

ФІЗИКА ЗВУКУ В ПРОГРАМУВАННІ: АЛГОРИТМИ СТВОРЕННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ВІРТУАЛЬНИХ СИНТЕЗАТОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація:

У роботі розглядається, як фізичні властивості звукової хвилі перетворюються на програмний код при створенні віртуальних інструментів (VST-плагінів). Спираючись на дослідження в галузі цифрової обробки сигналів та методи усунення цифрового шуму (аліасингу), проаналізовано базові алгоритми генерації цільного басу. Описано логіку роботи програмного осцилятора та методи збереження чистоти низьких частот.

Ключові слова: цифровий звук, VST-плагіни, генерація басу, осцилятор, програмування аудіо, аліасинг, DSP.

Abstract:

The paper explores how the physical properties of sound waves are translated into software code when creating virtual instruments (VST plugins). Based on research in digital signal processing and methods for eliminating digital noise (aliasing), basic algorithms for generating deep bass are analyzed. The logic of a software oscillator and methods for maintaining the clarity of low frequencies are described.

Keywords: digital audio, VST plugins, bass generation, oscillator, audio programming, aliasing, DSP.

Вступ

Сьогодні створення музики майже повністю перейшло у цифрові робочі станції (DAW), де замість громіздкого фізичного обладнання використовуються програми – віртуальні синтезатори. Проте, щоб написати код, який генеруватиме глибокий та чистий бас, недостатньо просто знати синтаксис мови програмування. Необхідно розуміти фізичну природу звуку. Метою цієї роботи є розбір того, як закони фізики перетворюються на алгоритми при розробці низькочастотних цифрових інструментів.

Фізична модель звукової хвилі та математичні основи осцилятора

З точки зору фундаментальної акустики, звук – це пружні механічні коливання, що хвилеподібно поширюються у середовищі. Їхніми ключовими параметрами є амплітуда, яка визначає наше суб'єктивне сприйняття гучності, та частота, що безпосередньо відповідає за висоту тону. У цифровій розробці віртуальних інструментів та VST-плагінів ці безперервні фізичні процеси математично моделюються спеціальними класами-осциляторами. Вони виступають алгоритмічними генераторами дискретних масивів даних, які з високою точністю імітують реальні зміни атмосферного тиску. Найпростішою базовою формою таких коливань є ідеальна синусоїда (рис. 1), яка є абсолютно незамінною для синтезу глибокого саб-басу (у діапазоні 30–60 Гц). Її унікальність полягає у повній відсутності вищих гармонік (обертонів) та наявності виключно однієї фундаментальної частоти. Саме ця властивість забезпечує ідеальну прозорість та чистоту звучання в низькому регістрі, дозволяючи уникнути фазових конфліктів та спектрального «бруду» під час фінального зведення композиції.

СИНУСОЇДА (Sine Wave)



ПИЛКОПОДІБНА ХВИЛЯ (Sawtooth Wave)

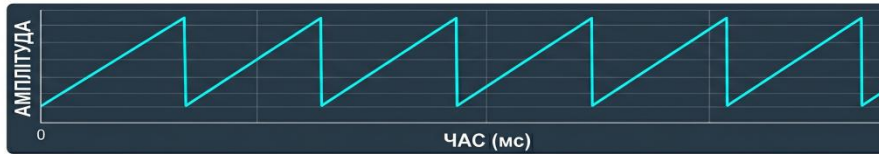


Рис. 1. Синусоїда та пилкоподібна хвиля

З математичної точки зору, генерація базового синусоїдального сигналу в програмному осциляторі описується рівнянням гармонічного коливання:

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi)$$

де $y(t)$ – поточне значення амплітуди сигналу, A (Amplitude) – максимальна амплітуда (пікове значення гучності), f (Frequency) – частота коливань у герцах (визначає висоту тону), t (Time) – поточний час, а φ (Phase) – початкова фаза коливання.

Проблема цифрового аліасингу та обмеження смуги частот

Однак, у сучасній електронній музиці базової синусоїди часто буває недостатньо, і виникає необхідність у використанні складніших та агресивніших форм звукових хвиль, зокрема пилкоподібної (Sawtooth). Оскільки її математична модель містить миттєві перепади амплітуди, це фізично призводить до генерації практично нескінченного та безперервного спектра вищих гармонік (обертонів). Саме тут спрацьовує фундаментальне обмеження цифрової обробки сигналів, що описується класичною теоремою Котельникова-Найквіста: будь-яка комп'ютерна система здатна коректно та без спотворень відтворити виключно ті частоти, які не перевищують строгу межу Найквіста (тобто дорівнюють половині встановленої частоти дискретизації). При наївній, прямій генерації таких різких математичних кутів виникає деструктивне явище аліасингу (рис. 2). У цьому процесі надлишкові високочастотні гармоніки не зникають, а парадоксальним чином «згортаються» (так званий ефект frequency folding) і відбиваються назад у нижній, чутний людським вухом діапазон. У результаті вони перетворюються на паразитний, негармонійний металевий цифровий шум, який повністю руйнує акустичну чистоту віртуального інструмента.

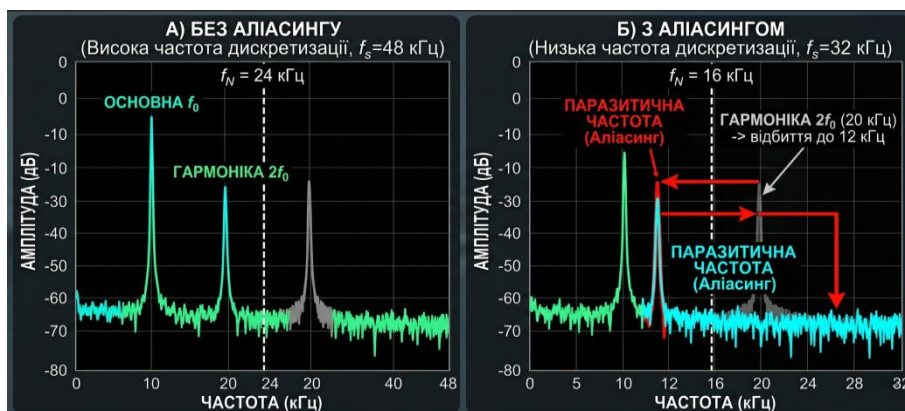


Рис. 2. Порівняння спектрів: без аліасингу та з аліасингом

На рисунку наведено порівняльний спектральний аналіз складеного сигналу за різних умов дискретизації. Ліва частина ілюструє спектр за умови високої частоти дискретизації, де всі гармонічні

складові знаходяться строго нижче частоти Найквіста, що забезпечує чисте відтворення. Права частина демонструє фізику виникнення явища аліасингу: при зниженні частоти дискретизації вищі гармоніки перевищують теоретичну межу і дзеркально відображаються у низькочастотному діапазоні. У спектрі з'являються паразитні частоти, які не є кратними основному тону, що на практиці призводить до значних нелінійних спотворень звукового потоку.

Алгоритмічна оптимізація та метод PolyBLEP

Для усунення цифрового шуму застосовують band-limited осцилятори. Замість ідеально різкого стрибка амплітуди програма виконує згладжування фази. Алгоритм PolyBLEP використовує поліноміальну інтерполяцію для коригування різкого фронту хвилі (рис. 3). Це дозволяє відсікати високі гармоніки до моменту їх перетворення на шум, зберігаючи характерну «щільність» басу.

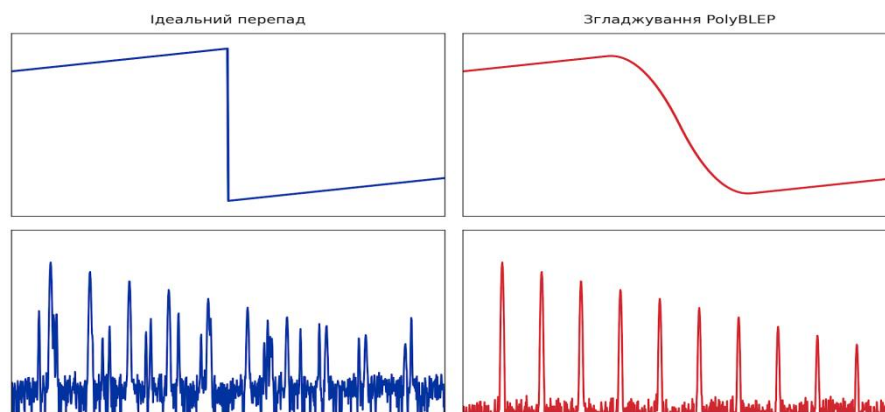


Рис. 3. Різкий фронт хвилі та згладжування PolyBLEP

Рисунок демонструє ефективність застосування алгоритму згладжування для усунення високочастотних артефактів. У лівій частині зображено пряму математичну генерацію різкого фронту хвилі (верхній графік) та відповідний їй спектр (нижній графік), який містить значну кількість шумових компонентів між основними гармоніками. Права частина ілюструє результати роботи алгоритму PolyBLEP. Використання поліноміальної інтерполяції згладжує перепад амплітуди в часовій області на величину кроку дискретизації. Як наслідок, спектральний аналіз підтверджує критичне зниження рівня паразитних частот, при цьому енергія основних гармонік сигналу залишається незмінною.

Висновок

Підсумовуючи вищезазначене, можна впевнено стверджувати, що розробка сучасних аудіоплагінів та віртуальних синтезаторів є надзвичайно складною точкою перетину класичної фізики акустики та прикладної комп'ютерної інженерії. Сліпе перенесення фізичних моделей звуку в цифровий код без урахування дискретної природи комп'ютера неминуче призводить до критичних артефактів та спотворень. Лише глибоке розуміння математичного апарату, принципів теореми Котельникова-Найквіста та застосування просунутих алгоритмів обмеження смуги частот, таких як PolyBLEP, дозволяє розробникам перетворювати рядки коду на фізично коректний, глибокий та чистий звук, який відповідає високим стандартам сучасної музичної індустрії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Smith J. O. Alias-Free Digital Synthesis of Classic Analog Waveforms // Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA), Stanford University. – 2001.
2. Pirkle W. Designing Software Synthesizer Plug-Ins in C++: For RackAFX, VST3, and Audio Units. – New York : Focal Press, 2014.
3. Zölzer U. Digital Audio Signal Processing. – 2nd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2008.
4. Oppenheim A. V., Schaffer R. W. Discrete-Time Signal Processing. – 3rd ed. – Upper Saddle River : Pearson Education, 2009.
5. Boulanger R., Lazzarini V. The Audio Programming Book. – Cambridge : MIT Press, 2010.

Дмитро Миколайович Чулюк, студент групи ЗПІ-25Б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: waterwull88@gmail.com.

Науковий керівник: *Володимир Валерійович Мартинюк* – доцент кафедри загальної фізики Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Dmytro Mykolayovich Chuliuk, student of group ЗPI-25B, Faculty of Information Technology and Computer Engineering.

Academic supervisor: *Volodymyr Valeriiovych Martyniuk* – Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua