

В. В. НАУМЕНКО, О. С. РУБЕЛЬ, О. В. ТОЦЬКИЙ, В. Б. ШАРОНОВ*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Україна*

ВІДТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ ТА ЗОБРАЖЕНЬ ЗА БІСПЕКТРОМ У ПРИСУТНОСТІ ШУМІВ

В ряді практичних застосувань цифрової обробки сигналів досліджуваній процес може містити в собі корельовані спектральні компоненти або фазові зв'язки між різними частотними складовими. Визначення фазових зв'язків дає дуже важливу й корисну інформацію для правильного розуміння, аналізу та опису властивостей фізичних явищ, що породжують ці процеси. Однак така інформація безповоротно втрачається при використанні класичних методів прийому та обробки сигналів з використанням енергетичних статистик, тобто статистик другого порядку. Отримання оцінок параметрів сигналів та їх аналіз з використанням кореляційних функцій третього порядку (КФТП) й біспектру – Фур'є перетворенню КФТП дозволяє дізнатися про властивості сигналів значно більше, ніж при використанні звичайних кореляційних функцій. Оцінка біспектральної густини (спектральної густини третього порядку) на відміну від оцінки енергетичного спектру дозволяє не тільки правильно описати характеристики процесу, що спостерігається, але й зберегти, а при необхідності й відновити фазові характеристики. Тому у ряді прикладних задач сучасної телекомунікації, радіолокації а також задач обробки зображень та інших біспектральний аналіз часто служить ефективним засобом обробки сигналів й оцінки параметрів сигналів. Метою статті є дослідження завадостійкості рекурсивного алгоритму відтворення форми сигналу та відтворення зображень за біспектром. Для дослідження було обрано декілька типів сигналів а саме: імпульси прямокутної, трикутної, гаусової форми, а також сигнал-триплет. Аналіз результатів відновлення сигналів вказую на те, що при підвищенні потужності перешкод якість відновлення знижується, однак, що саме найголовніше, форма сигналу навіть при малих значеннях SNR відновлюється добре. Аналіз результатів відновлення зображення вказує на відновлення зображення, але даний алгоритм вносить спотворення у вигляді зсуву.

Ключові слова: біспектр; біамплітуда; рекурсивний алгоритм; відновлення сигналу.

Вступ

У нинішній час більшість систем радіозв'язку, радіомовлення та телебачення є цифровими. При цьому збільшення об'єму інформації, що передається, зростання кількості абонентів, конкуренція на ринку послуг зв'язку призводять до більш жорстких вимог як до вже існуючих, так і до систем і пристроїв, що проектуються. Сучасні методи прийому інформації базуються на широкому використанні статистик другого порядку (автокореляційної функції й спектральної густини потужності) та метода максимальної правдоподібності. За їх допомогою було запропоновано вирішення широкого кола задач, серед яких отримання оптимальних оцінок параметрів сигналів, синтез оптимальних трактів, аналіз сигналів на основі миттєвих оцінок Фур'є спектру та ін. Необхідною умовою працездатності багатьох з розроблених процедур є наявність апріорної інформації про параметри сигналу та характеристики шуму, а також припущення щодо гаусовості шумів [1, 2].

В той же час, поступово зросла кількість задач,

розв'язання яких за допомогою оптимальних методів прийому та обробки виявилось важким або зовсім неможливим. В ряді практичних застосувань цифрової обробки сигналів досліджуваній процес може містити в собі корельовані спектральні компоненти або фазові зв'язки між різними частотними складовими, які присутні у процесі, що спостерігається. Визначення фазових зв'язків дає дуже важливу інформацію для правильного розуміння, аналізу та опису властивостей фізичних явищ, що породжують ці процеси. Однак така інформація безповоротно втрачається при використанні методів прийому та обробки сигналів з використанням енергетичних статистик, тобто статистик другого порядку. Отримання оцінок параметрів сигналів та їх аналіз з використанням кореляційних функцій третього порядку (КФТП) й біспектрального аналізу (біспектр, за визначенням, – це двовимірне перетворення Фур'є КФТП) дозволяє дізнатися про властивості сигналів значно більше, ніж при використанні звичайних кореляційних функцій. Зокрема, біспектральний аналіз в задачах обробки сигналів дозволяє

зберегти та добути інформацію щодо внеску частотно-фазових зв'язків спектральних компонент. Оцінка біспектру мало чутлива до адитивної завади з симетричним законом розподілу імовірності, а також дана оцінка нечутлива до випадкових зсувів сигналу, що обробляється.

Метою даної статті є дослідження завадостійкості біспектрального методу відновлення форми сигналів та відновлення цифрових зображень.

1. Математичні основи біспектральної обробки сигналів

Для вивчення властивостей випадкових процесів і вирішення багатьох прикладних завдань існує підхід, заснований на використанні кумулянтних функцій – кореляційних функцій і спектрів вищих порядків – поліспектрів [3]. Аналіз спектрів вищих порядків дає можливість здобуття принципово нової інформації про фазові властивості досліджуваних процесів і доповнює можливості некогерентного спектрального аналізу процесів. Даний підхід володіє рядом коштовних і привабливих переваг в порівнянні із звичайним спектральним аналізом [1, 2]. Ці переваги полягають, по-перше, в придушенні гаусової завади, по-друге, спектри вищих порядків містять інформацію про фазові зв'язки спектральних компонент у процесі, що спостерігається, і, по-третє, кумулянтні функції дозволяють вивчати нелінійні властивості процесу і оцінювати нелінійні характеристики.

Оцінка біспектральної щільності (спектральній щільності третього порядку або кумулянтного спектру) на відміну від оцінки енергетичного спектру дозволяє не лише правильно описати статистичні характеристики процесу, що спостерігається, але і визначити наявність кореляційних зв'язків спектральних компонент, а також відновити фазові зв'язки спектральних компонент даного процесу. Отже, основна відмінність біспектру від енергетичного спектру (спектральної щільності другого порядку) полягає в збереженні фазової інформації і можливості її добування. Безперервне зростання інтересу до біспектрального аналізу супроводжується появою великої кількості публікацій в даному напрямі. У зв'язку з цим досить відзначити ряд фундаментальних оглядових статей, основна увага яких присвячена додатку біспектрів до цифрової обробки сигналів і зображень [4]. Зупинимося на аналізі переваг біспектру по відношенню до енергетичного спектру, які є корисними, перспективними, знаходять практичне використання і служать основою для розробки нових методів і алгоритмів в сучасних системах обробки сигналів.

У системах обробки сигналу, що спостерігається

на тлі адитивного гаусового шуму, важливою є властивість спадання до нуля біспектральної щільності завади з симетричною функцією щільності вірогідності. Дана властивість біспектру забезпечує робастність алгоритмів відновлення сигналів у присутності нормальної адитивної завади в системах цифрової обробки сигналів у радіолокації, а також в системах обробки зображень [4-7].

За визначенням, вперше даним в роботі і загальноприйнятим в даний час в поліспектральному аналізі, біспектр – це перетворення Фур'є КФТП. Запишемо вираз для біспектру у вигляді наступного двовимірного дискретного перетворення Фур'є КФТП як:

$$\dot{B}_x(p, q) = \sum_{k=-I+1}^{I-1} \sum_{l=-I+1}^{I-1} R_x(k, l) \exp[-j2\pi(kp + lq)] \quad (1a)$$

або

$$\begin{aligned} \dot{B}_x(p, q) &= \left\langle \dot{X}^{(m)}(p) \dot{X}^{(m)}(q) \dot{X}^{*(m)}(p+q) \right\rangle_{\infty} = \\ &= \left\langle \dot{X}^{(m)}(p) \dot{X}^{(m)}(q) \dot{X}^{(m)}(-p-q) \right\rangle_{\infty}, \end{aligned} \quad (1b)$$

де біспектр $\dot{B}_x(p, q) = |\dot{B}_x(p, q)| \exp[j\gamma_x(p, q)]$ – це комплексна функція двох частотних змінних p і q ; $|\dot{B}_x(p, q)|$ і $\gamma_x(p, q)$ – відповідно амплітудний (біамплітуда) і фазовий (біфаза) біспектри даного процесу; $p = -I+1, \dots, I-1$, $q = -I+1, \dots, I-1$ – частотні індекси.

2. Рекурсивний алгоритм відновлення фази та амплітуди сигналу з біспектру

У 1984 році Н. Bartelt, А. W. Lohmann, В. Winitzer у статті [8] запропонували рекурсивний алгоритм відновлення фазового та амплітудного Фур'є спектрів з біспектру. Розглянемо його детальніше.

Спотворена шумом m -та реалізація $x^{(m)}(i)$ описується сумішшю корисного сигналу $s(i)$ і шуму $n(i)$ і може бути представлена як:

$$x^{(m)}(i) = s(i - \tau^{(m)}) + n^{(m)}(i), \quad (2)$$

де $n^{(m)}(i)$ – m -та реалізація суміші шумів, $m = 1, 2, \dots, M$; $\tau^{(m)}$ – випадковий зсув сигналу $s(i)$.

У відповідності з моделлю (2), що спостерігається на вході вимірювальної системи, розглядають-

ся такі джерела спотворень. Перший з них - це адитивний білий гаусів шум, походження якого зазвичай пов'язане, головним чином, з власними апаратурними шумами вимірювальної системи, а також із впливом адитивних шумів каналу поширення сигналів. Друге джерело спотворень - це імпульсний шум, який може виникати, наприклад, внаслідок впливу промислових перешкод. При відновленні сигналу по даним біспектру необхідно з набору реалізацій (2), що спостерігаються на вході вимірювальної системи, в першу чергу сформувати оцінку КФТП:

$$R_s(k, l) = \left\langle \sum_{i=0}^{l-1} x^{(m)}(i)x^{(m)}(i-k)x^{(m)}(i-1) \right\rangle_M, \quad (3)$$

де процедура $\langle \dots \rangle_M$ означає статистичне осереднення по кінцевому набору з M статистично незалежних реалізацій; $k = 0, 1, 2, \dots, l-1$ та $l = 0, 1, 2, \dots, l-1$ - індекси відліків двовимірної оцінки КФТП.

Двовимірну оцінку КФТП виду (3) можна представити наступною сумою:

$$\begin{aligned} \hat{R}_s(k, l) = R_s(k, l) + \left\langle n^{(m)}(i) \right\rangle_M \times \\ \times [R_s(k) + R_s(l) + R_s(k+1)] + \\ + \bar{s}(i) [\hat{R}_N(k) + \hat{R}_N(l) + \hat{R}_N(k+1)] + \hat{R}_N(k, l), \end{aligned} \quad (4)$$

де $\left\langle n^{(m)}(i) \right\rangle_M$ - середнє по ансамблю з M реалізацій значення шуму; $R_s(k), R_s(l), R_s(k+1)$ - кореляційні функції сигналу (моменти другого порядку); $\bar{s}(i)$ - середнє значення корисного сигналу; $\hat{R}_N(k, l)$ - оцінка КФТП шуму (момент третього порядку).

Оцінка КФТП збігається з КФТП корисного сигналу тільки при одночасному виконанні умов рівності нулю середнього значення корисного сигналу і шуму, а також рівності нулю оцінки ТАКФ шуму

$$\left\langle n^{(m)}(i) \right\rangle_M = 0, \quad (5a)$$

$$\bar{s}(i) = 0, \quad (5b)$$

$$\hat{R}_N(k, l) = 0. \quad (5b)$$

Слід зазначити, що на практиці одночасне виконання вище наведених умов (5a - 5b) має місце вельми рідко. Тому, практично завжди оцінка КФТП оброблюваного сигналу виявляється спотвореною шумом, який, як буде показано нижче, «просочується» в сигнал, відновлюваний за оцінкою біспектру.

Оцінка біспектру сигналу $\hat{B}_s(p, q)$, яка за визначенням є Фур'є перетворенням оцінки КФТП виду (3), може бути представлена як:

$$\hat{B}(p, q) = \text{DFT} \left\{ \hat{R}_s(p, q) \right\} = \left| \hat{B}_s(p, q) \right| \times e^{j\hat{\gamma}_s(p, q)}, \quad (6)$$

де $\text{DFT} \{ \dots \}$ означає процедуру двовимірного прямого перетворення Фур'є. При невиконанні умов (5a - 5b) біспектральної оцінки, отриманої за допомогою перетворення Фур'є, забрудненої оцінки КФТП також виявляється спотвореною шумом.

Скористаємося фундаментальними рівняннями зв'язку між амплітудним біспектром і амплітудним Фур'є-спектром сигналу, а також між фазовим біспектром і фазовим Фур'є-спектром сигналу:

$$\left| \hat{B}_s(p, q) \right| = \left| \hat{S}(p) \right| \left| \hat{S}(q) \right| \left| \hat{S}(p+q) \right|, \quad (7)$$

$$\gamma(p, q) = \varphi(p) + \varphi(q) - \varphi(p+q), \quad (8)$$

де $\left| \hat{S}(\dots) \right|$ і $\varphi(\dots)$ - відповідно амплітудний і фазовий Фур'є-спектри сигналу; причому для дійсного сигналу $\hat{S}(p) = \hat{S}^*(p)$; $\varphi(p) = -\varphi(-p)$.

З урахуванням рівнянь (7), (8) розглянемо рекурсивний алгоритм відновлення фазового і амплітудного Фур'є спектрів сигналу [8].

Даний рекурсивний алгоритм відновлення відліків фазового Фур'є-спектра сигналу з дискретних відліків оцінки фазового біспектру включає наступну рекурсивну послідовність процедур

$$\hat{\varphi}(p+q) = \hat{\varphi}(p) + \hat{\varphi}(q) - \hat{\gamma}_s(p, q), \quad (9)$$

де p, q - індекси відліків оцінки фазового Фур'є-спектра, причому для дійсного сигналу $\hat{\varphi}(0) = 0$, а $\hat{\varphi}(1) = 0$. Оцінка фази для першого відліку приймається рівною нулю, тому що цей відлік принципово не може бути визначений з рівняння (9).

Рекурсивний алгоритм відновлення амплітудного Фур'є-спектра сигналу з оцінки амплітудного біспектра [8] описується за допомогою наступної системи рівнянь

$$\left| \hat{S}(0) \right| = \sqrt[3]{\left| \hat{B}_s(0, 0) \right|}, \quad (10)$$

$$\left| \hat{S}(l-1) \right| = \left| \hat{B}_s(l-1, 0) \right| / \left(\left| \hat{S}(l-1) \right| \left| \hat{S}(0) \right| \right),$$

де $\left| \hat{S}(\dots) \right|$ - дискретна оцінка амплітудного Фур'є-спектра сигналу.

Для відновлення вихідного сигналу по відлікам фазового (9) і амплітудного (10) Фур'є-спектрів досить скористатися одномірної процедурою зворотного одновимірного перетворення Фур'є вигляду:

$$\hat{s}_{\text{rest}}(i) = \text{IFT} \left\{ \left| \hat{S}_{\text{bisp}}(r) \right| e^{j\hat{\varphi}_{\text{bisp}}(r)} \right\}, r = 0, \dots, I-1, \quad (11)$$

де $\text{IFT}\{\dots\}$ означає процедуру зворотного перетворення Фур'є; $\left| \hat{S}_{\text{bisp}}(r) \right|$ і $\hat{\varphi}_{\text{bisp}}(r)$ – оцінки амплітудного і фазового Фур'є-спектре сигналу, які відновлені по відлікам біспектру згідно (9) і (10).

Авторами статті [8] стверджено, що завдяки наявності певних повторень у послідовностях рекурсивних кроків (9) та (10) величин фазового та амплітудного спектрів Фур'є, з'являється можливість згладжування шумів шляхом осереднення певних фаз та амплітуд Фур'є-спектру. Однак, з нашого погляду, це ствердження є помилковим тому що означені фазові та амплітудні величини не є незалежними одне від одного.

Для доказу даної помилковості нижче представлено результати дослідження завадостійкості рекурсивного алгоритму (9), (10).

3. Відновлення сигналу, спотвореного адитивним гаусовим шумом

Відновлення форми сигналу, який було штучно спотворено, проводилося в системі Matlab за зазначеним рекурсивним алгоритмом. Для моделювання було обрано наступні початкові дані:

1. Розглянуто сигнали різної форми: прямокутний, трикутний, гаусів імпульси та сигнал-триплет. Максимальна амплітуда усіх сигналів $A_0 = 1$.

2. Значення відношення сигнал/завада (SNR) змінювалося як: SNR = 100дБ, 20дБ, 10дБ, 0дБ.

Сигнал типу «прямокутний імпульс», центрований відносно моменту часу $t = 0$ з кількістю відліків $N = 128$, відповідна біамплітуда та відновлені за рекурсивним алгоритмом сигнали за різними величинами SNR наведено на рис. 1.

Сигнал типу «трикутний імпульс», центрований відносно відліку $i = 128$ на загальній кількості відліків $N = 256$, відповідна біамплітуда та відновлені за рекурсивним алгоритмом сигнали за різними величинами SNR наведено на рис. 2.

Сигнал типу «гаусів імпульс», центрований відносно відліку $i = 512$ на загальній кількості відліків $N = 1024$, відповідна біамплітуда та відновлені за

рекурсивним алгоритмом сигнали за різними величинами SNR наведено на рис. 3.

Сигнал-триплет [9] вигляду

$$s(t) = A_0 \sum_{k=1}^3 \cos(2\pi f_k t + \varphi_k), \quad (12)$$

де $f_1 = 400$ Гц, $f_2 = 800$ Гц, $f_3 = f_1 + f_2$, $\varphi_k = 0$. Кількість відліків $N = 128$. На рис. 4 наведені: сигнал-триплет, його біамплітуда та відновлені за рекурсивним алгоритмом сигнали за різними величинами SNR.

4. Відновлення цифрового зображення за допомогою біспектрального рекурсивного алгоритму

Тестовим зображенням було обрано зображення `cameman.bmp` розміром 128x128 пікселів. На рис. 5, а наведено первинне зображення. Розглянуто чотири види спотворень: адитивним білим гаусовим шумом, імпульсним шумом типу «сіль і перець», пуасоновським та мультиплікативним шумами (див. рис. 5, б – 5, д). Відновлені з біспектру зображення за допомогою рекурсивного алгоритму наведені на рис. 5, е – 5, и.

Висновки

Розглянуто біспектральний рекурсивний алгоритм відновлення сигналів та цифрових зображень в умовах впливу шумів. Представлено результати досліджень завадостійкості рекурсивного алгоритму відновлення сигналів різної форми та тестового цифрового зображення за наявності різного рівня потужності шуму.

Аналіз результатів вказує, що при підвищенні потужності перешкод якість відновлення суттєво знижується. Це свідчить про те, що процедура осереднення відліків фазового та амплітудного Фур'є спектрів, яка передбачена у рекурсивному алгоритмі є неефективною. Для придушення шумів треба накопичувати декілька оцінок біспектру, отриманих для відповідної сукупності незалежних реалізацій процесу, що досліджується.

Цифрові зображення, що відновлені за допомогою рекурсивного біспектрального алгоритму, відзначаються наявністю характерного зсуву. Причиною даного зсуву є звісний ефект центрування біспектрально відновлених зображень відносно центру гравітації зображення.

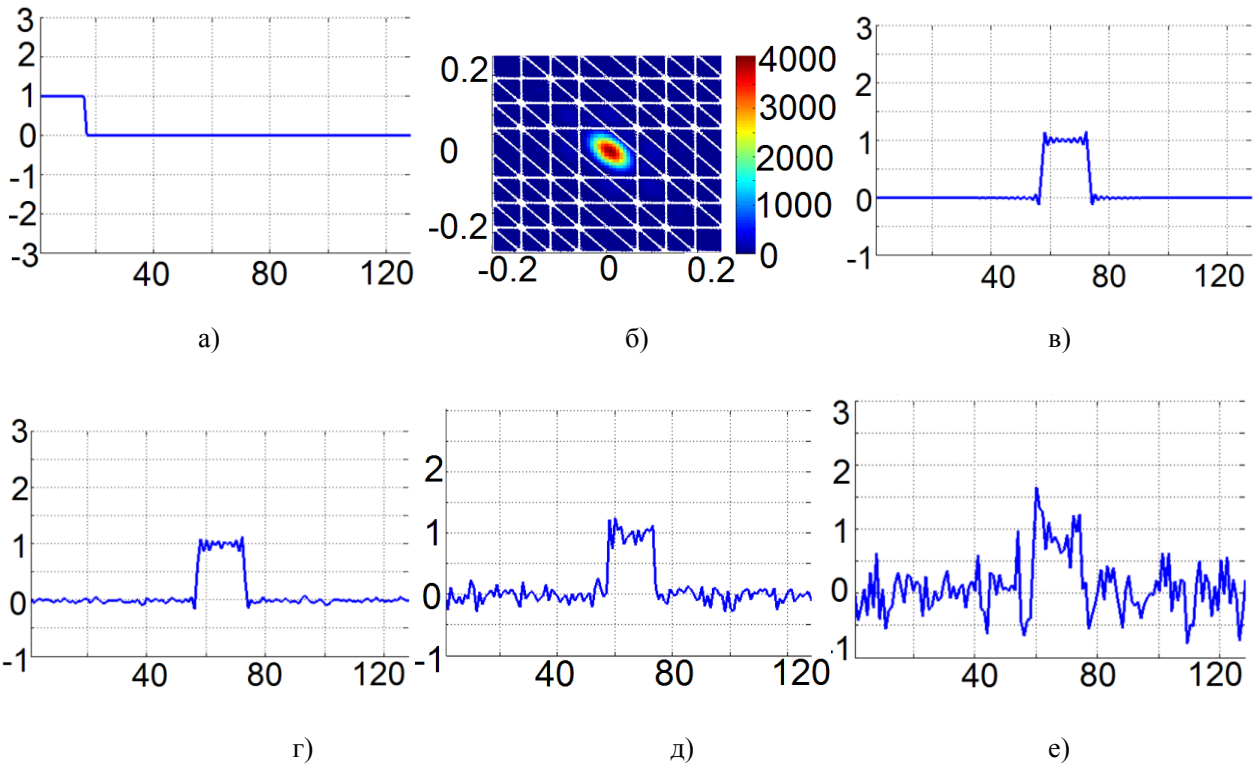


Рис. 1. а) – первинний сигнал; б) – біспектр первинного сигналу; відновлений сигнал при наявності адитивної гаусової завади: в) – SNR = 100dB ; г) – SNR = 20dB ; д) – SNR = 10dB ; е) – SNR = 0dB

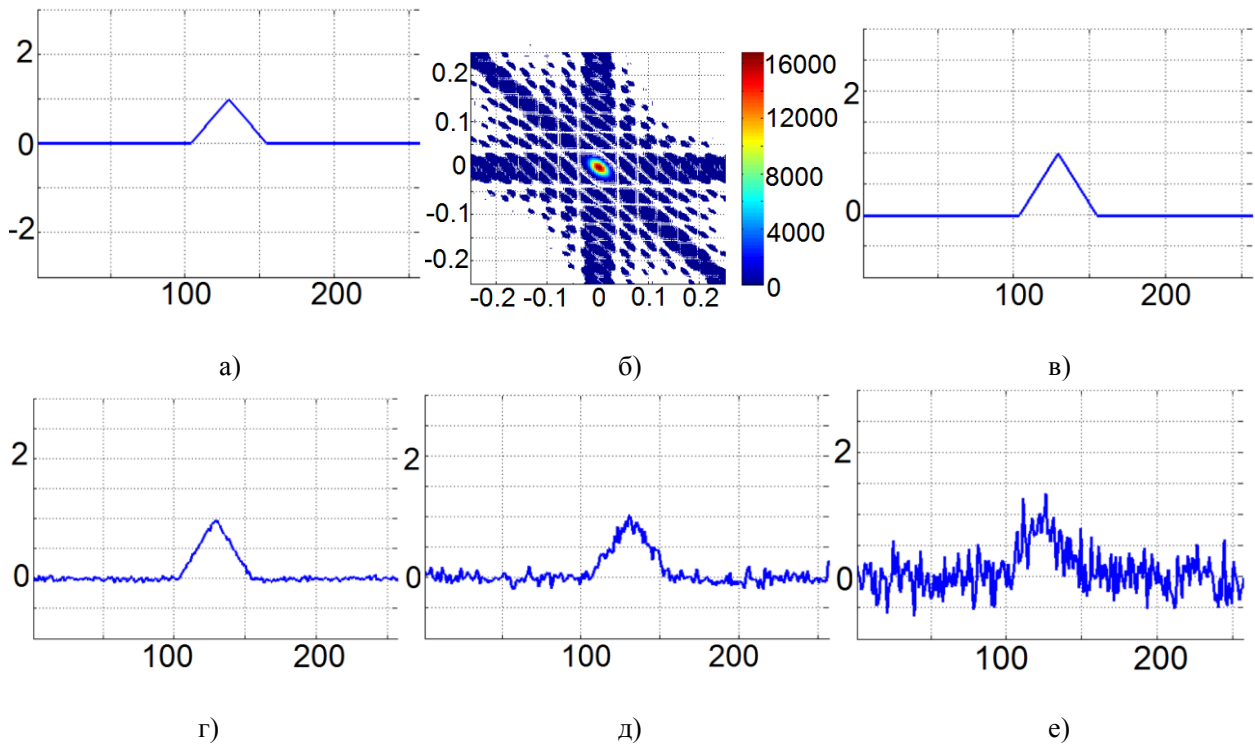


Рис. 2. а) – первинний сигнал; б) – біспектр первинного сигналу; відновлений сигнал при наявності адитивної гаусової завади: в) – SNR = 100dB ; г) – SNR = 20dB ; д) – SNR = 10dB ; е) – SNR = 0dB

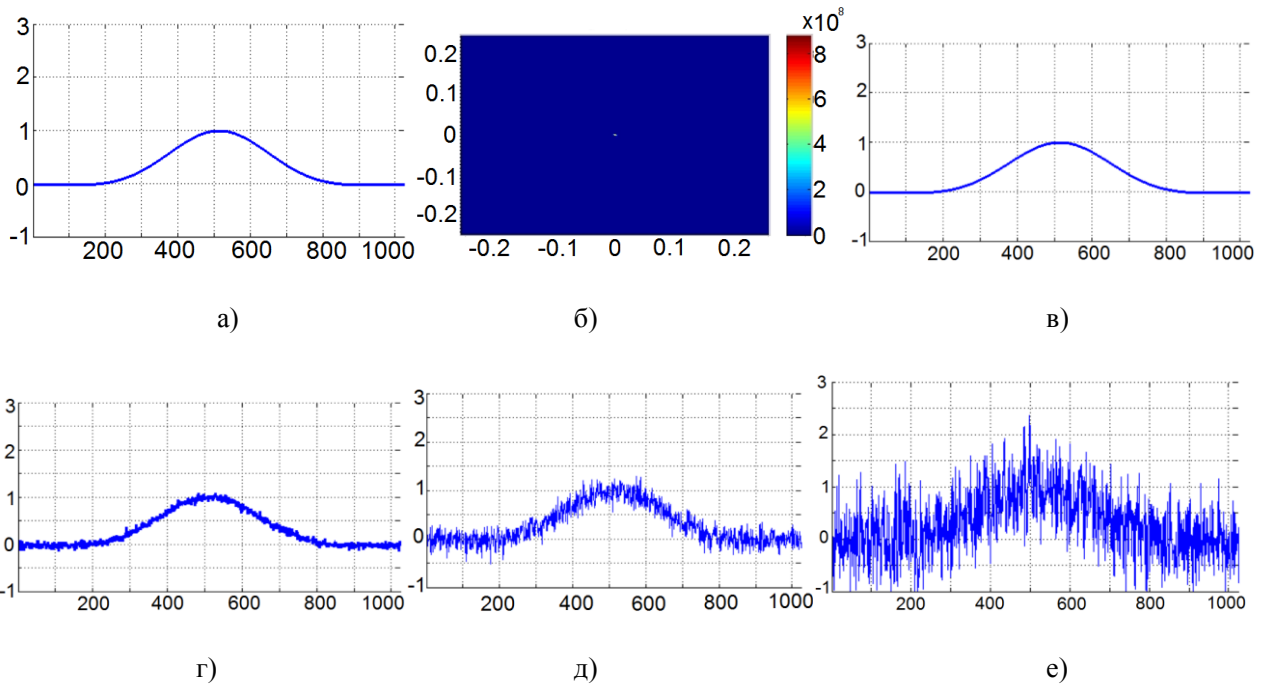


Рис. 3. а) – первинний сигнал; б) – біспектр первинного сигналу; відновлений сигнал при наявності адитивної гаусової завади: в) – SNR = 100dB; г) – SNR = 20dB; д) – SNR = 10dB; е) – SNR = 0dB

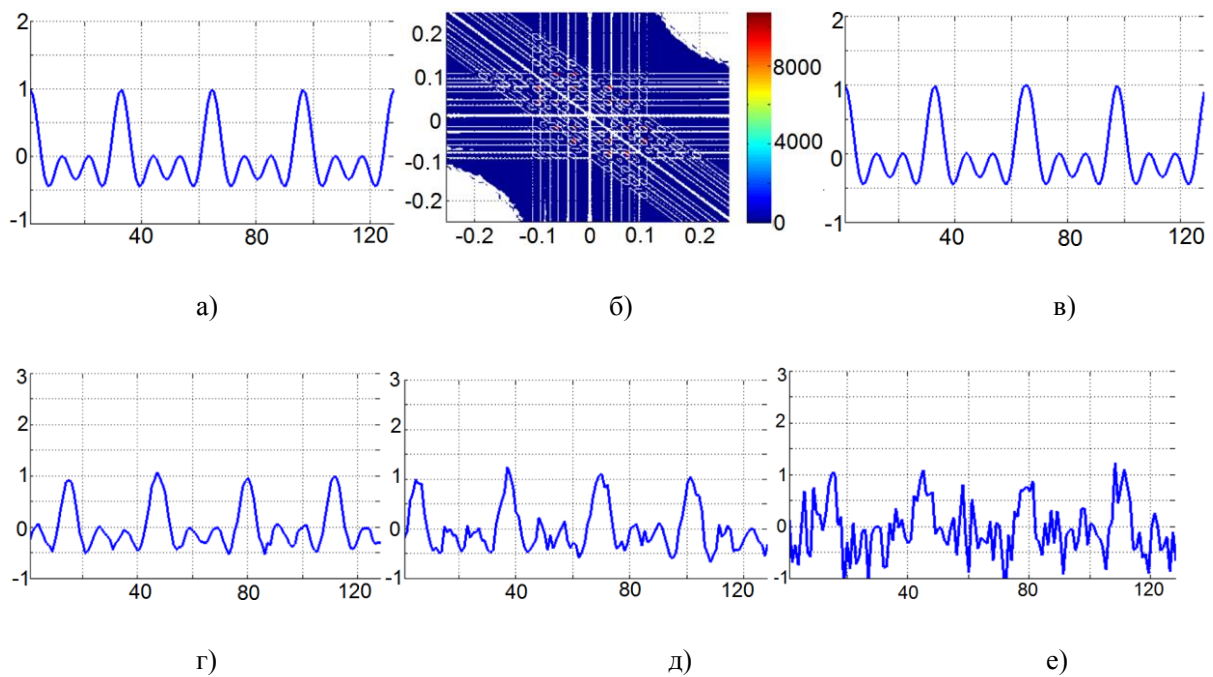


Рис. 4. а) – первинний сигнал; б) – біспектр первинного сигналу; відновлений сигнал при наявності адитивної гаусової завади: в) – SNR = 100dB; г) – SNR = 20dB; д) – SNR = 10dB; е) – SNR = 0dB

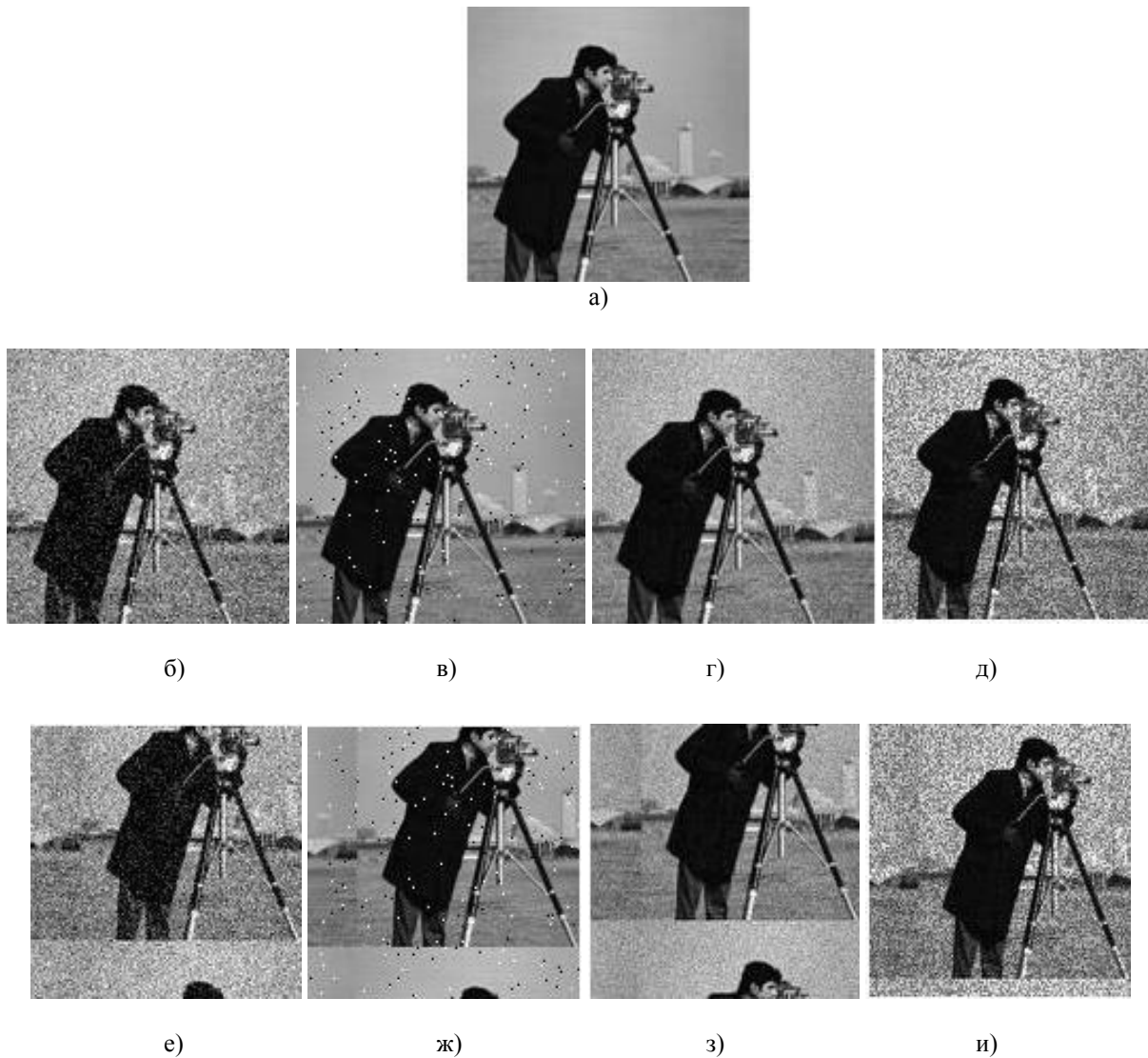


Рис. 5. а) – еталонне зображення, спотворені зображення: б) – адитивним гаусовим шумом, в) – шумом типу “сіль і перець”, г) – пуассоновським шумом, д) – мультиплікативним шумом, е)-и) – відновлені зображення

Література

1. Бендат, Дж. *Применение корреляционного и спектрального анализа* [Текст]: пер. с англ./ Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1983. – 312 с.

2. Марпл-мл., С. Л. *Цифровой спектральный анализ и его приложения* [Текст]: пер. с англ./ С. Л. Марпл-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

3. Малахов, А. Н. *Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований* [Текст] / А. Н. Малахов. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.

4. Nikias, C. L. *Bispectral estimation: A digital signal processing framework* [Text] / C. L. Nikias, M. R. Raghuveer // *Proc. IEEE*. – 1987. – Vol. 75, No. 7. – P. 869-891. DOI:10.1109/PROC.1987.13824.

5. *Application of bispectrum estimation for time-frequency analysis of ground surveillance Doppler ra-*

dar echo signals [Text] / J. T. Astola, K. O. Egiazarian, G. I. Khlopov, S. I. Khomenko, I. V. Kurbatov, V. Ye. Morozov, A. V. Totsky // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2008. – Vol. 57. – P. 1949–1957.

6. *Fault Feature Extraction of Diesel Engine Based on Bispectrum Image Fractal Dimension* [Text] / Jian Zhang, Chang-Wen Liu, Feng-Rong Bi, Xiao-Bo Bi, Xiao Yang // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2018. – P. 31 – 40. DOI: 10.1186/s10033-018-0230-9.

7. Saha, S. K. *Image Recovery* [Text] / S. K. Saha // *Aperture Synthesis. Astronomy and Astrophysics Library*. – Springer, New York, 2011. – P. 299-323. DOI:10.1007/978-1-4419-5710-8_8.

8. Bartelt, H. *Phase and amplitude recovery from bispectra* [Text] / H. Bartelt, A. W. Lohmann,

B. Wirnitzer // *Applied Optics*. – 1984. – Vol. 23. – P. 3121–3129.

9. Зеленский, А. А. *Методы параметрической и непараметрической обработки нестационарных сигналов с использованием свойств кумулянтных функций третьего порядка и биспектра [Текст] / А. А. Зеленский, В. В. Науменко, А. В. Тоцкий. – Х. : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2016. – 340 с.*

References

1. Bendat, Dzh., Pirsol, A. *Primenenie korrelyatsionnogo i spektralnogo analiza* [Application of correlation and spectral analysis]. Moscow, Mir Publ., 1983. 312 p.

2. Marpl-ml, S. L. *Tsifrovoy spektralnyy analiz i ego prilozheniya* [Digital Spectral Analysis and its Applications]. Moscow, Mir Publ., 1990. 584 p.

3. Malahov, A. N. *Kumulyantnyy analiz sluchaynykh negaussovykh protsessov i ih preobrazovaniy* [Cumulant analysis of random non-Gaussian processes and their transformations]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1978. 376 p.

4. Nikias, C. L., Raughveer, M. R. Bispectral estimation: A digital signal processing framework. *Proc. IEEE*, 1987, vol. 75, no. 7, pp. 869-891.

5. Astola, J. T., Egiazarian, K. O., Khlopov, G. I., Khomenko, S. I., Kurbatov, I. V., Morozov, V. Ye., Totsky, A. V. Application of bispectrum estimation for time-frequency analysis of ground surveillance Doppler radar echo signals. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, vol. 57, pp. 1949-1957.

6. Zhang, Jian., Liu, Chang-Wen., Bi, Feng-Rong., Bi, Xiao-Bo., Yang, Xiao. Fault Feature Extraction of Diesel Engine Based on Bispectrum Image Fractal Dimension. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2018, pp. 31 – 40. DOI: 10.1186/s10033-018-0230-9.

7. Saha, S. K. *Image Recovery. Aperture Synthesis. Astronomy and Astrophysics Library*, Springer, New York, 2011, pp. 299-323. DOI: 10.1007/978-1-4419-5710-8_8.

8. Bartelt, H., Lohmann, A. W., Wirnitzer, B. Phase and amplitude recovery from bispectra. *Applied Optics*, 1984, vol. 23, pp. 3121-3129.

9. Zelenskyi, A. A., Naumenko, V. V., Totskyi, A. V. *Metody parametricheskoy i neparametricheskoy obrabotki nestatsionarnykh signalov s ispolzovaniem svoystv kumulyantnykh funktsiy tret'ego poriadka i bispektra* [Methods of parametric and non-parametric processing of non-stationary signals using the properties of third-order cumulant functions and bispectr]. Kharkov, National aerospace university «KhAI» Publ., 2016. 340 p.

Надійшла до редакції 15.03.2019, розглянута на редколегії 12.06.2019

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ СИГНАЛА ПО БИСПЕКТРУ В ПРИСУТСТВИИ ШУМОВ

В. В. Науменко, А. С. Рубель, А. В. Тоцкий, В. Б. Шаронов

В ряде практических приложений цифровой обработки сигналов исследуемый процесс может включать в себя коррелированные спектральные компоненты или фазовые связи между различными частотными составляющими. Определение фазовых связей даёт очень важную и полезную информацию для правильного понимания, анализа и описания свойств физических явлений, порождающих эти процессы. Однако такая информация безвозвратно теряется при использовании классических методов приёма и обработки сигналов с использованием энергетических статистик, то есть статистик второго порядка. Оценка параметров сигналов и их анализ с использованием корреляционных функций третьего порядка (КФТП) и биспектрального анализа позволяет узнать о свойствах сигналов значительно больше, чем при использовании обычных корреляционных функций. Оценка биспектральной плотности (спектральной плотности третьего порядка) в отличие от оценки энергетического спектра позволяет не только правильно описать характеристики наблюдаемого процесса, но и сохранить, а при необходимости и восстановить физически существующие фазовые характеристики. Поэтому в ряде прикладных задач телекоммуникации, а также задач обработки изображений и других биспектральный анализ часто служит эффективным средством обработки сигналов и оценки параметров исследуемых процессов. Целью статьи является исследование помехоустойчивости рекурсивного алгоритма при восстановлении формы сигнала и изображения по биспектру. Для исследования были выбраны следующие типы сигналов: прямоугольный, треугольный, гауссов импульсы и сигнал-триплет, искажённые аддитивным гауссовым шумом. Тестовое изображение было искажено аддитивным белым гауссовым, импульсным, пуассоновским и мультипликативным шумами. Анализ результатов восстановления сигналов указывает на то, что при увеличении мощности помех качество восстановления снижается. Анализ результатов восстановления изображения показывает, что в восстановленном изображении могут появиться искажения в виде смещения фрагмента изображения.

Ключевые слова: биспектр; биамплитуда; рекурсивный алгоритм; восстановление сигнала.

SIGNAL SHAPE RECOVER BY BISPECTRUM IN NOISE ENVIRONMENT

V. V. Naumenko, O. S. Rubel, O. V. Totsky, V. B. Sharonov

In a number of practical applications of digital signal processing, the process under study may include correlated spectral components or phase coupling. Extracting the phase relationships provides very important and useful information for the correct understanding, analysis, and description of the properties of physical phenomena generating these processes. However, such information is irretrievably lost when using classical methods of signal processing using energy statistics, i.e. second-order statistics. Obtaining estimates of signal parameters and analyzing them using third-order correlation functions and bispectrum makes it possible to learn much more about signal properties than when using conventional correlation functions. Estimating the bispectral density (third order spectral density), in contrast to estimating the energy spectrum, makes it possible not only to describe the characteristics of the observed process correctly, but also to preserve and, if necessary, extract the phase characteristics of the component, which includes the observed process. Therefore, in a number of applied tasks of telecommunications, as well as tasks of image processing and other bisection analysis, often serves as an effective tool of signal processing. The aim of the article is to study the feasibility of using a recursive algorithm when restoring a waveform and image by bispectrum in the noise environment. The following types of signals were selected for the study: rectangular, triangular, Gaussian impulses and signal-triplet. They were distorted with additive white Gaussian noise. Test image was distorted by additive white Gaussian, pulsed, Poisson and multiplicative noises. Analysis of the signal recovery results indicates that as the noise power increases, the quality of the recovery decreases. The effect of random signal shift does not affect the shape of the recovered signal. Analysis of the image recovery results indicates image recovery, but this algorithm introduces distortions in the form of an offset.

Keywords: bispectrum; biamplitude; recursive algorithm; signal recovery.

Науменко Виктория Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-коммуникационных технологий им. А. А. Зеленского, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Рубель Алексей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-коммуникационных технологий им. А. А. Зеленского, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Тоцкий Александр Владимирович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационно-коммуникационных технологий им. А. А. Зеленского, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Шаронов Валерий Борисович – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник НТЦ Радиоэлектронных медицинских приборов и технологий, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Naumenko Victoriia Vladimirovna – PhD of Technical Science, Associate Professor of Department of Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: v.naumenko@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-5291-6032, Scopus Author ID: 55847192600, ResearcherID: E-9331-2019, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=NzQEfiAAAAAJ&hl>

Rubel Olexsiy Sergiyovych – PhD of Technical Science, Associate Professor of Department of Information-communication technologies named after O.O. Zelensky, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: o.rubel@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0001-6206-3988, Scopus Author ID: 56925032900, ResearcherID: O-5309-2014, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=4pZQhnUAAAAJ>

Totsky Alexander Vladimirovich – Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Department of Information-communication technologies named after O.O. Zelensky, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: totskiyalexander@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-3966-0746, Scopus Author ID: 6507438749, ResearcherID: F-1300-2019, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=MEBF4fIAAAAJ>

Sharonov Valeriy Borisovich – PhD of Technical Science, Associate Professor, Leading Researcher of Scientific and Technical Center of Radioelectronic Medical Devices and Technologies, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail:sharonov41val@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-2731-0995, Scopus Author ID: 8403984100