

ОПТИМІЗАЦІЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ГЕЙТІНГУ ДЛЯ АДАПТИВНОГО ШУМОЗАГЛУШЕННЯ

Багаєв Д.О.

denys.bahaiev@nure.ua

Науковий керівник – к.т.н., старший викладач Желанов О. О.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МІРЕС
м. Харків, Україна

Digital audio processing is essential for professional recording, bioacoustics, and speech recognition, where background noise often degrades signal quality. Spectral gating helps reduce noise by separating harmonic components from unwanted acoustic artifacts using the Fast Fourier Transform (FFT), which converts audio from the time domain to the frequency domain. By optimizing FFT window size and using parameters such as the over-subtraction factor (α) and spectral floor (β), systems can balance noise reduction with the preservation of natural sound.

Цифрова обробка аудіосигналів сьогодні є фундаментом для професійного звукозапису, біоакустики та систем розпізнавання мовлення. Головним викликом у цих сферах залишається фоновий шум, який деградує якість корисного сигналу.

Використання спектрального гейтінгу дозволяє не просто приглушувати звук, а адаптивно виділяти гармонійні компоненти, відокремлюючи їх від небажаних артефактів. Цей процес базується на декомпозиції складних коливань, де будь-який сигнал розглядається як сукупність хвиль різної частоти та амплітуди.

Переваги сучасних підходів до шумозаглушення полягають у гнучкості налаштувань: спектральний гейтінг забезпечує високу точність сепарації звуку, а використання методів згладжування (Smoothing) допомагає усунути «музичний шум» – специфічні сплески енергії, що часто виникають після обробки. Більш просунуті гібридні системи сьогодні поєднують класичні алгоритми з нейронними мережами, що дозволяє працювати навіть з нестатичними шумами, як-от гавкіт собак чи випадкові кроки, зберігаючи при цьому природність тембру.

Обробка звуків музичних інструментів зі складною спектральною структурою потребує спеціального налаштування алгоритмів шумозаглушення. Такі сигнали мають гармонійну будову, де обертони кратні основній частоті, однак їхній спектр додатково змінюється через резонанси інструмента, акустику середовища та динамічні зміни висоти тону під час виконання. Для точного аналізу використовується спектральне перетворення Фур'є з великими вікнами, що забезпечує високу частотну роздільну здатність і дозволяє відокремлювати гармоніки від шумових компонентів. Подальше застосування спектрального гейтінгу допомагає зменшити шум

у проміжках між гармоніками, зберігаючи природність звучання.

Щоб уникнути часового розмиття сигналу, використовують значне перекриття вікон і спеціальні віконні функції, що забезпечує баланс між ефективним шумозаглушенням і збереженням тембральних особливостей аудіосигналу.

Центральну роль у цій темі відіграє перетворення Фур'є (FFT). Воно слугує математичним "містком", який переводить аудіо з часової області (де ми бачимо лише загальну амплітуду) у частотну. Це критично важливо для гейтінгу: завдяки Фур'є система бачить звук як набір окремих каналів. Це дозволяє накладати "ворота" на кожну частоту окремо: якщо енергія в конкретному каналі нижча за поріг шуму, вона закривається, а корисні обертони інструмента залишаються недоторканими.

Оптимізація розміру вікна Фур'є дозволяє досягти балансу: достатньо велике вікно ідентифікує навіть найтонші вібрато скрипки, а правильна віконна функція (наприклад, Ганна або Геммінга) мінімізує витік енергії між частотами.

Математично цей процес описується моделлю адитивного шуму, де вхідний сигнал $x(k)$ є сумою чистого сигналу $s(k)$ та перешкоди $n(k)$. У частотній області це дає змогу оцінювати чистий сигнал через спектральне віднімання.

Таблиця 1 – Ключові параметри математичної моделі

Параметр	Технічна роль	Вплив на результат
α (Over-subtraction)	Коефіцієнт надлишкового віднімання	Допомагає "агресивніше" видаляти флуктуації шуму
β (Spectral Floor)	Спектральна підлога	Запобігає повній тиші, прибираючи ефект «вакууму»
Вікно FFT (N)	Розмір блоку даних	Визначає частотну роздільну здатність (наприклад, $N = 8192$)

Сфера застосування таких оптимізованих систем охоплює реставрацію архівних записів, мобільний зв'язок, де потрібно виділити голос користувача серед вуличного гулу, та навіть медицину для аналізу серцевих тонів. Узагальнюючи, можна сказати, що ефективність адаптивного шумозаглушення залежить від точного налаштування параметрів FFT та здатності алгоритму підлаштовуватися під динамічні зміни акустичного середовища.

Сучасний розвиток галузі рухається в бік поєднання класичної математики Фур'є з інтелектуальними фільтрами, що гарантує студійну якість звуку в реальному часі.

Список використаних джерел:

1. Carnegie Mellon University [Електронний ресурс] URL: <https://course.ece.cmu.edu/~ece491/homework/Boll79.pdf>, (дата звернення 09.03.2026 р.)
2. The Csound FLOSS Manual [Електронний ресурс] URL: <https://flossmanual.csound.com/sound-modification/fourier-analysis-spectral-processing>, (дата звернення 09.03.2026 р.)
3. Smith S. W. Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists. Elsevier. 2013. 650 p.
4. Allen B. Downey Think DSP: Digital Signal Processing in Python. – O'Reilly Media. – 2016. – 165 p.