

- УДК 621.396.96

## СЕЛЕКЦИЯ НАЗЕМНЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МНОГОСКОРОСТНОЙ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА

*Витязев В.В., Колодько Г.Н., Витязев С.В.*

### Введение

Под режимом селекции наземных движущихся целей (НДЦ) обычно понимают обнаружение и оценивание параметров траекторного сигнала, отраженного от движущихся объектов (целей) путем подавления сигналов от неподвижных объектов и фона местности.

В режиме селекции НДЦ решаются следующие задачи [1]:

- 1) обнаружение только движущихся объектов при подавлении сигналов от всех других объектов и фона местности;
- 2) обнаружение только движущихся объектов с измерением их координат (дальность-азимут) и радиальных скоростей;
- 3) обнаружение только движущихся объектов с измерением их координат и векторов скорости (радиальной и тангенциальной составляющих);
- 4) обнаружение одновременно движущихся и неподвижных объектов с измерением их координат и векторов скорости с индикацией на фоне радиолокационного изображения (РЛИ) земной поверхности.

Решение поставленных задач с позиции теории оптимального приема и синтеза оптимальных алгоритмов селекции НДЦ требует реализации многоканальной пространственно-частотно-временной обработки сигналов и знания статистических свойств траекторного сигнала и помех [2-6]. При этом обычно пространственная обработка обеспечивает подавление мешающих отражений от земной поверхности и неподвижных объектов путем формирования провалов диаграммы направленности антенны (ДНА) в направлении на источники помех. Последующая частотно-временная обработка с использованием методов и алгоритмов доплеровской фильтрации разделяет спектры сигналов движущихся целей и мешающих отражений на фоне шумов. Селекция НДЦ путем доплеровской фильтрации является самым распространенным способом решения задач обнаружения движущихся объектов и в сочетании с моноимпульсной антенной системой позволяет их надежно выделять и устанавливать отметки на РЛИ в истинное положение по азимуту [1].

Говоря об исключительной важности режима селекции НДЦ, следует отметить, что в данном режиме (в силу высокой чувствительности системы обнаружения к изменению параметров составляющей траекторного сигнала, формируемого движущимся объектом) удастся обнаруживать цели, размеры которых могут быть значительно меньше разрешающей спо-

*Рассматриваются проблемы селекции наземных движущихся целей (НДЦ) в задачах радиовидения. На основе принятой модели траекторного сигнала от движущихся целей на фоне подстилающей земной поверхности строятся алгоритмы и структура цифрового приемника в режиме НДЦ. Показано, что использование адаптивной многоскоростной обработки траекторного сигнала является эффективным инструментом решения поставленных задач. Формулируются задачи дальнейших исследований.*

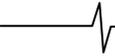
собности БРЛК, работающего в режиме картографирования земной поверхности.

Вместе с тем, требуемые технические характеристики БРЛК в режиме картографирования входят в противоречие с требованиями режима селекции НДЦ. Это связано с тем, что в режиме картографирования земной поверхности используют низкую частоту повторения зондирующих импульсов (как правило, не более 1 кГц) для обеспечения заданной дальности обзора. В то время как режим селекции НДЦ требует значительного повышения частоты повторения зондирующих импульсов для расширения диапазона измерения скоростей движущихся объектов. Поэтому данные режимы работы БРЛК следует чередовать [5].

Ниже рассматриваются основные проблемы селекции НДЦ и методы их решения путем доплеровской фильтрации с использованием многоскоростной частотно-временной и адаптивной обработки траекторного сигнала.

### Математическая модель траекторного сигнала в режиме селекции НДЦ

Предполагается, как и ранее [7], что РЛИ формируется как совокупность точечных объектов определенной яркости. Каждому  $i$ -му точечному объекту ставится в соответствие отраженный от объекта радиосигнал, который несет в себе информацию о целой совокупности отражателей, попадающих в зону его пространственного разрешения. Новым является предположение о возможном движении  $M$  точечных объектов (целей) в направлениях  $\alpha_i$  по отношению к направлению движения носителя БРЛК с неизвестными скоростями  $V_{цi}$  и ускорениями  $a_{цi}$ ,  $i = 1, M$ . При этом, если размеры цели не выходят за элемент пространственного разрешения, то движение всех  $M$  точечных объектов выполняется не зависимо друг от друга. В противном случае, может наблюдаться полная корреляционная зависимость между точечными объектами, принадлежащими одной цели.



В дальнейшем будем рассматривать ситуацию, когда каждая  $i$ -я цель – это отдельный точечный объект с независимыми параметрами движения, а число целей равно  $M$ . Тогда принимаемый БРЛК траекторный сигнал можно представить в виде:

$$s(t) = \sum_{i=1}^M s_{ui}(t) + s_{\phi}(t) + p(t), \quad (1)$$

где  $s_{ui}(t)$  – составляющая траекторного сигнала от  $i$ -й цели,  $s_{\phi}(t)$  – фоновая составляющая отражений от земной поверхности и неподвижных объектов,  $p(t)$  – комплексный шум от внешних и внутренних источников.

Для  $i$ -й точечной цели принимаемый сигнал  $s_{ui}(t)$  связан с полярными координатами и параметрами движения носителя БРЛК выражением вида:

$$s_{ui}(t) = U_i G(t) \exp \left\{ -j \left[ \frac{4\pi}{\lambda} r_i(t) - \varphi_{0i} \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $U_i$ ,  $\varphi_{0i}$  – случайные амплитуда и начальная фаза сигнала;  $\lambda$  – длина волны;  $G(t)$  – нормированная функция, характеризующая модуляцию сигнала ДНА;  $r_i(t)$  – текущее расстояние от носителя БРЛК до объекта.

Пусть в момент  $t = 0$  координаты  $i$ -ой цели относительно БРЛК принимают значения  $(X_{ni}, Y_{ni})$ . Носитель БРЛК движется в горизонтальном направлении со скоростью  $V$ , а  $i$ -я цель в противоположном направлении под углом  $\alpha_i$  (Рис.1.) со скоростью  $V_{ui}^t$ . Текущее расстояние  $r_i(t)$  между носителем БРЛК и  $i$ -й целью меняется с течением времени в общем случае по нелинейной зависимости вида

$$r_i(t) = \sqrt{[X_{ni} - (V + V_{ui}^t)t]^2 + [Y_{ni} - V_{ui}^{\perp}t]^2}, \quad (3)$$

где  $V_{ui}^t$ ,  $V_{ui}^{\perp}$  – проекции скорости цели по направлению движения носителя БРЛК и перпендикулярному к нему направлению.

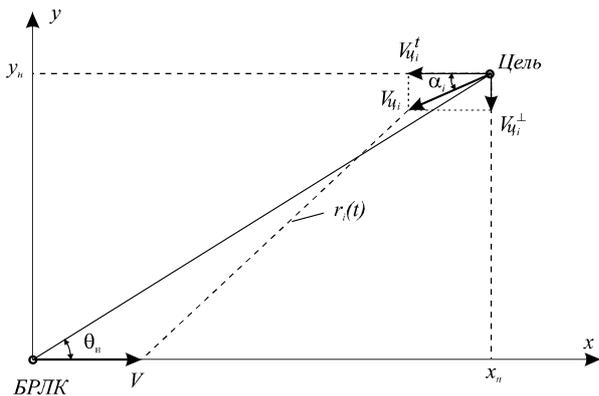


Рис. 1. Система координат при определении текущего расстояния от движущейся цели.

Используя разложение нелинейной зависимости (3) в ряд Тейлора и ограничиваясь на концах интервала обработки  $T_c$  первой и второй производными (при постоянных значениях параметров движения), получим:

$$r_i(t) = R_{ni} - [V \cos \theta_{ni} t + (V_{ui}^t \cos \theta_{ni} + V_{ui}^{\perp} \sin \theta_{ni}) t] + \frac{[(V + V_{ui}^t) \sin \theta_{ni} - V_{ui}^{\perp} \cos \theta_{ni}]^2}{2R_{ni}} t^2 + \dots \quad (4)$$

Заметим, что если  $i$ -я цель неподвижна, то  $V_{ui}^t = V_{ui}^{\perp} = 0$ , и выражение (4) принимает форму

$$r_i(t) = R_{ni} - V \cos \theta_{ni} t + \frac{V^2 \sin^2 \theta_{ni}}{2R_{ni}} t^2 + \dots,$$

используемую в режиме картографирования земной поверхности. Более того, если вместо горизонтальной и вертикальной проекций  $V_{ui}^t$  и  $V_{ui}^{\perp}$  вектора скорости цели  $V_{ui}$  воспользоваться радиальной  $V_{ui}^R$  и перпендикулярной к ней  $V_{ui}^{R\perp}$  составляющими, то выражение (4) примет следующий вид:

$$r_i(t) = R_{ni} - V \cos \theta_{ni} t - V_{ui}^R t + \frac{(V \sin \theta_{ni} + V_{ui}^{R\perp})^2}{2R_{ni}} t^2 + \dots \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что если в момент времени  $t = 0$   $i$ -я цель движется строго в направлении на носитель БРЛК и  $V_{ui}^{R\perp} = 0$ , то

$$r_i(t) = R_{ni} - (V \cos \theta_{ni} + V_{ui}^R) t + \frac{V^2 \sin^2 \theta_{ni}}{2R_{ni}} t^2 + \dots \quad (6)$$

и обнаружение  $i$ -й цели выполняется только по радиальной составляющей. С другой стороны, если  $i$ -я цель движется параллельно носителю БРЛК, то в режиме бокового обзора (когда  $\theta_{ni} = 90^\circ$ ), решающую роль играет тангенциальная составляющая  $V_{ui}^t = V_{ui}^{R\perp}$ .

Подставив (5) в аргумент функции (2) и отбросив все составляющие выше квадратичной, получим, что фаза траекторного сигнала  $i$ -й цели изменяется по закону:

$$\varphi_i(t) = \frac{4\pi}{\lambda} (V \cos \theta_{ni} + V_{ui}^R) t - \frac{2\pi}{\lambda R_{ni}} (V \sin \theta_{ni} + V_{ui}^{R\perp})^2 t^2 + \varphi_{n0i}, \quad (7)$$

где  $\varphi_{n0i} = \varphi_{0i} - \frac{4\pi}{\lambda} R_{ni}$  – начальная фаза.

При этом доплеровская частота принимает вид:

$$F_{ui}(t) = \frac{2(V \cos \theta_{ni} + V_{ui}^R)}{\lambda} - \frac{2(V \sin \theta_{ni} + V_{ui}^{R\perp})^2}{\lambda R_{ni}} t \quad (8)$$

**Примечание:** В выражениях (7) и (8) предполагается, что  $i$ -я цель движется навстречу носителю БРЛК, в противном случае – знаки перед составляющими вектора скорости  $V_{ui}$  меняются на противоположные.

Первый член выражения (8) определяет среднюю доплеровскую частоту, а второй член – ее линейный уход, обусловленный как движением носителя БРЛК, так и движением цели. Следовательно, возникает неоднозначность в принятии решения и оценке координат и параметров движения цели только по изменению значения доплеровской частоты. Вместе с тем, именно анализ траекторий доплеровских частот лежит в основе большинства методов и алгоритмов решения задачи селекции НДЦ.

## Проблемы селекции НДЦ. Постановка задачи исследований

При решении задач селекции НДЦ мы сталкиваемся прежде всего с теми же проблемами, которые характерны для радиолокации объектов в целом, как неподвижных, так и подвижных. Это противоречивость требований максимальной дальности обнаружения НДЦ, что достигается уменьшением частоты повторения зондирующих импульсов, и одновременно высокой разрешающей способностью в широком диапазоне скоростей и ускорений движущихся объектов, что требует соответствующего увеличения частоты повторения зондирующих импульсов. Как было отмечено ранее, на примере решения задачи картографирования земной поверхности, для принятых значений параметров движения носителя БРЛК дальность до 300 км обеспечивается при частоте повторения не более 500 Гц. В то же время, при радиальной скорости НДЦ от 1 м/с до 30 м/с (3,6 км/час – 100 км/час) доплеровская частота цели  $F_{ц}$  уходит от положения, соответствующего неподвижному объекту с теми же азимутальными координатами, на величину от 66 Гц до 2000 Гц. Поэтому даже при настройке центра ДНА на азимут НДЦ уход доплеровской частоты может значительно превышать 500 Гц. При этом методы пространственно-частотной селекции путем азимутального сканирования узкополосной ДНА в режиме секторного обзора не всегда дают положительный результат. Абсолютный уход доплеровской частоты НДЦ, вызванный ее движением, не зависит от азимутального положения. Таким образом, расширение диапазона обнаружения НДЦ по дальности достигается либо сканированием узкополосной ДНА по углу места, либо использованием зондирующих сигналов специального вида, например, многочастотных. В дальнейшем будем предполагать, что частота повторения зондирующих импульсов выбирается только из заданного диапазона изменения скорости и ускорения движущихся объектов, (и соответственно диапазона доплеровских частот), ширины ДНА (в режиме секторного обзора) и расстояния до сектора обзора.

Противоречивость требований максимальной достоверности принятия решения об обнаружении НДЦ и точности измерения его параметров, с одной стороны, и минимизации времени наблюдения и обработки данных траекторного сигнала, с другой стороны, остается основной проблемой селекции НДЦ, но приобретает при этом новую «окраску».

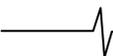
Весь комплекс вновь возникших проблем можно свести к следующим позициям:

1. Обнаружение медленно движущихся наземных целей на фоне подстилающей земной поверхности.
2. Обнаружение и измерение параметров движения маневрирующих НДЦ в широком диапазоне доплеровских частот при малых отношениях сигнал/шум.
3. Определение истинных азимутальных координат НДЦ и коррекция их положения на фоне подстилающей земной поверхности.
4. Автосопровождение маневрирующих НДЦ.
5. Пространственно-частотно-временная селекция НДЦ, близко расположенных по угловым координатам и параметрам движения.

При использовании однолучевой узкополосной по азимуту ДНА, например шириной 2 градуса, обнаружение НДЦ в секторе обзора выполняется при условии, что уход доплеровской частоты, обусловленный движением цели, приводит к ее выходу за границы полосы доплеровских частот траекторного сигнала, формируемого отражениями от неподвижных объектов и земной поверхности. Однако, если скорость НДЦ менее 6 м/с (20 км/час), то  $\Delta F_{ц} < 400 \text{ Гц}$  (для принятых ранее параметров движения носителя БРЛК), т.е. уход доплеровской частоты НДЦ соизмерим с шириной полосы доплеровских частот от подстилающей земной поверхности во всем диапазоне секторного обзора до  $\pm 60^\circ$ . Поэтому и встает проблема обнаружения медленно движущихся целей на земной поверхности, которая может быть решена либо дальнейшим обужением однолучевой ДНА, либо использованием других способов построения системы селекции НДЦ, например, многоантенной системой с остановленным фазовым центром или на основе селекции целей по тангенциальной составляющей скорости НДЦ [1]. Вместе с тем, и в рамках доплеровской фильтрации путем адаптивной частотно-временной обработки траекторного сигнала возможно расширение диапазона и увеличение достоверности обнаружения медленно движущихся наземных целей, что является одной из задач настоящего исследования и разработки.

С другой стороны, быстрое маневрирование цели приводит к значительным изменениям радиальной составляющей ее скорости движения и, как следствие, динамичному изменению доплеровской частоты. Если измерение доплеровской частоты ведется на интервале 1 с (при передне-боковом обзоре режима ДОЛ), то за это время доплеровская частота цели уходит на 66,7 Гц при радиальном ускорении  $a = 1 \text{ м/с}^2$  и на 667 Гц – при  $a = 10 \text{ м/с}^2$ . Значит, требуется механизм «раннего» обнаружения НДЦ, их захвата по доплеровской частоте и дальнейшего сопровождения. Однако недостаточное соотношение сигнал/шум на коротких интервалах измерения не гарантирует своевременный захват цели. Поэтому необходимы новые методы и алгоритмы обнаружения движущихся объектов в условиях малых соотношений сигнал/шум и относительно быстрого маневрирования НДЦ.

В соответствии с выражением (8), постоянная составляющая текущего значения доплеровской частоты цели  $F_{цi}(t)$  обусловлена, с одной стороны, ее азимутальным положением  $\theta_{ni}$ , а с другой стороны - радиальной составляющей скорости движения  $V_{цi}^R$ . Поэтому, если не учесть вторую постоянную составляющую, то это приведет к ложному азимутальному положению цели на РЛИ. Разрешение этого противоречия – одна из основных проблем селекции НДЦ путем доплеровской фильтрации. Один из подходов к решению проблемы коррекции азимутального положения НДЦ ориентирован на использование моноимпульсной антенной системы [1-5]. При этом синтезирование апертуры в суммарном канале обеспечивает одновременно формирование РЛИ земной поверхности, обнаружение и измерение доплеровских частот целей, а разностный канал – измерение азимутальных углов обнаруженных целей. Полученные оценки радиальной скорости и угловых координат позволяют селектировать движущиеся цели и устанавливать их отметки на РЛИ в истинное азимутальное положение.



Автосопровождение маневрирующих НДЦ является самостоятельной задачей, имеющей важное значение как с позиции требования постоянного слежения за выделенной целью, так и с позиции повышения разрешающей способности системы и достоверности обнаружения движущихся объектов. Захват и автосопровождение обнаруженных НДЦ способствует также более быстрому и надежному обнаружению новых НДЦ, так как прием последних будет вестись на фоне помех с априорно известными свойствами, а значит эффективно режектурируемых. Важным свойством режима автосопровождения является также возможность слежения за объектами в случае кратковременного пропадания информации об их положении и параметрах движения.

В случае близкого расположения НДЦ как по азимутальному положению, так и по радиальной скорости движения, остро встает вопрос о повышении частотного разрешения на относительно коротких временных интервалах. Эта проблема решается современными методами спектрального сверхразрешения на основе пространственно-частотно-временной селекции сигналов и алгоритмов параметрического оценивания [8].

#### Алгоритмы селекции НДЦ на основе пространственно-частотной обработки траекторного сигнала, доплеровской фильтрации и спектрального оценивания

Пространственно-частотная селекция НДЦ выполняется путем формирования узкой ДНА и ее сканирования или ориентации на азимутальное направление движущейся цели. Обнаружение НДЦ на фоне неподвижных объектов и подстилающей земной поверхности достигается при выходе доплеровской частоты цели за границы полосы частот траекторного сигнала, формирующего РЛИ земной поверхности (представляющего в данном случае мощную помеху).

Общую структуру устройства обнаружения и измерения параметров движущихся объектов путем секторного обзора и доплеровской фильтрации можно представить в виде последовательного соединения трех функцио-

нальных блоков (рис. 2): адаптивного режекторного фильтра (АРФ), подавляющего помеху от неподвижных объектов и земной поверхности, процессора дискретного преобразования Фурье (ДПФ) на  $N$  частотных каналах, разделяющего доплеровские частоты от НДЦ, движущихся с различной скоростью, и решающего устройства, выполняющего функцию собственно обнаружителя и измерителя параметров движения целей.

Как отмечалось ранее, основная проблема классической фильтрации НДЦ заключается в плохой селекции малоподвижных целей на фоне подстилающей земной поверхности, и главную роль здесь играет АРФ, параметры которого должны подстраиваться таким образом, чтобы максимально исключить паразитное влияние фона. Простейшим решением является обычный высокочастотный фильтр с перестраиваемой полосой режекции. Чем уже ширина спектра фона, что наблюдается при положении центра ДНА близком к направлению движения носителя БРЛК (передней обзор), тем уже должна быть полоса режекции. И, наоборот, при боковом обзоре полоса режекции максимально расширяется, что в значительной степени затрудняет обнаружение НДЦ по радиальной составляющей скорости их движения.

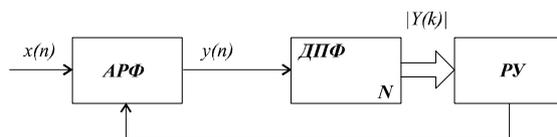


Рис. 2. Структурная схема устройства обнаружения и измерения параметров НДЦ.

В таблице 1 приведены расчетные данные, иллюстрирующие диапазон изменения минимальной радиальной скорости, обнаруживаемой НДЦ для различных азимутальных положений ДНА  $\theta_{нк}^\circ$ . Предполагается, что скорость носителя БРЛК  $V = 200$  м/с, длина волны  $\lambda = 0,03$  м, центр ДНА шириной  $2^\circ$  в начальный момент совмещен с истинным азимутальным положением НДЦ (если  $V_y^R = 0$ , то  $\beta_y = \theta_n$ ).

Таблица 1.

$k$	$\theta_{нк}^\circ$	$\Delta F_{\text{ок}}, \text{Гц}$	$V_{\text{л min}}^R, \text{м/с}$	$T_{\text{O min}}, \text{с}$	$k$	$\theta_{нк}^\circ$	$\Delta F_{\text{ок}}, \text{Гц}$	$V_{\text{л min}}^R, \text{м/с}$	$T_{\text{O min}}, \text{с}$
1	3	24,36	0,183	0,328	16	33	253,47	1,9	0,032
2	5	40,56	0,304	0,197	17	35	266,94	2,0	0,03
3	7	56,72	0,425	0,141	18	37	280,08	2,1	0,029
4	9	72,8	0,546	0,11	19	39	292,88	2,196	0,027
5	11	88,8	0,666	0,09	20	41	305,33	2,29	0,026
6	13	104,69	0,785	0,076	21	43	317,4	2,38	0,025
7	15	120,45	0,903	0,066	22	45	329,09	2,47	0,024
8	17	136,07	1,02	0,059	23	47	340,37	2,553	0,023
9	19	151,52	1,14	0,053	24	49	351,24	2,634	0,023
10	21	166,78	1,25	0,048	25	51	361,68	2,713	0,022
11	23	181,85	1,363	0,044	26	53	371,68	2,788	0,021
12	25	196,69	1,475	0,041	27	55	381,23	2,86	0,021
13	27	211,29	1,584	0,038	28	57	390,32	2,927	0,021
14	29	225,63	1,692	0,035	29	59	398,92	2,992	0,02
15	31	239,7	1,798	0,033					

Заметим, что приведенные в таблице 1 данные ориентированы только на положение НДЦ по центру ДНА и отражают среднее значение скорости. При азимутальном положении НДЦ на краях минимальная скорость обнаружения цели может меняться теоретически от нулевой до удвоенного значения. Минимальное время обнаружения  $T_{O\min}$  определялось эффективной шириной полосы режекции с подавлением до 80 дБс. Отметим, что время обнаружения НДЦ соизмеримо (не превышает) с временем синтезирования РЛИ в режиме ДОЛ [7].

Приведенная выше оценка минимального времени обнаружения НДЦ определяется фактически временем реакции режекторного фильтра на входное воздействие (эффективной длиной его импульсной характеристики). Заметим, что при сужении полосы режекции АРФ (при переднем обзоре) и, соответственно, расширении диапазона обнаруживаемых целей в сторону все меньших радиальных скоростей, пропорционально растет время обнаружения  $T_{O\min}$  (в 16 раз по отношению к боковому обзору, под углом  $60^\circ$ ). Поэтому эффективное обнаружение малоподвижных целей возможно только при условии, что на всем интервале обнаружения/измерения объект продолжает свое движение с постоянной радиальной скоростью (по крайней мере без «замираний»). При маневрировании цели, например, с максимальным радиальным ускорением  $a_y = 10 \text{ м/с}^2$  на интервале обнаружения равном 0,1 с доплеровская частота может уйти на 66,7 Гц (для принятых ранее параметров движения носителя БРЛК). А это означает, что за время обнаружения объект, находящийся вблизи границы доплеровских частот НДЦ, может попасть в «тень» полосы доплеровских частот от земной поверхности. Вместе с тем, подобный уход доплеровских частот НДЦ в полосу частот выше 100 Гц (когда радиальная скорость  $V_y^R \geq 5,4 \text{ км/час}$ ) не приводит к каким-либо потерям с позиции гарантированного обнаружения движущихся объектов. Следовательно, необходимо компромиссное решение между требованием высокой режекции, с одной стороны, и максимальной по длительности реакцией фильтра, с другой стороны. В дальнейшем, предполагается, что эффективная длительность импульсной характеристики АРФ соизмерима с интервалом последующего измерения доплеровских частот с помощью  $N$ -точечного процессора ДПФ, который определяет требуемую разрешающую способность по

частоте и, соответственно, достижимую точность измерения радиальной скорости НДЦ.

Эффективная реализация узкополосного перестраиваемого АРФ в общей структуре цифрового приемника траекторного сигнала является отдельной задачей, требующей неординарного подхода к ее решению с позиции достижимых характеристик частотной избирательности с учетом минимизации вычислительных затрат. Представляется, что в основе синтеза структуры узкополосного АРФ должно лежать сочетание адаптивной и многоскоростной обработки сигналов [9,10]. На рис. 3 дан пример реализации узкополосного режекторного фильтра с элементами децимации и интерполяции траекторного сигнала. Задержка сигнала  $x(n)$  по верхней цепи на  $N/2$  периодов дискретизации обусловлена эквивалентной задержкой, которую вносит последовательное соединение фильтров НЧФ<sub>1</sub> и НЧФ<sub>2</sub> в нижней цепи. Предполагается, что синтез структуры режекторного фильтра ведется в классе КИХ-цепей, обладающих абсолютной устойчивостью и стабильностью характеристик, а также сравнительно простой реализацией алгоритмов адаптации и перестройки параметров. Понижение и повышение частоты дискретизации обрабатываемого сигнала в  $\nu$  раз позволяет уменьшить общие вычислительные затраты пропорционально коэффициенту децимации  $\nu$ .

Отметим, что данное решение является далеко не единственным. Возможно, более рационально использование децимации не самого траекторного сигнала, а импульсной характеристики АРФ, и переход к многоступенчатой реализации [9,10]. Интересен также тот факт, что при сочетании режимов секторного обзора земной поверхности и СНДЦ адаптивный фильтр-дециматор (НЧФ<sub>1</sub>) в нижней цепи режекторного фильтра СНДЦ, представленного на рис. 3, является фактически устройством предварительной обработки в структуре цифрового приемника узкополосного траекторного сигнала, формирующего радиолокационное изображение [7]. В режиме картографирования земной поверхности этот фильтр выделяет полезный сигнал на фоне шумов и понижает частоту дискретизации, а в режиме СНДЦ выделенный ранее сигнал от подстилающей поверхности становится помехой и вычитается (после интерполяции) из принятого траекторного сигнала. В результате, выходной сигнал  $y(n)$  совпадает (или близок) с реакцией обычного режекторного фильтра.

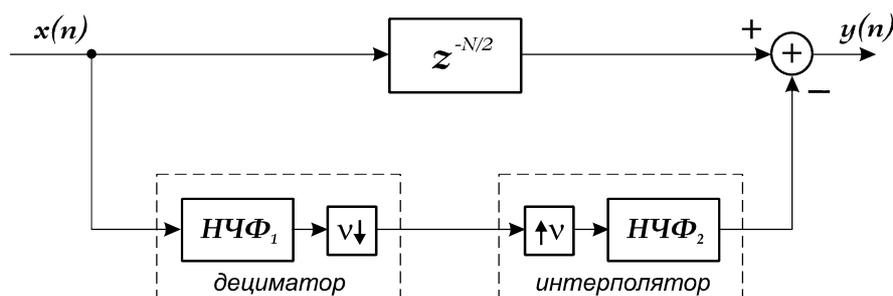


Рис. 3. Структурная схема узкополосного режекторного КИХ-фильтра

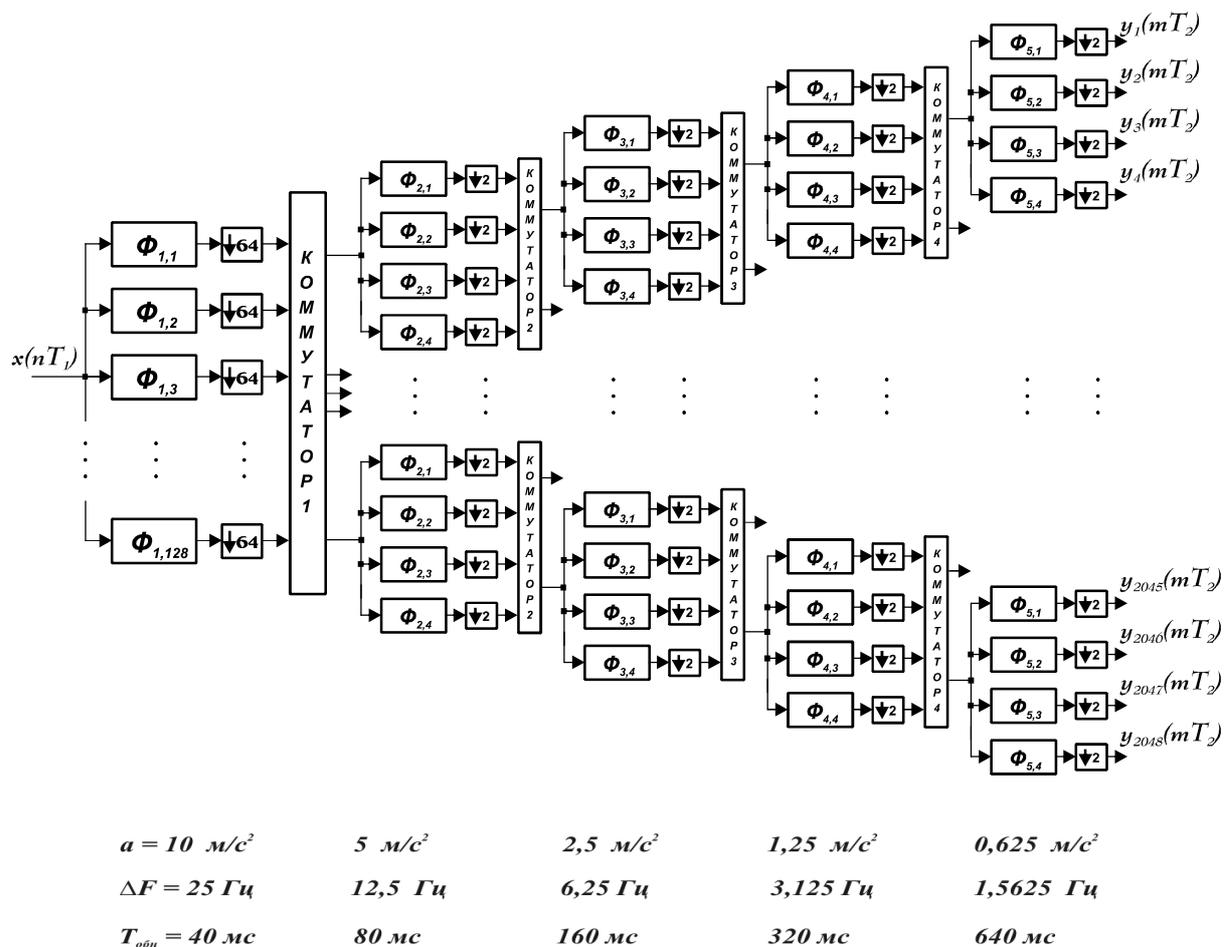


Рис. 4. Структурная схема цифрового приемника траекторного сигнала в режиме СНДЦ

Установим связь между достижимой разрешающей способностью цифрового спектрального анализатора на основе  $N$ -точечного ДПФ и параметрами движения носителя БРЛК и НДЦ. Если на всем интервале измерения радиальная скорость НДЦ и скорость носителя БРЛК сохраняют постоянное значение, то в соответствии с (8), путем пропорционального увеличения интервала измерения (порядка  $N$ ) можно теоретически достичь предельно высокой точности измерения доплеровской частоты и, соответственно, радиальной скорости НДЦ. Однако, незначительное маневрирование движущегося объекта, например с постоянным радиальным ускорением  $a_{\text{ц}} = 1 \text{ м/с}^2$  (скорость изменяется на 3,6 км/час), доплеровская частота уходит за 0,1 с на 6,67 Гц и, следовательно, дальнейшее увеличение интервала измерения вряд ли целесообразно. Если считать, что интервал измерения равен 0,1 с, то достижимая разрешающая способность по частоте составит 10 Гц и по радиальной скорости – 0,15 м/с (0,54 км/час). При этом для частоты дискретизации траекторного сигнала  $f_{\text{кв}} = 6400 \text{ Гц}$  порядок  $N \geq 640$ .

В тоже время, для быстро маневрирующих объектов с радиальным ускорением до  $10 \text{ м/с}^2$  (скорость изменяется до 36 км/час за 1 с) на том же временном интервале 0,1 с доплеровская частота уходит на 66,7 Гц, что фактически, как минимум в 6 раз, превышает разрешающую способность анализатора спектра. А значит, необходимо интервал измерения уменьшить, по крайней

мере, до 40 мс, т.е. вести анализ с шагом по частоте 25 Гц, оставаясь за время анализа в одной частотной полосе. Таким образом, структура приемного устройства должна адаптироваться в процессе спектрального анализа и измерения доплеровских частот НДЦ, обеспечивая различную разрешающую способность в зависимости от параметров их движения. На первом шаге обнаружения/измерения выделяют быстро маневрирующие цели с относительно низким разрешением по частоте, а на последующих шагах производится последовательное обнаружение и измерение параметров движения малоподвижных и медленно маневрирующих объектов с близкими доплеровскими частотами. На Рис. 4 представлен один из вариантов построения адаптивного приемника траекторного сигнала от множества маневрирующих НДЦ, обеспечивающего надежное их разделение и измерение параметров движения с различной разрешающей способностью.

Предполагается, что в диапазоне рабочих частот от частоты среза полосы пропускания АРФ до  $f_{\text{max}} = f_{\text{кв}} / 2 = 3200 \text{ Гц}$  возможно появление до  $M$  объектов, движущихся с радиальной скоростью  $V_{\text{ц}}^R$  от 1 м/с до 48 м/с (от 3,6 км/час до 172 км/час) и маневрирующих с радиальным ускорением до  $10 \text{ м/с}^2$ . Тогда для принятых выше параметров движения носителя БРЛК, с целью разделения быстро маневрирующих целей (с ускорением до  $10 \text{ м/с}^2$ ), необходимо воспользоваться банком из  $N_1 = 128$  полосовых фильтров-дециматоров,

которые на интервале анализа длительностью 40 мс обеспечивают частотное разрешение ориентировочно 25 Гц в полосе частот от 25 Гц до 3200 Гц. Заметим, что при этом максимальный уход доплеровских частот лежит в пределах

$$\Delta F_{\text{допл}} = \frac{2a_{\text{ц}}^{\text{max}}}{\lambda} T_o = 26,6 \text{ Гц}.$$

Следовательно, приемное устройство обеспечивает на первой итерации длительностью 40 мс разделение всех маневрирующих целей, разнесенных друг от друга по доплеровской частоте не менее 25 Гц, что соответствует разрешению по скорости не менее 0,375 м/с. На второй итерации для всех выделенных частотных каналов (не более  $M$ , по числу движущихся объектов) возможно двукратное повышение разрешающей способности по частоте и соответственно по скорости для НДЦ, маневрирующих с ускорением  $a_{\text{ц}} \leq 5 \text{ м/с}^2$ . На третьей итерации выполняется частотное разделение всех объектов, маневрирующих с ускорением  $a_{\text{ц}} \leq 2,5 \text{ м/с}^2$  и т.д., до самых медленно маневрирующих с максимальным ускорением менее  $1 \text{ м/с}^2$ .

На каждом этапе преобразования решающее устройство, являющееся основным элементом коммутаторов, принимает решение о выборе информативных частотных каналов и направлении дальнейшего движения по дереву набора полосовых фильтров-дециматоров или выдаче результата обработки в форме комплексной огибающей траекторного сигнала от  $i$ -ой НДЦ. С целью минимизации общих вычислительных затрат производится последовательное понижение частоты дискретизации траекторных сигналов по выделяемым частотным каналам: на первой итерации в 64 раза, а на всех последующих – в 2 раза. Заметим также, что решающие устройства коммутаторов могут изменять схему коммутации в процессе фильтрации и разделения траекторных сигналов от различных НДЦ не только по выходу, но и по входу, отслеживая уход полосы частот маневрирующих целей.

Таким образом, предложенная структура устройства селекции НДЦ за общий интервал обнаружения и измерения параметров движения объектов длительностью 0,64 с позволяет одновременно обнаруживать и разделять быстро маневрирующие цели на коротких интервалах обработки длительностью от 40 мс с разрешающей способностью 25 Гц (0,375 м/с) и медленно маневрирующие цели с разрешающей способностью до 1,5625 Гц (0,0234 м/с). Отметим, что кроме универсальности и адаптируемости к спектральной структуре принимаемого траекторного сигнала рассматриваемая пирамидальная структура селекции НДЦ отличается от классического способа построения устройства на основе процессора БПФ следующими важными свойствами и возможностями:

1. Минимизацией требуемых вычислительных затрат и памяти данных: после первичного разделения спектра траекторного сигнала по 64 частотным каналам последующая адаптивная обработка выполняется только для информативных каналов, и структура приемника принимает древовидную форму со значи-

тельным прореживанием ветвей поиска и измерения параметров НДЦ.

2. Высокой разрешающей способностью одновременно по времени (прием и разделение быстро маневрирующих целей) и по частоте (прием и разделение медленно маневрирующих целей): в течение всего длительного интервала разделения малоподвижных целей (до 1 с) каждые 40 мс выполняется обнаружение и разделение новых быстро маневрирующих НДЦ.

3. Повышенной помехоустойчивостью приема: каждый полосовой фильтр-дециматор первой степени преобразования существенно увеличивает соотношение сигнал/шум на его выходе, как за счет подавления широкополосного шума, так и помех от соседних частотных каналов, что особенно важно при обнаружении маломощных полезных сигналов на общем фоне.

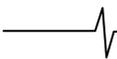
4. Минимизацией собственных шумов: шумы, возникающие на первых ступенях преобразования, сглаживаются при последующей узкополосной фильтрации, а собственные шумы на последних итерациях незначительны, вследствие относительно небольшого числа вычислительных операций и, как следствие, числа усечений или округлений промежуточных результатов обработки.

5. Потенциальной возможностью значительного повышения разрешающей способности по частоте (скорости НДЦ) на относительно коротких временных интервалах: на каждой ступени преобразования формируются не коэффициенты Фурье (как в классическом построении), а комплексные сигналы, несущие полную информацию о частотно-временной структуре в каждом канале, что позволяет методами спектрального оценивания на основе авторегрессионного анализа получить высокое разрешение по частоте (скорости).

Отметим в заключение, что последнее свойство является исключительно важным и может быть альтернативой адаптивному поиску по древовидной структуре, начиная со второй и последующих ступенях преобразования. При таком подходе роль предварительной частотно-временной обработки – разделение всех  $M$  движущихся объектов по различным частотным каналам (насколько это возможно) так, чтобы в каждый канал попадало не более трех-четырёх сигналов от различных НДЦ. Это одновременно повысит соотношение сигнал/шум на входе устройства параметрического спектрального оценивания (очень чувствительного к воздействию шумов и помех) и в значительной степени уменьшит затраты на его реализацию [8].

#### **Алгоритмы селекции НДЦ на основе частотно-временной адаптивной обработки траекторного сигнала**

Частотно-временная селекция НДЦ, в отличие от рассмотренной выше пространственно-частотной, не предполагает предварительного пространственного отделения движущихся объектов узкой ДНА и, как следствие, сужения полосы частот помех от подстилающей земной поверхности. Это значит, что во всем



диапазоне рабочих частот (до  $f_{\max} = f_{\text{кг}} / 2 = 3200 \text{ Гц}$ ) присутствует мощная помеха, а число НДЦ значительно возрастает (пропорционально расширению ДНА). Поэтому первая отличительная особенность устройства обнаружения и измерения параметров НДЦ в новых условиях приема – исключение из предварительной обработки режекторного фильтра, работающего по принципу частотной селекции узкополосной помехи от подстилающей земной поверхности.

За основу построения адаптивного приемника траекторного сигнала с использованием перестраиваемых фильтров частотной селекции можно принять структуру, представленную на Рис.4. В чем принципиальное отличие дальнейшей модификации устройства обнаружения НДЦ в новых условиях его работы? Если ранее, вследствие предварительной режекции мощной помехи, уже на первой ступени преобразований гарантировано принималось решение о наличии в отдельных частотных каналах траекторного сигнала от движущихся объектов, и число таких НДЦ было небольшим, так что вся последующая обработка шла по предельно ограниченному числу ветвей, то в новых условиях таких гарантий нет. Устойчивое обнаружение НДЦ наталкивается на проблему повышения соотношения сигнал/шум, что требует организации захвата и слежения за изменением доплеровской частоты траекторного сигнала от НДЦ на более длительном интервале обработки. Это сложная задача, но разрешимая в рамках рассмотренного подхода к построению приемника/обнаружителя, если на выходе каждого частотного канала ввести решающее устройство, обеспечивающее формирование множества потенциально возможных траекторий изменения доплеровской частоты каждой НДЦ и выбор наилучшей траектории по заданному критерию помехоустойчивого приема.

В зависимости от мощности сигнала, отраженного от НДЦ, по отношению к мощности всего траекторного сигнала, методы и алгоритмы построения траекторий движения доплеровских частот можно разделить на две группы. В первую группу входят алгоритмы формирования аналогичные ранее представленным, предполагающие, что соотношение сигнал/шум в результате первой итерационной обработки с помощью набора из  $M$  полосовых фильтров-дециматоров достаточно для принятия решения об обнаружении и захвате НДЦ. Однако, такое решение принимается при значительной вероятности «ложной тревоги». Поэтому на последующих итерациях обработки выполняется уточнение правильности принятого решения и приостановлении формирования траектории движения ложной НДЦ. Подобная избыточность требует значительного увеличения вычислительных затрат, но позволяет более надежно обнаружить и разделить движущиеся объекты, постоянно уточняя их параметры движения.

Вторая группа методов и алгоритмов ориентирована на более сложные условия реализации, когда соотношение сигнал/шум на первой итерации обработки является недостаточным для принятия какого-либо решения об обнаружении и захвате НДЦ. Вместе с тем, может быть ориентировочно известна возмож-

ная полоса доплеровских частот движущихся объектов (одного или нескольких). Например, по априорной информации о диапазоне скоростей их движения на интервале обнаружения. В этом случае построение относительно небольшого числа «правильных» траекторий движения ведется по всему множеству возможных последовательностей чередования выходов частотных каналов до принятия окончательного решения об обнаружении каждой из НДЦ.

Отметим, что по данному алгоритму построения траекторий движения возможно обнаружение и разделение медленно маневрирующих объектов, когда уход доплеровских частот за время обработки наблюдается только на последних итерациях, и таким образом, число возможных сочетаний выходов частотных каналов не очень значительно.

Для быстро маневрирующих целей не требуется высокое частотное разрешение, важно их своевременно «захватить» и после достаточного числа накоплений результатов измерений повысить вероятность правильного обнаружения. Поэтому число частотных каналов не увеличивается, но перебираются все возможные комбинации их чередования в общей последовательности при построении ожидаемой траектории движения доплеровских частот.

В частном случае, когда объект движется с постоянным радиальным ускорением, принимающим такое значение, что за интервал первичного преобразования 40 мс (разделение по 64 частотным каналам) доплеровская частота увеличивается на значение, равное ширине полосы пропускания частотного канала, на каждом шаге слежения за частотой необходимо простое последовательное перемещение в соседний частотный канал. Таким образом, фактически выполняется ЛЧМ-демодуляция принятого сигнала от объекта, движущегося с постоянным ускорением. Однако, в общем случае движение быстро маневрирующих объектов хаотично и непредсказуемо. Поэтому число возможных сочетаний выходов частотных каналов при построении множества траекторий движения доплеровских частот может быть значительным и потребовать значительных вычислительных затрат.

На Рис 5 дан пример, иллюстрирующий механизм построения потенциально возможных траекторий движения доплеровских частот на выходе 4-го частотного канала в результате трех итераций обработки по 40 мс. Предполагается, что на каждой последующей итерации доплеровская частота может переместиться не далее как в соседний частотный канал. Общее число возможных траекторий равно 27, только 15 из которых (сплошные линии) являются рациональными (без смены знака ускорения соответствующего объекта).

В общем случае, при выполнении  $m$  итераций, число потенциально возможных траекторий движения доплеровских частот для каждого из  $M$  выходных частотных каналов лежит в пределах до  $R = 3^m$  траекторий, из них до половины могут быть рациональными. Таким образом, вычислительные затраты быстро растут с увеличением числа итераций  $m$ .

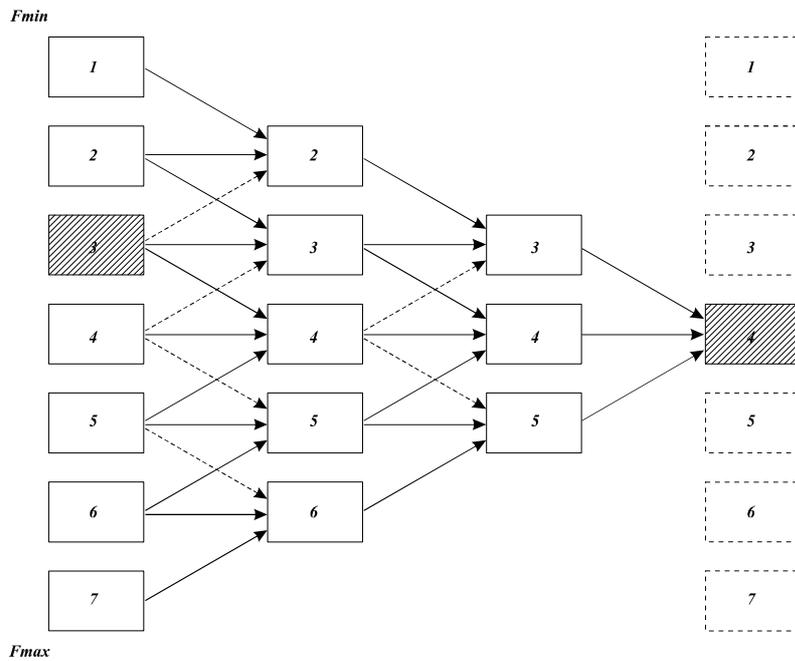


Рис. 5. Способ построения потенциально возможных траекторий движения доплеровских частот

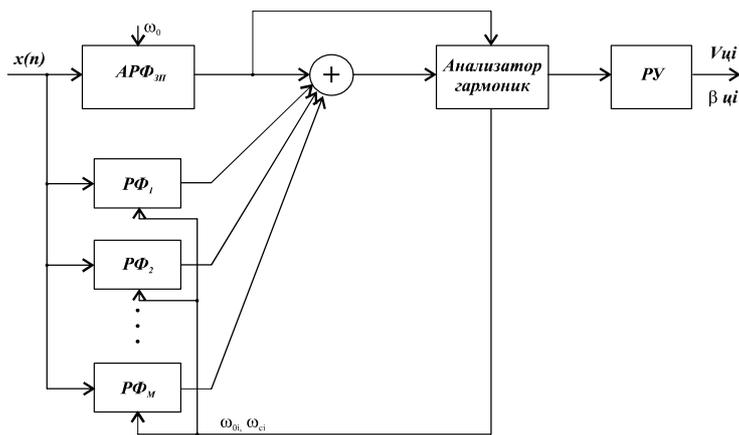


Рис. 6. Структурная схема СНДЦ со скользящей ДНА.

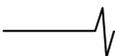
**Методы и алгоритмы селекции НДЦ со скользящей ДНА**

При использовании однолучевой ДНА азимутальное положение НДЦ определяется с точностью, ограниченной шириной диаграммы направленности. После принятия решения о наличии в данном азимутальном секторе (определяемом шириной ДНА) движущихся объектов, нельзя дать однозначный ответ об их фактическом азимутальном положении. Но можно утверждать, что обнаруженные движущиеся объекты находятся именно в этом секторе, а не в том азимутальном положении, которое дает совокупная доплеровская частота НДЦ. Это наталкивает на идею использования скользящей ДНА с шагом перемещения по азимуту в  $N_0$  раз меньшей ширины ДНА, например с шагом  $0,1^\circ$  при ширине  $\theta_0 = 2^\circ$ ,  $N = 20$ . Подобный метод, разумеется, увеличивает во столько же раз общее время сканирования ДНА и обнаружения движущихся объектов, но позволяет при определенных условиях более точно определять их азимутальное положение.

В основе данного подхода лежит предположение,

что на каждом новом шаге смещения ДНА мы имеем полную информацию о всех движущихся объектах, обнаруженных на предыдущих шагах. Поэтому фактически обнаружение новых НДЦ за счет смещения направления антенны говорит о том, что их появление связано только с небольшим азимутальным сектором, ширина которого определяется шагом смещения, т.е. при  $N = 20$ ,  $\Delta\beta = 0,1^\circ$ .

Общая структурная схема селектора НДЦ со скользящей ДНА представлена на Рис. 6. Адаптивный режекторный фильтр помехи от земной поверхности (АРФ\_зп) настраивается на центральную частоту  $\omega_0$  полосы режекции, соответствующей новому положению ДНА на каждом шаге смещения на угол  $\Delta\beta$  и подавляет траекторный сигнал, отраженный от земной поверхности в выделяемом азимутальном секторе. Анализатор гармоник обнаруживает узкополосные составляющие траекторного сигнала от НДЦ, не попадающие в полосу режекции АРФ\_зп и группы перестраиваемых узкополосных режекторных фильтров  $РФ_k$ ,  $k = \overline{1, M}$ . При этом в начальный момент все режектор-



ные фильтры  $R\Phi_k$  отключены, и анализ гармоник ведется на всем раскрыве ДНА. После первого шага скольжения ДНА на величину  $\Delta\beta = 0,1^\circ$  определяются все ранее обнаруженные и исчезнувшие из «поля зрения» гармоники (узкополосные компоненты) от НДЦ, вследствие пространственно-частотной селективности ДНА. Таким способом определяются азимутальные координаты всех НДЦ, попавших в крайний левый сектор шириной  $0,1^\circ$  (при движении справа налево). Для оставшихся гармоник производится оценка частот и настройка режекторных фильтров  $R\Phi_k$  на их подавление, что повышает соотношение сигнал/помеха для обнаружения и измерения параметров сигналов от новых НДЦ, попавших в крайний правый сектор шириной  $\Delta\beta$ . На втором шаге скольжения, при отключенных режекторных фильтрах  $R\Phi_k$  по такому же принципу определяются все НДЦ, попавшие в следующий по ходу смещения сектор той же шириной  $\Delta\beta$ . При настройке набора режекторных фильтров на оставшиеся гармоники определяются параметры сигналов от НДЦ, попавшие в новый сектор и т.д., до окончания скольжения по всей ширине ДНА за  $N$  шагов.

Дальнейшая процедура секторного обзора и обнаружения НДЦ выполняется аналогично. При этом повторная оценка азимутального положения НДЦ при их выходе за границы полосы обзора в раскрыве ДНА используется как для управления режекторными фильтрами, так и для повышения достоверности принятия решения о селекции движущихся объектов с установленной скоростью и координатами. Предполагается, что за все время скользящего сканирования ДНА все НДЦ, попадающие в зону обзора, остаются в пределах элемента разрешения по радиальной скорости и по азимутальному положению. Если это условие не выполняется, то потребуются адаптивное слежение за выделяемыми маневрирующими объектами, что позволит решить поставленную задачу в целом, но с меньшей разрешающей способностью.

Отметим, что скользящее сканирование ДНА – это фактически пространственная фильтрация объектов по их азимутальным координатам. Поэтому, помимо обнаружения НДЦ и измерения их координат описанным выше способом, следует ожидать и очищения траекторного сигнала от шума, в частности, спекл-шума. Плата за это – увеличение общего времени обзора. Однако вряд ли следует применять подобный способ обнаружения НДЦ в широком диапазоне угловых координат. Очевидно, скользящее медленное сканирование ДНА целесообразно только для тех участков панорамного обзора, в которых были обнаружены движущиеся объекты, и требуется более точное определение их азимутальных координат. Таким образом, при первом быстром сканировании решается только задача обнаружения НДЦ, а при втором, медленном сканировании, измеряются параметры движения НДЦ в выделенных направлениях.

### Заключение

Проведенный анализ алгоритмов селекции НДЦ и способов построения структуры цифрового приемника на основе многоскоростной и адаптивной обра-

ботки траекторного сигнала позволяет сделать вывод об их исключительной гибкости и адаптируемости к спектрально-временной структуре принимаемого сигнала, высокой разрешающей способности, помехоустойчивости и вычислительной эффективности. Показано, что использование многоскоростной и адаптивной обработки траекторного сигнала позволяет более эффективно обнаруживать и измерять параметры движения как быстро, так и медленно маневрирующих целей. Предложены варианты построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала в режиме СНДЦ, обеспечивающие обнаружение и измерение параметров движения объектов с учетом их доплеровских скоростей и азимутального положения.

Вместе с тем, многие вопросы, касающиеся эффективной программно-аппаратной реализации цифрового приемника траекторного сигнала в режиме СНДЦ на основе многоскоростной и адаптивной его обработки, и, в первую очередь, синтез многоступенчатых и пирамидальных структур набора доплеровских фильтров с адаптивной режекцией помех от подстилающей поверхности и разделением траекторных сигналов от различных маневрирующих НДЦ остались за границами анализа и являются предметом дальнейших исследований.

### Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.
2. Антипов В.Н., Ильчук А.Р., Колтышев В.Е., Янковский В.Т. Алгоритмы селекции сигналов движущихся объектов в когерентно-импульсной РЛС // Радиотехника, 1998, № 4, с. 69-78.
3. Сазонов Н.А., Щербинин В.Н., Ярушкин М.М. Фазовый способ селекции движущихся наземных целей в одноантенных РСА // Радиотехника, 2001, № 4, с.
4. Медведев Р.В., Сазонов Н.А., Щербинин В.Н. Синтез алгоритма селекции и измерения скорости движущихся наземных целей // Радиотехника, 2003, № 5, с. 45-48.
5. Антипов В.Н., Сусяков Д.Ю. Картографирование и обнаружение наземных движущихся целей // Радиотехника, 2005, № 6, с.
6. Потапов А.А., Герман В.А., Соколов А.В. Радиолокационное обнаружение цели на фоне земной поверхности фрактальным методом // Радиотехника, 2000, № 8, с.57-63.
7. Витязев В.В., Колодько Г.Н., Витязев С.В. Способы и алгоритмы формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского облучения луча // Цифровая обработка сигналов, 2006, № 3, с. 31-41.
8. Марплл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ., М.: Мир, 1990, 584 с.
9. Витязев В.В. Цифровая частотная селекция сигналов. М.: Радио и связь, 1993, 240 с.
10. Витязев В.В., Зайцев А.А. Основы многоскоростной обработки сигналов: Учебное пособие, ч.1. Рязан. Гос. Радитехн. Акад., Рязань, 2005, 124 с.