

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
РІВНЕНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНСТИТУТ МИСТЕЦТВ
КАФЕДРА ЕСТРАДНОЇ МУЗИКИ

УЖИНСЬКИЙ МИХАЙЛО ЮРІЙОВИЧ

Методичні вказівки
до виконання практичної та самостійної роботи

ОСНОВИ ЦИФРОВОГО ЗВУКОЗАПИСУ
ОСНОВИ ЗВУКОЗАПИСУ

для студентів спеціальності 025 «Музичне мистецтво»
освітньої програми
«Музичне мистецтво. Комп'ютерно-електронна музика»

Рівне – 2022

Автор.знак У-33

УДК 781.22:004.4'277(072)

Ужинський М. Ю. Основи цифрового звукозапису : метод. вказівки до виконання практ. та самост. роботи для студентів спец. 025 «Муз. мистецтво» освітньої програми «Муз. мистецтво. Комп'ютерно-електронна музика» / М. Ю. Ужинський ; М-во освіти і науки України, Рівнен. держ. гуманіт. ун-т, І-т мистецтв, Каф. естрадної музики. – Рівне : РДГУ, 2022. – 37 с.

Ужинський М. Ю. кандидат мистецтвознавства, доцент кафедри естрадної музики Інституту мистецтв Рівненського державного гуманітарного університету.

Рецензенти:

заслужений працівник культури України, звукорежисер вищої категорії кіно і телебачення, доцент, завідувач кафедри звукорежисури Київського Національного університету театру кіно і телебачення ім. І. К. Карпенка-Карого **Домбругова Н. М.;**

кандидат мистецтвознавства, доцент кафедри академічного і естрадного вокалу та звукорежисури Національної академії керівних кадрів культури і мистецтв (м. Київ) **Дьяченко В. В.**

Методичні вказівки покликані сприяти кращому розумінню і засвоєнню практичного матеріалу та самостійної роботи з дисципліни «Основи звукозапису» (Модуль «Цифровий звукозапис») студентами спеціальності 025 «Музичне мистецтво» освітньої програми «Музичне мистецтво. Комп'ютерно-електронна музика».

Розглянуто та схвалено на засіданні кафедри естрадної музики Інституту мистецтв Рівненського державного гуманітарного університету, протокол № 1 від 25.01.2022 р.

Розглянуто та рекомендовано до друку навчально-методичною радою Інституту мистецтв, Рівненського державного гуманітарного університету, протокол № 1 від 26.01.2022 р.

ЗМІСТ

Передмова	4
<i>Основи звуку в цифровій формі</i>	<i>5</i>
<i>Принцип аналого-цифрового перетворення (АЦП)</i>	<i>8</i>
<i>Принцип цифро-аналогового перетворення (ЦАП)</i>	<i>20</i>
<i>Способи передачі даних між цифровими приладами</i>	<i>23</i>
Термінологічний словник	33
Література	35

ПЕРЕДМОВА

Відновлення та подальший розвиток національної культури в незалежній Українській державі, яке відбувається на тлі процесів глобалізації світових культурних інституцій, розвиток новітніх технологій в усіх галузях людської діяльності, у тому числі – культурі й мистецтві, вимагає значної кількості висококваліфікованих кадрів у мистецькій сфері, особливо в забезпеченні професійного підходу до використання інформаційних технологій.

Виняткового значення в умовах стрімкого розвитку аудіовізуальної продукції в Україні набуває питання дотримання міжнародних стандартів у галузі авторських і суміжних прав щодо цифрового звукозапису, тиражування та розповсюдження творів мистецтва. Саме тут необхідно забезпечити професійний підхід до питань розвитку дискретного звукового виробництва та підготовки висококваліфікованих фахівців.

За останнє десятиріччя цифрові технології і аудіовізуальні носії накопичення звукової інформації остаточно витіснили “володарюючі” до цього часу аналогові системи запису/відтворення звукового тракту та засоби фіксації, пов’язані з ними. Як у професійній світовій, так і у вітчизняній сучасній естраді, студіях звукозапису різних форм використовується дедалі більше цифрових форматів високої розподільної здатності, і випускники вишів відповідних профільних спеціалізацій повинні фахово оцінити як їх технічні характеристики, функційні можливості так і особливості специфіки звучання цифрової звукотехніки та програмно-комп’ютерного забезпечення. Знання основ цифрового звукозапису передбачають у студентів не тільки наявний базис технічних знань, але ґрунтовного розуміння акустичних і психоакустичних процесів. Усе це надасть можливість, чіткого розуміння характеру тих перетворень, які передбачають зміну аналогового сигналу в цифрову форму і зворотно. Представлена методична рекомендація допоможе розібратися у складних технологіях цифрового звукозапису на початковій його стадії.

Основи звуку в цифровій формі

Перетворення звукового сигналу в цифрову форму полягає у вимірюванні миттєвих значень його амплітуди через рівні проміжки часу і представленні отриманих значень, званих відліками, у вигляді послідовності чисел. Ця процедура називається *аналого-цифровим перетворенням*, а пристрій для її реалізації – *аналого-цифровим перетворювачем АЦП (ADC)*.

Числа, отримані в результаті аналого-цифрового перетворення, визначаються в двоїтій системі числення, тобто у вигляді комбінації всього двох цифр – нулів (0) і одиниць (1).

Процес перетворення безперервного аналогового сигналу в послідовність його миттєвих значень (*вибіроч*) називається *дискретизацією*.

Визначення чисельного значення величини вибірки (відліку) називається *квантуванням*. Для цього весь діапазон можливих змін амплітуди перетворюваного сигналу ділиться на безліч *рівнів квантування*, кількість яких визначається розрядністю використаного при цьому двоїстого числа. Чим більше число розрядів квантування, тим менша відстань між рівнями квантування (*крок квантування*) і тим вище виходить точність перетворення.

У процесі квантування за величину вибірки (відліків) приймається номер найближчого рівня квантування.

У деяких існуючих цифрових форматах використовується 16-розрядне квантування. Це дозволяє отримати точність перетворення $1/2_{16} = 1/65536$.

З числом розрядів квантування N фізично пов'язаний динамічний діапазон D звукового сигналу.

$$D = 6N + 1,76 \text{ дБ} \sim 6N + 2 \text{ дБ}.$$

Унаслідок цього, для цифрових систем звукозапису з 16-розрядним квантуванням

$$D = 6 \times 16 + 2 + 98 \text{ дБ}.$$

Швидкість проходження відліків за секунду називається *частотою дискретизації*, а відстань між двома сусідніми відліками – *періодом дискретизації*.

Вибір частоти дискретизації в загальному випадку визначається **теоремою Котельнікова-Шеннона** (теоремою відліків):

“Якщо найвища частота в спектрі функції $S(t)$ менша ніж f_m , тоді функція $S(t)$ повністю визначається послідовністю своїх значень у моменти, віддалені один від одного не більше ніж на $1/2 f_m$ секунд”.

У даному випадку під функцією $S(t)$ слід розуміти безперервний аналоговий звуковий сигнал, а під частотою f_m – найвищу частоту потрібного звукового діапазону. Якщо необхідно точно відтворити аналоговий сигнал у діапазоні до f_m , то відліки повинні слідувати з періодом принаймні вдвічі меншим, ніж період частоти f_m . Іншими словами, частоту дискретизації слід вибирати так, щоб вона була принаймні вдвічі вище за максимальну частоту звукового діапазону.

При цьому мінімально можлива частота дискретизації $F_d = 2f_m$ називається **частотою Найквіста F_N**

$$F_N = 2f_m .$$

На практиці частота дискретизації F_d :

$$F_d = (2,1...2,4) f_m.$$

Найчастіше необхідна смуга звукових частот обмежується 20...22 кГц, а частота дискретизації при цьому вибирається рівною 44,1 або 48 кГц.

Це обумовлено тим, що між найвищою частотою звукового діапазону f_m і половиною частоти дискретизації $F_d/2$ повинен бути деякий інтервал, в який потрібно помістити зріз амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) фільтра низьких частот (ФНЧ), розташованого на вході блоку аналого-цифрового перетворення. Цей ФНЧ, який називається **анти-елайсинг фільтром**, потрібний для того, щоб жодна складова спектра вище $F_d/2$ не потрапила на перетворювач, тому що спектр сигналу, який робить його дискретним, має періодичну структуру. Окрім низькочастотної частини, що відображає сам звуковий сигнал, він має ще і високочастотні компоненти у вигляді бокових смуг з центрами в точках, кратних частоті дискретизації. Якщо спектр

звукового сигналу перед перетворенням не обмежити, то його високочастотна частина може бути накладена на суміжну бокову смугу. При цьому в перетвореному сигналі виникнуть неусунені спотворення субдискретизації у вигляді “паразитних” високочастотних складових. Звучання фонограми буде безнадійно спотворене.

Оскільки в процесі квантування відліки можуть приймати тільки значення, кратні кроку квантування, то при оцінці дійсного значення вибірки неминуче виникатиме деяка помилка q . Вочевидь, що величина помилки рівна половині кроку квантування і не залежить від рівня квантованого сигналу. Функцію $q(t)$ прийнято називати **шумом квантування**. Шум квантування буде нижчий тоді, коли буде менше крок квантування, або чим більше число розрядів квантування.

Вплив шуму дуже залежить від рівня перетворюваного аналогового сигналу. Якщо його амплітуда мала, тоді виникають спотворення, обумовлені появою вищих гармонік, за зубчатої форми шуму квантування. На слух це сприймається як спотворення, а не як шум.

Ослабити вплив таких спотворень можна за допомогою додавання іншого шуму. Якщо додати у вхідний сигнал так званий “білий шум” (шум, амплітуда якого практично постійна в широкому діапазоні частот), то зв’язок між шумами квантування і амплітудою сигналу порушується. При цьому відтворений сигнал уже не виглядатиме у спотвореній формі. Додавання такого шумоподібного маскуючого сигналу (діфера) є важливою частиною процесу перетворення.

Призначення ще одного елемента тракту аналого-цифрового перетворення – *приладу вибірки і зберігання* (ПВЗ) зрозуміле з його назви. Він (прилад) призначений для утримання значення квантування сигналу на час перетворення.

Вище йшлося тільки про такий вид аналого-цифрового перетворення, при якому відстань між рівнями квантування однакова у всьому діапазоні зміни амплітуди перетворюваного сигналу. Цей вид називають *лінійним*, або *квантуванням з постійним кроком*.

В інших випадках для перетворення використовують **нелінійне квантування**, або **квантування із змінним кроком**. У цьому випадку крок квантування збільшується із збільшенням рівня перетворюваного сигналу. Для слабких сигналів крок квантування маленький, для сильних сигналів – великий. За інших рівних умов такий вигляд квантування дозволяє краще передавати слабкі сигнали, оскільки відношення сигнал/шум буде вищим ніж у разі лінійного квантування.

Крім того, нелінійне квантування дозволяє значно підвищити щільність запису (або швидкість передачі інформації в цифровій формі), тому що малим числом розрядів можна передавати великий динамічний діапазон сигналу.

Характеристика квантування має вигляд логарифмічної кривої, що оптимальним чином відповідає умовам завдання. На практиці реалізувати цю характеристику складно. Тому її показують у вигляді ламаної лінії, котра складається з відрізків, що розбивають весь діапазон перетворення на низку під-діапазонів, у межах яких крок квантування залишається постійним. Такі під-діапазони називаються **сегментами квантування**. Сегментів може бути від трьох до десяти і більше. Чим їх більше, тим краще, але при цьому реалізація системи стає складніша.

Перетворення лінійної характеристики в нелінійну здійснюється після АЦП за допомогою спеціального цифрового кодуєчого пристрою. Зворотне перетворення у пристрої, який приймає/відтворює сигнал, реалізується декодером.

Нелінійне квантування має один дуже істотний недолік, слабкі ділянки сигналу на фоні сильного сигналу можуть істотно спотворюватися або навіть зникати зовсім. Тому якість звуку при нелінійному квантуванні завжди гірша, ніж при лінійному.

Принцип аналого-цифрового перетворення (АЦП)

Дискретизація (discrete – роздільний, що складається з окремих частин) – перша з трьох основних операцій, які необхідно виконати для перетворення аналогового сигналу в цифрову форму.

Дискретизація – це представлення безперервного аналогового сигналу послідовністю його значень (відліків). Ці відліки беруться в моменти часу, відокремлені один від одного інтервалом, який називається інтервалом дискретизації. Величину, зворотну інтервалу між відліками, називають частотою дискретизації. Частота дискретизації повинна мати певне мінімальне значення залежно від ширини спектру самого аналогового сигналу. Дискретизацію можна розглядати як процес амплітудної модуляції рівновіддалених імпульсів малої тривалості. Величина імпульсу рівна значенню сигналу в момент дискретизації. Ці імпульси можна вважати вибірками, або відліками сигналу. При належному виборі інтервалу дискретизації забезпечується збереження всієї інформації, що міститься в безперервному аналоговому сигналі. Дискретизація безперервного сигналу може не вносити ніяких спотворень. При виконанні деяких обмежень, що накладаються на дискретний сигнал, і належному виборі частоти дискретизації початковий аналоговий сигнал може бути точно відновлений. Проте квантування завжди пов'язане з необоротними спотвореннями і сигнал, відтворений на виході ЦАП, є деякою неточністю початкового безперервного сигналу.

Квантування є заміною величини відліку сигналу найближчим значенням з набору фіксованих величин – рівнів квантування. Рівні квантування ділять увесь діапазон можливої зміни значень сигналу на кінцеве число інтервалів – кроків квантування. Розташування рівнів квантування обумовлене шкалою квантування. Використовуються як рівномірні (крок квантування не залежить від значення сигналу), так і нерівномірні шкали.

Кодування. Квантований сигнал може приймати тільки кінцеве число значень. Це дозволяє представити його в межах кожного інтервалу дискретизації числом, рівним порядковому номеру рівня квантування. У свою чергу це число можна виразити комбінацією деяких знаків або символів. Сукупність знаків (символів) і система правил, за допомогою яких дані представляються у вигляді набору символів, називають кодом. Кінцева послідовність кодових символів називається кодовим словом. Квантований

сигнал можна перетворити в послідовність кодових слів. Ця операція і називається *кодуванням*.

Кожне кодове слово передається в межах одного інтервалу дискретизації. Для кодування сигналів звуку й зображення широко застосовують двоїстий код. Якщо квантований сигнал може приймати N значень, то число двоїстих символів у кожному кодовому слові $n > \log_2 N$. Один розряд, або символ слова, представленого в двоїстому коді, називають бітом. Якщо число рівнів квантування рівне цілому ступеню числа 2, то $N = 2^n$. Варіанти двоїстого кодування номерів рівнів квантування приведені в таблиці.

Передискретизація (oversampling): це дискретизація сигналу з частотою, вищою за частоту дискретизації. Передискретизація може бути аналоговою, коли з підвищеною частотою робляться вибірки початкового сигналу, або цифровою, коли між уже існуючими цифровими відліками вставляються додаткові, розраховані шляхом інтерполяції. Інший шлях отримання значень проміжних відліків у вставленні нулів, після чого вся послідовність підлягає цифровій фільтрації. В АЦП використовується аналогова передискретизація, у ЦАП – цифрова.

Передискретизація використовується для спрощення конструкцій АЦП і ЦАП. За вимогами на вході АЦП і виході ЦАП повинен бути встановлений аналоговий фільтр, лінійний у робочому діапазоні і круто спадаючою за його межами. Реалізація такого аналогового фільтра досить складна. У той самий час при підвищенні частоти дискретизації введені нею віддзеркалення спектра пропорційно зміщуються від основного сигналу, і аналоговий фільтр може мати набагато меншу крутизну зрізу. Ще одна перевага полягає в тому, що “помилки” амплітудного квантування (шум дроблення), розділені по усьому спектру квантованого сигналу, при підвищенні частоти дискретизації розділяються по більш широкій смузі частот, так що на спектр основного звукового сигналу надходить менша кількість шуму. Кожне подвоєння частоти знижує рівень шумів квантування на 3 дБ. Передискретизація разом із збільшенням відліків і підвищенням точності та виводом їх на ЦАП потрібної розрядності допомагає дещо поліпшити якість «відродженого» звукового

сигналу. З цієї причини навіть у 16-бітних системах не рідкість установлення 18 і 20-бітного ЦАП з передискретизацією. АЦП і ЦАП з передискретизацією за рахунок значного зменшення часу роздільної здатності можуть обходитись без схеми вибірки-зберігання.

Для нумерації рівнів використовуються позитивні й негативні числа. При семи рівнях квантування і двоїстому кодуванні потрібно використовувати кодові слова з трьох двоїстих символів, причому взаємозв'язок між рівнями і трирозрядними кодовими словами залежить від вибраного коду. Прямий код припускає представлення знака в старшому розряді кодового слова – *біт* знака рівний нулю для позитивних чисел і одиниці – для негативних. Після біта знака слідує двоїстий код абсолютної величини номера квантування. Прямий код є природним для людини, проте для обробки даних у процесорі зручнішими виявляються зворотний і додатковий коди. Позитивні числа відображаються однаково у всіх трьох приведених у таблиці кодах. Кодові слова негативних чисел у зворотному коді можуть бути отримані із слів прямого коду шляхом заміни нулів одиницями і одиниць – нулями в двох розрядах, що відображають абсолютну величину. Для представлення негативних чисел у додатковому коді треба до слів зворотного коду додати одиницю. Основна перевага додаткового коду полягає в тому, що складання і віднімання чисел може виконуватися в цифрових процесорах за допомогою одного і того ж цифрового пристрою.

Як правило, сигнали оцифровуються з мінімально необхідною частотою дискретизації з міркувань економії, при цьому шум квантування є білим, тобто його спектральна щільність потужності рівномірно розподілена по всій смузі. Якщо ж оцифрувати сигнал із частотою дискретизації, набагато більшої, ніж за теоремою Котельнікова-Шеннона, а потім піддати цифровій фільтрації для придушення спектра позачастотною смугою початкового сигналу, то відношення сигнал/шум буде краще, ніж при використанні всієї смуги. Таким чином можна досягти ефективної точності, більшої, ніж розрядність АЦП. Передискретизація також може бути використана для пом'якшення вимог до крутизни переходу від смуги пропускання до смуги

пригнічення анти-аліасинг фільтру. Для цього сигнал оцифровують, наприклад, на удвічі більшій частоті, потім проводять цифрову фільтрацію, пригнічуючи частотні компоненти поза смугою початкового сигналу і далі знижують частоту дискретизації шляхом децимації.

Фільтрація звуку – процес оброблення електричного звукового сигналу частотно-виборними пристроями з метою зміни спектрального складу звукового сигналу. Завданням фільтрації може бути:

- 1) амплітудно-частотна корекція сигналу (підсилення, або послаблення складових спектра звуку);
- 2) заглушування спектра сигналу або шумів у певній смузі частот.

Фільтри працюють на основі коливання ланок, що складаються з котушок індуктивності та конденсаторів або на основі їх аналогів. Основою фільтрів, реалізованих програмним шляхом, є спектральний аналіз. Спектральний аналіз здійснюється, як правило, за допомогою спеціального алгоритму – швидких перетворень Фур'є. Фільтрація зводиться до перемноження спектральних коефіцієнтів на відповідні значення передавальної функції фільтра.

Види фільтрів. Фільтри характеризуються за допомогою амплітудно-частотної характеристики (АХЧ). Ця характеристика являє собою графік залежності коефіцієнта передачі (амплітуди) $K(f)$ від частоти f . В залежності від розташування смуги пропускання та смуги загородження на осі частот, розрізняють фільтри:

- низьких частот, ФНЧ (low pass);
- високих частот, ФВЧ (high pass);
- смугові (band pass);
- режекторні (band stop);

Основними характеристиками фільтра є:

- частота зрізу (cut off);
- крутизна зрізу (slope);
- ширина смуги пропускання/загородження (bandwidth).

Низькочастотний фільтр пропускає через себе низькі частоти та редагує всі частоти, що перебивають вище частоти зрізу фільтра. Високочастотний фільтр пропускає через себе верхні частоти та редагує частоти нижче частоти зрізу фільтра. Смуговий фільтр пропускає певну смугу частот, та “заглушає” частоти поза смугою. Режекторний фільтр, навпаки, “заглушає” частотну смугу, пропускаючи частоти поза нею. Частотою зрізу фільтра, у цих випадках, називається центральна частота смуги. Оскільки реалізація “ідеального” фільтра, з різким переходом від смуги пропускання до смуги загородження, є неможливою, реальний графік залежності вихідної напруги від частоти являє собою криву лінію. У сучасній аудіотехніці, в т.ч. програмних аудіо редакторах використовують системи фільтрів, зокрема еквалайзери, кросовери та ін.

Дізеринг (dithering – підмішування псевдовипадкового шуму). Деякі характеристики АЦП можуть бути поліпшені шляхом використання методики підмішування псевдовипадкового шуму *дізеринг (dithering)*. Вона полягає в додаванні до вхідного аналогового сигналу випадкового шуму (білий шум) невеликої амплітуди. Для сигналу з шумом, що підмішується, замість простого округлення сигналу до найближчого розряду відбувається випадкове округлення вгору або вниз, причому середній час, протягом якого сигнал заокруглений до того або іншого рівня, залежить від того, наскільки сигнал близький до цього рівня.

Таким чином, оцифрований сигнал містить інформацію про амплітуду сигналу з кращою роздільною здатністю, тобто відбувається збільшення ефективної розрядності АЦП. Негативною стороною методики є збільшення шуму у вихідному сигналі. Фактично, помилка квантування розмивається по декількох сусідніх відліках. Такий підхід є бажанішим, ніж просте округлення до найближчого дискретного рівня. У результаті використання методики підмішування псевдовипадкового сигналу відбувається точне відтворення сигналу в часі. Малі зміни сигналу можуть бути відновлені з псевдовипадкових стрибків шляхом фільтрації. Крім того, якщо шум *детермінований* (амплітуда шуму, що додається, точно відома у будь-який

момент часу), то його можна відняти з оцифрованого сигналу, заздалегідь збільшивши його розрядність, тим самим майже повністю позбавитися від доданого шуму. Звукові сигнали малих амплітуд, оцифровані без псевдовипадкового сигналу, сприймаються на слух дуже спотвореними і неприємними. При підмішуванню псевдовипадковому сигналі дійсний рівень сигналу представлений середнім значенням декількох послідовних відліків. Дуже схожий процес, також званий dithering (або дифузія помилок), застосовується в комп'ютерній графіці при малій кількості біт на піксель. При цьому зображення стає більш спотвореним, але візуально сприймається реалістичніше, ніж те саме зображення, отримане простим квантуванням.

Нойс шейпінг (noise shaping). У результаті оцифрування вхідного аналогового сигналу до нього додається шум квантування. Його спектр рівномірний і починається від 0 Гц і до частоти Найквіста. Рівномірність щодо частоти й відсутність взаємозв'язку шуму з сигналом досягається використанням дизеринга і правилом квантування, при якому округлення амплітуди проходить до ближньої опорної величини.

Використання більш складних правил округлення допомагає отримати інші (нерівномірні) спектральні характеристики шумів округлення при збереженні повної потужності шумів. Ураховуючи те, що людський слуховий апарат має спад сприймання на високих і на дуже низьких частотах, і використовуючи спеціальні правила округлення під час квантування, можна отримати так званий спектр шумів округлення. Вони здебільшого перебувають у межі частот, котрі найменш сприймаються на слух (понад 20 кГц). Частота дискретизації для ЦАП з 256-кратним підвищенням частоти становить близько 11,2 МГц, відповідно, можна перемістити весь шум квантування в область частот, практично недосяжних людському вуху (вище 20 кГц). Таким чином значно поліпшується відношення сигнал/шум в діапазоні частот котрі прослуховуються в цифровому сигналі, без збільшення кількості біт.

Використання нойс шейпінга можливе і без переміщення шумів у високочастотну смугу, недосяжну людському слуху. Для цього, під час

переходу від 20-ти-24-хбітного початкового сигналу до 16-тибітного, формується спектр шумів квантування, котрий має форму, зворотну до кривої чутливості слухового апарату людини. Тобто, де наш слух найбільш чутливий до шумів, буде мінімум на кривій спектру потужності шумів, і навпаки. Там, де слух найменш чутливий до шуму, буде сконцентровано максимум шумів. Таким чином, шипіння в межах 3 – 4 кГц, які особливо подразнюють слух, стають більш м'які й непомітні, а спотворення при невеликих рівнях сигналу стають менш ймовірними.

Слід ставитися критично й розсудливо до рекламних заяв фірм-виробників цифрової звукотехніки про поліпшення звуку після використання дизеринга, нойс шейпінга і т.д. Усе це набувається з досвідом практичної роботи, постійним переглядом відповідної технічної літератури, участі у конференціях, наукових семінарах та інших заходах.

Джиттер (jitter). Цифровий звук передається між двома цифровими приладами по сигналу з прямокутною формою хвилі. Джиттер – це коливання крутизни фронтів цього сигналу і невеликі випадкові зміни місцеперебування фронтів по часу. Усе це призводить до невеликих випадкових змін швидкості передачі цифрових відліків. Якщо фронт має малу крутизну або відстав по часу, то цифровий сигнал ніби запізнюється, і навпаки. Існує формулювання щодо джиттера: *дрижання фази* сигналу. В дійсності фізичний цифровий джиттер за дією впливу щодо відтворення звуку аналогічний детонації. За фактом – внесені джиттером спотворення набагато помітніші в цифровому звуці.

У сучасних цифрових системах звукозапису і звуковідтворення основним джерелом джиттера є АЦП, тому що сучасні синхронізатори частоти дискретизації більш удосконалені і вносять джиттер менший, ніж аналогово-цифровий перетворювач. Частота дискретизації АЦП задається кварцовим генератором, а кожен кварцовий генератор (особливо бюджетний, дешевий) має фазові шуми. Таким чином, моменти часу отримання відліків сигналу, розташовані на осі часу зовсім, не рівномірні. Це призводить до «розмивання» спектра сигналу і погіршення показників сигнал/шум. Крім

того, на високочастотних компонентах сигналу джиттер може привести до пульсації амплітуд. Для уникнення цього негативного явища потрібно використовувати високоякісні кварцові генератори з добре стабілізованим джерелом живлення, котрі відповідають вимогам та стандартам і виготовлені фірмами-виробниками, котрі спеціалізуються на цій продукції.

Крім низькоякісних АЦП, джиттер виникає під час передачі цифрового сигналу від одного цифрового приладу до іншого через неоднорідність середовища самого передавання. Джиттер чути при моніторингу під час передачі, коли частота дискретизації пристрою, котрий приймає сигнал, синхронізована з частотою пристрою, котрий передає. Студійні звукорежисери пам'ятають, що шуми і спотворення мають негативну властивість об'єднуватись і потрапляти у збільшеній формі в загальний міх. Свій внесок додасть і джиттер.

У разі, якщо джиттер не потужний, і тріск, спотворення звуку на низькій і високій частоті не проявляється, тоді він не зберігається на запису, тому що відтворювальний пристрій регулює тактову частоту за допомогою власного генератора. Саме з цим явищем пов'язаний парадокс цифрового звуку, коли копія може звучати краще за оригінал. У подоланні джиттера використовується якісна комутація фірм-виробників, котрі спеціалізуються на кабельній продукції, сумісність опору для запобігання віддзеркалень сигналу, використання приладів, які регенерують цифровий сигнал. Також слід вимикати зовнішню синхронізацію частоти дискретизації приладу під час відтворення. Якщо подібна синхронізація не потрібна.

При використанні системи типу АЦП-комп'ютер-CD, проблем із цифровим спотворення, таким як джиттер, не виникає. Крім джиттера, пов'язаного з АЦП, ніякого додаткового джиттера під час передачі цифрових сигналів між цифровими пристроями не виникає. Якщо програмно обробити звукові файли і записати на компакт-диск за допомогою CD-рекордера, котрий підключений до комп'ютера по SCSI або IDE інтерфейсу, також проблем з джиттером не виникне.

Аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП) входять до комплектації великої частини інноваційної апаратури для звукозапису, оскільки обробка звуку проводиться у більшості випадках на комп'ютерах. Під час аналогового запису АЦП в ПК необхідний для перетворення сигналу в потік цифрових даних, який далі буде записаний на компакт-диск.

Сучасні АЦП, використані в звукозапису, можуть працювати на частотах дискретизації до 192 кГц. Поширена думка, що цей показник надмірний і використовується з суто маркетингових міркувань. А звуковий аналоговий сигнал не містить стільки інформації, скільки може бути збережено в цифровому сигналі при такій високій частоті дискретизації. І з цієї причини для мультимедійної аудіотехніки класу Hi-Fi використовується частота дискретизації 44.1 кГц (стандарт запису для CD-дисків). Широка смуга також спрощує і здешевлює реалізацію анти-алісінг фільтрів. Аналого-цифрове перетворення використовується скрізь, де потрібно обробляти, зберігати або передавати сигнал у цифровій формі. Швидкі відео АЦП використовуються, наприклад, в ТБ тюнерах. Повільні (8, 10, 12, або 16 бітові) АЦП, як правило, входять до складу мікроконтролерів. Дуже швидкі АЦП необхідні у цифрових осцилографах.

Основні способи побудови електронних аналогово-цифрових перетворювачів.

АЦП прямого перетворення, або паралельний АЦП містить компаратори на кожен дискретний рівень вхідного сигналу. У будь-який момент часу тільки компаратори, відповідні рівням нижче за рівень вхідного сигналу, видадуть на своєму виході сигнал перевищення. Сигнали зі всіх компараторів поступають на логічну схему, яка видає цифровий код, залежний від того, скільки компараторів показали перевищення. Паралельні АЦП дуже швидкі в роботі, але зазвичай мають розрядність не більше 8 біт (256 компараторів), оскільки мають велику й дорожу схему. АЦП цього типу мають відносно великий розмір мікросхеми, високу вхідну ємність і можуть видавати короточасні неточності на виході. Часто використовуються для відео, або інших високочастотних сигналів.

АЦП послідовного наближення, або АЦП з порозрядним врівноваженням містить компаратор, допоміжний ЦАП і регістр послідовного наближення. АЦП перетворить аналоговий сигнал у цифровий за N кроків, де N – розрядність АЦП. Послідовність дій за визначенням чергового біта полягає в такому. На допоміжному ЦАП виставляється аналогове значення, утворене з біт, уже визначених на попередніх кроках процесу. Біт, який повинен бути визначений на цьому кроці, виставляється в “1”, більш “молоді” біти встановлені в “0”. Отримане на допоміжному ЦАП значення порівнюється з вхідним аналоговим значенням. Якщо значення вхідного сигналу більше значення на допоміжному ЦАП, тоді визначальний біт отримує значення “1”, в іншому випадку “0”. Таким чином, визначення підсумкового цифрового значення нагадує двоїстий пошук. АЦП цього типу володіють одночасно високою швидкістю і хорошою розрядністю.

АЦП диференціального кодування (delta-encoded ADC) містять реверсивний лічильник, код з якого поступає на допоміжний ЦАП. Вхідний сигнал і сигнал з допоміжного ЦАП порівнюються на компараторі. Завдяки зворотному зв'язку з компаратора на лічильник, код на лічильнику постійно міняється так, щоб сигнал з допоміжного ЦАП якомога менше відрізнявся від вхідного сигналу. Після деякого часу різниця сигналів стає меншою, при цьому код лічильника прочитується на вихідному цифровому сигналі АЦП. АЦП цього типу мають дуже великий діапазон вхідного сигналу і високу розрядність, але час перетворення залежить від вхідного сигналу, хоч і обмежений. В іншому, не кращому випадку, час перетворення рівний: $T_{\max} = (2q) / f_c$, де q – розрядність АЦП, f_c – частота тактового генератора лічильника. АЦП диференціального кодування зазвичай є хорошим вибором для оцифровки сигналів у реальному часі, оскільки більшість сигналів у фізичних системах не схильні до стрибкоподібних змін. У деяких АЦП використовується комбінований підхід: диференційне кодування й послідовне наближення; це особливо добре працює у випадках, коли відомо, що високочастотні компоненти в сигналі відносно невеликі.

АЦП з урівноваженням заряду (до них належать АЦП з двостадійною інтеграцією, також АЦП з багатостадійною інтеграцією і деякі інші) містять генератор стабільного струму, компаратор, інтегратор струму, тактовий генератор і лічильник. Перетворення відбувається в два етапи – дві стадії інтегрування. На першому етапі значення вхідного сигналу перетвориться в струм, який подається на інтегратор струму (заряд інтегратора спочатку рівний нулю); цей процес триває протягом часу TN , де T – період тактового генератора, N – константа (велике ціле число, визначає час накопичення заряду). Коли накопичення заряду закінчене, вхід інтегратора відключається від входу АЦП і підключається до генератора стабільного струму. Полярність генератора така, що він зменшує заряд, накопичений в інтеграторі. Процес розряду триває до тих пір, поки заряд в інтеграторі не зменшиться до нуля. Час розряду вимірюється шляхом рахунку тактових імпульсів від моменту початку розряду до досягнення нульового заряду на інтеграторі. Порахована кількість тактових імпульсів і буде вихідним кодом АЦП. Можна показати, що кількість імпульсів n , порахована за час розряду, дорівнює: $n = U_{вх}N(RI_0) - 1$, де $U_{вх}$ – вхідна напруга АЦП, N – число імпульсів етапу накопичення, R – опір резистора, що перетворює вхідну напругу в струм, I_0 – струм генератора стабільного струму.

Таким чином, потенційно нестабільні параметри системи не входять у підсумкове визначення. Це є наслідком двостадійності процесу: похибки, введені на першому і другому етапах, взаємно віднімаються. Принцип двостадійної інтеграції дозволяє перетворити відношення двох аналогових величин у відношення числових кодів, практично без унесення можливих додаткових помилок. Типова розрядність АЦП цього типу становить від 10 до 18 двоїстих розрядів. Додатковим чинником є можливість побудови перетворювачів, нечутливих до періодичних перешкод (для прикладу, від мережевого живлення) завдяки точній інтеграції вхідного сигналу за фіксований часовий інтервал. Недоліком цього типу АЦП є низька швидкість перетворення. *АЦП з урівноваженням заряду використовуються у вимірювальних приладах високої точності.*

Конвеєрні АЦП використовують два або більше кроки-піддіапазону. На першому кроці проводиться “грубе” перетворення (з низькою розрядністю). Далі визначається різниця між вхідним сигналом і аналоговим сигналом, відповідно до результату “грубого” перетворення (з допоміжного ЦАП, на який подається цей код). На другому кроці знайдена різниця піддається перетворенню, і отриманий код об’єднується з “грубим” кодом для набуття повного цифрового значення. АЦП цього типу швидкі, мають високу розрядність і невеликий розмір корпусу.

Сигма-Дельта АЦП (звані також Дельта-Сигма АЦП) проводить аналого-цифрове перетворення з частотою дискретизації, що у багато разів перевищує потрібну і шляхом фільтрації залишає в сигналі тільки потрібну спектральну смугу.

Принцип цифро-аналогового перетворення (ЦАП)

У цифровій апаратурі поєднання пари АЦП і ЦАП є взаємодоповнювальним. Для перетворення аналогового сигналу в цифрову форму попереднім пристроєм вважається АЦП, однак у більшості випадків основною частиною АЦП рахується ЦАП і далі взаємодія “аналог-цифра” і “цифра-аналог”. Тому доцільніше розглянути принципи роботи у нижче викладеній послідовності.

Процес перетворення послідовності відліків в аналоговий сигнал називається **цифро-аналоговим перетворенням**, а пристрій для його здійснення – **цифро-аналоговим перетворювачем** ЦАП (DAC).

На виході ЦАП подається ступінчастий аналоговий сигнал, величина якого рівна чисельному значенню відповідних відліків. Щоб із ступінчастого сигналу отримати гладку криву, його необхідно пропустити через ФНЧ з характеристикою аналогічною тій, яку мав ФНЧ на вході АЦП. Тут також важливо, щоб спектр звукового діапазону не перекривався спектром найближчої бокової смуги, бо це також призведе до появи спотворень.

Для цього характеристика ФНЧ повинна мати достатньо крутий зріз, такий самий, як у випадку анти-елейсинг фільтру при аналого-цифровому

перетворенні. Побудова фільтрів високого порядку пов'язана з відомими труднощами, про які згадувалось у попередньому розділі. Тут потрібне застосування пасивних елементів та високоякісних операційних підсилювачів з хорошою температурною і часовою стабільністю. Оскільки все це призначено для використання в побутовій апаратурі невеликих розмірів, усі компоненти повинні бути малогабаритними.

Фільтри високого значення володіють істотно нелінійною фазовою характеристикою. А це призводить до помітних на слух людини спотворень звуків музичних інструментів з крутими перепадами рівня – барабанів, тарілок, рояля тощо.

Щоб полегшити вимоги до фільтрації перетвореного сигналу, перед ЦАП можна розмістити цифровий фільтр. Виконати такий фільтр з потрібними характеристиками значно простіше, ніж аналоговий. Він може мати достатньо високий порядок і при цьому володіти лінійною фазовою характеристикою.

Характеристика цифрового фільтру, як і спектр цифрового сигналу, теж має періодичну структуру і теж повторюється на частотах, кратних частоті дискретизації. Тому, якщо цифровий фільтр працюватиме на частоті дискретизації F_d , то усунути високочастотні компоненти остаточно не вдасться.

Проблема може бути вирішена шляхом штучного збільшення частоти дискретизації F_d у декілька разів. При цьому недостатність значення сигналу обчислюється за відомим значенням методами інтерполяції. Схема блоку цифро-аналогового перетворення в цьому випадку набирає вигляду, показаного на.

Передискретизація дозволяє значно понизити вимоги до характеристики аналогового ФНЧ. Навіть подвоєння F_d дає можливість зробити зріз АЧХ досить пологим. А при збільшенні частоти дискретизації в чотири, вісім і більше разів, вимоги до аналогового ФНЧ знижуються до цілком помірних. За рахунок цього відношення сигнал/шум і динамічний діапазон можна зробити навіть більшим, ніж визначена 16-бітним квантуванням величина в 98 дБ.

Усі цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) працюють шляхом вибірки вхідних значень через фіксовані інтервали часу. Отже, вихідні значення є неповною картиною того, що подається на вхід. Дивлячись на вихідні значення, немає жодної можливості встановити, як поведився вхідний сигнал між вибірками. Якщо відомо, що вхідний сигнал міняється достатньо поволі щодо частоти дискретизації, то можна припустити, що проміжні значення між вибірками перебувають десь між значеннями цих вибірок. Якщо ж вхідний сигнал міняється швидко, то ніяких припущень про проміжні значення вхідного сигналу зробити не можна, отже, неможливо однозначно відновити форму початкового сигналу. Якщо послідовність цифрових значень, виданих АЦП, перетвориться знову в аналогову форму ЦАП, тоді бажано, щоб отриманий аналоговий сигнал був максимально точною копією початкового сигналу. Якщо вхідний сигнал міняється швидше, ніж перетворюються його відліки, то точне відновлення сигналу неможливе і на виході ЦАП буде неточний сигнал.

Помилкові частотні компоненти сигналу (які відсутні у спектрі початкового сигналу) отримали назву *alias* (*помилкова частота, побічна низькочастотна складова*). Частота помилкових компонент залежить від різниці між частотою сигналу і частотою дискретизації. Наприклад, синусоїдальний сигнал з частотою 2 кГц, дискретизований з частотою 1,5 кГц був би відтворений як синусоїда з частотою 500 Гц. Ця проблема отримала назву накладення частот – *aliasing*. Для запобігання накладенню спектрів, сигнал, котрий подається на вхід АЦП, повинен бути пропущений через фільтр низьких частот для придушення спектральних компонент, частота яких перевищує половину частоти дискретизації. Цей фільтр отримав назву *anti-aliasing*, його застосування надзвичайно важливо при побудові АЦП.

Взаємний зв'язок «аналог-цифра» і «цифра-аналог». У цифровому звукозапису аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) і цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) входять до складу всіх цифрових звукових систем. Зараз існують технічні можливості для реалізації всіх видів оброблення, запису і передачі сигналів звуку в цифровій формі. Проте, як датчики

первинного сигналу, так і пристрої відтворення звуку поки що використовують аналогові прилади (за своєю структурою) – мікрофон і гучномовець. На вхід АЦП поступає безперервний сигнал, що описує звук як фізичний процес. На виході АЦП – послідовність чисел, тобто потік цифрових даних, що підлягає запису, обробці, зберіганню або ж передачі. Усі ці операції виконуються в елементі системи, що має узагальнену назву “Підсистема обробки і передачі звукових сигналів”. ЦАП приймає цифровий сигнал у вигляді послідовності чисел і перетворює його в еквівалентний безперервний сигнал – аналог відтвореного звукового коливання.

Взаємодія АЦП і ЦАП показана на схемі пунктирною лінією, є віртуальною.

Розгляд пари АЦП/ЦАП, утвореної за допомогою відповідного інтерфейсу, допоможе при аналізі або проектуванні цифрових звукових систем. Фундаментальне значення АЦП і ЦАП для цифрових звукових систем визначається тим, що звукова хвиля як фізичне явище являє собою безперервний процес. Параметри АЦП і ЦАП повинні бути узгоджені із закономірностями сприйняття звуків, вони роблять великий вплив на характеристики цифрової звукової системи в цілому і повинні відповідати критеріям IEEE (*Інституту інженерів з електроніки і електротехніки*) відповідно до вимог NARAZ (*Академії звукозапису*).

Способи передачі даних між цифровими приладами

Цифрові сигнали можна описувати за допомогою параметрів, типових для аналогових сигналів, наприклад таких, як ширина спектра або смуга частот. Але такий опис не був би достатнім. Важливим показником, що характеризує цифровий потік, є швидкість передачі, або швидкість потоку даних. Якщо довжина слова рівна n , а частота дискретизації FD , то швидкість передачі даних, виражена в числі двоїстих символів в одиницю часу (біт/с), визначається як твір довжини слова на частоту дискретизації: $Z = nFD$. Смуга

частот, яка необхідна для передачі цифрового потоку, залежить від форми імпульсів, використовуваних для передачі символів кодових слів.

Імпульси, що задовольняють умову Найквіста, дозволяють передавати потік даних у двоїстій формі зі швидкістю, рівною двом бітам за секунду, у смузі частот, рівній 1 Гц – швидкість передачі становить 2 (біт/с)/Гц. Необхідна смуга частот може бути скорочена, якщо застосовуються багатопозиційні сигнали, але за рахунок скорочення перешкод захисту. Використання восьмипозиційних імпульсів дозволяє збільшити втричі бітову швидкість передачі до 6 (біт/с)/Гц і зменшити втричі потрібну для передачі смугу частот каналу зв'язку.

Кодові слова можна передавати в паралельній або послідовній формах. Для передачі в паралельній формі треба використовувати n ліній зв'язку, кожного з яких передається один біт кодового слова. Символи кодового слова одночасно передаються лініями в межах інтервалу дискретизації. Для передачі в послідовній формі інтервал дискретизації треба розділити на n підінтервалів – тактів. У цьому випадку символи слова передаються послідовно по одній лінії, причому на передачу одного символу слова відводиться один такт.

Кожен символ слова передається за допомогою одного або декількох дискретних сигналів-імпульсів, тому перетворення аналогового сигналу в послідовність кодових слів часто називають **імпульсно-ковою модуляцією ІКМ (ADPCM)**. Форма представлення слів певними сигналами визначається форматом коду. Можна, наприклад, установлювати в межах такту високий рівень сигналу, якщо в даному такті передається двоїстий символ «1», і низький – якщо передається двоїстий символ «0» (такий спосіб представлення називають форматом БПН – “без повернення до нуля”). Також використовуються трьохрозрядні двоїсті слова – це дозволяє мати максимум 8 рівнів квантування. У паралельному цифровому потоці кожною лінією в межах інтервалу дискретизації передається один біт трьохрозрядного слова; старший біт слова передається за допомогою дискретного сигналу D_2 , молодший – D_0 . У послідовному потоці (сигнал D) інтервал дискретизації

ділиться на три такти, в яких передаються (починаючи із старшого) біти трьохрозрядного слова.

Операції, пов'язані з перетворенням аналогового сигналу в цифрову форму (дискретизація, квантування і кодування), можуть виконуватися за допомогою окремої інтегральної мікросхеми. Ці операції можуть також бути завданням, яке вирішується процесором більш високого рівня, наприклад кодером джерела. Фільтр низьких частот є елементом АЦП.

Інтернет (Internet). Досягненням наукового потенціалу та технологічних засобів стало винайдення Інтернету, що поєднує в собі функції практично всіх сучасних ЗМІ – преси, фотожурналістики, радіо, телебачення. Мережа синтезує текст, звук, відео. Крім того, має ще й власні ознаки – гіпертексти, гіперпосилання, мультимедіа... А ефект присутності, який вважається однією зі специфічних властивостей телебачення, в Інтернеті знайшов не тільки своє втілення, але й сприяв його розвитку. “Віртуальні розмови”, прямі ефіри, телемости, телеконференції – і все це в режимі real time (реальний час), це ті складники, без яких нині немислима мережа.

Удосконалення мережі, а найголовніше – її унікальна можливість оперативно доносити інформацію до аудиторії в будь-якому куточку світу, використовуючи властивості різних традиційних засобів масової інформації, спричинили виникнення новітнього ЗМІ. Ураховуючи швидкий прогрес наукової думки, найближчими десятиліттями Інтернет мультимедіа займуть одне з провідних місць, а може й найголовніше, серед традиційних джерел інформації. На сучасному етапі виникла нагальна потреба підготовки спеціалістів цього напрямку. Саме тому на спеціалізації “Комп’ютерно-електронна музика” поглиблено вивчають роботу в мережі Internet.

Рушійною силою для створення глобальної комп’ютерної мережі стала так звана “холодна війна”. У 1957 році при департаменті оборони США було створене Агентство дослідницьких проектів особливої складності – ARPA. Одним із напрямків роботи Агентства стало створення комп’ютерних технологій для військових цілей, зокрема для зв’язку. Перед американськими ученими Пентагон поставив нелегке завдання: створити комп’ютерну мережу,

якою могли б користуватися військові при ядерному нападі на країну. Мережа повинна була використовуватися для здійснення зв'язку між командними пунктами системи оборони. Головним критерієм при створенні мережі вважалась її невразливість до часткової руйнації під час ядерної атаки. Навіть при руйнації деяких гілок і вузлів повідомлення повинні були потрапляти до адресата. Єдиним способом формування такої комп'ютерної мережі було особливе з'єднання комп'ютерів, при якому комунікація не залежала б від якого-небудь центрального сервера. При втраті одного, декількох чи навіть більшої частин комп'ютерів підсистеми повинні були продовжувати працювати, забезпечуючи можливість удару у відповідь. У 1962 році було запропоновано концепцію, що базується на двох основних ідеях:

- 1) відсутність центрального комп'ютера – усі комп'ютери мережі рівноправні;
- 2) пакетний засіб передачі файлів по мережі.

Ще одним теоретичним джерелом створення мережі стала концепція «Галактичної мережі». Відповідно до цієї концепції за допомогою мережі будь-яка людина з будь-якої точки Землі може одержувати інформацію й обмінюватися файлами з будь-якою іншою людиною. Нині ця концепція втілена у сучасній мережі Інтернет. Перший значний крок у створенні Інтернету був зроблений 2 вересня 1969 року в Каліфорнійському університеті, де успішно були поєднані комп'ютер з маршрутизатором (мережевий пристрій передачі даних), відомим за назвою Interphones Message Processor. Спочатку мережа допомагала вченим користатися інформацією, що міститься в комп'ютерах колег в інших центрах.

У 1966 році було почате створення комп'ютерної мережі Arpanet. У жовтні 1967 року англійський учений, що досліджував питання пакетної пересилки файлів, уперше застосував термін “пакет”. В основу проекту були покладені три основні ідеї:

- 1) кожний вузол мережі сполучений з іншими, так що існує декілька різноманітних шляхів передачі даних від вузла до вузла;
- 2) усі вузли і зв'язки розглядаються як ненадійні – існують автоматично обновлювані таблиці перенаправлення пакетів;

3) пакет, призначений для сусіднього вузла, відправляється на найближчий до нього вузол, відповідно до таблиці перенаправлення пакетів, при недоступності цього вузла – на наступний і т.д.

Суть ідеї полягає в тому, що файл, який потрібно передати по мережі, розбивається на декілька частин – пакетів. Кожен пакет передається незалежно від інших. На кінцевому пункті в комп'ютері всі пакети збираються в один файл. Оскільки пакети передаються незалежно, то кожен пакет може дійти до кінцевого комп'ютера своїм власним шляхом. Щоб мережа, що складається з рівноправних комп'ютерів, працювала, кожному комп'ютеру присвоюється "ім'я", і в кожен комп'ютер записується таблиця імен усіх комп'ютерів мережі і таблиця з'єднань. Завдяки цим даним кожен комп'ютер "знає", яким шляхом направити пакет. Спочатку перевіряється найкоротший шлях, якщо він зайнятий або зруйнований, то перевіряється наступний найкоротший шлях і т.д. Після того, як пакети потраплять на комп'ютер-отримувач, перевіряється наявність усіх пакетів, що складають файл. Якщо якогось пакета не вистачає, комп'ютер надсилає запит на комп'ютер-відправник і повідомляє, який пакет відсутній. Потрібний пакет наново посилається адресату.

Усі правила кодування і пересилки файлів записуються в мережевому протоколі. Ці ідеї повинні забезпечити функціонування мережі у випадку руйнації будь-якої кількості її компонентів. У принципі, мережу можна вважати працездатною навіть у випадку, коли залишається функціонувати усього два комп'ютери. Крім того, створена за таким принципом система не мала централізованого вузла управління і, отже, безболісно могла змінювати свою конфігурацію.

В американській комп'ютерній індустрії 1970-х - 80-х років різні фірми випускали різні комп'ютери з різними оперативними системами (IBM, Microsoft і Apple). Не дуже складно об'єднати п'ятдесят комп'ютерів IBM у мережу IBM, чи п'ятдесят комп'ютерів Макінтош у мережу Макінтош, але п'ятдесят IBM і п'ятдесят Макінтошів об'єднати в мережу, здатну на обмін інформацією, було набагато складніше. Для мережі Arpanet був створений

протокол IP (Інтернет протокол), що дозволяв поділяти файли на пакети і передавати пакети від вузла до вузла. Потім був створений протокол TCP, що забезпечував передачу пакетів між комп'ютером-відправником і комп'ютером-приймачем, цей протокол дозволяв також досилати загублені пакети. Усі ці властивості протоколу TCP дозволили використовувати його для міжмережевого обміну файлами. 1969 рік вважається роком народження Інтернету, тому що подальші події показали, що основою Інтернет стала мережа Arpanet.

Після Arpanet у США й інших країнах створювалися комп'ютерні мережі, що з'єднували комп'ютерні центри наукових і державних організацій. Багато мереж стали використовувати протокол IP. Цей протокол був зручний тим, що можна легко нарощувати мережу, приєднуючи скільки завгодно нових комп'ютерів. Але, крім IP-мереж, створювалися мережі, що працюють за іншими мережевими протоколами. У 1972 році у Вашингтоні пройшла перша Міжнародна конференція комп'ютерних комунікацій. У конференції брали участь учені з 10 країн. Учасникам конференції вперше в історії продемонстрували мережу Arpanet, вона перестала бути секретною розробкою. Мережа Arpanet – перша глобальна мережа, у ній найбільш повно використані сучасні мережні розробки. Саме тому до Arpanet стали приєднуватися інші мережі, розроблені освітніми, науковими та урядовими організаціями.

З 1972 року починає функціонувати громадська організація INWG – робоча група з міжнародних мереж. INWG координувала роботу зі створення можливості міжмережевого обміну. Для об'єднання мереж, що працюють за протоколом IP, і мереж, що працюють за іншими протоколами, потребувався спеціальний міжмережевий протокол. Такий протокол – TCP розробили у 1974 році. Після об'єднання в 1982 році двох протоколів TCP і IP в один, протокол TCP/IP став стандартним протоколом об'єднаної мережі – Інтернет. У цьому ж році ввели термін «Інтернет».

У середині 1972 року серед користувачів мережі стало поширюватися думка про те, що передавати лист через комп'ютерну мережу набагато

швидше, легше і дешевше, ніж традиційним методом. Так почав зароджуватися перший сервіс, без якого сьогодні не мислимий Інтернет – це E-Mail. У 1976 році з'явилася програма UUCP (Unix-to-Unix Copy), що призвело до створення такої послуги, як UseNet. Саме так спочатку називалася мережа, що дозволяла користувачу ввійти на процесор, де розміщувалася інформація, і вибрати звідти всі потрібні йому матеріали. Уже на початковому етапі розвитку кількість користувачів мережі UseNet щорічно потроювалася.

Наприкінці 80-х років Радянський Союз підключився до мережі Arpanet. У 1990 році мережа Arpanet перестала існувати, і на її місці виник Інтернет. Він уможливив вільний обмін інформацією, незважаючи на відстані й державні межі. Проте на початках його ресурси були доступні лише за допомогою програмного забезпечення, орієнтованого виключно на пересилку файлів і неформатованого тексту. Зрештою, вирішили розробити інфраструктуру, що дозволить обмінюватися результатами досліджень через Інтернет у вигляді звичного відформатованого й ілюстрованого тексту, що включає посилання на інші публікації. Так було започатковано WWW (World Wide Web) – Всесвітню інформаційну павутину, яка на сучасному етапі охопила своїми мережами практично весь комп'ютерний світ і зробила Інтернет доступним і привабливим для мільйонів користувачів.

Сьогодні Інтернет – це об'єднання великої кількості мереж. Кожна мережа складається з десятків і сотень серверів. Сервери сполучені між собою різноманітними лініями зв'язку: кабельними, наземним радіозв'язком, супутниковим радіозв'язком. До кожного серверу підключається велика кількість комп'ютерів і локальних комп'ютерних мереж, що є клієнтами мережі. Клієнти можуть з'єднуватися із сервером не тільки прямими лініями і завдяки звичайним телефонним каналам, але і по покриттю без мережевого з'єднання; кількість клієнтських комп'ютерів, що підключаються до Інтернет, не піддається підрахунку.

S/PDIF (Sony/ Philips Digital Interfas Format) – формат інтерфейсу для передачі цифрових даних між побутовими цифровими приладами, розроблений фірмами Sony і Philips.

AES/EBU (Audio Engineers Society – спілка звукоінженерів, European Broadcast Union – європейське віщальне об'єднання) – цифровий інтерфейс для студійної апаратури.

Обидва інтерфейси є послідовними й використовують однаковий формат сигналу і систему кодування – самосинхронізуючий код ВМС (Biphase Mark Code – код із представленням одиниці подвійною зміною фази), можуть передавати сигнали в форматі РСМ розрядністю до 24 біт з частотою дискретизації до 48 кГц. Кожен відлік сигналу передається 32-розрядним кадром, в якому 20 розрядів використовують для передачі відліків, а 12 – для формування синхронізуючої трембули, передачі додаткової інформації і біта кратності. 4 розряди зі службової групи можуть використовуватись для розширення формату відліків до 24 розрядів. 192 послідовні кадри створюють блок, початок якого відмічається спеціальним кодом преамбули першого кадра. Окрім біта кратності, службова частина слова утримує біт (Validity), котрий повинен бути нульовим для кожного достовірного відліку. У разі прийняття слова з одиничним бітом Validity або порушення кратності в слові приймач, трактує весь відлік як помилковий і може на вибір або замінити його попереднім значенням, або інтерполювати на основі декількох з'єднань достовірних відліків. Відліки, помічені як недостовірні, можуть передавати CD-програвачі та інші прилади, якщо під час зняття інформації з носія не вдалося скоректувати помилки, які виникли під час зчитування.

У службову частину слова входять також біти С (Channel Status – стан каналу) і U (User Bit – біт користувача). Послідовний ланцюг кожного з цих бітів, взятому по одному з кожного кадра блоку, створює 192-розрядне слово службових бітів блоку, де передається інформація про назву твору, номер трека, ідентифікатор передавального приладу, субкод компакт-диску і т.п. По S/PDIF передаються параметри захисту від копіювання (SCMS). За стандартом кодування призначене для передачі одно-і двоканального сигналу, однак при використанні службових розрядів для кодування номера каналу можлива передача багатоканального сигналу.

З електричної сторони S/PDIF передбачає з'єднання коаксіальним кабелем з опором 75 Ом і роз'ємами RCA, амплітуда сигналу – 0,5 В. AES/EBR – передбачає з'єднання симетричним екранованим двопровідним кабелем з трансформаторною розв'язкою по інтерфейс RS-422 з амплітудою сигналу 3-10 В, роз'єми XLR, існують також оптичні варіанти TosLink (пластмасове оптоволокно) і AT&T Link (скляне оптоволокно).

USB (Universal Serial Bus) – універсальна послідовна шина двосторонньої направленості при достатності підключення одного кабеля. Стандартом передбачено наявність чотирьох дротового кабеля: одна пара використовується для передачі і прийому даних, друга – для живлення зовнішнього приладу.

TCP/IP – відкритий протокол, котрий забезпечує двосторонню передачу багатоканального аудіо, управляючих сигналів і службової інформації.

MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*) – цифровий інтерфейс музичних інструментів. Розроблений у 1983 році провідними виробниками електронних музичних інструментів – «Yamaha», «Roland», «Korg», «E-mu» та іншими. Спочатку був призначений для заміни управління між музичними інструментами за допомогою сигналів інформаційних повідомлень, переданих по інтерфейс. Згодом став стандартом, де-факто, в області електронних музичних інструментів і комп'ютерних модулів синтезу.

MIDI являє собою так званий подієвий протокол зв'язку між інструментами. Кожного разу, коли виконавець виконує будь-яку дію з органами управління (натиснення/відпускання клавіш, педалей, зміна положень регуляторів та інше), інструмент формує відповідне MIDI-повідомлення, і в той самий момент посилає його по інтерфейсу. Інші інструменти, отримуючи повідомлення, обробляють їх так само, як і при дії на власні органи управління. Таким чином, потік MIDI-повідомлень є мовби центром дій виконавця.

Специфікація MIDI складається з апаратної специфікації самого інтерфейсу і специфікації формату даних, або протоколу – кодованих даних,

які потрібно передати. Відповідно, розрізняється апаратний MIDI-інтерфейс і формат MIDI-даних, так звана MIDI-партитура. Інтерфейс використовується для фізичного з'єднання джерела і приймача повідомлень, формат даних – для створення, зберігання та передачі MIDI-даних. На сьогодні ці коди передач стали самостійними і зазвичай використовуються окремо один від одного – по MIDI-інтерфейсу можуть передаватися дані будь-якого іншого формату, а MIDI-формат може використовуватися для обробки музичних партитур, без виведення на пристрій синтезу.

Термінологія MIDI:

- **MIDI In** – вхід MIDI-пристрою;
- **MIDI Out** – вихід MIDI-пристрою;
- **MIDI Thru** – ретрансляційний вихід MIDI-пристрою (служить для ретрансляції MIDI-команд іншим приладам);
- **MIDI-данні** – послідовність MIDI-повідомлень або “подій”;
- **MIDI-контролер** – прилад, призначений для генерації MIDI-повідомлень і не вміщених засобів синтезу звуку;
- **MIDI-оператор** – генератор сигналу в поєднанні зі схемою керування;
- **MIDI-стандарт** – для всіх приладів, зроблених у відповідності до цього стандарту. Встановлює відповідні програми інструментів і тембр самих інструментів, а також вимоги стосовно контролю відтворення;
- **GM** (General-MIDI) – MIDI-стандарт розроблений фірмою Roland;
- **GS** (General-Synth) – MIDI-стандарт розроблений фірмою Roland, як продовження GM;
- **XG** (Extended-General) – MIDI-стандарт розроблений фірмою Yamaha.

Термінологічний словник

Інтерфейс – спосіб обміну інформацією між програмою і користувачем, забезпечує обмін між різними апаратними або програмними засобами.

Звуковий редактор – програма, призначена для здійснення різних перетворень та монтажу аудіо даних у цифровому вигляді.

Фільтр/Фільтрація – пристрій або програма, що здійснює перетворення звукового сигналу, у результаті якого відбувається підсилення або послаблення окремих частотних областей спектру сигналу.

Цифровий звукозапис – винахід і розробка теоретики у 20–30-х роках ХХ ст. Автори Гаррі Найквіст (США), Клод Шеннон (США).

Цифровий потік – послідовність/блок аудіоінформації в цифровому форматі.

Цифровий сигнальний процесор – спеціалізований пристрій, призначений для здійснення високошвидкісних перетворень над звуковими сигналами; використовується у звукових картах, модемах та інших приладах.

Частотна складова спектра – синусоїдальне коливання певної частоти.

Шум квантування – підмішується до звукового сигналу під час квантування в результаті округлення амплітуди сигналу до найближчого рівня.

ADC (Analog/Digital Converter) – аналогово-цифровий перетворювач.

AES/EBU – цифровий інтерфейс для студійної апаратури. *Audio Engineers Society* – спілка звукоінженерів, *European Broadcast Union* – європейське мовне об'єднання.

Apple AIFF (Audio Interchange File Format, формат файлів обміну звуком) – стандартний тип звукового файлу в системі Apple Macintosh.

DAC (Digital-Analog Converter) – цифро-аналоговий перетворювач.

Dolby Laboratories Inc. компанія була заснована у 1965 році Рейом Долбі. Цифрові Dolby-технології розроблені в основному для кіноіндустрії.

DD (Dolby Digital) – технологія цифрового кодування звуку.

Dithering – штучне підмішування до звукового сигналу псевдо-випадкового білого шуму, результатом чого є розсіювання шуму квантування по спектру корисного сигналу.

BNC, N, LC, 7/16", 7/8", 15/8", 31/8" – типорозміри коаксіальних високочастотних роз'ємів; на потужність 5 кВт використовуються 7/8".

MIDI (Musical Instrument Digital Interface). Специфікація/стандарт на програмну й апаратну частини, призначена для організації локальної мережі електронних інструментів.

S/PDIF (Sony/Philips Digital Interface Format) – формат інтерфейсу для передачі цифрових даних між побутовими цифровими приладами, розроблений фірмами «Sony» і «Philips».

FireWire – послідовна високошвидкісна шина, призначена для обміну цифровою інформацією між комп'ютером та іншими електронними пристроями, розроблено «Sony» і «Apple».

Jitter («дрижання фази сигналу») – шум, який виник під час оцифрування аналогового сигналу як наслідок нестабільності/неточності часу вибірки відліків АЦП/ЦАП,

Oversampling (передискретизація) – оцифровки сигналу з частотою дискретизації, що перевищує першоджерельну. Спосіб послаблення шуму квантування.

PAC (Perceptive Audio Coding): – алгоритм кодування (стиску) цифрових аудіосигналів, оснований на психоакустичному аналізі.

PCM (Pulse Code Modulation. Імпульсно-кодова модуляція) – спосіб кодування сигналу за допомогою запису абсолютних значень амплітуд.

RC (Remote Control) – дистанційне керування.

USB (Universal Serial Bus) – універсальна послідовна шина двосторонньої направленості при достатності підключення одного кабелю. Стандартом передбачено наявність у кабелі, окрім сигнальної лінії, живлення зовнішнього приладу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гайденко И. А. Роль музыкальных компьютерных технологий в современной композиторской практике: дис. ... канд. искусствоведения: 17.00.03. Харьков, 2005. 187 с.
2. Клименко О. Ф. Информатика та комп'ютерна техніка: навч.-метод. посіб. Київ: КНЕУ, 2002. 534 с.
3. Куц Є. В. Електромузичний інструментарій як еволюційний фактор музичної культури ХХ – початку ХХІ століть: дис. ... канд. мистецтвознава: 26.00.01. Київ, 2013. 200 с.
4. Лазарєв С. М. Електронна музика як соціокультурне явище (друга половина ХХ – початок ХХІ століть): дис. ... канд. мистецтвознавства: 26.01.01. Київ, 2019. 241 с.
5. Максимюк С. З історії українського звукозапису та дискографії. Львів; Вашингтон: Український Католицький Університет, 2003. 288 с.
6. Основи синтезу звуку/ Computer Music Special. Київ, Либідь, 2010. 137 с.
7. Пройдаков Е. М., Теплицький Л. А. Англо-український тлумачний словник з обчислювальної техніки, Інтернету і програмування. Київ: СофтПрес, 2005. 552 с.
8. Ужинський М. Ю. Цифровий формат для художнього і музичного мистецтва. *Актуальні питання культурології. Альманах наук. т-ва «Афіна» кафедри культурології: зб. наук. праць.* Рівне: РДГУ, 2009. Вип. 8. Т. 2. С. 196–199.
9. Acoustic and MIDI orchestration for the contemporary composer / A practical guide to writing and sequencing for the studio orchestra. Burlington: Focal Press, 2007. 289 p.
10. Hawksfords M. Parametric SDM Encoder for SACD in High Resolution Digital Audio. *Reproduced Sound 18 Conference, Vol 24, Part 8.* Stratford-Upon-Avon, UK: Proceedings of the Institute of Acoustics, 2002.
11. Hoffmann F. Encyclopedia of recorded sound /editor. 2nd ed. Routledge: JBL, 2005. 2 v., xii, 1289 p.

12. Holman T. 5.1 Surround Sound – Up and Running. Oxford, UK; Boston, USA: Focal Press, 2000. 274 p.
13. Katz B. Mastering Audio – the art and the science. Boston: Focal Press, 2002. 319 p.
14. Lieser W. Digital Art. Berlin, Germany: H.F. Ullmann. 2009. 239 p.
15. Olsen E., Verna P. The Encyclopedia of Record Producers. New York, USA: Billboard Books, 1998. 893 p.
16. Russel J., Cohn R. Sound Design. London: Bookvica Publishing, 2013. 100 p.
17. Wands B. Art of the Digital Age. London, UK: Thames & Hudson, 2006. 224 p.

Навчально-методичне видання

ОСНОВИ ЦИФРОВОГО ЗВУКОЗАПИСУ

Методичні вказівки

до виконання практичної та самостійної роботи

«ОСНОВИ ЗВУКОЗАПИСУ»

Цифровий звукозапис

для студентів спеціальності 025 «Музичне мистецтво»

освітньої програми «Музичне мистецтво. Комп'ютерно-електронна музика»

Інститут мистецтв (Музичне мистецтво)

Друкується в авторській редакції

Підписано до друку лютий 2022 р.

Формат 60:84 1/16. Папір офсетний № 1.

Умовн. Друк. Арк. 1. Тираж 50 примірників. Замовлення №

Відділ мережевого та інформаційного забезпечення

Рівненського державного гуманітарного університету

33028, м. Рівне, вул. С. Бандери, 12

Методичне видання