

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНУТРИСИСТЕМНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА КАЧЕСТВО РЕШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЗАДАЧ В АДАПТИВНОЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Теоретически оценивается влияние неидентичности частотных характеристик приемных каналов в многоканальной адаптивной радиотехнической системе с антенной решеткой и основным (опорным) каналом на качество подавления внешних шумовых помех. Полученные теоретические результаты используются для оценки отношения сигнал-шум в основном канале при имитационном моделировании влияния внутрисистемных возмущений на корреляцию радиолокационных дальностных портретов с идеальными портретами и могут использоваться для прогнозирования качества радиолокационного распознавания объектов на основе известных зависимостей.

Ключевые слова: внутрисистемные возмущения, шумовая помеха, адаптивная антенная решетка, коэффициент подавления, широкополосный сигнал, радиолокационный дальностный портрет.

Вступление

Адаптивные радиотехнические системы (РТС) обладают возможностью перестраивать свои характеристики, приспособившись к окружающей среде, включая помеховую обстановку. При этом для повышения помехоустойчивости РТС широко используются адаптивные антенные решетки (ААР), позволяющие формировать провалы в диаграмме направленности в направлении на источники внешних помех.

В отличие от устранимых внешних помех случайные внутрисистемные возмущения принципиально неустранимы. Поэтому, рассматривая проблему адаптации к внешней среде, необходимо дополнительно оценивать возможное влияние на результат решения информационной задачи внутрисистемных возмущений, в том числе, порождаемых неидентичностью частотных характеристик приемных каналов. Двумерная задача рассмотрена в [1]. Одной из таких задач является распознавание радиолокационных объектов. Зависимости качества распознавания воздушных целей от отношения сигнал-шум для различных алфавитов классов приведены, например, в [2, 3]. При этом одним из наиболее информативных признаков является корреляционная сумма радиолокационных дальностных портретов (РЛДП) с эталонными РЛДП.

Целью работы является получение оценок влияния неидентичности частотных характеристик приемных каналов ААР на качество подавления помех и решения информационных задач, связанных с распознаванием класса объекта, для более общего случая N -мерной РТС.

Изложение основного материала

Рассмотрим адаптивную РТС с антенной решеткой и основным (опорным) каналом, который выделен для приема полезной информации. Структура такой системы приведена на рис. 1, где обозначены частотные характеристики каналов приема $G_i(\omega)$, $i = \overline{0, N}$. Здесь полагаем, что действующие на систему случайные процессы представляют собой шумовые помехи.

В установленном режиме оптимальный по критерию минимума выходной мощности помехи параметрический вектор \mathbf{W}_{opt} адаптивной системы, приведенной на рис. 1, определяется через взаимные корреляционные моменты помехи $\mathbf{A}_{\text{нш}} = M[\mathbf{U}(t)\mathbf{U}^T(t)]$, $\boldsymbol{\alpha} = M[u_0(t)\mathbf{U}(t)]$ и равняется $\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{A}_{\text{нш}}^{-1}\boldsymbol{\alpha}$. Выходная мощность помехи, в этом случае, имеет минимальную величину. Очевидно, что минимальный уровень помехи на выходе адаптивной системы, при прочих равных условиях, зависит от вектора взаимной корреляции скалярного процесса $u_0(t)$ в опорном канале и наблюдаемого на входе антенной решетки векторного случайного процесса $\mathbf{U}(t)$: $\boldsymbol{\alpha} = M[u_0(t)\mathbf{U}(t)]$.

Скалярный процесс $y_0(t)$ на выходе фильтра с импульсной характеристикой $h_0(t)$ представляет собой одномерную свертку

$$y_0(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_0(t, \tau) u_0(\tau) d\tau = h_0(t) * u_0(t).$$

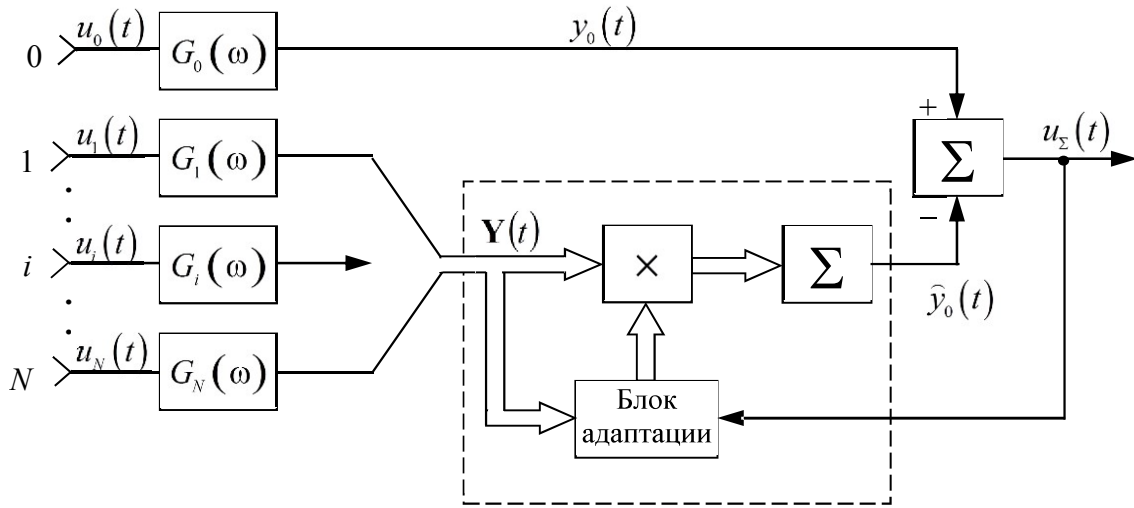


Рисунок 1 – Адаптивна радіотехнічна система з антенною решіткою і основним каналом

В свою очередь N -мерный векторный процесс $\mathbf{Y}(t)$ на выходе решетки представляет результат многомерной свертки

$$\mathbf{Y}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{H}(t, \tau) \mathbf{U}(\tau) d\tau = \mathbf{H}(t) * \mathbf{U}(t).$$

Одномерная $y_0(t)$ и многомерная $\mathbf{Y}(t)$ свертки представляют собой трансформанты Фурье в соответствующих преобразованиях:

$$y_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F[h_0(t) * u_0(t)] e^{j\omega t} d\omega;$$

$$\mathbf{Y}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F[\mathbf{H}(t) * \mathbf{U}(t)] e^{j\omega t} d\omega,$$

где F – обозначает оператор Фурье-преобразования.

Вектор взаимной корреляции процессов $y_0(t)$ и $\mathbf{Y}(t)$ на выходе частотных фильтров можно определить как

$$\mathbf{\alpha}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_0(\omega) \mathbf{S}^*(\omega) G_0^*(\omega) \mathbf{G}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega,$$

где $S_0(\omega)$ – спектр комплексной огибающей скалярного процесса $u_0(t)$;

$\mathbf{S}(\omega)$ – спектр комплексных огибающих векторного процесса $\mathbf{U}(t)$;

$G_0(\omega)$ – комплексная частотная характеристика основного (опорного) канала приема;

$\mathbf{G}(\omega)$ – матрица комплексных частотных характеристик каналов решетки;

Произвольная i -я компонента $\alpha_i(\tau)$ N -мерного вектора взаимных корреляционных моментов $\mathbf{\alpha}(\tau) = M[\alpha_i(t)]$, $i = \overline{1, N}$, равна

$$\begin{aligned} \alpha_i(\tau) &= M[y_0(t) y_i(t, \tau)] = \\ &= N_m \int_{-\infty}^{+\infty} G_0(\omega) G_i(\omega) e^{j\omega(\tau+\tau)} d\omega \end{aligned}$$

где $\tau_i = i \Delta\tau$.

Модуль соответствующего коэффициента корреляции имеет значение

$$\rho_{0i}(\tau) = \frac{|\alpha_i(\tau)|}{\sigma_0 \sigma_i} = \frac{1}{\sigma_0 \sigma_i} \sqrt{\text{Re}^2 \alpha_i(\tau) + \text{Im}^2 \alpha_i(\tau)}, \quad (1)$$

где $\sigma_0^2 = M[u_0^2(t)]$; $\sigma_i^2 = M[u_i^2(t)]$ – дисперсии помехи на выходах основного и i -го канала решетки, соответственно.

Примем, что частотные характеристики каналов решетки аппроксимируются гауссовыми кривыми и запишем выражения для частотных характеристик основного $G_0(\omega)$ и произвольного i -го канала решетки $G_i(\omega)$:

$$G_0(\omega) = \exp \left[- \left(\frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega_0} \right)^2 - j(\omega - \omega_0)t_0 \right];$$

$$G_i(\omega) = \exp \left[- \left(\frac{\omega - \omega_0 - \delta\omega_0}{\sigma_\Delta \Delta\omega_0} \right)^2 - j(\omega - \omega_0 - \delta\omega_0)t_i \right],$$

где $\Delta\omega_0$ – ширина полосы пропускания основного канала решетки;

t_0 и t_i – постоянные группового запаздывания, соответственно, в основном и i -ом каналах решетки;

$\delta \omega_0$ – расстройка по средней частоте канала;

$\sigma_\Delta = \Delta \omega_i / \Delta \omega_0$ – коэффициент рассогласования полос пропускания i -го $\Delta \omega_i$ и основного $\Delta \omega_0$ каналов приема

Если полагать, что дисперсия помехи во всех каналах одинакова, то после подстановки выражений $G_0(\omega)$ и $G_i(\omega)$ в (1) и выполнения ряда преобразований получим результат [1, 4, 5]:

$$\rho_{oi} = \frac{q_n}{1+q_n} \sqrt{\frac{2\sigma_\Delta}{1+\sigma_\Delta}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{1+\sigma_\Delta^2} \left[(\sigma_\Delta \sigma_\omega)^2 + \frac{\Delta \omega_0^2 (\tau + \delta \tau_i)^2}{4} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $\sigma_\omega = \delta \omega_0 / \Delta \omega_0$ – относительная расстройка по средней частоте;

$\delta \tau_i = t_0 - t_i + \tau_i$ – временной сдвиг наблюдаемых процессов, обусловленный как разносом в пространстве фазовых центров основного (информационного) и i -го каналов решетки, так и различной величиной группового запаздывания процессов в этих каналах.

Выражение (2) представляет зависимость модуля коэффициента корреляции между основным и произвольным каналом решетки (рис. 1) от неидентичности по полосе пропускания, а также от рассогласования по резонансной частоте и времени.

Оценим качество адаптации РТС с N -мерной ААР адаптирующейся к внешней помеховой ситуации по критерию минимума выходной мощности помехи в установившемся режиме. Для этого воспользуемся обобщенным показателем: $\delta = J[\mathbf{w}_{\text{corr}}(\mathbf{X})] / J[\mathbf{w}_{\text{opt}}(\mathbf{X}, \Delta \mathbf{X})]$ [6]. Присутствующие в этом показателе результаты согласованной обработки и обработки оптимальной по критерию минимума мощности помехи на выходе теперь будут равны: $J[\mathbf{w}_{\text{corr}}(\mathbf{X})] = P_{\text{ш}}$; $J[\mathbf{w}_{\text{opt}}(\mathbf{X}, \Delta \mathbf{X})] = A_{00} / K_n(\sigma_\Delta, \sigma_f, \sigma_\tau)$, где $K_n(\sigma_\Delta, \sigma_f, \sigma_\tau)$ – коэффициент подавления помехи. Таким образом, в условиях внутрисистемных декоррелирующих факторов, качество адаптации системы (рис. 1) к воздействию внешних помех определяется величиной отношения

$$\delta = \frac{|\tilde{\mathbf{A}}(N, N)|}{(1+q_n) |\tilde{\mathbf{B}}(N+1, N+1)|}, \quad (3)$$

где $\tilde{\mathbf{A}}(N, N) = \tilde{\mathbf{A}} \in \mathbf{R}^{N \times N}$; $\tilde{\mathbf{B}}(N+1, N+1) = \tilde{\mathbf{B}} \in \mathbf{R}^{(N+1) \times (N+1)}$.

На рис. 2, 3 приведены построенные по выражению (3) зависимости показателя качества адаптации системы с N -мерной решеткой (рис. 2) от величины относительных расстроек каналов приема по времени σ_τ и центральной частоте σ_f , когда отношение помеха-шум имеет значение $q_n = 30$ дБ, а размерность решетки равна: а) $N=10$; б) $N=50$.

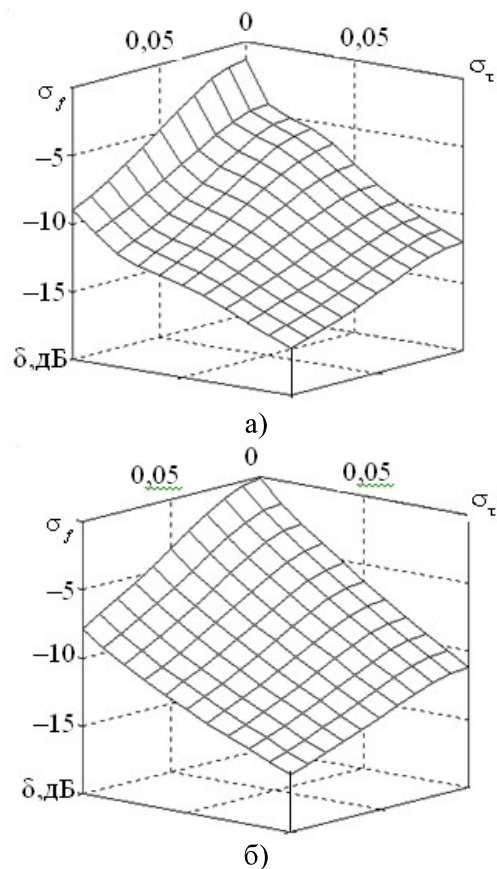


Рисунок 2 – Влияние расстроек каналов по несущей частоте σ_f и времени σ_τ на качество адаптации системы с N -мерной решеткой при $\sigma_\Delta = 1$: а) $N=5$; б) $N=50$

Поверхности на рис. 2 построены, когда рассогласование каналов по полосе пропускания отсутствует: $\sigma_\Delta = 1$. Результатам на рис. 3 соответствует коэффициент рассогласования полос, равный $\sigma_\Delta = 0,95$.

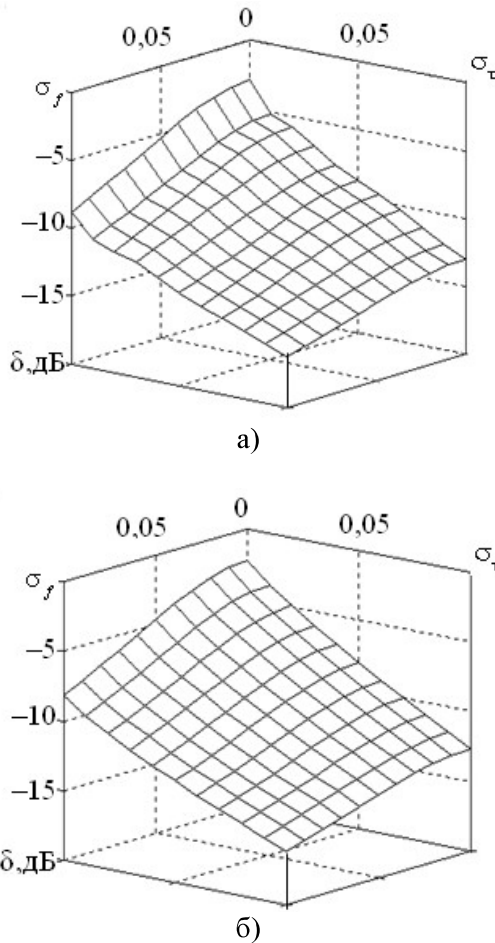


Рисунок 3 – Влияние расстроек каналов по несущей частоте σ_f и времени σ_τ на качество адаптации системы с N -мерной решеткой, при расстройке по полосе $\sigma_\Delta = 0,95$:

а) $N = 5$; б) $N = 50$

Из результатов на рис. 3 видно, что качество адаптации РТС с N -мерной решеткой существенным образом снижается при возрастании как временного рассогласования σ_τ , так и неидентичности настройки на резонансную частоту σ_f . Результаты рис. 3 иллюстрируют потерю качества адаптации системы с неидентичными по полосе пропускания каналами $\sigma_\Delta = 0,95$, при условии их рассогласования по времени σ_τ и резонансной частоте σ_f . Здесь следует заметить, что возрастание размерности системы N способствует некоторому повышению качества ее адаптации в условиях декоррелирующих факторов. Однако выигрыш этот весьма несущественен и, как следует из результатов на рис. 2, 3, для данных условий составляет примерно от 1,5 до 2 дБ.

Сравнение между собой зависимостей на рис. 2 и 3 позволяет сделать вывод о преобладании, по сравнению с прочими, веса тех декоррелирующих факторов, которые являются причиной временного рассогласования $\sigma_\tau = \Delta F \tau$ процессов, наблюдаемых в каналах адаптивной системы с антенной решеткой. Так, при независимых расстройках по времени σ_τ , резонансной частоте σ_f или полосе пропускания σ_Δ на 5%, то есть $\sigma_\tau = 0,05$, $\sigma_f = 0,05$, $\sigma_\Delta = 0,95$, качество адаптации системы падает, соответственно, на $\delta_\tau = (7 \div 8)$ дБ (рис. 2), $\delta_f = (3 \div 4)$ дБ (рис. 2), $\delta_\Delta = (2 \div 3)$ дБ (рис. 3).

С использованием приведенных выше аналитических результатов методом имитационного моделирования оценим влияние частотных расстроек каналов на степень искажения полезного сигнала. В качестве полезных сигналов на выходе адаптивной РТС примем РЛДП самолетов Ту-16, В-1В и МиГ-29. Методика их моделирования описана в [7]. Как и в [7], качество портретов на выходе адаптивной РТС будем оценивать по максимуму коэффициента взаимной корреляции искаженных и неискаженных (эталонных) РЛДП.

Имитационное моделирование искажений сигнала в опорном канале проводилось при следующих параметрах зондирующего ЛЧМ радиоимпульса с прямоугольной огибающей: длительность 13,65 мкс и девиация частоты 150 МГц. Отношение сигнал-шум в опорном канале задавалось равным 20 дБ. Количество реализаций, по которым производилось усреднение для каждой точки на приведенных далее графиках коэффициентов корреляции, составляло $N=51$. Результаты моделирования показывают незначительное возрастание корреляции портретов при расширении полосы частот опорного канала (рис. 4). При этом частотная характеристика приемного тракта меньше влияет на процесс согласованной фильтрации сигнала, однако расширение полосы частот канала приема может привести к увеличению уровня внешних шумов.

Расстройка по частоте в основном канале в пределах 15% от полосы частот тракта (150 МГц) не приводит к значительным изменениям коэффициента корреляции, составляющим порядка 10^{-3} .

Далее рассмотрим результаты моделирования влияния взаимной расстройки по несущей частоте и временного рассогласования каналов антенной решетки. Для рассмотренных выше условий (рис. 2, б; рис. 3, б) указанные дестабилизирующие факторы могут привести к сниже-

нию отношения сигнал-(помеха+шум) на выходе РТС в пределах до 15 дБ. Поэтому снижение корреляции РЛДП на выходе опорного канала с эталонным РЛДП фактически определяется снижением отношения сигнал-(помеха+шум). Если исходное отношение сигнал-шум составляло 20 дБ, то ожидаемое может уменьшиться до 5 дБ.

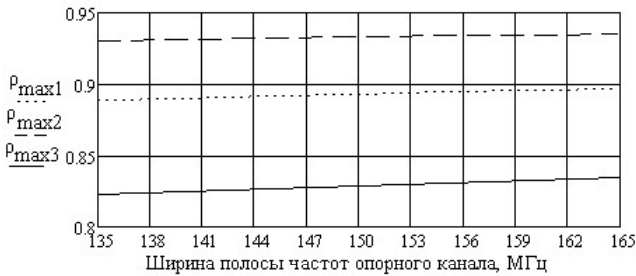


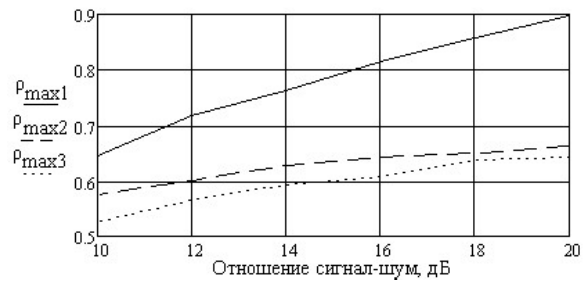
Рисунок 4 – Зависимости максимума корреляции идеального и искаженного РЛДП самолетов Ту-16 ($\rho_{\max 1}$), В-1В ($\rho_{\max 2}$) та МиГ-29 ($\rho_{\max 3}$) от ширины полосы частот опорного канала РТС

Для иллюстрации такого подхода к оценке корреляции РЛДП при моделировании нижний предел отношения сигнал-шум был принят равным 10 дБ, поскольку результаты моделирования показали значительное снижение коэффициента корреляции уже в пределах изменения отношения сигнал-шум от 20 до 10 дБ (рис. 5).

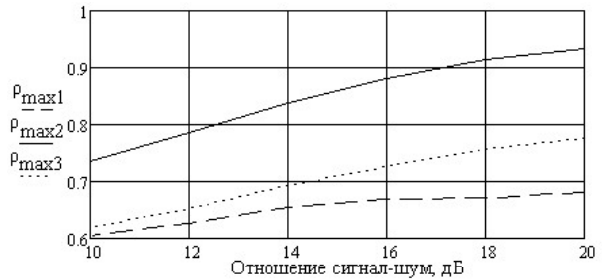
Для тех же условий моделирования получены зависимости для коэффициентов взаимной корреляции РЛДП самолетов с неискаженными шумами (эталонными) портретами самолетов двух других типов (рис. 5).

Как видно из графиков на рис. 5, коэффициенты корреляции, уменьшаются при снижении отношения сигнал-шум. При этом снижение взаимной корреляции портретов разных типов целей происходит медленнее, что особенно заметно на рисунке 5, б. Графики построены по усредненным значениям коэффициентов корреляции. С учетом разброса этих значений и тем более при большем разнообразии РЛДП следует ожидать возрастания вероятности ошибочного распознавания целей.

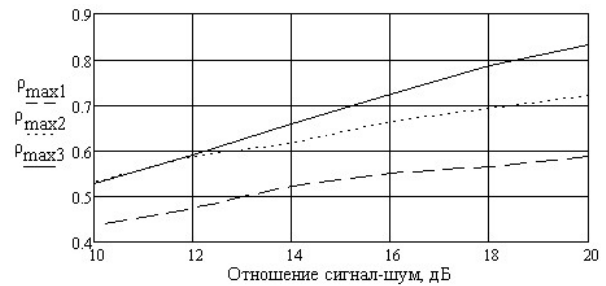
Зависимости средней вероятности ошибочного распознавания воздушных целей для разных алфавитов классов от отношения сигнал-шум при широкополосном зондировании приведены, например, в [2, 3]. В [3] также представлены подобные зависимости для информативности алфавитов классов.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Зависимости максимума корреляции искаженных портретов самолетов Ту-16 ($\rho_{\max 1}$), В-1В ($\rho_{\max 2}$) та МиГ-29 ($\rho_{\max 3}$) с эталонными портретами одного из самолетов: а) Ту-16; б) В-1В; в) МиГ-29

Все они получены методом математического моделирования распознавания целей. Основываясь на представленных выше теоретических расчетах и зависимостях в [2, 3], имеется возможность прогнозировать качество распознавания воздушных целей в условиях воздействия внешних шумовых помех и внутрисистемных дестабилизирующих факторов в адаптивной РТС в установившемся режиме.

Выводы

Получены теоретические результаты оценки влияния декоррелирующих факторов на качество адаптации информационной радиотехнической системы для РТС с опорным каналом, которые указывают на необходимость разработки общего подхода к решению задачи синтеза адаптивных систем устойчивых или, по крайней мере, локально-инвариантных к влиянию внутрисистем-

ных факторов декорреляции, независимо от природы их происхождения.

Предложена методика учета влияния декоррелирующих факторов на качество решения информационных задач с применением широкополосных сигналов в адаптивной РТС, основанная на использовании полученных теоретических результатов и дополнительного имитационного моделирования.

Список використаних джерел

1. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю. И. Лосев, А. Г. Бердников, Э. Ш. Гойхман и др.; Под. ред. Ю. И. Лосева. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
2. Ширман Я. Д. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Лещенко, Г. Д. Братченко, В. М. Орленко // Зарубежная радиоэлектроника: успехи современной радиоэлектроники. – 1996. – № 11. – С. 3 – 63.
3. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking / Y. D. Shirman, S. A. Gorshkov, S. P. Leshchenko, V. M. Orlenko, S. Y. Sedyshev, O. I. Sukharevskiy /

Y. D. Shirman editor. – Boston – London: Artech house, 2002. – 294 с.

4. Монзинго Р.А. Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ.; Под ред. В.А. Лексаченко. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
6. Скачков В. В. Анализ эффективности адаптивной обработки сигналов в условиях дестабилизирующих воздействий / В. В. Скачков // Радиотехника. – 1998. – № 11. – С. 10 – 14.
7. Братченко Г. Д. Моделювання впливу дестабілізуючих факторів на форму дальнісних портретів в радіолокаційних системах з антенними решітками / Г. Д. Братченко, Г. Г. Смаглюк // Збірник наукових праць ОДАТРЯ. – Одеса, 2015. – вип. 1(6). – С. 119 – 125.

Поступила в редакцію 20.10.2015

Рецензент: д.т.н., професор Величко О.М., Одеська державна академія технічного регулювання та якості.

В. В. Скачков, д.т.н., Г. Д. Братченко, д.т.н., Г. Г. Смаглюк, Г. С. Бондаренко

ОЦІНКА ВПЛИВУ ВНУТРІШНЬОСИСТЕМНИХ ЗБУРЕНЬ НА ЯКІСТЬ РІШЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ЗАДАЧ В АДАПТИВНІЙ РАДІОТЕХНІЧНІЙ СИСТЕМІ

Теоретично оцінюється вплив неідентичності частотних характеристик каналів прийому в багатоканальній адаптивній інформаційно-вимірювальній системі з антенною решіткою та основним (опорним) каналом на якість придушення зовнішніх шумових завад. Отримані теоретичні результати використовуються для оцінювання відношення сигнал-шум в основному каналі при імітаційному моделюванні впливу внутрішньосистемних збурень на кореляцію радіолокаційних дальнісних портретів з ідеальними портретами і можуть використовуватись для прогнозування якості радіолокаційного розпізнавання об'єктів на основі відомих залежностей.

Ключові слова: внутрішньосистемні завади, шумова завада, адаптивна антенна решітка, коефіцієнт придушення, широкосмуговий сигнал, радіолокаційний дальнісний портрет.

V. V. Skachkov, DSc, H. D. Bratchenko, DSc, G. G. Smagluk, G. S. Bondarenko

EVALUATION OF THE INFLUENCE INTRASYSTEM DISTURBANCES ON THE QUALITY OF SOLUTION OF INFORMATION PROBLEMS IN ADAPTIVE RADIO SYSTEMS

Effect of non-identical frequency characteristics of receiving channels in a multichannel radio system with adaptive antenna array and the main (reference) channel on the quality of suppression of external noise jamming is theoretically estimated. The theoretical results are used to evaluate the signal to noise ratio in the main channel in the simulation of influence of disturbances on the correlation of radar range profiles with the ideal profiles and can be used to predict the quality of the radar targets recognition based on the known dependencies.

Keywords: intrasystem disturbances, noise jamming, adaptive antenna array, suppression factor, wide-band signal, radar range profiles.