уровень величин рисков финансовых потерь. Минимальное количество защит, которое может быть использовано для достижения необходимого уровня величины рисков, должно быть не менее двух. Использование многоуровневой защиты позволит более эффективно защитить информацию при одинаковых финансовых затратах.

Получены выражения для расчета вероятности взлома информации, как от величины вложенного финансирования, так и от количества попыток взлома. Определены оптимальные соотношения между числом попыток взлома и вкладываемым в защиту финансированием. Оказалось, что вполне достаточно рассчитывать защищенность до второй или третьей попыток взлома одиночной защиты, но для более существенного уменьшения величины рисков потерь необходимо использовать многоуровневую защиту. В этом случае затраты на разработку или модернизацию КТЗИ будут соответствовать H или $2H$.

В многоуровневой защите необходимо при ее разработке или модернизации на каждую из единичных защит вкладывать одинаковое финансирование, что позволит добиться минимальных величин рисков финансовых потерь. Уменьшить вклад финансирования в разработку или модернизацию защиты может позволить долевая защита потерь каждой из защит. Однако, как уже отмечалось, необходимы дополнительные исследования для определения оптимальных условий.

Получены выражения для расчета величин рисков потерь, соответствующих реальным системам защиты, которые получаются при использовании той или иной защиты. При расчете рисков потерь используются реально полученные вероятности взлома каждой защиты $P_m(X_j)$ и реальные для них финансовые затраты X_j. С помощью формулы (26) определяется эффективность применения той или иной единичной защиты, причем формула (26) является обобщенным критерием (6) использования той или иной защиты. Если в результате расчетов $\gamma<1$, то такую защиту необходимо исключить из КТЗИ, как неэффективную. При $\gamma>1$ – защита обеспечит не только более высокий уровень защиты, но и экономию финансовых средств. При $\gamma=1$ защита обеспечивается с пропорциональным вложением финансирования.

Получено выражение (28), с помощью которого можно рассчитать величины рисков полных финансовых потерь любой многоуровневой защиты, определить эффективность не только одноуровневых защит, но и всего КТЗИ, а также использовать реальные параметры единичных защит, таких как вероятность их взлома и затрат на их разработку или модернизацию.

При дальнейших экономических расчетах, зная прибыль от защищенной системы и необходимых затрат на защиту, можно обосновать экономическую выгоду при внедрении КТЗИ.

Литература: ***1.*** *Колемаев В. А. Математическая экономика: учебник для вузов [2-е изд., перераб. и доп.]. / Колемаев В. А. - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 399с.* ***2.*** *Шапкин А. С. Экономические и финансовые риски. Оценка, управление, портфель инвестиций / Шапкин А. С. – М.: Издательско-торговая корпорация «Данков и К°», 2003. 544с. (Монография)* ***3.*** *Кравченко В. І. Використання теорії нечітких множин для визначення втрат на захист інформації / Кравченко В. І., Левченко Є. Г. // Науково-технічний журнал «Захист інформації» - 2011. - №1. - С.85-90.* ***4.*** *Домарев В. В. Безопасность информационных технологий. Системный подход / Домарев В. В. - К.:ООО «ТИД «ДС», 2004. - 992 с.* ***5.*** *Сахарцеа І. І. Ризики економічної діагностики підприємства / Сахарцева І. І., Шляга О. В; МОН. - К.: Кондор, 2008. – 380с.* ***6.*** *Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров / Андре Анго; [С предисловием Луи де Бройля. Перевод с французского под общей редакцией К. С. Шифрина.]. – М.: Из-во «Наука», 1964, 772 с.* ***7.*** *Румшинский Л. З. Элементы теории вероятностей / Румшинский Л. З. - М.: Изд-во «Наука», Главн. Ред. Физ.-мат. Лит., 1970. 256 с.*

УДК 621.396

СПОСІБ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГОМОМОРФНОЇ ФУНКЦІЇ МОВНОГО СИГНАЛУ

Максим Кузнецов

Центр Інформаційно-аналітичних досліджень стратегічних програм

Анотація: **Результат, що висвітлено у статті, є новітнім для галузі дослідження мовних сигналів. Ідеться про отримання залежностей від частоти гомоморфної функції сигналу квантилів варіаційних рядків – порядкових статистик гомоморфної функції мовного сигналу.**

Summary: **The result which presented in this article the newest in speech processing field – the variational series fractals depending on speech signal homomorphic function frequency. This effect was named the order statistics of speech signal homomorphic function.**

Ключові слова: **Мовний сигнал, гомоморфна фільтрація, порядкові статистики, статистичні залежності гомоморфної функції мовного сигналу.**

I Вступ

Той факт, що більшість сигналів можна виразити у вигляді лінійної комбінації комплексних показових часових функцій, та ці функції є властивими функціями лінійних та незмінних у часі систем, є ключем до математичного опису цих систем. Під час опису лінійних систем можна використовувати якість, що характеризує їх – принцип суперпозиції.

На відміну від цього, під час розгляду нелінійних систем виникає проблема відсутності загальної для систем такого типу та характеризуючої їх взагалі якості. Тому неможливо надати загальну характеристику нелінійним системам. У цьому випадку вважається доцільним зібрати нелінійні системи, що мають схожі властиві риси, з метою пошуку корисного способу опису систем одного класу.

Існує багато способів класифікації нелінійних систем, один із них – представлення нелінійних систем таким чином, що кожний клас визначається принципом суперпозиції, аналогічним до принципу суперпозиції для лінійних систем. На основі цього визначення існує підхід до окресленого класу завдань нелінійної фільтрації перемножених сигналів та близького завдання нелінійної фільтрації згорнутих сигналів. Завдання такого типу виникають під час стиснення динамічного діапазону сигналів, збільшення значення контрастності зображень та під час аналізу та гомоморфної обробки мовних сигналів [1, 2]. Цей загальний підхід є складним, результати його не завжди однозначні, отже існує потреба у спрощенні підходів до отримання гомоморфної функції складних сигналів із одночасним збереженням у повному обсязі даних, що характеризують функцію.

II Постановка завдання

Мета статті полягає у висвітленні новітнього результату у царині дослідження параметрів гомоморфної функції, що полягає в отриманих вперше значеннях порядкових статистик гомоморфної функції мовного сигналу – статистичних даних, що описують параметри гомоморфної функції мовного сигналу, неусереднених, робастних до впливу як шумів каналів, так і систем відтворення сигналів.

III Основна частина

Опис процесів фільтрування згорнутих сигналів наводиться стосовно до дискретних згорток та дискретних коливань, оскільки у сенсі обчислювальних затрат більш простим є процес дослідження послідовності відліків на відміну від безперервної функції. В роботі [1] наведено узагальнення принципу суперпозиції (котрий встановлено для лінійних систем) на деякі нелінійні системи. В основі опису систем, що мають ці властивості – відклик системи на комбінацію будь-яких двох вхідних сигналів $x_1(t)$ та $x_2(t)$ (комбінація, утворена за допомогою операції додавання, піддавалася перетворенню в системі φ) визначається відкликами на кожний сигнал цієї сукупності, а на операцію скалярного перемноження вхідних сигналів – добутком індивідуальних відкликів. Це твердження базується на представленні вхідних сигналів системи у вигляді векторів у векторному просторі, вихідних сигналів – у вигляді векторів у тому ж або іншому векторному просторі, а перетворення системи – у вигляді лінійного відображення цих просторів.

Такий підхід вимагає накладення обмеження на операції комбінування сигналів, вони мають задовольняти тим самим алгебраїчним постулатам, що й операція векторного складання. Відповідно до цього обмеження, та до того, що вхідні сигнали становлять векторний простір із операціями, що відповідатимуть векторному додаванню та скалярному перемноженню, для опису цих систем можна застосовувати теореми лінійної алгебри [1].

Системи, котрі можна описати як лінійні відображення векторних просторів, було віднесено до гомоморфних систем. Це термін алгебраїчного визначення гомоморфного (лінійного) відображення векторних просторів. Поняття гомоморфних (лінійних) систем обумовлено тим фактом, що при встановлених обмеженнях на сукупність вхідних сигналів, завжди можна знайти перетворювальну систему із якостями, що відповідатимуть наведеним вище принципам суперпозиції, в котрій вхідна та вихідна операції є операціями складання. Системи в межах цього класу відрізняються лише в лінійній частині канонічного представлення для цього класу [1]. Дію апарату гомоморфної обробки спрямовано на вирішення окремих завдань фільтрації перемножених або згорнутих сигналів. А саме – стиснення та розширення динамічного діапазону звукових коливань і стиснення динамічного діапазону та підсилення контрастності зображення, а також – боротьба із сигналами відлуння під час відбиття звукових хвиль та аналізу й стисненню смуги частот мовного сигналу. Як наслідок такого підходу до вирішення завдання щодо отримання параметрів шуканої функції є розміщені біля нуля, дуже вузькосмугові значення гомоморфної функції. Ці параметри розглядаються як відокремлені один від одного сегментами квазістаціонарності. Вони (значення гомоморфної функції) є вкрай малоінформативними (порівняно зі спектром) та застосовуються в окремих випадках. Оскільки існує загальний підхід до отримання гомоморфної функції, сфера застосування цих параметрів, то існує необхідність подальшого дослідження цього явища та потреба вдосконалення підходів отримання гомоморфної функції сигналу.

Нижче викладено підхід до рішення завдання отримання параметрів гомоморфної функції, котрий не вимагає обов'язкової класифікації систем та сигналів, що піддавалися перетворенням цими системами. Тобто отримання гомоморфної функції сигналу як такого.

Найбільш важливим чинником зниження ефективності відомих систем, що реалізують способи гомоморфної обробки складних сигналів (мовних, гідроакустичних, біомедичних, сейсмічних, ультразвукових), є те, що такі сигнали є випадковим нестаціонарним процесом зі змінною дисперсією і складною формою поточної гомоморфної функції. В результаті цього багатовимірні функції щільності розподілу ймовірностей миттєвих модульних значень дискретних відліків поточних гомоморфних функцій сигналів на сегментах аналізу є негаусовськими та багатомодальними, що істотно ускладнює обробку, оцінку та використання результатів гомоморфної обробки складних сигналів.

Потенційні характеристики систем гомоморфної обробки мовних сигналів можуть бути забезпечені лише при повному врахуванні значень багатовимірних функцій щільності розподілу ймовірності (ЩРЙ) інтенсивності гомоморфної функції мовних сигналів.

$$g_{\Sigma}([A_i, f_i]) = \prod_{i=1}^{n} g(A_i, f_i); \tag{1}$$

де: g_{Σ} – сумарна багатовимірна функція ЩРЙ (сукупність даних про досліджуваний сигнал), $[A_i, f_i]$ - матриця значень амплітуди A_i інтенсивності кепстру сигналу на кожній дискретній частоті f_i гомоморфної функції сигналу $x(t)$, що досліджується, $g(A_i, f_i)$ - багатовимірна функція ЩРЙ амплітуд A_i на частотах f_i в кожному перерізі (відлік сигналу) сегменту аналізу складного сигналу, $\prod_{i=1}^{n}$ – добуток всіх значень g на сегменті аналізу. Порівняння значень функцій ЩРЙ сигналу, що досліджується, у такий спосіб на практиці неможливо. Не реалізовано метод, що враховуватиме весь масив чисел, що описують значення функцій ЩРЙ. У практичних системах гомоморфної фільтрації проводять усереднення значень багатовимірних функцій ЩРЙ. Після чого, оперуючи поняттями середнього, дисперсії, асиметрії функцій ЩРЙ, ексцесу, тобто параметрами, які характеризують сумарну багатовимірну функцію ЩРЙ сигналу – виконують дослідження гомоморфної функції складних сигналів. Наслідками такого підходу є згладжування характеризуючих параметрів та втрати інформаційного наповнення мовного сигналу.

З високим ступенем точності функція ЩРЙ характеризується порядковими статистиками – квантилями (квартилями, децилями, п'ятилями, процентилями) аргументу в області визначення функції, із одночасним спрощенням завдання статистичного порівняння. Під спрощенням слід мати на увазі статистичне врахування не самих функцій щільності розподілу ймовірності гомоморфної функції мовного сигналу, що досліджується, а статистичне порівняння векторів порядкових статистик сигналу.

Рішення поставленого завдання досягається тим, що в заданій послідовності взаємозв'язаних операцій здійснюють перетворення мовного сигналу, що досліджується (рис. 1).

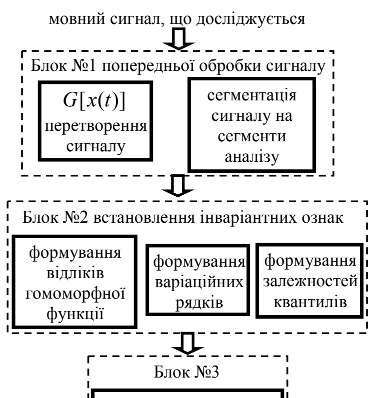

Рисунок 1 – Блок-схема методу дослідженя параметрів гомоморфної функції мовного сигналу

У першому блоці попередньої обробки сигналу $x(t)$ виконується представлення вхідного сигналу (рис. 2) у вигляді аналітичного сигналу, шляхом застосування перетворення Гілберта $G[x(t)]$ до довільного сигналу $x(t)$ обмеженої енергії $E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \langle \infty$, без постійної складової $\int_{-\infty}^{\infty} x(t)dt = 0$:

$$x(t) = a_x(t)\cos[2\pi f_0 t + \varphi_x(t)];$$

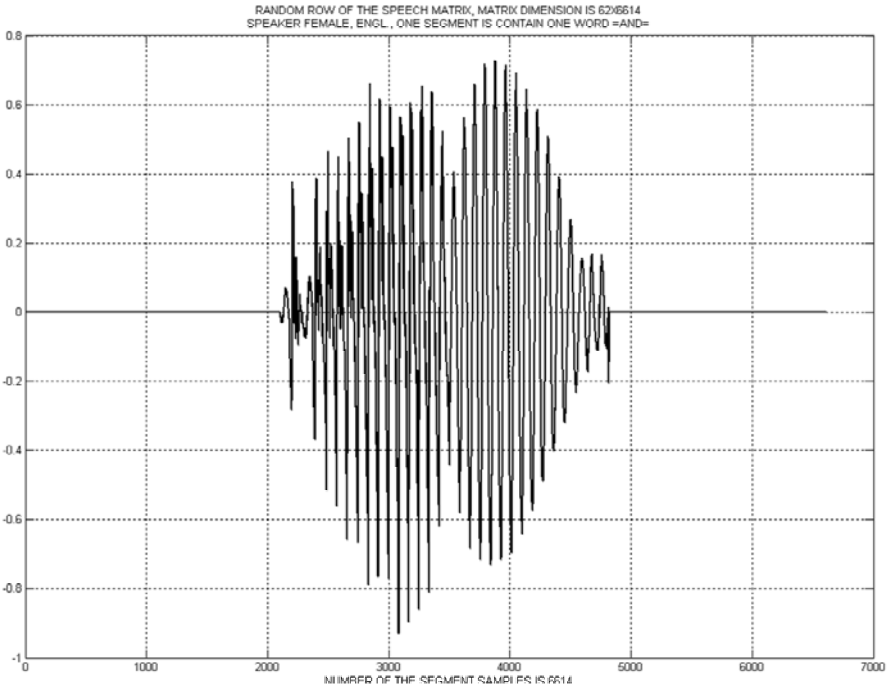

Рисунок 2 – Довільний сегмент аналізу мовного сигналу диктора із числом відліків 6614

Спряжений по Гілберту (рис. 3) дійсний сигнал $\tilde{x}(t)$ формується у вигляді згортки сигналу $x(t)$ та сигналу $1/(\pi t)$:

$$\tilde{x}(t) = [x(t) * (1/\pi t)] = G[x(t)] = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau;$$

Тригонометрична форма представлення сигналу, спряженого по Гілберту:

$$\tilde{x}(t) = a_x(t)\sin[g_x(t)] = a_x(t)\sin[2\pi f_0 t + \varphi_x(t)];$$

Аналітичний сигнал – як інформаційний еквівалент спряженого сигналу;

$$y(t) = x(t) + j\tilde{x}(t) = a_x(t)\exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_x(t))].$$

Також у цьому блоці виконується сегментація сигналу на сегменти аналізу однакової тривалості, що становить 6614 відліків досліджуваного сигналу. Це обумовлено потребою використовувати для отримання гомоморфної функції не неперервної мовної реалізації, а лише тільки обраного сегмента, що позначається англійським «**and**» (рис. 3).

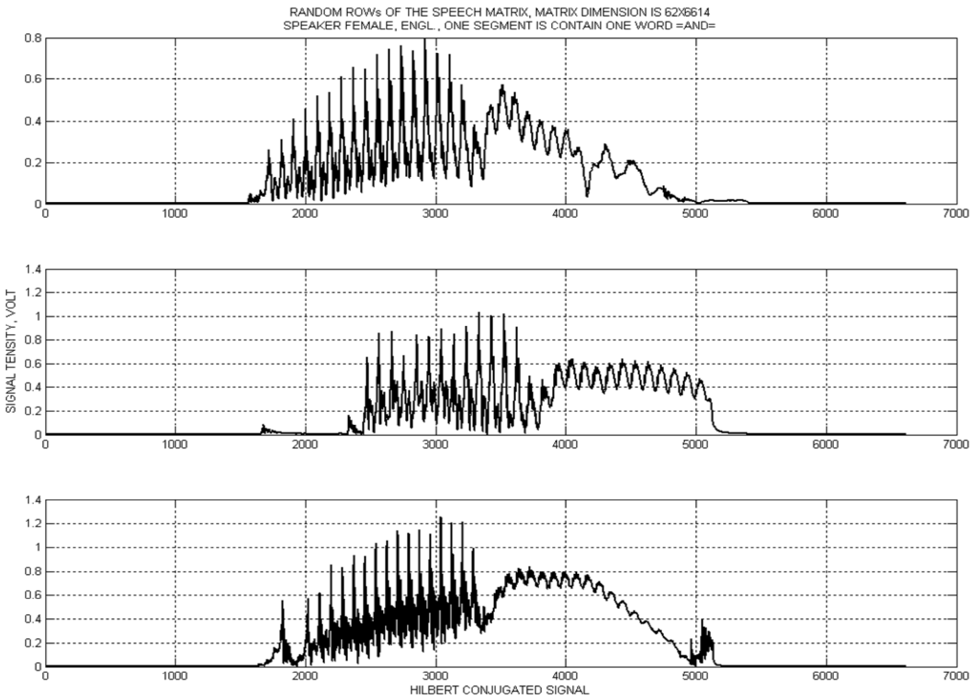

Рисунок 3 – Довільні сегменти мовного сигналу, спряженого по Гілберту

Функціоналом другого блоку передбачено вираховування гомоморфної функції сигналу шляхом застосування швидкого перетворення Фур'є до логарифма сигналу:

$$x(t) \xrightarrow{G[x(t)]} a_x(t) * \exp jg(t) \xrightarrow{\ln} \ln a_x(t) - \exp jg(t) \xrightarrow{F} A_x(f) \xrightarrow{abs} |A_x(f)| \;;$$

Пряме та зворотне перетворення Фур'є (БПФ):

$$X_F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\exp[-j2\pi ft]\,d(t)\,;\; x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_F(f)\exp[j2\pi ft]\,d(t)\,.$$

В результаті виконання розглянутих вище операцій часу-частотного перетворення мовного сигналу для кожного дискретного значення частоти його поточної гомоморфної функції може бути отримана сукупність значень модулів $x_i\,, i = 1 \ldots n,$ за всіма сегментами аналізу. Ця сукупність незалежних випадкових величин може вважатися вибіркою об'єму n (кількість сегментів аналізу, початкова вибірка) з генеральної сукупності, що характеризується функцією розподілу (ФР) $G(x)$ (блок 2 встановлення інваріантних ознак).

Таким чином, функції щільності розподілу вірогідності $g(x)$ ставиться в однозначну відповідність функція розподілу $G(x)$. Функція розподілу приймає значення від 0 до 1; в області математичного очікування набуває значення 0,5 при симетричній функції щільності розподілу ймовірності. Усі характеризуючі функцію розподілу $G(x)$ значення від 0 до 1 розміщуються на осі ***Y***. Представляється можливим встановити значення аргументу функції розподілу $G(x)$ у зоні визначення функції. Для стандартних розподілів всіх типів функція розподілу характеризується набором чисел (вектор порядкових статистик):

$$[\boldsymbol{x}_{01}, \boldsymbol{x}_{02}, \boldsymbol{x}_{03}, \boldsymbol{x}_{04}, \boldsymbol{x}_{05}, \boldsymbol{x}_{06}, \boldsymbol{x}_{07}, \boldsymbol{x}_{08}, \boldsymbol{x}_{09}];$$

по цих числах представляється можливим апроксимувати функцію розподілу $G(x)$, значить, немає необхідності описувати функції щільності розподілу ймовірності $g(x)$ і розподіли $G(x)$, досить задати значення її порядкових статистик.

До проведення будь якої обробки значень $[x_i]$, та оцінювання статистик вибірки, можна сформувати варіаційний ряд $[\widehat{x}_{i/n}]$ значень $[x_i]$: $\widehat{x}_{1/n} \le \widehat{x}_{1/n} \le \ldots \le \widehat{x}_{i/n} \le \ldots \le \widehat{x}_{n-1/n} \le \widehat{x}_{n/n}$, розташувавши їх в порядку не зменшення, де індекс елементів варіаційного ряду $[\widehat{x}_{i/n}]$ запишемо у вигляді $i/n,$ тобто

$\hat{x}_{1/n} = \min_i [x_i], \hat{x}_{n/n} = \max_i [x_i]$ [3]. Варіаційний ряд $[\hat{x}_{i/n}]$ містить всю інформацію про початкову вибірку $[x_i]$ і тому він називається тривіальною достатньою статистикою всієї сукупності незалежних випадкових величин $[x_i]$. Після формування варіаційних рядків виконується виділення квантилів варіаційних рядків (рис. 4, 5).

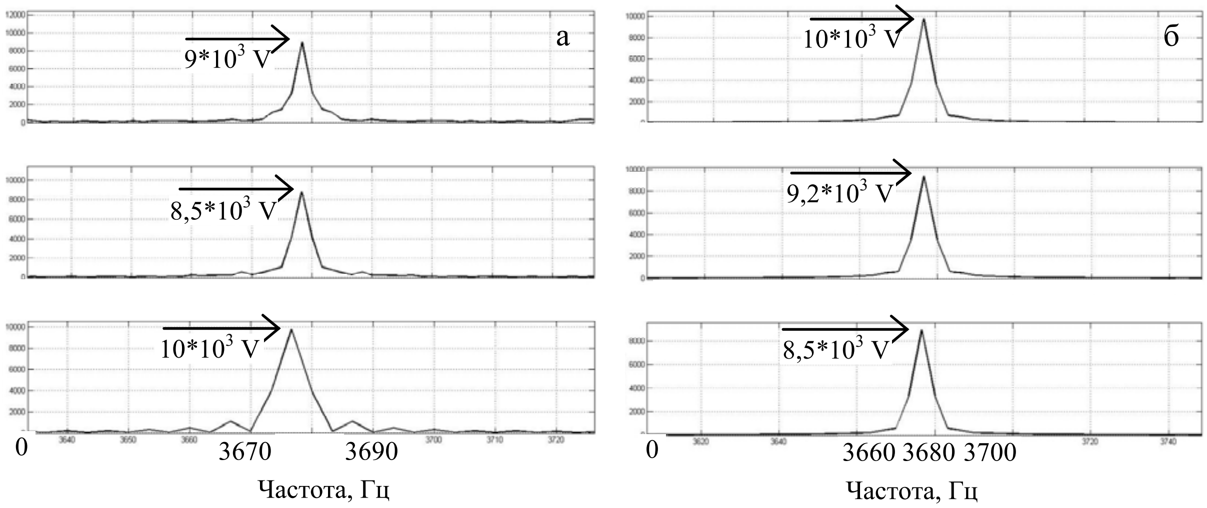

Рисунок 4 – Гомоморфні функції (а), по вибірковим сегментам аналізу мовного сигналу, гомоморфній статистичний квантильний образ, децилі 9, 8, 7 (б), диктор № 2

Таким чином, отримано залежності від частоти гомоморфної функції сигналу квантилів варіаційних рядків – порядкових статистик гомоморфної функції мовного сигналу. Ці залежності містять статистичну, неусереднену інформацію щодо функцій ЩРЙ гомоморфної функції сигналу, що досліджується. Оскільки розмірність вектора порядкових статистик допускається змінювати (з метою зміни ступеня деталізації опису функції) є можливість варіювати графічне зображення порядкових статистик гомоморфної функції складного сигналу. Кроком взяття відліків по осі абсцис можуть бути квартилі (кожен 25-й квантиль зі 100), децилі (кожен 10-й квантиль зі 100), п’ятилі (кожен 5-й квантиль зі 100), процентилі (усі квантилі вибірки, тобто з 1 по 100). Значення квартилів, наприклад, характеризуватимуться трьома векторами чисел $[\boldsymbol{A}_{0.25}\,(\boldsymbol{f})]$, $[\boldsymbol{A}_{0.50}\,(\boldsymbol{f})]$, $[\boldsymbol{A}_{0.75}\,(\boldsymbol{f})]$. Запис $[\boldsymbol{A}_{0.25}\,(\boldsymbol{f})]$ означає, що 25% статистичних даних гомоморфної функції лежать нижче цього значення, відповідно запис $[\boldsymbol{A}_{0.75}\,(\boldsymbol{f})]$ означає, що 75% статистичних даних гомоморфної функції лежать нижче цього значення, а запис $[\boldsymbol{A}_{0.50}\,(\boldsymbol{f})]$ визначає медіанне значення, що відіграє роль математичного очікування [3].

Крім того, вибіркові квартилі, децилі, п’ятилі, процентилі є стійкими до аномальних значень компонент гомоморфної функції $[x_i]$, які розташовані на «хвостах» варіаційного ряду $[\hat{x}_{i/n}]$. Ці аномальні компоненти є надпотужними шумами з рівномірним білим шумом, іншими шумами природного та штучного походження. Оскільки виконується будова варіаційних рядків, відповідні складові гомоморфної функції зсовуються на краї варіаційних рядків. Експериментально встановлено, що це є квантилі із значеннями більш ніж 95-й та менш ніж 10-й (залежно від зашумленості сигналу, що досліджується). Ці квантилі можливо не враховувати у дослідженні, але завдяки цій якості варіаційного ряду усі інші квантилі є очищеними від шумів природного та штучного походження. Окрім цього, важливим є те, що квантилі варіаційних рядків, як порядкові статистики вибіркового розподілу ймовірностей поточних значень гомоморфної функції для кожної частоти гомоморфної функції сигналу розподіляються за нормальним законом (незалежно від негаусовського характеру багатовимірних функцій розподілу вибіркових значень гомоморфної функції сигналів, що досліджуються), завдяки чому істотно підвищується ефективність функціонування систем гомоморфного аналізу складних сигналів, в тому числі систем ідентифікування джерела складних сигналів за критеріями згоди, що є орієнтованими на статистичну ідентифікацію нормально розподілених випадкових величин [3, 4].

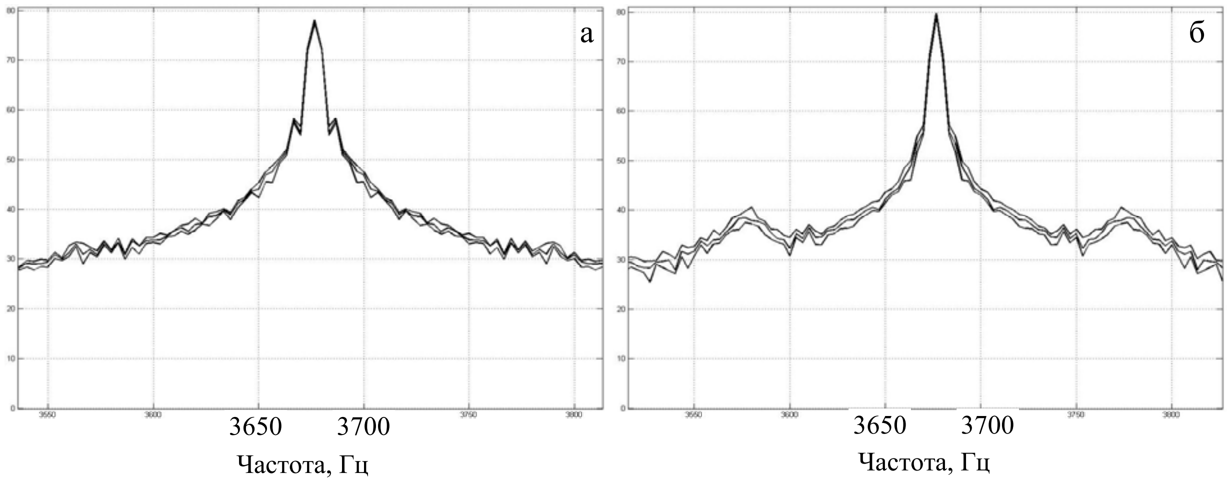

Рисунок 5 – Гомоморфні статистичні квантильні образи мовних сигналів дикторів № 1 (а), диктор № 2 (б), децилі 9, 8, 7

В роботі використано студійні записи професійного диктора (жінка, мова англійська), носій – CD-диск, що є доступним у продажу. Попередня обробка цих сигналів, проведена з метою привести формат сигналів (.mp3) до формату, що дозволить обробляти їх у середовищі MatLAB (.wav), виконувалася за допомогою програмного забезпечення CoolEdit Pro. Було прийнято рішення за мовну одиницю прийняти слово «and», та використовувати його для отримання порядкових статистик гомоморфної функції мовного сигналу. З вихідного сигналу було взято 62 таких слова (із розрахунку одне слово на сегмент), що є достатньою статистичною вибіркою матеріалу для отримання залежностей квантилів від частоти гомоморфної функції сигналу, та для оцінки отриманих статистичних даних.

IV Висновки

Приведені результати показують, що залежності від частоти гомоморфної функції сигналу квантилів варіаційних рядків є статистичним еквівалентом сукупності незалежних значень гомоморфної функції $[x_i]$. При цьому, з допустимою для практики точністю асимптотичні властивості квартилів і децилів варіаційного ряду значень гомоморфної функції розпочинають проявлятися при числі вимірів $n > 30$, а стійкість результатів їх статистичної обробки виявляється практично при $n = 100$. Це підкреслює перевагу аналізу квартилів, децилів, п'ятилів та процентилів варіаційного ряду порівняно з аналізом статистичних характеристик вибірки прямих вимірювань при $n > 100$. В загальному випадку визначеність асимптотичних властивостей порядкових статистик суттєво спрощує отримання оцінок максимальної правдоподібності і перевірку критеріїв згоди параметрів розподілів в умовах статистичної невизначеності характеристик шумів і помилок вимірювань.

В результаті дослідження експериментальним шляхом отримані новітні дані – порядкові статистики $\widehat{x}_{\alpha}(f_k)$ гомоморфної функції сигналу. Це неусереднені, статистичні, робастні до аномальних перешкод дані, що надано у вигляді графічних залежностей розподілу квантилів гомоморфної функції мовного сигналу.

Комплексне використання відмічених особливостей та пов'язаних з ними позитивних ефектів дозволяє забезпечити підвищення ефективності систем гомоморфного аналізу складних сигналів.

Література: ***1.*** *Голд Б., Рейдер Ч. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ./ Под ред. А. М. Трахтмана. – М.: «Сов. радио», 1973. – 368с.* ***2.*** *Рабинер Л. Р., Шафер Р. В. Цифровая обработка речевых сигналов: Пер. с англ./ Под ред. М. В. Назарова. и Ю. Н. Прохорова. – М.: «Радио и связь», 1981. – 496 с., ил.* ***3.*** *Дейвид Г. Порядковые статистики: Пер. с англ./ В. А. Егорова и В. Б. Невзорова, под ред. В. В. Петрова. – М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы 1979.-336 с.* ***4.*** *Патент України на винахід № 87924. Спосіб гомоморфної ідентифікації сигналів / В. Л. Селетков., М. В. Кузнецов. Опубліковано бюл. «Промислова власність» № 13 від 10. 07. 2009 р.*