

УДК 621.396.96

В.И. Климченко, А.В. Очкуренко

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба*

## УМЕНЬШЕНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ РАДИОИМПУЛЬСОВ ПОСРЕДСТВОМ АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ СПЕКТРОВ ЭХО-СИГНАЛОВ

*Исследуется метод адаптивной коррекции спектров эхо-сигналов, направленный на уменьшение неустойчивости несущей частоты радиоимпульсов в тракте внутривспериментальной обработки сигналов.*

**низкостабильные генераторные приборы, адаптивная коррекция, междупериодная корреляция**

### Введение

Во многих РЛС передающие устройства выполнены на базе магнетронов и других простых, но недостаточно стабильных генераторных приборов СВЧ. Основным типом неустойчивости являются случайные скачки несущей частоты зондирующих сигналов (ЗС). В существующих образцах РЛС типа П-37, П-18, П-19, ПРВ-13, 5Н84А, в которых передающие устройства выполнены на низкостабильных генераторных приборах, уход частоты может достигать 10...20% относительно ширины спектра сигнала. Неустойчивость несущей частоты ЗС разрушает междупериодную корреляцию пассивных помех (ПП), что приводит к недостаточной компенсации пассивных помех (коэффициент подавления не превышает 20 дБ).

Попытки улучшить эффективность работы системы СДЦ за счет применения усовершенствованных алгоритмов компенсации, замены старой системы СДЦ на более совершенную, использования современной элементной базы – не гарантируют повышение защищенности РЛС от ПП. Это обусловлено тем, что не устранен главный декоррелирующий фактор – неустойчивость несущей частоты генераторного прибора. Только после устранения (уменьшения влияния) этого фактора имеет смысл проводить замену систем СДЦ на более совершенные. Таким образом, задача устранения флюктуаций несущей частоты генератора СВЧ является весьма важной.

**Анализ литературы.** Существуют методы стабилизации частоты колебаний генераторных приборов, которые можно разделить на две группы: методы параметрической стабилизации и методы синхронизации и автоподстройки [1, 2]. Первая группа методов направлена на устранение или уменьшение дестабилизирующих факторов. К методам параметрической стабилизации относят: стабилизацию на-

пряжений и токов в цепях питания генераторных приборов, термостатирование и термостабилизацию, оптимизацию режима работы генераторных приборов по минимуму неустойчивости частоты, амортизацию и т.д. Однако в повседневной практике перечисленные меры не оказывают заметного влияния на стабильность несущей частоты.

Методы второй группы направлены на уменьшение неустойчивости частоты, не изменяя при этом величины самих дестабилизирующих факторов. Быстродействие и точность этих методов ограничивается инерционностью генераторного прибора как объекта управления и конечным временем срабатывания элементов системы автоподстройки. Неустойчивость несущей частоты ЗС на выходе передающих устройств, выполненных на низкостабильных генераторных приборах и охваченных кольцом АПЧ, составляет  $10^{-5} \dots 10^{-4}$ , что недостаточно для эффективной работы системы СДЦ.

Устранить флюктуации несущей частоты ЗС можно посредством коррекции спектров эхо-сигналов для каждой посылки импульсов. В [3] изложены результаты использования корректирующего устройства, основанного облучении спектров эхо-сигналов. "Обужающий" фильтр позволяет существенно уменьшить неустойчивость несущей частоты эхо-сигналов и восстановить их междупериодную корреляцию. Фильтр имеет фиксированные параметры и настроен с учетом среднеквадратических значений частотной неустойчивости. Однако значительно более эффективной видится работа адаптивных корректирующих устройств, реагирующих на текущие изменения несущей частоты ЗС и перестраивающих свои параметры в процессе работы.

**Цель статьи.** Исследовать метод адаптивной коррекции спектров эхо-сигналов, оценить эффективность метода по устранению влияния флюктуаций несущей частоты зондирующих сигналов на междупериодную корреляцию эхо-сигналов.

### Результаты исследований

Спектры  $S_i(f)$ , ...,  $S_k(f)$  последовательно излучаемых зондирующих радиоимпульсов обычно сходны по форме; они различаются случайными и независимыми отклонениями несущей частоты от среднего значения ( $\delta f_i$ ,  $\delta f_k$  – соответственно в  $i$ -м и  $k$ -м тактах зондирования). Нестабильность несущей частоты приводит к декорреляции эхо-сигналов. Устранить или ослабить рассматриваемую декорреляцию можно путем коррекции спектра эхо-сигналов.

Этот этап обработки сигналов направлен на то, чтобы совместить в системе СДЦ спектральные составляющие эхо-сигналов смежных периодов зондирования. Для этого в радиолокационный тракт необходимо вводить корректирующие устройства. Их частотные характеристики  $K_i(f)$ , ...,  $K_k(f)$  должны обеспечивать точное совмещение произведений  $S_i(f) \cdot K_i(f)$ , ...,  $S_k(f) \cdot K_k(f)$  для всех совместно обрабатываемых в системе СДЦ посылок. Такая обработка позволит на выходе корректирующего устройства восстановить корреляцию эхо-сигналов.

Описанный выше принцип коррекции реализован в методе адаптивной коррекции спектров эхо-сигналов. Суть метода в том, что в каждом такте зондирования осуществляется смещение частотной характеристики адаптивного фильтра-корректора (АФК) относительно несущей частоты  $f_0$ , на величину частотной расстройки зондирующего сигнала в противоположном направлении (рис. 1). В результате на выходе адаптивного корректора спектры обрабатываемых эхо-сигналов неизменны по форме и средней частоте.

Указанное свойство позволяет при дальнейшей обработке (в частности, в системе СДЦ) использовать одни и те же спектральные составляющие принимаемых сигналов, что приводит к повышению межпериодной корреляции эхо-сигналов.

При работе адаптивного фильтра-корректора обрабатываемые сигналы не меняют ширины спектра, следовательно, точность измерения и разрешающая способность по дальности остаются неизменными.

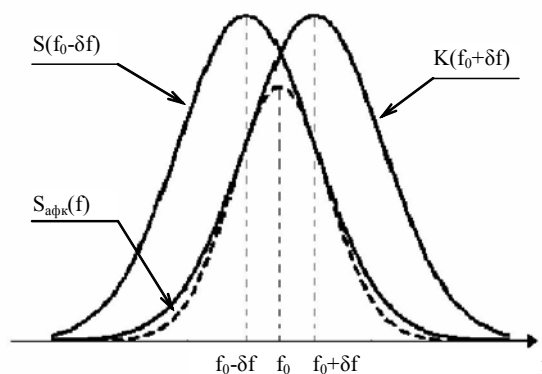


Рис. 1. Спектр сигнала  $S(f_0 - \delta f)$ , АЧХ адаптивного фильтра-корректора  $K(f_0 + \delta f)$  и спектр сигнала на выходе фильтра  $S_{\text{афк}}(f)$

Особенностью применения адаптивного корректора является то, что происходит трансформация нестабильности несущей частоты ЗС в амплитудные межпериодные флюктуации сигнала на выходе фильтра. Так как АФК осуществляет сдвиг своей АЧХ на величину частотной нестабильности, которая измеряется для перестройки фильтра, то эти амплитудные флюктуации легко учесть в дальнейшей обработке.

Учесть эффект трансформации можно с помощью коэффициента  $\alpha(\delta f)$ , зависящего от величины частотной расстройки:

$$\alpha(\delta f) = \frac{q_{\text{с/ш}}(\delta f)}{q_{\text{с/ш}}(0)}, \quad (1)$$

где  $q_{\text{с/ш}}(\delta f)$  – отношение “сигнал/шум” на выходе АФК при уходе несущей частоты генераторного прибора, равном  $\delta f$ ;

$q_{\text{с/ш}}(0)$  – отношение “сигнал/шум” в случае отсутствия рассогласования ( $\delta f = 0$ ).

Коэффициент  $\alpha(\delta f)$  определяет долю полезного сигнала на выходе фильтра-корректора по сравнению со случаем согласованной фильтрации и отсутствия рассогласования.

Анализ влияния АФК на характеристики эхо-сигналов проводился для наиболее типичных форм огибающей зондирующего сигнала: колокольной и прямоугольной. Для этих сигналов коэффициент  $\alpha(\delta f)$  численно равен (табл. 1).

Таблица 1

Эффект трансформации частотной нестабильности ЗС в амплитудные флюктуации сигнала на выходе АФК

$\delta f / \Pi_0, \%$	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70
$\alpha(\delta f)$ Кол. импульс	1	0,985	0,94	0,869	0,779	0,675	0,571	0,369	0,211	0,106	0,047
$\alpha(\delta f)$ Прям. импульс	1	0,987	0,949	0,889	0,808	0,746	0,604	0,378	0,17	0,011	0,0006

\*  $\Pi_0$  – ширина спектра сигнала.

Использование АФК приводит к нежелательному эффекту – уменьшению отношения “сигнал/шум” по сравнению с оптимальным значением

(случай отсутствия рассогласования,  $\delta f = 0$ ). Отношение “сигнал/шум” на выходе адаптивного фильтра-корректора, можно записать [4]:

$$q_{с/ш}(\delta f) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} S_c(f, \delta f) \cdot K(f, \delta f) \cdot df}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} N_0 \cdot K^2(f, \delta f) \cdot df}}, \quad (2)$$

где  $S_c(f, \delta f)$  – спектр зондирующего сигнала, смещенный относительно несущей частоты  $f_0$  на величину  $\delta f$ ;

$\delta f$  – отклонение несущей частоты зондирующего сигнала от номинального значения;

$K(f, \delta f)$  – частотная характеристика фильтра-корректора.

АЧХ адаптивного фильтра-корректора целесообразно выбрать колокольной формы [5]:

$$K(f, \delta f) = \exp\left[-\frac{(2\pi f - 2\pi f_0 - 2\pi\delta f)^2}{\pi^2 \cdot H_0^2} \cdot \ln\left(\frac{1}{d}\right)\right], \quad (3)$$

где  $d$  – уровень, на котором определяется длительность импульса относительно максимума (для прямоугольных и колокольных сигналов  $d$  соответственно равен 0,64 и 0,46);  $H_0$  – полоса пропускания фильтра.

Зависимость отношения "сигнал/шум" от относительной величины частотной расстройки на выходе АФК приведена на рис. 2 (начальное условие: в случае согласованной фильтрации отношение "сигнал/шум" равно 10 дБ).

Оценим влияние АФК на междупериодную корреляцию ПП. Коэффициент междупериодной корреляции ПП  $\rho_T$  в общем случае определяется как результат произведения частных коэффициентов корреляции [3 – 5]:

$$\rho_T = b(\delta f) \cdot \rho_{\delta f} \cdot \rho_{отр}(T_n), \quad (4)$$

где  $b(\delta f)$  – частный коэффициент корреляции, учитывающий изменение мощности ПП на выходе фильтра-корректора и воздействие внутреннего шума приемника;

$\rho_{\delta f}$  – частный коэффициент корреляции, учитывающий частотную нестабильность генераторного прибора;

$\rho_{отр}(T_n)$  – частный коэффициент корреляции, учитывающий хаотическое перемещение мешающих отражателей.

При аппроксимации спектра ПП гауссовским законом [3, 5] коэффициент корреляции  $\rho_{отр}(T_n)$  определяется выражением:

$$\rho_{отр}(T_n) = \exp\left(-2\pi^2 \sigma_{f_{ПП}}^2 T_n^2\right), \quad (5)$$

где  $\sigma_{f_{ПП}}$  – полуширина спектра флюктуаций ПП.

Коэффициент корреляции  $\rho_{\delta f}$ , определяемый частотными нестабильностями генераторного прибора, удобнее выразить в частотной области [4]:

$$\rho_{\delta f} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_c(f) \cdot \dot{S}_c^*(f, \delta f) \cdot K^2(f, \delta f) \cdot \exp(j \cdot 2\pi f \cdot T_n) \cdot df}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S_c^2(f, 0) \cdot K^2(f, \delta f) \cdot df} \cdot \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S_c^2(f, \delta f) \cdot K^2(f, \delta f) \cdot df}} \quad (6)$$

где  $S_c(f, 0)$  – спектр зондирующего сигнала, не смещенный относительно  $f_0$ .

Влияние внутренних шумов приемника и изменение мощности ПП на выходе АФК учитывается с помощью множителя  $b(\delta f)$ :

$$b(\delta f) = \frac{\sigma_{ПП}^2(\delta f)}{\sigma_{ПП}^2(\delta f) + \sigma_{ш}^2(\delta f)} = \frac{q_{ПП/ш}(\delta f)}{q_{ПП/ш}(\delta f) + 1}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{ш}^2(\delta f)$ ,  $\sigma_{ПП}^2(\delta f)$  – соответственно мощность ПП и мощность внутреннего шума приемника на выходе АФК;  $q_{ш/ш}(\delta f)$  – отношение "ПП/шум" на выходе адаптивного фильтра-корректора.

Как видно из (7) величина множителя  $b(\delta f)$ , а следовательно, и величина коэффициента междупериодной корреляции, зависит от отношения "ПП/шум" в тракте обработки.

При исследовании отношения "ПП/шум" учитывалось, что ПП можно рассматривать как стационарный случайный процесс, образованный в результате наложения отражений зондирующего сигнала от большого числа хаотически расположенных и взаимноперемещающихся отражателей [5, 6]. Следовательно, расчет отношения "ПП/шум" необходимо проводить через спектр мощности помехи ( $N_n(f)$ ). Выражение, определяющее отношение "ПП/шум", можно записать:

$$q_{ш/ш}(\delta f) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} N_n(f) \cdot K^2(f, \delta f) \cdot df \right|}{\int_{-\infty}^{\infty} N_0 \cdot K^2(f, \delta f) \cdot df}. \quad (8)$$

Зависимость отношения "ПП/шум" от относительной частотной расстройки  $\delta f/P_0$  на выходе адаптивного фильтра-корректора приведена на рис. 3 (начальное условие: в случае согласованной фильтрации отношение "ПП/шум" равно 40 дБ).

Важно отметить, что зависимости "сигнал/шум" и "ПП/шум" имеют одинаковый характер. Это говорит о том, что адаптивный фильтр-корректор в одинаковой мере воздействует на сигнальную и помеховую составляющие эхо-сигнала.

Так как частные коэффициенты корреляции описываются с помощью (5 – 8), следовательно, можно рассчитать коэффициент междупериодной корреляции (4) и провести анализ результатов воздействия АФК на  $\rho_T$ . Зависимость коэффициента междупериодной корреляции ПП от относительной величины частотной расстройки  $\delta f/P_0$  передатчика СВЧ приведена на рис. 4 ( $q_{ш/ш} = 40$  дБ).

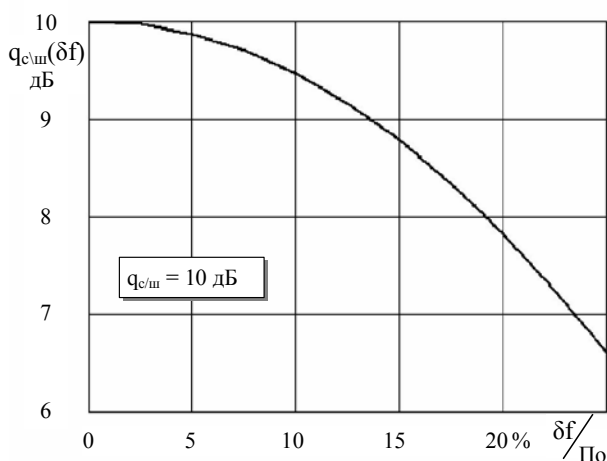


Рис. 2. Отношение “сигнал/шум”

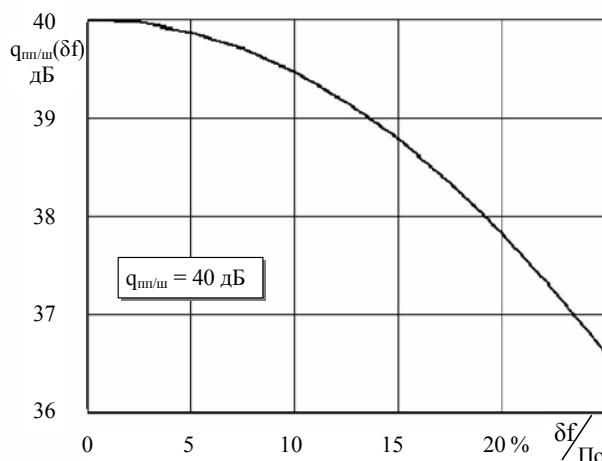


Рис. 3. Отношение “ПП/шум”

Полученные результаты указывают на то, что использование в приемном тракте АФК позволяет уменьшить декоррелирующее влияние частотной нестабильности и существенно повысить междупериодную корреляцию эхо-сигналов.

Характер зависимостей приведенных на рис. 4, а, б позволяет сделать вывод, что выигрыш в коэффициенте междупериодной корреляции вследствие применения АФК носит локальный характер. Существует область уходов несущей частоты ЗС, в пределах которой обеспечивается выигрыш в коэффициенте междупериодной корреляции. Вне этой области метод адаптивной коррекции спектров эхо-сигналов ухудшает междупериодную корреляцию. Так при использовании ЗС с колокольной формой огибающей и отношении  $q_{пн/ш} = 40$  дБ применение

АФК потенциально позволяет получить выигрыш в междупериодной корреляции, если нестабильность несущей частоты ЗС не превышает 84% относительно ширины спектра сигнала.

В случае использования ЗС с прямоугольной формой огибающей применение фильтра-корректора становится неэффективным при 55-процентной расстройке.

Применение АФК может значительно ухудшить междупериодную корреляцию эхо-сигналов. Однако это обстоятельство не повлияет на защищенность РЛС от ПП, поскольку существующие среднеквадратические отклонения несущей частоты ЗС составляют 10...20% относительно ширины спектра сигнала, а эффективность АФК при таких уходах несущей частоты ЗС высока.

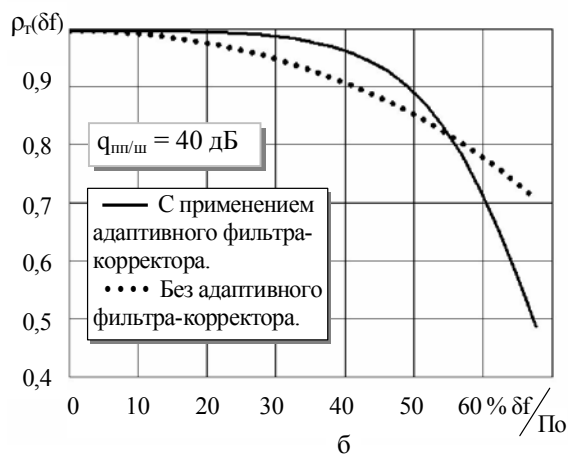
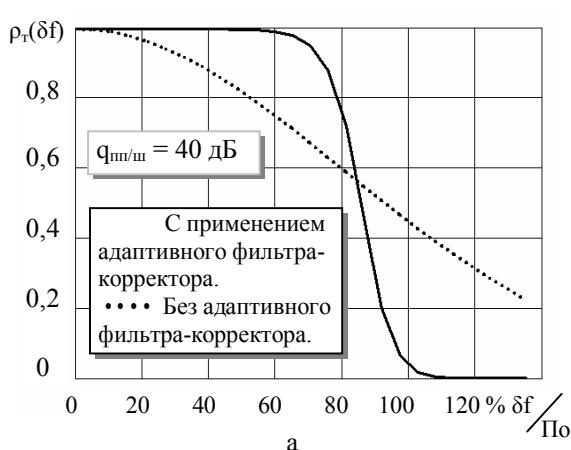


Рис. 4. Зависимость коэффициента междупериодной корреляции эхо-сигналов от частотной нестабильности генераторного прибора при использовании колокольного (а) и прямоугольного (б) импульсов

В целом, результаты расчетов позволяют утверждать, что метод адаптивной коррекции спектров эхо-сигналов достаточно эффективно устраняет влияние флуктуаций несущей частоты зондирующих сигналов на междупериодную корреляцию эхо-сигналов.

Предложенный метод может найти свое применение в классических радиолокаторах, передающие устройства которых выполнены на низкостабильных генераторных приборах.

## Выводы

1. Применение адаптивного фильтра-корректора в приемном тракте РЛС позволяет существенно повысить междупериодную корреляцию эхо-сигналов.

Достижимо практически полное устранение флюктуаций несущей частоты зондирующих радиопульсов.

При этом флюктуации несущей частоты на выходе адаптивного фильтра-корректора трансформируются в амплитудные флюктуации эхо-сигналов.

2. Применение адаптивного фильтра-корректора в приемном тракте позволяет получить выигрыш в междупериодной корреляции эхо-сигналов в ограниченной области уходов несущей частоты зондирующего сигнала.

Величина этой области зависит от интенсивности помех и вида обрабатываемого сигнала. Вне этой области метод адаптивной коррекции ухудшает междупериодную корреляцию эхо-сигналов.

## Список литературы

1. Приемно-передающие устройства радиотехнических систем / Под ред. Ю.Н. Седышева. – Х.: ВИРТА ПВО им. Л.А. Говорова. – 1991. – Ч. 1 – 334 с.

2. Теория и техника генерирования, излучения и приема сигналов / Под ред. Ю.Н. Седышева. – Х.: ВИРТА ПВО им. Л.А. Говорова. – 1986. – 650 с.

3. Литвинов В.В., Климченко В.И., Малышев А.А., Очкуренко А.В. Повышение междупериодной корреляции пассивных помех в РЛС с низкостабильными генераторными приборами // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2004. – № 7. – С. 45-51.

4. Горяинов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Сов. радио, 1980. – 544 с.

5. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Сколник. Т.4. – М.: Сов. радио. – 1979. – 528 с.

6. Бакулев П.А., Степин В.М. Методы и устройства селекции движущихся целей. – М.: Радио и связь. – 1986. – 288 с.

Поступила в редколлегию 3.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.