

УДК 656.212:681.3

Н. В. МОСКАЛЕЦ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ДОСТУПА

Розглядаються питання побудови методики для якісної і кількісної оцінювання впливу суми дестабілізуючих факторів, що приймають участь у технології просторово-часового доступу при використанні адаптивної антенної решітки на основі залежності показника відношення сигнал/завада+шум (ВСЗШ) від рівня взаємодії направляючого вектора корисного сигналу і векторів напрямку завадових сигналів. Отримана кількісна оцінка зниження відносного нормалізованого показника (ВСЗШ) від коефіцієнта просторової кореляції. Проведено аналіз граничних значень коефіцієнта просторової кореляції. Показані умови впливу коефіцієнта просторової кореляції на швидкість збіжності процесу адаптації алгоритмів управління ААР.

Ключові слова: просторово-часовий доступ, адаптивна антенна решітка, кореляція, вагові коефіцієнти, просторово-часова обробка.

Рассматриваются вопросы построения методики для качественной и количественной оценки влияния суммы дестабилизирующих факторов, участвующих в технологии пространственно-временного доступа с использованием адаптивной антенной решетки на основе зависимости показателя отношения сигнал/помеха+шум от уровня взаимодействия направляющего вектора полезного сигнала и направляющих векторов помеховых сигналов. Получена количественная оценка снижения относительного нормализованного показателя ОСПШ от коэффициента пространственной корреляции. Проведен анализ граничных значений коэффициента пространственной корреляции. Показаны условия влияния коэффициента пространственной корреляции на скорость сходимости процесса адаптации алгоритмов управления ААР.

Ключевые слова: пространственно-временной доступ, адаптивная антенная решетка, корреляция, весовые коэффициенты, пространственно-временная обработка.

The article analyzes the impact of restrictions on the effectiveness of space-time processing techniques in the antenna array during the implementation of space-time access methods. The method of qualitative and quantitative assessing the impact of the sum of the destabilizing factors in the form of restrictions affecting the signal to interference + noise ratio (SINR) is proposed on the basis of calculating the spatial coherence factor (SCF), which represents the value of the scalar product of the vectors of the desired signal and interference signal space.

The estimation of the upper and lower SINR values has been performed using spatial coherence factor in the assumption that the level of the interference signal interfering an SS at the entrance of AAA is significantly greater than the thermal noise power. The estimate of normalized index SINR reduction has been obtained regarding SCF.

The conditions of the influence of the SCF on the rate of convergence of the adaptation process of the control algorithms of the AAA are shown and the analysis of the boundary values of the SCF is carried out, as a result of which the basic approaches to the construction of the AAA have been developed:

The presented of estimating influence implementation methods restricted spatial-time access based on the analysis of AAA characteristics using a SCF is proposed to implement in the presence of two or more interferences.

Keywords: space-time access, adaptive antenna array, correlation, weights, space-time processing.

Введение. В связи с острым дефицитом радиочастотного спектра для обеспечения все расширяющейся популярности мобильных систем (МС), возникла необходимость активного использования пространственно-временных (ПВ) параметров сигналов. К числу активных методов такого использования следует отнести адаптивные методы пространственно-временной обработки (ПВОС) принятых сигналов. Наиболее простой, очевидной реализацией метода организации пространственно-временного доступа (ПВД) может быть использование на базовой станции адаптивной антенной решетки (ААР), реализующей механизм синтеза многолучевой диаграммы направленности в заданных направлениях. В пределах каждого из лепестков ДН можно осуществлять прием сигналов АС, локализованных в выделенном пространстве. Данная схема может быть, реализована с помощью адаптивной антенной решетки.

Задача пространственно-временного доступа (ПВД) с использованием алгоритмов адаптивных антенных решеток (ААР) сводится по сути к пространственной селекции сигналов каждой из абонентских станций (АС) на фоне других АС и прочих излучений, интерпретируемых как помехи приему сигналов данной станции. Важным достоинством данных методов ПВД является то, что все прочие существующие методы многостанционного частотно-временного доступа могут работать независимо от ПВД. Это позволяет задачу синтеза методов ПВД и их анализа проводить независимо от других методов. Более того, применение методов ПВД может осуществляться уже на

существующей базе и на существующих технологиях беспроводных сетей.

Вместе с тем, при реализации ПВД существуют ограничения, связанные в основном с характеристиками ААР и реализуемости алгоритмов адаптивной ПВОС синтезированных по различным критериям. Характеристики ААР зависят не только от алгоритма управления, но и от параметров собственно антенной решетки: числа антенных элементов (АЭ), характеристик направленности (ХН) и поляризационных характеристик АЭ, взаимного влияния АЭ, конфигурации решетки и др. При этом все эти факторы в различной степени приводят к снижению реально достижимого отношения сигнал/помеха+шум (ОСПШ), а некоторые могут вызывать также и уменьшение скорости сходимости процесса адаптации.

В данной постановке актуальными для исследований остаются вопросы анализа различных воздействующих ограничивающих факторов характеристик ПВОС и оценка её эффективности с учетом рассматриваемых ограничений.

Анализ литературных данных. Большое количество научных работ по адаптивным антенным решеткам посвящены вопросам конструирования [1], оценке параметров взаимной связи между антенными элементами решетки [2], проблемам влияния конструктивных особенностей антенн на пропускную способность [3], разработке алгоритмов обработки сигнала для адаптивного формирования диаграммы направленности [4] и оценки направления прихода сигнала [5].

© Н. В. Москалец. 2016

Наряду, с часто рассматриваемыми в литературе ограничениями обусловленными взаимным влиянием антенных элементов и параметрами антенных устройств, в задачах пространственно-временного доступа представляет интерес анализ эффективности характеристик ААР с учетом ряда ограничений связанных с:

- влиянием начальных условий;
- характеристиками алгоритмов обработки сигналов (МСКО, МОСП);
- условиями многолучевости и рассеяния сигналов;
- степенью пространственной когерентности помех (нормированного коэффициента пространственной корреляции);
- учетом реальной ширины спектра принимаемых сигналов;
- дискретностью управления весовыми коэффициентами пространственного фильтра ААР (квантование весовых коэффициентов) и др.

Все перечисленные факторы снижают эффективность пространственной фильтрации сигналов абонентских станций (АС) в мобильной сети и представляют определенный интерес для детального анализа характеристик ПВД.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка вопросов методики оценки качественного и количественного влияния суммы дестабилизирующих факторов, участвующих в технологии ПВД сводящаяся к зависимости показателя ОСПШ от уровня взаимодействия направляющего вектора полезного сигнала и направляющих векторов помеховых сигналов.

Для выполнения поставленной цели осуществляется решение следующих задач:

- 1) проведение оценки снижения коэффициента пространственной корреляции (КПК), представляющего по сути значение скалярного произведения векторов полезного сигнала и пространству помеховых сигналов;
- 2) оценка степени снижения относительного показателя ОСПШ пропорционально КПК.

Материалы и методы для анализа характеристик ААР с использованием коэффициента пространственной корреляции. Вектор полезного сигнала пришедшего по основному лучу формируемый в ААР:

$$\vec{X}_c(t) = a(t)e^{-j(\omega_0 t + \varphi(t))} \vec{D}_c, \quad (1)$$

где \vec{D}_c – вектор волнового фронта полезного сигнала.

Аналогичным образом выразим вектор V -ой помехи в виде:

$$\vec{X}_{nv}(t) = a_v(t)e^{-j(\omega_0 t + \varphi_v(t))} \vec{D}_{nv}, \quad (2)$$

Будем полагать отсутствие когерентности между полезным сигналом и помехой.

Корреляционную матрицу входных сигналов можно записать в виде [6]:

$$R_{xx} = \sigma_{ui}^2 I + P_c \vec{D}_c^* \vec{D}_c + \sum_{\gamma=1}^L P_\gamma \vec{D}_{n\gamma}^* \vec{D}_{n\gamma}, \quad (3)$$

где σ_{ui}^2 – мощность теплового шума в полосе сигнала; P_c – мощность полезного сигнала; P_γ – мощность V -ой помехи от соседней АС.

Представим фазовые набег Z_i и Z_{nv} соответственно в виде

$$z_i = \vec{k}_c \cdot \vec{r}_i, \quad (4)$$

$$z_{nv} = \vec{k}_{nv} \cdot \vec{r}_i^*, \quad (5)$$

где \vec{k}_c – вектор волнового фронта сигнала, \vec{r}_i – вектор координат i -го АЭ.

При использовании критерия минимального среднего квадратического отклонения (МСКО) оптимальное значение вектора весовых коэффициентов (ВВК) будет определяться выражением [6, 7]:

$$\vec{W}_{opt} = R_{xx}^{-1} \vec{R}_{xc}, \quad (6)$$

а для выходного ОСПШ справедливо выражение [8]:

$$\rho = P_c D_c R_{nn}^{-1} \vec{D}_c^*. \quad (7)$$

Очевидно, что поскольку масштабирование ВВК не изменяет значение ОСПШ, то выражение (7) справедливо и для критерия максимума отношения сигнал-помеха (МОСП). Поэтому для уменьшения выкладок ограничимся рассмотрением критерия МСКО.

В случае воздействия 1-го сигнала мешающей АС (одной помехи) для оптимального значения ВВК справедливо выражение [7, 8]:

$$\vec{W}_{opt} = k \left\{ \vec{D}_c - \frac{P_1 \vec{D}_c^* \vec{D}_1}{\sigma_{ui}^2 + P_1 \vec{D}_1^* \vec{D}_1} \cdot \vec{D}_1 \right\} \quad (8)$$

где k – скалярный коэффициент.

Используя обозначение $\vec{D}_i^* \vec{D}_j = \delta_{ij}$, получим

$$\vec{W}_{opt} = \gamma \left\{ \vec{D}_c - \frac{P_1 \delta_{c1}}{\sigma_{ui}^2 + P_1 \delta_{11}} \vec{D}_1 \right\} \quad (9)$$

Выражение для выходного ОСПШ, с учетом выражений (7) и (9), выглядит следующим образом:

$$\rho = \frac{P_c \delta_{cc}}{\sigma_{ui}^2} \left\{ 1 - \frac{P_1 |\delta_{c1}|^2}{(\sigma_{ui}^2 + P_1 \delta_{11}) \delta_{cc}} \right\} \quad (10)$$

Величина δ_{c1} представляет собой скалярное произведение векторов \vec{D}_c и \vec{D}_1 . Абсолютное значение величины δ_{c1} можно представить соотношением:

$$|\delta_{c1}| = |\vec{D}_1| |\vec{D}_c| \cos \xi = \sqrt{\delta_{11}} \sqrt{\delta_{cc}} \cos \xi, \quad (11)$$

где ξ – обобщенный угол между \vec{D}_c и \vec{D}_1 в комплексном векторном пространстве;

$$|\vec{D}_1| = \sqrt{\vec{D}_1^+ \vec{D}_1} = \sqrt{\delta_{11}};$$

$$|\vec{D}_c| = \sqrt{\vec{D}_c^+ \vec{D}_c} = \sqrt{\delta_{cc}}.$$

Введем обозначение нормированного коэффициента пространственной корреляции (КПК) между направляющими векторами сигнала D_c и помехи D_n .

Очевидно КПК однозначно определяется через $\cos \xi$:

$$\gamma_{ij} = \frac{\vec{D}_i \vec{D}_j}{|\vec{D}_i| |\vec{D}_j|} = \frac{\delta_{ij}}{\sqrt{\delta_{ij}} \sqrt{\delta_{jj}}}, \quad (12)$$

где $i, j = c = 1, 2, \dots, n$.

Тогда выражение для ОСПШ на входе можно представить в виде

$$\rho = \frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2} \left\{ 1 - \frac{P_{n\Sigma}}{\sigma_{ui}^2 + P_{n\Sigma}} |\gamma_{1c}|^2 \right\}, \quad (13)$$

где

$$P_{\Sigma c} = P_c \sum_{i=1}^m |A_c^i|^2 \quad (14)$$

$$P_{n\Sigma} = P_1 \sum_{i=1}^m |A_{n1}^i|^2 \quad (15)$$

где A_c^i и A_{n1}^i – определяются соответственно выражениями:

$$A_c^i = \vec{E}_i(\theta, \Psi_c) \vec{e}_c; \quad (16)$$

$$A_{n1}^i = \vec{E}_i(\theta_v, \Psi_v) \vec{e}_v, \quad (17)$$

где $\vec{E}_i(\theta, \Psi_c)$ – векторная характеристика направленности i -го АЭ по напряженности электрического поля; \vec{e}_c – единичный вектор поляризации входящей волны.

Проведем оценку нижнего и верхнего значения ОСПШ используя выражения (13). Очевидно, что максимальное значение ОСПШ имеет вид

$$\rho_{\max} = \frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2}. \quad (18)$$

Когда помеха подавлена до нуля и КПК $\gamma_{1c} = 0$ будет достигнуто максимальное значение ОСПШ. Максимальное ОСПШ не зависит от местоположения АЭ и источника помех, а определяется ХН АЭ и поляризацией полезного сигнала, как это можно видеть из выражения (18). При этих условиях оптимальный ВВК имеет вид

$$\vec{W}_{opt} = n \vec{D}_c^+ \quad (19)$$

Следовательно, если АЭ идентичны и одинаково ориентированы, т.е. все A_c^i одинаковы, то на выходах всех АЭ полезный сигнал находится в фазе и когерентно суммируется, как в обычной фазированной антенной решетке (ФАР). Когда же A_c^i различны, ОСПШ снижается несмотря на то что полезный сигнал по прежнему будет когерентно суммироваться. Различие значений A_c^i может оказаться результатом воздействий окружающей обстановки (мачты, крыши и др.).

Для оценки нижнего значения ОСПШ будем полагать, что уровень сигнала помехи, т.е. мешающей АС на входе ААР значительно больше мощности теплового шума

$$P_{n\Sigma} \gg \sigma_{ui}^2, \quad (20)$$

тогда выражение (13) упрощается и принимает вид

$$\rho = \frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2} \left\{ 1 - |\gamma_{1c}|^2 \right\}, \quad (21)$$

Из выражения (21) следует, что ОСПШ на выходе ААР зависит только от ρ_{\max} и $|\gamma_{1c}|$ и не зависит от мощности помех.

При этом нижнее значение ОСПШ определяется выражением (21). Используя выражения (18), (21) получим

$$\frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2} \left\{ 1 - |\gamma_{1c}|^2 \right\} < \rho \leq \frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2} \quad (22)$$

Результаты исследования нормированного показателя эффективности ОСПШ от КПК. Зависимости нормализованного значения ОСПШ от $|\gamma_{1c}|$ показаны на рис. 1. Нормализованное значение ОСПШ

$$\rho_n = \frac{\rho}{\rho_{\max}} \quad \text{изменяется в пределах } [1 - |\gamma_{1c}|^2].$$

Как следует из анализа зависимостей представленных на рис. 1 в общем случае при малых значениях

$\frac{P_{n\Sigma}}{\sigma_{ui}^2}$ ОСПШ приближается к верхней границе, а при

больших значениях $\frac{P_{n\Sigma}}{\sigma_{ui}^2}$ – к нижней.

Вместе с тем при $|\gamma_{1c}| \ll 1$, независимо от значения

$\frac{P_{n\Sigma}}{\sigma_{ui}^2}$ ОСПШ всегда приближается к верхней границе. Из этого следует, что уменьшая значение

КПК $|\gamma_{1c}|$ можно значительно улучшить характеристики ААР в установленном режиме.

Рассмотренный подход к оценке характеристик ААР на основе использования КПК можно использовать при наличии двух и более помех [7]. В этих условиях в качестве КПК выступает обобщенный

угол между \vec{D}_c и гиперплоскостью, образованной векторами $\vec{D}_{n1}, \vec{D}_{n2}, \dots, \vec{D}_{nn}$.

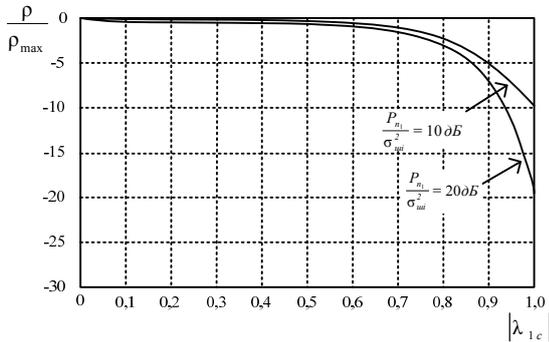


Рис. 1 – График снижения зависимости ОСПШ от коэффициента пространственной корреляции

Следует отметить, что в общем случае КПК зависят от следующих факторов:

- угла прихода полезного сигнала и помехи;
- ориентации и расположение АЭ в решетке;
- характеристики направленности АЭ;
- поляризации полезного сигнала и помех.

Для уменьшения КПК, при конструировании АР, необходимо должным образом подбирать конфигурацию решетки, тип и ориентацию АЭ. Важно отметить, что КПК оказывают влияние не только на выходное ОСПШ, но в ряде случаев и на скорость сходимости процесса адаптации алгоритмов управления ААР, синхронизируемых на основе градиентного метода [9]. Это вызвано тем, что скорость сходимости алгоритмов основанных на градиентном методе зависит от обусловленности корреляционной матрицы входных сигналов. Обусловленность же корреляционной матрицы в свою очередь зависит от КПК.

В случае когда на вход N -элементной ААР воздействуют полезный сигнал и одна мощная помеха можно показать, что собственные значения корреляционной матрицы могут быть определены [8]:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \sigma_{ui}^2 + \frac{1}{2}(P_{\Sigma c} + P_{\Sigma n}) + \frac{1}{2}\sqrt{(P_{\Sigma c} - P_{\Sigma n})^2 + 4P_{\Sigma c}P_{\Sigma n}|\gamma_{1c}|^2} \\ \beta_2 &= \sigma_{ui}^2 + \frac{1}{2}(P_{\Sigma c} + P_{\Sigma n}) - \frac{1}{2}\sqrt{(P_{\Sigma c} - P_{\Sigma n})^2 + 4P_{\Sigma c}P_{\Sigma n}|\gamma_{1c}|^2} \\ \beta_i &= \sigma_{ui}^2, i = 3, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Тогда, если $|\gamma_{1c}| = 1$ имеем

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \sigma_{ui}^2 + P_{\Sigma c} + P_{\Sigma n} \\ \beta_2 &= \sigma_{ui}^2 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Вместе с тем, когда $|\gamma_{1c}| = 0$ получим

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \sigma_{ui}^2 + P_{\Sigma n} \\ \beta_2 &= \sigma_{ui}^2 + P_c \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Следовательно, что когда $P_c \gg \sigma_{ui}^2$ скорость сходимости процесса адаптации при $|\gamma_{1c}| = 0$ оказывается существенно выше, чем при $|\gamma_{1c}| = 1$, при выполнении равенства

$$\vec{D}_1 = s\vec{D}_c, \quad (24)$$

где s – комплексный скаляр.

В свою очередь (24) удовлетворяется при выполнении следующих условий [8]:

$$\left. \begin{aligned} |A_c^i| &= s_1 |A_{n1}^i|, \\ \left(\arctg\left(\frac{\text{Im}\{A_c^i\}}{\text{Re}\{A_c^i\}}\right) - \arctg\left(\frac{\text{Im}\{A_{n1}^i\}}{\text{Re}\{A_{n1}^i\}}\right) - (\bar{k}_c - \bar{k}_{n1})r_i \right) &= 2\pi s_2 \\ i &= 1, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где s_1 и s_2 - вещественные константы.

Из анализа представленных условий (25) следует:

1. Для всех АЭ отношения между коэффициентами усиления сигнала и помехи должно быть одинаково.

2. Разность фаз между сигналом и помехой, а также фазовые различия между A_c^i и A_{n1}^i , обусловленные местоположением элемента, должна быть постоянной с точностью до 2π (требование о плоскости фазового фронта полезного сигнала и помех).

Обсуждение результатов исследования. Когда $|\gamma_{1c}| = 1$ описываемая ситуация представляется в виде ААР состоящей использования в ААР двух изотропных и невзаимодействующих АЭ, разнесенных в пространстве на $d = \frac{\lambda_c}{2}$ с углами прихода сигнала и помехи относительно нормали к линии расположения АЭ соответственно $\theta_c = -90^\circ$, $\theta_n = 90^\circ$.

Будем полагать также, что поляризация электромагнитных волн сигнала и помехи одинакова. ААР может или максимизировать или подавлять помехи, но вместе с тем не может достигать этого одновременно.

При $|\gamma_{1c}| = 0$, когда межэлементное расстояния $d = \frac{\lambda_c}{4}$, решетка способна одновременно максимизировать полезный сигнал и полностью подавлять помеху.

Если не выполняются условия (25) нетрудно показать, что при $d = \frac{\lambda_c}{2}$ $|\gamma_{1c}| = 0,8$ и в данном случае ААР может полностью подавить помеху и частично полезный сигнал. За счет использования разнотипных АЭ, так и за счет различной ориентации идентичных элементов могут быть получены различные характери-

стики направленности АЭ. В случае априорно точной известной информации об углах прихода сигналов и помех ААР можно было бы построить таким образом, чтобы практически исключить случай $|\gamma_{ic}|=1$. Вместе с тем такой информации нет и при построении решетки необходимо стремиться к ситуации, когда $|\gamma_{ic}|=1$, $i=1,2,\dots,N$ были бы достаточно небольшими для широкого сектора углов прихода помех.

Проанализировав данные варианты сценариев можно предложить следующие подходы к построению ААР:

- использование нерегулярного размещения АЭ в решетке (неэквидистантные решетки);
- использование АЭ с различной ХН;
- использование различной ориентации идентичных АЭ.

Первый подход дает возможность ААР осуществлять поляризационно-временную обработку сигналов, т.е. различать сигналы и помехи по их поляризации.

Последние два подхода неизбежно уменьшают потенциально достижимое ОСПШ, но вместе с тем, данное уменьшение максимального ОСПШ является вполне допустимым, поскольку это значительно снижает вероятность ситуаций, при которых $|\gamma_{ic}|=1$.

Выводы

1. Эффективность методов ПВД непосредственно определяется качеством алгоритмов пространственно-временной обработки. Факторами влияния является: процедуры управления ВВК, число и свойства АЭ, конфигурация антенной решетки, наличие взаимных влияний между АЭ и влияния окружающих предметов (мачты, крыши и др.), многолучевость принимаемых сигналов. Число мешающих сигналов других АС при обработке данной АС, широкополосность самих информационных сигналов и др. Все указанные факторы в различной степени негативно влияют на качество ПВД. Ряд из этих дестабилизирующих факторов следует учитывать при анализе, влияния других удается минимизировать за счет различных компенсационных методов.

2. Разработана методика оценки качественного и количественного влияния суммы дестабилизирующих факторов, участвующих в технологии ПВД сводящаяся к зависимости показателя ОСПШ от уровня взаимодействия направляющего вектора полезного сигнала и направляющих векторов помеховых сигналов. В идеальной обстановке вектор полезного сигнала ортогонален пространству помеховых сигналов. В реальности эта ортогональность нарушается. Количественно это нарушение выражается в снижении коэффициента пространственной корреляции, представляющего по сути значение скалярного произведения указанных векторов, и относительный показатель ОСПШ, который снижается пропорционально КПК.

3. Имеется ряд дестабилизирующих факторов поддающиеся контролю и которые относительно просто можно учесть при проектировании мобильной системы с ПВД. К числу таких относятся:

- выбор межэлементного расстояния АЭ следует устанавливать $d = \lambda/2$, что исключает появление интерференционных решеточных нулей;
- во всех АЭ следует выбирать идентичные характеристики;
- разность фаз между векторами сигнала и помех должна быть постоянной (требования о плоскости фазового фронта полезного сигнала и помех).

Список литературы:

1. Bellofiore, S. Smart-antenna systems for mobile communication networks. Part 1. Overview and antenna design [Text] / S. Bellofiore, C. A. Balanis, J. Foutz, A. S. Spanias // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2002. – № 44 (3). – P. 145–154. doi: [10.1109/map.2002.1039395](https://doi.org/10.1109/map.2002.1039395)
2. Hult, T. The Effect of Mutual Coupling on a High Altitude Platform Diversity System Using Compact Antenna Arrays [Text] / T. Hult, A. Mohammed // International Journal of Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 2010. – P. 1–7. doi: [10.1155/2010/492915](https://doi.org/10.1155/2010/492915)
3. Bellofiore, S. Smart-antenna system for mobile communication networks. Part 2. Beamforming and network throughput [Text] / S. Bellofiore, J. Foutz, C. A. Balanis, A. S. Spanias, // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2002. – № 44 (4). – P. 106–114. doi: [10.1109/map.2002.1043158](https://doi.org/10.1109/map.2002.1043158)
4. Arce, A. Design of Beam-Forming Networks for Multibeam Antenna Arrays Using Coherently Radiating Periodic Structures [Text] / A. Arce, D. H. Covarrubias, M. A. Panduro, L. A. Garza // Journal of Applied Research and Technology. – 2012. – Vol. 10, № 1. – P. 48–56.
5. Zeng, W. J. Direction-of-arrival estimation based on spatial-temporal statistics without knowing the source number [Text] / W. J. Zeng, X. L. Li, H. C. So // Signal Processing. – 2013. – Vol. 93. – № 12. – P. 3479–3486. doi: [10.1016/j.sigpro.2013.05.017](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.05.017)
6. Монзинго, Р. А. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию [Текст] / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер. – Москва: Радио и связь, 1986. – 448 с.
7. Марчук, Л. А. Пространственно-временная обработка сигналов в линиях радиосвязи [Текст] / Л. А. Марчук. – Ленинград: ВАС, 1991. – 136 с.
8. Lin, H. C. Correction to “Spatial Correlations in Adaptive Arrays.” [Text] / H. C. Lin // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1982. – Vol. 30, № 6. – P. 1268–1268. doi: [10.1109/tap.1982.1142929](https://doi.org/10.1109/tap.1982.1142929)
9. Popovskij, V. Control and Adaptation in Telecommunication Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, [Text] / V. Popovskij, A. Barkalov, L. Titarenko. – Springer Berlin Heidelberg, 2011. – 173 p. doi: [10.1007/978-3-642-20614-6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20614-6)
10. Kosterev, M. Development of fuzzy statistical method of optimal resource allocation among technical departments of an electric utility company [Text] / M. Kosterev, V. Litvinov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 3/4 (81). – P. 20–27. doi: [10.15587/1729-4061.2016.70522](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.70522)

Bibliography (transliterated):

1. Bellofiore, S., Balanis, C. A., Foutz, J., Spanias, A. S. (2002). Smart-antenna systems for mobile communication networks. Part 1. Overview and antenna design. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 44 (3), 145–154. doi: [10.1109/map.2002.1039395](https://doi.org/10.1109/map.2002.1039395)
2. Hult, T., Mohammed, A. (2010). The Effect of Mutual Coupling on a High Altitude Platform Diversity System Using Compact Antenna Arrays. International Journal of Antennas and Propagation, 2010, 1–7. doi: [10.1155/2010/492915](https://doi.org/10.1155/2010/492915)
3. Bellofiore, S., Foutz, J., Balanis, C. A., Spanias, A. S. (2002). Smart-antenna system for mobile communication networks. Part 2. Beamforming and network throughput. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 44 (4), 106–114. doi: [10.1109/map.2002.1043158](https://doi.org/10.1109/map.2002.1043158)
4. Arce, A., Covarrubias, D. H., Panduro, M. A., Garza, L. A. (2012). Design of Beam-Forming Networks for Multibeam Antenna Arrays Using Coherently Radiating Periodic Structures. Journal of Applied Research and Technology, 10 (1), 48–56.
5. Zeng, W. J., Li, X. L., So, H. C. (2013). Direction-of-arrival estimation based on spatial-temporal statistics without knowing the source number. Signal Processing, 93 (12), 3479–3486. doi: [10.1016/j.sigpro.2013.05.017](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.05.017)

6. Monzingo, R. A., Miller, T. U. (1986). *Adaptivnye antennnye reshetki. Vvedenie v teoriju*. Moskva: Radio i svjaz', 44
7. Marchuk, L. A. (1991). *Prostranstvenno-vremennaja obrabotka signalov v linijah radiosvjazi*. Leningrad: VAS, 136.
8. Lin, H. C. (1982). Correction to "Spatial Correlations in Adaptive Arrays." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 30 (6), 1268–1268. doi: [10.1109/tap.1982.1142929](https://doi.org/10.1109/tap.1982.1142929)
9. Popovskij, V., Barkalov, A., Titarenko, L. (2011). Control and Adaptation in Telecommunication Systems. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, 173. doi: [10.1007/978-3-642-20614-6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20614-6)
10. Kosterev, M., Litvinov, V. (2016). Development of fuzzy statistical method of optimal resource allocation among technical departments of an electric utility company. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(4(81)), 20–27. doi: [10.15587/1729-4061.2016.70522](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.70522)

Надійшла (received) 10.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз впливу обмежень при реалізації методів просторово-часового доступу/ М. В. Москалець// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.95–100. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Анализ влияния ограничений при реализации методов пространственно-временного доступа/ Н. В. Москалец// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.95–100. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Analysis of influence implementation methods restricted spatial-time access/ M. V. Moskalets// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No 50 (1222). – P.95–100. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Москалець Микола Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії, пр-т Науки, 14, м Харків, Україна, 61166; е-пошта: moskalets1@yandex.ua

Москалец Николай Вадимович – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры инфокоммуникационной инженерии, пр-т Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: moskalets1@yandex.ua

Moskalets Mykola Vadymovych – candidate of technical sciences, associate professor, Kharkov National University of Radioelectronics, associate professor of the department of infocommunication engineering, avenue of Science, 14, Kharkov, Ukraine, 61166; e-mail: moskalets1@yandex.ua

УДК 004.891.3

О. Є. ІЛАРІОНОВ, Н. М. ІЛАРІОНОВА, П. М. СОРОКА

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ СВДЧЕНЬ У АДАПТИВНИХ КУРСАХ КОРПОРАТИВНИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

Розглянуто перспективи застосування окремих математичних інструментів для адаптації курсів у корпоративних системах дистанційного навчання. Ідентифіковано особливості корпоративних систем дистанційного навчання – характеристики осіб, що навчаються, характеристики навчальних курсів та показники ефективності. Показано, що адаптація дистанційних курсів у таких системах повинна відбуватися передусім на основі аналізу компетенцій. Компетенції визначаються в результаті тестування та аналізу результатів тесту за допомогою теорії свідчень Демпстера-Шафера. Подальша адаптація курсів відбувається за допомогою моделі генерації контенту на основі компетенцій.

Ключові слова: теорія Демпстера-Шафера, навчальний профіль, адаптивні моделі, корпоративне дистанційне навчання, компетенції.

Рассмотрено перспективы использования отдельных математических инструментов для адаптации курсов в корпоративных системах дистанционного образования. Идентифицированы особенности корпоративных систем дистанционного образования – характеристики учащихся, характеристики учебных курсов и показатели эффективности. Показано, что адаптация дистанционных курсов в таких системах должна происходить прежде всего на основе анализа компетенций. Компетенции определяются в результате тестирования и анализа результатов теста при помощи теории свидетельств Демпстера-Шафера. Последующая адаптация курсов происходит при помощи модели генерации контента на основе компетенций.

Ключевые слова: теория Демпстера-Шафера, учебный профиль, адаптивные модели, корпоративное дистанционное образование, компетенции.

Perspectives to use some mathematical instruments to adapt e-learning courses in corporate area are considered. Analysis of corporate e-learning systems showed that the level of prior knowledge, skills, and abilities (competencies) of learners is one of the most important criteria effectiveness of education and should serve as a basis for courses customization. Pretest can be conducted using multiple choice questions where there is a relationship between questions and concepts, and this relationship has weights. The evidences obtained from pretest are combined using Dempster's combination rule to find the real level of competences of the learner. These values are used as an input in competency-based content generation model. The approach offered by the authors is not free of the drawbacks. First, any tests are associated with errors and mistakes. Also, there is a need of fuzzification of intervals obtained from evidence combinations. Content generation model requires a lot of learning objects that together with input profile might lead to issues with finding the optimal decision. Also, teachers should invest a lot of efforts to create appropriate test questions and learning objects.

Keywords: Dempster-Shafer theory, learning profile, adaptive models, corporate e-learning, competencies.

© О. Є. Іларіонов, Н. М. Іларіонова, П. М. Сорока. 2016