

УДК 621.396.933.4

Б.Б. ПОСПЕЛОВ<sup>1</sup>, Д.Л. ЧЕЧОТКІН<sup>2</sup>, С.В. ШТАНГЕЙ<sup>2</sup><sup>1</sup> Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Україна<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

## ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРОБКИ В МІМО-СИСТЕМАХ В УМОВАХ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ ВИДІВ МОДУЛЯЦІЇ ТА ДІЇ ЗОВНІШНІХ ЗАВАД

На основі методів калмановської фільтрації запропонована структура пристрою оптимальної попередньої обробки радіосигналів, які приймаються багатоелементною антенною системою в умовах дії зовнішніх, крапкових у просторі джерел завад. Показано, що в умовах функціонування МІМО-систем оптимальна обробка розпадається на просторову і попередню часову. Структура пристрою оптимальної просторової обробки індуферентна до виду модуляції корисного радіосигналу. При зміні виду модуляції радіосигналу міняється алгоритм його обробки в пристрої попередньої часової обробки.

**Ключові слова:** бездротові телекомунікаційні системи, МІМО-системи, оптимізація, багатоелементна антенна система, просторові канали, види модуляції.

### Постановка проблеми в загальному вигляді

Основною задачею при створенні сучасних бездротових телекомунікаційних систем є підвищення завадостійкості і швидкості передачі даних. Перспективний напрямок рішення цієї проблеми полягає у використанні систем з багатоелементними антенами на передавальній і прийомній сторонах. В таких системах можлива одночасна передача даних по так званих просторових підканалах, які формуються за допомогою адаптивних передавальної і прийомної багатоелементних антенних систем – МІМО-систем [1 – 3]. Найбільш популярним підходом до формування таких підканалів є метод сингулярного розкладання (SVD – Singular Value Decomposition) каналної матриці [3]. Вагові коефіцієнти в антенах за методом SVD задаються значеннями власних векторів каналної матриці, при цьому, відношення сигнал-шум у просторових підканалах визначається квадратом відповідного власного числа. Основними перевагами даного підходу є забезпечення максимальної пропускної здатності.

Однак при передачі сигналів у середовищі з високою просторовою кореляцією і наявністю сторонніх джерел потужних сигналів та завад, розкид власних значень матриці виявляється істотним, що призводить до значного розкиду і зниження відносини сигнал-шум у просторових підканалах, сформованих за допомогою SVD-методу. Використання фіксованої модуляції для всіх просторових підканалів у цьому випадку призводить до різної завадостійкості підканалів та їх пропускної здатності. Тому передбачено використання різних видів модуляції, наприклад, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM для кожного з

підканалів [1, 2, 4]. У силу обмеженої завадостійкості видів модуляції, підканали з високим рівнем завад практично виявляються непрацездатними. Знизити рівень завад у цих підканалах можливо за рахунок використання оптимальної обробки в багатоелементних антенах з урахуванням впливу усіх заважаючих сторонніх сигналів та шумів на прийомній стороні. Тому актуальною є задача оптимізації обробки в багатоелементних прийомних антенах МІМО-систем в умовах застосування різних видів модуляції з урахуванням впливу заважаючих сторонніх джерел сигналів та шумів.

**Мета статті.** Оптимізація обробки в багатоелементних прийомних антенах МІМО-систем в умовах використання різних видів модуляції та впливу заважаючих сторонніх джерел сигналів та шумів.

### Постановка задачі та виклад матеріалів досліджень

Розглянемо загальну структуру МІМО-системи передачі інформації в якій на передавальній та прийомній стороні використовуються багатоелементні антенні системи [1, 2]. Загальна задача оптимізації обробки в МІМО-системах в умовах використання різних видів модуляції та впливу заважаючих сторонніх джерел сигналів та шумів може бути декомпонована до ряду однотипних часткових задач оптимізації обробки для кожного з антенних елементів на передавальному боці і декількох антенних елементів на прийомному боці МІМО-систем (рис. 1).

Така ситуація може розглядатися як один з просторових каналів МІМО-системи і може бути охарактеризована в термінах МІМО-систем як SІМО-система. Будемо вважати, що у SІМО-системі при-

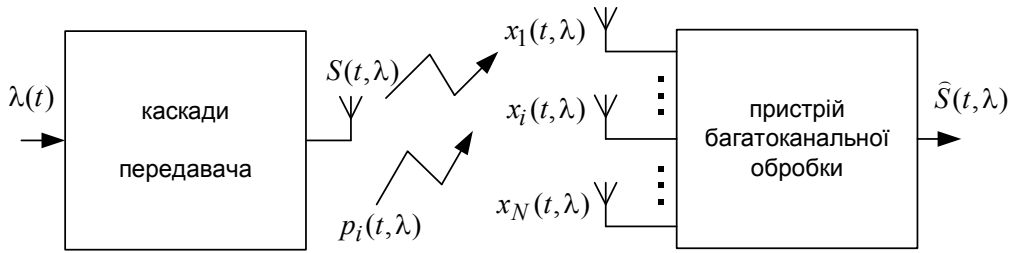


Рис. 1. Геометрія часткової задачі оптимізації обробки в МІМО-системах

йомна антенна система (ПАС) в загальному випадку складається з  $N$  антен з відомими неізотропними характеристиками спрямованості і положенням кожної антени відносно визначеної опорної точки. Будемо вважати, що кожна антена ПАС реєструє поле, яке обумовлене корисним сигналом  $s(t, \lambda)$ , що залежить від інформаційного повідомлення  $\lambda(t)$  і завадами  $p_i(t)$ ,  $i = \overline{1, L}$  від  $L$  зовнішніх джерел.

Корисний сигнал і завади будемо вважати вузькосмуговими в просторово-часовому змісті процесами. Хвильові фронти корисного сигналу і завад в області прийомних антен передбачаються плоскими і спостерігаються на фоні внутрішніх шумів, що являють собою стаціонарні гаусовські процеси з нульовим середнім і рівномірною в широкій смузі частот спектральною густиною  $N_0(t)$ . Сигнали з виходів антен ПАС надходять на вхід пристрою багатоканальної обробки невідомої структури, на виході якого формується відповідна оцінка прийнятого корисного сигналу  $\hat{s}(t, \lambda)$ .

Відмінність даної задачі від традиційних задач фільтрації полягає у формуванні на виході пристрою багатоканальної обробки оцінки корисного радіосигналу (з урахуванням носія інформації), а не оцінки самого повідомлення, що передається.

Оскільки в якості носія інформації в МІМО-системах використовують високочастотне гармонійне коливання, один або декілька параметрів якого (амплітуда, частота та фаза) модулюються інформаційним повідомленням  $\lambda(t)$  [1, 2, 4], це означає, що в МІМО-системах використовуються три базових види модуляції – АМ, ЧМ, ФМ. В результаті різних комбінацій цих базових видів модуляції та різних способів реалізації відповідності інформаційного повідомлення та модулюємого параметра високочастотного коливання, в теперішній час широко застосовуються на практиці такі похідні базових видів модуляції, як BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM та ін. [4].

В загальному випадку, згідно з [5], модель корисного радіосигналу при різних видах модуляції може бути представлена у вигляді диференціального рівняння стану:

$$s'' + a_1(t, \lambda)s' + a_0(t, \lambda)s = 0, \quad (1)$$

де  $s''$ ,  $s'$  – друга та перша похідна корисного сигналу за часом (залежність від часу та інформаційного повідомлення опущена для спрощення запису);

$a_1(t, \lambda)$ ,  $a_0(t, \lambda)$  – скалярні функції часу та інформаційного повідомлення, які визначаються конкретним типом модуляції корисного сигналу [5].

Так для базової АМ будемо мати

$$a_{1\text{ам}}(t, \lambda) = -2 \frac{m_{\text{ам}} \lambda'(t)}{1 + m_{\text{ам}} \lambda(t)},$$

$$a_{0\text{ам}}(t, \lambda) = \omega_0^2 + 2 \left( \frac{m_{\text{ам}} \lambda'(t)}{1 + m_{\text{ам}} \lambda(t)} \right)^2 - \frac{m_{\text{ам}} \lambda''(t)}{1 + m_{\text{ам}} \lambda(t)},$$

де  $m_{\text{ам}}$  – коефіцієнт амплітудної модуляції,

$\lambda'(t)$ ,  $\lambda''(t)$  – перша та друга похідна від інформаційного повідомлення.

Для базових ЧМ та ФМ, відповідно:

$$a_{1\text{чм}}(t, \lambda) = \frac{m_{\text{чм}} \lambda'(t)}{\omega_0 + m_{\text{чм}} \lambda(t)},$$

$$a_{0\text{чм}}(t, \lambda) = \left( \omega_0 + m_{\text{чм}} \lambda(t) \right)^2,$$

де  $m_{\text{чм}}$  – максимальне відхилення частоти радіосигналу, що модулюється (девіація частоти),

$$a_{1\text{фм}}(t, \lambda) = \frac{m_{\text{фм}} \lambda''(t)}{\omega_0 + m_{\text{фм}} \lambda'(t)},$$

$$a_{0\text{фм}}(t, \lambda) = \left( \omega_0 + m_{\text{фм}} \lambda'(t) \right)^2,$$

де  $m_{\text{фм}}$  – максимальне відхилення фази радіосигналу, що модулюється.

Для зручності подальшого розгляду рівняння стану (1) представимо у векторно-матричній формі:

$$s' = \mathbf{A}(t, \lambda) \mathbf{s}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{s} = [s, s_1]^T$  – вектор стану корисного сигналу;

$s_1 = s'$  – перша похідна корисного сигналу за часом;

$\mathbf{A}(t, \lambda) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0(t, \lambda) & -a_1(t, \lambda) \end{bmatrix}$  – матриця коефіцієнтів рівняння (2).

Представимо сукупність вхідних сигналів пристрою багатоканальної обробки у виді вектора, що визначає рівняння спостереження:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{V}_s(t)\mathbf{s}(t) + \mathbf{V}_n(t)\mathbf{p}(t) + \mathbf{n}_0(t), \quad (3)$$

де  $\mathbf{V}_s(t)$  –  $N \times 2$  матриця, перший стовпець якої являє собою вектор з координатами  $v_{si}$ ,  $i = \overline{1, N}$ , що описують амплітудно-фазові викривлення корисного сигналу, які обумовлені характеристиками спрямованості реальних  $N$  антен, що використовуються в МІМО-системі, а другий є нульовим вектором;

$\mathbf{V}_n(t)$  –  $N \times L$  матриця, стовпці якої представляють аналогічні амплітудно-фазові викривлення заважаючих сигналів та/або завад від  $L$  зовнішніх джерел, що обумовлені  $N$  приймальними антенами з урахуванням напрямку їх прийому;

$\mathbf{p}(t)$  – вектор заважаючих сигналів та/або завад з елементами  $p_j(t)$ ,  $j = \overline{1, L}$ ;

$\mathbf{n}_0(t)$  – вектор шумів прийому, які діють на виході антен.

Уведемо, аналогічно [6], вектор сумарних завад та шумів:

$$\mathbf{n}(t) = \mathbf{V}_n(t)\mathbf{p}(t) + \mathbf{n}_0(t), \quad (4)$$

які є квазібілими шумами з нульовим середнім і невиродженою матрицею взаємних спектральних щільностей:

$$\mathbf{N}(t) = \mathbf{N}_0 + \mathbf{V}_n(t)\mathbf{N}_p(t)\mathbf{V}_n^T(t), \quad (5)$$

де  $\mathbf{N}_0 = \text{diag}\{N_{01}, \dots, N_{0N}\}$ ,

$$\mathbf{N}_p = \text{diag}\{N_{p1}(t), \dots, N_{pL}(t)\}.$$

Тоді рівняння спостереження (3) може бути представлене у вигляді [7]:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{V}_s(t)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t). \quad (6)$$

На підставі (2) і (6) оптимальна оцінка корисного сигналу на виході пристрою багатоканальної обробки буде визначатися рівнянням, що відповідає калмановському фільтру, наступного виду:

$$\hat{\mathbf{s}}' = \mathbf{A}(t, \lambda)\hat{\mathbf{s}} + \mathbf{k}(t)\{\mathbf{x}(t) - \mathbf{V}_s(t)\hat{\mathbf{s}}\}, \quad (7)$$

де  $\mathbf{k}(t)$  –  $2 \times N$  матриця коефіцієнтів фільтра Кал-

мана, яка визначається співвідношенням:

$$\mathbf{k}(t) = \mathbf{E}(t)\mathbf{V}_s^T(t)\mathbf{N}^{-1}(t), \quad (8)$$

де  $\mathbf{E}(t)$  –  $2 \times 2$  матриця дисперсії погрішності фільтрації вектора  $\mathbf{s}$  на виході пристрою багатоканальної обробки.

Матриця  $\mathbf{E}(t)$  задовольняє рівнянню:

$$\mathbf{E}' = \mathbf{A}(t, \lambda)\mathbf{E}(t) + \mathbf{E}(t)\mathbf{A}^T(t, \lambda) - \mathbf{E}(t)\mathbf{V}_s^T(t)\mathbf{N}^{-1}(t)\mathbf{V}_s(t)\mathbf{E}(t). \quad (9)$$

Перетворивши рівняння (7), одержимо співвідношення щодо оцінки корисного сигналу  $s(t, \lambda)$  на виході пристрою багатоканальної обробки у вигляді:

$$\hat{s}'' + a_1(t, \lambda)\hat{s}' + a_0(t, \lambda)\hat{s} = \gamma(t)\Delta z' + \beta(t)\Delta z, \quad (10)$$

де  $\gamma(t) = E_{11}$ ;

$\Delta z = \mathbf{w}^T \{\mathbf{x}(t) - \mathbf{v}_s \hat{s}\} = y(t) - \mathbf{w}^T \mathbf{v}_s \hat{s}$  – похибка в оцінці корисного сигналу;

$y(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}(t)$  – вихідний сигнал пристрою просторової обробки;

$$\mathbf{w}^T = \left[ \sum_{i=1}^N v_{si} r_{i1}, \dots, \sum_{i=1}^N v_{si} r_{iN} \right] - \text{ваговий вектор}$$

просторової обробки;

$\mathbf{v}_s = [v_{s1}, \dots, v_{sN}]^T$  – вектор амплітудно-фазових викривлень корисного сигналу, обумовлених прийомними антенами;

$r_{ij}$  –  $ij$ -й елемент матриці  $\mathbf{N}^{-1}(t)$ ;

$\beta(t) = a_1(t, \lambda)E_{11} + E_{21} + E'_{11}$ ;

$E_{11}, E_{21}$  – елементи матриці  $\mathbf{E}(t)$ , обумовленої (9).

Отже співвідношення (7), (8) і (9) цілком визначають структуру пристрою багатоканальної обробки і точність оцінки радіосигналу на його виході при довільному виді модуляції корисного сигналу.

Структурна схема синтезованого пристрою багатоканальної обробки, що реалізує алгоритм (10), зображена на рис. 2.

На виході пристрою формується оптимальна оцінка прийнятого радіосигналу  $\hat{s}(t, \lambda)$ . Основу пристрою складає керований генератор модульованих коливань  $\Gamma(\hat{\lambda})$ , частота якого збігається з частотою корисного сигналу. На виході суматора діє сигнал помилки  $\Delta z$ , що служить для формування відповідних керуючих напруг генератора по відхиленню  $\Delta z$  і по швидкості відхилення  $\Delta z'$ . Оптимальна обробка вхідних сигналів у пристрої збігається з аналогічною, яка має місце в багатоканальних

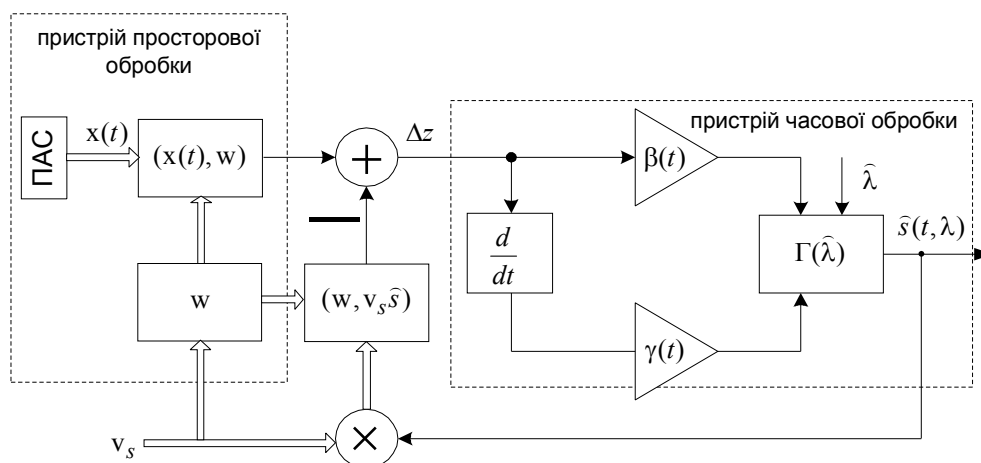


Рис. 2. Структурна схема пристрою оптимальної багатоканальної обробки в МІМО-системі

виявлювачах-вимірювачах [8] і зводиться до декореляції завад і накопичення корисних сигналів. Сигнал помилки  $\Delta z$  являє собою різницевий сигнал між оптимальним вихідним сигналом пристрою вагової просторової обробки та пристрою формування опорного сигналу. При цьому на одному вході суматора діє адитивна суміш корисного сигналу і завад, а на другому – тільки корисного сигналу. У випадку забезпечення високоточної фільтрації, коли  $\beta(t) = \gamma(t) \rightarrow 0$ , підстроювання генератора припиняється. Вид модуляції корисного сигналу впливає лише на структуру генератора  $\Gamma(\hat{\lambda})$ , величину коефіцієнта підсилення  $\beta(t)$ , а також вектор  $\mathbf{w}$ .

Як видно з рис. 2, оптимальна обробка розпадається на просторову і попередню часову. Оптимізація просторової обробки реалізується пристроєм вагової обробки шляхом вагового підсумовування комплексних амплітуд коливань  $x_i(t)$  з виходів прийомних антен МІМО-системи з комплексними ваговими коефіцієнтами  $w_i$ , а попередня часова здійснюється за допомогою керованого генератора та підсилювачів з змінними коефіцієнтами підсилення  $\beta(t), \gamma(t)$ .

З виразу (8) витікає, що в розглянутому випадку оптимальна просторова обробка в МІМО-системах не залежить від часових статистичних характеристик корисного сигналу. Це означає, що для різних режимів передавання в МІМО-системах (різних модуляцій корисного сигналу) просторова обробка не змінюється і реалізується шляхом вагового підсумовування комплексних амплітуд коливань  $x_i(t)$  з виходів прийомних антен МІМО-системи з комплексними ваговими коефіцієнтами  $w_i$ . Вид модуляції впливає на структуру пристрою попередньої часової обробки (змінюється структура генератора  $\Gamma(\hat{\lambda})$  відповідно виду модуляції) та в пода-

льшому на структуру пристрою основної часової обробки (демодулятора).

### Висновки та напрямки подальших досліджень

На основі використання методу калмановської фільтрації синтезовано пристрій оптимальної багатоканальної обробки на прийомній стороні для МІМО-систем в умовах використання різних видів модуляції та впливу заважаючих сторонніх джерел сигналів та шумів. Структура синтезованого пристрою оптимальної багатоканальної обробки щодо МІМО-систем при різних видах модуляції корисного сигналу складається з пристрою просторової обробки та пристрою попередньої часової обробки, який формує необхідний опорний сигнал щодо пристрою просторової обробки. При цьому структура пристрою попередньої часової обробки залишається незмінною при різних видах модуляції корисного сигналу. Змінюються лише параметри відповідних елементів пристрою попередньої часової обробки.

В загальному випадку рішення задачі оптимізації багатоканальної обробки на прийомній стороні для МІМО-систем визначається умовами у середовищі передачі сигналів, заводовою обстановкою та напрямком прийому корисного сигналу при заданих характеристиках спрямованості прийомних антен і їх розміщенні відносно опорної точки. Для реалізації оптимальної просторової обробки сигналів в МІМО-системах потрібно знати ваговий вектор  $\mathbf{w}$ , який визначається не тільки оберненою кореляційною матрицею  $\mathbf{R}^{-1}$  завад і шумів, але й вектором  $\mathbf{V}_s$  амплітудно-фазових викривлень корисного сигналу, обумовлених характеристиками спрямованості прийомних антен з урахуванням напрямку його прийому.

Напрямок подальших досліджень визначається тим, що в багатьох реальних умовах застосування

МІМО-систем така інформація відома частково або зовсім відсутня. Це обумовлено різноманіттям можливих видів обстановки, безперервною зміною взаємного просторового положення передавального та прийомного терміналів і джерел завад, які визначають відповідний рівень ситуаційної невизначеності умов використання МІМО-систем. Щоб досягти оптимальності обробки в таких умовах та забезпечити високий рівень ефективності передачі інформації ( $\eta$ -ефективності), пристрій багатоканальної обробки МІМО-систем повинен бути самонастроювальним (адаптивним) до апріорі невідомих та змінних за часом складних зовнішніх умов їх застосування. Це обумовлює актуальність проблеми створення МІМО-систем з інваріантними характеристиками  $\eta$ -ефективності в умовах ситуаційної невизначеності.

### Література

1. WiMAX – технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / В.С. Сюваткин и др.; под ред. В.В. Крылова. – СПб.: БВХ-Петербург, 2005. – 368 с.
2. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи / И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
3. Andersen J.B. Singular Value Decomposition / J.B. Andersen // IEEE Antennas Propagat. Magazine. – 2000. – V. 42, No.2. – P.12.
4. Маковеева М.М. Системы связи с подвижными объектами / М.М. Маковеева. – М.: Радио и связь, 2002. – 212 с.
5. Борисов Ю.П. Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств / Ю.П. Борисов, В.Б. Цветнов. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.
6. Обработка сигналов в радиотехнических системах / Под ред. А.П. Лукошкина. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. – 400 с.
7. Фалькович С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
8. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.И. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

Надійшла до редакції 14.12.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. каф. ТКС Ю.Ю. Коляденко, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

### ОПТИМИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ В МІМО-СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МОДУЛЯЦИИ И ДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ПОМЕХ

**Б.Б. Поспелов, Д.Л. Чечёткин, С.В. Штангей**

На основе методов калмановской фильтрации предложена структура устройства оптимальной предварительной обработки радиосигналов, принимаемых на многоэлементную антенную систему в условиях действия внешних, точечных в пространстве источников помех. Показано, что в условиях функционирования МІМО-систем оптимальная обработка распадается на пространственную и предварительную временную. Структура устройства оптимальной пространственной обработки индифферентна к виду модуляции полезного радиосигнала. При изменении вида модуляции радиосигнала меняется алгоритм его обработки в устройстве предварительной временной обработки.

**Ключевые слова:** беспроводные телекоммуникационные системы, МІМО-системы, оптимизация, многоэлементная антенная система, пространственные каналы, виды модуляции.

### OPTIMIZATION TREATMENTS FOR MIMO-SYSTEMS IN USE CONDITIONS OF DIFFERENT MODULATION FORMAT AND EFFECT EXTERNAL NOISE

**B.B. Pospelov, D.L. Chechotkin, S.V. Shtangey**

Configuration of multi channel receiving device for optimal processing of radio signal in condition external noise is described. Kalman filtering methods use for synthesis the device. The optimization treatment device consists of a spatial processing device and a pretreatment time processing device for MIMO-systems operating conditions. The spatial processing device is indifferent to modulation format of valid radio signal. Operation algorithm of the pretreatment time processing device depend on modulation format.

**Key words:** wireless communication, MIMO-systems, optimization, multielement array, spatial channel, modulation format.

**Поспелов Борис Борисович** – д-р техн. наук, доцент, професор Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, Харків, Україна.

**Чечоткін Дмитро Леонідович** – канд. техн. наук, доц. каф. ТКС Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна. e-mail: chechotkin@list.ru.

**Штангей Світлана Вікторівна** – канд. техн. наук, доц. каф. ТКС Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.