

## СДЦ В ИМПУЛЬСНЫХ РЛС: 6. ПОЛУНАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ МПО СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ ФИЛЬТРОВ

Д.И. ЛЕХОВИЦКИЙ, В.П. РЯБУХА, Г.А. ЖУГА, Д.С. РАЧКОВ, В.Н. ЛАВРЕНТЬЕВ

Шестая статья цикла статей по теории и технике нетраекторной селекции движущихся целей (СДЦ) на фоне источников пассивных помех (ПП) в системах междупериодной обработки (МПО) сигналов импульсных РЛС. Анализируются результаты полунатурных исследований систем МПО на основе адаптивных решетчатых фильтров (АРФ) в импульсной РЛС с попачечной вобуляцией интервалов зондирования (ПВ ИЗ). Полученные по цифровым записям реальных пассивных помех экспериментальные характеристики МПО на основе АРФ сравниваются с характеристиками штатной системы МПО. По результатам сравнения обосновываются рекомендации по совершенствованию систем СДЦ таких РЛС.

**Ключевые слова:** импульсные РЛС, селекция движущихся целей, пассивные помехи, экспериментальные исследования, адаптивные решетчатые фильтры, характеристики обнаружения, практические рекомендации.

### ВВЕДЕНИЕ

Данная статья – шестая из цикла статей по теории и технике нетраекторной селекции движущихся целей (СДЦ) на фоне пассивных помех (ПП) в системах междупериодной обработки (МПО) сигналов импульсных РЛС.

Предыдущие статьи этого цикла были посвящены теоретическим исследованиям оптимальных, квазиоптимальных и адаптивных систем МПО гауссовых сигналов на фоне гауссовых ПП и их сравнению с системами МПО, использующимися на практике. В частности, в [1] выявлены достаточно большие резервы совершенствования штатной системы СДЦ РЛС с попачечной вобуляцией интервалов зондирования (ПВ ИЗ) [2] за счет перехода от штатной фильтровой системы МПО к компенсационно-фильтровой.

Количественные оценки этих резервов были получены в [1] для гипотетических условий известности статистических характеристик гауссовых сигналов и помех. В данной статье они оцениваются экспериментально в близких к реальным условиям априорной неопределенности, преодолеваемой использованием адаптивных систем МПО на основе адаптивных решетчатых фильтров (АРФ).

В п. 1 кратко рассматриваются особенности штатной неадаптивной системы МПО сигналов в РЛС с ПВ ИЗ. В п. 2 описываются методика и условия полунатурных испытаний с использованием цифровых записей пассивных помех РЛС [2]. В п. 3 обсуждаются экспериментальные статистические характеристики обнаружения штатной и адаптивных (на основе АРФ) систем МПО при “укороченной”, а в п. 4 – при полной стратегии принятия решений [2]. В п. 5 рассматривается роль и особенности штатной системы СУЛТ В РЛС [2] и вытекающие из этого рекомендации по организации МПО в этой РЛС.

### 1. ОСОБЕННОСТИ ШТАТНОЙ СИСТЕМЫ МПО РЛС С ПВ ИЗ

А. В РЛС с ПВ ИЗ [2] используется неадаптивная система МПО (рис. 1), в которой сочетается когерентное (внутрипачечная МПО) и бинарное некогерентное (междупачечная МПО) накопление импульсов пакета. Для краткости далее мы называем **штатной** эту систему МПО, достаточно подробно описанную в [1, 2]. Здесь лишь отметим следующее.

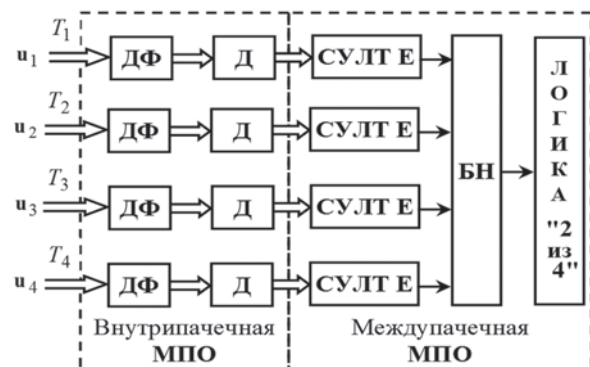


Рис. 1. Штатная система МПО при “усеченной” стратегии принятия решений (ДФ – доплеровские фильтры, Д – детекторы, БН – бинарный накопитель)

Решение об обнаружении (или необнаружении) цели выносятся по результатам некогерентной двухуровневой междупачечной обработки с использованием полной или “укороченной” стратегий.

При “укороченной” стратегии принятия решений протектированные выходные сигналы  $m$  ( $m = 8, 12$  или  $16$ ) доплеровских фильтров (ДФ) каждой из  $n = 4$  пачек пакета (рис. 1) сравниваются с энергетическим порогом в устройстве стабилизации уровня ложных тревог (СУЛТ Е). Пачка считается обнаруженной, если она превосходит энергетический порог хотя бы в одном

из  $m$  доплеровских фильтров. Если таких пачек не менее двух, принимается решение о наличии цели в проверяемом импульсном объеме.

**Б.** При полной стратегии принятия решений об обнаружении сигнала хотя бы одного из  $m$  доплеровских фильтров должен преодолеть и энергетический (СУЛТ Е) и, через блок вычисления “контрастов” (БВК), скоростной (СУЛТ V) пороги (рис. 2).

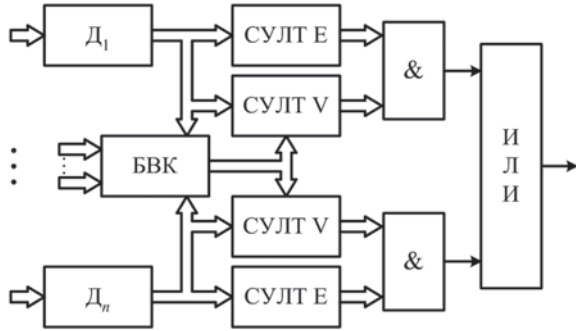


Рис. 2. Использование энергетического (СУЛТ Е) и скоростного (СУЛТ V) порогов при полной стратегии принятия решений

В блоке СУЛТ V сигналы разделяются по доплеровскому сдвигу частоты (скорости) и бланкируются те из них, модуль радиальной скорости источников которых меньше устанавливаемого оператором порога. Работа этого блока базируется на использовании отличий амплитуд выходных сигналов фильтров с одинаковыми номерами в пачках с различными интервалами  $T_i$  ( $i \in 1, n$ ) следования импульсов. Они обусловлены различием частот настройки фильтров пачек и с ростом (до определенного уровня) скорости источников также увеличиваются.

Количественной мерой этих различий для каждого из фильтров пачки служит “контраст”, который в системе МПО РЛС [2] вычисляется как отношение модуля сигнала на выходе данного фильтра к среднему арифметическому значению модулей сигналов фильтров с теми же номерами в остальных пачках. Вычисленный “контраст” фильтра сравнивается с пороговым значением “контрастной характеристики”  $\chi(V_r)$  соответствующей пачки. Эта характеристика образована максимумами “контрастов” всех фильтров данной пачки, рассчитанных для когерентных пачек сигналов движущихся целей в отсутствие помех.

Пороговое значение “контрастной характеристики” пачки может быть превышено контрастами тех или иных фильтров этой пачки только тогда, когда радиальная скорость цели  $V_r$  окажется выше пороговой скорости  $v_0(i)$ ,  $i \in 1, n$ .

Возможность в широких пределах регулировать зону скоростной режекции СУЛТ V позволяет уже на этапе первичной МПО эффективно защитить РЛС от множества движущихся с относительно небольшими скоростями мешающих дискретных отражателей (“ангелов”), существенно затрудняющих работу многих современных высокопотенциальных РЛС сантиметрового диапазона.

Следует, однако, иметь в виду, что в процессе скоростной селекции в СУЛТ V могут быть забланкированы и полезные сигналы малоскоростных воздушных целей, а также высокоскоростных, но движущихся не радиально на РЛС, а “с параметром” и поэтому имеющих малую радиальную составляющую скорости.

Еще один недостаток штатной СУЛТ V порожден ее спецификой как параметрической системы, свойства которой зависят от входных воздействий. В связи с этим в реальных помеховых условиях модули выходных сигналов фильтров, а, следовательно, и их “контрасты” могут меняться в широких пределах и не совпадать с рассчитанными для идеализированных условий отсутствия шума и ПП [3].

## 2. МЕТОДИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**А.** Обобщенная схема полунатурных экспериментов показана на рис. 3. В ней предусматривается междупериодная обработка входных воздействий, которыми служат  $N = n \cdot m$  – мерные векторы комплексных амплитуд  $\mathbf{u} = \{u_i\}_{i=1}^n$  ( $n=4$ ) реальных ПП РЛС [2] из КК элементов дистанции данного азимутального направления в аддитивной смеси с контрольными сигналами, имитирующими цель, движущуюся с произвольной (заданной) радиальной скоростью.

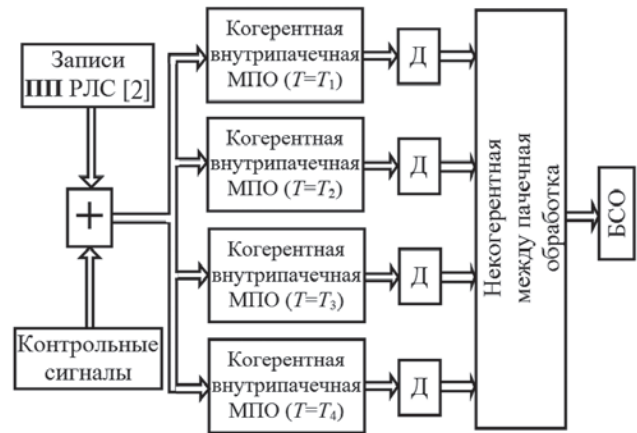


Рис. 3. Схема полунатурных экспериментов

Каждая  $m$  – элементная пачка  $\mathbf{u}_i = \{u_\ell^{(i)}\}_{\ell=1}^m$  ( $i \in 1, n$ ) исходного  $N$  – мерного вектора (пакета) с одинаковыми в пределах пачки, но различными от пачки к пачке временными интервалами между импульсами вначале обрабатывалась в своем блоке когерентной внутрипачечной обработки, построенном по схеме рис. 4.

Она предусматривала либо штатную (рис. 1) обработку (в наборе доплеровских фильтров) непосредственно центральной пачки  $\mathbf{u}_i(t)$  скользящего по времени (дальности) окна, либо обработку в наборе подобных фильтров результатов преобразования этой пачки в квазиобеляющем  $(\mathbf{p}(t))$  или квазиобращающем  $(\mathbf{v}(t))$  АРФ с ленточными матричными импульсными харак-

теристиками (МИХ)  $\hat{W}_{lb}$  (АРФ<sub>w</sub>) или  $\hat{\Psi}_b$  ([4], рис. 17) (АРФ<sub>inv</sub>). АРФ настраивались по  $K$ -мерной обучающей выборке из  $K/2$  пачек, предшествующих центральной, и  $K/2$  пачек, следующих за ней. Преобразованная в АРФ центральная пачка подключалась к набору фильтров через мультиплексор (MUX). Это позволяло проверить адаптивные системы МПО на основе квазиобращающего или квазиобеляющего АРФ и сравнить их со штатной неадаптивной МПО (п. 1).

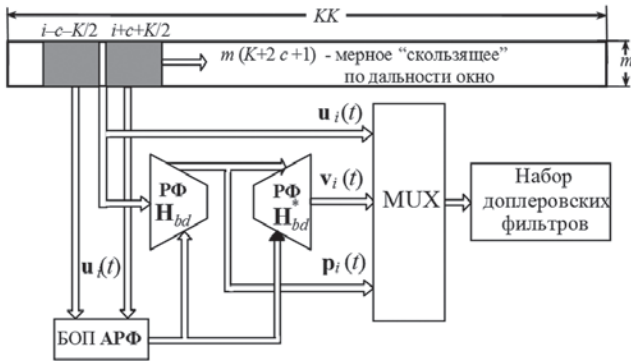


Рис. 4. Внутрипачечная МПО

Продетектированные выходные сигналы доплеровских фильтров всех пачек далее обрабатывались в штатном блоке некогерентной междупачечной обработки (рис. 1, 3, 4), описанном в п. 1.

В блоке статистической обработки (БСО) схемы рис. 4 определялись характеристики сравниваемых систем МПО.

Б. В ходе экспериментов использовались цифровые записи реальных ПП от различных источников. На рис. 5, 6 приведены примеры дальностно-азимутальных распределений мощности ПП от местных предметов (рис. 5) и об-

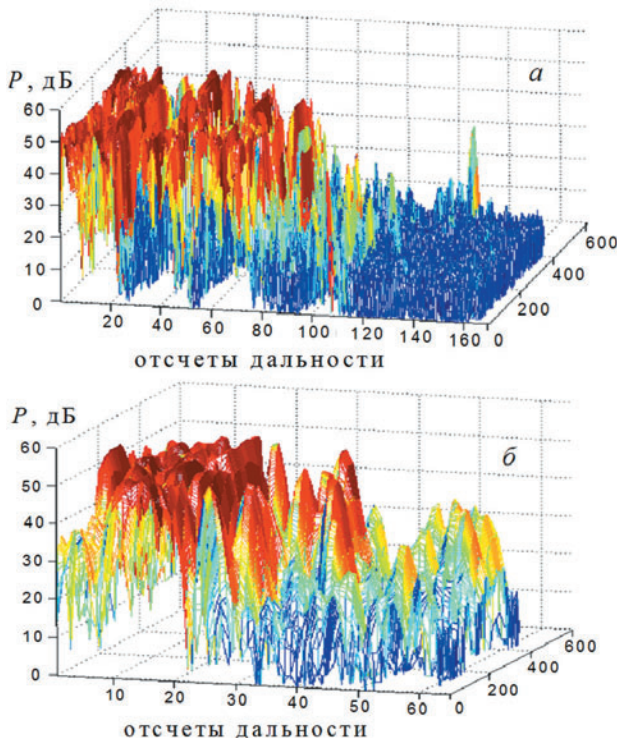


Рис. 5. Дальностно-азимутальное распределения мощности ПП от местных предметов

лаков (рис. 6), маскировавших контрольные сигналы, имитирующие движущиеся с заданной скоростью воздушные цели. В этих записях относительная (по отношению к шуму приемника) мощность ПП на отдельных участках дальности превосходит 50 дБ для местных предметов и 40 дБ – для облаков. Как для тех, так и для других ПП характерна существенная неравномерность (нестационарность) дальностных распределений, что подчеркивает актуальность высокого быстродействия адаптивной обработки.

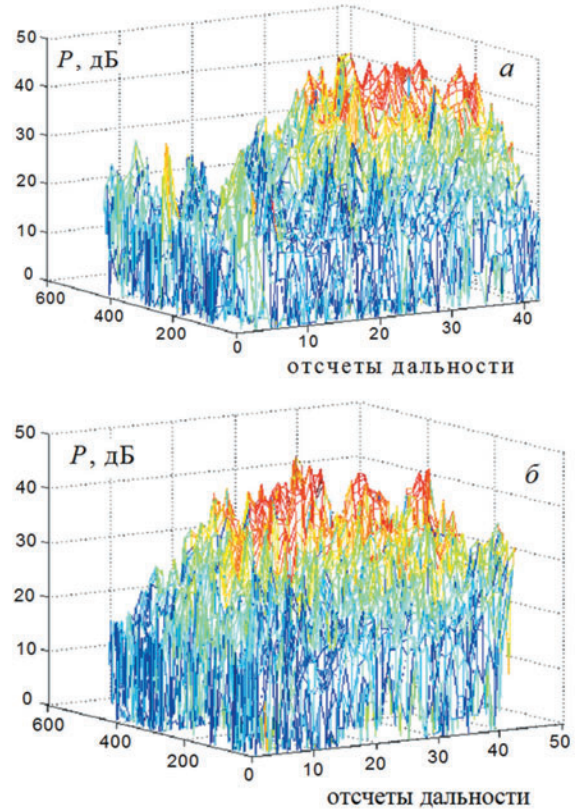


Рис. 6. Дальностно-азимутальное распределения мощности ПП от облаков

Испытания проводились в два этапа. На первом из них использовалась “укороченная”, а на втором – полная стратегия принятия решений (п. 1). Ниже рассматриваются результаты каждого из этих этапов.

### 3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИ “УКОРОЧЕННОЙ” СТРАТЕГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

На этом этапе решение о наличии цели в анализируемом элементе дистанции принималось при превышении результатом междупачечной обработки (рис. 2) только одного (энергетического) порога  $x_E$ , установленного по заданной вероятности ложной тревоги (ВЛТ)  $F$ .

А. Остановимся вначале на методике задания этого порога в штатной системе МПО. В ней он рассчитывается по формуле

$$x_E = x_0 \cdot \sigma_{est}^2(v), \quad (1a)$$

где  $x_0$  – относительный порог, а  $\sigma_{est}^2(v)$  имеет смысл мощности помехи на выходе  $v$ -го ( $v \in 1, m$ )

фильтра соответствующей пачки. В штатной системе МПО используется “оконная” оценка

$$\sigma_{est}^2(v) = (k)^{-1} \cdot \sum_{\ell=1}^k |\xi_{\ell}(v)|^2 \quad (16)$$

этой мощности, формируемая по отсчетам  $\xi_{\ell}(v)$  его выходного эффекта в  $k/2$  элементах дистанции, предшествующих текущему, и  $k/2$  элементах, следующих за ним. В этом случае ВЛТ  $F_1$  на выходе каждого из фильтров четырех пачек связана с относительным порогом  $x_0$  равенством [10]

$$F_1 \approx (1 + x_0 / k)^{-k}. \quad (1в)$$

Его приближенный характер обусловлен ненулевой корреляцией отсчетов, интервал между которыми меньше временной протяженности элемента разрешения по дальности.

При рассматриваемой “укороченной” стратегии требуемая ВЛТ  $F$  обработки в целом связана равенством  $F \approx 6 \cdot m^2 \cdot F_1^2$  с ВЛТ  $F_1$  на выходе каждого из фильтров [1], из которого в сочетании с (1в) следует, что

$$x_0 \approx k \cdot \left( (6 \cdot m^2 / F)^{1/2 \cdot k} - 1 \right). \quad (2)$$

Рассчитанные по (2) значения  $x_0$  штатной МПО для ряда значений  $F$  и используемых в ней “окнах” размером  $k=16$  и пачек размером  $m=8, 12, 16$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения относительных порогов

ВЛТ	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
$m=8$	7.9	9.7	11.6	13.7
$m=12$	8.5	10.4	12.3	14.4
$m=16$	9	10.84	12.8	15

**Б.** При адаптивной МПО (рис. 4) из-за случайности параметров АРФ, порожденной конечностью объема  $K$  обучающей выборки, распределения предпороговых статистик (ППС) отличаются от распределения ППС штатной МПО не только при наличии, но и при отсутствии ПП, т. е. в условиях их асимптотического ( $K \rightarrow \infty$ ) равенства. “Дополнительная” случайность, порожденная случайностью и отличием от нуля асимптотически нулевых в этой ситуации параметров  $\alpha_i(\ell)$  настроенных АРФ меняет законы распределения адаптивных ППС тем сильнее, чем меньше объем выборки  $K$ . Наглядной иллюстрацией этого служат приведенные для этой ситуации на рис. 7 экспериментальные функции распределения  $P(|\xi_i(v)|^2 < x_E = x_0 \cdot \sigma_{est}^2(v))$  ППС при рассматриваемой “укороченной” стратегии для штатной МПО и адаптивных МПО на основе “теплицевых” ([5], формула (33))  $z z = 4$  – ступенчатых АРФ<sub>w</sub> и АРФ<sub>inv</sub>, настроенных по пакетам  $U = U_1$  ([5], формула (14а)) с  $K/2=5$  (а) и  $K/2=12$  (б).

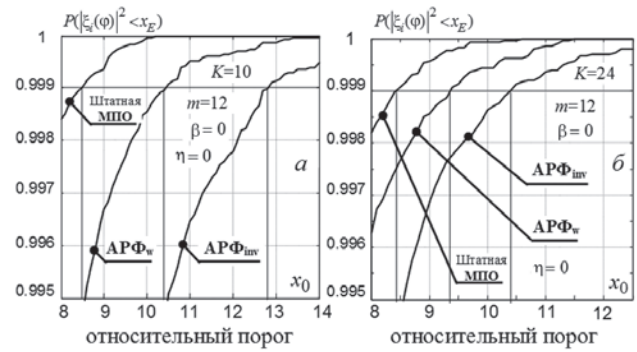


Рис. 7. Функции распределения ППС

Относительные пороги  $x_0$ , обеспечивающие требуемую ВЛТ  $F$ , определяются абсциссами точек пересечения соответствующих функций распределения с горизонтальной прямой на уровне  $P(|\xi_i(\varphi)|^2 < x_E) = 1 - F$ . Так, для  $F = 10^{-3}$  ( $1 - F = 0.999$ )  $x_0 \approx 8.4$  для штатной МПО (см. табл. 1), 10.3 и 12.8 ( $K/2=5$ ), 9.3 и 10.4 ( $K/2=12$ ) – для АРФ<sub>w</sub> и АРФ<sub>inv</sub> соответственно.

При установке в адаптивных системах таких порогов вероятность обнаружения полезных сигналов в зонах отсутствия ПП будет, естественно, ниже, чем в штатной системе МПО, где требуется заметно меньший порог.

Представление об уровне связанных с этим потерь дают экспериментальные характеристики обнаружения когерентных сигналов на фоне шума, приведенные на рис. 8 для ВЛТ  $F = 10^{-3}$ .

Видно, что потери порогового сигнала для АРФ<sub>w</sub> (АРФ<sub>inv</sub>) могут при этом составить  $\approx 1.2$  (2.4) дБ и  $\approx 0.7$  (1.3) дБ при настройке “теплицевого” АРФ по  $K/2=5$  и  $K/2=12$  выборкам соответственно.

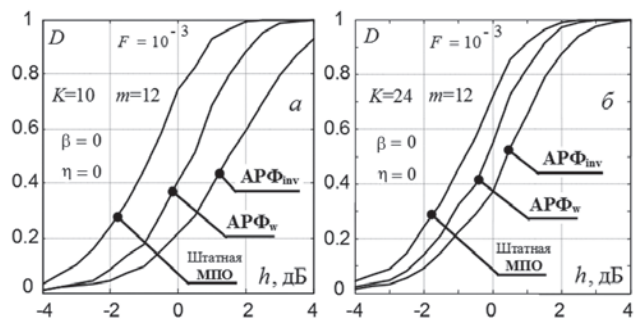


Рис. 8. Экспериментальные характеристики обнаружения на фоне шума приемника

**В.** Потери уменьшаются при “ленточно-диагональной” (ЛД) регуляризации оценок АРФ [6]. Это иллюстрируется показанными на рис. 9 экспериментальными функциями распределения ППС (а) и характеристиками обнаружения когерентных сигналов на фоне шумов приемника (б) штатной и адаптивных систем МПО на основе “теплицевых” ([5], формула (33))  $z z = 4$  – ступенчатых АРФ<sub>w</sub> и АРФ<sub>inv</sub> ([4], рис. 17), настроенных по “ЛД – регуляризованному” пакету  $U = U_3$  ([5], формула (15а)) из  $K/2=5$  обучающих выборок.

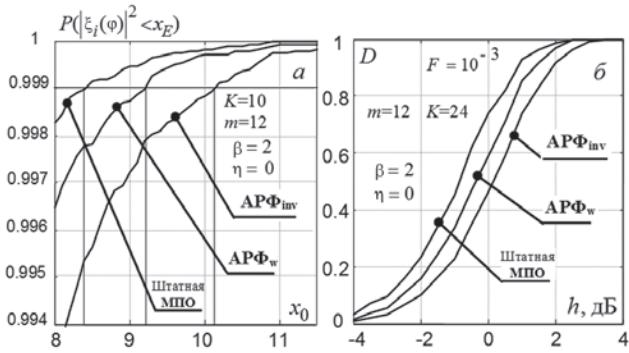


Рис. 9. Функция распределения ППС (а) и характеристики обнаружения (б) на фоне шума

Видно, что для адаптивной МПО относительные пороги  $x_0$  для заданной ВЛТ (а) и потери порогового сигнала по сравнению со штатной МПО, составляющие здесь около 1 дБ (б), уже при  $K/2=5$  не выше, чем при “чисто ленточной” регуляризации (рис. 7, 8) при  $K/2=12$ .

Г. Несмотря на относительно малый уровень, остающиеся потери адаптивной обработки по сравнению со штатной при отсутствии ПП нежелательны. Как было показано в [1, 11], их можно устранить, заменяя на выходе АРФ штатные “сглаженные” фильтры на согласованные, поскольку при наличии АРФ, компенсирующих ПП, необходимость “сглаживать” ИХ доплеровских фильтров отпадает.

Экспериментальные характеристики обнаружения при такой замене показаны на рис. 10.

Как следует из рисунка, ЛД регуляризация “теплицевых” алгоритмов настройки АРФ в сочетании с согласованными доплеровскими фильтрами на их выходе уже при  $K/2 \geq 5$  обеспечивает более высокую эффективность адаптивной МПО по сравнению со штатной и при обработке сигналов на фоне шума приемника. Поэтому в последующих экспериментах по обнаружению сигналов на фоне смеси шума и интенсивных ПП при адаптивной внутрипачечной обработке исследовалось именно такое сочетание.

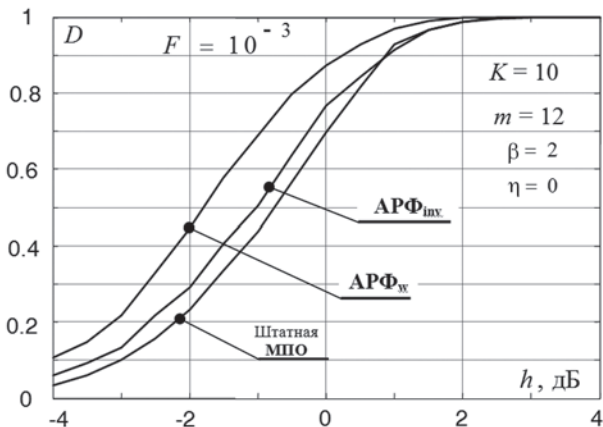


Рис. 10. Характеристики обнаружения на фоне шума

Д. На рис. 11 приведены экспериментальные характеристики обнаружения на фоне ПП от местных предметов (рис. 5, б) контрольных сигна-

лов. Последние имитировали когерентные пачки полезных сигналов с заданным ОСШ  $h$  от целей, движущихся с радиальными скоростями, равномерно заполняющими диапазон  $V_r \in 0, 3600$  км/ч. ВПО рассчитана как отношение числа сигналов, превысивших энергетический порог для ВЛТ  $F = 10^{-3}$ , к их общему числу  $N$ .

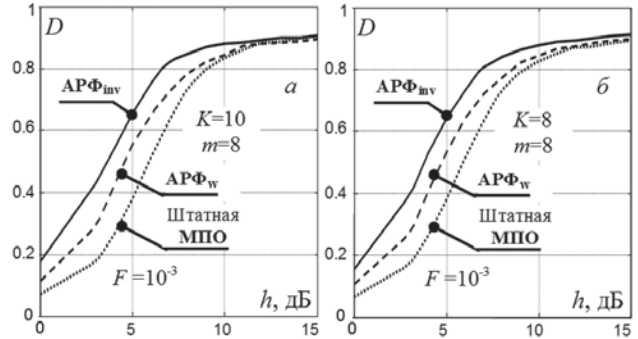


Рис. 11. Экспериментальные характеристики обнаружения на фоне ПП от местных предметов

Аналогичные характеристики обнаружения, но для ПП от облаков (рис. 6, б), показаны на рис. 12. Здесь размер пачки  $m=8$ , размер пакета  $M=4 \cdot m=32$ , размеры обучающей выборки ПП, использованной для настройки АРФ, равны  $K/2=5$  (а) и  $K/2=4$  (б).

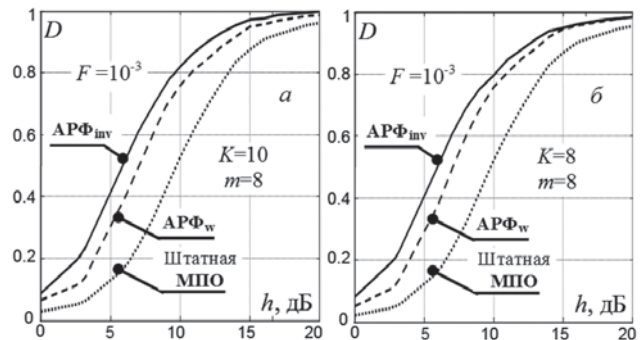


Рис. 12. Экспериментальные характеристики обнаружения на фоне ПП от облаков ( $F = 10^{-3}$ )

Сравнение характеристик обнаружения на рис. 11, 12 позволяет количественно проиллюстрировать физически достаточно очевидные выводы.

1. Требуемый уровень пороговых сигналов, обеспечивающих равные показатели обнаружения, для облаков (рис. 12) выше, чем для местных предметов (рис. 11) как в адаптивных, так и штатной системах МПО. Причина этого – более низкая междупериодная корреляция отражений от облаков (их более широкий спектр) и меньший размер пачек  $m$  и пакетов  $M$  (более редкий запуск в РЛС при цифровой записи ПП от облаков).

2. “Теплицев” алгоритм настройки АРФ [5] в условиях облаков позволяет ограничиться обучающей выборкой помехи размера  $K/2=4$  (рис. 15, б), при которой вычислительные затраты весьма незначительно превосходят затраты наиболее экономичных, но менее быстродействующих рекуррентных алгоритмов настройки, не учитывающих теплицевость внутрипачечных КМ ПП.

3. Выигрыш адаптивной обработки по сравнению со штатной в пороговом сигнале в условиях облаков (равный примерно 4 дБ) выше, чем в условиях местных предметов (примерно 3 дБ). Это связано с ростом относительного уровня боковых лепестков и с более широким главным лепестком ЧХ фильтров меньшего размера  $m$  в штатной системе СДЦ, лучшим отслеживанием формы спектра помехи в АРФ, а также большим интервалом стационарности отражений от облаков (рис. 6, б), чем от местных предметов (рис. 5, б).

4. Приведенные экспериментальные выигрыши меньше вытекающих из результатов математического имитационного моделирования. Основная причина этого – специфика условий эксперимента. В нем проинтегрированы результаты обнаружения целей на фоне не только интенсивных, но и относительно слабых ПП, по отношению к которым выигрыш даже оптимальной МПО существенно меньше, чем в модельных условиях интенсивных ПП. В эксперименте “участвуют” цели с различными, в том числе с близкими к “слепым” скоростями, для которых отличия показателей оптимальной и штатной МПО малы. Кроме того, как стало известно после окончания эксперимента, входные случайные векторы ПП имели отличные от нуля средние значения, что снижало качество оценок параметров АРФ и, тем самым, эффективность адаптивной обработки.

Е. Тем не менее даже в этих условиях использование адаптивной МПО на основе АРФ заметно повысило эффективность обнаружения целей на фоне ПП. Это наглядно иллюстрируют экспериментальные скоростные характеристики (СХ) сравниваемых систем МПО, приведенные на рис. 13 для ПП от облаков (рис. 6, б, рис. 12). По горизонтальной оси здесь отложена радиальная скорость (в м/с) целей с ОСШ  $h = 6$  дБ отраженного от них нефлуктуирующего сигнала. По вертикальной оси отложено число целей с соответствующей скоростью, обнаруженных при использовании только энергетического порога, выбранного для ВЛТ  $F = 10^{-3}$  (при нулевых порогах в СУЛТ V). Число целей с каждой скоростью, равномерно расположенных в дальностно-азимутальной зоне ПП, в этом эксперименте равнялось 1091.

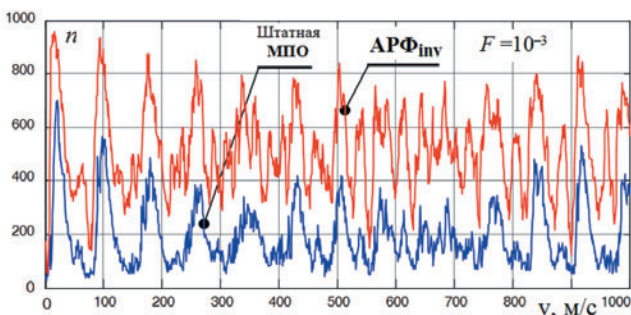


Рис. 13. Экспериментальные СХ в ПП от облаков

Видно, что СХ адаптивной МПО на основе АРФ существенно лучше, чем штатной системы СДЦ. Выигрыш в числе обнаруженных целей (в ВПО) здесь может достигать три – четыре, а в некоторых точках – и более раз.

Еще один пример экспериментальных СХ показан на рис. 14 для ПП от местных предметов (рис. 5, а, рис. 11). Число целей на каждой скорости здесь равно 657, ОСШ = 5 дБ.

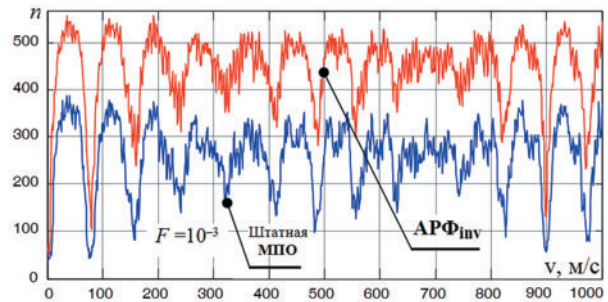


Рис. 14. Экспериментальные СХ в ПП от местных предметов

Видно, что адаптивная МПО на основе АРФ и в этих условиях заметно эффективнее штатной системы СДЦ, хотя выигрыш, как и следует из вывода 3 п. Е, здесь меньше, чем в условиях рис. 13.

#### 4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИ ПОЛНОЙ СТРАТЕГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

А. При используемой в штатной системе МПО полной стратегии принятия решений протектированные выходные сигналы доплеровских фильтров сравниваются не только с энергетическими (СУЛТ E), но и со скоростными (СУЛТ V) порогами (рис. 2) [2]. Последние введены для “очистки” экрана РЛС от дискретных ПП от местных предметов с временной протяженностью, близкой к интервалу разрешения по дальности, а также сигналов малоскоростных целеподобных “ангелов” различной физической природы, которые могут существенно затруднять работу высокопотенциальных РЛС. Однако в штатной системе СУЛТ V решение этой задачи может сопровождаться крайне нежелательными эффектами подавления полезных сигналов целей, движущихся как с малыми, так и с большими радиальными скоростями, существенно превышающими скорость движения “ангелов”, что было подтверждено и результатами полунатурных испытаний.

Б. На рис. 15 показаны экспериментальные СХ штатной и адаптивной МПО на основе АРФ<sub>inv</sub> в ПП от местных предметов (рис. 5), полученные для тех же условий, что и СХ рис. 14, но с использованием полной стратегии принятия решений при двух различных наборах скоростных порогов в СУЛТ V, предусмотренных в РЛС [2].

Из сравнения СХ (рис. 15) с СХ (рис. 14) видно, что при “малых” скоростных порогах (рис. 15, а) число обнаруженных целей, движу-

щихся с радиальными скоростями  $v \geq 100$  м/с, за счет введения СУЛТ V уменьшается незначительно, но при этом невелика и глубина зоны режекции для целей с  $v < 100$  м/с. Увеличение скоростных порогов (рис. 15, б) увеличивает глубину этой зоны, однако заметно уменьшает число обнаруженных целей с радиальными скоростями  $v \geq 100$  м/с.

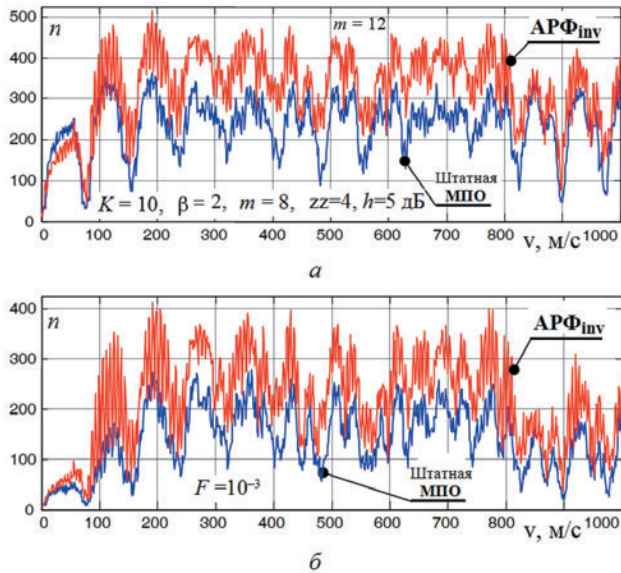


Рис. 15. Экспериментальные СХ в ПП от местных предметов для 3-го (а) и 5-го (б) порогов СУЛТ V

Эти же закономерности еще в большей степени проявляются при обнаружении целей на фоне облаков (рис. 6), что хорошо видно из сравнения соответствующих экспериментальных СХ штатной и адаптивной МПО на основе АРФ<sub>inv</sub> при “укороченной” (рис. 13) и полной стратегии (рис. 16) при двух различных скоростных порогах в СУЛТ V.

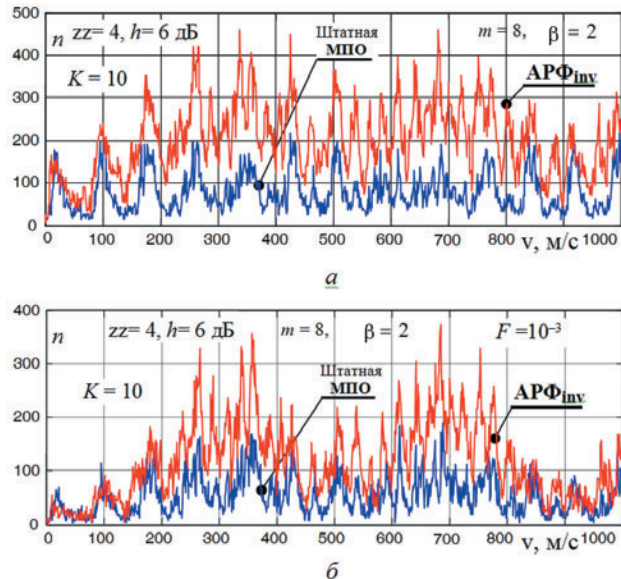


Рис. 16. Экспериментальные СХ в ПП от облаков для 3-го (а) и 5-го (б) порогов СУЛТ V

Здесь уже относительно “малые” скоростные пороги СУЛТ V (рис. 16, а) примерно вдвое уменьшают число обнаруженных целей с ради-

альными скоростями  $v \geq 200$  м/с. При увеличении этих порогов (рис. 16, б) их число может уменьшиться в три и более раз. При этом адаптивная МПО, как и в условиях рис. 15, остается эффективнее штатной, но ее выигрыш в этом случае заметно меньше, чем при использовании “укороченной” стратегии (п. 3).

Остановимся поэтому на принципиальных особенностях системы СУЛТ V, использующейся в РЛС [2].

### 5. О НЕТРАЕКТОРНОЙ СЕЛЕКЦИИ МАЛОСКОРОСТНЫХ ЦЕЛЕЙ МАЛОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

А. Возлагаемая на систему СУЛТ V РЛС [2] задача нетраекторной селекции сигналов воздушных целей на фоне отражений от неподвижных или медленно перемещающихся объектов, в том числе малой протяженности, соизмеримой с интервалом разрешения РЛС по дальности (так называемых дискретных отражений (ДО)), имеет специфические особенности. Они порождены тем, что на интервале МПО, выделенном для СУЛТ V, частотно-временные характеристики ДО могут не иметь отличий от соответствующих характеристик пачек сигналов от представляющих интерес воздушных целей, как малоскоростных, так и высокоскоростных, но движущихся не радиально на РЛС (с параметром). Отсутствие этих различий порождает два подхода к организации обработки.

Б. При первом подходе целеподобные ДО на этапе МПО считаются полезными сигналами, и как таковые должны на этом этапе наилучшим образом обрабатываться для передачи на последующую межобзорную обработку, на интервале которой они могут уже существенно отличаться от полезных сигналов (в частности, из-за различия траекторий движения источников).

На рис. 17 показаны траектории движения ДО типа “ангел-эхо” (АЭ), сфотографированные с экрана индикатора кругового обзора (ИКО) с выдержкой 5 мин. [7, 8].

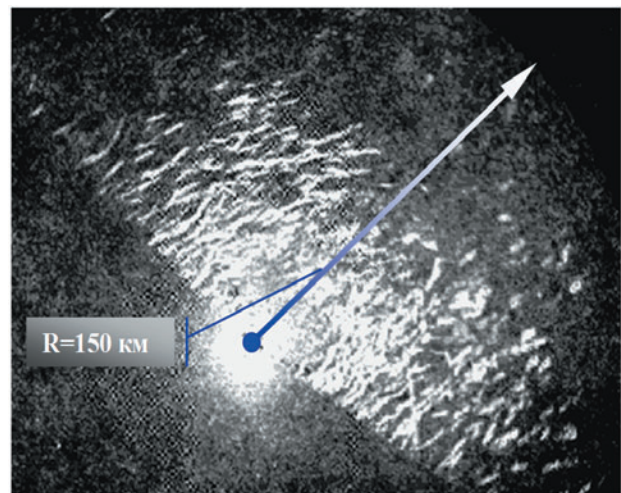


Рис. 17. Трассы ДО в секторе 180°, масштаб 150 км, выдержка 5 мин

Эти траектории в основном ориентированы в направлении среднего ветра в приземном слое атмосферы. Отклонения траекторий отдельных АЭ объясняется ненулевым градиентом скорости ветра по высоте и азимуту.

Поскольку трассы воздушных целей не увязываются с направлением ветра, они в большинстве случаев отличаются от трасс АЭ, что создает реальные предпосылки их разделения в процессе **межобзорной** (траекторной) обработки.

На рис. 18 приведены результаты применения такого подхода в аэродромной РЛС УВД 23 см диапазона челябинского завода “Полеет” [9]. Здесь показан экран оператора при выключенных (а) и включенных (б) системах междупериодной и межобзорной обработки.

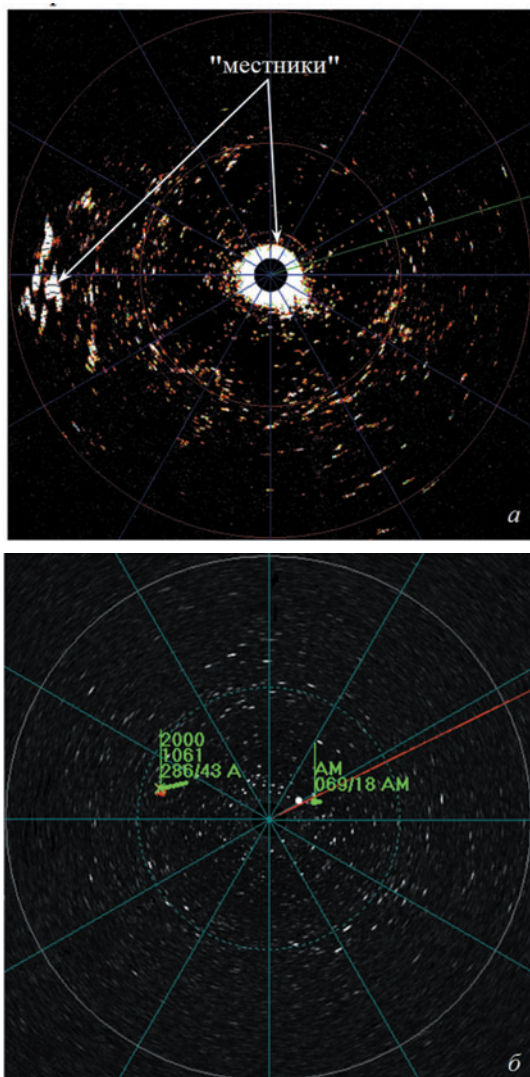


Рис. 18. Вид экрана ИКО аэродромной РЛС до (а) и после (б) обработки

В первом случае (а) экран засвечен отражениями от протяженных местных предметов (вблизи точки стояния РЛС и Уральских гор примерно в 90 км от нее в западном направлении), а также множеством точечных целеподобных АЭ. В процессе МПО компенсируются помехи только от протяженных местных предметов, но не отметки от АЭ и двух воздушных целей. Они

разделяются в процессе последующей межобзорной (трассовой) обработки, результатом которой являются формуляры с параметрами этих целей (б). По данным экспериментов, для двухкоординатных импульсных РЛС с периодом обзора  $\approx 5$  с среднее время правильной селекции может составлять 3–5 обзоров при вероятности ложной селекции  $10^{-2}$ . Для когерентно-импульсных РЛС среднее время принимаемых решений может быть уменьшено вплоть до 1–2-х обзоров [7, 8].

**В.** При **втором** подходе ДО на этапе МПО рассматриваются как помехи, которые должны быть устранены на этом этапе. Именно этот подход фактически используется в РЛС [2], в которой эта задача решается в процессе некогерентной междупачечной МПО (рис. 2). Здесь за счет выбора скоростных порогов системы СУЛТ V ДО обнаруживаются с вероятностью, не превышающей заданную малую вероятность ложной тревоги  $F \ll 1$ . Однако при этом с большой вероятностью  $\bar{D} = 1 - F$  этот порог не преодолеют и сигналы представляющих интерес воздушных целей, не имеющие отличий от ДО. Тем самым из межобзорной обработки безвозвратно исключатся не только  $100 \cdot \bar{D}$  процентов мешающих ДО, что было бы полезным эффектом, но и такой же процент полезных сигналов целей с радиальными скоростями, не превышающими скоростные пороги СУЛТ V. Этот эффект негативен и не зависит от конкретных особенностей штатной системы СУЛТ V. Он будет присущ любой системе обнаружения полезных сигналов, предусматривающей подавление не имеющих от них отличий помех.

В то же время негативный эффект уменьшения вероятности обнаружения целей, скорости которых превышают пороги штатной системы СУЛТ V, порожден ее специфическими особенностями как *параметрической* системы [3]. Его в принципе можно исключить за счет перехода к непараметрическому линейному фильтру с регулируемой (возможно, в меньших пределах) шириной зоны частотной режекции. Однако более рационально не совершенствовать штатную СУЛТ V, а исключить ее, сняв тем самым с системы МПО задачу селекции целей на фоне ДО и возложив ее на последующую межобзорную обработку (отказаться от **второго** подхода в пользу **первого**).

**Г.** Эффект такого решения иллюстрируется рис. 19, где показаны экспериментальные характеристики обнаружения на фоне ПП от местных предметов (а) и облаков (б) штатной МПО при полной стратегии и адаптивной МПО на основе квазиобращающего АРФ<sub>inv</sub> при “укороченной” стратегии принятия решений.

При таких условиях выигрыш  $\Delta h$  адаптивной МПО по сравнению со штатной в пороговом сигнале достигает 5 дБ в ПП от местных предметов (а) и около 8 дБ – в ПП от облаков. Значимость этих выигрышей наглядно иллюстрируется экспериментальными СХ для соответствующих условий, показанными на рис. 20.



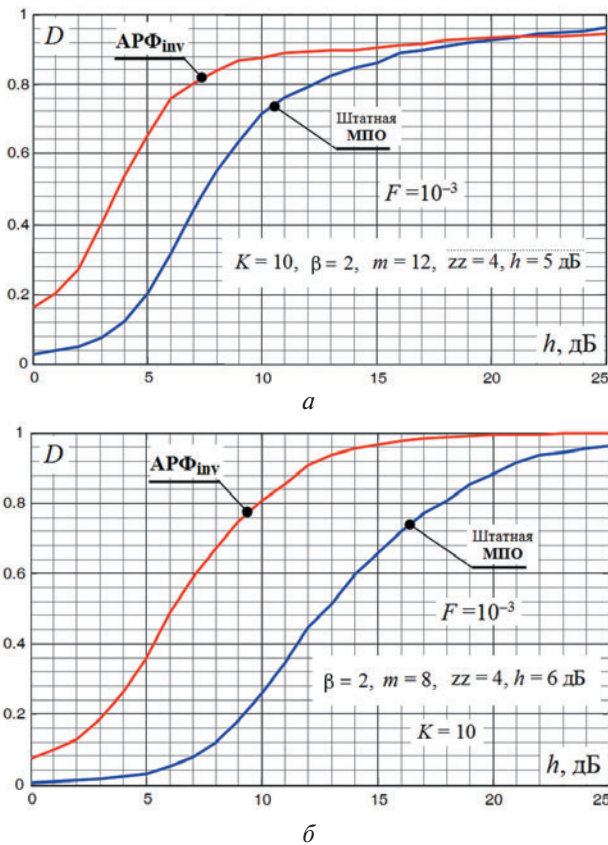


Рис. 19. Кривые обнаружения в ПП от местных предметов (а) и облаков (б)

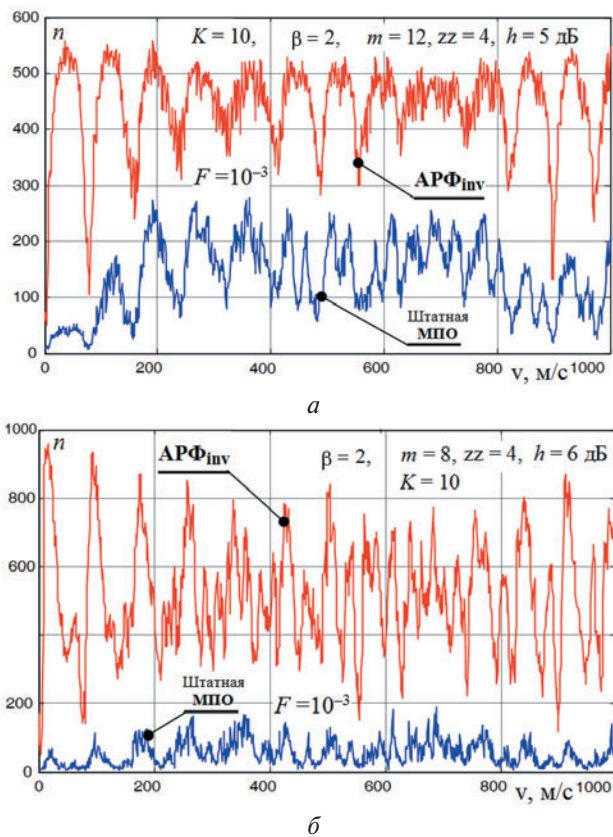


Рис. 20. СХ в ПП от местных предметов (а) и облаков (б)

Видно, что в условиях этого рисунка выигрыш адаптивной МПО по сравнению со штатной в числе обнаруженных целей (вероятности

правильного обнаружения) в зависимости от их радиальной скорости может достигать 2,5–5 раз в ПП от местных предметов и превышать 4–8 раз в ПП от облаков.

Переход к рекомендуемой адаптивной МПО на основе квазиобезличающих или квазиобращающих АРФ, работающей по “укороченной” стратегии принятия решений, в сочетании с эффективной системой межобзорной обработки может рассматриваться как наиболее обоснованное и перспективное направление модернизации системы МПО РЛС [2], а также широкого класса других РЛС.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

А. Проведенные сравнительные полунатурные испытания подтвердили теоретические выводы [1, 11] о возможности повысить защищенность от пассивных помех (ПП) РЛС с попачечной вобуляцией интервалов зондирования (ПВ ИЗ) [2] за счет введения на входе штатной фильтровой системы МПО адаптивной системы компенсации ПП на основе АРФ и отказа от “сглаживания” импульсных характеристик (ИХ) фильтров на выходе АРФ.

Б. В конкретных условиях проведенных полунатурных испытаний выигрыш в пороговом сигнале предложенной адаптивной МПО по сравнению со штатной неадаптивной при “укороченной” стратегии принятия решений составил примерно 4 дБ в условиях ПП от облаков и около 3 дБ – в условиях ПП от местных предметов. За счет этого число сигналов, имитирующих движущиеся воздушные цели, обнаруженных на фоне реальных отражений от местных предметов, увеличилось примерно вдвое, а на фоне отражений от облаков – примерно в 3 – 4 раза.

В. Использование полной стратегии, предусматривающей принятие решения о наличии цели только после преодоления выходными эффектами фильтров как энергетического, так и скоростного порогов, снижает вероятность обнаружения не только малоскоростных, но и высокоскоростных целей, как в штатной, так и в предлагаемой адаптивной системе МПО. Первопричиной этого является вполне вероятное отсутствие на этапе МПО отличий полезных сигналов движущихся воздушных целей и мешающих сигналов от дискретных отражателей, для подавления которых используются скоростные пороги, а также параметрические свойства нелинейной системы их установления [2, 3].

Д. В связи с этим на этапе МПО следует использовать только энергетические пороги, а задачу селекции воздушных целей на фоне малопротяженных дискретных отражателей возложить на последующую межобзорную (траекторную) обработку, в процессе которой могут быть использованы дополнительные (в частности, трассовые) отличия между ними. Целесообразность такого решения подтверждена и результатами проведенного полунатурного эксперимента. В совокупно-

сти с предложенной адаптивной системой МПО на основе АРФ эта мера в эксперименте обеспечила выигрыш в уровне порогового сигнала по сравнению со штатной системой МПО, использующей полную стратегию, примерно на 5 дБ в условиях ПП от местных предметов и примерно 8 дБ для ПП от облаков. Практическая реализация такого подхода может быть связана с ростом требований к производительности устройств межобзорной обработки, которые могут быть удовлетворены современной и, тем более, перспективной цифровой элементной базой [7, 8].

#### Литература

- [1] Леховицкий Д.И., Рябуха В.П., Жуга Г.А., Рачков Д.С., Катюшин Е.А. СДЦ в импульсных РЛС: 4. Резервы совершенствования систем СДЦ РЛС с попачечной вобуляцией интервалов зондирования – настоящий сборник.
- [2] Май И.Д., Каспирович А.Г., Винник В.А., Донченко А.И., Мотыль В.Н., Антоненко В.Г. Радиолокационная станция 36Д6. Эксплуатация и техническое обслуживание: Учебное пособие. – Запорожье, КЭМЗ “Искра”, 2003.
- [3] Леховицкий Д.И., Рябуха В.П., Жуга Г.А., Лаврентьев В.Н. Экспериментальные исследования систем СДЦ на основе АРФ в импульсных РЛС с попачечной вобуляцией периодов зондирования. – Х.: Прикладная радиоэлектроника, т.7, 2008, №1.
- [4] Леховицкий Д.И., Рачков Д.С., Семеняка А.В., Рябуха В.П., Атаманский Д.В. Адаптивные решетчатые фильтры. Часть I. Теория решетчатых структур – настоящий сборник.
- [5] Леховицкий Д.И., Рачков Д.С., Семеняка А.В., Рябуха В.П., Атаманский Д.В. Адаптивные решетчатые фильтры. Часть II. Алгоритмы настройки АРФ – настоящий сборник.
- [6] Леховицкий Д.И., Абрамович Ю.И., Рябуха В.П., Жуга Г.А., Рачков Д.С., Семеняка А.В. Ленточно-диагональная регуляризация МП оценок корреляционных матриц в задачах адаптивной обработки сигналов на фоне гауссовых помех – настоящий сборник.
- [7] Горшков С.А., Солонар А.С. Сопоставление методов адаптивной дискретной фильтрации координат маневрирующих целей. – Информационно-измерительные и управляющие системы, т.4, 2006, №6, с. 14–30.
- [8] Горшков С.А., Седышев С.Ю. Современные методы дискретной адаптивной фильтрации координат маневрирующих воздушных целей // В сб. научных трудов 1-го Международного радиоэлектронного Форума “Прикладная электроника. Состояние и перспективы развития” МРФ-2002, Часть I. 8–10 октября 2002 г., Харьков – 2002, с. 132–137.
- [9] Родионов В.В. Адаптивный алгоритм обнаружения точечных целей на фоне протяженных по дальности помех. – Х.: Прикладная радиоэлектроника, 2002. № 1, с. 173–180.
- [10] Леховицкий Д.И., Полишко С.В., Семеняка А.В., Катюшин Е.А. СДЦ в импульсных РЛС: 3. Об управлении уровнем вероятности ложной тревоги в фильтровых системах междупериодной обработки сигналов на фоне пассивных помех – настоящий сборник.
- [11] Леховицкий Д.И., Рябуха В.П., Жуга Г.А., Рачков Д.С. СДЦ в импульсных РЛС: 2. Структуры, параметры и эффективность квазиоптимальных систем

МПО гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех – настоящий сборник.

Поступила в редколлегию 2.11.2011

**Леховицкий Давид Исаакович**, фото и сведения об авторе см. на с. 404.

**Рябуха Вячеслав Петрович**, фото и сведения об авторе см. на с. 404.

**Жуга Геннадий Александрович**, фото и сведения об авторе см. на с. 422.

**Рачков Дмитрий Сергеевич**, фото и сведения об авторе см. на с. 404.



**Лаврентьев Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, начальник отдела КП «НПК «Искра», г. Запорожье. Область научных интересов: разработка, испытания и эксплуатация радиолокационной техники.

УДК 621.396.965:621.391.26

**СРЦ в імпульсних РЛС: 6. Напівнатурні дослідження адаптивних систем МПО сигналів на тлі пасивних завад на основі адаптивних решітчастих фільтрів / Д.І. Леховицький, В.П. Рябуха, Г.О. Жуга, Д.С. Рачков, В.М. Лаврент'єв // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2011. Том 10. № 4. – С. 526-535.**

Шоста стаття циклу статей з теорії й техніки нетраєкторної селекції рухомих цілей (СРЦ) на тлі джерел пасивних завад у системах міжперіодної обробки сигналів імпульсних РЛС. Аналізуються результати напівнатурних досліджень систем МПО на основі адаптивних решітчастих фільтрів (АРФ) в імпульсній РЛС із попачковою вобуляцією інтервалів зондування. Отримані по цифрових записам реальних пасивних завад експериментальні характеристики МПО на основі АРФ порівнюються з характеристиками штатної системи МПО. За результатами порівняння обґрунтовуються рекомендації з удосконалювання систем СРЦ таких РЛС.

*Ключові слова:* імпульсні РЛС, селекція рухомих цілей, пасивні завади, експериментальні дослідження, адаптивні решітчасті фільтри, характеристики виявлення, практичні рекомендації.

Табл. 1. Лл. 20. Бібліогр.: 11 найм.

UDC 621.396.965:621.391.26

**MTD in pulse radars: 6. Scaled-down research of adaptive systems for interperiod signal processing against the background of clutter based on adaptive lattice filters / D.I. Likhovitskiy, V.P. Ryabukha, G.A. Zhuga, D.S. Rachkov, V.N. Lavrent'ev // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. 2011. Vol. 10. № 4. – P. 526-535.**

This is the sixth paper of paper series devoted to the theory and technique of non-trace moving target detection (MTD) against the background of Gaussian clutter in the pulse radar interperiod processing systems. The results of scaled-down research of adaptive-lattice-filter-based (ALF) IPP systems in a pulse radar with batch-to-batch staggering of pulse repetition intervals are analyzed. The experimental characteristics of ALF-based and standard IPP systems obtained by digital records of real clutter are compared. Based on the comparison results, recommendations for improving MTD systems of such radars are substantiated.

*Keywords:* pulse radar, moving target detection, clutter, experimental research, adaptive lattice filters, detection characteristics, practical recommendations.

Tab. 1. Fig. 20. Ref: 11 items.