интервала синтеза РЛИ в режиме панорамного обзора становится возможным, так как облучение земной поверхности ведется одновременно во всей полосе обзора земной поверхности, а не последовательно сектор за сектором, как это осуществлялось в режиме секторного обзора, ограничивая тем самым время обзора в каждом отдельном секторе.

Общая структурная схема цифрового приемника траекторного сигнала в режиме панорамного обзора приведена на рис.6. Заметим, что единственное отличие от общей структурной схемы цифрового приемника узкополосного траекторного сигнала в режиме секторного обзора состоит в том, что вводится банк (набор) цифровых полосовых фильтров (ЦПФ), перекрывающих заданный диапазон рабочих частот траекторного сигнала по некоторому алгоритму согласования спектральных окон соседних частотных каналов. При этом банк фильтров-дециматоров, включающий M полосовых фильтров, работающих с понижением частоты дискретизации в V_j раз, $j = \overline{1, M}$, принимает вид, представленный на рис.7.

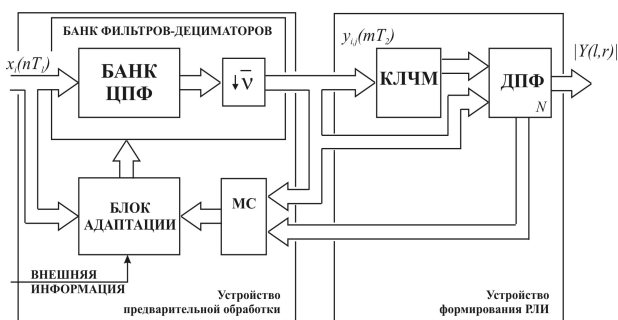


Рис. 6. Структурная схема цифрового приемника траекторного сигнала в режиме панорамного обзора

Входной траекторный сигнал $x_i(nT_1)$, в общем случае комплексный, подается на вход устройства предварительной обработки, включающего в себя набор из M ЦПФ, перестраиваемых по центральной частоте ω_{0j} и ширине полосы пропускания $2\omega_{c_j}$, $j = \overline{1, M}$, и блок адаптации. Задача первого блока – банка фильтров-дециматоров, выделить заданную полосу частот траекторного сигнала, соответствующую определенному азимутальному направлению ДНА в режиме секторного обзора, и понизить частоту дискретизации в V_j раз, пропорционально отношению частоты повторения

зондирующих импульсов к ширине полосы частот j -ой составляющей траекторного сигнала. Предполагается, что при переходе от бокового обзора к переднему и формированию РЛИ в соответствующем азимутальном направлении ДНА равной ширины, полоса частот траекторного сигнала в значительной степени сужается (рис. 7б), а, следовательно, возрастает коэффициент децимации V_j .

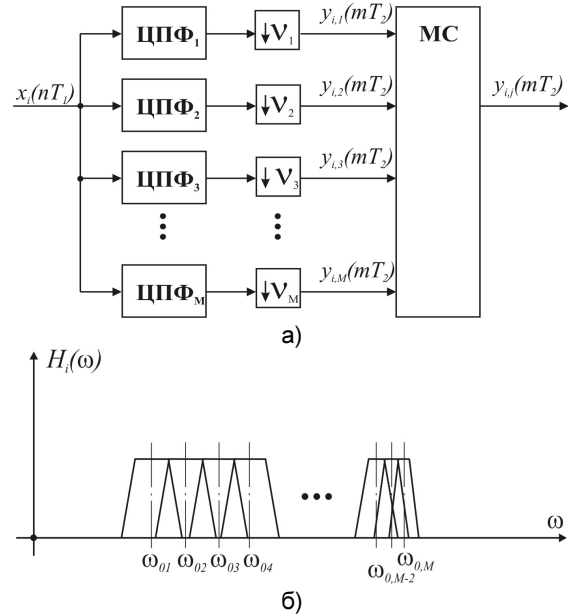
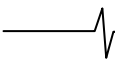


Рис. 7. Банк полосовых фильтров-дециматоров (а) и его частотные свойства (б)

Задача второго блока - блока адаптации, - слежение за возможным непропорциональным уходом центральных частот ω_{0j} и ширины полосы частот траекторного сигнала на выходе каждого канального ЦПФ, вследствие траекторных нестабильностей и маневров носителя БРЛК, и автоматическая настройка соответствующих параметров набора полосовых фильтров-дециматоров. По внешней информации, поступающей от блока управления БРЛК, задается ширина сектора и направление обзора. Устройство формирования РЛИ по прореженным последовательностям траекторного сигнала $y_{i,j}(mT_{2j})$, $j = \overline{1, M}$, $i = \overline{1, K}$, синтезирует текущий кадр изображения $|Y(i, j)|$ путем вычисления ДПФ последовательностей $y_{i,j}(mT_{2j})$, $j = \overline{1, M}$, $i = \overline{1, K}$, и оценки модуля элементов матрицы вычисленных коэффициентов Фурье.

В зависимости от способа построения блока адаптации (режима работы) можно говорить о двух подходах к решению задачи предварительной обработки траекторного сигнала с помощью набора цифровых фильтров-дециматоров. Первый предполагает, что ширина полосы частот траекторного сигнала на выходе каждого j -го ЦПФ изменяется в относительно небольших пределах (не более чем на половину ширины полосы пропускания), а уход по центральной частоте ω_{0j} компенсируется блоком адаптации по внешней информации о скорости и ускорении носителя БРЛК, траектории его полета и другим параметрам, однозначно определяющим уход доплеровских частот траекторного сигнала. Может также приниматься во внимание информация, поступающая с выхода устройства формирования РЛИ. В этом случае задача построения оптимальной структуры цифрового приемника траекторного сигнала сводится к оптимизации параметров в общем случае многоступенчатой пирами-



дальной структуры набора из M полосовых фильтров-дециматоров с заданными параметрами и свойствами частотной избирательности (рис. 7). При этом, с учетом возможного расширения полосы частот и не скомпенсированного блоком адаптации ухода доплеровских частот, следует увеличить коэффициент перекрытия соседних частотных каналов как минимум в два раза (рис.8), оставляя прежними значения центральных частот ω_{0j} каждого j -го фильтра, что позволит в последующем, на этапе формирования РЛИ, выполнить «подстройку» амплитудного спектра в каждой j -й полосе частот траекторного сигнала.

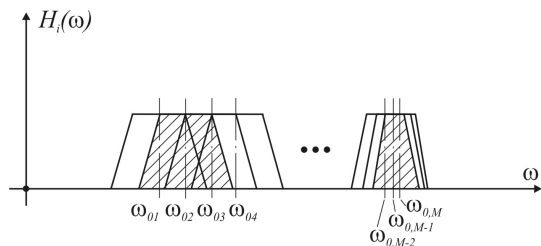


Рис. 8. Эффект перекрытия АЧХ набора полосовых фильтров

Представленная на рис. 7 структурная схема набора из M фильтров-дециматоров удобна в реализации с использованием параллельного набора из M цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), когда каждый процессор или модуль решает свою задачу предварительной обработки j -го частотного канала. Вместе с тем при совместной реализации всего набора ЦФД, в частности на одном сигнальном процессоре, следует подходить к решению поставленной задачи оптимизации структуры и параметров приемного устройства с более общих позиций.

Известно [6], что переход от прямой параллельной формы реализации набора ЦФД к многоступенчатой пирамидальной – это шаг в направлении существенной минимизации общих вычислительных затрат. Поэтому последующая постановка и решение задачи оптимального проектирования устройства предварительной обработки траекторного сигнала должны исходить из условия поиска оптимального числа ступеней предварительной фильтрации входного траекторного сигнала $x_i(nT_1)$ с использованием набора полосовых фильтров-дециматоров в тех частотных каналах, ширина полосы частот которых много меньше частоты повторения зондирующих импульсов (передний и передне-боковой обзоры).

Второй подход к реализации устройства предварительной обработки траекторного сигнала полностью ориентируется на методы и алгоритмы автофокусировки и адаптации в частотной области с использованием устройства спектрального оценивания (УСО) (рис. 9).

По результатам спектрального оценивания решающее устройство (РУ) производит оценку возможного ухода полосы частот траекторного сигнала, используя один из алгоритмов автофокусировки, а блок перестройки параметров (БПП) вносит соответствующую коррекцию центральных частот набора полосовых фильтров-дециматоров.

Задача оптимизации набора ЦФД в рамках данной структуры устройства предварительной обработки траекторного сигнала должна строиться с учетом затрат на реализацию алгоритма спектрального оценивания и автофокусировки в частотной области. Предполагается, что спектральное оценивание ведется в расширенной полосе частот каж-

дого отдельного j -го канала или по всей совокупности каналов с тем, чтобы учесть ее возможный уход при маневрах носителя БРЛК и траекторных нестабильностях.

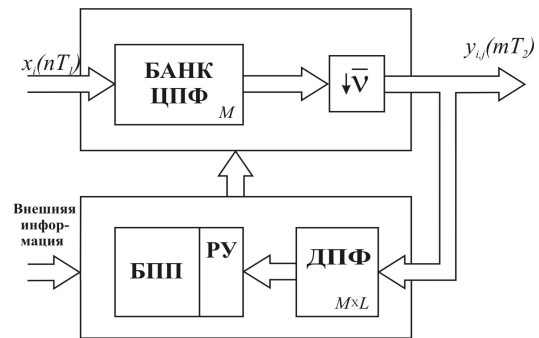


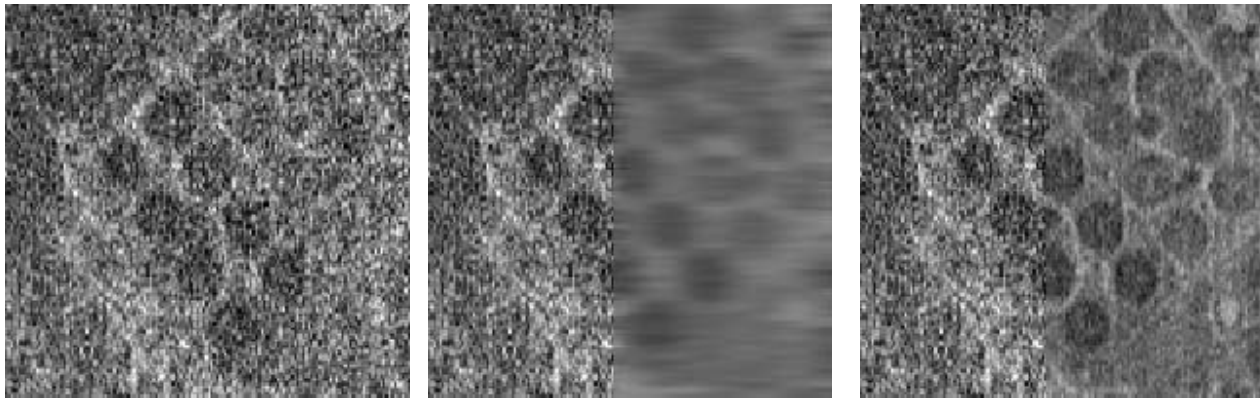
Рис. 9. Устройство предварительной обработки траекторного сигнала с использованием автофокусировки в частотной области

При использовании адаптации в каждом j -м канале и древовидной структуры банка ЦФФ [3] описание параметров набора адаптивных фильтров-дециматоров приобретает векторно-матричную форму. Задача оптимизации векторно-матричной формы реализации адаптивных фильтров-дециматоров (АФД) заключается в том, что ширина полосы частот каждого j -го ЦФФ в режиме адаптации расширяется в несколько раз. Причем, если уход доплеровских частот в абсолютных значениях примерно одинаковый во всей полосе панорамного обзора, то в относительных значениях (по отношению к ширине полосы частот отдельного полосового фильтра) доплеровский уход частот при переднем обзоре может значительно превышать «захватываемую» им полосу частот. Есть два пути решения этой проблемы. Первый ориентирован на пропорциональное расширение полосы пропускания фильтров-дециматоров, а второй предполагает возможность реализации автоматического слежения за уходом доплеровских частот и многоступенчатого переключения центральных частот каждого АФД.

Моделирование алгоритмов многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала

С целью иллюстрации эффективности рассмотренных выше методов и алгоритмов адаптации цифрового приемника траекторного сигнала было проведено моделирование их работы отдельно для узкополосного (режим секторного обзора) и широкополосного (режим панорамного обзора) сигналов.

Эффект от применения схемы адаптации, введенной в цифровой приемник узкополосного траекторного сигнала, иллюстрирует рис. 10. Здесь показан случай некогерентного накопления выходов согласованной обработки сигнала от кадра к кадру с целью снижения уровня шумов. Показано, что при отсутствии схемы компенсации фазовых искажений некогерентное накопление, повышая отношение сигнал/шум, вместе с тем приводит к размытию РЛИ (рис. 10б). Причина этого состоит в том, что также как и отдельные реализации шума, сигналы РЛИ в разных периодах наблюдения оказываются слабо коррелированы друг с другом, и метод накопления не дает ожидаемых результатов. Применение схемы адаптации «возвращает» полосу сигнала в исходное положение, и корреляция между отдельными наблюдениями повышается. РЛИ на рис.10в отличается высоким отношением сигнал/шум и увеличенной четкостью и контрастностью.



а) исходное изображение б) накопление без адаптации в) накопление с адаптацией

Рис. 10. Иллюстрация алгоритма адаптации цифрового приемника

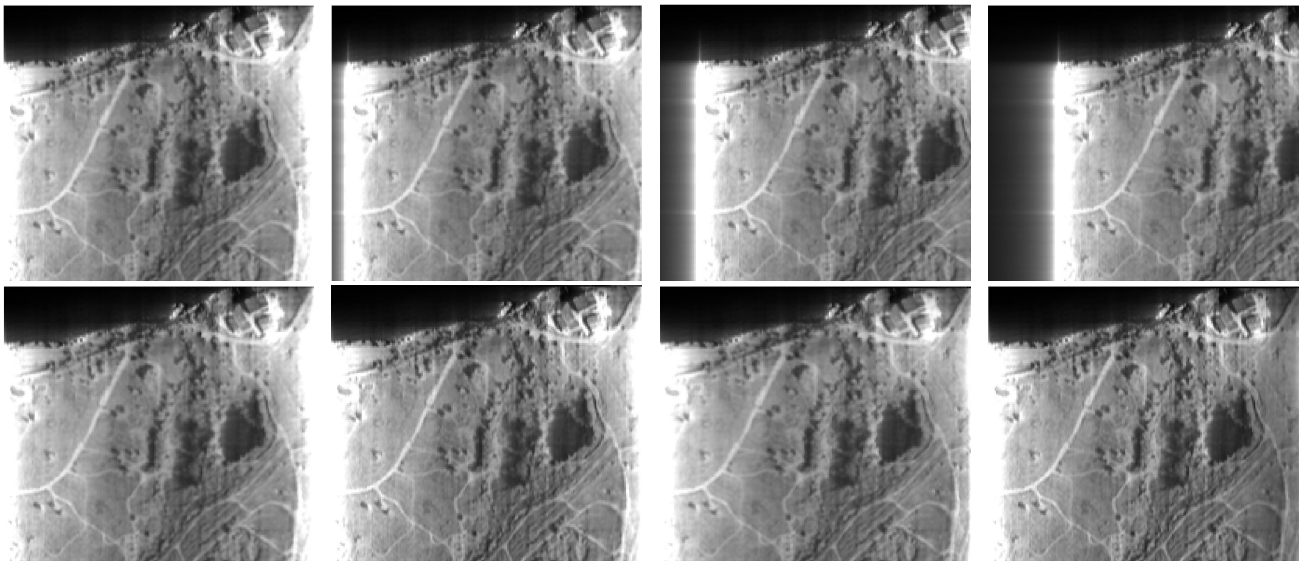


Рис. 11. Иллюстрация формирования РЛИ при различных значениях ухода частот траекторного сигнала в режиме секторного обзора

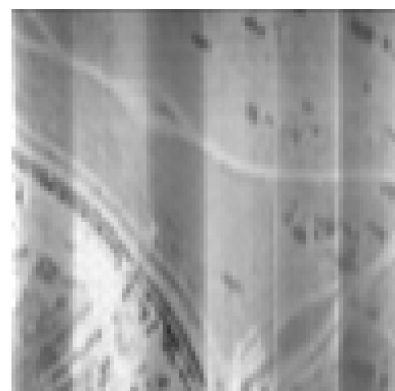
Дополнительно отметим, что схема адаптации к полосе траекторного сигнала способна компенсировать уход частот, связанный с квадратичным набегом фазы, увеличивая потенциально достижимый уровень разрешающей способности по азимуту в этом режиме.

На рис. 11 в верхнем ряду представлены результаты обработки траекторных сигналов с уходами частот на 0, 10, 25 и 45 элементов разрешения, соответственно, когда процедура адаптации не применялась. В нижнем ряду представлены соответствующие радиолокационные изображе-

ния, полученные с применением процедуры адаптации. Можно сделать вывод о целесообразности использования предложенных алгоритмов. Области в крайних столбцах, засвеченные ярко-белым, возникают из-за особенностей обработки (скорее всего из-за эффекта Гиббса), и борьба с ними представляет собой отдельный вопрос. Эффект от предложенной адаптации особенно ярко проявляется при повторяющихся накоплениях результатов обработки с целью повышения отношения сигнал/шум и борьбы со спекл-шумом, что демонстрировалось ранее [8].



а



б

Рис. 12. Иллюстрация формирования РЛИ в режиме панорамного обзора

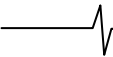


Рис. 12 иллюстрирует результат формирования РЛИ (б) в режиме панорамного обзора по принятой модели широкополосного траекторного сигнала, адекватной исходному изображению (а).

Заключение

По результатам проведенных исследований и моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Представлены два алгоритма адаптации узкополосного фильтра-дециматора к уходу (смещению) доплеровских частот траекторного сигнала: на основе набора формирующих фильтров и автофокусировки в частотной области. Показано, что для обеспечения быстрой настройки и надежной работы адаптивной системы предпочтительно использовать набор формирующих узкополосных фильтров, перекрывающих заданный диапазон ухода доплеровских частот траекторного сигнала. При этом точность настройки системы определяется точностью аппроксимации АЧХ формирующих фильтров и числом фильтров с разнесенными центральными частотами, определяющим шаг перестройки по частоте. Автофокусировка в частотной области может использоваться при дальнейшей обработке на этапе формирования РЛИ.

2. Рассмотрены два подхода к построению схем адаптивной обработки широкополосного траекторного сигнала. Показано, что наибольшей гибкостью и точностью настройки обладает структура цифрового приемника, использующая предварительное субполосное разбиение широкополосного траекторного сигнала. С целью минимизации общих затрат на ее реализацию требуется математическая формализация и решение задачи оптимального проектирования набора полосовых фильтров-дециматоров, перекрывающих заданную полосу частот траекторного сигнала, с учетом влияния ухода доплеровских частот и автоматической подстройки параметров одновременно всех субполосных каналов.

3. Проведено моделирование алгоритмов многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала в режимах секторного и панорамного обзора, иллюстрирующее работоспособность и эффективность предложенного способа построения цифрового приемника траекторного сигнала на конкретных примерах.

Литература

1. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны \ В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н.

Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988 – 304 с.

2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие \ Под ре. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
3. Витязев В.В., Колодько Г.Н., Витязев С.В. Способы и алгоритмы формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского обужения луча \ Цифровая обработка сигналов, 2006, № 3, с. 31-41.
4. Витязев В.В., Колодько Г.Н., Воронков Д.В. Формирование радиолокационного изображения в режиме фокусируемого синтезирования апертуры ДНА \ Цифровая обработка сигналов, 2006, № 4, с. 34-40.
5. Витязев В.В., Колодько Г.Н., Витязев С.В. Селекция наземных движущихся целей на основе многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала \ Цифровая обработка сигналов, 2007, № 1, с. 41-50.
6. Витязев В.В. Цифровая частотная селекция сигналов. М.: Радио и связь, 1993, 240 с.
7. Андреев Н.А., Витязев С.В., Витязев В.В. Алгоритмы адаптации к уходу доплеровских частот узкополосного траекторного сигнала \ Труды 11-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2009», Москва, ИПУ РАН, Т.1, с.111-114.
8. Витязев С.В., Колодько Г.Н. Моделирование и исследование эффективности формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского обужения луча \ Труды 9-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2007», г. Москва, ИПУ РАН, март 2007.

METHODS AND ALGORITHMS OF ADAPTIVE MULTIRATE SIGNAL PROCESSING IN RADIO-IMAGING SYSTEMS

Nikolay Andreev, Sergey Vityazev, Vladimir Vityazev.

Methods and algorithms of the adaptive multirate radio-imaging signal processing are considered. Some modes of operation are investigated. It is shown that the suggested technique allows to decrease significantly computational costs and to provide high speed and high accuracy receiver adjustment.