

УДК 534.41; 004.4; 681.84

І. В. Косяк

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Відновлення та реконструкція звукового сигналу у фонограмах раритетних носіїв запису

Запропоновано алгоритм цифрової обробки звукових сигналів, зчитаних з фоноциліндрів, і проведено оцінку впливу виконання процедур відновлення. Досліджено наявність викривлення звуку в фонограмах та класифіковано види існуючих у них перешкод.

Ключові слова: перешкоди, викривлення, фонограма, фоноциліндр, звуковий сигнал.

Вступ

З часу винаходу Т. Едісоном фонографа, завдяки його використанню для запису звуку, у світі накопичилася величезна кількість фонографічних циліндрів. Зокрема, в Україні близько 2000 одиниць [1, 3] зберігаються у відомих культурних закладах, не враховуючи приватних колекцій. За допомогою створеної в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України системи неруйнівного відтворення звуку з фонографічних циліндрів [2], з'явилася можливість перезапису їх на сучасні носії, забезпечивши тим самим доступ до безцінних зразків звукової культурної спадщини дослідникам, аматорам і знавцям народної творчості.

Більшість записів фонограм мають низьку якість звучання, що обмежує їх введення до наукового обігу та унеможлиблює доступ широкому колу шанувальників музичної культурної спадщини. В зв'язку з цим, вирішення задачі відновлення та реконструкції звукового сигналу з метою поліпшення якості відтворення стає актуальною.

Викривлені спектри первісних звуків, невелике співвідношення сигнал-шум, великі зміни в швидкостях запису, імпульсні перешкоди, шуми різнобічного характеру є характерними ознаками звукових сигналів, зчитаних з фонографічних циліндрів. Найбільшу небезпеку для інформаційної поверхні циліндра представляють мікроорганізми і багаторазове зчитування на фонографі, пов'язане з великим тиском на поверхню циліндра [3]. На рис. 1 зображені в збільшеному масштабі звукові канавки фоноциліндрів з типовими ушкодженнями поверхні. На рис. 2, а, в представлені поперечні профілі якісних і ушкоджених звукових канавок, а на рис. 2, б, г відповідно їм їх тривимірні зображення, отримані за допомогою сканування

© І. В. Косяк

електронним мікроскопом. Порівняння на рис. 2 дає нам уявлення про достатньо значні ушкодження, до яких призводять мікроорганізми і багаторазове зчитування. Окрім викривлень, викликаних механічним ушкодженням поверхні та довготерміновим зберіганням, існують викривлення, що викликали деградацію сигналу ще в момент запису. Більшість фонографічних циліндрів записані поза студію на портативних фонографах, рушійні механізми яких були далекі від досконалості, а тому мали підвищену нерівномірність швидкості обертання та збільшений ексцентриситет. Ці відхилення рушійного механізму передавалися безпосередньо циліндру і викликали паразитну частотну модуляцію корисного сигналу — детонацію. Обертіві деталі рушійного механізму додатково викликали низькочастотну перешкоду, яка, додаючись до корисного сигналу в момент запису, також приводила до викривлення сигналу.

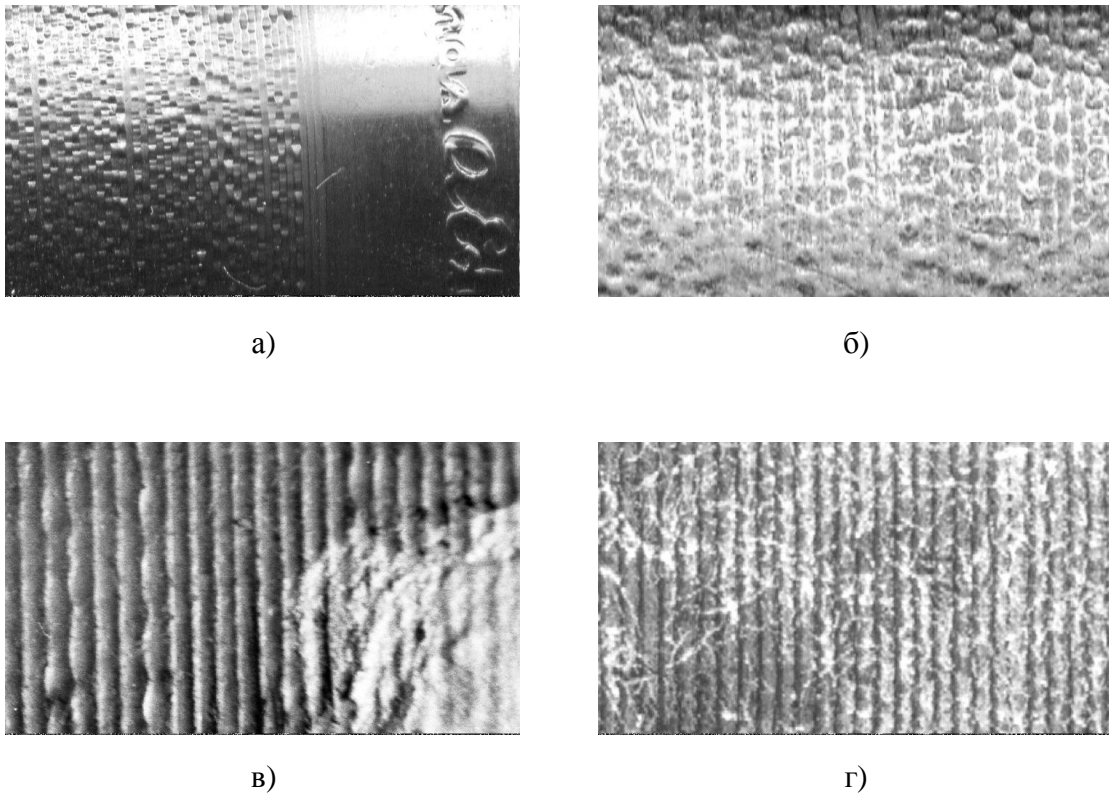
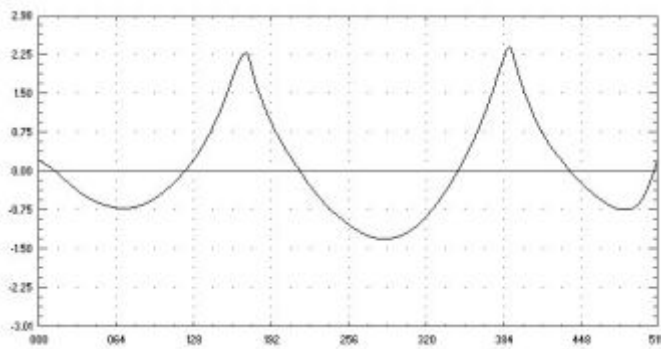


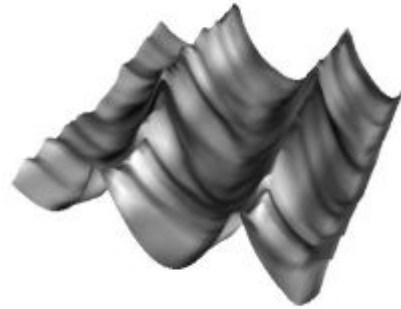
Рис. 1. Зображення поверхні фоноциліндрів: а) фоноциліндр відмінної якості, виготовлений за допомогою штамп; б) ушкодження звукових канавок від багаторазового зчитування на фонографі; в) фрагментарне ушкодження цвільлю; г) ушкодження мікроорганізмами усієї поверхні

Види перешкод

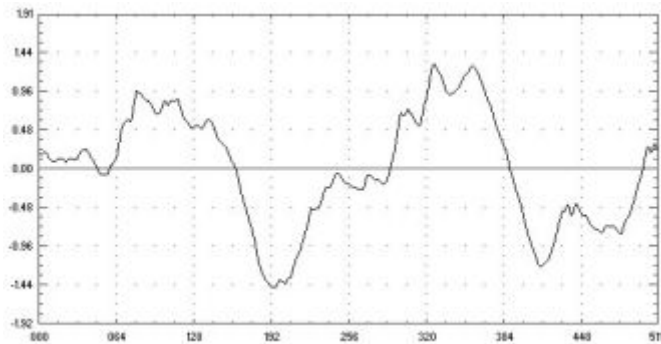
Викривлення звуку, які присутні у сигналах, зчитаних з фонографічних циліндрів, можна розділити на дві групи: локальні та глобальні. До локальних викривлень сигналу відносяться різні імпульсні перешкоди — клацання, потріскування. Глобальні викривлення сигналу включають до себе широкосмуговий шум, низькочастотний шум (рокіт), детонацію і нелінійні викривлення.



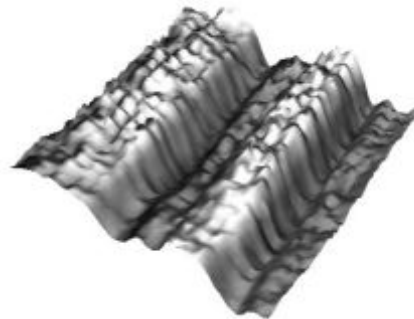
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Зображення звукових каналок (розмірність осей виражена в мкм): а) поперечний профіль звукових каналок; б) тривимірний профіль звукових каналок; в) поперечний профіль ушкоджених звукових каналок; г) тривимірний профіль ушкоджених звукових каналок

Для досягнення бажаних результатів при відновленні сигналів, присутні у фонограмах викривлення звуку, насамперед, необхідно класифікувати й розділити за тривалістю та частотою.

Аналіз багатьох відтворених з фоноциліндрів фонограм показав, що в переважній більшості присутні найбільш характерні перешкоди таких видів:

— *широкосмуговий поверхневий шум*: виникає через шорсткість поверхні, подряпини, пил, плісняву і являє собою випадковий, адитивний фон, який має істотно важливі складові у всьому діапазоні звукових частот;

— *частотні викривлення*: зумовлені, в першу чергу, формою та розмірами металевого рупора, який використовувався разом із закріпленою у ньому мембраною як перетворювач звукових коливань повітря у механічні коливання записуючої голки;

— *короткі імпульсні перешкоди (кляцання)*: виникають через механічні ушкодження поверхні фоноциліндра у формі подряпин, тріщин і представляють собою всі дефекти сигналу кінцевої тривалості, що займають випадкові положен-

ня у формі звукової хвилі. Їхня тривалість у звуковому сигналі може досягати 3 мсек;

— *низькочастотні імпульсні перешкоди (тріск)*: у випадку, коли тривалість імпульсних перешкод значно перевищує 3 мсек, їх можна віднести до типу низькочастотних імпульсних перешкод. Ця форма перешкод пов'язується з механічними ушкодженнями поверхні фоноциліндра у формі великих тріщин, сколів;

— *низькочастотний шум (рокот)*: являє собою низькочастотну перешкоду, викликану обертовими деталями рушійного механізму записуючого пристрою фонографа;

— *нелінійні амплітудні викривлення*: викликані, в першу чергу, дефектами в первісній системі реєстрації та ушкодженнями звукових канавок фоноциліндра при повторному відтворенні звуку фонографом через великий тиск голки на достатньо м'яку поверхню фоноциліндра;

— *акустичні резонансні викривлення*: небажаний акустичний резонанс, зумовлений виникненням відбиття сигналу в рупорі;

— *детонація*: представляє собою зміни висоти тону у відтвореному сигналі через нерівномірність швидкості обертання, ексцентриситет, деформації форми фоноциліндра внаслідок неправильного довготривалого зберігання.

Алгоритм цифрової обробки сигналу

Сучасна обробка звукових сигналів пропонує різні способи поліпшення якості звучання від традиційної смугової фільтрації до особливо складних цифрових методів заглушення найрізноманітніших шумів й імпульсних перешкод. На сьогоднішній день цифрова обробка звукових сигналів майже витіснила аналогові методи, які мають великі обмеження і незначні можливості, і стала самостійною потужною технологією.

Аналіз практичних досліджень по відновленню і реконструкції звукових сигналів, зчитаних з фонографічних циліндрів, дозволив оцінити вплив на характеристики якості як послідовність виконання процедур обробки [4], так і ступінь їх застосування. Це дозволило узагальнити алгоритм цифрової обробки сигналу з метою раціонального використання програмних засобів для якісного відновлення фонограм. Отже, алгоритм цифрової обробки по відновленню й реконструкції звукового сигналу у фонограмах раритетних носіїв запису повинен виконуватись у такій послідовності:

- 1) усунення коротких імпульсних перешкод;
- 2) усунення низькочастотних імпульсних перешкод;
- 3) усунення низькочастотного шуму — рокоту;
- 4) усунення широкосмугового поверхневого шуму;
- 5) вирівнювання частотної характеристики;
- 6) компенсація акустичних резонансних викривлень;
- 7) вирівнювання амплітудної характеристики.

Будь-яка процедура обробки вносить свої коригування в сигнал у тій чи іншій мірі, і це треба враховувати при їх подальшому виконанні. Виконання процедур здійснюється в порядку зростання їх впливу на суттєві зміни реконструкції звукового сигналу.

Методи комп'ютерної обробки звукових сигналів ґрунтуються на принципах фільтрації й оцінювання параметрів по дискретній вибірці відліків сигналу. Обробка здійснюється на основі наближених математичних представлень. Ступінь наближення значною мірою визначається складністю алгоритмів комп'ютерної обробки в межах прийнятих моделей сигналу та шуму.

Основні процедури відновлення та реконструкції сигналу

Сучасний ринок програмного забезпечення, призначеного для обробки звукових сигналів, широко представлений багатьма компаніями, серед найбільш відомих це: Sonic Foundry, Syntrillium Software Corporation, Waves, DARTech, Steinberg, Sonic Solution, Cedar, Diamond Cut Production, Algorithmix, Digidesign, Magix. Програмні засоби та окремі модулі, які вони поставляють, призначені для реставрації звукових сигналів, зчитаних як правило з магнітної стрічки і грамплатівок. Вони різняться рівнем складності алгоритмів, інтерфейсом, якістю обробки і відповідно різною вартістю. Найбільш слабкі місця всіх програмних засобів проявляються при їх застосуванні до обробки записів фонограм фоноциліндрів. Особливо це стосується виконання процедур усунення низькочастотних імпульсних перешкод та усунення широкосмугового поверхневого шуму.

Виконання процедури *усунення коротких імпульсних перешкод* полягає в тому, щоб відокремити імпульсні перешкоди від корисного сигналу. При цьому треба враховувати, що в музичних фонограмах можуть бути присутні звукові сигнали з різким наростанням амплітуди, та й амплітуда і тривалість самих імпульсних перешкод може відчутно змінюватись у межах фонограми. В діалогових вікнах усіх програм є можливість встановлення рівня порога (чутливості), а в деяких також додатково параметрів, які істотно впливають на якість усунення перешкод — тривалість та вибір форми детектованої імпульсної перешкоди. Основним критерієм для різних методів виявлення перешкод служить мінімальна ймовірність помилки детектування. Після виявлення імпульсних перешкод стратегія заміщення, яка закладена в алгоритмі програм, обчислює варіанти маскуванню їхнього ефекту. Це досягається інтерполяцією значень даних, що оточують ушкоджену ділянку [5].

Процедура *усунення низькочастотних імпульсних перешкод*, присутніх у звукових записах фоноциліндрів, є набагато складнішою від попередньої. Вони відрізняються від коротких імпульсних перешкод значно більшою тривалістю (5–20 мсек і більше) і відносно більшим умістом низькочастотної складової сигналу. Так як ефекти імпульсного шуму досить тривалі, відповідно безпосереднє застосування інтерполяції у багатьох випадках не дає практичної користі. Тоді реконструкція сигналу відбувається вручну за допомогою звукового редактора, при цьому небажана ушкоджена ділянка запису видаляється.

Процедура *усунення широкосмугового поверхневого шуму* є найскладнішою і найбільш проблематичною. Існує багато методів обробки зашумлених звукових сигналів, але найбільш прийнятним для обробки саме музичних записів є метод вирахування амплітудних спектрів, який застосовується практично в усіх програмних продуктах. При виконанні даної процедури важливо дотримуватися принципу мінімального викривлення сигналу і не вносити до корисного сигналу істот-

них викривлень та побічних звукових шумів-артефактів. Більш детально проблему усунення шуму в записах фоноциліндрів було розглянуто в [6]. Так як попередні процедури в цілому суттєво не видозмінюють сам сигнал, то дана процедура впливає водночас на всю фонограму і може докорінно змінювати власне огибаючу звукового сигналу, привносити нелінійні викривлення (гармонійні й інтермодуляційні), погіршувати частотну характеристику, що зрештою, може призводити до спотворення оригінального звучання. Саме тому усунення широкосмугового поверхневого шуму повинно виконуватися після процедур усунення імпульсних перешкод і перед процедурою вирівнювання частотної характеристики.

Записи фонограм, зчитаних з фоноциліндрів, у більшості випадків необхідно піддавати частотній корекції для компенсації нелінійності амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) звукового тракту запису. Власне звуковий тракт фонографа складається з рупора, діафрагми та голки для запису. Форми рупорів та їх розміри були різними, що зумовлювало певні відхилення АЧХ на записах фоноциліндрів. Портативні фонографи, що використовували для запису в експедиціях, мали відносно малі розміри рупорів. Безсумнівно цей факт істотно вплинув на якість записаних фонограм. Записи, здійснені портативними фонографами, відрізняє від студійних записів головним чином якість передачі сигналу, який має більш гірші частотні й амплітудні характеристики. *Вирівнювання частотної характеристики* відбувається за допомогою процесу фільтрації з використанням цифрових фільтрів, що дозволяють коректувати АЧХ як завгодно глибоко й точно без викривлення фази сигналу, застосовуючи при цьому, як правило, графічний еквалайзер.

Записам на фоноциліндрах властивий ще один різновид викривлень — акустичні резонансні викривлення. Це паразитні періодичні коливання, які присутні у записаному сигналі внаслідок виникнення небажаного акустичного резонансу в рупорі фонографа. *Компенсація акустичних резонансних викривлень* відбувається за допомогою тонких настроювань багатосмугового параметричного еквалайзера. На підставі прослуховування сигналу та обмірюваного його спектра визначаються частоти, що мають небажаний підйом посилення певних звукових частот. Настроювання багатосмугового параметричного еквалайзера відбувається таким чином, щоб зменшити посилення цих частот.

Процедура *вирівнювання амплітудної характеристики* застосовується в тих випадках, коли відтворені записи з фонографічних циліндрів мають суттєво нерівномірну амплітудну характеристику. Вона проявляється в тому, що на зчитаних фонограмах записів досить сильно відчутні зміни середнього рівня інтенсивності звукового сигналу, які позначаються на погіршенні сприймання якості відтвореного звуку. Це пов'язано як з недоліками конструкції записуючого пристрою-фонографа, так і з непрофесійним підходом до самого процесу запису. Для вирішення цих недоліків фонограми слід застосувати динамічну обробку сигналу. Ефект стискання динамічного діапазону (компресія) дозволяє ущільнити звуковий сигнал так, щоб різний рівень амплітуд став більш рівним. Суб'єктивно компресія проявляється як збільшення гучності звуку. При правильному застосуванні ефекту компресії динаміка первісного музичного сигналу практично не змінюється, а тільки відбувається його ущільнення. Звучання стає більш рівним і насиченим.

Серед фонограм, зчитаних з фоноциліндрів, трапляються такі, де в сигналі достатньо відчутна присутність *нелінійних амплітудних викривлень*. На рис. 1,б

зображено ушкоджені звукові канавки, відтворення звуку з яких містить подібні викривлення. Вони можуть бути викликані безліччю різних дій, таких як: дефекти в первісній системі реєстрації, перевантаження сигналу запису, деградація звукових канавок через надмірне використання, неправильне зберігання. Нелінійні викривлення характеризуються зміною форми сигналу і, як наслідок, появою в спектрі частот, кратних частотам корисного сигналу. До них відносяться гармонійні викривлення, коли до корисного сигналу додаються частоти, кратні основній, та інтермодуляційні, коли в багаточастотному сигналі з'являються сумарно-різницевої частоти. Реконструювати такий викривлений сигнал практично неможливо. В залежності від складу спектра нелінійні викривлення одного порядку можуть викликати різні суб'єктивні сприйняття викривлень. Діапазон відтворюваних частот також впливає на сприйняття нелінійних викривлень: чим ширше частотний діапазон, тим помітніше нелінійні викривлення. Існують певні методи, які дозволяють часткове усунення нелінійних викривлень, присутніх в записах магнітних стрічок і на звукових доріжках кіноплівок [7, 8]. Але вони можуть усувати викривлення, пов'язані з незначними амплітудними обмеженнями, на відміну від фізичних ушкоджень звукових канавок фоноциліндрів, які взагалі мають втрату первісної форми звукової хвилі (рис. 1,б та рис. 2, в,г). Тому часткове відновлення записів фоноциліндрів, в яких присутні нелінійні викривлення, можливе тільки за рахунок звуження частотного діапазону сигналу до 2–3 кГц. Зважаючи на цінність раритетних записів — це не велика втрата. Звичайно реконструкції сигналу при цьому не відбувається, але сприймання викривлень стає менш помітним.

Висновки

Аналіз фізичного стану інформаційної поверхні фоноциліндрів показав, що практично всі вони мають механічні та біологічні (мається на увазі мікроорганізми, які спричинюють появу плісняви) пошкодження, що значно впливає на якість відтвореної звукової інформації і вимагає індивідуального підходу при реконструкції й очищенні кожної фонограми в залежності від ступеня пошкоженості.

Розроблений на методах комп'ютерної обробки сигналів алгоритм відновлення та реконструкції звукового сигналу забезпечує високу якість кінцевих (реконструйованих і очищених) фонограм завдяки можливостям:

- індивідуального підходу при реконструкції й очищенні кожної фонограми;
- видаленні тільки тих деградованих сигналів, що є відчутними слухачеві;
- урахування відомої особливості слухового апарату людини у відношенні оцінки гучності тонів різної висоти;
- максимального збереження первісності та природності звучання раритетних фонограм, зважаючи на ступінь ушкодження фоноциліндра.

1. Довгалюк І. Фоноархів Осипа Роздольського // Вісник Львівського університету. Серія філологічна. — 1999. — Вип. 27. — С. 165–170.

2. Petrov V.V., Onishenko O.S., Kryuchin A.A., Shanoylo S.M., Ryabokon I.P. Optomechanical Method of Edison Cylinders Sound Reproduction. An Audio Engineering Society Preprint 4491 (M 4). Presented at 102-nd Convention. — Munich (Germany). — 1997, 22–25 March.

3. *Новикова Г., Скобець І.* До питання про збереження фонографічних воскових циліндрів (у НБУ ім. В.І. Вернадського) // Бібліотечний вісник. — 1996. — № 6. — С. 10–12.
4. *Shanoylo S.M., Kosyak I.V., Petrov V.V., Kryuchin A.A.* Reading and processing of audio information reproduced from Edison phonograph cylinders by method of laser interferometry. Proc. SPIE Vol. 4402, Laser Techniques and Systems in Art Conservation, Renzo Salimbeni; Ed. –10/2001– p.194–201.
5. *Vaseghi S.V. and Rayner P.J.W.* Detection and suppression of impulsive noise in speech communication systems // IEEE Proceedings. Part 1. — 1990. — **137**(1), Febr. — P. 38–46.
6. *Косяк І.В.* Усунення широкосмугового поверхневого шуму в фонограмах раритетних носіїв запису // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2004. — Т. 6, № 4. — С.12–22.
7. *Tamas B. Vako, Tamás Daboczi, Barry A. Bell.* Automatic Compensation of Nonlinear Distortions // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Anchorage. — AK (USA). — 21-23 May. — 2002.
8. *Preis D. and Polchlopek H.* Restoration of nonlinearly distorted magnetic recordings // J. Audio Eng. Soc. — 1984. — **32**(12), Jan. — P. 79–86.

Надійшла до редакції 02.02.2005