

AKADEMIE MÚZICKÝCH UMĚNÍ V PRAZE

**HUDEBNÍ A TANEČNÍ FAKULTA**

Hudební umění

Zvuková tvorba

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**GRANULÁRNÍ SYNTÉZA A JEJÍ APLIKACE**

**André Sklenář**

Vedoucí práce : Doc. MgA. Ing. Ondřej Urban Ph.D.

Oponenti práce: Ing. Milan Guštar Ph.D., Doc. MgA. Martin Pinkas Ph.D.

Datum obhajoby: 6.6.2016

Přidělovaný akademický titul: Bc.

Praha, 2016

ACADEMY OF PERFORMING ARTS IN PRAGUE

MUSIC AND DANCE FACULTY

Music arts

Sound engineering

**BACHELOR THESIS**

**GRANULAR SYNTHESIS AND ITS APPLICATION**

**André Sklenář**

Supervisor: Doc. MgA. Ing. Ondřej Urban Ph.D.

Opponents: Ing. Milan Guštar Ph.D., Doc. MgA. Martin Pinkas Ph.D.

Date of defense: 6.6.2016

Academic degree: Bc.

Praha, 2016

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma

Granulární syntéza a její aplikace

vypracoval(a) samostatně pod odborným vedením vedoucího práce a s použitím uvedené literatury a pramenů.

Praha, dne .....

.....

podpis diplomanta

## **Upozornění**

Využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, nebo jakékoliv nakládání s nimi je možné pouze na základě licenční smlouvy tj. souhlasu autora a AMU v Praze.



## **Abstrakt**

Tato práce si klade za úkol popsat princip granulární syntézy, historii jejího vývoje a jednotlivé aspekty granulárního syntezátoru. Jejím cílem je seznámit hudebníka, skladatele či zvukaře s jejími detaily a zkonsolidovat znalosti technicky znalého uživatele či vývojáře hudební techniky. Práce u čtenáře předpokládá základy fyzikálních vlastností zvuku a jeho digitální reprezentace, stejně jako teoretické základy softwarové analýzy.

Práce je rozdělena na dvě části. První část se věnuje teoretickým vlastnostem granulární syntézy a jejím použití v historii hudby i dnešní době. Druhá část představuje praktickou ukázkou aplikace granulární syntézy ve formě zvukového zásuvného modulu v několika formátech a názorné ukázkou jeho použití.

## **Abstract**

This work aims to describe the principles behind granular synthesis, its development history and individual aspects of a granular synthesizer. It aims to familiarize a musician, composer or sound engineer with its details and consolidate the knowledge of a technically knowledgeable music technology user or developer. The work expects the reader to have a basic knowledge of sound physics and its digital representation, as well as theoretical knowledge of software analysis.

The work is divided into two parts. The first part addresses the theoretical properties of granular synthesis and its usage in music history and today. The second part represents a practical example of an application of granular synthesis in the form of a plug-in in several formats and examples of its usage.

## Obsah

Předmluva.....	1
Úvod.....	2
Historické pozadí.....	2
Princip granulární syntézy.....	3
Syntéza nebo efekt?.....	5
Základní předpoklady.....	6
Granulární syntéza a původní materiál.....	7
Vývoj granulární syntézy.....	7
Iannis Xenakis - Analogique A-B.....	11
Granulární syntéza použitím magnetické pásky.....	12
Digitální éra.....	13
Vývojový software přístupný neprogramátorům.....	16
Variace granulární syntézy.....	17
Moderní použití granulární syntézy.....	19
Ukázka implementace granulárního syntežátoru - GrainJuice.....	20
Uspořádání programu.....	25
Ukázka programového kódu.....	25
Zvukové ukázky.....	27
Závěr.....	29







## Předmluva

Od doby, kdy jsem se začal seznamovat s elektronickou a elektroakustickou hudbou, rostl můj zájem o zkoumání metod kreativní syntézy a úprav zvuku. Již jako hráč na kytaru jsem měl blízko k různým úpravám zvuku pomocí kytarových efektů – flangery, step filtry, chorusy. Když jsem pronikl do studiové nahrávací a produkční práce, objevil jsem problematiku digitálního zpracování zvukového signálu. Díky mému dlouhodobému zájmu o počítačovou techniku a programování jsem se pokoušel proniknout do technických detailů a implementací efektů a syntezátorů. Postupem času jsem implementoval IIR a FIR filtry, kompresor, vektorový syntezátor a různé efekty pro kreativní práci se zvukem. Když jsem se začal věnovat také elektroakustické hudbě, granulární syntéza mi byla ze studí již známa. Tato bakalářská práce byla tedy skvělou příležitostí granulární syntézu prozkoumat a také ji naprogramovat ve formě zásuvného modulu.

Psát tuto bakalářskou práci na téma granulární syntézy se zdálo být naprosto přirozené, neboť je skloubením mých tvůrčích, technických i řemeslných zvukařských znalostí a schopností.

# Úvod

Tato práce postupně rozebere historické pozadí granulární syntézy a důvody jejího vzniku ze společenského a technologického pohledu, popíše její princip, rozebere jednotlivé typické parametry granulárního syntezátoru a bude se také věnovat praktickým jejím použití v digitální doméně.

Popíše historické kořeny smýšlení o *mikrozvuku* (angl. microsound) a rané pokusy aplikovat granulární syntézu pomocí magnetických pásek, obtíže s tím způsobené a důvody, proč se muselo čekat na vývoj v oblasti digitálních technologií pro umožnění volného rozletu granulární syntézy a její popularizace.

## Historické pozadí

Hudebníci a skladatelé se vždy pokoušeli najít nové metody vytváření zvuků a jejich kombinací. Tyto metody byly ovlivněny dobovými estetickými nároky a předpoklady, kulturními vlivy a dědictvím. Nejbouřlivější rozvoj začaly zažívat prostředky hudebních vyjádření ve dvacátém století díky prudkému technologickému, společenskému rozvoji a postupnému přechodu k postindustriální společnosti. Společenské změny dávaly vznikat novým tématům a technologický pokrok umožňoval vznik nástrojů, které umožnily uspokojit požadavky na nové způsoby tvorby a zpracování zvuku.

S příchodem nejdříve mechanických, poté elektronických nástrojů se prudce rozšířila paleta zvukových možností a s dalším technologickým vývojem přestávala být výsadou výzkumných studií a movitých institucí – stala se přístupnou širší veřejnosti, i když se tento přerod dokončil až s příchodem a popularizací digitálních technologií začátkem 21. století.

Skladatelská komunita musela začít odlišně nahlížet na materii zvuku jako takovou. Již nebyla primárně vnímána ve formě not a harmonií, cemuž daly pokusy o elementarizaci zvuku.

Ve chvíli, kdy začala existovat možnost zvuk poměrně jednoduše zaznamenat a poté ho opakovaně reprodukovat, začalo využití těchto strojů přesahovat jejich původní záměr. Zaznamenaný zvuk byl poprvé přehráván pozpátku, byly vytvářeny smyčky i zvukové koláže. Magnetická páska umožnila stříh audio záznamu s minimálními zvukovými artefakty a na tehdejší dobu minimálním opotřebením záznamu při jeho přehrávání, záznamu a další manipulaci. Je pochopitelné, že se skladatelé a zvukoví experimentátoři stále pokoušeli překonávat existující hranice. Jednou z nich byla velikost jednotlivých dílů, ze kterých byly koláže slepovány (z francouzského *collage* – lepení). Elektronické hudební nástroje skladatelům umožnily zmenšovat a zpřesňovat časové rozlišení jednotlivých zvukových událostí a gest. Nejzazším případem této zvukové miniaturizace bylo užití *filtrovaných impulsů* (viz dále). V paralelní linii se vyvíjely metody zmenšování ohniska pozornosti u již existujícího audio materiálu.

## Princip granulární syntézy

Granulární syntéza je jednou ze základních zvukových syntéz, která pracuje s *mikrozvukem*. Na rozdíl od ostatních typů syntéz vyžaduje granulární syntéza již existující audio materiál, který je jí upravován. Z tohoto hlediska je granulární syntéza *spíše efektem* než syntézou v pravém slova smyslu.

Jak ještě zmíníme dále, granulární syntéza přistupuje ke zvuku zcela odlišně, než syntézy aditivní či subtraktivní. Zatímco aditivní syntéza pracuje na principu sčítání sinusových vln a subtraktivní na filtraci komplexních signálů jako pila či obdélník, granulární syntéza pracuje především v časové doméně a zdrojový materiál pro ni nehraje roli. Podobným způsobem lze také granulovat předem připravené zvukové vlny a docílit tak velmi organických padových zvuků (této metodě se někdy také říká *grainable synthesis*). Princip granulární syntézy spočívá v rozdělení vstupního audio signálu v čase na jednotlivé úseky, typicky 1-50ms. Tyto výseky – zrnka (angl. *grains*) jsou základem granulární syntézy. Úpravou některých parametrů jednotlivých zrn a jejich variací v čase či ve *virtuálním zvukovém prostoru* docílíme množství různých tónů.

Mezi úpravy jednotlivých zrn patří:

- Zisk (gain):
  - Úprava hlasitosti jednotlivých zrn.
- Frekvence
  - Přeladění jednotlivých zrn jak v oktávách, tak v libovolných intervalech. V digitální doméně tohoto docílíme převzorkováním.
- Panorama
  - Rozdílné umístění ve virtuálním prostoru
- Obálka
  - Aplikace odlišných obálek, ASD (attack, sustain, decay) i okénkování
  - Na rozdíl od funkce *sustain* v jiných syntezátorech (Moog aj.), zde určuje nikoli *amplitudu* signálu po dobu držení klávesy, ale *dobu*, po kterou zůstává zrno v amplitudě maximální. Stejně tak *decay* neurčuje dobu, za kterou přejde hlasitost signálu na úroveň *sustain*, ale dobu, za kterou se hlasitost vrátí zpět na nulu. Jedná se tedy o fade-in a fade-out. *Tento* rozdíl je zřejmý, neboť ryzí granulární syntezátor není ovládán klávesami.
- Délka zrnka
  - Různé délky bufferu, který se naplňuje audio materiálem
- Pořadí zrněk v čase
  - Míra zamíchání jednotlivých zrn
- Filtry
  - Filtrace jednotlivých zrn rozdílnými procesory
- Roztažení
  - Změna délky zrna za zachování jeho frekvence.

Další globální parametr granulární syntézy:

- Hustota
  - Nejdůležitější parametr granulární syntézy, který určuje množství zrn v textuře zvuku. Je obvykle určena počtem zrn za vteřinu. Hustota zrn ovlivňuje tón, hlasitost i výšku textury. Použitím velmi nízké hustoty můžeme docílit rytmických zvuků, naopak čím je hustota vyšší, tím je i harmonické spektrum výsledného zvuku bohatší.

## Syntéza nebo efekt?

Zmínil jsem, že granulární syntézu považuji spíše za efekt než za syntézu v pravém slova smyslu a toto nyní objasním – domnívám se, že je nutné jakýkoli proces atomizovat na jeho jednotlivé části. Obecně se jedná v první řadě o samotnou syntézu zvuku a v druhé o její zpracování. Metoda syntézy zvuku je dle mého agnostická vůči technickému řešení – není důležité, zda při např. aditivní syntéze tvoříme sinusové vlny pomocí *wavetable* techniky, nebo je digitálně generujeme (aproximujeme) za běhu programu, nebo je vytváříme reverzní FFT. Stále se jedná o aditivní syntézu. Stejně jako není podstatné, zda vlny *pilového* tvaru generujeme vybíjením kondenzátoru, naivně generujeme digitálně za běhu nebo opět použijeme předpočítanou a navzorkovanou vlnu.

Považme příklad, kdy aditivní syntezátor tvoří sinusové vlny subtrakcí velmi úzkým filtrem z bílého šumu. Jedná se o syntézu aditivní, nebo subtraktivní?

Jak již bylo řečeno, technické řešení není spojeno s principem syntézy, a v takovém případě mluvíme o syntéze aditivní.

Z tohoto hlediska, je-li v granulárním syntezátoru, který sám sebe takto pojmenovává, již zahrnuta některá metoda syntézy, je nutné na ni v tomto smyslu nahlížet jako na

samostatný blok, který není hlavním těžištěm našeho bádání a vzhledem k téměř nekonečným možnostem DSP, kdy propojováním jednotlivých (sub)modulů tvoříme výsledný program, se i vzhledem k zúžení vymezení této práce budeme věnovat především samotnému granulačnímu procesu.

Je třeba také zmínit určitou nesourodost mezi názvem této metody zpracování zvuku a jejím těžištěm, která nejspíše pramení z jejího překotného praktického vývoje na úkor jejího teoretického poznání.

## Základní předpoklady

Granulární syntéza může pracovat buď takzvaně v offline režimu, kdy je aplikována mimo reálný čas na vstupní audio, nebo v reálném čase, kdy se vstupní audio ukládá do bufferu a její výsledek je ihned k dispozici. Výhody a nevýhody jednotlivých přístupů jsou stejné jako u jakýchkoli jiných audio procesorů – při práci v reálném čase jsou větší nároky na rychlost algoritmu a především také prostý fakt, že *nevidíme dopředu*, tedy můžeme zrnka pouze zpoždovat. Kdybychom chtěli zrnka posouvat v čase dopředu, musíme přidat zpoždění (latenci) celému procesu – čímž by se nám mohla zvýšit latence celého audio proudu (toku).

Granulární syntéza může mít libovolný počet audio vstupů i výstupů, lze ji tedy použít i při vícekanálovém zpracování zvuku. Jedním z častých použití granulární syntézy je míchání typově různých druhů vstupních dat (například housle v jednom kanálu, viola v druhém) k docílení různých tónů. Ve svém principu není granulární syntéza omezena pouze na zpracování audio signálu – granulovat můžeme jakákoli sériová data, jako videosnímky, ale i například text.

Jedním ze základních a velmi často žádaných výsledků granulární syntézy je natahování či smršťování v čase (ang. *time-stretching*) a přeladování (angl. *detuning*), který funguje na principu několika páskových hlav.

## Granulární syntéza a původní materiál

Granulární syntéza nám umožňuje určité *zcizení* původního materiálu, však charakteristika původního materiálu je ponechána. Speciálním případem, kdy se tónbr původního materiálu neprojeví ve výsledném zvuku je rychlé opakování jednoho zrna, kdy i při určité rychlosti opakování a především je-li zrno vyextrahováno z náběžné hrany původního materiálu. Tomuto výslednému efektu se také říká *stutter*.

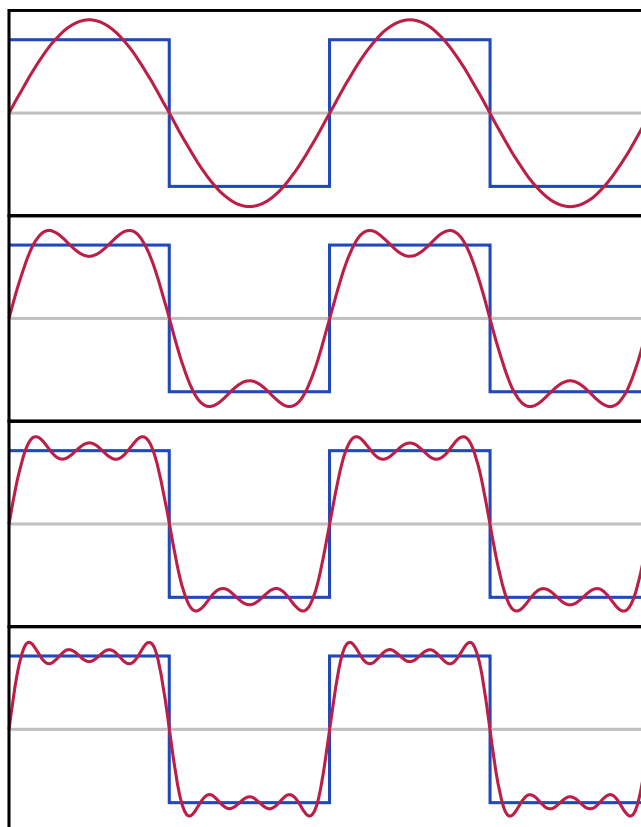
Dodejme také, že samotné zrno nemusí být samo o sobě dostatečným nositelem původní informace. Toho je dosaženo až při použití více zrn, jsou-li jednotlivé parametry granulátoru vhodně nastaveny.

## Vývoj granulární syntézy

Jedni z prvních, kteří se domnívali, že může být souvislý zvuk rozložen do menších časových úseků pochází z starověkých atomistických filozofů. Leucippus, Démokritos a Leukippos z Milétu učili, že veškerá hmota se skládá z *atomů* obklopených prázdným prostorem. Atomizací hmoty a energie, kdy je rozdělujeme do menších a menších dílů se dostaneme do bodu, kdy již nelze dále rozdělovat.<sup>1</sup>

Jedním z nejzásadnějších objevů v oblasti zvukové analýzy je Fourierova transformace, která je pojmenována po francouzském matematikovi Jeanu-Baptistovi Josephu Fourierovi. Je úzce navázána na teorii Fourierovy řady, která slouží k zápisu průběhu periodických funkcí pomocí funkcí sinus a kosinus. Ta tvrdí, že jakýkoli periodický signál může být rozložen do jistého (i nekonečného) množství fází a amplitudou určených funkcí sinus. Fourierova transformace nám umožňuje určit počet a poměr jednotlivých frekvencí ze vzorku signálu a

najít tedy základní kameny jakéhokoli periodického signálu.



*Sčítání funkcí sinus za účelem dosažení obdelníkové vlny*

Jedněmi z prvních, kteří se v moderních dějinách věnovali teorii granulární syntézy byl anglo-maďarský fyzik Dennis Gabor a franko-řecký skladatel a Iannis Xenakis. Dennis Gabor rozvinul ve čtyřicátých letech dvacátého století teorii *fononu* Igora Jevgeněviče Tamma a za svůj vynález holografu byla Dennisu Graborovi roku 1968 udělena Nobelova cena. Gabor si byl vědom omezení fourierovy transformace a navrhl systém okénkování, který použil k analýze a reprodukci zvuku<sup>2</sup>. Dennis Gabor na adresu fourierovy transformace prohlásil:



*“I když nelze matematického hlediska tomuto teorému nic vytknout, i experti občas nemohou zakrýt nelehký pocit z fyzikální interpretace výsledků dosažených Fourierovou metodou”<sup>3</sup>*

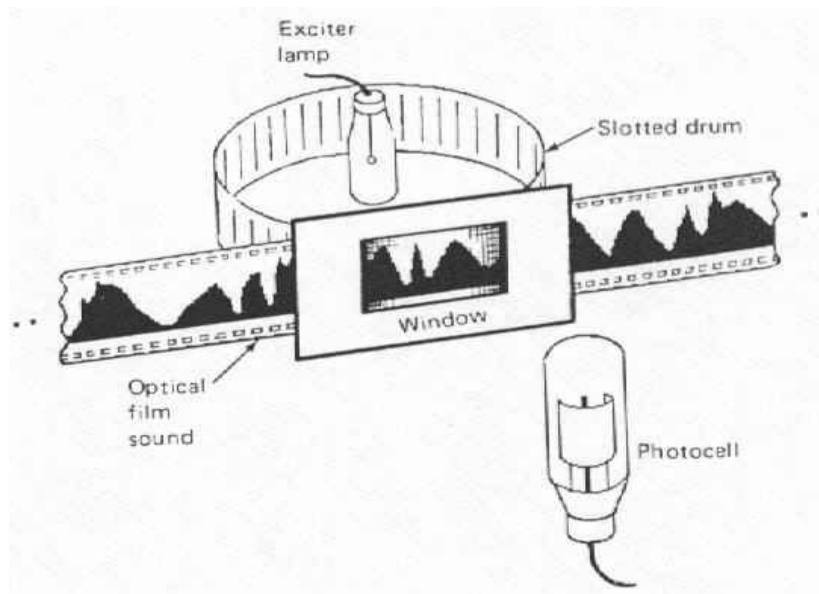
Iannis Xenakis, který byl obeznámen s Gaborovými experimenty a v roce 1959 provedl experiment, ve kterém přiblížil granulární syntézu pomocí stříhu magnetické pásky<sup>4</sup>, se domníval, že veškerá hudba se skládá z velkého množství *elementárních zrn*.

Samotný vznik granulární syntézy byl umožněn technologickým pokrokem v oblasti záznamu a reprodukce zvukového signálu, kde určité paralely ve změně chápání zvuku lze vidět i ve filmu, kdy byl video záznam rozdělen do okének (angl. *frames*) a tato přímo určovala práci s videem v časové doméně.

I Martin Russ ve své práci srovnává granulární syntézu se snímkováním ve filmu:

*„Granulární syntéza se zdá být ve funkci poněkud analogická k filmovým projektorům. Vyvoříme-li sérii mírně odlišných nehybných obrazů v rychlosti, která je vyšší než schopnost lidského oka rozeznat od sebe jednotlivé obrazy, je výsledkem plynulý pohyb. V granulární syntéze se rychlá posloupnost malých fragmentů spektra kombinuje do zdánlivě plynule měnícího spektra“<sup>5</sup>.*

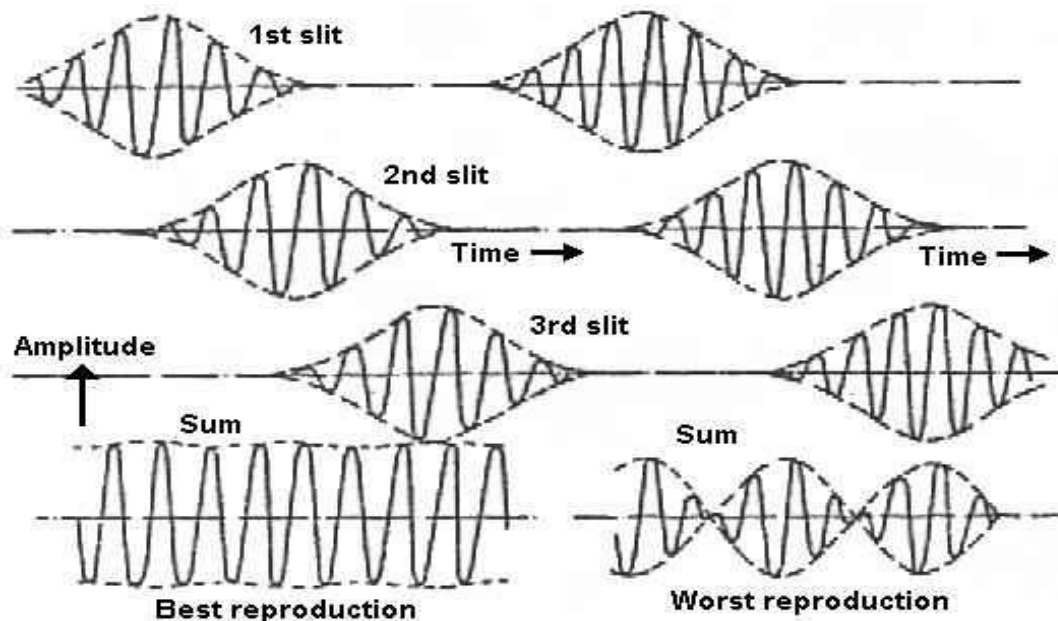
Již Dennis Gabor zkonstruoval zařízení, které mělo měnit frekvenci signálu pomocí opakovaného okénkování vstupního signálu, kdy jednu zdíčku pro průchod světla nahradil rotujícím bubnem s mnoha zdíčkami.



*Gaborův přístroj pro úpravu frekvence*

Při změně rychlosti pohybu pásky docházelo ke změně frekvence signálu. Při každém průchodu ždířky přes okénko přístroj zaznamenal pouze malý usek signálu. Tyto pak byly spojeny v čase, čímž vznikl výsledný signál v jiné frekvenci.

Gabor si všiml, že za určitých konfigurací je výsledek vysoké kvality, jindy jsou však slyšet artefakty – rázy.



*Součet signálu v čase Gabrovým přístrojem*

Gabor rozebírá metody, kterými se dá docílit větší kvality a robustnosti systému. Tyto zahrnují úpravu rychlosti rotujícího bubnu, počet zdírek a rychlost pohybu pásky <sup>6</sup>.

## Iannis Xenakis – Analogique A-B

Analogique A-B byla první skladbou, která využívala metod granulární syntézy<sup>7</sup>. Základem této skladby jsou stovky malých ústřížků magnetické pásky. Skladba je rozdělena na dvě paralelní části, kdy v jedné z nich se využívá granulární syntézy (B), která se skládá ze čtyř zvukových stop a je reprodukována 8-mi měniči, které jsou jednoznačně umístěny v koncertní síni, druhá je napsána pro smyčcový ansámbl (A) stochastickými metodami a poté přepsána do hudební notace.

Skladba je zkomponována metodou zvolání-odpověď. Xenakis vždy odpovídá na zvolání orchestru granulární syntézou, která se “pokouší” napodobit orchestr. Esteticky Xenakis vytváří dojem učícího se stroje, kdy zvolání orchestru je pokaždé volnější a trpělivější a každá další granulární odpověď je rychlejší a zbrklejší.

Granulární část je vytvořena z části orchestrální. Xenakis rozstříhal její záznam na magnetickém pásu na malé dílky a potom, co je cíleně přeuspořádal, některé vynechal a aplikoval další úpravy, opět sestříhal do souvislého celku. Zde je zřejmé, že manuální aplikace granulární syntézy je velmi časově náročná. I proto se granulární syntéza dočkala širšího použití až s příchodem digitálních technologií, kde je manipulace s jednotlivými zvukovými vzorky jednodušší na vývoj i práci.

Curtis Roads je americký skladatel elektroakustické hudby, který se specializuje na granulární a pulsarovou syntézu a programátor. Byl prvním, který implementoval granulární syntézu v digitální doméně a v roce 1980 spoluzaložil International Computer Music Association<sup>8</sup>.

Jednou z jeho prvních skladatelských počinů v oblasti granulární syntézy byl 9-ti minutový *nscor* roku 1987. Této skladby je několik verzí, kdy každá další obsahovala postupy, které byly umožněny pokračujícím technologickým pokrokem.

## **Granulární syntéza použitím magnetické pásky**

Jedinou metodou, jak docílit granularizace zvuku byl stříh magnetické pásky. V cestě tomu stály především fyzikální a praktické limitace při práci s magnetickým záznamem zvuku. Nejenže vyžaduje stříhání magnetické pásky na čím dál menší díly značnou manuální zručnost, celý proces je také velmi časově i organizačně náročný. Při standardní rychlosti magnetického pásu 38cm/s je 50ms záznam dlouhý přibližně 2cm.

Při práci s vícero vstupními zvukovými materiály připustíme, dosažení působivého granulárního výsledného efektu bylo a je jen pro ty otrlejší.

## Digitální éra

S příchodem výkonnějších a cenově dostupnějších výpočetních jednotek a pamětí se stávala aplikace granulární syntézy častější a tato zažila nemalý rozkvět. Jedním z problémů, které přinesly pokusy implementovat různé druhy granulárních syntezátorů v digitální doméně byly její paměťové nároky. Při vzorkovací frekvenci 48kHz a bitové hloubce 16bit je pro záznam jednoho stereo zrnka o délce 100ms zapotřebí 19.2 kilobytů. V době (rok 1984), kdy se cena jednoho megabytu paměti ram pohybovala okolo 1300\$<sup>9</sup> a jeden megahertz procesorového taktu (jeden milion cyklů za vteřinu) stál 30\$<sup>10</sup>, bylo velmi svízelné implementovat granulární syntézu kvůli příliš vysokým cenám pamětí i drahému výkonu. O dvě dekády později, s dalším rozvojem výkonu domácích i přenosných počítačů, se vyvinuly vysokoúrovňové programovací jazyky, které umožňují implementaci různých variant granulární syntézy bez detailních znalostí nízkoúrovňového programování nebo specializovaného hardwaru. Většina z nich je šířena pod některou ze svobodných licencí (GPL, MIT, atd.), jsou tedy dostupné širokému spektru hudebníků, skladatelů i výzkumných pracovníků.

Jako jeden z příkladů komerčního a proprietárního granulárního syntezátoru uvedme Steinberg Padshop Pro, který pracuje na bázi již existujících audio vzorků – wavetables. Tyto vzorky jsou potom pomocí vstupu od midi kláves granulovány v takových parametrech, aby výsledné fundamentální frekvence odpovídaly frekvencím stisknutých kláves. Syntezátor vytváří a ruší jednotlivé virtuální čtecí hlavy, které posléze přehrávají jednotlivé úseky v rámci dlouhého vzorku. Tím může docílit harmonicky bohatého zvuku, ale zachovává zvukovou kontinuitu a je naladěn na požadované frekvenci. Padshop Pro také obsahuje množství filtrů, obálek a parametrický dozvukový procesor a je k dispozici ve formě VST pluginu nebo samostatného programu.

---

I Motorola 6820, 16MHz



*Steinberg Padshop Pro*

Jako další, komerční a proprietární audio plugin uvedme Malstöm od švédské společnosti Propellerhead Software. Ten je pojmenován s přívlastkem *grainable synthesizer* a opět zde nalezneme kombinaci granulární a wavetable syntézy. Nalezneme v něm waveshaper, filtry, obálku a další věci typické pro tento typ syntezátoru.



*Malström Grainable Synthesizer*

Dodejme, že všechny zmíněné granulární syntezátory jsou ve svém *jádro* stejné. Liší se použitými filtry, možnostmi polyfonie a přiloženými zvukovými vzorky a metodou syntézy těchto vzorků. Jak již bylo řečeno, takový program se vlastně skládá minimálně ze dvou částí – samotný syntezátor a granulátor.

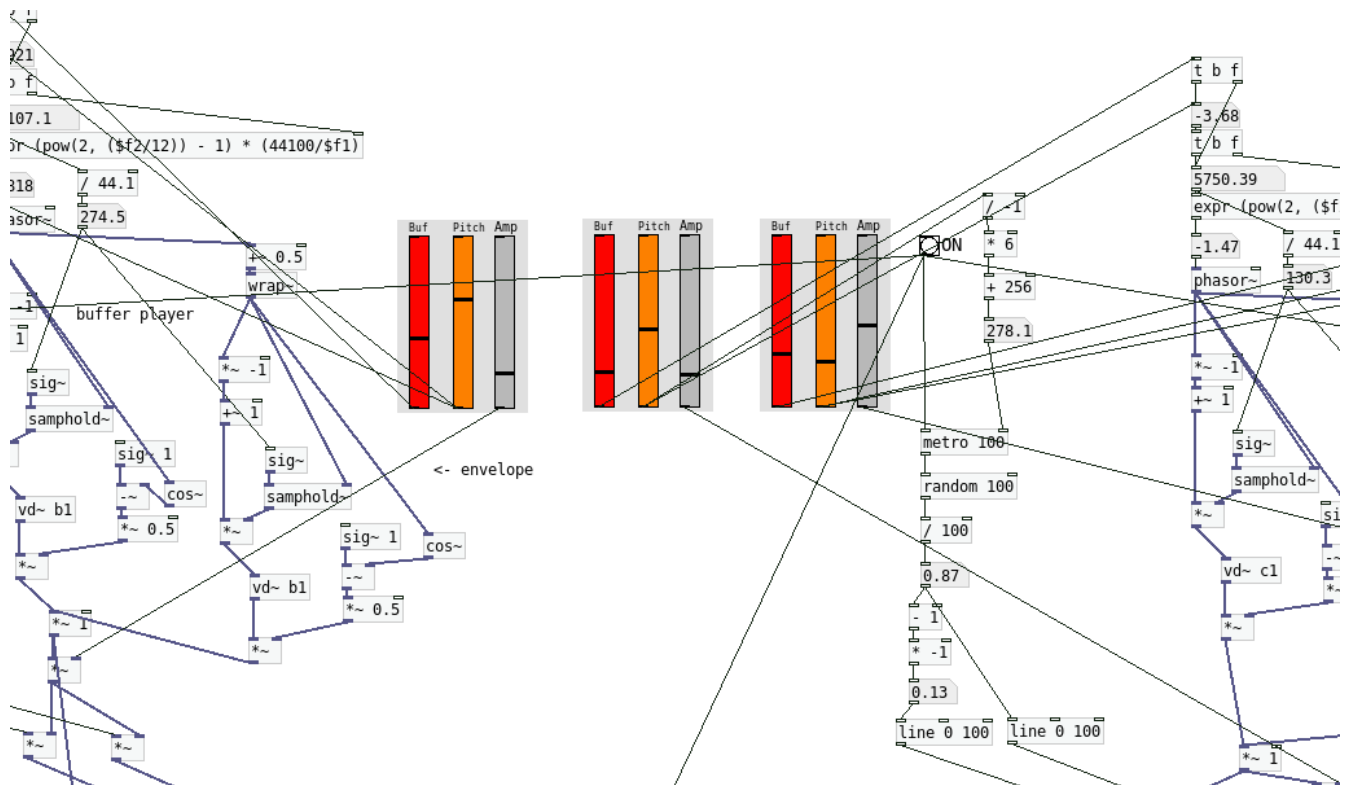
Je v takových případech běžné, že jsou parametry syntezátoru i granulátoru velmi úzce propojeny vzájemnými vztahy. Stále se však ne nutně jedná o jeden díl – jako paralelu můžeme uvést modulární syntezátor, kdy mohou být moduly různých částí zvukového toku vzájemně, někdy i velmi úzce, propojeny, nemluvíme však ani v tomto případě o jednom bloku.

## Vývojový software přístupný neprogramátorům

Jak již bylo zmíněno dříve, nejen výsledné syntezátory se staly dostupnějšími, ale i jejich vývoj se stal rychlejší a jednodušší. Například v SuperCollideru je možno implementovat funkční granulární syntézu na 10-ti řádcích kódu. Rovněž v CSoundu je možno docílit požadovaného výsledku poměrně rychle. Tyto programovací jazyky míří přímo na hudební experimentátory, kteří se nechtějí zabírat detailním programováním a vzhledem k tomu, že jsou většinou interpretovány (nepřekládají se do strojového kódu), jsou vhodné i na tzv. *live coding*, kdy skladatel přímo při představení za běhu programuje a jeho obrazovka je často promítána na plátno.

Vyvinulo se rovněž *vizuální programování*, které rovněž cílí na skladatele, kteří mají blízko k technice, jako Pure Data nebo MAX/MSP, kde jsou i k dispozici již hotové knihovny ještě dále zjednodušující vývoj osobitých granulárních syntezátorů. Můžeme být svědky propojování granulárních syntezátorů s živým promítáním videa za užití modulů *Gem* v případě Pure Data nebo *Jitter* v případě MAX/MSP.





Ukázka granulárního syntezátoru v prostředí Pure Data

## Variace granulární syntézy

*Vlnková syntéza* je podobná syntéze granulární, liší se však striktností svých parametrů. Zatímco délky jednotlivých zrn v granulární syntéze mohou být jakékoliv, ve vlnkové syntéze se délka zrn vyvozuje z výšky obsahu pomocí vlnkové transformace (angl. wavelet transform).

Pulsarová syntéza nahrazuje zrnko impulsem, se kterým je dále pracováno – aplikují se na ně filtry aj. Spojením velkého množství různě filtrovaných impulsů v čase je možno docílit mnoha různých tónů od velmi jednoduchých po harmonicky nesmírně bohaté. Jako příklad takového komerčního proprietárního syntezátoru uvedmě Nuklear – Pulsar Train Synthesizer od Kolínské firmy Hamburg Audio. Obsahuje 4 *pulsar train* oscilátory, umožňuje hrát 16 hlasů v jednu chvíli, sekvencer, obálky, LFO (angl. *low frequency oscillator* – oscilátor

o nízké frekvenci) a několik druhů zkreslení a filtry.

VOSIM syntéza (z angl. *VOIce SIMulation*) pracuje na principu přehrávání impulsů s různou pulsní šířkou. Navzdory tomuto jednoduchému principu může být výstupem VOSIM syntézy velmi expresivní a muzikální zvuk i bez použití filtrů a oscilátorů.

FOF syntéza (z franc. *Fonction d'onde formantique*) rekonstruuje zvuk sčítáním jednotlivých formantů, které jsou reprezentovány FOF zrnem.

Glissonová syntéza je rovněž podobná granulární syntéze. Klade důraz především na frekvenčně-časovou úpravu obsahu jednotlivých zrn glissandem.



*Nuklear - Pulsar Train Synthesizer*

## Moderní použití granulární syntézy

S postupnou popularizací skladatelských metod a zvukového slovníku elektroakustických skladatelů se můžeme čím dál více setkat s použitím granulárních syntezátorů ve filmu i populární hudbě, protože dnešní posluchač je zvukově zhýčkaný a unavený a jsme svědky neustálé snahy chytit posluchačovu pozornost a nepustit, překřičet ostatní a zaujmout na první poslech.

Ve filmovém sound designu se granulární syntéza použila například při realizaci zvukového efektu, kdy se zaznamenal dobytek, který byl posléze přeladěn a upraven granulárním syntezátorem. Výsledek je velmi organický, svým ténbrem připomíná živého tvora, je však zároveň originální a zajímavý.

Dalším příkladem budiž švédská umělkyně Karin Elisabeth Dreijer Andersson prezentující se pod pseudonymem Fever Ray. Na jejím stejnojmenném albu jsou vedle přeladování často použity i granulární syntezátory.

Někdy je granulární syntéza použita vedle jiných, příbuzných technik, jako je například beat/sample-juggling, chopping a sampling.

V posledních letech můžeme opravdu pozorovat nástup granulačních kompozičních technik v oblasti populární hudby. Její etablovanost však není a nemůže být okamžitá, neboť se musí nejprve postupně rozšířit existující žánrové hranice.

## Ukázka implementace granulárního syntezátoru - GrainJuice

### Návrh

Jako aplikaci granulární syntézy jsem zvolil program, který má být k dispozici ve formátech LV2, VST a LADSPA, je realtime, má mít stereo vstup a stereo výstup a následující parametry:

- Size            Délka (0 – 1 vteřina)
- Density        Maximální počet zrn
- Gain            Zisk (hlasitost)
- Scatter        Míra rozhození v čase
- LPF            Filtr dolní propusti
- HPF            Filtr horní propusti

Každý z těchto parametrů má určit *výchozí pozici* každého parametru. Ke každému z nich má být dále k dispozici nastavení náhodné odchylky tohoto parametru pro každé zrno. Plugin má být nezávislý na vzorkovací frekvenci a musí být do určité míry nezávislý na architektuře a platformě – má být kompatibilní s Linuxovými systémy, Microsoft Windows, Apple Mac OSX a další.

Grafické verze tohoto pluginu (tedy VST a LV2) budou vyžadovat grafickou akceleraci z důvodu použití OpenGL jako vykreslovacího enginu. Plugin používá aritmetiku plovoucí čárky a je z větší části portovatelný na všechny platformy (x86, x64, ARM, atd). Kromě

OpenGL nevyžaduje plugin žádné další závislosti při kompilaci ani při běhu.

Jako vývojové prostředí jsem zvolil editor Geany a kompilátor GCC.

## Realizace

Jako základ pro tento plugin jsem vybral *DPF (Distrho Plugin Framework)*, není tedy nutné ručně zadávat detaily jednotlivých API (*Application Programming Inteface*), vše je řešeno automaticky, včetně inicializace, vystavení parametrů a komunikace mezi UI (User Interface – uživatelské prostředí) a DSP (*Digital Signal Programming – programování číslicového signálu*) vláknů. Tyto vlákna běží v paralelních procesech, je tedy na hostiteli pluginu rozdělovat výkon procesoru a při zatížení dle potřeby prioritizovat DSP vlákno. Tento framework jsem zvolil, protože s ním mám výborné zkušenosti, má vhodnou licenci pro účely akademické práce (MIT/ISC) a je kompatibilní s licencí, kterou jsem zvolil pro zdrojový kód zde popisovaného zásuvného modulu (GPLv3). Tato licence umožňuje zdrojový kód volně šířit (i upravený) pod podmínkou, že bude zachována tato licence. Je tedy takzvaně *virální*.

Velkou výhodou tohoto frameworku je jeho podpora několika API a podpora vícero platforem. Toto je zvláště vhodné, protože ve své podstatě se jednotlivá API naprosto v ničem neliší, mají pouze odlišně pojmenované funkce a jiná pořadí inicializace, včetně použití různých inicializačních datových typů.

Jako programovací jazyk jsem zvolil C++ a dynamickou alokací paměti pro jednotlivá zrna. Vhodnost dynamické alokace paměti je v DSP komunitě diskutována, tato diskuse je však mimo rozsah této práce a ve výsledku se tento přístup v tomto rozsahu ukázal jako dostatečný.

Veškeré grafické prvky tohoto zásuvného modulu jsou vytvořeny v otevřeném programu GIMP.

Zpracování každého samplu je rozděleno na dvě části, kdy v první z nich, v případě že jsme ještě nenaplnili maximální počet zrn, se dle potřeby vytvoří zrno nové, které si vygeneruje svojí délku (převedenou do počtu vzorků) a čas zpoždění. Nově vytvořené zrno si následně do bufferu ukládá příchozí vzorky do doby, než zaplní svůj buffer. Kdybychom vytvořili pokaždé pouze jedno zrno, tak kvůli jejich náhodným posunům bychom vytvořili v audio toku spoustu prázdných míst a protože bylo jedním z požadavků zpracování vzorků v reálném čase, není časově a výpočetně vhodné hotové zrno vzorek po vzorku kopírovat (a použitím SIMD instrukcí bychom přišli o portabilitu kódu), vytvoří se dle parametru density prázdných zrn více naráz, těm jsou vybrány různé časy zpoždění a zaplňují se současně.

Protože mají všechna paralelně zaplňovaná zrna stejnou délku, jsou odbavena ve stejnou chvíli. Jedná se tedy o druh selektivního delaye. Takové zrno je poté je označeno jako *připraveno k přehrávání*.

$$w(n) = 0.5 \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi n}{N-1} \right) \right)$$

*Hanningovo okno*

Aplikace *Hanningova okna* nám zaručí hladké hrany i při velmi krátkých délkách zrn.

Ve druhé fázi program postupně prochází všemi zrny, které jsou označeny jako *připravené k přehrávání*. Postupně je každým krokem vyčerpáván čas zpoždění, který nám umožní rozhození jednotlivých zrn v čase (parametr *Scatter*). Jakmile je tento čas pro jednotlivá zrna vyčerpán, je zrno postupně přehráváno tím, že je přičítáno k výstupu. Těsně před přičtením k výstupu je na každé zrno aplikována amplitudová obálka podle *Hanningova okna*, dle nastavení je nejdříve užito IIR filtru dolní propusti, poté IIR filtru horní propusti (oba se strmostí 24 dB na oktávu) a aplikuje se úprava zisku. Jakmile je zrno přehráno v celé své délce, zařadí se do fronty na odstranění, která se pro přehlednost odbaví na konci celého cyklu. Jeho odstraněním se uvolní místo pro další zrno a tím se celý proces opakuje.

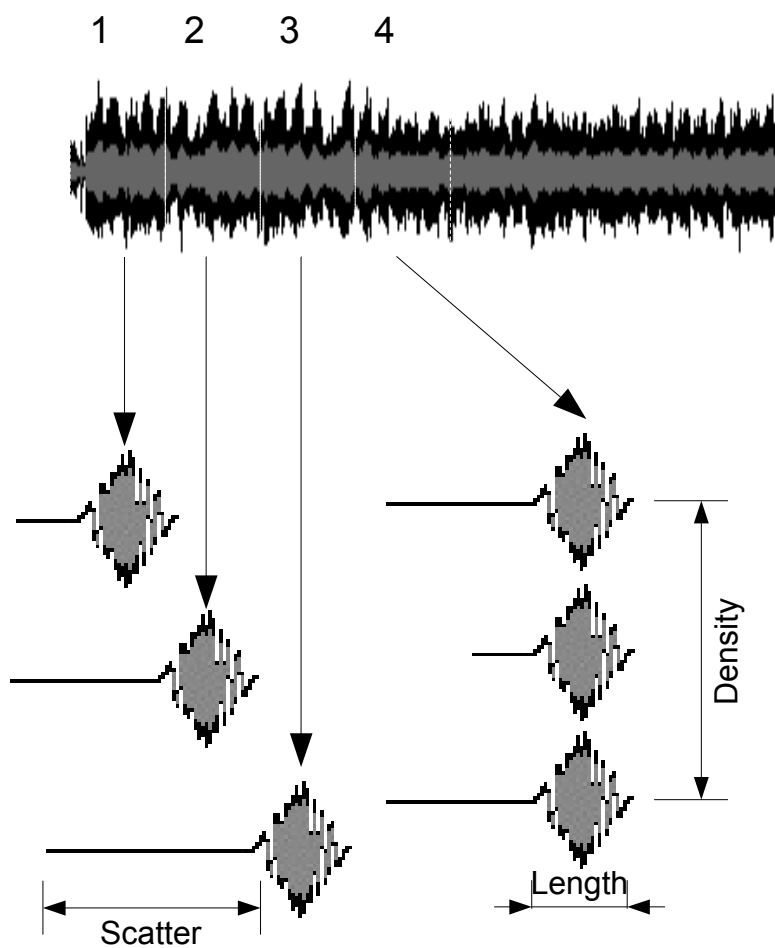


*Vlastní implementace granulárního syntezátoru*

Celý tento proces se provádí pro každý vzorek, který je dodán systémovým audio subsystémem (CoreAudio, ASIO, JACK, ALSA, atd.). Pro každý přijatý vzorek zároveň očekává audio subsystém také právě jeden hotový vzorek.

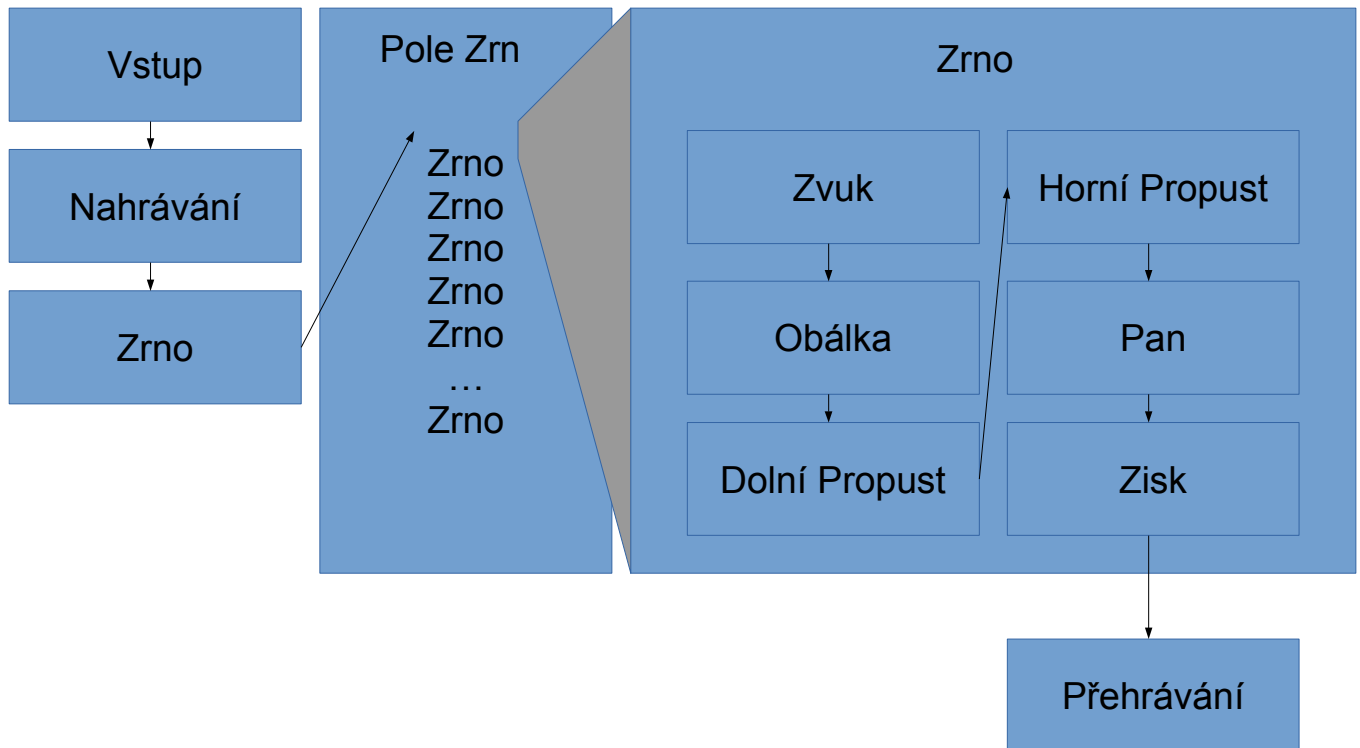
Tato implementace je poměrně náročná na výpočetní výkon procesoru, neboť je-li aktuální celkový počet zrn 80 a každé zrno prochází nejdříve vlastním filtrem dolní i horní propusti, dostáváme se k celkovému počtu 160-ti simultánně běžících filtrů se strmostí 24dB na oktávu. Důvod pro potřebu samostatných filtrů pro každé zrno je zřejmý – každé zrno má odlišně nastavené parametry filtru a tedy i jiné koeficienty. Pro každé vyčerpání jednoho vzorku z každého zrna se také musí vypočítat okamžitá amplituda Hanningova okna, což zahrnuje volání funkce kosinus, která je výpočetně náročná. Celý proces by se dal urychlit a výpočetně odlehčit aproximovanými metodami kosinus nebo určením pevně daných frekvencí filtrů, jejichž počet bychom omezili. Každé zrno by si při svém vzniku vybralo jednu z předem určených frekvencí a před výstupem by ním prošlo. Personifikace je stylisticky použita záměrně, neboť se jedná o objektově orientované programování.

# Příklad toku audio signálu a parametry syntézy





## Uspořádání programu



## Ukázka programového kódu

Pro ukázkou přikládám také dva výňatky z kódu – část, která přičítá výstup ze zrn na výstup audio rozhraní a přiřazuje již přehraná zrna do fronty na smazání a část z objektu *CGrain*, která tento vzorek dává k dispozici.

```

for (uint32_t j = 0; j < grains.size(); j++) {
    if (!grains[j]->wantsSample()) {
        if (!grains[j]->inDelay()) {
            // grain is in playback phase
            if (grains[j]->donePlaying()) {
                // mark grains for erase
                eraseGrains[eraseIndex] = j;
                eraseIndex++;
            } else {
                // get current sample from the grain
                nSample = grains[j]->getSample();
                // add it to the output
                outputs[0][i] += nSample[0];
                outputs[1][i] += nSample[1];
            }
        }
    }
}

float *GrainJuicePlugin::CGrain::getSample() {
    // move the playhead
    playhead--;

    // generate hanning window coefficient
    float coeff = 0.5f * (1 - cosf((2.f * M_PI * playhead)/(length-1)));

    // prepare a temporary sample for filtering
    float newSample[2];

    // apply high and low pass filters for each sample on both channels
    for (int i = 0; i < 2; i++) {
        newSample[i] = samples[length-playhead][i];
        newSample[i] *= coeff*gain;
    }
}

```

```

        newSample[i] = lowPass[i].process(newSample[i]);
        if (HPF>500) {
            newSample[i] = highPass[i].process(newSample[i]);
        }
    }

    // apply the modified sample to the buffer
    samples[length-playhead][0] = newSample[0];
    samples[length-playhead][1] = newSample[1];

    return samples[length-playhead];
}

```

## Zvukové ukázky

Připravil jsem několik ukázek, které v praxi demonstrují použití granulární syntézy ve formě zásuvného modulu GrainJuice. Jako pracovní prostředí jsem zvolil otevřenou DAW (angl. *digital audio workstation*) Ardour v čerstvé verzi 4.0. a jako virtuální patchbay program Catia.

Jako první příklad jsem uvedl elementární porovnání dvou identických signálů, kdy jeden na jeden z nich je aplikována granulární syntéza. Jedná se dlouhou notu vlny typu obdélník a signál je bez jakékoli další úpravy. V tomto případě jsou důležité parametry Size, Scatter a Density, které jsou nastaveny na 0.75, 0.8 a 0.2 (v rozsahu [0, 1]).

Jako druhý a třetí příklad uvádím použití granulárního syntezátoru GrainJuice na nahraný materiál. V prvním případě se jedná se o hlášení o evakuaci v anglickém jazyce, ve druhém nahraná manipulace s kameny – škrábání, bouchání, klepání atd. Kameny byly nahrány v akusticky neošetřené místnosti jedním mikrofonom Rode NT2-A, jako převodník a mikrofonní předzesilovač byl použit Focusrite Saffire Pro 40. Granulární syntezátor je

upravuje s automatizací parametrů density, size, LPF a HPF a na výsledek je nakonec decentně aplikován dozvuk typu room a v případě kamenů i limiter pro zachycení některých transientů. Právě použití klepání kamenů, které jsou samy o sobě granulární již ze své podstaty je dojem GrainJuice umocněn a v případě mluvené řeči dává barvotvorný prostor především parametrům LPF a HPF díky vysokému obsahu formantů ve vstupním materiálu.

Dalším příkladem je krátká skladbička “Drone Ark”, která se tematicky pokouší dát do kontrastu statiku a dynamiku. Jako technologický nástrojový základ jsem použil softwarový syntezátor ZynAddSubFx, který opět obstaral všechny syntézové nároky (ve smyslu tvorby zvuku). V projektu jsou tři stopy. Stopa, která je v popředí jsou dlouhé noty upravené arpeggiátorem – opakovačem, který i v sobě má kontrast – aranž na této stopě je zároveň statická i dynamická. Dynamická je proto, že je neustále v pohybu, statická protože je její pohyb monotónní a bez vývoje. Pro udržení posluchačovy pozornosti jsem do stopy vložil jen několik “anekdot” kolem třicáté vteřiny a ke konci. Zvuk arpeggiátoru je vytvořen z několika zvukových vln typu pila v několika oktávách a slabé odečtené kvinty a odečtené kvarty (z toho důvodu se může zdát, že je do signálu přimíchána i zvuková vlna typu obdélník). Pro ozvláštňení jsem také fázově jednotlivé vlny odposouval. Na tento zvuk je aplikován filtr ovládaný obálkou ADSR, která se na každé notě rychle zavírá. Gesto při přechodu v polovině skladby je odbočeným signálem této stopy do elektronického oktavizéru, který generuje signál o jednu oktávu výše je na něj aplikován ping-pong delay.

O dynamickou a organickou část skladby se starají dvě stopy, obě používají GrainJuice jako hlavní barvotvorný prostředek. I u těchto jsem zvolil harmonicky bohaté signály, které dají vyniknout filtraci jednotlivých zrn. Kvůli barevné sladění jsem opět použil zvukové vlny typu pila, tentokrát však při zvukovém enginu “PAD”, který funguje na principu FFT resyntézy. Harmonicky je tato stopa vystavěna na pomezí mollové a dórské stupnice, mezi kterými neustále lavíruje za účelem dosažení určitého napětí. Skladba, která začíná jakoby bez úvodu stejně tak i končí. Zcela záměrně nemá vedoucí melodickou linku ani perkusní složku – je částečně zvukovou plochou (angl. *soundscape*) a částečně neustálou rytmickou pulsací arpeggiátoru. Parametry GrainJuice jsou i zde automatizovány, především pak parametry Scatter a Density.

## Závěr

Granulární syntéza je velmi přímočarým a vděčným způsobem, jak hledat nové barvy zvuku, aniž bychom do signálové cesty vsázeli bezpočet chorusů, dynamických filtrů a jiných procesorů. Umožňuje nám objevit další tóny u běžných, již poměrně prozkoumaných zvukových zdrojů – jako různé vokální projevy, luskání, šustění papírem a jiné manipulaci s všelijakým materiálem, stejně tak i uměle vytvořených zdrojů, pro které bychom jinak v kompozici nebo sound designu hledali uplatnění tíže – impulsy, krátké šumové zdroje, různé analogové i digitální nepřesnosti (angl. *glitch* – porucha) i zdroje zvuku, které jinak většinou požadujeme za nežádoucí – rezonance různých předmětů, hluky větráku, 50Hz/60Hz brum nebo jiné síťové artefakty. Je hojně uplatňována při elektroakustických kompozicích, zvukových instalacích a jiných moderních formách umění. Zdá se, že pro každý druh signálu, se kterým již máme zkušenosti, jakoby při aplikaci granulární syntézy znovu ožil a stal se nově objeveným. Granulární syntéza nám umožňuje znovu prozkoumávat prozkoumané a experimentovat se zdroji zvuku, které nám jinak mohou připadat okoukané a nezajímavé.

- 1 The evolution of granular synthesis: an overview of current research, University of California, 2006
- 2 Riset, J.-C., Timbre Analysis By Synthesis: Representations, Imitations, and Variants for Musical Composition, In G. De Poli, A. Piccialli, & C. Roads (Eds.), Representations of Musical Signals, Cambridge: MIT Press, 1991
- 3 Gabor, Dennis, Theory of Communication, The Journal of the Institution Of Electrical Engineers, 1947, strana 43.
- 4 Tamtéž
- 5 Russ, Martin, Sound Synthesis and Sampling, 2004, strana 258
- 6 Opie, Timothy, Honours Degree In Bachelor of Arts, 1999
- 7 Tamtéž
- 8 MAT: Faculty and Researchers, [mat.ucsb.edu](http://mat.ucsb.edu)
- 9 McCallum, John C., Memory Prices, 1957-2014
- 10 Polsson, Ken, Chronology of Microprocessors,

