

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

УДК 519.853; 621.372

Шелевицький Ігор Володимирович

**СПЛАЙН-МЕТОДИ І ЗАСОБИ АНАЛІЗУ І СИНТЕЗУ ЦИФРОВИХ
СИГНАЛІВ**

05.12.17 Радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Київ-2005

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор Шутко Микола Олександрович,
Національний авіаційний університет,
професор.

Офіційні опоненти:

заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України, доктор
технічних наук, професор, Ігнатов Володимир Олексійович,
Національний авіаційний університет, професор кафедри телекомунікаційних систем;

Провідна установа:

Захист відбудеться 2005 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої
ради Д26.062.05 при Національному авіаційному університеті.

Адреса: проспект Космонавта Комарова, 1, м.Київ, Україна, 03058.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного авіаційного університету,
проспект Космонавта Комарова, 1, м.Київ, Україна, 03058.

Автореферат розісланий

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради, к.т.н.

В.Шутко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогодні інтенсивно розвиваються радіотехнічні системи, що обробляють сигнали, носіями важливої інформації в яких є не лише деякі середні чи локальні характеристики, а саме їх унікальна форма. Це радіолокаційні станції для контактного та дистанційного проникаючого зондування GPR (Ground Penetrating Radar), радіометричні системи, що використовують власне випромінювання тіл у радіочастотному діапазоні, расдари і содари тощо. Алгоритми обробки сигналів в таких системах здебільшого запозичені з радіолокації і мало адекватні процесам зондування, що не дозволяє повною мірою використати потенційні можливості цих систем. В багатьох випадках сигнали в таких системах є сплайнами. Іншим важливим напрямком розвитку радіотехнічних систем є телемедицина, зокрема біорадіотелеметрія. Ефективність цих систем значною мірою залежить від наявності високих метрологічних характеристик пристроїв підсилення, перетворення та фільтрації біосигналів, інформативності пристроїв обробки та стиснення сигналів. Біосигнали також мають складну форму та значну шумову складову, що ускладнює їх обробку. Роботи цього напрямку із застосуванням сплайнів представлені Biomedical Imaging Group (BIG, bigwww.epfl.ch)

Успішно вирішити проблему обробки сигналів у вказаних системах можна використавши сплайн-моделі сигналів. Сплайни мають добре розвинену математичну теорію (роботи I.Schoenberg, C de Boor, M.Unser, Стечкіна С.Б., Субботіна Ю.Н., Зав'ялова Ю.С., Василенка В.А., українських вчених Корнейчука М.П., Лигуна А.А., Попова Б.А., Марченка Б.Г., Денисюка В.П., Шутка М.О. Приставки О.П.) і відомі своїми хорошими наближувочими властивостям в поєднанні з ефективним апаратом розрахунків. Достоїнство сплайнів полягає тому, що зростання порядку сплайнового полінома не погіршує якість обчислень, а похибка наближення залежить від похідної фіксованого порядку. Прості, не сплайнові моделі, що використовуються для обробки сигналів складної форми (в даній роботі неперіодичних гладких сигналів, що мають більше 4-6 екстремумів) не здатні адекватно та ефективно описати вказані сигнали в цілому. Тому такі сигнали обробляють короткими фрагментами (вікнами), в межах яких зберігається практично достатня адекватність простої моделі. За наявності випадкових шумів, для отримання якісних статистичних оцінок параметрів моделі сигналу бажано врахувати максимальну кількість даних, для чого необхідно збільшити розкриття вікна. Розширення вікна призводить до неадекватності простої моделі і потребує її ускладнення (наприклад зростання порядку полінома), що в свою чергу призводить до погіршення статистичних оцінок, та обчислювальних труднощів. Це погіршення знову необхідно компенсувати збільшенням числа даних (розширенням вікна). Не вирішеним є також питання вибору відповідного базису для наближення конкретного сигналу за методом найменших квадратів в радіотехнічних системах. Використання сплайнів, в якості моделі сигналу, дозволяє уникнути зазначених труднощів і суттєво підвищити якість обробки сигналів. Наприклад, заміна кубічного полінома сплайном дозволяє, при однаковій похибці апроксимації, вдвічі збільшити ширину вікна обробки. В області цифрової обробки сигналів сплайни інтенсивно

почали використовуватись з кінця 80-х років у wavelets методах, в основі яких інтерполяційні схеми з локальними базисними функціями. Сучасний стан досліджень та перспектив в області застосування сплайнів для обробки цифрових сигналів найбільш повно висвітлено в роботі [M. Unser, "Splines: a perfect fit for signal and image processing," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 16, no. 6, pp. 22-38, 1999]. Використання більш складних, статистичних методів обробки: статистичної ідентифікації, оптимальної фільтрації та адаптація сплайнів до характеристик реальних сигналів дозволяє отримати значно точніші моделі та ефективніші статистичні оцінки параметрів сигналів ніж ті, що ґрунтуються на інтерполяційних схемах. Однак цілий ряд особливостей обробки сигналів не дозволяють безпосередньо застосувати існуючий математичний апарат сплайнів і потребують нетривіальних підходів до реалізації методів і засобів сплайн-обробки та їх об'єднання в рамках спеціалізованої теорії і технології. Основні підходи до оптимізації та апаратної реалізації обчислень викладені в роботах Блейхута Р., Гольденберга Л.М., Задіраки В.К., Теслера Г.С., Кузьміна С.З., Ігнатова В.О., Білецького А.Я..

Отже маємо потребу у вдосконаленні обробки сигналів складної форми, яку потенційно дозволяє задовольнити застосування сплайн-моделей, але сплайни не можна застосувати для обробки сигналів в радіотехнічних системах у рамках існуючих методів та методик.

Викладене вище дозволяє сформулювати важливу **науково-технічну проблему вдосконалення обробки цифрових сигналів складної форми в радіотехнічних системах шляхом застосування сплайн-моделей.**

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Результати дисертаційної роботи отримані та застосовані в процесі виконання наступних науково-дослідних робіт:

036-ГБ92 “Разработка методов повышения достоверности обработки измерительной информации и контроля параметров радиоэлектронных систем” (1992-1994);

301-Х93 “Разработка, проектирование, изготовление выхревых устройств для научно-исследовательских целей“ (1993);

302-Х93 “Разработка контроллера прибора неразрушающего контроля поверхностного слоя ферромагнитных деталей (1993);

397-Х93 “Разработка технологии радиоиммунологического анализа предсердного гормона” (1993-1994);

497-ГК94 “Разработка и исследование методов и средств повышения технико-экономических показателей преобразователей параметров электроэнергии в несимметричных режимах” (1994-1996).

ГБ07-206-01 “Створення інтелектуальної системи оперативного аналізу техногенного навантаження довкілля на основі сучасних інформаційних технологій В перерахованих науково-дослідних роботах сплайн-технологія обробки даних застосовувалась для ідентифікації, моделювання, фільтрації та стиснення сигналів складної форми.

Мета роботи: Досягти суттєвого покращення результатів синтезу та аналізу цифрових сигналів складної форми в радіотехнічних системах, шляхом застосування сплайн-моделей.

Основні задачі дослідження:

1. Розробка методів адаптації сплайнів до частотних властивостей конкретних сигналів (діапазону частот, амплітудного чи енергетичного спектру) з врахуванням практичних аспектів застосування в задачах цифрової обробки сигналів в радіотехнічних та телевізійних системах.
2. Створення та дослідження методів та алгоритмів побудови сплайнів із заданими частотними властивостями.
3. Розробка і дослідження швидких алгоритмів та методики побудови пристроїв для обробки сигналів, що ґрунтуються на сплайн-інтерполяції та статистичному оцінюванню за МНК сплайнових моделей в реальному часі.
4. Синтез пристроїв та алгоритмів адаптації сплайнів до сигналів та заводової обстановки, включаючи алгоритми та пристрої частотно-часового розкладу, стійких до адитивного білого шуму.
5. Виконання експериментальної та практичної перевірки основних теоретичних положень, алгоритмів та засобів, що складають апаратне і програмне забезпечення цифрових систем сплайн-обробки радіотехнічних сигналів складної форми.

Об'єктом дослідження є цифрові сигнали, їх теорія, засоби і методи аналізу і синтезу.

Предметом досліджень є засоби і технології сплайн-методів аналізу і синтезу цифрових сигналів складної форми в радіотехнічних системах.

Методи дослідження. Для побудови сплайнових моделей застосовані методи апроксимації, лінійної алгебри, математичного аналізу. При розробці методів статистичного оцінювання параметрів сплайнів застосовано методи максимальної правдоподоби, математичної статистики та випадкових процесів. Методи лінійної фільтрації, дослідження операцій, нелінійної оптимізації використовувались при розробці прикладних методів та алгоритмів. Для моделювання даних застосовані методи статистичного моделювання та чисельні методи. В цілому в процесі роботи використовувалась теорія сигналів, теорія наближень та теорія сплайн-функцій.

Наукова новизна полягає в наступному:

1. В класі сплайнових моделей сигналів створено методи синтезу оптимальних за МНК фільтрів (фільтрів Вінера-Колмогорова)..
2. Отримано та теоретично обґрунтовано згортковий метод побудови базисних сплайнів з фрагментів широкого класу неперервних на фрагментах функцій.
3. Розроблено способи трансформації чотирьохфрагментних базисних сплайнів в локальний та глобальний інтерполяційні імпульси.
4. Створено методику розрахунку LSS (Least Squares Spline) фільтрів зі сплайн-моделями, які складаються з необмеженої кількості фрагментів рівної ширини, що ґрунтуються на наближеному оберненні матриці специфічної форми.

5. Виведено формули для рекурентних розрахунків оцінок МНК зі сплайновими моделями (рекурентних LSS фільтрів).
6. Отримано частотно-часові розклади сигналів в локальних сплайнових базисах за методом найменших квадратів (LSS розклад).

Практичне значення роботи полягає в тому, що:

1. Створено технологію обробки цифрових сигналів складної форми, що ґрунтується на сплайнових моделях залежностей. Перевагою розробленої технології перед відомими є універсальність моделі, що використовується та її обчислювальна ефективність. Відносно інших сплайнових технологій, розроблену відрізняє обґрунтованість вибору конкретних сплайнових базисів з врахуванням характеру сигналів та завад
2. Розроблено методику розрахунків віконних, рекурентних, децимуючих LSS фільтрів, синтез базисів для яких обґрунтований частотними властивостями корисного сигналу і шуму.
3. Синтезовано алгоритми та пристрої адаптивної обробки сигналів однократної обробки (з адаптацією за рахунок зміни частотних властивостей базисних сплайнів) та багатократної обробки в системах оптимального частотно-часового сплайн-розкладу за МНК (LSS розклад), що є стійким до адитивного білого шуму.
4. Ефективність розробленої технології випробувана при вирішенні практичних задач в системах обробки реальних сигналів складної форми у медичній функціональній діагностиці, геології і геофізиці та на модельних сигналах.
5. Отримані методи, способи і методики реалізовані у вигляді алгоритмів, прикладних програм і бібліотек функцій на алгоритмічних мовах "C", "VBA", в середовищах математичних пакетів "MathCad", "Reduce", "Derive", "MatLab", "Simulink" та в спеціалізованих пакетах проектування цифрових пристроїв "Altera DSP blokset", "Quartus II". Така реалізація потенційно дозволяє розробити системи автоматизованого схемотехнічного проектування та комп'ютерного моделювання радіотехнічних та телевізійних пристроїв та вузлів (наприклад створення гіперфункцій для ПЛІС Altera).
6. Отримані результати дозволяють виготовляти універсальні та спеціалізовані інтегральні мікросхеми оптимальної та адаптивної сплайн-обробки цифрових сигналів складної форми в радіотехнічних та телевізійних системах в умовах реальної заводової обстановки.
7. В цілому застосування отриманих результатів в системах проникаючої радіолокації, телеметрії, телемедицини дозволяє суттєво покращити обробку сигналів, підвищити інформативність та достовірність результатів. Так, заміна кубічної моделі сплайною в фільтрі Савицького-Голея зменшує максимальну динамічну похибку в 16 разів, або дозволяє розширити вікно обробки щонайменше вдвічі, відповідно зменшивши випадкову похибку в 1.4 рази.

Впровадження результатів роботи. Основні результати досліджень і розробок впроваджені:

- у міському діагностичному центрі 2-ї міської лікарні м.Кривий Ріг;

- на кафедрі педіатрії та клінічної лабораторної діагностики факультету післядипломної освіти Дніпропетровської державної медичної академії (м.Кривий Ріг);
- на кафедрі математичного забезпечення ЕОМ Дніпропетровського національного університету.

Особистий внесок здобувача. Положення відзначені, як наукова новизна є особистим внеском здобувача що викладений в наукових роботах. У наукових роботах опублікованих у співавторстві автором належать: [1,10,11,12,13,15] - застосування сплайн-моделі, [2,3,4,8,21,23,33] - методи побудови базисів, [5, 14] – рекурентний алгоритм, [6] - метод адаптації, [9] - метод реального часу, [7, 16, 28] - постановка задачі, [17]- побудова необмежених сплайнів, [24] – застосування центральної граничної теореми, [25] - швидкий алгоритм, [27] - розв'язок МНК, [30] - сплайн-метод частотно-часового аналізу, [31] – встановлення зв'язку між сплайнами і вейвлетами, [34]- конструкції пристроїв.

Апробація результатів дисертації. Основні результати доповідались на вказаних нижче наукових конференціях: II МНТК “Методы управления системной эффективностью функционирования электрифицированных и пилотажно-навигационных комплексов” (Київ, 1993); звітна науково-технічна конференція наукових колективів університету за 1994 рік (Київ, КМУЦА); XVI звітна науково-технічна конференція університету за 1995 рік (Київ, КМУЦА); МНТК “Проблемы совершенствования систем аэронавигационного обслуживания и управления подвижными объектами” (Київ, 1996); МНТК “Авіа-1999” (Київ,1999); МНТК “Авіа-2000” (Київ, 2000). МНТК “Авіа-2001” (Київ, 2001), МНТК “Авіа-2002” (Київ, 2002), МНТК “Авіа-2003” (Київ, 2003), МНТК “Авіа-2004” (Київ, 2004), МНК “Теорія та методи обробки сигналів” (Київ, 2005), МНМК “Проблеми математичного моделювання” (Дніпродзержинськ, 2003), МНМК “Проблеми математичного моделювання” (Дніпродзержинськ, 2004). Результати дисертаційних досліджень доповідались на секції №1 Вченої ради ІПММС НАН України, та у відділі оптимізації чисельних методів Інституту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України, де отримали позитивну оцінку. Основні результати досліджень (включаючи електронну версію монографії) розміщені в internet за адресою www.kdeu.dp.ua/spline і є загальнодоступними з лютого 2003 року. Частина програмного забезпечення (побудова інтерполяційних сплайнів та сплайн-інтерполяторів) розміщена на сайтах www.matlab.ru та www.exponenta.ru./journal.

Публікації. Основні оригінальні результати є підсумком наукової роботи автора, котрою він займається з 1983 року. Вони складають зміст 34 наукових робіт, в тому числі 27 статей у фахових наукових виданнях, згідно списку ВАК, та однієї монографії.

Структура роботи та її обсяг. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, що містять основні результати роботи, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 308 сторінок, робота містить 147 рисунків, 6 таблиць та список джерел з 345 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність, сформульовано мету та ціль роботи, окреслено коло проблем, що розглядаються, вказано на наукову новизну та практичне значення роботи.

У першому розділі розглянуто радіотехнічні системи, сигнали в яких мають складний вигляд, а подальше їх використання передбачає їх розпізнавання за формою оператором чи автоматично. Це георадари, системи радіо та акустичного зондування атмосфери, телемедичні системи. В ряді випадків сигнали в цих системах є сплайнами.

В Україні над питаннями радіоакустичного зондування працюють в ХНУРЕ (проф. Є.Г.Прошкін) та НУ "Львівська політехніка". В дисертаційній роботі Карташова В.М. „Розвиток теорії та удосконалення систем радіоакустичного й акустичного зондування атмосфери” відмічається: „Основним фактором, що визначає недосконалість систем, є недостатнє теоретичне й методичне забезпечення діяльності інженерів, які займаються розробленням, дослідженням та експлуатацією апаратури. Наявну інформаційну прогалину компенсують використанням відповідних відомостей, методик та алгоритмів із класичної радіолокації, що розроблені для точкових розсіювальних об’єктів, або знаходять технічні рішення, спираючись на інженерну інтуїцію чи натурний експеримент. Застосовувані методи і рішення недостатньо враховують специфічні особливості даних систем, обумовлені унікальністю використовуваних локаційних об’єктів – акустичного хвильового пакету і розподілених “повсюдно” у середовищі природних турбулентних неоднорідностей”.

Актуальним є також розвиток телемедицини (особливо в медицині катастроф та військовій медицині), де сигнали також мають складну форму і значний рівень шумів. В Україні діє асоціація комп’ютерної медицини УАКМ (www.uacml.kharkov.ua). Значна увага цьому питанню приділяється в Національному медичному університеті (www.srlc.nmu.kiev.ua/telemed), в Донецькому державному медичному університеті (ДонДМУ, www.telemed.org.ua), інституті проблем військової медицини МО України (м.Ірпінь, Київська область), міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій і систем НАН України та Міністерства освіти і науки України (МННЦ ІТтаС, www.dlab.kiev.ua).

В доповіді Б.М.Шевчука (МННЦ ІТтаС, відділ медичних систем) на симпозіумі „Телемедицина” (25-26 травня 2000 р., Київ) зазначається: „Ефективність функціонування систем довготривалого дистанційного контролю за станом біооб’єктів у значній мірі визначається тими алгоритмами попередньої обробки контролюючих сигналів, які реалізуються безпосередньо в процесі зйомки біосигналів. Як правило, такі алгоритми повинні орієнтуватися на роботу в реальному часі і реалізуватися у вигляді програм для мікроконтролерів чи сигнальних процесорів. Довготривалий дистанційний контроль біооб’єктів в першу чергу передбачає виконання в темпі зйомки інформації операцій фільтрації й стиску цифрових відліків сигналів.”

Застосування в якості моделей сплайнів дозволяє суттєво покращити обробку сигналів в зазначених системах. Для цього необхідно врахувати специфіку систем цифрової обробки сигналів в радіотехнічних системах.

В роботі відмічається значне різноманіття конструкцій, котрі називають сплайнами. Тому автор вважає за необхідне уточнити, що маємо на увазі під вказаним терміном в даній роботі. Сплайном називатимемо неперервну і визначену на фрагментах функцію S , яка складається з фрагментів, що є функціями одного виду і стиковані спеціальним чином. Точки стикування фрагментів називатимемо вузлами сплайна. Основною умовою стикування фрагментів є неперервність значень і частини похідних в точках стикування.

Проаналізовано різні способи побудови сплайнів та основні їх різновиди. Відмічено, що основний інтерес маємо до локальних ермітових сплайнів, котрі хоч і не мають деяких оптимальних властивостей, характерних для глобальних, але вирізняються простотою розрахунків.

Розглянуто питання точності наближення інтерполяційними сплайнами. Відмічено, що в математичній теорії наближень нев'язка виражається через похідні високих порядків, в різних класах функцій. Для сплайнів нев'язка залежить від норми похідної фіксованого порядку, в цьому їх основна перевага перед класичними інтерполяційними функціями.

Проаналізовано стан використання сплайнів в задачах обробки цифрових даних. Відмічено, що в Україні зосереджено значний науковий потенціал в цьому напрямку. Це математичні дослідження Корнійчука М.П., Попова Б.А., Лигуна А.А., Назаренка Н.А., Марченка Б.Г., Денисюка В.П. та прикладні роботи наукових шкіл Шутка М.О. і Марченка Б.Г. та Приставки О.П. За кордоном теорія та практика сплайн-методів є напрямком, що інтенсивно розвивається. Теоретичний напрямок представляють Карл де Бур, Шумейкер Л.Л. Серед науковців, котрі займаються прикладними задачами сплайн-методів в цифровій обробці даних варто відмітити Унсера М. (BIG, EPFL). Значним досягненням є wavelet методи, котрі ґрунтуються на інтерполяції в локальних базисах, включаючи й сплайнові. Однак при наявності білого шуму їх ефективність суттєво знижується.

В другому розділі розглянуто математичні методи побудови інтерполяційних сплайнів, що найбільш відповідають задачам цифрової обробки сигналів.

Найбільш придатним для задач цифрової обробки сигналів є запропонований згортковий метод, що є узагальненням методу побудови поліноміальних В-сплайнів та фракціональних сплайнів. Суть методу полягає отриманні базисного сплайна шляхом згортки симетричних локальних (утворюючих) функцій

$$f_1(a+x) = f_2(b-x), \quad x \in [0, \frac{b-a}{2}], \quad \text{аналогічно } \varphi(x):$$

$$f(x) = \begin{cases} f_1(x), & \text{для } x \in [a, \frac{a+b}{2}] \\ f_2(x) & \text{для } x \in [\frac{a+b}{2}, b], \\ 0 & \text{для } x \notin (a, b) \end{cases}, \quad \varphi(x) = \begin{cases} \varphi_1(x), & \text{для } x \in [a, \frac{a+b}{2}] \\ \varphi_2(x) & \text{для } x \in [\frac{a+b}{2}, b], \\ 0 & \text{для } x \notin (a, b) \end{cases}.$$

В роботі доведено, що лінійна згортка $F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\varphi(x-t)dt$ є локальним сплайном, що складається з чотирьох фрагментів, є неперервним (включаючи точки стику), має неперервну першу та другу похідні, якщо виконуються наступні умови: $f_1(0) = 0$, $\varphi_1(0) = 0$, $f_1(h) = f_2(h)$, $\varphi_1(h) = \varphi_2(h)$, $f_2(2h) = 0$, $\varphi_2(2h) = 0$, ($a = 0$, $b = h$). При цьому функції $f(x)$, $\varphi(x)$ мають бути неперервними і інтегрованими на фрагментах. Як приклад, розглянемо експоненційний базис на сітці 0,1,2,3,4. Утворюючі функції однакові і складаються з фрагментів $f_1(x) = e^x - 1$, $f_2(x) = e^{(2-x)} - 1$. Отримуємо вирази для фрагментів базисного сплайна:

$$F_1(x) = \int_0^x (e^t - 1)(e^{x-t} - 1)dt = xe^x - 2e^x + x + 2,$$

$$F_2(x) = \int_{x-1}^1 (e^t - 1)(e^{x-t} - 1)dt + 2 \int_1^x (e^{2-t} - 1)(e^{x-t} - 1)dt,$$

$$F_2(x) = e^{2-x} + (3-x)e^x + x - 4e + 2, \quad F_3(x) = F_2(4-x), \quad F_4(x) = F_1(4-x).$$

Для трикутних утворюючих функцій отримаємо добре відомі вирази для кубічного В-сплайна. Приклади базисних сплайнів показано на рис.1.

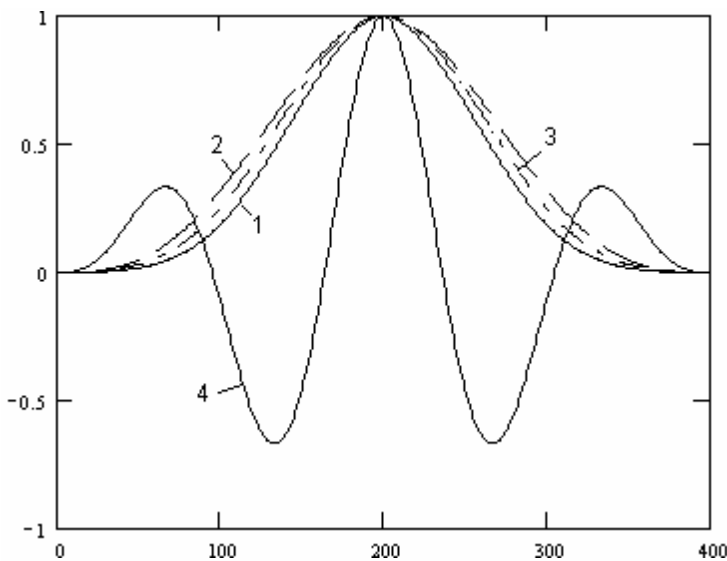


Рис.1. Приклади сплайнових базисів.

1-експоненційний, 2-кубічний, 3-синусоїдальний (четверть), 4-синусоїдальний (половина).

Якщо $\varphi(x)$ прямокутне вікно, то маємо неперервність лише першої похідної. Зміщені пропорційно ширині фрагмента отримані сплайни утворюють базис. Розглянуто також дискретний варіант отримання базисних сплайнів. Перевагою є можливість застосування швидких алгоритмів розрахунку дискретної згортки. Відмітимо також, що вимогам до утворюючих функцій задовольняють імпульсні характеристики нерекурсивних цифрових фільтрів.

Для інтерполяції необхідно розв'язати систему інтерполяційних рівнянь з умови $Y(x) \approx \sum_j a_j F_j(x)$. Такий підхід є

непродуктивним з огляду на необхідність роботи в реальному часі. Тому розроблено методи приведення отриманих базисних сплайнів до лагранжівової форми, де числові коефіцієнти є значеннями функції у вузлах інтерполяції (Л.Френкс називає такі базисні функції інтерполяційними імпульсами).

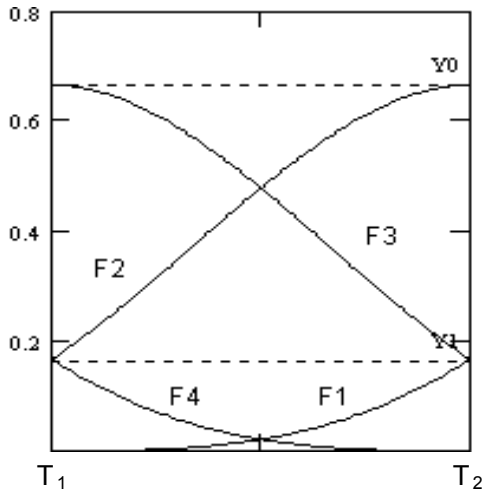


Рис.2. Базисні сплайни на окремому фрагменті

Перший метод полягає у вирішенні цієї задачі на окремому фрагменті (рис.2), з врахуванням значень похідних в точках стикування. Тому отримані базиси називатимемо ермітовими. Вони мають неперервність лише першої похідної. Фрагмент сплайна задано двома вузловими точками (T_1, A_1) , (T_2, A_2) . Для встановлення однозначного взаємозв'язку між вузловими точками та чотирма коефіцієнтами сплайна потрібно ще два параметри пов'язаних із вузлами. За ці параметри приймемо значення першої похідної у вузлових точках.

Перша похідна базисних функцій у вузлових точках легко визначається. Позначимо її z_1 і рахуватимемо наближено, через центральні різниці $A_1' \approx (A_2 - A_0)/2$, $A_2' \approx (A_3 - A_1)/2$. Складемо систему лінійних рівнянь:

$$\begin{bmatrix} 0 & Y_1 & Y_0 & Y_1 \\ Y_1 & Y_0 & Y_1 & 0 \\ 0 & z_1 & 0 & -z_1 \\ z_1 & 0 & -z_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ (A_2 - A_0)/2 \\ (A_3 - A_1)/2 \end{bmatrix}$$

Знайдені значення d_1, d_2, d_3, d_4 підставимо в інтерполяційне рівняння

$S(x) = d_1 F_1(x) + d_2 F_2(x) + d_3 F_3(x) + d_4 F_4(x)$. Виділивши вузлові значення

отримаємо: $\tilde{S}(x) = A_1 F_1(x) + A_2 F_2(x) + A_3 F_3(x) + A_4 F_4(x)$, де

$$\tilde{F}_1 = \alpha((2Y_0 z_1 + 2Y_1^2 - Y_0^2)F_1 + (Y_1 Y_0 - 4Y_1 z_1)F_2 + (2Y_0 z_1 - 2Y_1^2)F_3 + (Y_1 Y_0 - 4Y_1 z_1)F_4);$$

$$F_2 = \alpha((2Y_0 z_1 - 2Y_1^2)F_2 + (Y_1 Y_0 - 4Y_1 z_1)F_1 + (2Y_0 z_1 + 2Y_1^2 - Y_0^2)F_3 + (Y_1 Y_0 - 4Y_1 z_1)F_4);$$

$$F_3 = \alpha[(-Y_0 Y_1)F_1 + (2Y_1^2)F_2 + (-Y_0 Y_1)F_3 + (Y_0^2 - 2Y_1^2)F_4];$$

$$F_4 = \alpha[(-Y_0 Y_1)F_4 + (2Y_1^2)F_3 + (-Y_0 Y_1)F_2 + (Y_0^2 - 2Y_1^2)F_1];$$

$$\alpha = 1/(2[z_1(Y_0^2 - 4Y_1^2)]).$$

Перетворення для базисів утворених згорткою з прямокутним імпульсом неможливе, оскільки дискримінант системи $4z_1^2 Y_1^2 - Y_0^2 z_1^2$ дорівнює нулю. На рис.3 показано вигляд ермітових базисних сплайнів отриманих з показаних на рис.1.

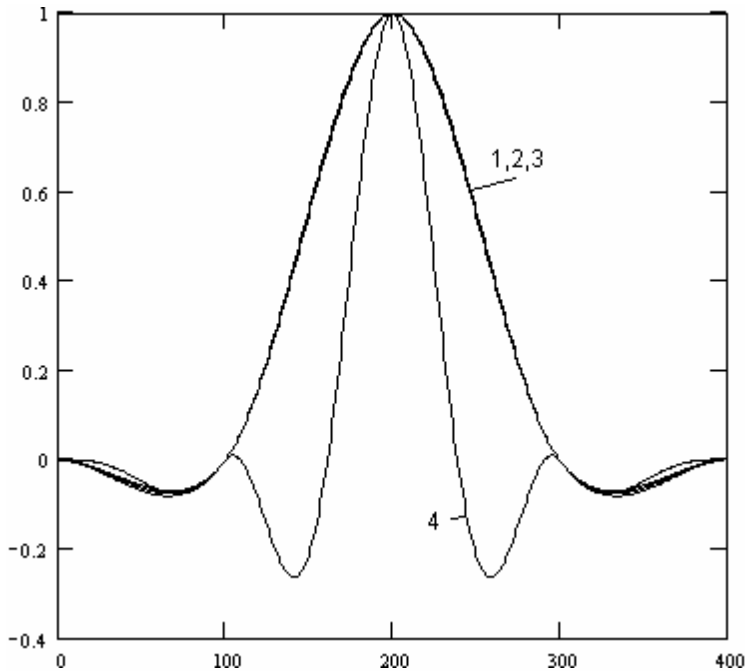


Рис.3. Ермітові базисні сплайни

Другий метод ґрунтується на наближеному розв'язковій інтерполяційних рівнянь специфічної форми. Базиси зберігають неперервність другої похідної, але значно розширюють область ненульових значень. Така конструкція близька до фундаментальних кубічних сплайнів. Значення базисної функції у вузлових точках (0, 1, 2, 3, 4) рівні (0, f1, f0, f1, 0). Тоді для інтерполяційного сплайна побудованого на вузлах, що співпадають із вузловими точками базисних функцій запишемо систему інтерполяційних рівнянь

$$F * A = Y, \text{ де } F \text{ квадратна}$$

симетрична тридіагональна матриця. Матриця повністю визначається двома ненульовими значеннями f0 та f1. Розмірність матриці вважатимемо довільною, або навіть необмежено великою, проте не менше п'яти.

$$F = \begin{bmatrix} f_0 & f_1 & 0 & 0 & 0 \\ f_1 & f_0 & f_1 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & f_0 & f_1 & 0 \\ 0 & 0 & f_1 & f_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_0 \end{bmatrix}$$

Матриця - стовпець Y містить значення інтерпольованої функції у вузлах інтерполяції. Знайдемо значення елементів матриці A. Специфічна форма матриці F дозволяє скористатись наближеним методом визначення елементів інверсної матриці розглянутим нижче. Прийнемо, що інверсна матриця складається із семи ненульових діагоналей. Отримаємо аналітичний розв'язок для ненульових елементів матриці, інверсної до F :

$$d_0 = f_0(f_0^2 - 2f_1^2)/Q, \quad d_1 = -f_1(f_0^2 - f_1^2)/Q, \quad d_2 = f_0f_1^2/Q, \\ d_3 = -f_1^3/Q, \quad Q = f_0^4 - 4f_0^2f_1^2 + 2f_1^4.$$

Для кубічного В-сплайна (f0=0.6667, f1=0.16665) отримаємо значення елементів $\{d_3, d_2, d_1, d_0, d_1, d_2, d_3\} = \{0.000, -0.031, 0.124, -0.463, 1.731, -0.463, 0.124, -0.031, 0.000\}$. Похибка, внаслідок наближеного розрахунку, становитиме не більше

$2Mf_1d_3=(0.01M)$, де M -максимальне вхідне значення. Інтерполяційний імпульс отримаємо, як згортку вхідного базисного сплайна з отриманими елементами $\{d_3, d_2, d_1, d_0, d_1, d_2, d_3\}$. Тобто елементи можна вважати коефіцієнтами нерекурсивного префільтра перед інтерполяційним фільтром з початковим базисом.

В роботі розглянуто і дискретний варіант описаних методів, а також приклади побудови базисів з фрагментів алгебраїчного полінома, експоненти, синусоїди. Таким чином, розроблено метод отримання різноманітних сплайнових базисів, керуючись фізичною природою процесів на фрагменті, або специфічними частотними властивостями утворюючих функцій (що можуть бути імпульсними характеристиками фільтрів).

В третьому розділі розглянуто питання наближення сигналів в сплайнових базисах. Проведена аналогія між фільтрацією нерекурсивним цифровим фільтром: $y(nT) = \sum_{j=0}^n h_j x(nT - jT)$, (h_j -відліки імпульсної характеристики) та математичною процедурою інтерполяції: $S(nT) = \sum_v x(v) F_v(nT, m)$, ($F_v(t, m)$ - v -та базисна функція форми).

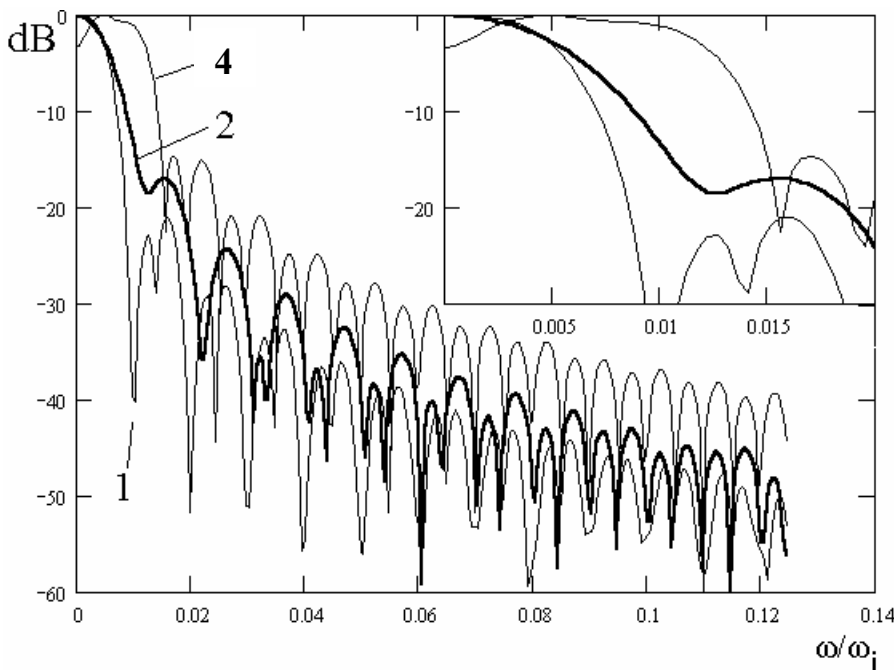


Рис.4. Нормовані амплітудно-частотні характеристики ермітових базисних сплайнів

Отже базисні сплайн-функції можна вважати імпульсними характеристиками цифрових фільтрів. Тому можна говорити про частотні характеристики сплайнових базисів, а нев'язку наближення зручно розглядати в спектрах сигналів та базисів (рис.4). Нев'язку характеризує нерівномірність частотної характеристики базису в значимій області частот сигналу та

глибина подавлення в області затримки. Варто зазначити, що в цілому ряді останніх публікацій похибка наближення окремими видами сплайнів розглядається саме в частотній області. Але похибка оцінюється окремо від сигналів, що обробляються, а задача синтезу сплайнів із заданими частотними властивостями не ставилася.

Розглянуто особливості отримання статистичних оцінок сплайнової моделі за методом найменших квадратів (МНК). Задача розглядається в класичній постановці: модель сигналу описується системою рівнянь $Y = XA + \Xi$, де Y - вектор відліків

сигналу; A - вектор параметрів (значення сплайна у вузлах для лагранжевої форми); X - детермінована матриця, розмірності $n \times k$, що має максимальний ранг k (матриця планування); Ξ випадкова складова з математичним сподіванням $M(\Xi) = 0$, та матрицею коваріацій $D(\Xi) = \sigma^2 I_n$.

Оцінка за МНК $\hat{A} = (X'X)^{-1} X'Y = C^{-1}B$ є найбільш ефективною (в смислі найменшої дисперсії) в класі лінійних незміщених оцінок. Достовірність оцінки параметрів характеризує довірчий інтервал, що визначається у випадку нормальності

даних, як $\hat{a}_j \pm t_\beta(n-k) \sqrt{\frac{(Y - XA)'(Y - XA)g_{j,j}}{n-k}}$, де $t_\beta(n-k)$ двохстороння $\beta * 100\%$ квантиль закону Стюдента з $n-k$ ступенями вільності; $g_{j,j}$ елемент кореляційної матриці МНК $G = (X'X)^{-1}$.

Варто особливо звернути увагу на розрахунок матриці B , елементи котрої є скалярним добутком сигналу та відповідних базисних функцій: $b_j = \sum_{k=0}^n B_0(t_k - jh)y_k$ (де $B_0(t)$ "еталонна" базисна функція з нульовим зміщенням). Це базовий елемент практичної реалізації МНК. Локальність базисних сплайн-функцій обумовлює специфічний блочно-діагональний вигляд матриці планування, наслідком якого є обчислювальна ефективність.

Розглянемо процедуру отримання екстрапольованих значень сплайнової моделі: $S = X\hat{A} = X(X'X)^{-1} X'Y = LY$. Матриця $L = X(X'X)^{-1} X'$ є матрицею оператора ортогонального проектування на підпростір η , породжений сплайновими базисами. З точки зору цифрової обробки даних рядки матриці L є імпульсними характеристиками нерекурсивних цифрових фільтрів нижніх частот. Тобто МНК оцінку значення сплайн-моделі можна отримати, як результат лінійної фільтрації нерекурсивним цифровим фільтром з імпульсною характеристикою, що є рядком матриці L . Для алгебраїчних поліноміальних моделей сигналів такі фільтри відомі, як фільтри Савицького-Голея. Фільтри, що реалізують МНК зі сплайновими моделями називатимемо LSS (Least Squares Spline) фільтрами. Залишки $e = Y - S$ отримаємо аналогічно попередньому з допомогою матриці $M = I - L$ - оператора ортогонального проектування на η^\perp - ортогональне доповнення до підпростору η в R^n . Рядки матриці M також можна розглядати, як коефіцієнти нерекурсивного фільтра верхніх частот, ортогонального до попереднього. На подібних властивостях перетворень: $S = LY$, $e = MY$, $Y = e + S$, ґрунтуються wavelet розклади сигналів. Проте у wavelet методах мова йде про інтерполяційні схеми з різноманітними локальними базисами, а в даній роботі про оптимальні по МНК оцінки сигналів, або інакше про узагальнений Фур'є розклад у сплайнових базисах.

В роботі запропоновано метод розрахунку МНК для сплайнів з необмеженим числом фрагментів і фрагментами рівної ширини та з рівномірним розміщенням відліків кратно до вузлів сплайна. За таких умов матриця C визначатиметься чотирма ненульовими елементами. Вважаючи, що інверсна матриця має обмежене число

ненульових діагоналей можемо записати добуток матриць необмеженої розмірності, що дорівнюють одиничній матриці необмеженої розмірності:

$$\left(\begin{array}{cccccccc|cccccccc} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & c_0 & c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & d_0 & d_1 & \dots & d_m & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & c_1 & c_0 & c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 & \dots & \dots & d_1 & d_0 & d_1 & \dots & d_m & 0 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & c_2 & c_1 & c_0 & c_1 & c_2 & c_3 & 0 & \dots & \dots & \dots & d_1 & d_0 & d_1 & \dots & d_m & 0 & \dots & \dots \\ \dots & c_3 & c_2 & c_1 & c_0 & c_1 & c_2 & c_3 & \dots & \dots & d_m & \dots & d_1 & d_0 & d_1 & \dots & d_m & \dots & \dots \\ \dots & 0 & c_3 & c_2 & c_1 & c_0 & c_1 & c_2 & \dots & \dots & 0 & d_m & \dots & d_1 & d_0 & d_1 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & 0 & 0 & c_3 & c_2 & c_1 & c_0 & c_1 & \dots & \dots & 0 & 0 & d_m & \dots & d_1 & d_0 & d_1 & \dots & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & c_3 & c_2 & c_1 & c_0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & d_m & \dots & d_1 & d_0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array} \right) = \vec{E}$$

Звідси слідує система з m рівнянь, з допомогою котрої можна наближено знайти невідомі значення $d_0, d_1, \dots, d_{m-1}, d_m$:

$$\begin{array}{cccccccc|cccc} c_0 & 2c_1 & 2c_2 & 2c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_0 \\ c_1 & c_0 + c_2 & c_1 + c_3 & c_2 & c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_1 \\ c_2 & c_1 + c_3 & c_0 & c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 & 0 & d_2 \\ c_3 & c_2 & c_1 & c_0 & c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 & d_3 \\ 0 & c_3 & c_2 & c_1 & c_0 & c_1 & c_2 & c_3 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & c_3 & c_2 & c_1 & c_0 & c_1 & c_2 & 0 & d_5 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_0 & d_m \end{array} = \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{array}.$$

Похибка наближеного методу обернення необмеженої матриці C становитиме $\max |a_j - a_j| = 2M [c_3(d_{m-2} + d_{m-1} + d_m) + c_2(d_{m-1} + d_m) + c_1 d_m]$, де M -максимально можливе значення елементів матриці B . Описаний метод наближеного обернення використано в попередньому розділі для отримання узагальненого перетворення Фур'є в локальних сплайнових базисах, та для приведення базису до лагранжевої форми. З його допомогою отримано також аналітичні оцінки ефективності МНК фільтрів для кубічного ермітового сплайна.

Розглянемо дискретний варіант узагальненого перетворення Фур'є в локальних сплайнових базисах. Сплайновий базис складається з відліків базисної сплайн-функції F_i , що містить чотири фрагменти, зміщеної пропорційно N на регулярній сітці $H_{ij} = F_i$. Наслідком цього сума всіх базисних функцій у певній точці сітки відліків є сумою з чотирьох фрагментів базисних сплайнів:

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} H_{ij} = F1_i + F2_i + F3_i + F4_i$$

Індекс “ j ” є номером базисної функції, а індекс “ i ” є номером точки на відрізку сплайна, якому ця точка належить. Для сплайнових базисів, що розглядаються має місце $\sum_i H_{im} H_{in} = 0$, для $|m-n| > 3$. Що є наслідком локальних властивостей. Хоча

ключовою для реалізації алгоритмів реального часу, для розрахунку узагальнених коефіцієнтів Фур'є по сплайнових базисах. Практично для більшості сплайнових базисів із точністю до 1% d_m можна вважати рівним нулю для $m > 3$.

В роботі обгрунтовано вибір базисного сплайна з чотирма фрагментами. Традиційно за аналогією з глобальними базисами досліджують зростання порядку базисів. Якщо способом побудови базисів є згортка $B_{i,k}(x) = \underbrace{B_{i,1}(x) * B_{i,1}(x) * \dots * B_{i,1}(x)}_k$, то

для довільних базисів низьких порядків процес сходиться до кривої Гауса. Це призводить до втрати базисом локальності і значного росту розрахунків. Тому для сплайнів досягають зменшення нев'язки наближення скорочуючи ширину фрагментів сплайна, а не збільшуючи порядок сплайна. Однак таке скорочення погіршує статистичні оцінки. Альтернативою є запропонований метод синтезу базисних сплайнів згорткою. Для забезпечення гладкості при мінімальному числі фрагментів і застосовується базисний сплайн з чотирма фрагментами.

В четвертому розділі досліджено основні шляхи побудови швидких алгоритмів сплайн-обробки даних, розроблено алгоритми та структурні схеми пристроїв для їх реалізації.

Розглянуто реалізацію сплайн-інтерполяційних фільтрів у вигляді поліфазних цифрових фільтрів з нерекурсивними цифровими фільтрами четвертого порядку у гілках. Загальна імпульсна характеристика такого фільтра є базисним сплайном. В таких конструкціях доцільно застосовувати ермітові базиси в лагранжівій формі, котрі не вимагають попереднього розрахунку вхідної послідовності. В роботі показано структурні схеми інших можливих реалізацій сплайн-інтерполяторів, з різними схемними затратами.

В розділі розглянуто конструкції фільтрів, що реалізують оцінку значень за МНК для сплайнових моделей – LSS фільтри. Варіанти їх реалізації відрізняються схемними затратами.

Структурною простотою відрізняється реалізація у вигляді нерекурсивного цифрового фільтра (по типу Савицького-Голея). Імпульсна характеристика фільтра вибирається з одного з рядків (стовпців) проекційної матриці МНК, про що зазначалося вище. Рекомендується вибирати рядок, що відповідає вузловій точці. У цьому випадку імпульсна характеристика є симетричною, а амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) найбільш близька до АЧХ базисного сплайна. Це забезпечує лінійність фазової характеристики і простоту побудови. Така конструкція є найбільш простою, забезпечує мінімальну затримку і може застосовуватись для довільних схем розміщення вузлів та даних. Проте вона вимагає максимальних схемних затрат.

Інша конструкція впливає з розгляду МНК, як децимуючого фільтра. Їх також називають фільтрами з багаточастотною дискретизацією. Дані та вузли сплайна мають розміщуватись на регулярних сітках, при чому дані на фрагментах сплайна повинні розміщуватись однаково, по N точок на фрагмент. Основні обчислювальні витрати приходяться на розрахунок елементів матриці \mathbf{V} . Обсяг розрахунків на кожний елемент не більше $4N$ операцій множення і $4N-1$ додавання. В результаті

перемноження рядка коваріаційної матриці і матриці **B** отримаємо оцінюваний параметр. Суть стиснення в тому, що на виході алгоритму отримуємо оцінки сплайна у вузлах. Таким чином стиснення рівняється числу даних на фрагменті сплайна. Значення у вхідних точках легко отримати шляхом інтерполяції. Для ермітового кубічного сплайна отримано прості розрахункові вирази. Складові базисної функції розраховуються згідно виразів:

$$h1_i = -\frac{1}{2N^3}(i^3 - (2N + 3)i^2 + (N^2 + 4N + 3)i - N^2 - 2N - 1),$$

$$h2_i = \frac{1}{2N^3}(3i^3 - (5N + 9)i^2 + (10N + 9)i - 2N^2 - 5N - 3),$$

$$h4_i = \frac{1}{2N^3}(i^3 - (N + 3)i^2 + (2N + 3)i - N - 1),$$

$$h3_i = 1 - h1_i - h2_i - h4_i, \quad i = \overline{1, N}.$$

$$\text{Ненульові елементи матриці } C = X'X : \quad c_0 = \frac{171N^6 + 14N^2 + 25}{210N^5}, \quad c_1 = \frac{71N^6 - 21N^2 - 50}{560N^5},$$

$$c_2 = -\frac{N^6 - 1}{28N^5}, \quad c_3 = \frac{3N^6 + 7N^2 - 10}{1680N^5}.$$

Елементи інверсної матриці отримані наближеним методом дорівнюють:

$$g_0 = 3360 * N^5 (192850731 * N^{18} + 55913802 * N^{14} + 115162185 * N^{12} + 3878203 * N^{10} + 14380030 * N^8 + 12237164 * N^6 + 243285 * N^4 + 338100 * N^2 + 132500) / Q;$$

$$g_1 = -(5880 * (19420479 * N^{18} - 2218407 * N^{14} - 8370390 * N^{12} - 936523 * N^{10} - 3897820 * N^8 - 3646849 * N^6 - 118790 * N^4 - 166700 * N^2 - 65000)) / Q;$$

$$g_2 = (94080 * (516906 * N^{18} - 34383 * N^{14} - 480300 * N^{12} + 7448 * N^{10} - 100 * N^8 - 23671 * N^6 + 4900 * N^4 + 6700 * N^2 + 2500)) / Q;$$

$$g_3 = -(6720 * (2083527 * N^{18} - 109221 * N^{14} - 3790200 * N^{12} + 158711 * N^{10} + 730100 * N^8 + 1005733 * N^6 - 29400 * N^4 - 36750 * N^2 - 12500)) / Q;$$

$$Q = 495160052859 * N^{24} + 208167799644 * N^{20} + 432054656280 * N^{18} + 23505750114 * N^{16} + 87252201960 * N^{14} + 73245219604 * N^{12} + 2902503240 * N^{10} + 3923029579 * N^8 + 1433754520 * N^6 + 7438200 * N^4 + 4004000 * N^2 + 550000.$$

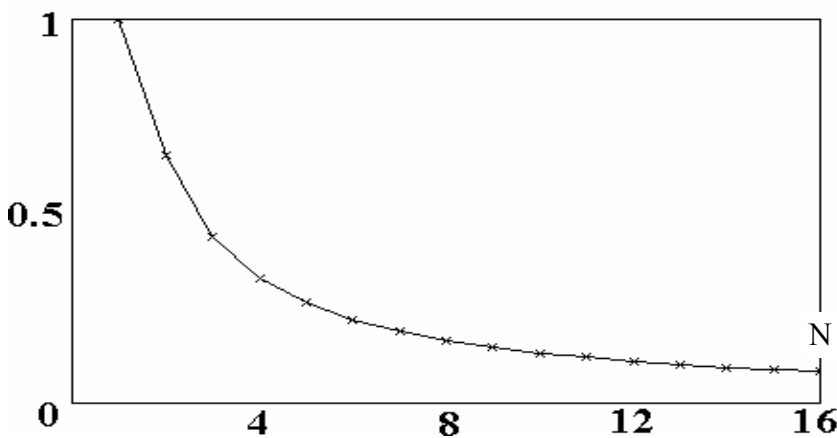


Рис.5. Ефективність кубічного ермітового МНК сплайн-фільтра

Елемент, g_0 характеризує ефективність методу (зниження вхідної дисперсії) при заданій кількості спостережень на одному фрагменті сплайна. Залежність показана на рис.5. Результат практично співпадає з чисельними розрахунками. При заданій ширині ненульових елементів кореляційної матриці (7 діагоналей) для оцінки у вузлі використовуються вхідні дані з 6 фрагментів сплайна. Отже загальна кількість даних, що враховуються при

розрахунку оцінки становитиме $6 \cdot N$. При оцінюванні загальної ефективності потрібно брати до уваги не лише зменшення дисперсії стохастичної складової у вхідних даних, але й динамічну похибку.

Верхня межа нев'язки інтерполяції кубічним ермітовим сплайном становить $\frac{\max(f^{(4)}(t))}{384} h^4$, де f - детермінована основа вхідного процесу, h - ширина фрагмента.

Отже в порівнянні з оцінюванням із використанням одного фрагмента - кубічного полінома отримаємо приблизно в 16 разів меншу динамічну похибку, для рівної кількості спостережень. Загальна схема розрахунків МНК у фільтрі зі стисненням показана на рис.6. Тут блоки з позначками $h1, \dots, h4$ виконують операції:

$\sum_{k=1}^N h1_k y_{i+k-1}, \dots, \sum_{k=1}^N h4_k y_{i+k-1}$, скалярного добутку базису і сигналу. На виході першого суматора отримуємо значення елементів матриці B , на виході другого оцінку сплайна у вузлі. Оцінки формуються з інтервалом в N ($n=N$ на схемі) вхідних відліки. Вказана схема відрізняється простотою та мінімальними схемними та обчислювальними затратами. Для базисів відмінних від кубічного ермітового, значення коефіцієнтів розраховують за методикою описаною в третьому розділі для необмежених сплайнів.

Третім підходом до побудови швидких алгоритмів є застосування рекурентних формул. В роботі розглянуто різні варіанти алгоритмічної реалізації таких схем.

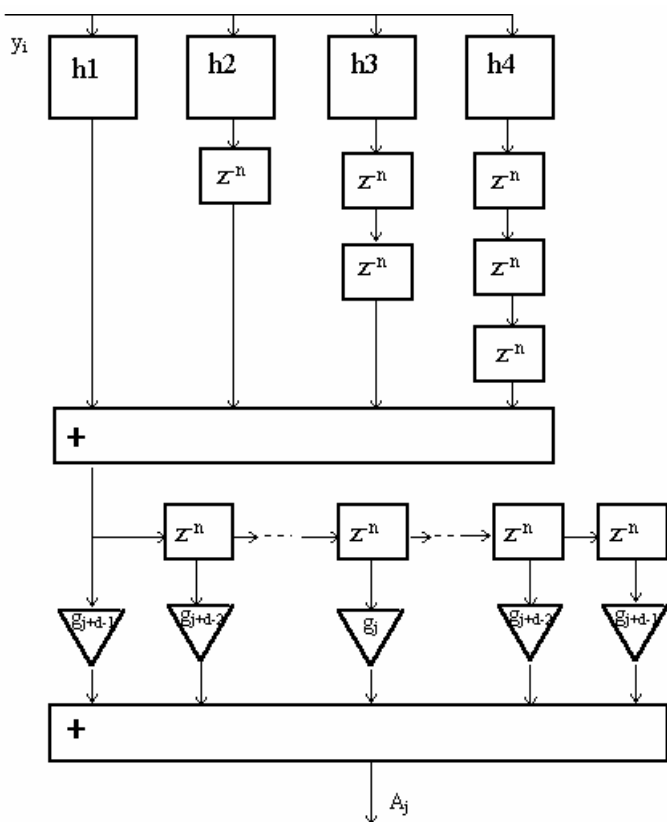


Рис.6. МНК фільтр зі стисненням даних.

Особливості розрахунків і ефективність алгоритмів ґрунтуються на локальних властивостях базисів. Результатом цього є значне спрощення розрахункових виразів. Автором, створено алгоритм рекурентного МНК (РМНК) для загального випадку з поступовим збільшенням числа оцінюваних параметрів. Також розглянуто найбільш ефективні варіанти РМНК. Зокрема класичний РМНК значно спрощено і для рівномірних сіток даних та вузлів побудовано структурну схему пристрою. Розроблено алгоритм для РМНК для сплайнової моделі з останнім фрагментом екстраполяції, що не містить даних. Алгоритм РМНК з початком наступного чергового

фрагмента в останній точці даних і наступним заповненням чергового фрагмента.

В п'ятому розділі розглянуто алгоритми та схеми адаптивних сплайн-пристроїв обробки сигналів. Запропоновано метод частотно-часового розкладу сигналів у сплайнових базисах за методом найменших квадратів (LSS розклад).

Позначимо базисний сплайн певного виду, що складається з чотирьох фрагментів як $B_{\tau,\nu}(t)$, де τ - зміщення базису відносно початкового (материнського) базисного сплайна, ν - масштабний коефіцієнт базису відносно базисного. Отже можна записати:

$$B_{\tau,\nu}(t) = B_0\left(\frac{t-\tau}{\nu}\right), \nu \in R^+, \tau = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Позначимо як LS оператор отримання оцінок МНК функції $f(t)$ в системі вектора базисних функцій \mathbf{B}_ν . Вектор оцінок (коефіцієнтів розкладу) в масштабі ν запишемо наступним чином: $\mathbf{A}_\nu = \text{LS}[f(t), \mathbf{B}_\nu]$. Отримання сплайна $S_\nu(t)$ позначимо оператором IN, що по своїй суті є оператором інтерполяції. Нагадаємо, що коефіцієнти розкладу \mathbf{A}_ν для ермітових сплайнів є значеннями сплайна у вузлових точках, а для інших пропорційні цим точкам. Запишемо $S_\nu = \text{IN}[\mathbf{A}_\nu, \mathbf{B}_\nu]$, звідки отримаємо залишки наближення (нев'язку МНК апроксимації) $E_\nu = f(t) - \text{IN}[\mathbf{A}_\nu, \mathbf{B}_\nu]$, або інакше $E_\nu = f(t) - \text{IN}[\text{LS}[f(t), \mathbf{B}_\nu], \mathbf{B}_\nu]$. Позначимо окремим оператором RS процес

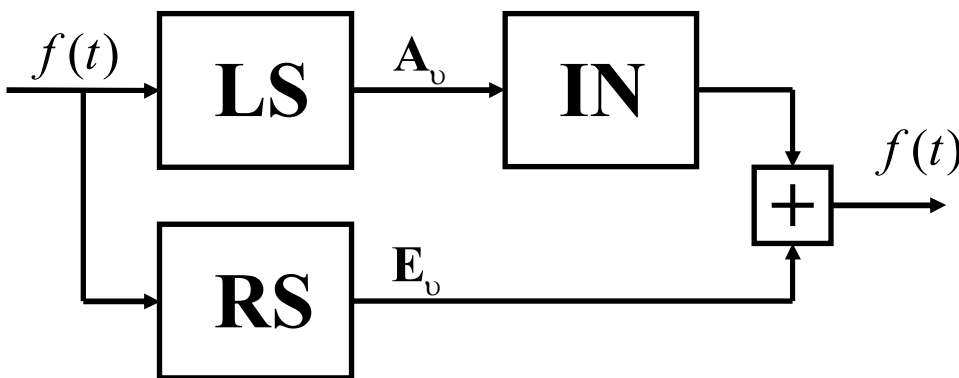


Рис.7. Загальна схема LSS розкладу і реконструкції (один етап)

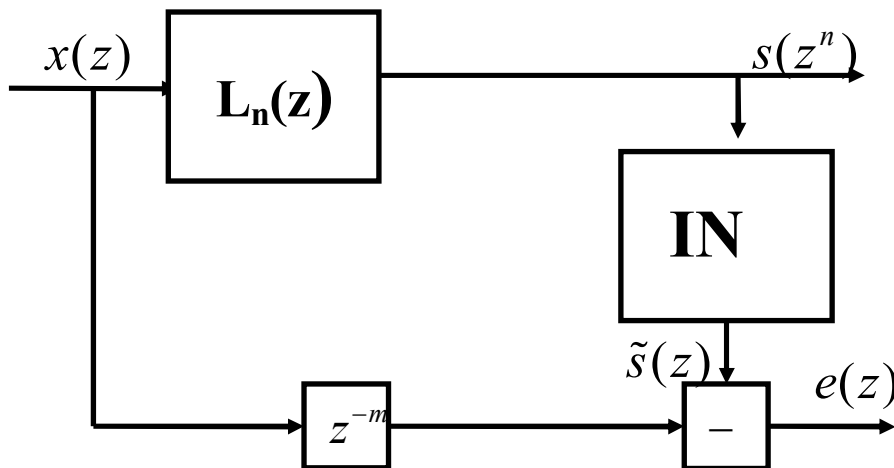


Рис.8. Схема етапу розкладу з децимуючим LSS фільтром

отримання залишків від МНК наближення:

$$E_\nu = \text{RS}[f(t), \mathbf{B}_\nu]$$

Очевидно, що $E_\nu + S_\nu = f(t)$. Тобто має місце реконструкція розкладу. Маємо два оператори розкладу сигналу $f(t)$ на дві складові.

Низькочастотну складову (тренд) \mathbf{A}_ν , що має розмірність від двох до половини числа вхідних відліків.

Високочастотну складову E_ν , розмірність якої завжди рівняється числу вхідних даних. Обидва оператори є лінійними і якщо

знехтувати похибками розрахунків реконструкція є точною. Загальна схема етапу розкладу і реконструкції показана на рис.7. На рис.8 показано реалізацію розкладу із застосуванням децимуючого LSS фільтра з рис.2. Розклад названий LSS (Least Squares Spline) є поетапним, подібно до вейвлет розкладу. Але на відміну від нього починається з виділення області нижніх частот і подальшому розкладу підлягає високочастотна складова. Така схема дає можливість припинити розклад при виділенні інформативної низькочастотної складової.

МНК забезпечує оптимальність і статистичну стійкість коефіцієнтів (і картини) розкладу. На рис.9. показано вплив адитивного білого шуму на картину wavelet і LSS розкладів. Картина розкладу будувалася за прийнятою для wavelet схемою з нормуванням по рядках. В роботі показано аналітичний розклад ступінчатої функції в базисі кубічних В-сплайнів та кубічних ермітових сплайнів. Розроблено структурні схеми пристроїв LSS розкладу. Десятирозрядний пристрій реалізовано в MatLab Simulink в середовищі Altera DSP Builder.

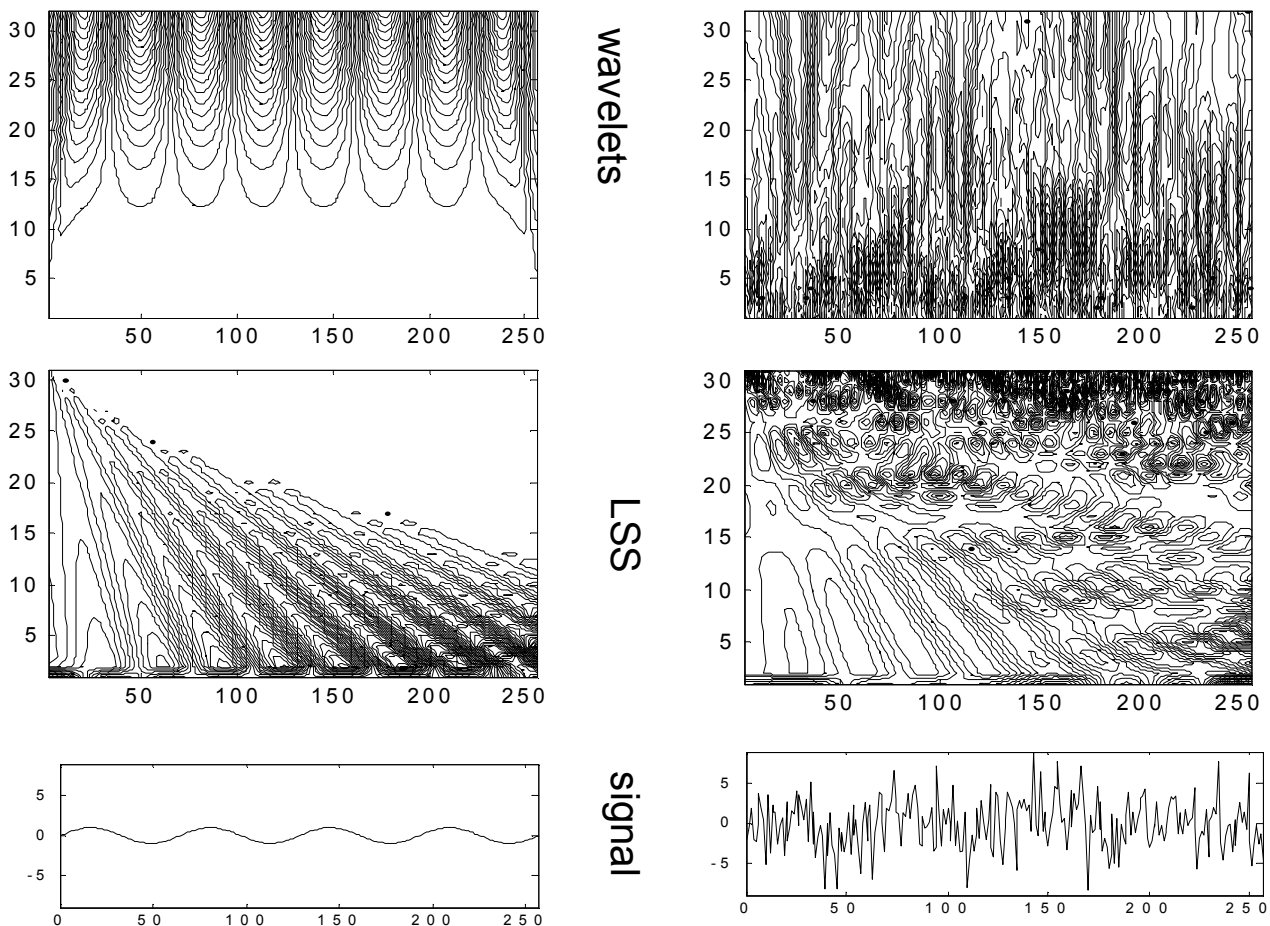


Рис.9. Порівняння wavelet і LSS розкладів синусоїди без і з адитивним шумом

Базові елементи розкладу: сплайн-апроксиматор та сплайн-інтерполятор працюють в цілочисельній арифметиці і потребують для реалізації відповідно 30-40 та 15-20 тисяч ветилів програмованої логічної матриці.

LSS розклад дозволяє отримувати оцінки достовірності коефіцієнтів (будувати довірчі інтервали) та перевіряти статистичні гіпотези. В роботі запропоновано здійснювати перевірку залишків на етапах розкладу на випадковість за допомогою непараметричних критеріїв (наприклад інверсій). Якщо гіпотезу про випадковість залишків не можна відкинути, то подальший розклад залишків припиняється. Оцінки достовірності отримуємо з евівалентної k-етапному розкладу МНК процедури з

моделлю виду:
$$S(t) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_k} a_{j,i} B_{\tau_j, \nu_i}(t).$$

LSS розклад зручно застосовувати при мінімумі апріорної інформації про сигнал, але його недоліком є значна затримка результату та велика розмірність коефіцієнтів розкладу. Якщо відомі (або їх можна визначити) частотні властивості сигналу то зручніше користуватися одноетапною процедурою з адаптацією базисного сплайна до частотних властивостей сигналу та шуму. В роботі розроблено ряд схем таких фільтрів із зворотнім зв'язком та без нього.

В схемах зі зворотнім зв'язком (рис.10) перевіряється випадковість залишків за допомогою критерія інверсій. Схема включає два канали.

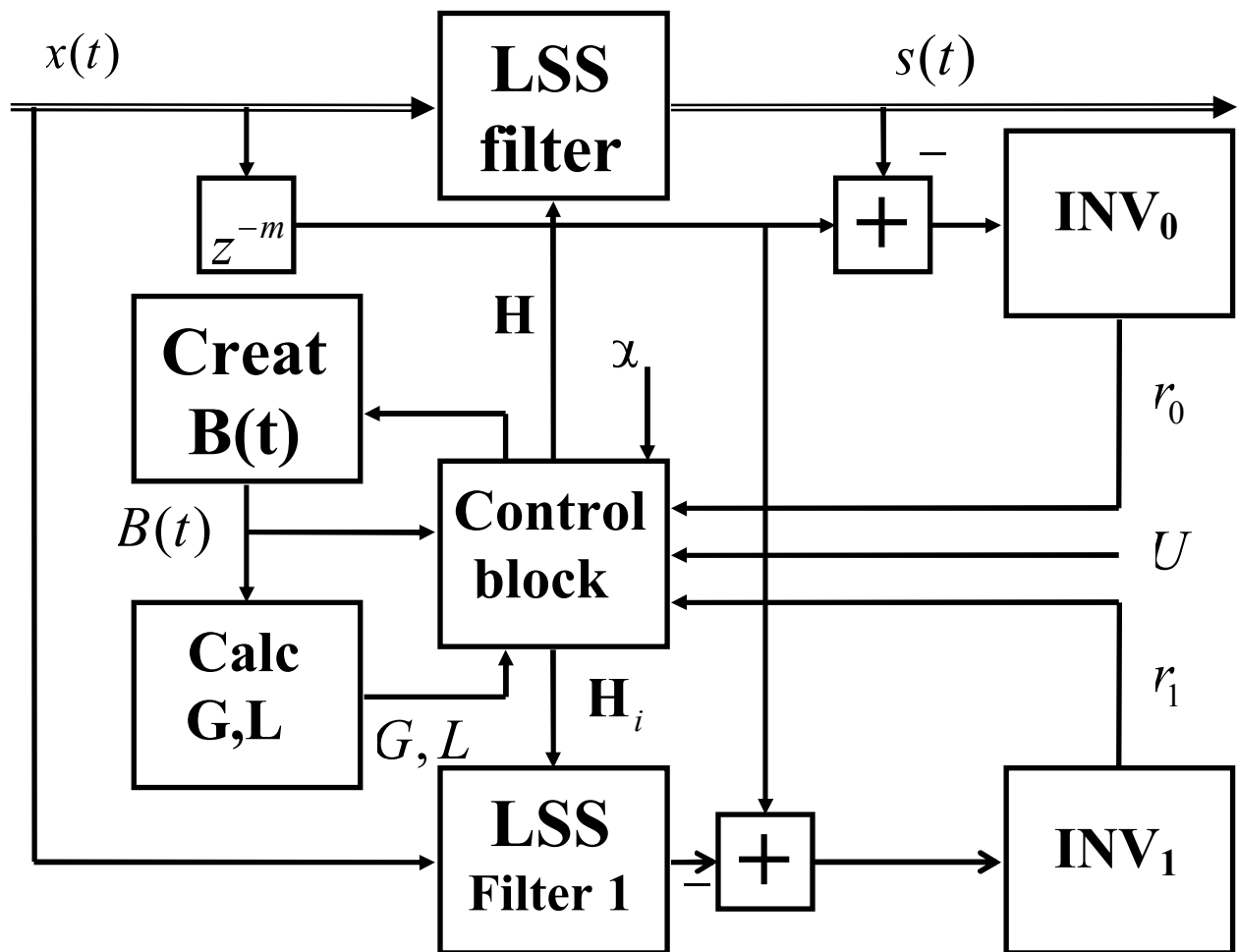


Рис.10. Схема адаптивної фільтрації зі зворотнім зв'язком.

Один канал є робочим (LSS filter), а інший вимірювальним (LSS filter 1). Вихідний сигнал фільтра вимірювального каналу вираховується із затриманого

вхідного сигналу. Сформований сигнал залишків надходить до блока перевірки залишків на випадковість (INV1). Блок розраховує число інверсій I_1 і передає до блока управління. Блок управління періодично робить спроби знизити верхню частоту базису, аж до появи детермінованої складової в залишках (завантажуючи параметри \mathbf{H}_i у LSS фільтр вимірювального каналу). Успішність спроб дає підстави внести зміни в основний канал (змінивши параметри \mathbf{H}). Розширення спектру сигналу виявляє блок INV0, який передає число інверсій I_0 в блок управління, що

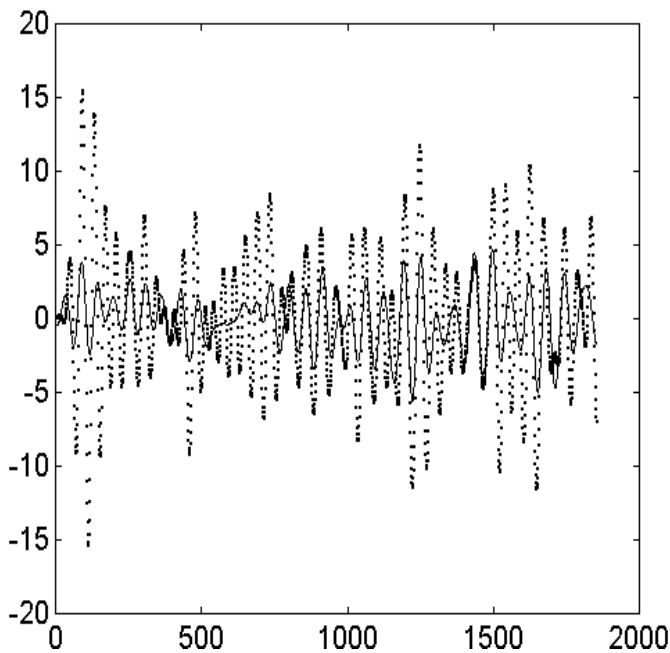


Рис.11. Фільтрація кубічним сплайном.

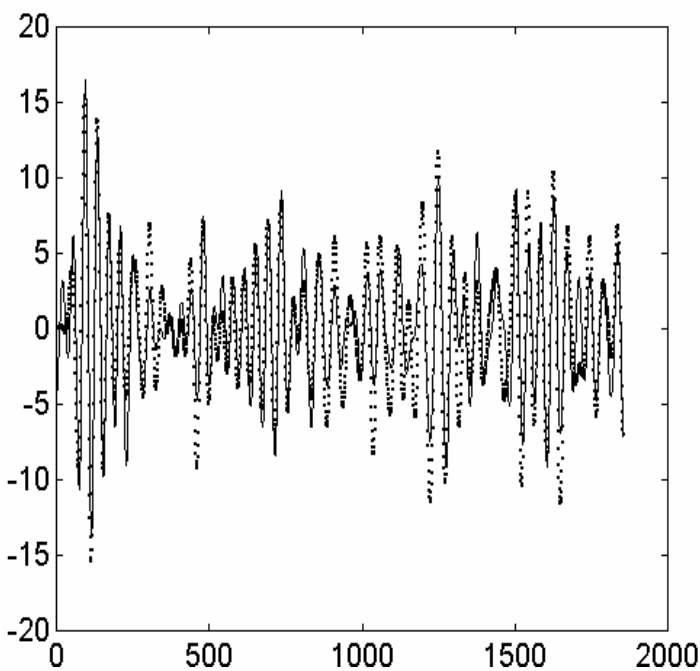


Рис.12. Фільтрація синусоподібним сплайном.

призводить до завантаження параметрів \mathbf{H} для базису із більшою шириною спектру.

Створено також програмне забезпечення для демонстрації адаптивних можливостей сплайнів та програмної реалізації адаптивних алгоритмів.

В шостому розділі описано сплайн-технологію ідентифікації та фільтрації сигналів, її складові та реалізацію. Основна частина алгоритмів реалізована у вигляді програм пакету MatLab. Ідея технології полягає у врахуванні при синтезі сплайнових базисів частотних характеристик сигналу (як мінімум верхньої частоти) та реалізації МНК алгоритмів та алгоритмів інтерполяції, що відповідають вимогам конкретної задачі. В розділі продемонстровано застосування розробленої технології для різних сигналів, як реальних так і синтезованих. Так показано і проаналізовано різні алгоритми фільтрації з відповідністю спектру базису сигналу та без такої відповідності. На рис.11,12 показано результат фільтрації сигналу близького до сигналів у георадарах.

Кубічний та експоненційний сплайнові базиси не здатні відтворити характер сигналу

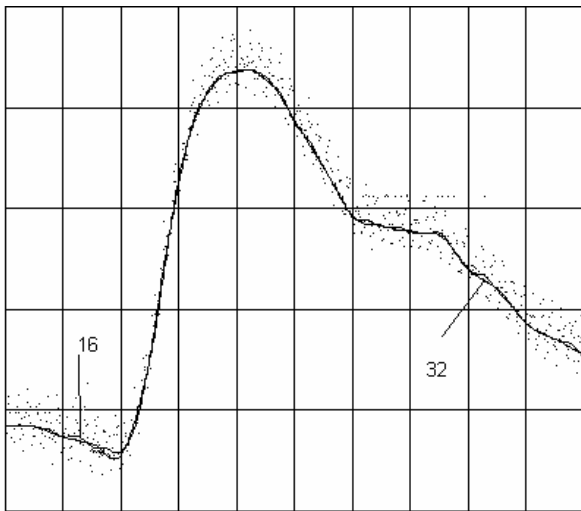


Рис.13. LSS фільтрація зі стисненням реограми

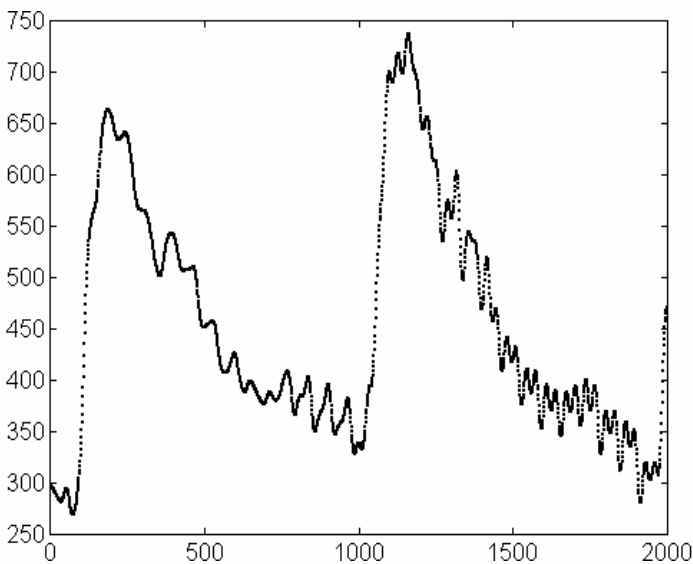


Рис.14. Wavelet (QS) фільтрація реограми

(рис.11). Узгоджений зі спектром сигналу сплайновий базис, утворений з фрагментів синусоїди, успішно справляється з цією задачею (рис.12). В обох випадках фільтрація виконана зі стисненням в 32 рази і наступною інтерполяцією до вхідної частоти.

Розглянуто застосування сплайнів в системі обробки даних електронних вимірювань у функціональній діагностиці (реографічні вимірювання в медицині). В процесі розробки виявилось три основні складності.

- Необхідність високоякісного згладжування даних з незначними спотвореннями корисного сигналу;
- Потреба у достатньо зручній та адекватній моделі корисного сигналу для подальшої обробки (диференціювання та аналізу);
- Необхідність стиснення даних для подальшого зберігання.

Спроби вирішити ці задачі в рамках класичних підходів виявились безуспішними. Використання рекурсивних цифрових фільтрів виключалось через спотворення форми корисного сигналу. Нерекурсивні фільтри для задовільного згладжування потребували високих порядків і відповідно значних обчислень. Вибір прийнятної моделі для апрокси-

мації реограми окрім складної форми ускладнювався значними обсягами даних та мінливістю форми. Безпосереднє диференціювання даних не вдавалося через наявність шумів. Використання аналогового диференціатора з комплекту поліграфа значно знижувало потенційну точність вимірювань. Перераховані задачі було вирішено застосуванням сплайн-функцій. Для фільтрації, апроксимації та стиснення даних був використаний LSS фільтр описаний в розділі 4. На рис.13 показано вхідні дані та результати фільтрації зі стисненням в 16 та 32 рази з наступною інтерполяцією. Операційні витрати склали 4 множення на відлік і 6 мнужень на кожні 16 (32) відліки при оцінюванні і 4 множення на відлік при інтерполяції. В системі реалізовано стиснення в 16 разів. Алгоритм реалізовано програмно на "С" в цілочисельній арифметиці. Програмний комплекс успішно експлуатується на комп'ютері з 286 процесором і тактовою частотою 16 МГц. Для порівняння на

рис.14 показано результат аналогічної за характером wavelet фільтрації в сплайновому базисі. Виконано чотирьохетапний розклад з інтерполяцією низькочастотної складової з відкиданням високочастотних складових розкладу.

Показано застосування LSS розкладу для аналізу легеневих звуків. Вислуховування звуків дихання залишається золотим стандартом практичної медицини. Однак дистанційний контроль цих сигналів, не зважаючи на простоту реєстрації, складний, оскільки потребує передачі значної інформації. Автоматичне розпізнавання і діагностика легеневих звуків розвинені слабо. Сучасна концепція формування легеневих сигналів розглядає легені, як ФНЧ, що формує сигнал із шуму. Дослідження цих процесів здійснюється й в Україні (академік В.Т.Грінченко, Інститут гідромеханіки НАНУ). Міжнародна асоціація легеневих звуків (ILSA) склала класифікацію міжнародного еталона легеневих звуків (<http://www.ilsa.cc>). Для класифікації пробують застосовувати wavelet методи, але як показано вище, за наявності шумів картина розкладу є нестійкою. LSS розклад характерних легеневих звуків, з демонстраційної версії R.A.L.E.® View software показує, що отримані картини є стійкими і мають виразний вигляд, придатний для візуальної інтерпретації та друкування (документування). В роботі показано типовий вигляд LSS розкладу для нормального дихання, вологих хрипів (crackle) і сухих свистячих хрипів (wheeze). Наявність статистичної оцінки достовірності оцінок розкладу потенційно дозволяє вирішувати задачі автоматичного розпізнавання.

В роботі також показано застосування адаптивних алгоритмів для фільтрації растрових зображень. Адаптація здійснюється шляхом зміни частотних властивостей базисних сплайнів. Зокрема реалізовано зміну частоти зрізу нерекурсивного цифрового фільтра нижніх частот з імпульсної характеристики якого утворюється базисний сплайн. Це дозволяє змінювати верхньою частотою базисного сплайна, адаптуючись до корисного сигналу і шумів. Розроблене програмне забезпечення дозволяє фільтрувати зображення із шумами, змінюючи верхню частоту базисних сплайнів, число відліків на фрагменті сплайна та вид вікна при синтезі ФНЧ, що застосовується для синтезу сплайна.

Алгоритми стиснення даних, розроблені в 4-му розділі знайшли застосування в задачі стиснення растрових зображень. Алгоритм ґрунтується на LSS розкладі і є несиметричним. Процедура стиснення потребує більше затрат ніж відновлення. За обсягами розрахунків алгоритм може конкурувати з wavelet алгоритмами. Переваги проявляються при стисненні зображень з адитивним білим шумом. Робота алгоритму проілюстрована прикладами стиснення відомого тестового зображення "Lena".

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

Сутність, наукова новизна, прикладне спрямування і практична значимість основних результатів виконаних досліджень полягає в наступному.

Сформульована, досліджена і розв'язана проблема суть якої полягає у вдосконаленні обробки цифрових сигналів складної форми в радіотехнічних системах шляхом застосування сплайн-моделей.

Вирішення сформульованої проблеми представлено розв'язаними в роботі науковими та практичними підпроблемами в наступних аспектах:

1. Розроблено та теоретично обґрунтовано методи синтезу сплайнів із заданими частотними властивостями, придатних для застосування в алгоритмах реального часу.

Досліджено наукові основи використання сплайнових моделей сигналів складної форми в радіотехнічних і телевізійних системах. Застосування сплайнових моделей найбільш доцільне в рамках сигнальної концепції вивчення складних систем. Складні системи є джерелом сигналів складної форми, для моделювання яких і застосовуються сплайни. Сигнали в радіотехнічних системах мають характерні особливості, які необхідно враховувати при розробці систем обробки. Для цього теоретично обґрунтовано методи побудови сплайнових базисів з відрізків неперервних на фрагменті функцій на рівномірній сітці вузлів. Сформульовані і доведені умови неперервності першої та другої похідних у вузлових точках отриманих базисних сплайнів. Отримано розрахункові співвідношення необхідні для побудови локальних сплайнових базисів, що складаються з чотирьох фрагментів (включаючи й дискретний варіант побудови). Основи вказаного підходу були відомі лише для окремих В-сплайнів. Розроблений в роботі підхід є узагальненням, що розширює можливі різновиди базисних сплайнів і дає практичний підхід до їх розрахунків. Розроблено математичний апарат для приведення базисних сплайнів до ермітової та лагранжевої форм. Ці форми дозволяють уникнути розв'язання лінійних рівнянь при інтерполяції. Отримані результати дозволили звести задачу синтезу сплайнів до відомих задач синтезу нерекурсивних цифрових фільтрів із заданими амплітудно-частотними характеристиками.

2. Створення та теоретичне обґрунтування основних принципів побудови пристроїв для сплайн-аналізу та синтезу радіотехнічних сигналів. Розробка методологічних основ побудови алгоритмів реального часу для сплайн-обробки та оптимальної фільтрації.

Із знайдених методів синтезу сплайнів слідує, що в інтерполяційних фільтрах базисні сплайни на рівномірних сітках ідентичні імпульсним характеристикам нерекурсивних цифрових фільтрів. В результаті похибка наближення оцінюється як в часовій так і в частотній областях.

В роботі МНК розглянуто з погляду цифрової обробки сигналів. Розроблено універсальний підхід до побудови нерекурсивних цифрових фільтрів, що реалізують згладжування за МНК зі сплайновими моделями з використанням проекційної матриці. Розроблено рекомендації що до вибору імпульсних характеристик таких

фільтрів. Даний підхід є узагальненням відомих фільтрів Савицького-Голлея для сплайнових моделей.

Отримано процедури для розрахунків МНК оцінок параметрів сплайнів з необмеженим числом фрагментів на рівномірних сітках. Зокрема розроблено спосіб наближеного обернення семидіагональної симетричної матриці необмеженої розмірності специфічного для сплайнових моделей вигляду. Отримано розрахункові вирази, оцінку похибки та проаналізовано вплив неточності обернення на МНК оцінки. З допомогою зазначеного методу отримано вирази для приведення сплайнових базисів до лагранжівної форми та розрахунку корегуючого нерекурсивного префільтра для інтерполяції В-сплайнами. Відомі способи потребують ортогоналізації базисних функцій. Розроблено структуру МНК сплайн-фільтрів зі стисненням даних. Для кубічних ермітових сплайнів отримані наближені аналітичні оцінки ефективності МНК фільтрів, що добре узгоджуються з чисельними розрахунками.

Розроблено рекурентні алгоритми отримання МНК оцінок, що враховують специфічну структуру сплайнових базисів і ефективніші в обчисленнях за відомі.

В цілому отримані конструкції фільтрів можна розглядати, як реалізацію оптимальних фільтрів Вінера в класі сплайн-функцій.

3. Знайдено метод частотно-часового розкладу сигналів в сплайнових базисах за методом найменших квадратів (LSS розкладу), що має оптимальні та адаптивні властивості. Розроблено структуру пристроїв та самі пристрої LSS розкладу та адаптивної обробки сигналів.

Давно відомі схеми частотно-часового розкладу з допомогою банків фільтрів. Особливу популярність частотно-часовий розклад здобув у зв'язку з розвитком вейвлет-методів. Поетапні пірамідальні схеми вейвлет розкладу природнім чином є адаптивними структурами, що здатні виконувати обробку широких класів сигналів (звукові, відеосигнали). Однак вейвлет методи ґрунтуються на інтерполяції і за наявності білого шуму їх характеристики значно погіршуються. За цих умов якраз МНК гарантує статистичну стійкість та оптимальність оцінок. Авторіві вдалося знайти метод частотно-часового розкладу за МНК в сплайнових базисах, розробити структуру пристроїв розкладу та створити самі пристрої. На відміну від вейвлет картин розкладу картини LSS розкладу є стійкими до білого шуму, дозволяють отримувати оцінку достовірності та перевіряти статистичні гіпотези. LSS розклад вдало поєднує простоту реалізації та статистичну обробку, що дозволяє реалізувати цілий ряд схем адаптивної обробки сигналів.

4. Створена сплайн-технологія обробки сигналів складної форми в радіотехнічних системах та виконана її апробація шляхом проведення модельних експериментів та впровадження в інженерну практику.

Розроблена технологія дозволяє будувати програмні та апаратні комплекси оптимальної адаптивної обробки радіотехнічних сигналів складної форми. При цьому використовуються всі три можливості адаптації. За рахунок оптимального зважування базисних сплайнів за МНК, за рахунок зміни ширини базисних сплайнів, за рахунок зміни форми та частотних властивостей базисних сплайнів. Якщо перші два підходи є добре відомими, то останній є новим для сплайнів, оскільки існувала

можливість лише вибору певного виду сплайну з множини відомих. Отримані результати дозволяють цілеспрямовано синтезувати базисний сплайн, а знайдені ефективні рішення дозволяють здійснювати цей процес в реальному часі.

Розроблена система фільтрації та стиснення реографічних даних (медична функціональна діагностика). Система є перспективною для застосування в телемедичних комплексах. Виконано порівняння з вейвлет методом обробки реограм. Результат показав якісно гірші результати вейвлет обробки.

Розроблене програмне забезпечення для адаптивної фільтрації растрових відеозображень. Адаптація здійснюється шляхом зміни ширини фрагментів сплайна та змінюючи верхню частоту базисного сплайна, а також вікна в процесі синтезу імпульсної характеристики нерекурсивного цифрового фільтра, що утворює базисний сплайн.

Розроблено алгоритм стиснення зображень в основу котрого покладено поєднання алгоритмів фільтрації та стиснення. Проаналізовано якості алгоритму в порівнянні з wavelet методами та JPEG алгоритмом. Основними перевагами є простота алгоритму, що зводиться до цілочисельних розрахунків, багатократне стиснення за один цикл і оптимальність наближення (за МНК), можливість широкої оптимізації процесу та адаптації до даних. Перевага запропонованих методів перед вейвлетами проявляється за умов наявності некорельованого адитивного шуму.

Сформульовані підпроблеми утворюють в комплексі проблему закінченого в роботі дослідження. А саме: вдосконалення обробки цифрових сигналів складної форми в радіотехнічних системах шляхом застосування сплайн-моделей.

Наукова новизна та оригінальність розв'язку проблеми обґрунтовано у викладеному вище, де показане теоретичне значення отриманих результатів та їхнє місце в порівнянні з отриманими раніше результатами, що відомі з літературних джерел, а також технічними та програмними рішеннями теоретичних розробок, моделей та алгоритмів.

Практична значимість основних результатів полягає в тому, що досягнуто суттєвого покращення результатів синтезу та аналізу цифрових сигналів складної форми в радіотехнічних системах, шляхом застосування сплайн-моделей. Одержані результати дозволяють приблизно вдвічі розширити вікно обробки та отримати стійкі до білого шуму і оптимальні частотно-часові розклади, будувати схеми адаптивної обробки з адаптацією за рахунок зміни амплітуди, масштабу та форми базисних сплайнів. Значимість підтверджена їх успішним застосуванням при вирішенні реальних задач, що зустрічалися в інженерних розробках. Виконані дослідження дозволяють використати отримані методи та алгоритми в задачах обробки і аналізу сигналів, що характеризуються складним характером сигналів за наявності шуму, високими вимогами до ефективності розрахунків, достовірністю статистичних оцінок. Переважна більшість способів та алгоритмів реалізована програмно у середовищах VBA, MathCad, MatLab. Функціонування пристроїв змодельовано в системі Simulink. Це дає можливість їх безпосереднього застосування на практиці. Базові конструкції пристроїв сплайн-обробки доступні для виготовлення

у вигляді універсальних заказних, напівзаказних інтегральних схем та програмованих логічних інтегральних мікросхем.

Проблемні питання та перспективи подальших досліджень, що слідують з виконаних досліджень, на думку автора, полягають в наступному:

1. Створення математичної теорії сплайн-фільтрації, котра встановлює кількісні співвідношення між якістю сплайнових фільтрів і спектрами даних та сплайнових базисів, з урахуванням наявності випадкових складових. Практичне значення має розробка методів, котрі за спектральними оцінками вхідних даних дозволяють б точно синтезувати відповідні базисні сплайни. Таким чином можна реалізувати цілий ряд алгоритмів адаптивної фільтрації нестационарних даних.
 2. Розробка методів отримання оцінок сплайнових моделей за умови наявності в даних корельованого та не нормального шуму. Зокрема це застосування Калманівської фільтрації зі сплайновими моделями, та методу максимальної вірогідності.
 3. Дослідження та розвиток методів фільтрації та стиснення даних з допомогою сплайн-апроксимації для відеоданих та аудіоданих, включаючи застосування двох та трьох вимірних сплайнів.
 4. Розробка придатних для ефективного застосування на практиці методів та алгоритмів обробки сигналів, що ґрунтуються на двох та трьох вимірних сплайнах. Такі моделі в багатьох випадках є більш адекватними природі процесів, котрі породжують дані, що підлягають аналізу (метеорології, відеозображеннях).
 5. Розвиток прикладних сфер застосування сплайн-методів обробки цифрових сигналів в телебаченні, телемедицині, радіозв'язку, телекеруванні, радіолокації.
- Вказані напрями далеко не вичерпують всіх актуальних задач, зміст яких є близьким до виконаних в роботі досліджень. Автор обмежився лише тими, котрі є предметом подальших досліджень, або дослідження з яких в деяких обсягах уже виконані, як самим автором так і його колегами.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНО В НАСТУПНИХ РОБОТАХ

1. Белецкий А.Я., Шелевицкий И.В., Шутко В.Н.. Спектральный анализ сверхмалых выборок наблюдений. Защита информации (сборник научных трудов), КМУГА, Киев, 1998.
2. Білецький А.Я., Матіборський В.В., Сенин А.О., Шелевицький І.В., Шутко В.М.. Побудова квазіортогональних сплайнових базисів з неперервною першою похідною. Вісник центрального наукового центру транспортної Академії України. Вип.2, травень 1999, Київ.
3. Білецький А.Я., Матіборський В.В., Шелевицький І.В., Шутко В.М. побудова ермітових сплайнових базисів у лагранжівій формі. Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: збірник наукових праць. Том 2. - Дніпропетровськ. -“Навчальна книга”, 1999
4. Білецький А.Я., Шелевицький І.В., Шутко В.М. Наближення залежностей за допомогою дискретних сплайнових базисів. Вісник КМУЦА (№1, 1999), Київ. с.85-89.
5. Білецький А.Я., Шелевицький І.В., Шутко В.М. Рекурентний сплайн-метод спектрального оцінювання. Вісник КМУЦА (№2, 1999), Київ. с.138-141.
6. Білецький А.Я., Шелевицький І.В., Шутко В.М., Юрко Ю.В. Адаптивна обробка геохімічних аналізів з допомогою сплайнової моделі. Вісник КМУЦА (№1-2, 2000), Київ. с.89-93.
7. Білецький А.Я., Шелевицький І.В., Шутко В.М., Юрко Ю.В. Побудова тривимірних ермітових інтерполяційних сплайнів. // Вісник НАУ. –К.:НАУ, 2001, №1(8). – с.150-153.
8. Білецький А.Я., Шелевицький І.В., Шутко В.М.. Приведення сплайнових базисів до лагранжівіої форми. Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: збірник наукових праць. Том 4. - Дніпропетровськ. -“Навчальна книга”, 2000.
9. Бойко И.Ф., Шутко В.Н., Шелевицкий И.В., Турчак В.В.. Метод и алгоритм оптимальной фильтрации потока измерительной информации в реальном времени. Проблемы моделирования и цифровой обработки сигналов:Сборник научных трудов.-Киев:КМУГА, 1996. (стр.125-136).
10. Доровской В.А., Миначева А.В., Сенин А.А., Шелевицкий И.В. Анализ данных в экспертных системах антикризисного управления // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: збірник наукових праць. - Том 3. - Дніпропетровськ. - “Навчальна книга”, 2000.- С.45-54.
11. Доровской В.А., Шелевицкий И.В. Моделирование дихотомических тестов. Придніпровський науковий вісник. (№131, 1998), Дніпропетровськ. с.14-24.
12. Доровской В.А., Шелевицкий И.В. Оперативный сплайн прогноз валютных курсов. Придніпровський науковий вісник. (№129, 1998), Дніпропетровськ. с.2-9.

13. Доровской В.А., Шелевицкий И.В. Прогнозирование кризисного состояния эргатических систем. Придніпровський науковий вісник. (№123, 1998), Дніпропетровськ. с.72-83.
14. Сенін А.О., Сольонов В.І., Шелевицький І.В., Шутко В.М.. Рекуррентний сегментний сплайн-метод спектрального оцінювання. Защита информации (сборник научных трудов), КМУГА, Киев, 1999.
15. Сенін А.О., Сольонов В.І., Шелевицький І.В., Юрко Ю.В. Сплайнова модель релаксаційного генератора. Вісник центрального наукового центру транспортної Академії України. Вип.2, травень 1999, Київ.
16. Турчак В.В., Шелевицкий И.В., Шутко Н.А.. Приближение функции двух переменных с помощью двумерных кубических сплайнов. Проблеми авіоніки. Збірник наукових праць. КМУЦА, Київ, 1997.(ст.131-135).
17. Турчак В.В., Шелевицький І.В., Шутко В.М. Необмежені сплайни в задачах фільтрації та стиснення даних Вісник КМУЦА (№1, 1998), Київ. С.275-279.
18. Шелевицкий И.В. Метод адаптивного сжатия данных с помощью сплайнов. Защита информации (сборник научных трудов), КМУГА, Киев, 1998.
19. Шелевицкий И.В.. Рекуррентный алгоритм построения сплайнов методом наименьших квадратов. Статистические методы обработки сигналов в авиационных радиоэлектронных системах: Сборник научных трудов. - Киев:КМУГА, 1995.
20. Шелевицький І.В. Ефективність оцінок методу найменших квадратів для сплайнової моделі. // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: збірник наукових праць. - Том 1. - Дніпропетровськ. - “Навчальна книга”, 1999.- С.129-135
21. Шелевицький І.В., Шутко В.М. Вибір сплайнових базисів у задачах оптимальної лінійної фільтрації. Захист інформації. (№2, 2000), Київ. с.40-44.
22. Шелевицький І.В. Побудова цифрового сплайн-інтерполяційного фільтра. // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: збірник наукових праць. - Том 5. - Дніпропетровськ. - “Видавництво ДНУ”, 2001.- С.24-30.
23. Шелевицький І.В., Шутко В.М., Ткаченко Є.В. Сплайнові базиси в задачах стиснення числових даних. Вісник КМУЦА (№7, 2000), Київ. (ст.119-124).
24. Шелевицький І.В., Шутко В.М., Юрко Ю.В. Базисні сплайни та їх зв'язок із законами розподілу. Захист інформації. (№1, 2000), Київ. с.28-32.
25. Шелевицький І.В., Шутко В.М.. Швидкий алгоритм оптимальної сплайн-фільтрації даних. Проблеми авіоніки. Збірник наукових праць. КМУЦА, Київ, 1997.(ст.136-143).
26. Шелевицький І.В. Сплайновий характер інтерполяційних фільтрів. Защита информации (сборник научных трудов), КМУГА, Киев, 1999.
27. В.О.Касьянов, В.М.Шутко, І.В.Шелевицький. Сплайн-апроксимація аналітично зв'язаних часових послідовностей. Вісник НАУ №4, Київ, НАУ, 2001. с 117-120.

28. Білецький А.Я., Рашевський М.О., Шелевицький І.В., Шутко В.М. Умови неперервності двох похідних в сплайнних безисах, отриманих згорткою. – „Вісник НАУ” №2(9). –К.:НАУ, 2001. –с.177-181.
29. Шелевицький І.В. Методи та засоби сплайн-технології обробки сигналів складної форми. /Під ред. Шутка М.О. –Кривий Ріг: Європейський університет, 2002 р. -304 с.
30. Робастний частотно-часовий аналіз з допомогою методу найменших квадратів та сплайнів. М.О.Шутко, І.В.Шелевицький, Ю.В.Юрко. Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції „АВІА-2003”. Том.1.Інформаційно-діагностичні системи. Київ: НАУ. 2003 р. С.13.67-13.70.
31. Сплайни в частотній області і вейвлети: зв'язок і застосування. І.В.Шелевицький, В.М.Шутко, В.Й.Луцяненко, В.І.Сольонов. Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції „АВІА-2003”. Том1.Інформаційно-діагностичні системи. Київ: НАУ. 2003 р. С.13.28-13.30.
32. Шелевицький І.В. Интерполяционные сплайны в задачах цифровой обработки сигналов. // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. -№4 –С. 42 -53.
33. Синтез сплайнів із заданими частотними властивостями. І.В.Шелевицький, Ю.В.Юрко. Матеріали Міждержавної науково-методичної конференції „Проблеми математичного моделювання”. Дніпродзержинськ, ДДТУ. 2003.
34. Швидкі алгоритми і пристрої для частотно-часового розкладу сигналів з допомогою сплайнів і методу найменших квадратів. І.В.Шелевицький, В.М.Шутко, А.П.Нікітін, В.І.Сольонов. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції „АВІА-2004”. Том 2. Аерокосмічні системи моніторингу та керування. Київ: НАУ. 2004 р. С.22.16 4.с.
35. Адаптивні сплайн-фільтри в обробці сигналів складної форми. І.В.Шелевицький. Матеріали Міждержавної науково-методичної конференції „Проблеми математичного моделювання”. Дніпродзержинськ, ДДТУ. 2004. с.26-27.



Шелевицький І.В. Методи та засоби аналізу і синтезу цифрових сигналів.

- Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний авіаційний університет, Київ, 2005.

В роботі запропоновано методи та засоби обробки сигналів складної форми, обробка яких класичними методами не ефективна. Застосування сплайнів, що будуються із врахуванням апріорної інформації про природу сигналу чи його частотні властивості дозволяє суттєво точніше описати такі сигнали. На відміну від wavelet методів, що ґрунтуються на інтерполяційних схемах, запропоновані застосовують метод найменших квадратів (МНК). Розроблено швидкі алгоритми сплайн-інтерполяції, фільтрації та стиснення сплайнами за МНК. Практично реалізовано фільтри Вінера в класі сплайн-функцій: LSS (Least Squares Spline) фільтри. Отримано схеми стійкого до шумів частотно-часового LSS розкладу та схеми адаптивної фільтрації, де адаптація здійснюється за рахунок зміни амплітуди, масштабу і форми базисних сплайнів. Показано застосування отриманих результатів для обробки модельних та реальних локаційних, відео та біометричних сигналів.

Ключові слова: сплайни, сплайнові базиси, синтез сплайнів, інтерполяція, децимація, фільтрація, фільтри Вінера-Колмогорова, частотно-часовий аналіз.

Шелевицкий И.В. Методы и средства адаптивной оптимальной обработки сигналов сложной формы. - Рукопись. Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук за специальностью 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы – Национальный авиационный университет, Киев, 2004.

В работе предложены методы и средства обработки сигналов сложной формы, обработка которых классическими методами не эффективная. Применения сплайнов, которые строятся с учетом априорной информации о природе сигнала или его частотных свойств позволяет существенно повысить точность описания таких сигналов. В отличие от wavelet методов, которые основаны на интерполяционных схемах, предложенные применяют метод наименьших квадратов (МНК). Разработаны быстрые алгоритмы сплайн-интерполяции, фильтрации и сжатия сплайнами за МНК. Практически реализованы фильтры Винера в классе сплайн-функций: LSS (Least Squares Spline) фильтры. Получены схемы стойкого к шумам частотно-временного LSS разложения и схемы адаптивной фильтрации, где адаптация осуществляется за счет изменения амплитуды, масштаба и формы базисных сплайнов. Показаны применения полученных результатов для обработки модельных и реальных локационных, видео и биометрических сигналов.

Ключевые слова: сплайни, сплайновые базисы, синтез сплайнів, інтерполяція, децимація, фільтрація, фільтри Вінера-Колмогорова, частотно-временной анализ.

Shelevitsky Igor V. The spline methods and tools of the analysis and syntheses for digital signals. - Manuscript.

The Thesis for a doctor's degree by speciality 05.12.17 – radiotechnical and televisions systems. – The National Aviation university, Kyiv, 2005.

The methods of building hermite splines and local splines bases is explored In robot on even nets of nodes. Base splines get, as folding of local functions, which are formed with two symmetrical fragments free and unceasing on fragments of functions. The Author are explored the condition of continuity derived and particularities of educated bases. It Is stated that base splines possible consider, as pulsed features of nonrecursive digital filters. Then error of approach empirical data an splines possible to consider, as difference between spectrums data and base. Explored particularities of algorithms of reception of estimations of splines models in ordinary least squares method (OLS). In particular, OLS is considered as combination coordinated with base splines of filters. Method of reception OLS estimations is Developed for splines with unlimited amount of fragments of alike length. Expressions are Received for calculation of generalised transformation Fourier in nonorthogonal splines bases. The Main advantage of splines models there is possibility to take into account the quite a number given under good adequacy of models and without significant complication of calculations. The Developed methods and algorithms of identification of spectrums given with aproximation of spectrum an spline to provide the minimum of least squares of temporary image of spectrum and data. The Considered questions of optimization of net of nodes spline method of co-ordinates lowering. Use is Motivated as criterion of quality of identification probability to accidents of remainders of approach. The Designed algorithms of building an splines on nets of nodes close to optimum on specified criterion. The Designed cardinal principles of building of quick algorithms spline-identifications and filtrations by means of OLS. The Created algorithms OLS with use projection matrixes and algorithms with uneasiness data and recurrence algorithms. The Got methods, algorithms and program form spline-technology a data processing, which main idea consists in syntheses base splines with provision for frequency characteristics concrete data and the most further choice of necessary algorithms.

Illustrated functioning (working) the created algorithms to filtrations on examples given coordinated and uncoordinated with spectrums of splines bases. It Is Shown that choice of splines base, which corresponds to the spectrum data gives the good results and allows to identify and compress not typical processes for splines. It Is Shown using the got results for data processing in medical diagnostics, геохимии and geophysics. The Designed cardinal principles of compression of scenes, which are founded on OLS algorithms. **The Keywords:** splines, splines bases, hermite splines, generalised transformation Fourier in splines bases, smoothing, aproximation, identification, filtration, algorithms of realtime, estimation of spectrum, compression data, compression of images.

Підписано до друку 01.08.2005 р. Формат 60x84x16.
Ум.друк.арк. 1.9. Обл.-вид.арк. 1.9.
Тираж 100. Зам.№

Типографія

Свідоцтво № від

м.Кривий Ріг.

