

СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ АДАПТИВНОГО ЦИФРОВОГО ПРИЕМНИКА ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА В РЕЖИМЕ ПАНОРАМНОГО ОБЗОРА

*Андреев Н.А., начальник отдела НТЦ ФГУП «Государственный рязанский приборный завод»,
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]. В работах [2,3,4] рассмотрены способы и алгоритмы формирования РЛИ в различных режимах обзора и картографирования земной поверхности, отличающиеся введением в структуру цифрового приемника траекторного сигнала блока предварительной обработки, который выполняет функцию согласования полосы его пропускания с шириной и положением частот траекторного сигнала. В результате предварительной обработки с понижением частоты дискретизации принимаемого сигнала многократно уменьшаются вычислительные затраты, память данных и коэффициентов на последующем этапе – этапе формирования РЛИ в режиме переднего и передне-бокового обзора.

С целью адаптации параметров блока предварительной обработки к траекторным нестабильностям, обусловленным изменением параметров движения носителя бортового радиолокационного комплекса (БРЛК) и различных возмущающих воздействий, в последующих работах [5,6,7] были проведены разработка и исследование методов и алгоритмов адаптивной многоскоростной обработки траекторного сигнала в задачах радиовидения.

В настоящей работе, отражающей результаты последующих исследований, основное внимание акцентируется на способах построения структуры адаптивного цифрового приемника траекторного сигнала в режиме панорамного обзора [2,6,7]. Рассматриваются новые способы и алгоритмы многоступенчатой адаптации на основе многоскоростной обработки, позволяющие повысить точность настройки параметров адаптивного цифрового приемника и уменьшить вычислительные затраты на его реализацию.

Задача построения структуры адаптивного цифрового приемника траекторного сигнала в режиме панорамного обзора

С целью значительного уменьшения времени формирования РЛИ в [2] рекомендуется использовать режим панорамного обзора,

Представлены способы построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала в режиме панорамного обзора земной поверхности и алгоритмы адаптации банка полосовых фильтров-дециматоров к уходу и трансформации доплеровских частот принимаемого сигнала. Рассмотрены два подхода к построению схем адаптивной обработки широкополосного траекторного сигнала. Предложены новые алгоритмы адаптации на основе многоступенчатой многоскоростной обработки.

отличающийся от секторного обзора расширением диаграммы направленности антенны (ДНА) в азимутальном направлении и, как следствие, увеличением ширины полосы частот принимаемого траекторного сигнала. Как показал анализ спектральной структуры траекторного сигнала [2], для обеспечения равного азимутального разрешения по всем направлениям обзора и формирования РЛИ требуется неравномерное спектральное разрешение, в значительной степени возрастающее при переднем обзоре. Для реализации неравномерной частотной селекции азимутальных каналов было предложено использовать набор (банк) цифровых полосовых фильтров-дециматоров предварительной обработки широкополосного траекторного сигнала, «имитирующего» пространственно-частотное разделение азимутальных каналов, характерное для секторного обзора.

Общая структурная схема цифрового приемника траекторного сигнала в режиме панорамного обзора приведена на рис.1. 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 $2\omega_c, j = \overline{1, M}$, и блока 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, а, следовательно, возрастает коэффициент децимации V_j .

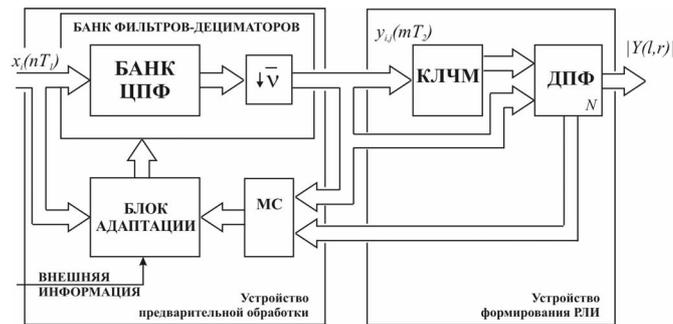


Рис. 1. Структурная схема цифрового приемника траекторного сигнала в режиме панорамного обзора

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 $y_{i,j}(mT_{2j})$, $j = \overline{1, M}$, $i = \overline{1, K}$, путем прямого вычисления ДПФ (в режиме «ДОЛ») или с использованием предварительной компенсации ЛЧМ (в режиме «ФСА») и оценки модуля элементов матрицы вычисленных коэффициентов Фурье $|Y(i, j)|$, синтезирует текущий кадр изображения.

В работе [7] рассмотрены два подхода к решению задачи предварительной обработки траекторного сигнала с помощью набора полосовых фильтров-дециматоров. Первый предполагает, что ширина полосы частот траекторного сигнала на выходе 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 пирамидальной структуры набора из M полосовых фильтров-дециматоров с заданными параметрами и свойствами частотной избирательности. При этом, с учетом возможного расширения полосы частот и некомпенсированного блоком адаптации ухода доплеровских частот, следует увеличить коэффициент перекрытия соседних частотных каналов как минимум в два раза, 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.

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. По результатам спектрального оценивания решающее устройство блока адаптации производит оценку возможного ухода полосы частот траекторного

сигнала, используя один из алгоритмов автофокусировки, а блок перестройки параметров вносит соответствующую коррекцию центральных частот набора полосовых фильтров-дециматоров.

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

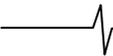
В свою очередь, как показано в [6], автофокусировка в частотной области может быть осуществлена одним из двух способов. В первом случае производится оценка ухода и трансформации полосы частот всего траекторного сигнала, как единого целого, по характерным перепадам спектра, например, по смещению верхней и нижней границ полосы частот (рис. 2).

Альтернативный способ предполагает, что адаптация выполняется независимо в каждом азимутальном канале, для полосы частот каждой составляющей на выходе набора полосовых фильтров-дециматоров. Первый подход проще в реализации и с позиции вычислительных затрат. Второй является более точным и универсальным, но требует существенного увеличения вычислительной нагрузки. В любом случае, в основе самой адаптации лежат методы оценки максимума мощности и корреляции в частотной области.

Ниже рассматривается дальнейшее развитие описанных способов построения блока адаптации на основе многоступенчатой многоскоростной обработки широкополосного траекторного сигнала.

Способ многоступенчатой адаптации по верхней границе полосы частот траекторного сигнала

Рассмотренные выше алгоритмы адаптации к спектральной структуре широкополосного траекторного сигнала строились исходя из предположения, что по оценке смещения границ его полосы частот с помощью набора узкополосных фильтров или корреляционной обработки текущего и эталонного дискретных спектров в каждом субполосном канале можно перестроить всю систему частотно-временной обработки траекторного сигнала и последующего формирования РЛИ. В том и другом случаях адаптация велась одноступенчато, по окончательным результатам обработки на выходах полосовых



фильтров-дециматоров, что «затягивает» процесс адаптации и неприемлемо с позиции требуемых динамических характеристик. В тоже время для узкополосных субполосных каналов «верхних» частот необходимо повышенное частотное разрешение, что требует значительного увеличения интервала преобразования и точности оценки смещения доплеровских частот. Поэтому

целесообразно перейти к многоступенчатой адаптации, т.е. при использовании квазиоптимальной комбинированной структуры набора ЦФФ оценку смещения и трансформацию спектра траекторного сигнала проводить поэтапно, от ступени к ступени, постепенно увеличивая точность оценок для более узкополосных субполосных каналов верхних частот.

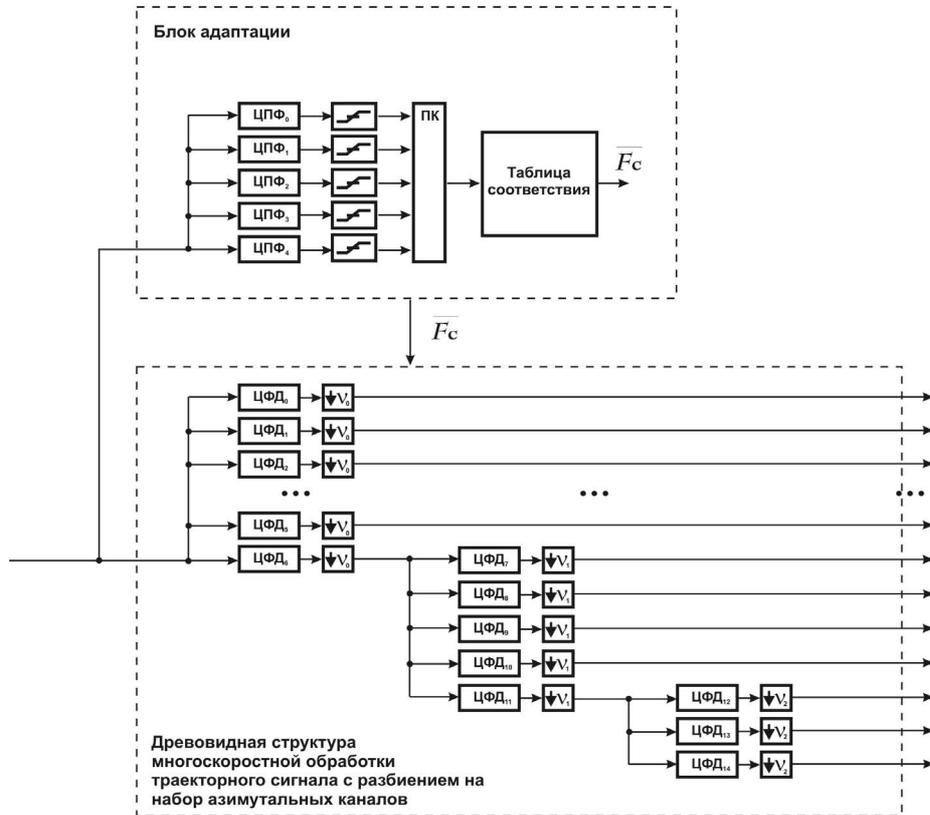


Рис. 2. Схема построения набора фильтров-дециматоров с адаптацией по всей полосе частот

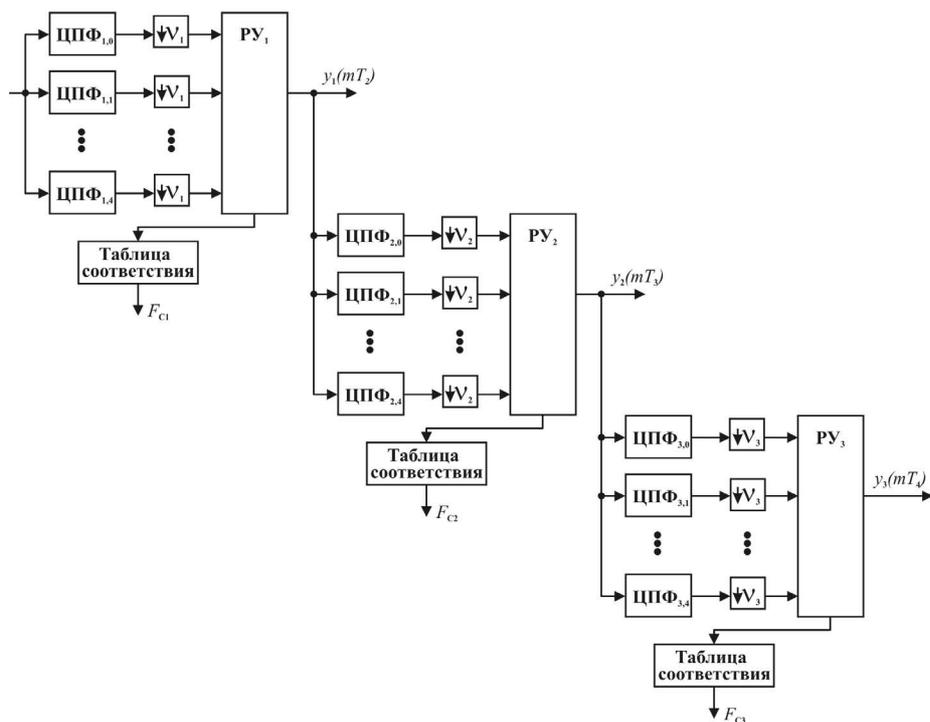


Рис. 3. Способ адаптации с многоступенчатой оценкой смещения полосы частот траекторного сигнала по ее верхней границе

На рис. 3 представлена схема построения блока адаптации с многоступенчатой оценкой смещения полосы частот траекторного сигнала по ее верхней границе. В отличие от схемы построения блока адаптации, представленной ранее [6,7], адаптация, как собственно и сама фильтрация, выполняются поэтапно. На первой ступени преобразования отслеживается общий уход полосы частот траекторного сигнала с точностью, определяемой шириной полосы частот входных ЦПФ. Эта «грубая» оценка F_{C_1} позволяет вести перестройку всей системы при быстрых высоко динамичных уходах полосы частот. Для повышения точности оценки смещения границ, в первую очередь на высокочастотных каналах, можно воспользоваться набором более узкополосных ЦПФ $_{ij}$ каждой i -ой последующей ступени преобразования. В свою очередь, более точные оценки F_{C_2} и F_{C_3} ухода полосы частот, полученные на последующих ступенях преобразования, могут использоваться для всех субполосных каналов при вычислении амплитудного спектра и формировании РЛИ.

Заметим, что каждый последующий набор перестраиваемых ЦПФ работает на пониженной частоте дискретизации (в V_1 раз – для 2-й ступени и в V_1V_2 - для 3-й ступени), что многократно уменьшает общие вычислительные затраты и память данных на их реализацию. Поэтому для более точной оценки ухода полосы частот траекторного сигнала можно увеличивать число полосовых фильтров от ступени к ступени, при незначительном повышении общих затрат.

Способ многоступенчатой адаптации на основе квазиоптимальной комбинированной структуры набора фильтров-дециматоров

В отличие от выше рассмотренного способа адаптации предполагается, что процесс адаптации совмещается с реализацией набора ЦПФ и, с целью оценки смещения полосы частот траекторного сигнала, в блоке оценки подвергается ДПФ с использованием алгоритма БПФ (рис. 4). Полученный Фурье-образ сравнивается с эталонным (вычисленным на предыдущем кадре обработки), и по оценке смещения нового Фурье-образа по отношению к эталонному, усредненному по всем субполосным каналам, входящим в первую ступень преобразования, принимается решение о величине ухода доплеровских частот F_{C_1} траекторного сигнала. В соответствии с этим перестраиваются по центральной частоте цифровые фильтры-дециматоры (ЦФД) не только первой, но и всех последующих ступеней преобразования. Причем, последний из набора ЦФД первой ступени фактически не участвует в процедуре оценки смещения, так как его задача – предварительное понижение частоты дискретизации на входах ЦФД второй и последующих ступеней преобразования. Вместе с тем, приблизительно равный уход всех частот широкополосного траекторного сигнала, включая и самые высокие частоты, требует пропорциональной перестройки центральных частот всех ЦФД первой ступени преобразования.

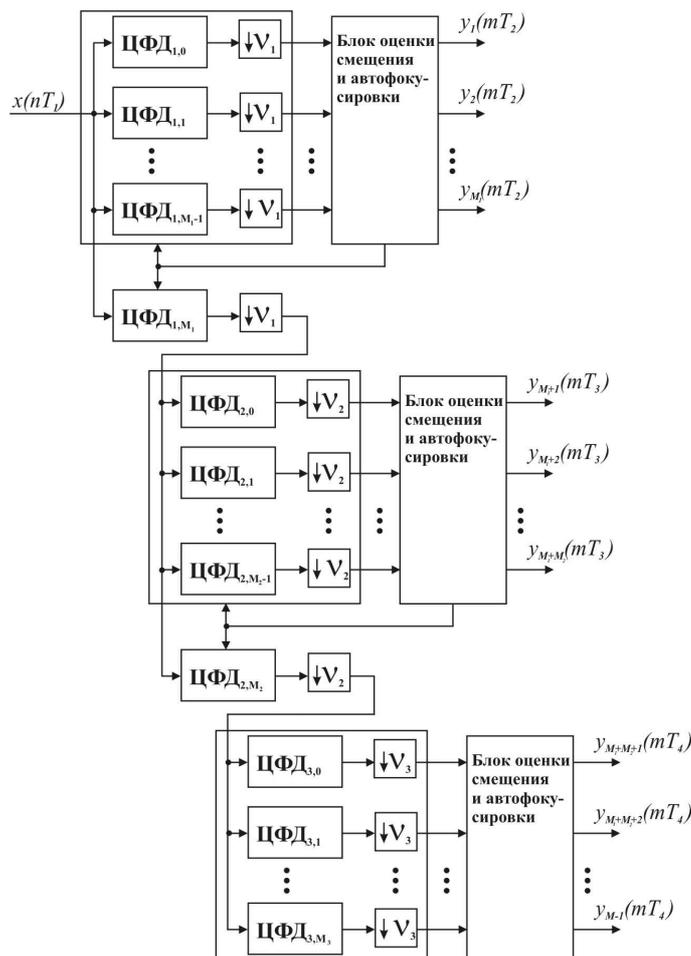


Рис. 4. Способ многоступенчатой адаптации на основе квазиоптимальной комбинированной структуры набора фильтров-дециматоров



На второй ступени преобразования аналогичную функцию выполняют вторая группа ЦФД, работающих на пониженной в V_1 раз частоте дискретизации, и процессор БПФ на выходе каждого субполосного канала. Поскольку интервал преобразования увеличивается в V_1 раз, во столько же раз увеличивается спектральное разрешение, а, следовательно, пропорционально возрастает и точность оценки смещения доплеровских частот, в основе определения которой лежит вычисление взаимной корреляции текущего и эталонного спектров. Заметим, что увеличение разрешающей способности по частоте и точности оценки смещения спектра траекторного сигнала на более высоких частотах является обязательным условием, если требуется равное пространственное разрешение по всем азимутальным направлениям в выбранном секторе передне-бокового обзора.

И, наконец, на третьей ступени преобразования, для самых высоких частотных составляющих, автоматическая фокусировка радиоизображения выполняется путем двухэтапной процедуры «грубой» настройки с использованием ЦФД первой и второй ступеней и более «точной» настройки, на основе собственной оценки смещения полосы частот траекторного сигнала.

Заключение

Таким образом, предложены два способа многоступенчатой адаптации на основе многоскоростной обработки широкополосного траекторного сигнала и алгоритмы их реализации с использованием набора перестраиваемых полосовых фильтров-дециматоров, позволяющие уменьшить вычислительные затраты, увеличить точность настройки системы и ускорить процесс адаптации. Первый способ предполагает многоступенчатую оценку смещения полосы частот траекторного сигнала по ее верхней границе, а второй – многоступенчатую адаптацию на основе комбинированной структуры набора фильтров-дециматоров и алгоритмов фильтрации в частотной области.

Ускорение процесса адаптации обусловлено тем, что настройка фильтров-дециматоров выполняется поэтапно, от ступени к ступени, не дожидаясь окончательного результата обработки на их выходах (т.е. в переходном процессе). Фактически фильтры-дециматоры реализуются как фильтры с растущей памятью. Последнее позволяет последовательно увеличивать точность оценок параметров адаптивной системы для более узкополосных субполосных каналов, используя «грубые» оценки смещения доплеровских частот предыдущих ступеней преобразования. Уменьшение приведенных вычислительных затрат связано с эффектом децимации, т.е. уменьшением частоты дискретизации и, соответственно, скорости входного потока данных на каждой последующей ступени преобразования и настройки адаптивной системы.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие \ Под ре. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Витязев В.В., Колодыко Г.Н., Витязев С.В. Способы и алгоритмы формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского обужения луча \ Цифровая обработка сигналов, 2006, № 3, с. 31-41.
3. Витязев В.В., Колодыко Г.Н., Воронков Д.В. Формирование радиолокационного изображения в режиме фокусируемого синтезирования апертуры ДНА \ Цифровая обработка сигналов, 2006, № 4, с. 34-40.
4. Витязев В.В., Колодыко Г.Н., Витязев С.В. Селекция наземных движущихся целей на основе многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала \ Цифровая обработка сигналов, 2007, № 1, с. 41-50.
5. 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.
6. Андреев Н.А., Витязев С.В., Витязев В.В. Алгоритмы адаптивной многоскоростной обработки широкополосного траекторного сигнала \ Труды 12-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2010», Москва, ИПУ РАН, Т.1.
7. Андреев Н.А., Витязев С.В., Витязев В.В. Методы и алгоритмы адаптивной многоскоростной обработки траекторного сигнала в задачах радиовидения \ Цифровая обработка сигналов, 2010, № 1, с. 33-40.

ADAPTIVE DIGITAL RECEIVER BUILDING TECHNIQUES FOR RADAR IMAGING SYSTEM WITH PANORAMIC VIEW MODE

Andreev N.A.

A panoramic view mode of radar imaging system functionality is considered. The techniques of designing a structure of a receiver are offered. These techniques assume using of adaptive bandpass filter-decimator banks, which are adaptable to Doppler frequencies offset and transformation in a receiving signal. Two methods of designing an adaptive wideband processing structure are considered. New algorithms of adaptation based on multistage multirate signal processing are offered.

Keywords: radar imaging; multirate adaptive processing; Doppler; frequency; method; algorithm; filter.