

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**ВИШНІВЕЦЬКИЙ ОЛЕГ ВАДИМОВИЧ**

УДК 621.372:550.388

**АНАЛІЗ СИГНАЛІВ  
НА БАЗІ ПЕРЕТВОРЕНЬ ВІГНЕРА ТА ЧОЇ-ВІЛЬЯМСА  
В МЕТОДАХ ДИСТАНЦІЙНОГО РАДІОЗОНДУВАННЯ ГЕОКОСМОСУ**

01.04.03 – радіофізика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти, науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник:** доктор фіз-мат наук, доцент  
Лазоренко Олег Валерійович,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки МОНмолодьспорту України,  
професор кафедри фізики.

**Офіційні опоненти:** доктор фіз-мат наук, професор  
Нерух Олександр Георгійович,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки МОНмолодьспорту України,  
завідувач кафедри вищої математики;

кандидат фіз-мат наук, доцент  
Думін Олександр Миколайович,  
Харківський національний університет імені  
В. Н. Каразіна МОНмолодьспорту України, доцент  
кафедри прикладної електродинаміки.

Захист відбудеться «14» січня 2013 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки: 61077, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61077, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «13» грудня 2012 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В. М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Перехід від індустріального суспільства до інформаційного останніми роками висуває нові підвищені вимоги до розв'язання задач у різних галузях науки й техніки, які пов'язані з отриманням, аналізом, обробкою, зберіганням і передачею значних обсягів інформації про найрізноманітніші процеси й об'єкти.

Одним з можливих шляхів розв'язання таких задач є використання нових видів сигналів, зокрема, нестационарних, нелінійних, фрактальних, надшироко-смужових (НШС), сигналів з особливостями та інше. Такі сигнали переносять значно більший об'єм інформації, ніж традиційні вузькосмугові сигнали. Їх застосування дозволить удосконалити існуючі та створити нові технології та технічні засоби у різних галузях науки й техніки.

Однак, платою за одержані переваги є неефективність, а інколи й цілковита непридатність застосування традиційних методів аналізу та обробки, які ґрунтуються на перетворенні Фур'є та його модифікаціях.

Крім того, більшість явищ у фізиці та радіофізиці геокосмоса мають дуже складний динамічний характер, і тому ці явища супроводжуються процесами, які є нестационарними, нелінійними, НШС, фрактальними та процесами з особливостями. Саме тому для успішного їх вивчення можливостей традиційних методів дослідження виявляється недостатньо.

Застосування нових методів аналізу й обробки нестационарних, нелінійних, НШС сигналів і процесів, а також сигналів з особливостями у задачах дистанційного радіозондування (ДР) геокосмоса останніми роками відбувається за декількома напрямками.

Перший з них пов'язаний з використанням різноманітних методів вейвлет-аналізу, які ґрунтуються на безперервному, аналітичному, дискретному, стаціонарному, швидкому вейвлет-перетвореннях, вейвлетних рядах, вейвлет-пакетах, вейвлет-фреймах та ін.

Другий напрямок полягає в модифікації методів Фур'є-аналізу, зокрема, у застосуванні створеного у 2005 р. адаптивного перетворення Фур'є (АПФ), яке поєднує в собі переваги вейвлетів і традиційного динамічного (віконного) перетворення Фур'є (ДПФ).

Третій напрямком пов'язаний із використанням апарату атомарних функцій.

Четвертим перспективним напрямком сучасного аналізу й обробки сигналів і процесів є використання нового комплексного методу аналізу – системного спектрального аналізу, який побудовано на спільному застосуванні ряду лінійних і нелінійних інтегральних перетворень та їх характеристик.

Актуальність теми даної дисертації полягає в застосуванні перспективного напрямку розв'язання задач ДР геокосмосу, який істотно відрізняється від попередніх, – використання нелінійних перетворень класу Коена, що мають ряд унікальних властивостей.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Частину результатів отримано під час виконання у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна таких науково-дослідницьких робіт: «Радіофізичні та магнітометричні дослідження нелінійних явищ у геокосмосі з використанням нових методів обробки сигналів» (№ держреєстрації 0103U004238), «Радіофізичні та магнітометричні ефекти дії на геокосмос високоенергетичних джерел» (№ держреєстрації 0106U001549), в яких автор був співдослідником.

**Мета дослідження** – підвищення інформативності методів дистанційного радіозондування під час розв'язання задач фізики геокосмосу та космічної радіофізики шляхом застосування нелінійних перетворень Вігнера (ПВ) та Чої–Вільямса (ПЧВ).

Для досягнення мети розв'язано такі **задачі**:

1. Вивчення стану використання сучасних методів часо-частотного аналізу й обробки сигналів і процесів під час розв'язання задач фізики космосу та космічної радіофізики, оцінка їх основних переваг і недоліків.

2. Проведення вігнер- та чої–вільямс-аналізів модельних найпростіших, нестационарних, нелінійних та фрактальних сигналів і процесів, а також сигналів з особливостями. Створення на базі отриманих результатів банка часо-частотних вігнер- та чої–вільямс-портретів таких модельних сигналів і процесів.

3. Вігнер- та чої–вільямс-аналізи реальних експериментальних сигналів і процесів, отриманих у методах ДР під час дослідження явища виникнення великомасштабних і глобальних збурень у геокосмосі під дією потужних нестационарних джерел енерговиділення.

*Об'єкт дослідження* – нестационарні, нелінійні та фрактальні процеси, а також процеси з особливостями в задачах фізики космоса та космічної радіофізики.

*Предмет дослідження* – параметри, характеристики та часо-частотна структура нестационарних, нелінійних і фрактальних сигналів і процесів, а також процесів з особливостями в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера, що є реакцією на дію потужних нестационарних джерел енерговиділення.

*Методи дослідження.*

1. Вігнер-аналіз, який ґрунтується на застосуванні перетворення Вігнера, що належить до класу Коена нелінійних квадратичних перетворень, використовувався для проведення як теоретичних досліджень модельних сигналів і процесів, так і для вивчення реальних експериментальних даних, що отримано в методах дистанційного радіозондування геокосмосу.

2. Чої–вільямс-аналіз, який полягає у використанні нелінійного квадратичного перетворення Чої–Вільямса, застосовувався для проведення часо-частотних перетворень як модельних сигналів і процесів, так і аналогічних сигналів і процесів, що було отримано в методах дистанційного радіозондування геокосмосу.

3. Спектральний аналіз, який ґрунтується на традиційних одновимірному та динамічному (віконному) перетвореннях Фур'є, застосовувався як для

теоретичного дослідження модельних сигналів та процесів, так і для експериментального дослідження часових варіацій нестационарних, нелінійних і фрактальних сигналів та процесів, а також сигналів з особливостями, які були отримані під час розв'язання задач фізики космосу та космічної радіофізики в методах дистанційного радіозондування геокосмосу.

4. Метод комп'ютерного моделювання був призначений для вивчення особливостей вігнер- та чої-вільямс-аналізів під час обробки найпростіших, нестационарних, нелінійних і фрактальних сигналів та процесів, а також сигналів з особливостями.

5. Теоретичний (аналітичний) метод використовувався при проведенні вігнер- та чої-вільямс-аналізів модельних сигналів і процесів.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Вперше запропоновано підвищити можливості часо-частотного аналізу нестационарних, нелінійних і фрактальних сигналів і процесів, а також сигналів і процесів з особливостями, які досліджуються в методах ДР геокосмосу під час розв'язання задач фізики космосу та космічної радіофізики, за рахунок використання нелінійних інтегральних перетворень Вігнера та Чої-Вільямса. Відмінною особливістю цих перетворень є значно краща часо-частотна роздільна здатність порівняно з традиційною спектрограмою Фур'є (СФ).

2. Вперше проведено поглиблені вігнер- і чої-вільямс-аналізи модельних найпростіших, нестационарних, нелінійних та фрактальних сигналів і процесів, а також сигналів з особливостями. Показано переваги методів вігнер- і чої-вільямс-аналізів над традиційним фур'є-аналізом під час дослідження часо-частотної структури таких сигналів та процесів.

3. Вперше створено банк часо-частотних вігнер- і чої-вільямс-портретів найбільш характерних найпростіших, нестационарних, нелінійних та фрактальних сигналів і процесів, а також сигналів і процесів з особливостями, необхідний для проведення ефективного часо-частотного аналізу реальних сигналів і процесів у методах ДР геокосмосу під час розв'язання задач фізики космосу та космічної радіофізики.

4. Розроблено спеціальний зручний формат подання даних вігнер- і чої-вільямс-аналізів, який рекомендовано для використання фахівцям.

5. Вперше проведено вігнер- і чої-вільямс-аналізи реальних нестационарних, нелінійних сигналів та процесів, а також сигналів з особливостями в методах ДР, що виникають у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера під дією потужних нестационарних джерел енерговиділення.

### **Практичне значення отриманих результатів**

1. Показано, що використання ПВ і ПЧВ під час проведення часо-частотного аналізу реальних нестационарних, нелінійних, фрактальних сигналів та процесів, а також сигналів та процесів з особливостями за рахунок суттєвого збільшення часо-частотної роздільної здатності дозволяє отримувати унікальну інформацію про тонку часо-частотну структуру досліджуваних сигналів і проце-

сів, що, в свою чергу, дає можливість уточнювати й удосконалювати існуючі моделі процесів у геокосмосі, зокрема, пов'язаних із впливом на геокосмос потужних нестационарних джерел енерговиділення.

2. Створений банк часо-частотних вігнер- та чої-вільямс-портретів модельних нестационарних, нелінійних і фрактальних сигналів і процесів, а також сигналів і процесів з особливостями може бути корисним не тільки фахівцям у галузі космічної радіофізики, але й вченим у інших областях науки та техніки (наприклад, у радіолокації, геофізиці, океанографії, фізиці плазми та ін.)

3. Під час розв'язання практичних задач, пов'язаних з дослідженням часо-частотної структури сигналів і процесів довільної природи рекомендовано використовувати методи вігнер-, чої-вільямс- і фур'є-аналізів водночас, тому що вони добре доповнюють одне одного. Запропоновано формати подання даних, які дають можливість досліднику ефективно отримувати потрібну інформацію про внутрішню будову й особливості процесів, що досліджуються.

4. На практичних прикладах із фізики космосу та космічної радіофізики продемонстровано ефективність застосування вігнер-, чої-вільямс-аналізів під час вивчення нестационарних, нелінійних, фрактальних процесів, а також процесів з особливостями.

5. Результати вігнер- та чої-вільямс-аналізів модельних найпростіших, нестационарних, нелінійних та фрактальних сигналів і процесів, а також сигналів з особливостями, отримані автором, використано іншими авторами під час створення нового комплексного методу аналізу – системного спектрального аналізу.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати роботи отримано автором особисто. В роботах, виконаних у співавторстві, автору належать: результати проведення вігнер-аналізу модельних найпростіших сигналів [1, 7]; результати проведення вігнер-аналізу модельних нелінійних хвильових процесів [2]; результати чої-вільямс-аналізу модельних найпростіших сигналів [3]; результати вігнер-аналізу модельних сигналів з особливостями [4]; результати чої-вільямс-аналізу модельних нелінійних хвильових процесів [5]; результати вігнер-аналізу реальних експериментальних даних, пов'язаних з вулканізмом та сонячними спалахами [6]; участь в обговоренні результатів вігнер- та чої-вільямс-аналізів нелінійних НШС процесів [9, 11, 13]; участь в обговоренні доцільності та ефективності застосування вігнер- та чої-вільямс-аналізів у задачах фізики геокосмосу [10]; участь в обговоренні результатів чої-вільямс-аналізу нелінійних НШС процесів [15].

**Апробація результатів дисертації** здійснювалась на таких 9 міжнародних, 1 національній і 2 регіональних конференціях.

*Міжнародні конференції:* Third and Fourth International Conferences on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (Sevastopol, Ukraine, 2006, 2008); The Sixth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies (Kharkov, Ukraine, 2007); The Sixth International Conference on Antenna Theory

and Techniques (Sevastopol, Ukraine, 2007); друга міжнародна конференція «Акустооптические методы измерений и обработки информации» (м. Суздаль, Росія, 2007 р.); третя, четверта, п'ята та шоста міжнародні науково-технічні конференції «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (м. Севастополь, 2007 р., 2008 р., 2009 р., 2011 р.).

*Національні конференції:* Шоста Українська конференція з космічних досліджень (м. Євпаторія, 2007 р.).

*Регіональні конференції:* VI Харківська конференція молодих вчених «Радіофізика й електроніка» (м. Харків, Україна, 2006 р.); Конференція молодих вчених «Дистанційне радіозондування іоносфери» (м. Харків, Україна, 2010 р.).

**Публікації.** Результати наукових досліджень відображено у 18 друкованих працях. З них статті у фахових виданнях України – 6, тези доповідей на наукових конференціях – 12.

**Структура й обсяг дисертації:** дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків і двох додатків. Дисертація містить 170 сторінок; 67 ілюстрацій по тексту; 5 ілюстрацій на 5 стор.; 2 додатки на 10 стор.; 123 найменувань використаних джерел літератури на 12 стор.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** містить обґрунтування актуальності обраної теми, формулювання мети, об'єкта, предмета, методів та задач дослідження, формулювання наукової новизни та практичного значення отриманих результатів, відомості про публікації автора й апробацію результатів дисертації.

**Перший розділ** «Аналітичний огляд» присвячено аналізу властивостей, переваг і недоліків основних видів часо-частотних інтегральних перетворень, які вже успішно застосовуються для аналізу нетрадиційних видів сигналів у методах ДР геокосмосу під час розв'язання задач фізики космосу та космічної радіофізики. Проаналізовано можливості одновимірного і динамічного перетворень Фур'є, перетворення Габора, безперервного та аналітичного вейвлет-перетворень, АПФ, класичної СФ, скейлограми, а також перетворень класу Коена.

Детально розглянуто властивості та можливості ПВ і ПЧВ. Показано, що ПВ, а частково і ПЧВ, вже успішно використовуються під час розв'язання задач геофізики, сейсмології, океанології, акустики, оптики, медицини, радіофізики, фізики геокосмосу, неруйнівного контролю тощо.

Продемонстровано, що для успішного дослідження нетрадиційних видів сигналів (короткочасних знакозмінних, нелінійних, фрактальних, НШС) потрібно застосовувати методи не частотного, а часо-частотного аналізу. При цьому відзначено, що можливостей ДПФ і СФ для аналізу подібних сигналів виявляється явно недостатньо, адже вони не забезпечують необхідної часо-частотної роздільної здатності.

Показано, що для аналізу таких сигналів перспективно застосування нелінійних інтегральних часо-частотних перетворень класу Коена, а саме, ПВ і ПЧВ.

Встановлено, що основними перевагами ПВ і ПЧВ є добра часо-частотна роздільна здатність, інваріантність щодо зсувів за фазою, часом і частотою.

ПЧВ до того ж має параметр, який дозволяє зменшувати величину інтерференційних структур за рахунок певного погіршення часо-частотної роздільної здатності. Основними недоліками ПВ і ПЧВ є виникнення інтерференції під час аналізу багатокомпонентних сигналів і не завжди фізично коректне трактування функції спектральної густини (ФСГ) цих перетворень.

На підставі зробленого аналітичного огляду сформульовано задачі дослідження, результати якого викладено в даній дисертаційній роботі.

**У другому розділі** «Вігнер-аналіз модельних сигналів» аналітичними та числовими методами проведено вігнер-аналіз модельних найпростіших сигналів, нелінійних хвильових процесів, сигналів з особливостями та фрактальних сигналів. Показано, що застосування ПВ дозволяє отримати більш точну інформацію про часо-частотну структуру таких досліджуваних сигналів або процесів порівнянно з фур'є-аналізом, зокрема, здійснюваним за допомогою СФ.

Перетворення Вігнера сигналу  $s(t)$  задається співвідношенням:

$$P_V [s(t)] = P_V f(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s\left(\tau + \frac{t}{2}\right) s^*\left(\tau - \frac{t}{2}\right) \exp(-i\omega t) dt, \quad (1)$$

де  $P_V f(\omega, \tau)$  – ФСГ ПВ, а знак “\*” – операція комплексного сполучення.

Класична СФ має вигляд:

$$P_S f(\omega, \tau) = |Sf(\omega, \tau)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) w(t - \tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2,$$

де  $w(t - \tau)$  – спектральна віконна функція.

На жаль, через складність інтегралу (1) для переважної більшості навіть дуже простих сигналів отримати результати вігнер-аналізу можливо виключно числовими методами. Отже тому переважну більшість результатів вігнер-аналізу отримано з використанням системи комп'ютерної математики MatLab, пакета прикладних програм Time Frequency Toolbox та оригінального програмного забезпечення, створеного автором.

Існування значної переваги ПВ над СФ під час аналізу нестационарних, нелінійних, фрактальних сигналів, а також сигналів з особливостями добре демонструє такий приклад.

На рис. 1. наведено результати вігнер-аналізу модельного сигналу у вигляді суми гармонічної функції та  $\delta$ -функції Дірака. Важливо, що на ФСГ ПВ (рис. 1, б) присутні часо-частотні структури, що відповідають обом компонентам сигналу, тоді як на ФСГ СФ (рис. 1, в) можна бачити тільки горизонтальну лінію, яка демонструє наявність тільки гармонічного сигналу. Отже, на ФСГ СФ інформацію про присутність  $\delta$ -функції Дірака, на жаль, втрачено. Цілком зрозуміло, що під час аналізу реальних сигналів у методах ДР геокосмосу такі втрати у більшості випадків є неприпустимими.

Водночас з цим встановлено, що під час аналізу квазімонохроматичних і вузькосмугових сигналів СФ демонструє кращі результати, ніж ПВ.



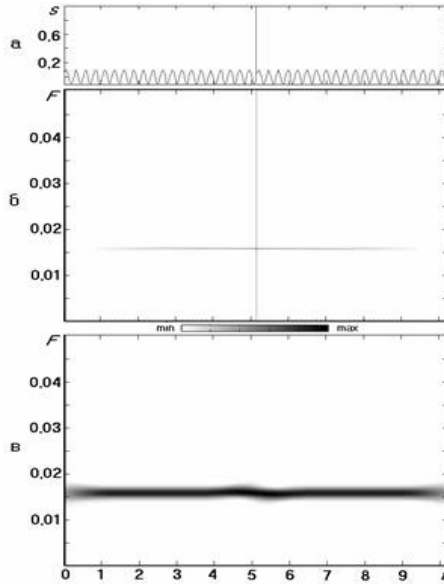


Рис.1 – Результати вігнер-аналізу суми гармонічного сигналу та  $\delta$ -функції Дірака: а – процес  $v$  часовій області, б – ФСГ ПВ, в – ФСГ СФ

Показано, що для дослідження реальних сигналів у методах ДР геокосмосу не слід протиставляти ПВ та СФ, а навпаки необхідно їх застосовувати водночас, тому що їх можливості добре доповнюють одне одного.

Для аналізу сигналів окрім самих ФСГ також застосовувались їх енергограми  $Ef(\omega)$ , скелетони та середньоквадратичні відхилення  $\sigma(\omega)$  ФСГ. Для ПВ і СФ ці числові характеристики мають відповідно такий вигляд:

$$E_V f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P_V(\omega, \tau) d\tau, \quad E_S f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P_S(\omega, \tau) d\tau,$$

$$\sigma_V(\omega) = \left[ \frac{1}{\tau_{\max} - \tau_{\min}} \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} [P_V(\omega, \tau) - \langle P_V(\omega, \tau) \rangle]^2 d\tau \right]^{1/2},$$

$$\langle P_V(\omega, \tau) \rangle = \frac{1}{(\omega_{\max} - \omega_{\min})(\tau_{\max} - \tau_{\min})} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} P_V(\omega, \tau) d\omega d\tau,$$

$$\sigma_S(\omega) = \left[ \frac{1}{\tau_{\max} - \tau_{\min}} \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} [P_S(\omega, \tau) - \langle P_S(\omega, \tau) \rangle]^2 d\tau \right]^{1/2},$$

$$\langle P_S(\omega, \tau) \rangle = \frac{1}{(\omega_{\max} - \omega_{\min})(\tau_{\max} - \tau_{\min})} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} P_V(\omega, \tau) d\omega d\tau,$$

де  $\omega_{\max}$ ,  $\omega_{\min}$ ,  $\tau_{\max}$  і  $\tau_{\min}$  – мінімальні та максимальні значення параметрів  $\omega$  і  $\tau$ , які застосовуються під час обчислення ФСГ відповідного перетворення.

Енергограми ФСГ відображають розподіл енергії сигналу (процесу) за різними частотами  $\omega$ . Інтеграл від кожної енергограми за всіма частотами  $\omega \in (-\infty : +\infty)$  дорівнює, як відомо, енергії сигналу.

Скелетони ФСГ отримано за допомогою алгоритму, який базується на застосуванні відповідних модифікованих методів. До них належать, зокрема, псевдо- та згладжені псевдо-ПВ і СФ.

На основі цих числових характеристик розроблено спеціальний формат подання даних для проведення порівняльного вігнер- і фур'є-аналізів сигналів. Приклад практичного використання цього формату наведено на рис. 2, 3.

Встановлено, що використання ПВ є перспективним для аналізу нелінійних хвильових процесів, сигналів з особливостями та фрактальних сигналів. Також показано, що для більш повного аналізу останніх необхідно ПВ використовувати разом з безперервним та аналітичним вейвлет-перетвореннями та СФ. Перші два дозволяють ефективно боротися з нелокальністю ПВ, а третє – відсіювати небажані інтерференційні часо-частотні структури.

Нелінійні хвильові процеси посідають особливе місце в сучасних фізиці та радіофізиці. Багато фізичних процесів у геокосмосі, що супроводжуються значним енерговиділенням (наприклад, землетруси, вибухи вулканів, магнітні бурі тощо) мають істотно нелінійний характер. Але порівнянно з лінійними процесами нелінійні залишаються в цілому малодослідженими. Отже, проведення вігнер-аналізу таких модельних процесів є своєчасним.

До того ж слід зауважити, що переважна більшість згаданих високоенергетичних процесів у геокосмосі супроводжуються також появою сигналів з особливостями, а інколи також і сигналів, що мають монофрактальну або мультифрактальну структуру. Отже, створення банку часо-частотних вігнер-портретів є корисним та актуальним.

Як приклад, що демонструє можливості вігнер-аналізу під час дослідження нелінійних хвильових процесів і сигналів з особливостями на рис. 2 та рис. 3 наведено результати дослідження часо-частотної структури кноідальної хвилі та різкого стрибка фази гармонічного сигналу відповідно.

Привертає увагу те, що на ФСГ СФ (рис. 2, г) спостерігається три досить розмиті часо-частотні утворення, а на ФСГ ПВ (рис. 2, б) перебуває п'ять добре локалізованих таких утворень. Відсіяти реально не існуючі друге та четверте утворення, що є результатами інтерференції, дозволяє як ФСГ СФ (рис. 2, г) та її скелетон (рис. 2, д), так і скелетон самої ФСГ ПВ (рис. 2, в).

Осцилююча структура центрального (третього) утворення пояснюється накладанням інтерференційної структури від першого та п'ятого утворень на реально існуюче третє часо-частотне утворення. «Іжакоподібна» структура енерго-

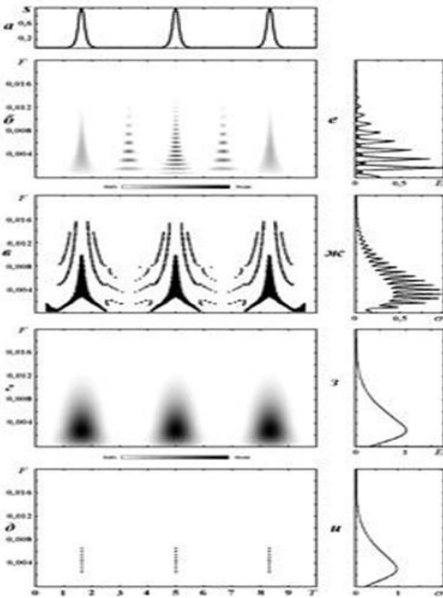


Рис. 2 – Результати аналізу кноїдальної хвилі: а – процес у часовій області, б – ФСГ ПВ, в – скелетон ФСГ ПВ, г – ФСГ СФ, д – скелетон ФСГ СФ, е – енергограма ПВ, ж – середньо квадратичне відхилення ФСГ ПВ, з – енергограма СФ, и – середньо квадратичне відхилення ФСГ СФ

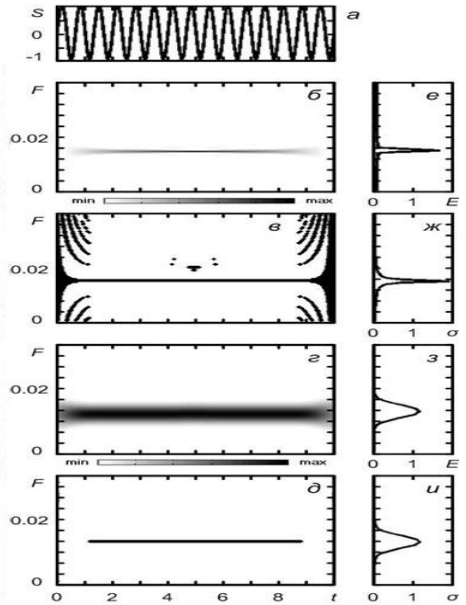


Рис. 3 – Те саме для різкого стрибка фази гармонічного сигналу ( $\Delta\varphi = \pi / 64$ )

грами ПВ (рис. 2, е) і середньоквадратичного відхилення ФСГ ПВ (рис. 2, ж) зумовлена не тільки наявністю інтерференції, а ще й тим, що  $P_V.f(\omega, \tau)$  може приймати й від'ємні значення. Але, на наш погляд, істотне зростання часо-частотної роздільної здатності ФСГ ПВ з надлишком компенсує ці незручності.

Ще більш переконливо демонструє переваги ПВ над СФ під час аналізу сигналів з особливостями рис. 3. Видно, що жодна з характеристик СФ не виявляє стрибка фази сигналу, натомість скелетон ФСГ ПВ (рис. 3, в) навіть за  $\Delta\varphi = \pi / 64$  його знаходить.

**У третьому розділі** «Чої-вільямс-аналіз модельних сигналів» на численних прикладах показано, що ПЧВ є ефективним методом дослідження нелінійних хвильових процесів, фрактальних сигналів і сигналів з особливостями.

ПЧВ було запропоновано Чої та Вільямсом у 1989 р. як один з можливих методів усереднення ПВ, що дає змогу зменшити вплив часо-частотних інтер-

ференційних структур порівняно з ПВ. Воно задається таким співвідношенням:

$$P_{CW}[f(t)] \equiv P_{CW}f(\omega, \tau) = \sqrt{\frac{\sigma}{4\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\omega t)}{|t|} \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-(u-\tau)^2\sigma}{4t^2}\right) s\left(u + \frac{t}{2}\right) s^*\left(u - \frac{t}{2}\right) dudt,$$

де  $P_{CW}f(\omega, \tau)$  – ФСГ ПЧВ,  $\sigma$  – додатний масштабний коефіцієнт.

Унікальність цього перетворення полягає в тому, що за допомогою параметра  $\sigma$  можна регулювати з одного боку рівень інтерференційних структур у ПВ, а з іншого – ступінь часо-частотної роздільної здатності ФСГ. За  $\sigma \rightarrow \infty$  ПЧВ переходить у ПВ.

Основні результати чої–вільямс-аналізу досліджуваних модельних сигналів і процесів отримано чисельними методами і подано у спеціально розробленому форматі. Приклад використання якого наведено на рис. 4 і 5. В ньому крім ФСГ ПЧВ, отриманих за різних значень  $\sigma$ , в кожному випадку обчислено також відповідну енергограму:

$$E_{CW}f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{CW}f(\omega, \tau) d\tau.$$

Продемонстровано, що під час аналізу конкретного сигналу, емпірично підбираючи величину параметра  $\sigma$ , вдається відшукувати оптимальний в умовах конкретної задачі баланс між необхідною величиною часо-частотної роздільної здатності та дозволеним рівнем інтерференційних часо-частотних структур. Це цілком компенсує головний недолік ПЧВ – нерівномірність зменшення інтерференційних структур вздовж часової та частотної осей.

Встановлено, що під час аналізу нестационарних, нелінійних і фрактальних сигналів, а також сигналів з особливостями ПВ, ПЧВ та СФ добре доповнюють одне одного, а саме тому рекомендується їх одночасне використання.

Як приклад на рис. 4 і рис. 5 наведено результати проведення чої–вільямс-аналізу модельних сигналів: сигналу з особливістю (сума шпиль та синусоїди) та фрактального сигналу (функція Римана-Вейерштрасса) відповідно.

На часо-частотній площині ФСГ ПВ (рис. 4, б) присутня горизонтальна лінія, що відповідає гармонічному сигналу, локальне утворення, що відповідає наявності шпиль, а також осцилюючі інтерференційні структури у центрі між ними. На енергограмі ПВ (рис. 4, ж) спостерігаються тільки два піки, що відповідають частотним компонентам шпиль та гармонічного сигналу. Осцилюючі інтерференційні структури під час інтегрування ФСГ ПВ взаємно знищуються. ПЧВ дозволяє практично повністю заглушити інтерференцію (рис. 4, д), але відбувається це за рахунок деякого погіршення часо-частотної роздільної здатності. Водночас на ФСГ СФ (рис. 4, е) інтерференційні структури відсутні, видно два сигнали, а також спостерігається максимум у місці перетинання двох компонент досліджуваного сигналу на часо-частотній площині.

Під час аналізу модельного фрактального сигналу привертає увагу те, що часо-частотна структура ФСГ ПВ (рис. 5, б) теж виявляється фрактальною. Натомість за зовнішнім виглядом ФСГ СФ (рис. 5, е) про це сказати неможна. ПЧВ добре справляється з ліквідацією інтерференційних структур. Так для значення масштабного коефіцієнта  $\sigma = 0,01$  (рис. 5, д) останні практично відсутні. Привертає увагу також добре виражена фрактальна структура енергограм ПЧВ (рис. 5, м – п) та СФ (рис. 5, р) у логарифмічному масштабі.

Таким чином, створено великий банк даних вігнер- і чої-вільямс-портретів характерних модельних найпростіших і фрактальних сигналів, нелінійних хвильових процесів та сигналів з особливостями, що є вкрай необхідним для успішного проведення вігнер-і чої-вільямс-аналізів реальних сигналів і процесів в методах ДР геокосмосу під час розв'язання задач фізики космосу та космічної радіофізики.

**У четвертому розділі** проведено вігнер- та чої-вільямс-аналізи реальних сигналів і процесів, що спостерігаються в методах ДР геокосмосу під час вивчення впливу на системи Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ) і Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (СМСМІАЗ) потужних нестационарних джерел енерговиділення.

Згідно із системною парадигмою, сформульованою доктором фіз.-мат. наук, професором Л. Ф. Черногором (м. Харків, Україна), системи ЗАІМ і СМСМІАЗ є відкритими динамічними нелінійними системами, а тому процеси, які в них відбуваються, відрізняються особливою складністю та різноманіттям. У більшості випадків їх можна віднести до нестационарних, нелінійних, надширокопосмугових, фрактальних, а також процесів з особливостями. Саме тому використання вігнер- і чої-вільямс-аналізів під час вивчення таких процесів є вкрай корисним.

У рамках даної роботи проведено ретельне вивчення часових варіацій повного електронного вмісту в іоносфері під час вибуху вулкана Сент-Хелленс, який відбувся 18 травня 1980 р. (метод трансіоносферного радіозондування), та часових варіацій геомагнітного поля (Н – компонента) під час найпотужнішого рентгенівського сонячного спалаху, що відбувся 5 грудня 2006 р. (метод дослідження електромагнітного поля Землі).

Розглянемо результати аналізу першої з цих непересічних подій. Досліджувались часові варіації, які були зареєстровані на дослідницьких станціях у містах Голдстоун, Боулдер та Юма (США). На рис. 6, як приклад, надано часо-частотний аналіз процесу, який був зареєстрований у м. Голдстоун. Тривалість реєстрації у часовій області складала  $T_p = 420$  хв. Розмах процесу за величиною

повного електронного вмісту:  $\Delta \approx 1,2 \times 10^{-17} \text{ м}^{-2}$ . Кількість відліків дискретного вектора даних складала  $N = 861$ . Користь від використання ПВ і ПЧВ полягає у наступному.

За допомоги ФСГ ПВ (рис. 6, б) можна виявити низькочастотну гармонічну складову з характерним періодом  $T \approx 250$  хв, про що свідчить горизонтальна лінія у нижній частині рисунка. На ФСГ ПЧВ і ФСГ СФ ця складова вже не

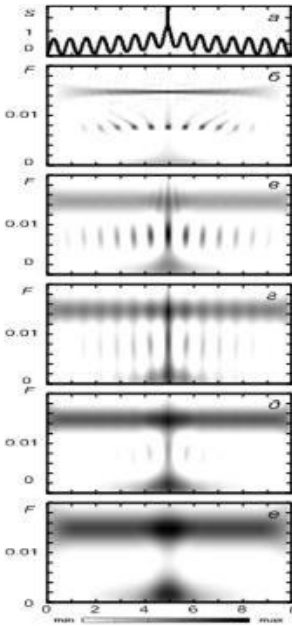


Рис. 4 – Результати аналізу суми шпигля та синусоїди: а – сигнал у часовій області, б – ФСГ ПВ, в – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 1000$ , г – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 10$ , д – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 0.01$ , е – ФСГ СФ, ж-л – енергограми

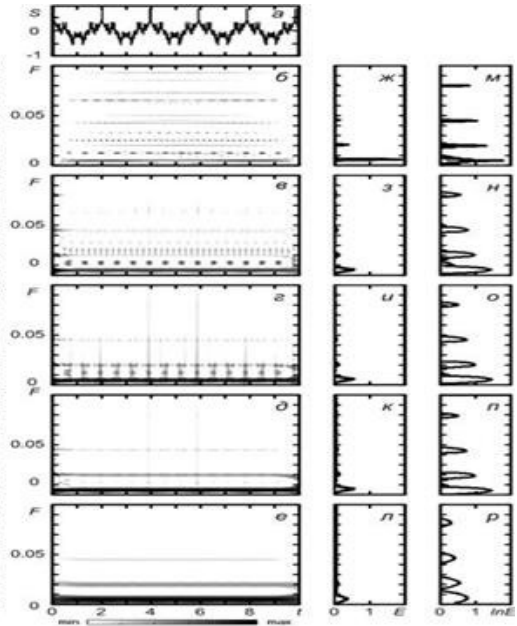


Рис. 5 – Результати аналізу функції Римана-Вейерштраса: а – сигнал у часовій області, б – ФСГ ПВ, в – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 1000$ , г – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 10$ , д – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 0.01$ , е – ФСГ СФ, ж-л – енергограми, м-р – енергограми в логарифмічному масштабі

проглядає, будучи усередненою з третім процесом, для якого уточнені значення тривалості і характерного квазіперіода складають відповідно  $\Delta t \approx 50$  хв і  $T \approx 100 - 150$  хв. Більш того, третій процес, мабуть, можна віднести до НШС процесів зі змінною середньою частотою (ЗСНШС). У нього з часом середня частота зростає, а середній період відповідно зменшується.

Крім того, за допомогою енергограм ФСГ ПВ (рис. 6, ж, м) виявлено процес з характерним періодом  $T \approx 25$  хв. На ФСГ ПЧВ (рис. 6, в – д), а також на ФСГ СФ (рис. 4.1, е), цей процес не виявляється через згладжування. Швидше за все, він не є інтерференційною структурою, оскільки останні виникають в середніх точках на часо-частотній площині між структурами реально існуючих процесів. Також, мабуть, не є інтерференційною структурою й нестационарний процес з тривалістю  $\Delta t \approx 20$  хв, характерним квазіперіодом  $T \approx 35 - 40$  хв, хоча він і є маскований накладеною зверху інтерференційною структурою між першим та другим процесами.

Більш складну часо-частотну структуру, як виявляється, має й перший процес. Схоже, він також належить ЗСЧНШС процесів, до того ж його середня частота (і середній період) змінюються за дуже складним законом.

Також слід відзначити, що на ФСГ ПЧВ і ФСГ СФ більш ярко вимальовується процес, який починається приблизно через 350 хв після початку відліку часу. На ФСГ ПВ він практично непомітний через наявність інтерференції.

Інший високоенергетичний процес, який був проаналізований у роботі, це сонячний спалах. Сонячний спалах – раптовий вибуховий процес виділення енергії (світлової, теплової, кінетичної) у атмосфері Сонця.

На рис. 7 наведено результати аналізу часових варіацій геомагнітного поля (Н – компонента) найпотужнішого рентгенівського сонячного спалаху, який відбувся 5 грудня 2006 р. Тривалість реєстрації у часовій області складала  $T_p = 240$  хв. Розмах процесу за величиною індукції магнітного поля:  $\Delta B \approx 8$  нТл. Кількість відліків дискретного вектора даних складала  $N = 1200$ .

З аналізу ФСГ СФ (рис. 7, е) та її енергограм (рис. 7, л, р) виявляється, що у досліджуваному сигналі є чотири характерних збурення. Перше з них починається приблизно через 70 хв від початку реєстрації, має тривалість  $\Delta t \approx 75 - 80$  хв і характерні періоди  $T \approx 12 - 20$  хв, показник широкосмуговості  $\mu \approx 0,5$ . Друге починається практично водночас з першим і має відповідно  $\Delta t \approx 60$  хв,  $T \approx 7 - 12$  хв,  $\mu \approx 0,5$ . Третє збурення починається приблизно через 75 хв від початку реєстрації та має  $\Delta t \approx 35$  хв,  $T \approx 5 - 7$  хв,  $\mu \approx 0,3$ , до того ж спостерігається одночасно з першим і другим. Четверте збурення суттєво відрізняється від трьох попередніх. Воно починається приблизно за 175 хв після початку реєстрації та має  $\Delta t \approx 50$  хв,  $T \approx 10 - 20$  хв,  $\mu \approx 0,7$ . Перший, другий і четвертий процеси та із зауваженнями третій процес можуть бути віднесені до НШС процесів.

ФСГ ПВ і ФСГ ПЧВ істотно уточнюють отриману інформацію.

На часо-частотній площині ФСГ ПВ (рис. 7, б) добре проглядає вузька горизонтальна смуга з характерним періодом  $T \approx 20$  хв, яка свідчить, що в цьому процесі присутнє досить тривале ( $\Delta t \approx 120$  хв) хвильове збурення, яке явно не є надширокосмуговим. Воно перебуває практично на місці першого НШС процесу. В той самий час на місці другого НШС процесу розташовано типовий ЗСЧНШС процес із зростаючим середнім періодом, а отже, і з середньою частотою, яка зменшується із часом. Динаміка усереднення ФСГ ПВ, що наведена на рис. 7, в – д, пояснює, як внаслідок погіршення часо-частотної роздільної здатності конструкція з близько розташованих ЗСЧНШС процесів та вузькосмугового процесу може перетворитись на те, що на ФСГ СФ виглядає як два НШС процеси.

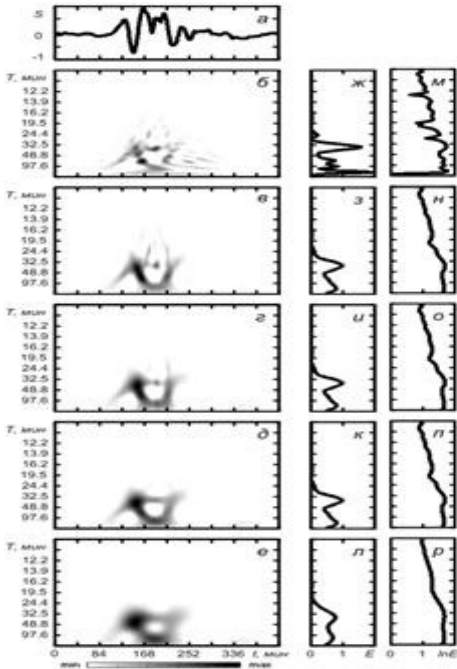


Рис. 6 – Результати аналізу часових варіацій повного електронного вмісту в іоносфері (м. Голдстоун) під час вибуху вулкана Сент-Хелленс 18 травня 1980р.: а – процес у часовій області, б – ФСГ ПВ, в – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 1000$ , г – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 10$ , д – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 0.01$ , е – ФСГ СФ, ж-л – енергограми, м-р – енергограми у логарифмічному масштабі

Про третій процес в плані уточнення його часо-частотної структури не можна сказати чогось певно визначеного, оскільки на ФСГ ПВ він є сильно маскований інтерференційними структурами, хоча на на ФСГ ПЧВ (рис. 7, д) ми бачимо деяке зменшення його часової тривалості. Четвертий з розглянутих процесів, судячи за ФСГ ПЧВ, має дещо більш складну часо-частотну конфігурацію, ніж на ФСГ СФ.

У висновках підбито підсумки виконаних автором досліджень.

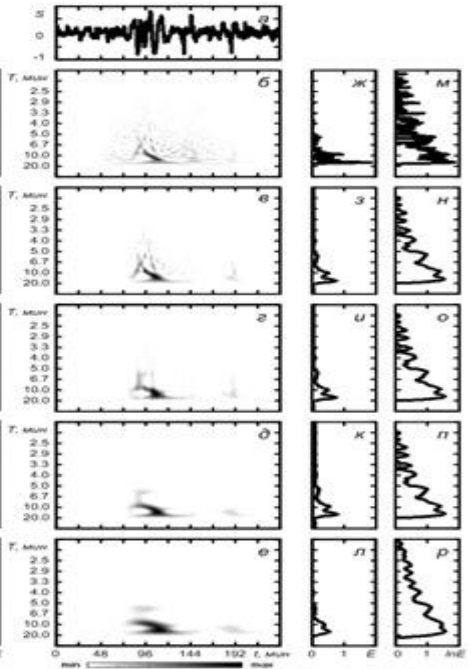


Рис. 7 – Результати аналізу часових варіацій геомагнітного поля (Н – компонента) під час найпотужнішого рентгенівського сонячного спалаху 5 грудня 2006 р.: а – процес у часовій області, б – ФСГ ПВ, в – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 1000$ , г – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 10$ , д – ФСГ ПЧВ  $\sigma = 0.01$ , е – ФСГ СФ, ж-л – енергограми, м-р – енергограми у логарифмічному масштабі



## ВИСНОВКИ

Внаслідок виконаних досліджень успішно розв'язано актуальну наукову задачу підвищення інформативності методів дистанційного радіозондування, що використовуються у фізиці геокосмосу та космічній радіофізиці, шляхом застосування для аналізу та обробки сигналів нелінійних перетворень Вігнера та Чої–Вільямса. Це дозволило суттєво уточнити часо-частотну структуру та фізичні параметри ряду збурень, що виникають у геокосмосі під впливом потужних нестационарних джерел енерговиділення, зокрема, вибухів вулканів, сонячних спалахів тощо. Робота є одним з етапів фундаментальних досліджень надскладних процесів у відкритих нелінійних динамічних системах Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера та Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля, а її результати використано під час розв'язання проблеми створення адекватної моделі таких процесів.

1. Показано, що традиційний спектральний аналіз на базі одновимірного перетворення Фур'є та його модифікаціях, придатний тільки для вузькосмугових і широкосмугових сигналів та процесів. Для ефективного дослідження нетрадиційних сигналів і процесів (нелінійних, фрактальних, надширокосмугових та ін.) необхідно використовувати методи часо-частотного аналізу.

2. Показано, що часо-частотний аналіз нетрадиційних видів сигналів і процесів наразі проводиться із застосуванням сучасних лінійних інтегральних перетворень, зокрема, безперервного вейвлет перетворення (БВП), аналітичного вейвлет перетворення (АВП), перетворення Габора, адаптивного перетворення Фур'є та ін.

3. Встановлено, що для аналізу нетрадиційних видів сигналів та процесів перспективно використання нелінійних квадратичних інтегральних перетворень класу Коена. Найбільш придатними є перетворення Вігнера та Чої–Вільямса.

Показано, що до основних переваг ПВ належать добра роздільна здатність та інваріантність щодо зсувів за фазою, часом та частотою. Недоліками є виникнення інтерференції для багатокомпонентних сигналів і не завжди фізично коректне трактування значень ФСГ ПВ. Зазначено, що основним методом боротьби з цими недоліками є усереднення ФСГ ПВ з керованою (ПЧВ) та некерованою роздільною здатністю (псевдо ПВ та згладжене псевдо ПВ).

Встановлено, що переваги ПЧВ полягають у хорошій роздільній часо-частотній здатності, інваріантності щодо зсувів за фазою, часом та частотою, а головне – у наявності параметра, який керує відношенням між інтенсивністю інтерференційних структур для багатокомпонентних сигналів та часо-частотною роздільною здатністю. Платою за зменшення впливу інтерференції є деяке погіршення часо-частотної роздільної здатності. Інші недоліки ПЧВ – відсутність можливості отримання аналітичних результатів під час аналізу навіть достатньо простих сигналів, та неоднородність зменшення інтерференційних структур багатокомпонентних сигналів уздовж різних напрямків на часо-частотній площині.

4. Показано, що ПВ, а частково і ПЧВ, вже успішно використовуються під час вирішення різноманітних задач, зокрема, задач геофізики, сейсмології, океанології, оптики, радіофізики, фізики геокосмоса, неруйнівного контролю тощо. Зазначено, що методи на основі ПВ та ПЧВ увійшли до складу нового комплексного методу

аналізу сигналів і процесів – системного спектрального аналізу.

5. Продемонстровано, що для найбільш повного аналізу сигналів з особливостями ПВ необхідно використовувати разом з БВП, АВП та СФ. Перші два перетворення дозволяють ефективно боротися з нелокальністю ПВ, а третє – відсіювати інтерференційні часо-частотні структури, які виникають під час аналізу багатокомпонентних сигналів.

6. Продемонстровано, що під час проведення чої-вільямс-аналізу нестационарних, нелінійних, фрактальних сигналів, а також сигналів з особливостями переваги ПЧВ з лишком компенсують основний недолік ПЧВ, який полягає в нерівномірності зменшення інтерференційних часо-частотних структур вздовж різних координатних осей на часо-частотній площині.

7. Створено банк часо-частотних вігнер- та чої-вільямс-портретів модельних нестационарних, нелінійних, фрактальних сигналів і процесів, а також сигналів та процесів з особливостями. Такий банк є необхідним для проведення ефективного вігнер- та чої-вільямс-аналізу реальних сигналів і процесів.

8. Продемонстровано, що вігнер-, чої-вільямс та фур'є-аналізи добре доповнюють один одного, причому недоліки одних перетворень компенсуються за рахунок переваг інших. ФСГ ПВ та енергограма ПВ дозволяють з високою роздільною здатністю вивчати часо-частотну структуру досліджуваного процесу, ФСГ СФ та енергограма СФ дають можливість ефективно відсіювати інтерференційні часо-частотні структури, а ФСГ ПЧВ та енергограма ПЧВ забезпечують перегляд еволюції зменшення інтерференційних структур при поступовому зниженні часо-частотної роздільної здатності.

Розроблено та рекомендовано фахівцям спеціальний формат подання даних під час проведення спільного вігнер-, чої-вільямс та фур'є-аналізів експериментальних даних, зокрема, під час вирішення задач космічної радіофізики.

9. Показано, що під час дослідження за допомогою методів ДР впливу на геокосмос потужних нестационарних джерел енерговиділення виникає необхідність у проведенні часо-частотного аналізу нелінійних, фрактальних і надширокосмугових сигналів і процесів, а також сигналів і процесів з особливостями.

10. Встановлено, що застосування спільно з фур'є-аналізом вігнер- та чої-вільямс-аналізів для дослідження часових варіацій повного електронного вмісту в іоносфері у методі трансіоносферного радіозондування під час вивчення іоносферних ефектів вибуху вулкана Сент-Хелленс 18 травня 1980 р. та часових варіацій електромагнітного поля Землі, які супроводжували найсильніший рентгенівський сонячний спалах 5 грудня 2006 р., дозволило суттєво уточнити часо-частотну структуру збурень, що виникають. Останнє дало змогу покращити існуючі моделі процесів у геокосмосі, які супроводжували дію таких потужних нестационарних джерел енерговиділення, як вибух вулкана та найсильніший рентгенівський сонячний спалах.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Вишнинецкий О. В. Преобразование Вигнера и атомарные функции в цифровой обработке сигналов / О. В. Вишнинецкий, В. Ф. Кравченко, О. В. Ла-

зоренко, Л. Ф. Черногор // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 11, №6 – С. 26-38.

2. Вишниецкий О. В. Анализ нелинейных волновых процессов при помощи преобразования Вигнера / О. В. Вишниецкий, О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 295 – 310.

3. Вишниецкий О. В. Чои–вильямс-анализ в цифровой обработке сигналов / О. В. Вишниецкий, О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, № 4. – С. 410 – 432.

4. Вишниецкий О. В. Вигнер-анализ модельных сигналов с особенностями / О. В. Вишниецкий, О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 195 – 209.

5. Вишниецкий О. В. Чои–Вильямс-анализ нелинейных волновых процессов / О. В. Вишниецкий, О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 4 – С.293-303.

6. Вишниецкий О. В. Вигнер-анализ в задачах космической радиофизики / О. В. Вишниецкий, О. В. Лазоренко // Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Радиофизика и электроника. – 2010. – № 927. – Вып. 16. – С. 89 – 95.

7. Chernogor L. F. Ultrawideband signals and Wigner transform / L. F. Chernogor, O. V. Lazorenko, O. V. Vishnivezky // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals: Third International Conference, 19 – 22 September, 2006: Proc. – Sevastopol, 2006. – P. 297 – 299.

8. Вишниецкий О. В. Анализ нелинейных волновых процессов при помощи преобразования Вигнера / О. В. Вишниецкий // VI Харьковская конференция молодых ученых «Радиофизика и электроника». – 13-14 декабря 2006 г. – Харьков, Украина. – С. 70.

9. Вишниецкий О. В. Системный спектральный анализ нелинейных сверхширокополосных процессов и сигналов / О. В. Вишниецкий, О. В. Лазоренко, С. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Труды Российского НТОРЭС им. А. С. Попова, серия «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике». – М.: Радиотехника, 2007. – Вып. II. – С. 102 – 105.

10. Вишниецкий О. В. Вигнер-анализ и Чои–Вильямс-анализ в задачах физики геокосмоса / О. В. Вишниецкий, О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Седьмая украинская конференция по космическим исследованиям, 3 – 8 сентября 2007 г.: сб. тезисов. – Крым, Евпатория, НЦУВКЗ, 2007. – С 114.

11. Chernogor L. F. Digital Analysis of the Non-Linear Ultrawideband Processes / L. F. Chernogor, O. V. Lazorenko, S. V. Lazorenko, O. V. Vishnivetsky // 6-th International Conference on Antenna Theory and Techniques, September 17 – 21, 2007: Proc. – Sevastopol, 2007. – P. 262 – 264.

12. Вишниецкий О. В. Применение преобразования Вигнера для анализа

сигналов с особенностями / О. В. Вишнинецкий // 3-я Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций». –16-21 апреля 2007 г. – Севастополь. – С. 297.

13. Chernogor L. F. System spectral analysis of the non-linear ultrawideband signals / L. F. Chernogor, O. V. Lazorenko, O. V. Vishnivezky // Sixth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies, June 25–30, 2007 : Proc. – Kharkov, 2007. – Vol. 2. – P. 980 – 982.

14. Вишнинецкий О. В. Применение преобразования Чои–Вильямса для анализа нелинейных волновых процессов / О. В. Вишнинецкий // 4-я Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций». –21-25 апреля 2008 г. – Севастополь, 2008. – С. 365.

15. Chernogor L. F. Choi–Williams Analysis of the Non-Linear Ultrawideband Signals / L. F. Chernogor, O. V. Lazorenko, O. V. Vishnivetsky // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals: Fourth International Conference, 15 – 19 September, 2008: Proc. – Sevastopol, 2008. – P. 235 – 237.

16. Вишнинецкий О. В. Вигнер- и чои–вильямс-анализы фрактальных процессов / О. В. Вишнинецкий // 5-я Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций». –20-25 апреля 2009 г. – Севастополь, 2009. – С. 332.

17. Вишнинецкий О. В. Нелинейный время-частотный анализ высокоэнергетичных процессов в ионосфере / О. В. Вишнинецкий // Конференция молодых ученых «Дистанционное радиозондирование ионосферы». – 6-9 апреля 2010 г. – Харьков, Украина. – С. 29.

18. Вишнинецкий О. В. Время-частотный анализ сигналов с особенностями / О. В. Вишнинецкий // 7-я Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций». –11-15 апреля 2011 г. – Севастополь, 2011. – С. 321.

### АНОТАЦІЯ

*Вишнівецький Олег Вадимович.* Аналіз сигналів на базі перетворень Вігнера та Чої–Вільямса в методах дистанційного радіозондування геокосмосу.– Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.– Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2012.

Ключові слова: перетворення Вігнера, перетворення Чої–Вільямса, клас перетворень Коена, аналіз сигналів, дистанційне радіозондування, космічна радіофізика, геокосмос.

В дисертації успішно розв'язано актуальну наукову задачу підвищення інформативності методів дистанційного радіозондування, що використовуються у фізиці геокосмосу та космічній радіофізиці, шляхом застосування для аналізу та

обробки сигналів нелінійних перетворень Вігнера та Чої–Вільямса. Це дозволило суттєво уточнити часо-частотну структуру та фізичні параметри ряду збурень, що виникають у геокосмосі під впливом потужних нестаціонарних джерел енерговиділення, зокрема, вибухів вулканів, сонячних спалахів тощо. Робота є одним з етапів фундаментальних досліджень надскладних процесів у відкритих нелінійних динамічних системах Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера та Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля, а її результати використано під час розв'язання проблеми створення адекватної моделі таких процесів.

### АННОТАЦІЯ

*Вишиневецкий Олег Вадимович.* Анализ сигналов на основе преобразований Вигнера и Чои–Вильямса в методах дистанционного радиозондирования геокосмоса. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 01.04.03 – радиопизика. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2012.

Ключевые слова: преобразование Вигнера, преобразование Чои–Вильямса, класс преобразований Коэна, анализ сигналов, дистанционное радиозондирование, космическая радиопизика, геокосмос.

В диссертации успешно решена актуальная научная задача повышения информативности методов дистанционного радиозондирования, которые используются в физике геокосмоса и космической радиопизике, посредством применения для анализа и обработки сигналов нелинейных преобразований Вигнера и Чои–Вильямса. Это позволило существенно уточнить время-частотную структуру и физические параметры ряда возмущений, которые возникают в геокосмосе под действием мощных нестационарных источников энерговиделения, в частности, взрывов вулканов, солнечных вспышках, и т. п. Работа является одним из этапов фундаментальных исследований сверхсложных процессов в открытых нелинейных динамических системах Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера и Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля, а ее результаты использовались при решении проблемы создания адекватной модели таких процессов.

Создан банк время-частотных вигнер- и чои–вильямс-портретов (ФСП ПВ и ФСП ПЧВ, их скелетоны, энергограммы и среднеквадратичные отклонения) для характерных модельных простейших сигналов, нелинейных волновых процессов, сигналов с особенностями и фрактальных сигналов.

Методы на основе ПВ и ПЧВ вошли в состав нового комплексного метода анализа сигналов и процессов – системного спектрального анализа.

Разработан и рекомендується спеціалістам спеціальний формат представлення даних при проведенні спільних вигнер-, чои–вильямс- і фур'є-аналізів експериментальних даних, в частности, при решении задач космической радио-

физики.

Установлено, что применение совместно с фурье-анализом вигнер- и чои-вильямс-анализов для исследования временных вариаций полного электронного содержания в ионосфере в методе транзиосферного радиозондирования при изучении ионосферных эффектов взрыва вулкана Сент-Хелленс 18 мая 1980 г. и временных вариаций электромагнитного поля Земли, сопровождавших сильнейшую рентгеновскую солнечную вспышку 5 декабря 2006 г., позволило существенно уточнить время-частотную структуру возникающих возмущений. Последнее дало возможность улучшить существующие модели процессов в геосмосе, сопровождающих действие таких мощных нестационарных источников энерговыделения, как взрыв вулкана и сильнейшая рентгеновская солнечная вспышка.

### ABSTRACT

*Vishnivetskiy Oleg.* Signal analysis based on the Wigner and Choi–Williams transforms in the methods of remote radio sounding of geospace.

Manuscript. – Thesis for a candidate degree of physical and mathematical sciences on specialty 01.04.03 – radio physics. – Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, 2012.

Key words: Wigner transform, Choi–Williams transform, Cohen's class of transforms, signal analysis, remote radio sounding, space radio physics, geospace.

This actual science task is increasing of informational content of remote radiosonde methods using Wigner and Choi-Williams nonlinear transformations signals analysis and treatment. These methods are used in geospace physics and space radiophysics.

It allowed to significantly improve time-frequency structure and physical parameters of disturbances, which occurs in geospace during the influence of powerful nonstationary sources of energy, such as volcano explosions, solar flares. This thesis is a one of stages of fundamental researches of extremely complex processes in opened nonlinear dynamical systems Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere and the Sun – interplanetary environment – magnetosphere – ionosphere – atmosphere – Earth. Thesis results were used in task solving of adequacy model creation of such processes.

Підп. до друку 5.12.12. Формат 60г841/16. Спосіб друку – ризографія.  
Умов. друк. арк. 1.2. Облік. вид. арк. 1.0. Тираж 100 прим. Зам. № \_\_\_\_.  
Україна, 61200, Харків, просп. Леніна, 14, ХНУРЕ  
Віддруковано в навчально-науковому видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ.  
Україна, 61166, Харків, просп. Леніна, 14.

