ISSN 2073-7394

**Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка**

# СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Випуск 1(29)

Заснований

у 2007 році

Наукове періодичне видання, в якому відображені результати наукових досліджень з розробки та удосконалення систем управління, навігації та зв'язку у різних проблемних галузях.

**Засновник:**
Полтавський Національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

**Адреса редакційної колегії:**
Україна, 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24

**Телефон**: +38 (066) 706-18-30 (консультації, прийом статей).

**E-mail**:
kozelkovae@mail.ru

**Інформаційний сайт**:
http://www.pntu.edu.ua

**Реферативна інформація** зберігається: у загальнодержавній реферативній базі даних „Україніка наукова" та публікується у відповідних тематичних серіях **УРЖ „Джерело"**.



*За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор*

*Затверджений до друку науково-технічною радою Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка (протокол № 3 від 22 січня 2014 року)*

*Занесений до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого наказом Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України від 25.01.2013 р., № 54*

*Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ПР від 16.11.2012 р.*

# З М І С Т

УДК 621.396.91

А.Ю. Литвиненко, О.А. Мирний, І.І. Слюсарь

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава*

# ВЛАСТИВОСТІ СПЕКТРАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ КУТОВИХ КООРДИНАТ КОРЕСПОНДЕНТІВ ПРИ ВРАХУВАННІ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ АНТЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ SMART-АНТЕН

*У роботі досліджено особливості найбільш відомих методів спектрального оцінювання кутових координат кореспондентів в системах зі SMART-антенами в умовах компенсації взаємного впливу антенних елементів.*

***Ключові слова:*** *цифрове діаграмоутворення, діаграма спрямованості, взаємний вплив, спектральна оцінка, метод Бартлетта, метод Кейпона, MUSIC, SMART-антени.*

## Вступ

У сучасних інфокомунікаційних системах зі SMART-антенами використовується технологія цифрового діаграмоутворення (ЦДУ) [1]. Внаслідок її застосування створюються передумови для ефективного розв'язання таких задач:

– поліпшення відношення сигнал-завада завдяки формуванню глибоких «нулів» ДС в напрямках завад;

– інтеграція в єдину інформаційну систему різних за функціональним призначенням підсистем (наприклад, радіонавігації, радіозв'язку);

– придушення завад, що виникають при багатопроменевому поширенні радіохвиль;

– підвищення інтенсивності корисних сигналів шляхом фокусування максимумів ДС у напрямках рухомих кореспондентів;

– розв'язання проблеми електромагнітної сумісності.

Для адаптації до сигнально-завадової обстановки доцільно розглянути підходи до обробки сигналів на основі методів спектрального аналізу. Їхня реалізація пов'язана з аналізом стійкості проти впливу різного роду дестабілізуючих чинників. При цьому має значення чутливість методів обробки до розкиду амплітудних і фазових характеристик окремих каналів приймального тракту, рівня власних шумів, ідентичності та кількості антенних елементів (АЕ), корельованості сигналів, обсягу сигнальної вибірки тощо. У результаті взаємодії випромінювачів у решітках можуть істотно змінюватися скеровані особливості та енергетичні характеристики SMART-антени порівняно з характеристиками, визначеними без врахування взаємного впливу [2]. На рис. 1 наведено спектральну оцінку за методом Бартлетта, яка отримана за 2 рівнопотужними сигналами від кореспондентів з кутовими координатами 0 і $-34^0$ для лінійної SMART-антени, що складається з 8-ми напівхвильових диполів. Як наслідок, можна констатувати той факт, що якість процедур обробки сигналів суттєво залежить від прояву ефекту взаємного впливу каналів приймального тракту [3].

**Мета роботи:** дослідження особливості методів спектрального аналізу при компенсації взаємного впливу каналів SMART-антени.

## Основна частина

Для спрощення аналітичних положень надалі доцільно обмежитися розглядом лінійної еквідистантої SMART-антени. Оцінку кореляційної матриці (КМ) сигналів на виходах приймальних каналів такої антени представимо у вигляді:

$$R_S = \frac{1}{S}\sum_{c=1}^{S} \dot{x}_c \, \dot{x}_c^{н}, \qquad (1)$$

де S – кількість вибірок, $\dot{x}_c$ – вибірка, що відповідає с-му відліку, н – символ операції комплексного сполучення.

У точках розташування АЕ плоска хвиля поширюється з напрямку візування на m кореспондентів ($m \in \overline{1,M}$) і характеризується керуючим вектором:

$$F_{LINE} = \left(1 \;\; \exp\left(j\theta_m\right) \;\; \ldots \;\; \exp\left(j\left(N-1\right)\theta_m\right)\right)^T, \qquad (2)$$

де N – кількість каналів ЦАР, т – символ транспонування.

Припустимо, що амплітудні-частотні характеристики (АЧХ) приймальних каналів SMART-антени мають форму, близьку до прямокутної; коефіцієнти передачі всіх каналів однакові та дорівнюють одиниці; власні шуми на виходах цих каналів не корельовані із сигналами від кореспондентів, статистично незалежні, мають однакову дисперсію. Крім того, вважаємо, що щільності ймовірностей миттєвих значень власних шумів решітки розподілені за нормальним законом,

ширина спектра джерел випромінювання шумових сигналів істотно перевищує смугу пропускання каналів, інтервал кореляції сигналів на виходах приймальних каналів SMART-антени, що відповідають одному й тому ж кореспондентів, значно перевищують максимальний час затримки по каналах SMART-антени.

Далі реалізуємо підхід до врахування взаємного впливу АЕ SMART-антени, який можна використовувати в процедурах обробки сигналів, що базуються на будь-якому методі спектрального аналізу, в випадку досить великого відношення сигнал-шум (ВСШ) та інваріантності коефіцієнтів взаємного впливу каналів (КВВ) до напрямку на кореспондентів. Сутність його полягає в наступному. Спочатку визначається оцінка матриці значень КВВ Q. Для обчислення КВВ необхідно мати інформацію про взаємні і власні опори випромінювання АЕ SMART-антени. При цьому можна використовувати методики [4 - 6]. У процесі приймання сигналів відносно невідомого вектору напруг приймальних каналів U, вільних від ефекту взаємного впливу, розв'язується рівняння:

$$QU = \tilde{U}, \qquad (3)$$

де $\tilde{U}$ – напруги приймачів після аналого-цифрового перетворювача (АЦП) без проведення корекції.

Після розв'язання виразу визначається оптимальна оцінка вектору:

$$U = \left(Q^H Q\right)^{-1} Q^H \tilde{U}, \qquad (4)$$

яка в процедурах обробки сигналів використовується замість значень $\tilde{U}$.

Розглянемо більш докладно цей підхід на прикладі SMART-антени з N елементів (наприклад, N=8), розташованих через інтервал d. Проаналізуємо три можливі варіанти обробки сигналів. Перший – відноситься до випадку відсутності взаємного впливу, у другому – ДС лінійної антени формується при некомпенсованому впливі всіх наявних N елементів решітки ( K = N ), третій варіант відповідає компенсації взаємного впливу АЕ. Визначимо спектральні оцінки кутової координати кореспонденту, для чого розглянемо оцінки, отримані за допомогою найбільш відомих методів.

Оцінка за методом Бартлетта [7], представлена такий вигляд:

$$\hat{X} = \arg\max_X \left[F_{LINE}^H R_S F_{LINE}\right], \qquad (5)$$

де $\hat{X} = (\hat{X}_1 \ \dots \ \hat{X}_m \ \dots \ \hat{X}_M)^T$ – вектор оптимальних оцінок кутових координат кореспондентів, що характеризує потужність результуючого сигналу, який надходить з напрямку $X_m$. Розглянемо ситуацію для одного кореспонденту ( $M = 1$ ) при відсутності шумів. Через наявність взаємного впливу АЕ звужується кутовий сектор сканування, в якому можливо однозначне визначення параметрів сигналів. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням відхилення напрямку візування на кореспондентів від нормалі решітки зростає неадекватність оцінки енергетики прийнятих сигналів до 12 дБ за потужністю. З ростом кутової координати більш помітним стає і зсув її оцінки (рис. 2), який представлений залежно від числа (0, 2, 4, 6, 7) АЕ, вплив яких враховується в обчислювальних процедурах. У випадку кількох рівнопотужних сигналів спектральна оцінка за методом Бартлетта при взаємному впливі має ті ж властивості, що і для односигнальної ситуації (див. рис. 1 для двох сигналів з кутовими координатами 0 і $-34^0$).

Існують методи спектрального оцінювання з характеристиками розрізнення сигналів набагато кращими, у порівнянні з методом (5). Одним з найбільш відомих є метод Кейпона [7]:

$$\hat{X} = \arg\max_X \left[\left(F_{LINE}^H R_S^{-1} F_{LINE}\right)^{-1}\right], \qquad (6)$$

де $\hat{X} = \left(X_1, X_2, \dots, X_m, \dots, X_M\right)^T$ – вектор оптимальних оцінок кутових координат кореспондентів.

За можливістю розрізнювання сигналів він займає проміжне місце між методом Бартлетта і так званими проекційними методами надрозрізнення. Слід зазначити, що в ситуації приймання негауссовських і нестаціонарних сигналів великої інтенсивності кращі показники точності порівняно з методом Кейпона має більш складний в обчислювальному плані, але близький за структурою метод теплового шуму [8]. Метод класифікації множинних сигналів (MUSIC) відноситься до проекційних методів надрозрізнення [7]. Хоча він і має деякі недоліки в умовах корельованих шумів, але за рахунок відносної простоти реалізації він набув широкого застосування. MUSIC передбачає операцію розподілу власних значень кореляційної матриці на сигнальні й шумові. Як варіант, метод MUSIC може бути представлений у вигляді [8]:

$$\hat{X} = \arg\max_X \left[\left(N - F_{LINE}^H \sum_{r=M+1}^{N} g_r g_r^H F_{LINE}\right)^{-1}\right], \qquad (7)$$

де $g_r$ – власні вектори, що відповідають шумовим (найменшим) власним значенням КМ.

Проаналізуємо спектральні оцінки для двох рівнопотужних сигналів від кореспондентів з координатами, наприклад: $-38^0$ і $-34^0$, отримані методом Кейпона (6) рис. 3. На відміну від оцінок отриманих методом Бартлетта, вони менш чутливі до відповідності прийнятої моделі компенсації взаємного впливу реальному числу взаємодіючих АЕ. Розглянуті вище спектральні оцінки, отримані за умов відсутності шуму. Для прийнятих допущень

про шумову компоненту сигналів, ці оцінки можна вважати асимптотичними.

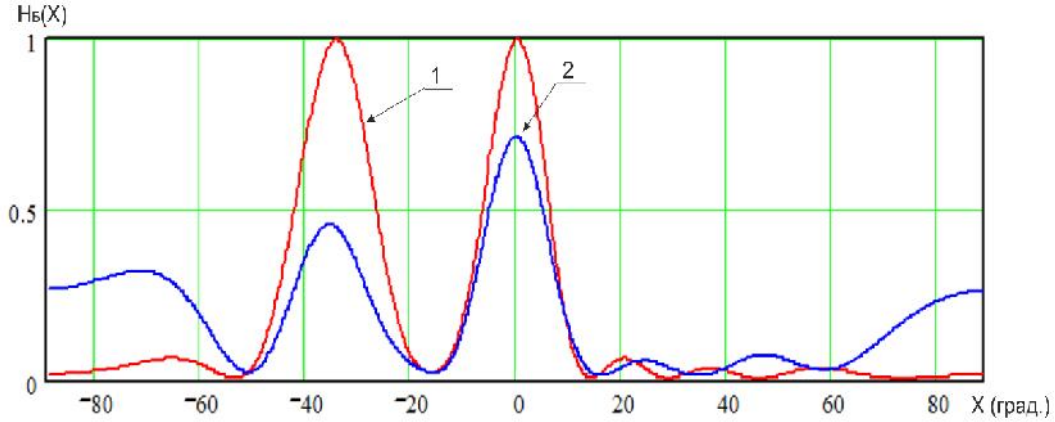



Рис. 1. Оцінка за методом Бартлетта: 1) – у випадку врахування взаємного впливу АЕ; 2) – при його нехтуванні

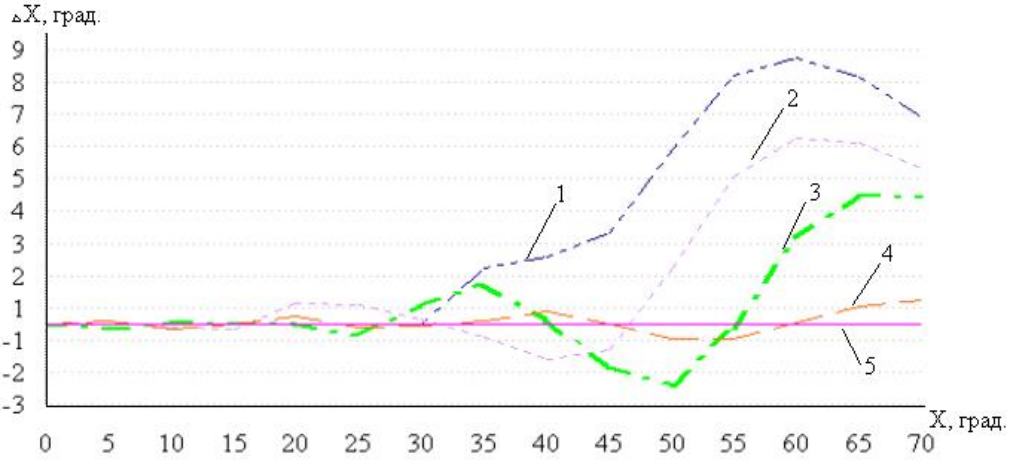
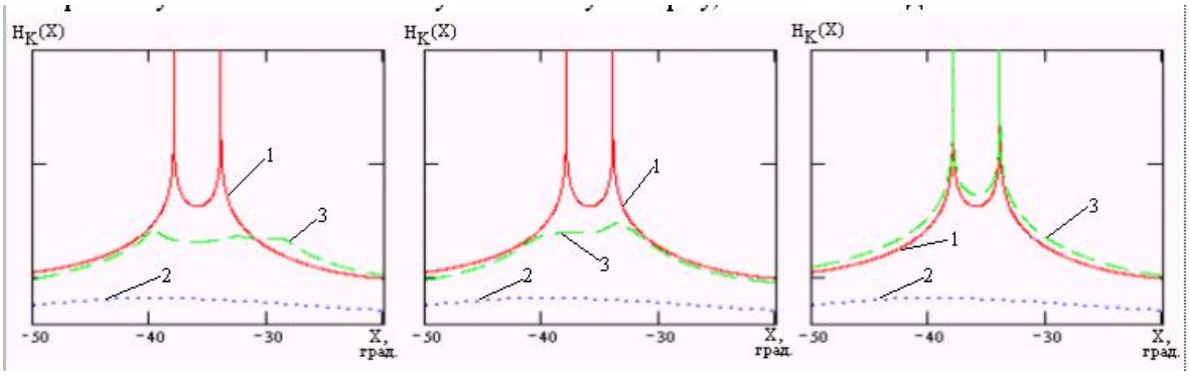
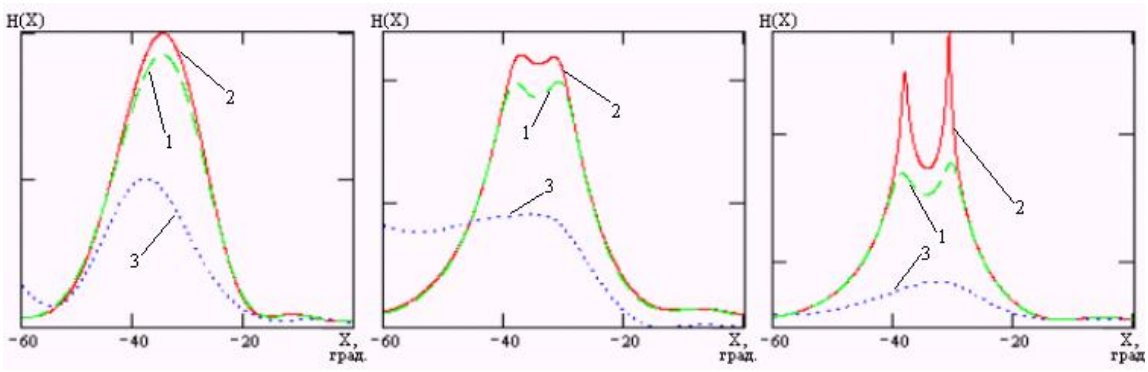



Рис. 2. Зсув оцінки кутової координати кореспондентів за методом Бартлетта при компенсації взаємного впливу: 1 – нуль, 2 – двох, 3 – чотирьох, 4 – шести, 5 – сім з 8-ми каналів антени




*а)* *б)* *в)*

Рис. 3. Оцінка кутових координат кореспондентів за методом Кейпона: 1) – при відсутності взаємного впливу, 2) – при впливі 8-ми АЕ, 3) – відповідно при врахуванні а) – 5-ти б) – 6-ти в) – 7-ми з 8-ми АЕ, що впливають




*а)* *б)* *в)*

Рис. 4. Оцінка кутових координат кореспондентів за методами а) – Бартлетта, б) – Кейпона, в) – MUSIC, при компенсації взаємного впливу 1) – 6-ти каналів з 8-ми, 2) – при компенсації 8-ми каналів з 8-ми, 3) – за умови відсутності врахування взаємного впливу каналів

Однак, на практиці для формування КМ (1) доводилося використовувати не нескінченну сигнальну вибірку, а обмеженої довжини. При впливі шуму, наприклад, коли ВСШ становить ≈12 дБ за потужністю, метод Кейпона не дозволяє розрізнити два рівнопотужні сигнали з зазначеними раніше кутовими координатами ($-38^0$, $-34^0$). Як і у випадку відсутності взаємного впливу каналів, на особливості оцінки за методом Кейпона впливає ефективна довжина антени (кількість каналів SMART-антени), ВСШ на вході приймальних каналів, довжина сигнальної вибірки. Розрізнення кореспондентів можливо зі збільшенням їх мінімального кутового рознесення, наприклад, при кутових координатах, рівних відповідно $-38^0$ та $-34^0$, з ВСШ на вході приймачів, рівним 12 дБ за потужністю, для довжини сигнальної вибірки 300 відліків (рис. 4).У випадку оцінки за методом Бартлетта кореспонденти не розрізнюються. Серед методів Кейпона і MUSIC найбільш чутливим відповідно до прийнятої моделі компенсації взаємного впливу реальному числу взаємодіючих АЕ є метод Кейпона. Основну роль відіграє відповідність кількості каналів, вплив яких компенсується при обробці сигналів, числу каналів решітки, що реально впливають. Чим менше кутове рознесення кореспондентів, тим більше повинна бути ця відповідність. Вважається, що метод MUSIC порівняно з методом мінімальної норми більш стійкий проти розходжень коефіцієнтів підсилення приймальних каналів і наявності фазових помилок [8], але програє йому в точності оцінювання. При зменшенні ВСШ має місце збільшення зсуву оцінки кутової координати, одержуваної за методом MUSIC, при цьому зсув залежить також від корельованості сигналів і кількості АЕ. При дослідженні чутливості алгоритмів MUSIC, ESPRIT до помилок АЕ, пов'язаних з похибками оцінювання амплітуд і фаз сигналів, неточністю розташування і т. ін., гірші характеристики має метод MUSIC. Кореляція сигналів діє однаково на всі методи. При наближенні коефіцієнта взаємної кореляції до одиниці СКП кутового оцінювання істотно зростає, а при рівності одиниці, алгоритми стають непрацездатними.

## Висновки

Таким чином, проведений порівняльний аналіз чутливості методів надрозрізнення сигналів до ступеня компенсації взаємного впливу АЕ антени дозволяє зробити вибір на користь того чи іншого методу спектрального оцінювання. Запропонована оптимізація процедур обробки сигналів наближає до практичної площини розв'язання задачі електромагнітної сумісності, дозволяє додатково сфокусувати промені ДС SMART-антен за рахунок компенсації побічних ефектів.

## Список літератури

*1. Слюсар В.И. Smart-антенны пошли в серию // Электроника: наука, технология, бизнес. –Москва, 2004. – № 2 – С. 62–65.*

*2. Слюсарь І.І. Проблемні аспекти використання цифрового діаграмоутворення в системах зв'язку в епоху інформаційних війн// Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць ХАІ. – 2001. – № 22. –С. 79–83.*

*3. Слюсарь І.І. Особливості кутової пеленгації в оглядово-прицільних РЛС з цифровим діаграмоутворенням при компенсації взаємного впливу каналів// Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научн.-техн. сб. № 7. – К.: НТЦ АСВ, 2003. – С. 19–25.*

*4. Режим доступу – Svantesson T. Direction Finding in the Presence of Mutual Coupling. – http://db.s2.chalmers.se/download/theses/lic_307.pdf.*

*5. Лобкова Л.М., Проценко М.Б., Посный О.А. Взаимные сопротивления излучения круглых рамок в малоэлементных антенных решетках// Радиоэлектроника. –1999. – № 2. – С. 27–32.*

*6. Режим доступу – Millar. J. Equations from "Yagi*

*Antenna Design" by Jim Lawson. – http://mathcad.adeptscience.co.uk/mcadlib/apps/lawson.mcd.*

*7. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.*

*8. Дрогалин В.В., Меркулов В.И., Родзивилов В.А. и др. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучений, основанные на методах спектрального анализа//Заруб. радиоэлектроника. –1998. –№2. –С. 3–17.*

*Надійшла до редколегії 12.11.2013*

**Рецензент:** д.т.н., проф. В.А. Краснобаєв, ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, Полтава

СВОЙСТВА СПЕКТРАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ КОРРЕСПОНДЕНТОВ
**ПРИ УЧЕТЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ SMART-АНТЕНН**

А.Ю. Литвиненко, О.А. Мирный, И.И. Слюсарь

*В работе исследованы особенности наиболее известных методов спектрального оценивания угловых координат корреспондентов в системах со SMART-антеннами в условиях компенсации взаимного влияния антенных элементов.*

***Ключевые слова:*** *цифровое диаграммообразование, диаграмма направленности, взаимное влияние, спектральная оценка, метод Бартлетта, метод Кейпона, MUSIC, SMART-антенны.*

**PROPERTIES OF SPECTRAL ESTIMATION OF ANGULAR COORDINATES OF CORRESPONDENTS AT THE MUTUAL COUPLING OF ANTENNA ELEMENTS SMART-ANTENNAS**

A.J. Lytvynenko, O.A. Myrnyi, I.I. Slyusar

*This paper studies the features of the most well-known methods of spectral estimation of angular coordinates of correspondents in systems with a SMART antennas in compensation of the mutual influence of antenna elements.*

***Keywords:*** *digital beamforming, directional diagram, mutual coupling, spectral estimation, method Bartlett, method Capone, MUSIC, SMART-antenna.*