

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.5>

УДК: 621.396.96

АЛГОРИТМЫ КОМПЕНСАЦИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ФИЛЬТРАХ МЕЖДУПЕРИОДНОГО НАКОПЛЕНИЯ, АДАПТИВНЫХ К КОРРЕЛЯЦИОННЫМ СВОЙСТВАМ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА

А.С. Солонар, Е.Н. Буйлов

**ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»,
220026, Республика Беларусь, Минск, пр-т Партизанский, 64а**

Статья поступила в редакцию 3 июня 2026 г.

Аннотация. В статье рассмотрена обобщенная структура и алгоритм работы адаптивного устройства междупериодного накопления (когерентного и некогерентного) флуктуирующей последовательности отраженного сигнала. В ходе исследования проведен анализ причин возникновения переходных процессов в фильтрах накопления, а также оценено их влияние на параметры огибающей пачки отраженного сигнала. Разработан алгоритм компенсации переходных процессов на выходе устройства междупериодного накопления (для когерентных и некогерентных накопителей, реализованных с использованием рекурсивных фильтров), адаптивного к корреляционным свойствам флуктуирующей последовательности отраженного сигнала. Практическая значимость предложенных решений проиллюстрирована результатами математического моделирования, демонстрирующими их эффективность.

Ключевые слова: междупериодная обработка, фильтр с конечной импульсной характеристикой, фильтр с бесконечной импульсной характеристикой, когерентное накопление, некогерентное накопление, флуктуирующая последовательность отраженного сигнала, адаптация фильтров к корреляционным свойствам отраженного сигнала, компенсация переходных процессов.

Автор для переписки: Буйлов Евгений Николаевич, lerka.by@mail.ru

Введение

На сегодняшний день современные радиолокационные станции функционируют в условиях интенсивного воздействия помех, при необходимости обнаружения малозаметных целей (например, беспилотных летательных аппаратов), ограниченной импульсной мощности (в частности, при использовании твердотельных элементов в радиопередающих устройствах) и ряда других факторов, существенно ухудшающих характеристики обнаружения. Одним из путей решения данных проблем является применение комбинированного междупериодного (когерентного и некогерентного) накопления с адаптацией к корреляционным свойствам флуктуирующей последовательности отраженного сигнала (ОС), поскольку традиционные подходы, основанные на фиксированной настройке фильтров накопления, не обеспечивают требуемого качества.

Среди множества существующих подходов к реализации накопления наибольшее распространение получили цифровые фильтры с конечной (КИХ) и бесконечной (БИХ) импульсной характеристикой, каждый из которых обладает собственными достоинствами и недостатками [1-10]. Однако, как уже отмечалось в [11], применение БИХ фильтра в структуре устройства междупериодного накопления приводит к затягиванию переходных процессов (ПП), продолжительность которых может превышать длительность пачки ОС [6, 8, 12, 13]. Наличие этого недостатка приводит к снижению эффективности обнаружения слабых целей и ухудшению разрешающей способности по азимуту,

а также ложным срабатываниям устройства принятия решения и другим негативным последствиям [3, 14].

Ввиду этого, данная статья посвящена рассмотрению алгоритмов компенсации ПП в фильтрах междупериодного комбинированного накопления (когерентного и некогерентного), адаптивных к корреляционным свойствам флуктуирующей последовательности ОС, что подтверждает актуальность данного направления исследования. В качестве накопителей выступают КИХ-фильтр и БИХ-фильтр 1-го порядка.

1. Устройство междупериодного накопления, адаптивное к корреляционным свойствам флуктуирующей последовательности отраженного сигнала

На этапе междупериодного накопления высокая степень временной корреляции ОС позволяет эффективно выделять его на фоне некоррелированного шума [1-4, 12, 13]. Причем, показатели эффективности работы устройств накопления во многом будут зависеть от точности оценивания корреляционных свойств ОС.

Время наблюдения цели T_n распределяется между устройствами когерентного и некогерентного накоплений согласно выражению [1-3]:

$$T_n = T_{\text{кн}} + T_{\text{нн}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{кн}}$ – время когерентного накопления, определяющее ширину полосы фильтра когерентного накопителя (КН) $\Delta F_{\text{ц}} = 1/T_{\text{кн}}$; $T_{\text{нн}}$ – время некогерентного накопления.

В зависимости от корреляционных характеристик ОС применение адаптивных систем позволяет распределять время наблюдения T_n между этапами когерентного и некогерентного накоплений. В результате подстройки параметров устройств накопления характеристики обнаружения приемника стремятся к оптимальным значениям не зависимо от характеристик и параметров движения цели [1, 4].

В общем виде алгоритм работы накопителя на k -м периоде повторения можно представить в виде:

– при когерентном накоплении ОС:

$$S_{\Pi(k)} = \sum_{s=0}^{L_{\text{кн}}-1} V_{\Phi(s)} S_{I(k-s)}, \quad (2)$$

где V_{Φ} – комплексная огибающая импульсной характеристики узкополосного фильтра; $S_{I(k)}$ – входной сигнал КН на k -м периоде повторения; $L_{\text{кн}}$ – длительность пачки ОС за время его когерентного накопления;

– при некогерентном накоплении ОС:

$$Z_{\text{нн}(k)} = \sum_{i=0}^{L_{\text{нн}}-1} |S_{\Pi(k-i)}|^2, \quad (3)$$

где $L_{\text{нн}}$ – длительность пачки ОС за время его некогерентного накопления.

На рисунке 1 представлена обобщенная структура устройства междупериодного накопления, адаптивного к корреляционным свойствам флуктуирующей последовательности ОС.

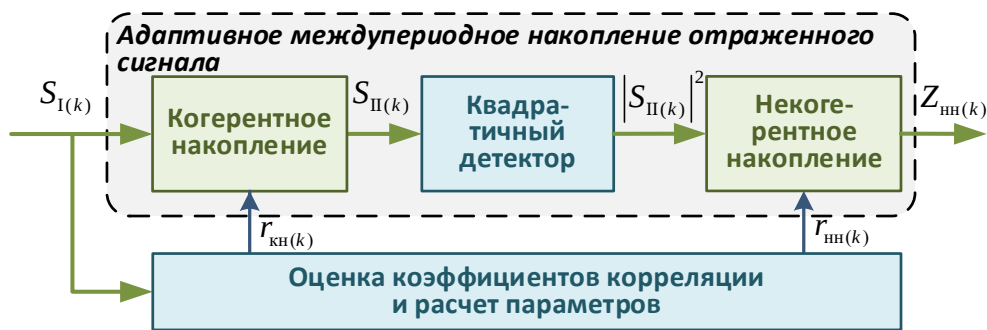


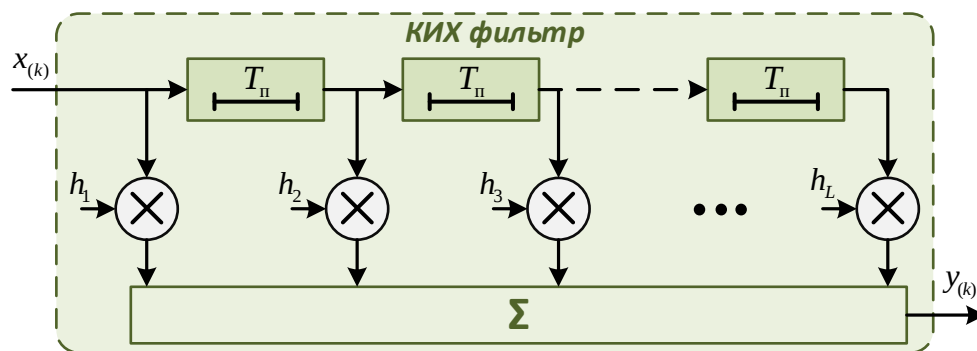
Рис. 1. Структура устройства междупериодного накопления, адаптивного к корреляционным свойствам флуктуирующей последовательности ОС.

Среди большого разнообразия фильтров широкое распространение при реализации междупериодного накопления ОС (когерентного и некогерентного) получили КИХ фильтры (нерекурсивные) и БИХ фильтры первого порядка (рекурсивные) [3, 5, 7, 8, 14].

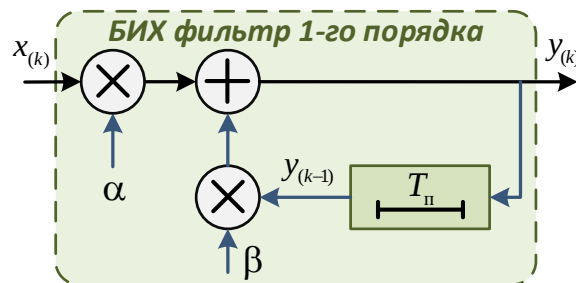
Алгоритм работы КИХ фильтра на k -м периоде повторения (рис. 2 а) имеет следующий вид [1-4, 12]:

$$y_{(k)} = \sum_{j=1}^L [h_{(j)} x_{(k-j+1)}], \quad (4)$$

где $h_{(j)}$ – импульсная характеристика фильтра ($j=1...L$); L – порядок фильтра; $x_{(k)}$ – входной сигнал КИХ фильтра. При когерентном накоплении – выход устройства когерентной компенсации мешающих отражений либо фильтра одиночных сигналов, а при некогерентном – выход квадратичного детектора.



а



б

Рис. 2. Структура КИХ (а) и БИХ (б) фильтров.

Алгоритм работы БИХ фильтра 1-го порядка ($\alpha\beta$ -фильтра) на k -м периоде повторения (рис. 2 б) можно представить в виде [1-4, 12]:

$$y_{(k)} = \alpha x_{(k)} + \beta y_{(k-1)}, \quad (5)$$

где α , β – коэффициенты фильтра. При реализации когерентного накопления данные коэффициенты могут принимать комплексное значение, а при некогерентном накоплении – вещественное (действительное) [1, 3].

Вместе с тем, как было отмечено в [11], наличие в структуре междупериодного (когерентного либо некогерентного) накопителя БИХ фильтра приводит к затягиванию ПП, превышающего протяженность пачки ОС в 3-5 раза [1, 3]. С увеличением мощности сигнала на входе накопителя длительность ПП растет на фоне постоянного уровня шумов наблюдения.

С целью подавления ПП в устройствах когерентного и некогерентного накопления, реализованных с использованием рекурсивных фильтров, требуется выполнить анализ выходных сигналов фильтров и выделить компенсационную составляющую. Решению данной задачи и посвящены разделы статьи.

2. Алгоритмы компенсации переходных процессов в рекурсивных фильтрах когерентного накопления, учитывающие изменение корреляционных свойств флуктуирующей последовательности отраженного сигнала

В соответствии с выражением (5) алгоритм когерентного устройства череспериодного суммирования (ЧПС) с рециркулятором (рис. 2 б), учитывающего изменение корреляционных свойств флуктуирующей последовательности ОС на k -м периоде повторения запишется в виде [1-4, 12]:

$$S_{\Pi(k)} = S_{I(k)} + m_{(k)} S_{\Pi(k-1)}, \quad (6)$$

где $S_{I(k)}$ – выходной сигнал устройства когерентной компенсации мешающих отражений на k -м периоде повторения; $\alpha=1$, а $\beta=m_{(k)}$ – коэффициенты фильтра когерентного накопления на k -м периоде повторения; $m=r_{\phi}r_L$ – коэффициент передачи канала задержанной обратной связи; $r_{\phi}=e^{-T_{\Pi}/\tau_{\phi}}$ – коэффициент междупериодной корреляции импульсной характеристики накопителя рециркулятора; $r_L=e^{-2/L_{\text{кн}}}$ – коэффициент междупериодной корреляции флуктуаций ОС; τ_{ϕ} – постоянная времени фильтра.

Для случая слабого медленно флуктуирующего сигнала ($2\tau_c \gg L_{\text{KH}} T_{\Pi}$, где τ_c – время корреляции флуктуаций ОС) алгоритм когерентного накопления ОС (выражение (6)) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 S_{\Pi(k)} &= m_{(k)} S_{\Pi(k-1)} + S_{I(k)} = m_{(k)} (m_{(k-1)} S_{\Pi(k-2)} + S_{I(k-1)}) + S_{I(k)} = \\
 &= m_{(k)} m_{(k-1)} S_{\Pi(k-2)} + m_{(k)} S_{I(k-1)} + S_{I(k)} = \\
 &= m_{(k)} m_{(k-1)} (m_{(k-2)} S_{\Pi(k-3)} + S_{I(k-2)}) + m_{(k)} S_{I(k-1)} + S_{I(k)} = \\
 &= m_{(k)} m_{(k-1)} m_{(k-2)} S_{\Pi(k-3)} + m_{(k)} m_{(k-1)} S_{I(k-2)} + m_{(k)} S_{I(k-1)} + S_{I(k)} = \\
 &= m_{(k)} m_{(k-1)} m_{(k-2)} (m_{(k-3)} S_{\Pi(k-4)} + S_{I(k-3)}) + m_{(k)} m_{(k-1)} S_{I(k-2)} + m_{(k)} S_{I(k-1)} + S_{I(k)} = \\
 &= m_{(k)} m_{(k-1)} m_{(k-2)} m_{(k-3)} S_{\Pi(k-4)} + m_{(k)} m_{(k-1)} m_{(k-2)} S_{I(k-3)} + \\
 &\quad + m_{(k)} m_{(k-1)} S_{I(k-2)} + m_{(k)} S_{I(k-1)} + S_{I(k)} = \dots
 \end{aligned} \tag{7}$$

Из выражения (7) следует, что выходной сигнал когерентного череспериодного суммирования ОС с рециркулятором можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$S_{\Pi(k)}^{\text{ЧПС}} = \left(\prod_{i=k-L_{\text{KH}}+1}^k m_{(i)} \right) S_{\Pi(k-L_{\text{KH}})}^{\text{ЧПС}} + \left\{ \sum_{j=k-L_{\text{KH}}+1}^{k-1} \left[\left(\prod_{i=j+1}^k m_{(i)} \right) S_{I(j)} \right] + S_{I(k)} \right\} = S_{\Pi(k)}^{\text{trans}} + S_{\Pi(k)}^{\text{signal}}, \tag{8}$$

где $S_{\Pi(k)}^{\text{trans}}$ – ПП КН:

$$S_{\Pi(k)}^{\text{trans}} = \left(\prod_{i=k-L_{\text{KH}}+1}^k m_{(i)} \right) S_{\Pi(k-L_{\text{KH}})}^{\text{ЧПС}}; \tag{9}$$

$S_{\Pi(k)}^{\text{signal}}$ – полезный сигнал КН:

$$S_{\Pi(k)}^{\text{signal}} = \sum_{j=k-L_{\text{KH}}+1}^{k-1} \left[\left(\prod_{i=j+1}^k m_{(i)} \right) S_{I(j)} \right] + S_{I(k)}. \tag{10}$$

В выражении (8) первая составляющая $S_{\Pi(k)}^{\text{trans}}$ учитывает влияние на выходной сигнал фильтра ($S_{\Pi(k)}^{\text{ЧПС}}$) результата накопления, запаздывающего на L_{KH} периодов повторения и является источником ПП. Вторая составляющая ($S_{\Pi(k)}^{\text{signal}}$) учитывает в выходном сигнале фильтра взвешенную сумму входных сигналов

($S_{I(k)}$) за длительность пачки $L_{\text{кн}}$, что соответствует актуальной информации о наблюдаемом сигнале за время наблюдения (является полезной).

В соответствии с выражением (5) алгоритм когерентного накопления, реализованный с использованием БИХ фильтра 1-го порядка (рис. 2 б) и учитывающий изменение корреляционных свойств флуктуирующей последовательности ОС на k -м периоде повторения примет вид [1-4, 12]:

$$S_{\Pi(k)} = (1 - m_{(k)})S_{I(k)} + m_{(k)}S_{\Pi(k-1)}, \quad (11)$$

где $\alpha = 1 - m_{(k)}$, а $\beta = m_{(k)}$ – коэффициенты фильтра когерентного накопления.

По аналогии с алгоритмом ЧПС (выражение (8)) алгоритм когерентного накопления, реализованного с использованием БИХ фильтра 1-го порядка, можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$S_{\Pi(k)}^{\text{БИХ1}} = \left(\prod_{i=k-L_{\text{кн}}+1}^k m_{(i)} \right) S_{\Pi(k-L_{\text{кн}})}^{\text{БИХ1}} + \left\{ \sum_{j=k-L_{\text{кн}}+1}^{k-1} \left[\left(\prod_{i=j+1}^k m_{(i)} \right) (1 - m_{(j)}) S_{I(j)} \right] + (1 - m_{(k)}) S_{I(k)} \right\} = S_{\Pi(k)}^{\text{trans}} + S_{\Pi(k)}^{\text{signal}}, \quad (12)$$

где $S_{\Pi(k)}^{\text{trans}}$ – ПП БИХ фильтра 1-го порядка идентичны ЧПС (выражение (9)):

$$S_{\Pi(k)}^{\text{trans}} = \left(\prod_{i=k-L_{\text{кн}}+1}^k m_{(i)} \right) S_{\Pi(k-L_{\text{кн}})}^{\text{БИХ1}}; \quad (13)$$

$S_{\Pi(k)}^{\text{signal}}$ – полезный сигнал КН:

$$S_{\Pi(k)}^{\text{signal}} = \left\{ \sum_{j=k-L_{\text{кн}}+1}^{k-1} \left[\left(\prod_{i=j+1}^k m_{(i)} \right) (1 - m_{(j)}) S_{I(j)} \right] + (1 - m_{(k)}) S_{I(k)} \right\}. \quad (14)$$

С учетом введенных обозначений алгоритм компенсации ПП в устройстве когерентного накопления последовательности ОС (устройства ЧПС $S_{\Pi(k)}^{\text{ЧПС}}$ либо БИХ фильтра 1-го порядка $S_{\Pi(k)}^{\text{БИХ1}}$) определяется выражением:

$$\tilde{S}_{\Pi(k)} = S_{\Pi(k)} - \left(\prod_{i=k-L_{\text{кн}}+1}^k m_{(i)} \right) S_{\Pi(k-L_{\text{кн}})} = S_{\Pi(k)} - S_{\Pi(k)}^{\text{trans}}. \quad (15)$$

На этапе инициализации (при $k = L_{\text{кн}}$) задаются начальные параметры устройства накопления. При этом выражения (8) и (12) обретают физическую значимость исключительно в случае, когда $L_{\text{кн}} \geq 2$.

При реализации когерентного ЧПС флуктуирующих сигналов с использованием многозвенного устройства задержки максимальное ослабление ПП достигается при их компенсации после каждого звена.

3. Алгоритмы компенсации переходных процессов в рекурсивных фильтрах некогерентного накопления, учитывающие изменение корреляционных свойств флуктуирующей последовательности отраженного сигнала

В соответствии с выражением (5) алгоритм некогерентного накопления, реализованного по схеме рециркулятора (рис. 2 б) и учитывающего изменение корреляционных свойств флуктуирующей последовательности ОС на k -м периоде повторения запишется в виде [1-4, 12]:

$$Z_{\text{нн}(k)} = |S_{\Pi(k)}|^2 + m_{\text{нн}(k)} Z_{\text{нн}(k-1)}, \quad (16)$$

где $\alpha = 1$, а $\beta = m_{\text{нн}(k)}$ – коэффициенты фильтра некогерентного накопления;

$m_{\text{нн}} = e^{-2/L_{\text{нн}}}$ – коэффициент задержанной обратной связи накопителя; $|S_{\Pi(k)}|^2$ – выход квадратичного детектора.

По аналогии с алгоритмом когерентного накопления (выражение (8)) для случая быстро флуктуирующей последовательности сигналов произвольной интенсивности ($\tau_c < T_{\Pi}$) на k -м периоде повторения алгоритм некогерентного накопления можно записать в следующем виде:

$$Z_{\text{нн}(k)}^{\text{ПЦ}} = \left(\prod_{i=k-L_{\text{нн}}+1}^k m_{\text{нн}(i)} \right) Z_{\text{нн}(k-L_{\text{нн}})}^{\text{ПЦ}} + \left\{ \sum_{j=k-L_{\text{нн}}+1}^{k-1} \left[\left(\prod_{i=j+1}^k m_{\text{нн}(i)} \right) |S_{\Pi(j)}|^2 \right] + |S_{\Pi(k)}|^2 \right\} = Z_{\text{нн}(k)}^{\text{trans}} + Z_{\text{нн}(k)}^{\text{signal}}, \quad (17)$$

где $Z_{\text{нн}(k)}^{\text{trans}}$ – ПП некогерентного накопителя (НН):

$$Z_{\text{нн}(k)}^{\text{trans}} = \left(\prod_{i=k-L_{\text{нн}}+1}^k m_{\text{нн}(i)} \right) Z_{\text{нн}(k-L_{\text{нн}})}^{\text{ПЦ}}; \quad (18)$$

$Z_{\text{HH}(k)}^{\text{signal}}$ – полезный сигнал на выходе НН:

$$Z_{\text{HH}(k)}^{\text{signal}} = \sum_{j=k-L_{\text{HH}}+1}^{k-1} \left[\left(\prod_{i=j+1}^k m_{\text{HH}(i)} \right) |S_{\text{II}(j)}|^2 \right] + |S_{\text{II}(k)}|^2. \quad (19)$$

В соответствии с выражением (5) алгоритм некогерентного накопления с использованием БИХ фильтра 1-го порядка (рис. 2 б) и учитывающий изменение корреляционных свойств флуктуирующей последовательности ОС на k -м периоде повторения примет вид [1-4, 12]:

$$Z_{\text{HH}(k)} = (1 - m_{\text{HH}(k)}) |S_{\text{II}(k)}|^2 + m_{\text{HH}(k)} Z_{\text{HH}(k-1)}, \quad (20)$$

где $\alpha = 1 - m_{\text{HH}(k)}$, а $\beta = m_{\text{HH}(k)}$ – коэффициенты НН.

Выполнив аналогичные преобразования, алгоритм НН, реализованного с помощью БИХ фильтра 1-го порядка можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$\begin{aligned} Z_{\text{HH}(k)}^{\text{БИХ1}} &= \left(\prod_{i=k-L_{\text{HH}}+1}^k m_{\text{HH}(i)} \right) Z_{\text{HH}(k-L_{\text{HH}})}^{\text{БИХ1}} + \\ &+ \left\{ \sum_{j=k-L_{\text{HH}}+1}^{k-1} \left[\left(\prod_{i=k-L_{\text{HH}}+1}^k m_{\text{HH}(i)} \right) (1 - m_{\text{HH}(j)}) |S_{\text{II}(j)}|^2 \right] + (1 - m_{\text{HH}(k)}) |S_{\text{II}(k)}|^2 \right\} = \\ &= Z_{\text{HH}(k)}^{\text{trans}} + Z_{\text{HH}(k)}^{\text{signal}}, \end{aligned} \quad (21)$$

где $Z_{\text{HH}(k)}^{\text{trans}}$ – ПП НН с использованием БИХ фильтра 1-го порядка и рециркулятора идентичны (выражение (18)):

$$Z_{\text{HH}(k)}^{\text{trans}} = \left(\prod_{i=k-L_{\text{HH}}+1}^k m_{\text{HH}(i)} \right) Z_{\text{HH}(k-L_{\text{HH}})}^{\text{БИХ1}}; \quad (22)$$

$Z_{\text{HH}(k)}^{\text{signal}}$ – полезный сигнал НН:

$$Z_{\text{HH}(k)}^{\text{signal}} = \sum_{j=k-L_{\text{HH}}+1}^{k-1} \left[\left(\prod_{i=k-L_{\text{HH}}+1}^k m_{\text{HH}(i)} \right) (1 - m_{\text{HH}(j)}) |S_{\text{II}(j)}|^2 \right] + (1 - m_{\text{HH}(k)}) |S_{\text{II}(k)}|^2. \quad (23)$$

С учетом введенных обозначений обобщенный алгоритм компенсации ПП в устройстве некогерентного накопления (рециркулятора либо БИХ фильтра 1 – го порядка) флуктуирующей последовательности ОС определяется выражением:

$$\tilde{Z}_{\text{нн}}(k) = Z_{\text{нн}}(k) - \left(\prod_{i=k-L_{\text{нн}}+1}^k m_{\text{нн}}(i) \right) Z_{\text{нн}}(k-L_{\text{нн}}) = Z_{\text{нн}}(k) - Z_{\text{нн}}^{\text{trans}}. \quad (24)$$

Этап инициализации заканчивается при условии, когда $k = L_{\text{нн}}$. При этом выражения (17) и (21) обретают физическую значимость исключительно в случае, когда $L_{\text{нн}} \geq 2$.

4. Структура устройства междупериодного накопления флуктуирующей последовательности отраженного сигнала и компенсацией переходных процессов

Результаты анализа показали, что компенсацию ПП целесообразно выполнять на каждом этапе междупериодного накопления (когерентного и некогерентного, рис. 3). В первую очередь, это обусловлено громоздкостью и сложностью вывода составляющей сигнала, характеризующей суммарные ПП фильтров накопления. Во-вторых, значительно возрастают вычислительные затраты, требующие реализации алгоритма совместной компенсации ПП.

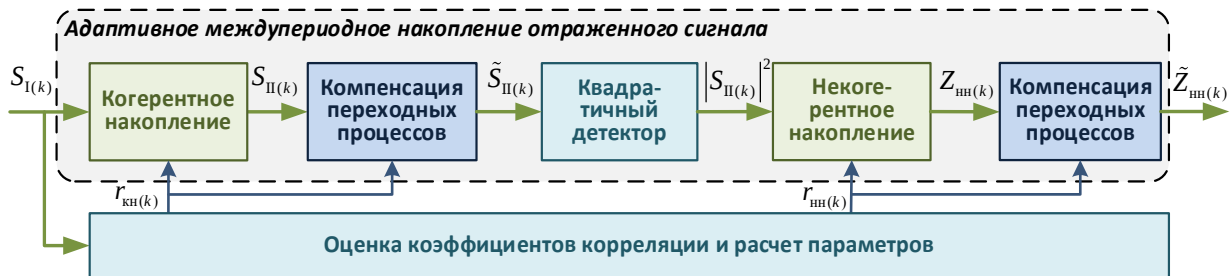


Рис. 3. Обобщенная структура устройства междупериодного накопления флуктуирующей последовательности ОС и компенсацией ПП.

Основными элементами устройства междупериодного накопления флуктуирующей последовательности ОС и компенсацией ПП являются устройства когерентного и некогерентного накопления, устройство оценки коэффициентов корреляции и расчета параметров, квадратичный детектор. Полоса пропускания фильтров накопления на k -м периоде повторения адаптируется к корреляционным свойствам сигнала по средствам учета в обратной связи множителей $r_{\text{кн}}(k)$ и $r_{\text{нн}}(k)$ соответственно [1, 3, 15, 16].

Таким образом, алгоритм компенсации ПП устройства междупериодного накопления, адаптивного к корреляционным свойствам флуктуирующей последовательности ОС включает следующие этапы:

1) Вычисление сигнала на выходе устройства когерентного накопления $S_{\Pi(k)}$ в соответствии с алгоритмами (6) и (11) (использование ЧПС ОС либо БИХ фильтра 1-го порядка).

2) Вычисление ПП устройства когерентного накопления ОС ($S_{\Pi(k)}^{trans}$) с помощью операции логарифмирования (для исключения ситуации переполнения разрядной сетки при программной реализации алгоритма компенсации ПП):

$$S_{\Pi(k)}^{trans} = 10^{\left(\sum_{i=k-L_{\text{кн}}+1}^k \log_{10}[m_{(i)}] \right)} S_{\Pi(k-L_{\text{кн}})}. \quad (25)$$

3) Инициализация начальных параметров устройства когерентного накопления, которая заканчивается при условии $k = L_{\text{кн}}$.

4) Вычитание ПП ($S_{\Pi(k)}^{trans}$) из выходного сигнала устройства когерентного накопления $S_{\Pi(k)}$ в соответствии с выражением (15).

5) Вычисление сигнала на выходе устройства некогерентного накопления $Z_{\text{нн}(k)}$ в соответствии с алгоритмами (16) и (20) (использование рециркулятора либо БИХ фильтра 1-го порядка).

6) Вычисление ПП устройства некогерентного накопления ОС ($Z_{\text{нн}(k)}^{trans}$) с помощью операции логарифмирования:

$$Z_{\text{нн}(k)}^{trans} = 10^{\left(\sum_{i=k-L_{\text{нн}}+1}^k \log_{10}[m_{\text{нн}(i)}] \right)} Z_{\text{нн}(k-L_{\text{нн}})}. \quad (26)$$

7) Инициализация начальных параметров устройства когерентного накопления, которая заканчивается при условии $k = L_{\text{нн}}$.

8) Вычитание ПП ($Z_{\text{нн}(k)}^{trans}$) из выходного сигнала устройства некогерентного накопления $Z_{\text{нн}(k)}$ в соответствии с выражением (24).

5. Результаты моделирования и их обсуждение

Достоверность и эффективность разработанного алгоритма компенсации ПП устройства междупериодного накопления, адаптивного к корреляционным свойствам флуктуирующей последовательности ОС подтверждены результатами математического моделирования для следующих комбинаций фильтров накопления (когерентного и некогерентного):

- КИХ фильтр (КН) и рециркулятор (НН);
- КИХ фильтр (КН) и $\alpha\beta$ -фильтр (НН);
- устройство ЧПС (КН) и рециркулятор (НН);
- устройство ЧПС (КН) и $\alpha\beta$ -фильтр (НН).

В качестве исходных данных приняты параметры двухкоординатной радиолокационной станции кругового обзора, работающей в координатах «дальность – азимут». Период обзора составлял 12 с, период повторения радиоимпульсов – $T_{\Pi} = 3$ мс, а ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности – $\Delta\beta_{0,5} = 4,6^\circ$. Корреляционная функция междупериодных флуктуаций последовательности ОС аппроксимировалась экспоненциальной зависимостью [1-4]. Отношение сигнал-шум (ОСШ) на входе устройства накопления принималось равным $\gamma = 5$ дБ и $\gamma = 15$ дБ.

В качестве показателя, характеризующего на сколько сократятся ПП на выходе устройства междупериодного накопления выбрана эффективность компенсации ПП $\Delta\eta$, введенная в [11]:

$$\Delta\eta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_{\text{кп}} - \theta_0} 100\%, \quad (27)$$

где θ_1 – угловая координата точки пересечения «значимого» порога сигналом на выходе накопителя без компенсации ПП, а θ_2 – с компенсацией ПП; $\theta_{\text{кп}}$ – угловая координата конца пачки ОС на входе накопителя.

В данной статье под «значащим» порогом понимается порог в 5 дБ над средним уровнем шума, при котором полезный сигнал выделяется из шумов (рис. 4 и 5). Под длительностью ПП понимается длительность сигнала от середины пачки ОС на входе накопителя θ_0 до точки снижения сигнала к «значащему» порогу в 5 дБ над средним уровнем шума на выходе накопителя.

На рисунках 4 и 5 представлены флуктуирующие последовательности ОС на входе (зеленая пунктирная линия) и выходе устройства междупериодного накопления, без учета (красная непрерывная линия) и с учетом компенсации ПП (синяя точечная линия), при различном ОСШ на его (устройства накопления) входе и разных комбинациях фильтров накопления (когерентного и некогерентного). Время корреляции междупериодных флуктуаций ОС $\tau_c = 0,4$ с.

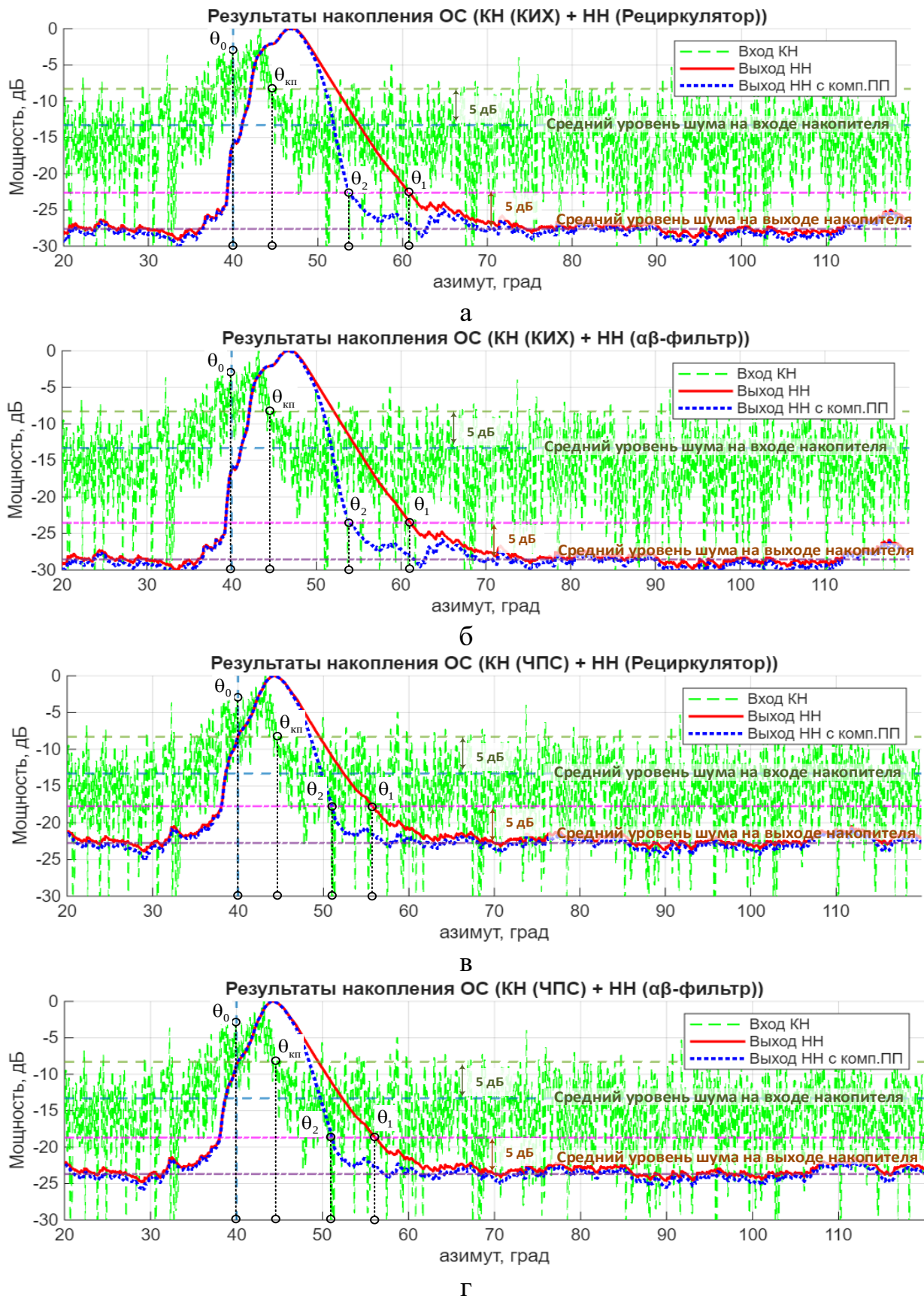


Рис. 4. Выходной сигнал устройства междупериодного накопления при ОСШ на его входе $\gamma = 5$ дБ и реализованного различными комбинациями фильтров когерентного и некогерентного накопления: КИХ фильтр – рециркулятор (а); КИХ фильтр – $\alpha\beta$ -фильтр (б); ЧПС – рециркулятор (в); ЧПС – $\alpha\beta$ -фильтр (г).

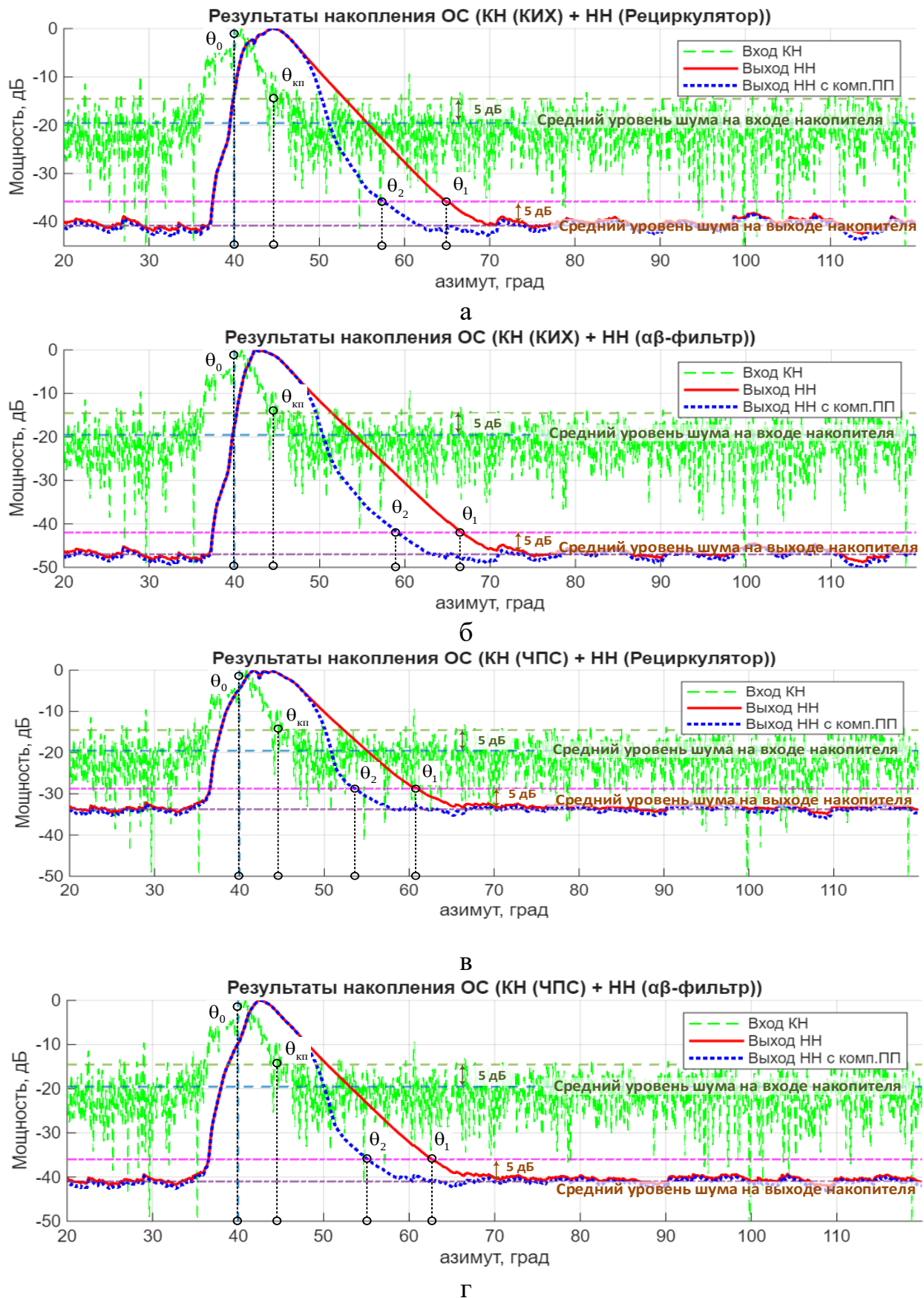


Рис. 5. Выходной сигнал устройства междупериодного накопления при ОСШ на его входе $\gamma = 15$ дБ и реализованного различными комбинациями фильтров когерентного и некогерентного накопления: КИХ фильтр – рециркулятор (а); КИХ фильтр – $\alpha\beta$ -фильтр (б); ЧПС – рециркулятор (в); ЧПС – $\alpha\beta$ -фильтр (г).

В таблицах 1 и 2 представлены результаты оценки конца пачки ОС ($\theta_{\text{кп}}$, θ_1 и θ_2), длительности ПП (без компенсации ПП $\Delta\theta_1$ и с компенсацией ПП $\Delta\theta_2$) и эффективности алгоритма компенсации ($\Delta\eta$) устройства междупериодного накопления при ОСШ на его входе $\gamma = 5$ дБ (таблица 1) и $\gamma = 15$ дБ (таблица 2).

Таблица 1. Результаты оценки эффективности алгоритма компенсации устройства междупериодного накопления при ОСШ на его входе $\gamma = 5$ дБ.

Комбинация фильтров междупериодного накопления (КН+НН)	Угловая координата середины и конца пачки ОС, град				Длительность ПП, град		Эффективность компенсации ПП $\Delta\eta$, %
	θ_0	$\theta_{\text{кп}}$	θ_1	θ_2	$\Delta\theta_1$	$\Delta\theta_2$	
КИХ фильтр + рециркулятор	40	43	60,7	53,8	20,7	13,8	230
КИХ фильтр + $\alpha\beta$ -фильтр			55,6	51,0	15,6	11,0	153
ЧПС + рециркулятор			56,2	51,0	16,2	11,0	173
ЧПС + $\alpha\beta$ -фильтр			61,0	54,0	21,0	14,0	233

Таблица 2. Результаты оценки эффективности алгоритма компенсации устройства междупериодного накопления при ОСШ на его входе $\gamma = 15$ дБ.

Комбинация фильтров междупериодного накопления (КН+НН)	Угловая координата середины и конца пачки ОС, град				Длительность ПП, град		Эффективность компенсации ПП $\Delta\eta$, %
	θ_0	$\theta_{\text{кп}}$	θ_1	θ_2	$\Delta\theta_1$	$\Delta\theta_2$	
КИХ фильтр + рециркулятор	40	43	65,0	57,7	25,0	17,7	243
КИХ фильтр + $\alpha\beta$ -фильтр			66,5	59,3	26,5	19,3	240
ЧПС + рециркулятор			60,4	53,4	20,4	13,4	233
ЧПС + $\alpha\beta$ -фильтр			62,7	55,0	22,7	15,0	257

Анализ рисунков 4 и 5 и таблиц 1 и 2 показал, что при ОСШ $\gamma = 5$ дБ на входе фильтра междупериодного накопления длительность ПП достигает $\Delta\theta_1 = (15,6 - 21)^\circ$, а при $\gamma = 15$ дБ – $\Delta\theta_1 = (20,4 - 26,5)^\circ$. При использовании алгоритмов компенсации (выражения (15) и (24)) величина данного показателя

снижается при ОСШ $\gamma = 5$ дБ до $\Delta\theta_2 = (11,0 - 14,0)^\circ$, а при $\gamma = 15$ дБ – до $\Delta\theta_2 = (13,4 - 19,3)^\circ$. ОСШ на выходе накопителя для различных комбинаций его реализации увеличилось, в среднем, на 20 дБ. Эффективность компенсации ПП в фильтрах междупериодного накопления, адаптивных к корреляционным свойствам флуктуирующей последовательности ОС для различных условий наблюдения (ОСШ, значения коэффициента корреляции, комбинации фильтров и др.) составляет $\Delta\eta = (153 - 257)\%$. Результаты исследования показали, что повышение ОСШ на входе накопителя приводит к значительному росту длительности ПП на его выходе по отношению к среднему уровню шумов.

Выводы о эффективности компенсации ПП на основе математического моделирования подтверждены результатами обработки записей принятого сигнала (более 500) от РЛС кругового обзора метрового диапазона длин волн. Во время проведения полунатурного эксперимента эффективность компенсации ПП $\Delta\eta$ в адаптивных фильтрах междупериодного накопления составила $\Delta\eta = (105 - 360)\%$. Расхождение результатов математического моделирования и полунатурного эксперимента объясняется большим разбросом значений ОСШ на входе накопителя при наблюдении целей с различной эффективной отражающей поверхностью на разных дальностях.

Таким образом, для повышения эффективности устройства междупериодного накопления ОС, реализованного с использованием рекурсивных фильтров необходимо применять разработанные алгоритмы компенсации ПП (выражения (15) и (24)). Результаты математического моделирования и полунатурных экспериментов показали, что для различных условий наблюдения (комбинации реализации накопителя ОС, ОСШ, значения коэффициента корреляции и др.) эффективность компенсации ПП на выходе фильтра накопления составляет $\Delta\eta = (105 - 360)\%$.

Заключение

По результатам статьи можно сделать следующие выводы.

1) Междупериодное адаптивное накопление с использованием рекурсивных фильтров является эффективным средством повышения качества обнаружения сигналов в современных радиолокационных станциях, работающих в условиях интенсивных шумов и ограниченных вычислительных ресурсов. Однако практическая реализация данного подхода сопряжена с негативным влиянием ПП, обусловленных конечным временем установления и накопления сигнала [1, 2, 4].

2) Разработаны алгоритмы компенсации ПП в устройстве междупериодного накопления, реализованного с использованием рекурсивных фильтров и адаптивного к корреляционным свойствам флуктуирующей последовательности ОС. Результаты математического моделирования и полунатурных экспериментов показали, что для различных условий наблюдения эффективность компенсации ПП на выходе фильтра накопления составляет $\Delta\eta = (105 - 360)\%$.

Литература

1. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. – М.: Воениздат. 1983. – 456 с.
2. Охрименко А.Е. Теоретические основы радиолокации. – Минск: МВИЗРУ ПВО, 1976. – 430 с.
3. Ширман Я.Д. и др. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
4. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
5. Горшков С.А., Латушкин В.В., Седышев С.Ю. Основы радиолокации: Конспект лекций. – Минск: ВА РБ. – 2004.

6. Дятко А.А. и др. Использование стационарных фильтров с конечной импульсной характеристикой в интересах междупериодной обработки гауссовских радиолокационных сигналов // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатики. – 2015. – №. 6. – С. 142-146.
7. Толмачева А.С. и др. Применение быстродействующих рекурсивно-сепарабельных фильтров для обработки зашумленных изображений // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2023. – Т. 26. – № 1. – С. 56-62. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2023-26-1-56-62>.
8. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: ООО Бином-Пресс, 2007. – 656 с.
9. Kumar A. Singh R. Patel S. Inter-pulse Accumulation in Pulsed Radar: A Comparative Study of FIR and IIR Filtering for SNR Enhancement // IEEE Access, 2021.
10. Dewald K. et al. IIR Filter Transient Suppression by Signal Shifting // IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON). – 2014. – С. 153-158. <https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2014.6868488>
11. Солонар А.С., Буйлов Е.Н., Лещенко Д.В. Алгоритмы компенсации переходных процессов в рекурсивных фильтрах междупериодного накопления отраженного сигнала // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.4>
12. Охрименко А.Е. Основы обработки и передачи информации. – Минск: МВИЗРУ ПВО, 1990. – 180 с.
13. Белокуров В.А. Когерентное межобзорное накопление флуктуирующих пачек импульсов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – №. 68. – С. 15-20.
14. Кошелев В.И. Белокуров В.А. Межобзорное накопление отраженных радиолокационных сигналов на фоне негауссовских коррелированных помех // Радиотехника и электроника. – 2022. – Т. 67. – №. 4. – С. 361-368.

15. Габец С.А., Седышев С.Ю. Адаптивное к корреляционным характеристикам отраженного сигнала устройство междупериодной обработки // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2015. – №. 4. – С. 100-106.
16. Габец С.А., Седышев С.Ю. Выбор алгоритма самонастройки для адаптивного устройства когерентного накопления отраженного сигнала в приемном устройстве радиолокатора обзора // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2016. – №. 1 (95). – С. 57-63.

Для цитирования:

Солонар А.С., Буйлов Е.Н. Алгоритмы компенсации переходных процессов в фильтрах междупериодного накопления, адаптивных к корреляционным свойствам флуктуирующей последовательности отраженного сигнала // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.5>