

УДК 621.396.1.001.24

КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ФЛУКТУИРУЮЩЕГО СИГНАЛА НА ФОНЕ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХ

Ю.В. ГРИДНЕВ, В.А. ПАЛЬЦЕВ

*Физико-технический институт НАН Беларуси
Купревича, 10, Минск, 220141, Беларусь**Военная академия Республики Беларусь
пр. Независимости, 220, Минск, 220057, Беларусь**Поступила в редакцию 16 мая 2012*

Построены и проанализированы компьютерные модели пространственно-временных автокомпенсатора и автокогерентного накопителя в программе MATLAB-SIMULINK.

Ключевые слова: пространственно-временной фильтр, компьютерная модель.

Введение

В РЛС с большой апертурой система междупериодной и междуканальной обработки сигнала на фоне коррелированных помех определяется пространственно-временной (ПВ) матрицей, которую можно представить в виде произведения двух сомножителей [1]:

$$\|R_{kl\chi\lambda}^y\| = \left[E + \left(\|Q_{kl\chi\lambda}^f\| \cdot \|R_{kl\chi\lambda}^x\| \right)^{-1} \right]^{-1} \|Q_{kl\chi\lambda}^f\|, \quad (1)$$

где $\|R_{kl\chi\lambda}^I\| = \|Q_{kl\chi\lambda}^f\|$ – первый этап обработки входного сигнала, который определяется ПВ матрицей фона; $\|R_{kl\chi\lambda}^{II}\| = \left[E + \left(\|Q_{kl\chi\lambda}^f\| \cdot \|R_{kl\chi\lambda}^x\| \right)^{-1} \right]^{-1}$ – второй этап обработки входного сигнала, который определяется ПВ-матрицей полезного сигнала и остатками фона. Учитывая изменения по пространству и времени параметров отраженного сигнала цели и помехи, оптимальная система обработки, согласно выражения (1), должна быть адаптивной, т.е. ее структура и параметры должны подстраиваться под входной сигнал. В настоящее время для решения этой задачи применяют пространственный и временной автокомпенсаторы подавления помехи, а также пространственный и временной автокогерентные накопители полезного сигнала. Недостатком данных технических решений является отсутствие ПВ системы самонастройки (ПВСС), которая бы учитывала пространственно-временную корреляцию сигнала цели и помехи и за счет этого повышала бы эффективность подавления сигнала помехи и накопление полезного сигнала [2, 3].

Алгоритмы формирования сигналов ошибок ПВ систем самонастройки

ПВ матрицу фона $\|Q_{kl\chi\lambda}^f\|$ за счет ПВ корреляционной связи можно представить тремя сомножителями $\|Q_{kl\chi\lambda}^f\| = \|Q_{kl}^f\| \cdot \|Q_{\chi\lambda}^f\| \cdot \|Q_{k\lambda}^{f1}\|$, которые учитывают подавление и декорреляцию

фона по времени, углу и по времени-углу. Квадрат амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ПВ фильтра подавления помехи, полученного путем преобразования Фурье матрицы $\|Q_{kl\chi\lambda}^f\|$, обратно пропорционален междупериодному $S_{kl}^f(\omega T_n)$, междуканальному $S_{\chi\lambda}^f(\omega_y T_y)$ и междупериодно-междуканальному $S_{k\lambda}^{f1}(\omega T_n, \omega_y T_y)$ энергетическим спектром фона

$$|K^I(\omega T_n, \omega_y T_y)|^2 = \sum_{k-l} \sum_{\chi-\lambda} Q_{kl\chi\lambda}^f e^{-j[(k-l)\omega T_n + (\chi-\lambda)\omega_y T_y]} = \frac{1}{S_{kl}^f(\omega T_n)} \cdot \frac{1}{S_{\chi\lambda}^f(\omega_y T_y)} \cdot \frac{1}{S_{k\lambda}^{f1}(\omega T_n, \omega_y T_y)}.$$

В качестве модели междуканального пространственного фильтра подавления рассмотрим адаптивную антенную решетку (ААР) в виде двухканальной схемы, представленной на рис. 1,а. Регулируемый «комплексный вес» $\dot{k}_{\chi-1}$ ААР охвачен комплексной системой автоподстройки, в которой на выходе дискриминатора формируется сигнал ошибки вида $U_{\text{соП}} = K_d [\dot{U}_{\chi-1}^* (\dot{U}_{\chi} - \dot{k}_{\chi-1}^f \dot{U}_{\chi-1})] = 2\sigma_{\text{п}}^2 K_d [r_{\text{п}} e^{-j\Delta\Psi_{\text{п}}} - k_{\chi-1}^f e^{-j\Delta\Psi_{\text{пкор}}}].$

В качестве модели междупериодного временного фильтра подавления рассмотрим временной автокомпенсатор (АК) (рис. 1,б). Его регулируемый «комплексный вес» $\dot{\alpha}$ охвачен комплексной системой автоподстройки, в которой на выходе дискриминатора формируется сигнал ошибки вида $U_{\text{соВ}} = K_d [\dot{U}_{k-1}^* (\dot{U}_k - \dot{\alpha} \dot{U}_{k-1})] = 2\sigma_{\text{п}}^2 K_d [r_{\text{в}} e^{-j\Delta\Psi_{\text{в}}} - \alpha e^{-j\Delta\Psi_{\text{вкор}}}].$

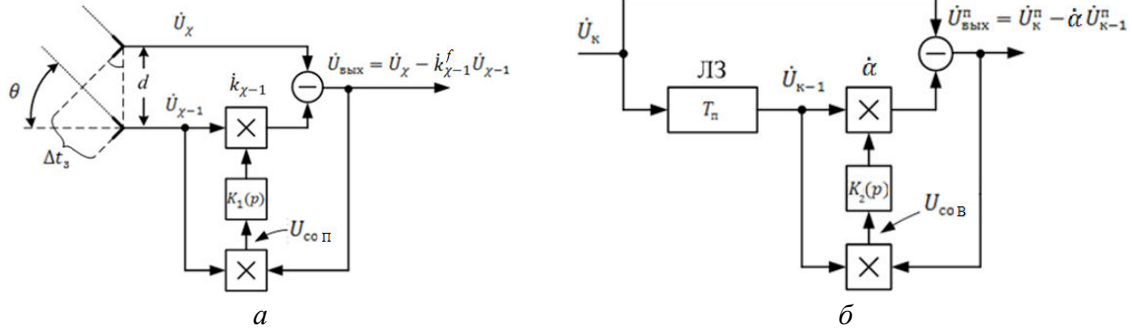


Рис. 1. Модели автокомпенсаторов сигнала помехи: а – междуканальный пространственный фильтр; б – междупериодный временной фильтр

В качестве модели ПВ-фильтра подавления предлагается к известным адаптивным фильтрам подавления помехи применить дополнительную ПВ комплексную систему автоподстройки с «ПВ комплексным весом» $\dot{v} = v e^{-j\Delta\Psi_{\text{ПВ}}} = \dot{k}^f \dot{\alpha}$, который включает пространственный $\dot{k}^f$ и временной $\dot{\alpha}$ вес. Сигнал ошибки такой ПВ комплексной цепи самонастройки должен определяться следующим выражением [4]:

$$U_{\text{соПВ}} = [r_{\text{ПВ}} e^{-j\Delta\Psi_{\text{ПВ}}} - v e^{-j\Delta\Psi_{\text{ПВкор}}}].$$

Второй этап обработки входного сигнала $\dot{y}_{k\lambda}$ заключается в накоплении полезного когерентно-импульсного сигнала цели $x_{k\lambda} e^{j\theta_{k\lambda}}$ на декоррелированном фоне, элементы центральной диагональной матрицы которого определяются отношением сигнал/фон μ .

Матрица второго этапа обработки (см. выражение (1)) с учетом подавленного сигнала помехи имеет вид

$$\|R_{kl\chi\lambda}^{\text{II}}\| = \left[E + \left\| \mu r_{kl\chi\lambda}^x e^{-j[(k-l)\Delta\theta_{\text{в}} + (\chi-\lambda)\Delta\theta_{\text{п}}]} \right\|^{-1} \right]^{-1},$$

что указывает на когерентное накопление флуктуирующего сигнала с относительной интенсивностью μ на фоне декоррелированной помехи. Квадрат АЧХ второго этапа обработки после дискретного преобразования Фурье от элементов корреляционной матрицы сигнала цели можно записать в виде

$$\left| K_{\text{опт}}^H(\omega T_n, \omega_y T_y) \right|^2 = \frac{\mu S_{kl}^x(\omega T_n) S_{\chi\lambda}^x(\omega_y T_y) S_{\text{ПВ}}^x(\omega T_n, \omega_y T_y)}{1 + \mu S_{kl}^x(\omega T_n) S_{\chi\lambda}^x(\omega_y T_y) S_{\text{ПВ}}^x(\omega T_n, \omega_y T_y)},$$

где $S_{kl}^x(\omega T_n)$, $S_{\chi\lambda}^x(\omega_y T_y)$, $S_{\text{ПВ}}^x(\omega T_n, \omega_y T_y)$ – энергетические спектры междупериодных, междуканальных и междупериодно-междуканальных дискретных значений сигнала цели.

В качестве модели междуканального фильтра накопления используем ААР в виде двухканальной схемы (рис. 2,а). Регулируемый «комплексный вес» $\dot{k}_{\chi-1}^x$ ААР охвачен комплексной системой автоподстройки, в которой на выходе дискриминатора формируется сигнал ошибки вида $U_{\text{соПх}} = 2\sigma_{\text{п}}^2 K_{\text{д}} \left[r_{\text{п}} e^{-j\Delta\theta_{\text{п}}} - k_{\chi-1}^x e^{-j\Delta\theta_{\text{пкор}}} \right]$.

В качестве модели междупериодного фильтра накопления рассмотрим автокогерентный накопитель (АКН) на базе рециркулятора с комплексной системой автоподстройки, которая формирует «комплексный вес» $\dot{\beta} = \beta e^{-j\Delta\theta_{\text{Вхкор}}}$ в задержанном канале (рис. 2,б). Регулируемый «комплексный вес» $\dot{\beta}$ управляется комплексной системой автоподстройки, в которой на выходе дискриминатора (схемы перемножения) формируется сигнал ошибки вида $U_{\text{соВх}} = K_{\text{д}} \left[\dot{U}_{k-1}^* (\dot{U}_k - \dot{\beta} \dot{U}_{k-1}) \right] = 2\sigma_{\text{п}}^2 K_{\text{д}} \left[r_{\text{Вх}} e^{-j\Delta\theta_{\text{Вх}}} - \beta e^{-j\Delta\theta_{\text{Вхкор}}} \right]$.

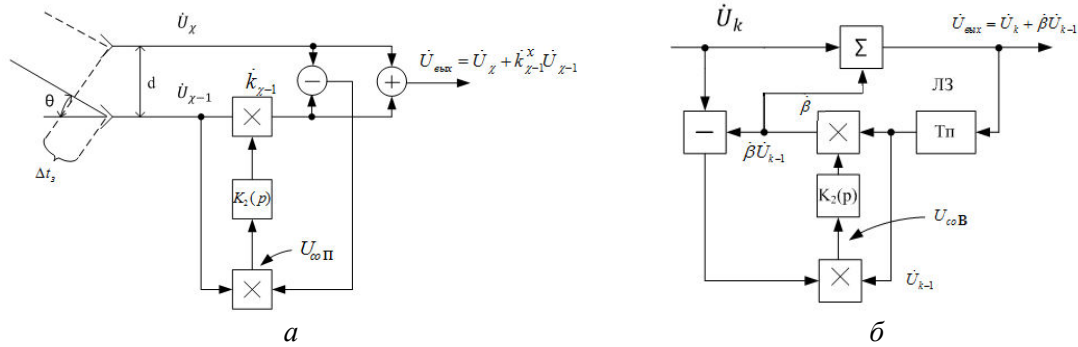


Рис. 2. Модели АКН сигнала цели: а – междуканальный пространственный АКН; б – междупериодный временной АКН

В качестве модели ПВ-фильтра накопления предлагается к известным адаптивным фильтрам накопления полезного сигнала применить дополнительную ПВ комплексную систему автоподстройки с «ПВ комплексным весом», который должен включать два веса: пространственный $\dot{k}^x$ и временной $\dot{\beta}$ и определяться выражением: $\dot{v} = v e^{-j\Delta\psi_{\text{ПВ}}} = \dot{k}^x \dot{\beta}$. Сигнал ошибки такой ПВ-системы автоподстройки должен соответственно определяться следующим выражением [5]:

$$U_{\text{соПВ}} = \left[r_{\text{ПВ}} e^{-j\Delta\theta_{\text{ПВ}}} - v e^{-j\Delta\theta_{\text{ПВкор}}} \right].$$

Компьютерные модели адаптивных систем ПВ обработки сигнала

Для проверки работоспособности и эффективности рассмотренных ПВ автокомпенсатора (ПВ-АК) и автокогерентного накопителя (ПВ-АКН) предложена их компьютерная модель в программе MATLAB-SIMULINK (рис. 3). Компьютерная модель включает в себя следующие подсистемы:

- модель формирования пакета из 10 радиоимпульсов цели, помехи и непрерывного шума (Block1);
- модель последовательно включенных пространственного АК (ПАК) и временного АК (ВАК) с коммутируемой ПВ системой самонастройки (ПВ автокомпенсатор);
- модель последовательно включенных пространственного АКН (ПАКН) и временного АКН (ВАКН) с коммутируемой ПВ системой самонастройки (ПВ автокогерентный накопитель);

- средства визуализации результатов моделирования (СВРМ).

Block1 включает цепи формирования пакета радиопульсов сигнала цели, помехи и шума. Сигналы с выхода Block1 можно подавать на ПВ автокомпенсатор и ПВ автокогерентный накопитель. Контроль процесса моделирования осуществляется с помощью блоков отображения информации (СВРМ) Scope1 и Scope2, а также спектроанализаторов Power Spectral Density 1,2,3.

Основная цель моделирования – показать положительный эффект применения ПВ системы самонастройки в ПВ-АК и ПВ-АКН. Моделирование ПВ-АК проводилось в два этапа. При первом этапе из Block1 на вход ПВ-АК с выключенной ПВ системой самонастройки подается пакет сигнала помехи и «белый» шум (рис. 4,а,б). Результаты подавления сигнала помехи на выходах пространственного АК и временного АК показаны на рис. 5,а,д соответственно. Спектр скомпенсированного сигнала помехи на выходе пространственного АК показан на рис. 5,в, а спектр сигнала на выходе временного АК – на рис. 5,ж.

При втором этапе процесс моделирования ПВ-АК повторяется, но уже при включенной ПВ-системе самонастройки. Результаты подавления сигнала помехи на выходах пространственного АК и временного АК показаны на рис. 5,б,е соответственно. Спектр скомпенсированного сигнала помехи на выходе пространственного АК показан на рис. 5,з, а спектр сигнала на выходе временного АК – на рис. 5,з.

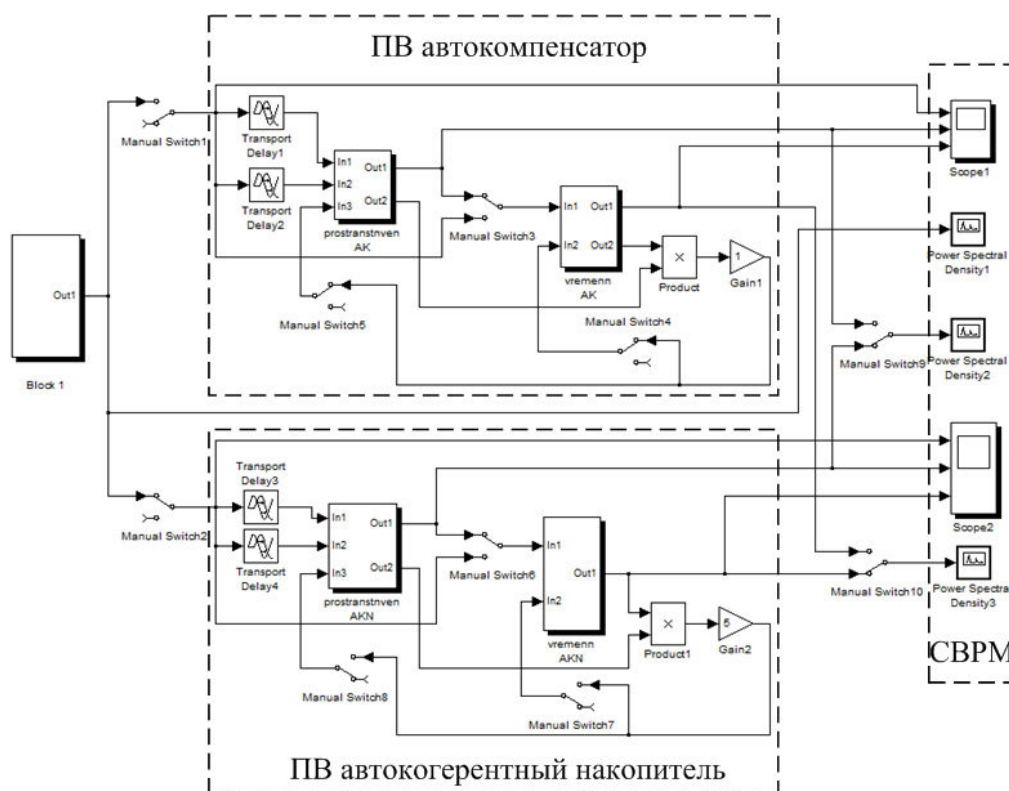


Рис. 3. Компьютерная модель ПВ-АК и ПВ-АКН в программе MATLAB-SIMULINK

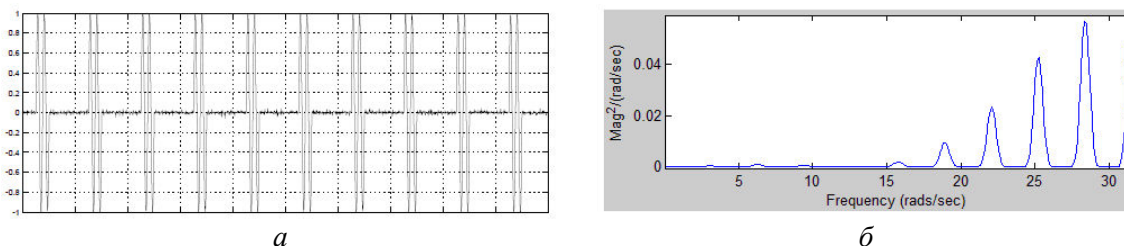


Рис. 4. Сигнал с выхода Block1 и его спектр: а – радиосигнал помехи и шума; б – энергетический спектр помехи

Сравнительный анализ спектров сигнала помехи показывает, что при включенной ПВ-системе самонастройки гребенчатый спектр помехи на выходе пространственного АК (рис. 5, *з*) еще сохраняет гребенчатый вид, а на выходе временного АК (рис. 5, *з*) помеха декоррелируется и имеет вид спектра белого шума. Сравнение спектров (рис. 5, *ж, з*) показывает, что при включении ПВ-системы самонастройки мощность помехи уменьшилась с $2 \cdot 10^{-5}$ до $4 \cdot 10^{-6}$ (в 5 раз).

Моделирование ПВ-АКН также проводилось в два этапа. При первом этапе из Block1 на вход ПВ-АК с выключенной ПВ-системой самонастройки подается пакет сигнала цели и «белый» шум (рис. 6, *а, б*).

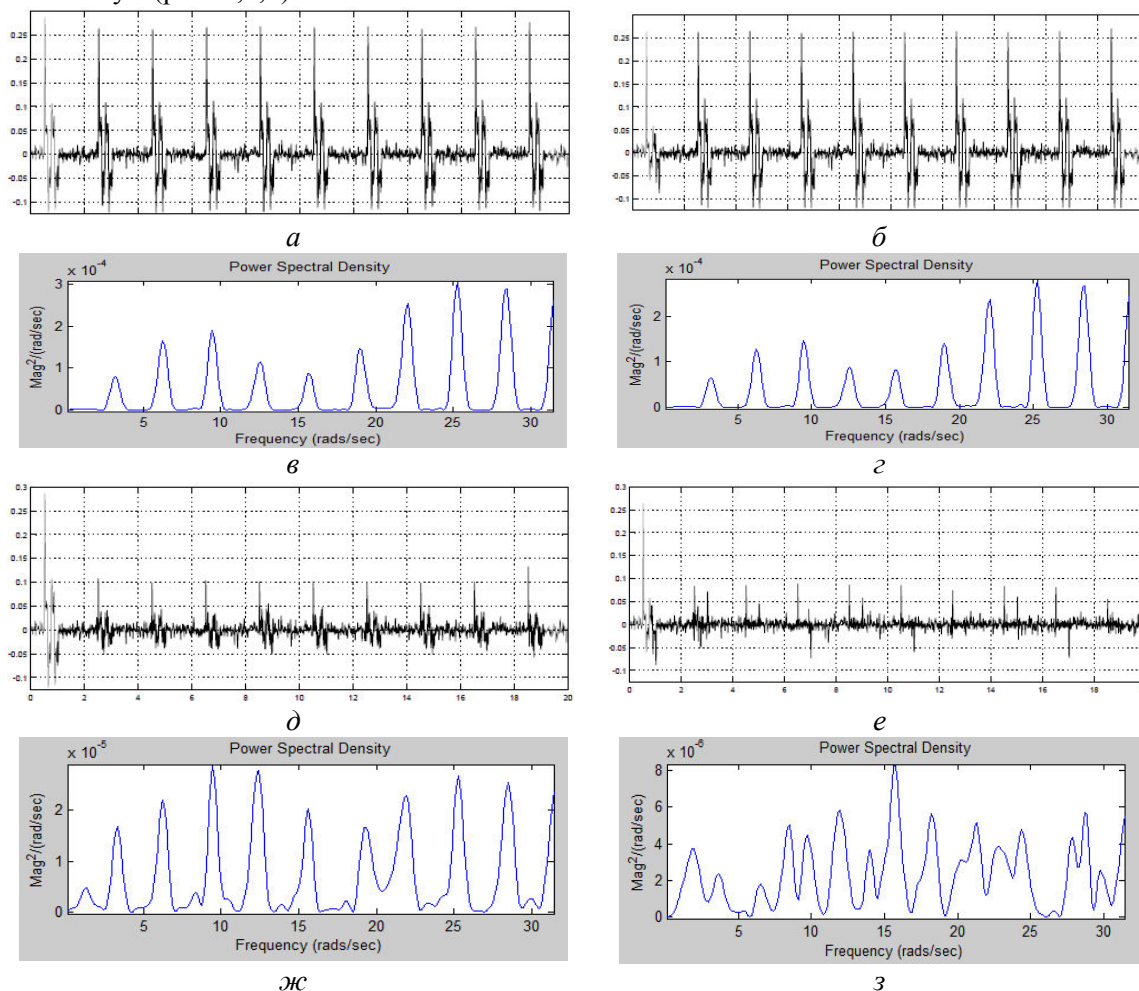


Рис. 5. Сигналы помехи и их спектры: *а* – радиосигнал помехи с выхода ПАК без ПВСС; *б* – радиосигнал помехи с выхода ПАК с ПВСС; *в* – энергетический спектр помехи на выходе ПАК без ПВСС; *г* – энергетический спектр помехи на выходе ПАК с ПВСС; *д* – радиосигнал помехи с выхода ВАК без ПВСС; *е* – радиосигнал помехи с выхода ВАК с ПВСС; *ж* – энергетический спектр помехи на выходе ВАК без ПВСС; *з* – энергетический спектр помехи на выходе ВАК с ПВСС

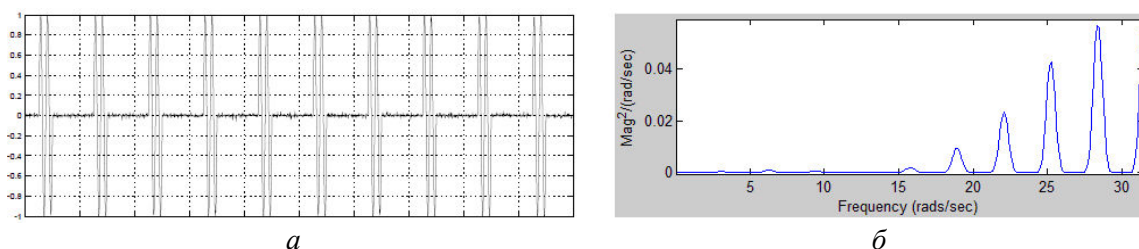


Рис. 6. Сигнал с выхода Block1 и его спектр

Результаты накопления сигнала помехи на выходах пространственного АКН и временного АКН показаны на рис. 7, *а, д*. Спектр накопленного сигнала цели на выходе пространственного АКН показан на рис. 7, *в*, а спектр сигнала на выходе временного АКН – на рис. 7, *ж*.

При втором этапе процесс моделирования ПВ-АК повторяется, но уже при включенной ПВ-системе самонастройки. Результаты накопления сигнала цели на выходах пространственного АКН и временного АКН показаны на рис. 7,б,е соответственно. Спектр накопленного сигнала цели на выходе пространственного АКН показан на рис. 7,з, а спектр сигнала на выходе временного АКН – на рис. 7,3.

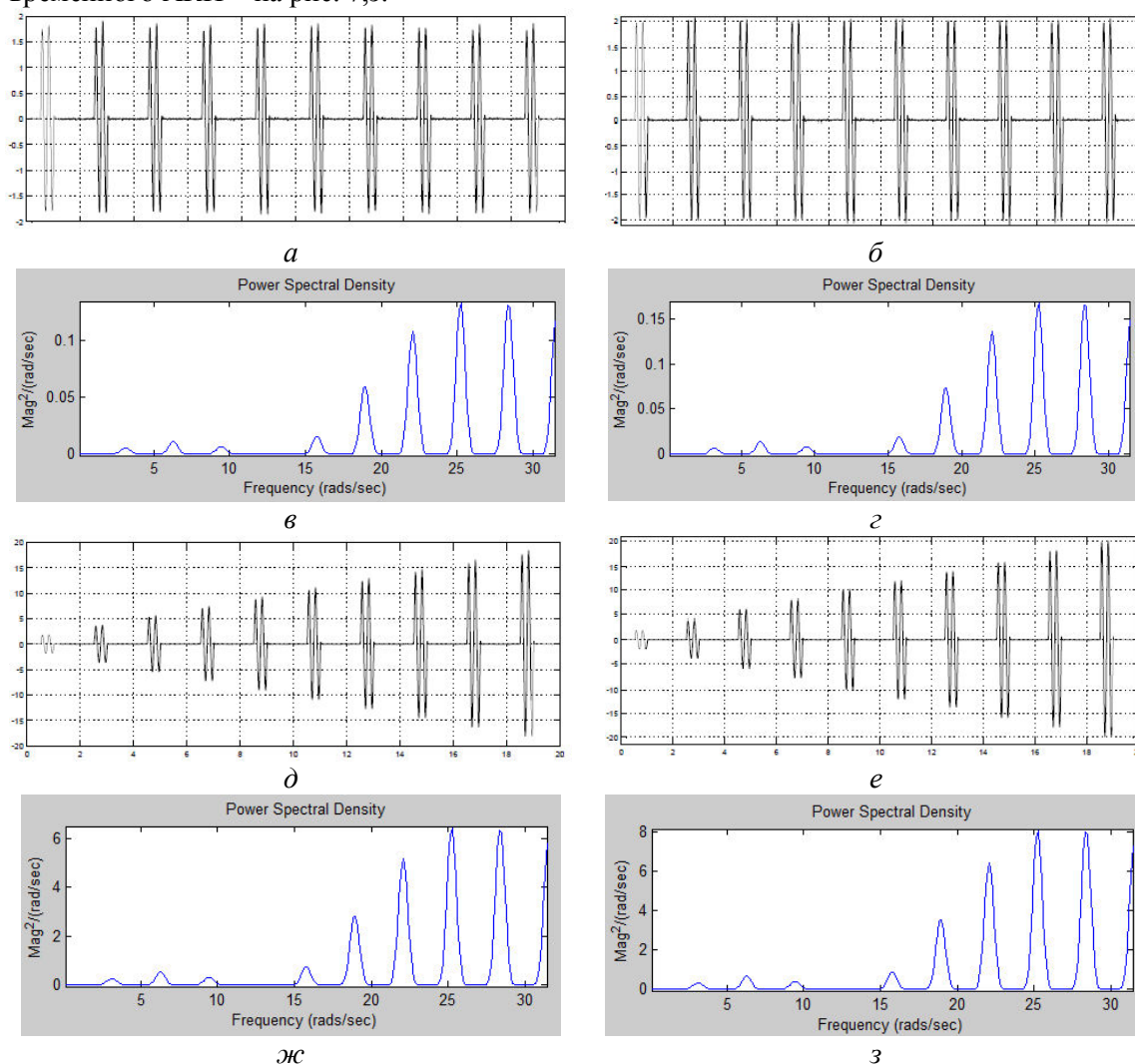


Рис. 7. Сигналы цели и их спектры: а – радиосигнал цели с выхода ПАКН без ПВСС; б – радиосигнал цели с выхода ПАКН с ПВСС; в – энергетический спектр сигнала цели на выходе ПАКН без ПВСС; г – энергетический спектр сигнала цели на выходе ПАКН с ПВСС; д – радиосигнал цели с выхода ВАКН без ПВСС; е – радиосигнал цели с выхода ВАКН с ПВСС; ж – энергетический спектр сигнала цели на выходе ВАКН без ПВСС; з – энергетический спектр сигнала цели на выходе ВАКН с ПВСС

Сравнительный анализ спектров сигнала цели (рис. 7,ж,з) показывает, что при включении ПВ системы самонастройки мощность сигнала цели увеличилась в 1,3 раза.

Заключение

Применение в ПВ-АК и ПВ-АКН дополнительной ПВ-системы самонастройки приводит к увеличению коэффициента компенсации помехи и коэффициента накопления полезного сигнала.

COMPUTER MODELS OF ADAPTIVE SYSTEMS OF SPACE-TIME PROCESSING OF THE FLUCTUATING SIGNAL AGAINST THE CORRELATED HINDRANCES

Y.V. GRIDNEV, V.A. PALTSEV

Abstract

Computer models of the space-time auto compensator and the auto coherent drive in the MATLAB-SIMULINK program are constructed and analyzed.

Список литературы

1. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и РЭБ. М., 1983.
2. *Коростелев А.А.* Пространственно-временная теория радиосистем. М., 1987.
3. *Монзинго Р.А., Миллер Т.У.* Адаптивные антенные решетки. М., 1986.
4. *Гриднев Ю.В.* Авторское свидетельство SU №1632209
5. *Гриднев Ю.В., Пальцев В.А., Осипова Д.Н.* Патент на полезную модель BY №7898 U.