

## 12 Diskrétní systémy pro simulaci poslechového prostoru

**Simulace poslechového prostoru** je nalezení takového diskrétního systému, který popisuje vlastnosti **šíření zvukových vln** od zvukového vysílače (zdroje zvuku) k přijímači (posluchači) v uzavřeném prostoru. Na akustické vlastnosti tohoto systému mají zásadní vliv následující **fyzikální parametry** – velikost uzavřeného prostoru, jeho geometrické uspořádání, materiál, ze kterého jsou vyrobeny stěny a objekty v uzavřeném prostoru, poloha zdroje zvuku a poloha posluchače (u některých přístupů i **orientace hlavy**).

Náplní této kapitoly **není** teorie týkající se šíření zvukových vln, kapitola se zaměřuje na způsoby **realizace** simulace poslechového prostoru. Používá se několik způsobů simulace, které se liší svou **složitostí**, **přesností** a **použitím**. Problematika je rozsáhlá, nepopisuje struktury do podrobností a využívá teorie popsané v kapitole o zpožďovacích systémech.

### 12.1 Přístupy k simulaci poslechového prostoru

Výchozím popisem poslechového prostoru je parametrický systém **impulsových odezev**, každá další poloha zdroje zvuku a posluchače (**topologie**) je popsána **jinou** impulsovou odezvou. Běžně může být délka jedné diskrétní impulsové odezvy blízká se **stovkám tisíc** vzorků v závislosti na době dozvuku a vzorkovacím kmitočtu. Pokud se realizuje systém s takovou délkou impulsové odezvy **filtrem FIR**, je jeho výpočtová náročnost **velmi vysoká**. Dostatečný výpočetní výkon pro takovou simulaci mají jen specializované **hardwarové konvoluční procesory**. První hardwarový konvoluční procesor Huron byl vyroben v roce 1994 a umožňoval vícekanálovou konvoluci v reálném čase s maximální délkou 262144 vzorků pro jeden kanál. Existují také konvoluční procesory Sony DRE-S777 a Yamaha SREV1. Mají však jednu společnou vlastnost, jsou **finančně nákladné**.

Historicky se hledali různé **přístupy** k simulacím, jejichž vlastnosti a možnosti se zásadním způsobem liší a odpovídají požadavkům na ně kladeným.

- **Fyzikální přístup** vychází z vnějšího popisu systému – z **impulsových odezev** poslechového prostoru.
- **Vjemový přístup** vychází ze subjektivních **vjemů**, které posluchač vnímá při poslechu ve skutečném poslechovém prostoru. Snahou je přiblížit se těmto vjemům během simulace při zachování **minimální výpočtové náročnosti**.
- **Aproximační přístup** vychází z **impulsové odezvy** poslechového prostoru a hledá se takový systém, jehož impulsová odezva se co nejvíce **blíží** impulsové odezvě simulovaného poslechového prostoru. Výpočtová náročnost musí být **nižší** než u fyzikálního přístupu.

#### 12.1.1 Fyzikální přístup

Jde o **přesnou** simulaci daného poslechového prostoru pro **aktuální topologii** zdroje a posluchače. Fyzikální přístup vychází z **impulsové odezvy** daného poslechového prostoru pro tuto topologii.

- Pokud je poslechový prostor **reálný**, je možné jeho impulsovou odezvu **změřit** nějakou ze známých metod. Jednou z používaných metod pro měření impulsových odezev akustických prostorů je metoda **MLS** (Maximum Length

Sequences). Na této metodě je založen měřicí systém MLSSA. Tento měřicí systém je v základní konfiguraci schopný měřit impulsové odezvy až do délky  $L=2^{16}$  při vzorkovacím kmitočtu 96 kHz. Nejstarší metody jsou však založeny na metodě **TDS** (Time Delay Spectrometry), která při měření používá **lineárně** rozmítaný harmonický signál. Používá se také např. metoda **ESS** (Exponential Sine Sweep), která rozmítá sinusový signál **exponenciálně**. Dle konkrétní metody je měřicí signál reprodukován v poslechovém prostoru a pro danou topologii je změřen mikrofonom, čímž se získá změřený signál (odezva). Každá z metod pak používá **dekonvoluci měřicího a změřeného signálu**, aby se získala impulsní odezva měřeného poslechového prostoru. Je nutné změřit odpovídající počet impulsových odezev a to dle druhu simulace. Např. u **binaurální** simulace je nutné změřit pro aktuální topologii dvě impulsové odezvy nazvané jako **BRIR** (Binaural Room Impulse Response). Jedna odezva BRIR odpovídá šíření zvukového paprsku od **vysílače** k **levému** uchu a druhá k **pravému** uchu, pro **konkrétní** polohu a orientaci posluchače.

- V případě **virtuálního** poslechového prostoru se šíření zvukových paprsků modeluje různými metodami, např. **sledováním paprsku** (Ray-tracing), metodou založenou na **zrcadlení zdroje** (Image-source), metodou **konečných prvků** (Finite-element nebo Boundary-element) nebo **hybridními metodami**, využívající výhod více přístupů. Výsledkem modelování virtuálního poslechového prostoru je **jednokanálová impulsová odezva**. Ta však popisuje poslechový prostor bez přesnější specifikace, popisuje pouze **šíření zvukového vlnění** v poslechovém prostoru pro danou topologii, tedy pro konkrétní polohu zdroje a posluchače. Pokud je požadována např. binaurální simulace poslechového prostoru, použije se **modelovaná jednokanálová impulsová odezva** a na ni se aplikuje HRTF (Head Related Transfer Function), tedy do série za systém simulující šíření zvukového vlnění se použije parametrický systém HRIR, který do celkové simulace přidá parametr **azimut** a **elevaci** hlavy konkrétního posluchače (viz kapitola Přenosová funkce hlavy).

Celý výše popsáný proces simulace poslechového prostoru se pak nazývá **auralizace**. Realizace **auralizace** je dána průchodem signálu systémem SIMO s konečnou impulsovou odezvou. Pro simulaci poslechových prostorů se obvykle nepoužívají algoritmy **konvoluce pracující** v časové oblasti. Nabízí se použití konvoluce v kmitočtové oblasti, nevýhodou **rychlé konvoluce** je však její celkové **procesní zpoždění**, což je dáno nutnou **značnou** délkou segmentů. Jejich délka musí být definována jako nejbližší vyšší mocnina dvou od skutečné **délky impulsové odezvy**. Jak již bylo uvedeno, typicky se jedná až o statisíce vzorků, což v čase odpovídá procesnímu zpoždění až **několika sekund**. Algoritmus rychlé konvoluce je možné upravit tak, aby procesní zpoždění bylo minimalizováno. Takový algoritmus pak realizuje **efektivní konvoluci bez procesního zpoždění**. Nevýhodou tohoto algoritmu je **vyšší** výpočtová náročnost, než v případě rychlé konvoluce.

Fyzikální přístup se používá především v případech, kdy je hlavním požadavkem **přesnost** simulace poslechového prostoru. Příkladem může být proces návrhu **akusticky významného prostoru**, jako jsou koncertní sály, divadla apod. Před finalizací stavebního projektu jsou simulací otestovány jeho budoucí vlastnosti.

### 12.1.2 Vjemový přístup

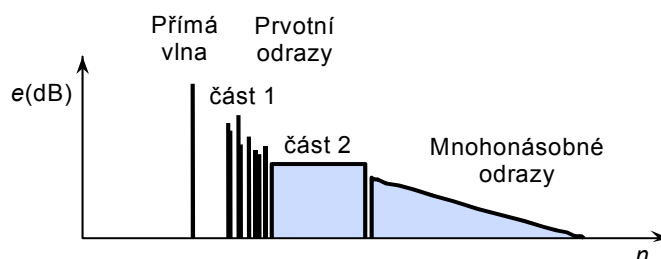
Vjemový přístup vychází ze základního požadavku – **snížit** výpočetní náročnost algoritmu simulace poslechového prostoru. Systém definovaný na základě vjemového

přístupu **nesimuluje impulsovou odezvu** poslechového prostoru, ale pouze **specifické vlastnosti** poslechového prostoru. Tyto specifické vlastnosti jsou definovány jako **subjektivní vjemy posluchače**. Mějme prostor všech vjemů způsobených šířením zvukového paprsku v akustickém prostoru rozložen do  $V$  dimenzí, které by odpovídaly všem nezávislým vjemům způsobených šířením zvukového paprsku. Pokud každý z vjemů může být popsán určitou **fyzikální vlastností** poslechového prostoru, je možné navrhnout diskretní systém s  $V$  **parametry**, které simulují každý z  $V$  **nezávislých vjemů**. Tolik obecná definice.

Tento přístup má několik základních **výhod**.

- Diskretní systém pro simulaci poslechového prostoru bude dále popisován prostřednictvím **struktur**. Každá z těchto struktur se snaží o **simulaci** daného vjemu nebo souboru vjemů ze všech  $V$  vjemů.
- Simulace poslechového prostoru je založena na mnohem efektivnějším algoritmu – na **zpožďovacích linkách** realizujících **řídké impulsové odezvy** a výpočtově méně náročných IIR filtrech. Tímto je dosaženo podstatně **nižší** výpočtové náročnosti než u fyzikálního přístupu, kde se používají výhradně systémy typu FIR velmi vysokého řádu.
- Takto definovaný diskretní systém umožňuje **změnu všech  $D$  parametrů v reálném čase** a navíc tyto parametry a ani jejich změny **ne musí být korelovány**, jak je tomu v případě fyzikálního přístupu, kde s každou změnou jednoho parametru simulace je nutné změnit **všechny koeficienty FIR** systému (celou impulsovou odezvu).

Naopak za **nevýhodu** lze považovat fakt, že s vjemovým přístupem není možné provést přesnou simulaci daného poslechového prostoru, je možné se jeho vlastnostem **pouze přiblížit**. Na následujícím obrázku je zobrazena zjednodušená **obálka impulsové odezvy** systému v dB, který vychází z **vjemového** přístupu. V diskretním systému založeném na vjemovém přístupu, lze většinou rozlišit **dvě až tři** základní struktury, které jsou často založeny na odlišných algoritmech.



**Obrázek 12.1:** Zjednodušená obálka impulsové odezvy systému dle vjemového přístupu

- Struktura **prvotních odrazů** (Early Reflections) se používá vždy, v základních simulacích se používá pouze tato struktura (část 1) v kombinaci se strukturou mnohonásobných odrazů.
- Struktura **zahuštění prvotních odrazů** nebo **struktura následných odrazů** (Subsequent Reflections nebo Cluster) se používá pouze u pokročilých simulací. V pokročilých simulacích je vložena další struktura, která zahušťuje prvotní odrazy (část 2), čímž je zajištěna plynulejší návaznost mezi odezvou struktur pro simulaci prvotních odrazů a mnohonásobných odrazů.
- Struktura **mnohonásobných odrazů** (Subsequent Reverberation) se používá vždy a simuluje **dozvuk** poslechového prostoru.

Vjemový přístup se používá především pro realizaci **zvukového efektu** nazývaného jako **Hall, Verb, Reverb** apod. U něj není klíčová přesnost simulace, především jde o dodání **dojmu** poslechu v prostoru s typicky delší dobou dozvuku. Požadavkem je, aby byla jeho výpočtová náročnost **malá** při zachování akceptovatelné kvality simulace. Požadována je také možnost **nekorelované změny** jednotlivých parametrů simulace.

### 12.1.3 Aproximační přístup

Jak fyzikální, tak vjemový přístup má své výhody a nevýhody. Prostřednictvím fyzikálního přístupu je možné **přesně** simulovat poslechový prostor, ale výpočtová náročnost simulace je **vysoká**. Vjemový přístup je o několik řádů výpočtově **méně** náročný, ale **nedokáže** se zcela přiblížit vlastnostem poslechového prostoru. Aproximační přístup se snaží u využití dobrých vlastností obou předcházejících přístupů.

Cílem aproximačního přístupu je co největší **přiblížení** se **impulsové odezvě** simulovaného poslechového prostoru při zachování **nižší výpočtové náročnosti** simulace, než je tomu v případě fyzikálního přístupu. Obecně lze říct, že v případě **aproximačního přístupu** se hledá **transformace** systému FIR s velkou výpočtovou náročností, který je plně popsán svou konečnou impulsovou odezvou, na obecně jiný systém s nižší výpočtovou náročností. Vzhledem k neustálému zvyšování výpočetního výkonu výpočetních systémů, na kterých je simulace poslechového prostoru realizována v reálném čase, se aproximační přístup podobně jako v případě jednoduchého vjemového přístupu většinou realizuje pomocí **dvou** struktur.

- **FIR struktura** – pro realizaci FIR systému, jehož koeficienty jsou **rovny** impulsové odezvě simulovaného systému s **délkou** odpovídající času  $t_{SR} \sim \sqrt{V}$ , kde  $V$  je vnitřní objem poslechového prostoru. Od času  $t_{SR}$  se vzorky impulsové odezvy považují již za odezvu odpovídající mnohonásobným odrazům v difúzním zvukovém poli. Do času  $t_{SR}$  je impulsová odezva velmi závislá na konkrétní **topologii, geometrii a materiálech** použitých v poslechovém prostoru, je tedy simulována zcela **přesně**. FIR struktura je definována přesně impulsovou odezvou typicky ve stovkách až tisících vzorků dle aktuálního času  $t_{SR}$ , který je závislý na **vnitřním objemu** uzavřeného poslechového prostoru.
- **IIR struktura** – pro realizaci IIR systému, který simuluje **mnohonásobné odrazy** po čase  $t_{SR}$ . V případě mnohonásobných odrazů již tyto **nejdou** závislé na konkrétní topologii zdroje a posluchače. Použitá struktura má pak **impulsovou odezvu**, která má charakter **exponenciálně doznívajícího barevného šumu**. Struktura umožňuje nastavení kmitočtově závislé doby dozvuku popsané prostřednictvím **reliéfu EDR( $t, f$ )** (Energy Decay Relief), který popisuje časově – kmitočtové rozložení energie impulsové odezvy.

## 12.2 Rozdělení simulace dle počtu kanálů

Základní rozdělení simulací lze provést také dle **počtu výstupů** systému, který simuluje poslechový prostor. Pro **úspěšnou** simulaci je nutné definovat více než jeden výstup.

- **Jednokanálová** – poslechový prostor je simulován systémem SISO s pouze **jedním** výstupem. Systém popisuje šíření zvukových vln od zvukového zdroje k posluchači, zdroj a posluchač je specifikován pouze jedním bodem v prostoru. Tento druh simulace je **nedostatečný**, protože neudává žádné informace o **směru** přichozích zvukových vln. Hodí se pro **vývojové a ověřovací** účely pro

svůj jednoduchý popis např. jednou impulsovou odezvou nebo jednou sadou parametrů. Většinou se používá jako **výchozí** simulace pro další druhy simulace s větším počtem výstupních kanálů.

- **Dvoukanálová (stereofonní)** – poslechový prostor je simulován systémem SIMO se **dvěma** výstupy. Tento způsob simulace vychází přímo z jednobanálové simulace. Systém popisuje šíření zvukových paprsků od vysílače k posluchači, který je specifikován **dvěma** body. Definice těchto dvou bodů **není jednotná**. Tyto body mohou být popsány dvěma překrývajícími se body ve stejných souřadnicích a s **rozdílnými** směrovými charakteristikami, které by odpovídaly přichozím zvukovým vlnám zleva a zprava. Jindy jsou tyto body popsány pomocí **spekulativního** šíření zvukových paprsků tak, aby výsledná stereofonní báze simulace byla co **nejširší**. Mezi základní požadavky na stereofonní simulaci patří její **monofonní kompatibilita**. Pokud se sečtou výstupní signály stereofonní simulace, což je vlastně konverze na monofonní signál, **nesmí** se kromě nulové šířky stereofonní báze zásadním způsobem změnit charakter původní stereofonní simulace. Používá se především pro dodání **dojmu** z většího nebo jinak akusticky významného prostoru do jednotlivých zvukových stop nebo na úrovni již smíchaného zvuku.
- **Dvoukanálová (binaurální)** – poslechový prostor je také simulován systémem SIMO se dvěma výstupy. Systém popisuje šíření zvukových vln od zdroje k posluchači, který je kromě své polohy specifikován **orientací** hlavy v poslechovém prostoru. Orientace hlavy je popsána dvěma parametry, **azimutem** a **elevací**. Jeden výstup ze systému je určen přímo levému uchu a druhý přímo pravému uchu. Podmínkou je, že k reprodukci zvukového snímku jsou použita **sluchátka**. Pokud budou zařazeny také **transaurální** filtry je možné pro reprodukci použít dvě reproduktorové soustavy v obvyklém stereofonním uspořádání (ideálně v mrtvé komoře). Transaurální filtr je však vždy parametrizován k **aktuální poloze posluchače**, není možný současný poslech **více** posluchači pomocí reproduktorových soustav. Binaurální simulace jako jediná může principiálně poskytnout **přesnou** simulaci poslechového prostoru včetně orientace hlavy posluchače.
- **Vícekanálová** – poslechový prostor je simulován systémem s více výstupy SIMO – např. se třemi, pěti nebo osmi výstupy, což odpovídá 2D standardům vícekanálového zvuku. Systém nesimuluje jednoduše cestu zvukové vlny od vysílače k posluchači, ale pokouší se o simulaci **virtuálního poslechového prostoru v jiném** zatlumeném poslechovém prostoru (v obývacím pokoji, ideálně pak v mrtvé komoře). Předpokládá se tedy, že poslechový prostor, ve kterém má dojít k vytvoření jiného virtuálního poslechového prostoru, má **zanedbatelný** vliv na simulaci poslechového prostoru. Virtuální poslechový prostor je vytvořen prostřednictvím **sady** reproduktorových soustav umístěných **okolo** posluchače ve **standardizovaných** konfiguracích. Protože reproduktorové soustavy **obklopují** posluchače, jsou tyto systémy označovány jako **surround** systémy nebo systémy **prostorového** ozvučení. Při použití omezeného počtu reproduktorových soustav **nelze přesně** simulovat daný poslechový prostor, polohu posluchače a orientaci jeho hlavy. Je používán zejména pro zvukový **doprovod** k filmům. Zvukové pole je vytvořeno **kompromisním** způsobem, aby bylo možné prostorový zvukový snímek poskytnout **více** posluchačům najednou. Výše uvedené konfigurace předpokládají rozmístění reproduktorů více méně na kružnici, v jejímž **středu** je ideální poloha posluchače. Topologie

reproduktorových soustav je většinou **dvojrozměrná**, nově jsou u pokročilých systémů navíc používány i reproduktory umístěné nad posluchačem, ale nejde o přesnou simulaci elevace. U profesionálních nebo vědeckých aplikací se používá plnohodnotná **trojrozměrná** topologie, kdy jsou reproduktory rovnoměrně rozloženy na **ploše** opisující tvar polokoule a jejich počet přesahuje několik desítek. Ideální poloha posluchače je opět ve středu, tedy opět pouze pro **jednoho** posluchače. Pak je možné kromě polohy posluchače s dostatečnou přesností simulovat i **azimut** a **elevaci zdroje** zvukového vlnění.

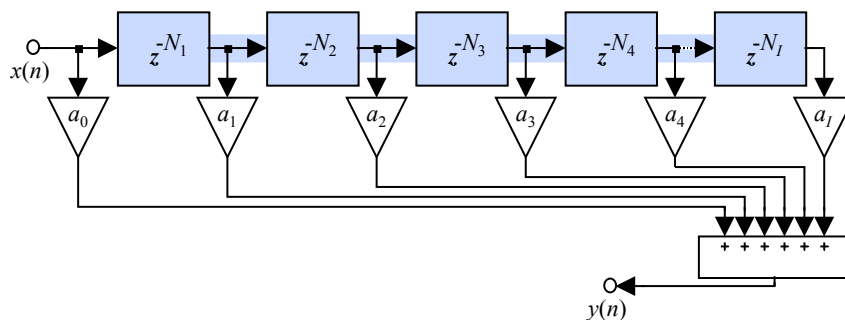
## 12.3 Struktury pro metody vjemového přístupu

V případě použití fyzikálního přístupu je z pohledu implementace potřebná struktura, která dostatečně **rychle** a s **minimálním** procesním zpožděním realizuje FIR filtr **vysokého** řádu. V případě aproximačního přístupu je potřeba tatáž struktura jen s podstatně **nižším** řádem a struktura realizující impulsovou odezvu, která má charakter exponenciálně doznívajícího barevného šumu pro simulaci mnohonásobných odrazů. Tyto přístupy tedy **nejsou** nějak rozmanité z pohledu implementace.

V případě smyslového přístupu se využívají **různé** struktury podle toho, kolik a které ze všech  $V$  vjemů je v případě dané aplikace nutné simulovat. Následující podkapitoly popisují možné struktury pro simulaci **prvotních odrazů**, **následných odrazů** a **mnohonásobných odrazů**. Struktury se od sebe liší dosahovanou **věrností** simulace a výpočtovou **náročností**.

### 12.3.1 Struktury pro simulaci prvotních odrazů

Základní strukturou využívanou pro simulaci prvotních odrazů je **zpožďovací linka s více výstupy**, která na každém z výstupů zpožďuje o  $N_i$  vzorků. Zpožďovací linka již byla podrobněji popsána v kapitole pojednávající o zásobnících. Zpožďovací linka je zde navíc vždy označena modrým pruhem, který naznačuje zpoždění v rámci jednoho zásobníku.

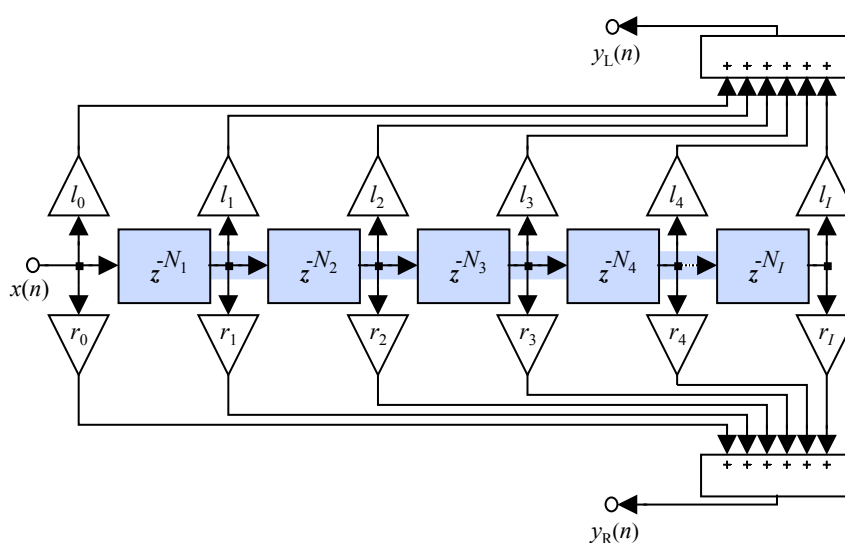


**Obrázek 12.2:** Zpožďovací linka s výstupem daným váhovaným součtem jednotlivých zpožděných výstupů

Vstupní posloupnost a každá ze zpožděných posloupností na jednotlivých výstupech zpožďovací linky je nejdříve váhována **koefficienty**  $a_i$  a následně sečtena do výstupní posloupnosti. Struktura je velice podobná přímé formě realizace standardního FIR systému, který však má jednotlivé zpožďovací bloky zpožďující **pouze o jeden** vzorek. Rozdíl je tedy v tom, že tato struktura nerealizuje násobení **nulovými** koefficienty, které odpovídají nulovým vzorkům v impulsové odezvě. Struktura tak realizuje systém s tzv. **řídkou impulsovou**

**odezvou.** Dosáhne se zcela zásadního snížení výpočtové náročnosti. Běžně se v tomto případě poměr nenulových ku nulovým vzorkům pohybuje v poměru 1:10 až 1:1000.

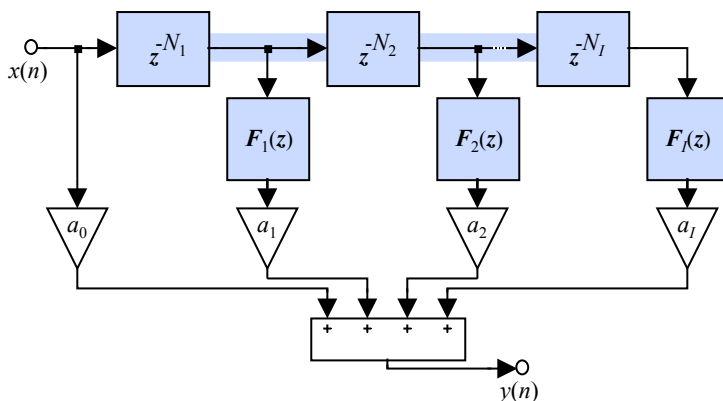
Při simulaci prvotních odrazů jsou váhovací koeficienty  $a_i$  použity pro popis **velikosti** a  $N_i$  pro popis časového **zpoždění** jednotlivých prvotních odrazů, jak dorazily k posluchači. Výjimkou je koeficient  $a_0$ , který slouží k simulaci velikosti přímé zvukové vlny. Simulovány jsou pouze ty odrazy, které jsou svou velikostí **významné**. Celkový počet simulovaných prvotních odrazů se u méně dokonalých simulací pohybuje kolem hodnoty 5 až 10, s požadavkem přesnější simulace prvotních odrazů i s menší velikostí se může pohybovat kolem hodnoty 50 až 100. Další navyšování příliš zvyšuje výpočetní náročnost, která by se blížila výpočtové náročnosti aproximačního přístupu. Je to SISO systém, tedy jedná se pouze o **jednokanálovou** simulaci poslechového prostoru. Pokud má být simulace **dvoukanálová**, např. stereofonní, jsou výstupem dva váhované součty zpožděných posloupností.



**Obrázek 12.3:** Zpožďovací linka se dvěma výstupy danými váhovanými součty jednotlivých zpožděných výstupů

Koeficienty  $l_i$  a  $r_i$  specifikují velikost konkrétních prvotních odrazů, které mají být vnímány v **levém** a **pravém** kanále simulace. Tato struktura **není monofonně kompatibilní**, pokud jsou koeficienty  $l_i = -r_i$  nebo  $-l_i = r_i$ . V tomto případě, kdy bude pro konkrétní odraz vytvořena **maximální** stereofonní báze a odrazy tak budou maximálně **externalizovány**, bude vytvořen vjem **velkého** poslechového prostoru. Pro opačné hodnoty koeficientů pro pravý a levý kanál však dojde po monofonní konverzi k úplnému potlačení prvotních odrazů. Pokud je při určité aplikaci požadována minimální citlivost na monofonní konverzi, je pro každé  $i$  jeden z koeficientů **nulový**. Stejně jako u jednokanálové simulace i zde se používá podobný počet výstupů, tentokrát na každý kanál.

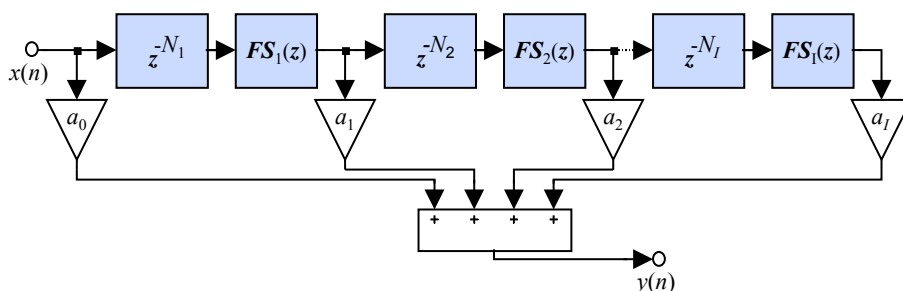
Problémem předcházejících struktur je simulace odrazení zvukové vlny **bez** jeho kmitočtové závislosti, což neodpovídá realitě. V poslechovém prostoru jsou překážky, od kterých se zvuková vlna odráží, a tyto překážky mají **kmitočtově závislou absorpci** části energie zvukové vlny, která na překážku dopadá. Tento jev je nutné také simulovat. Následující struktura je pro zjednodušení opět jednokanálová, má však na každý z výstupů zavedeny **kmitočtové filtry**  $F_i(z)$ , které mají simulovat kmitočtovou závislost konkrétního odrazu. Tyto filtry jsou **normovány**, velikost odrazu pak simuluje příslušný koeficient jako ve struktuře bez kmitočtových filtrů.



**Obrázek 12.4:** Zpožďovací linka se zavedenými filtry za výstupy ze zpožďovací linky

Zařazením kmitočtových filtrů se zásadním způsobem **zvýší** výpočetní náročnost struktury. Pokud konkrétní výstup ze zpožďovací linky simuluje odraz např. **2. řádu** (zvuková vlna se odrazila dvakrát obecně od různých překážek), musí být konkrétní kmitočtový filtr schopný simulovat kmitočtovou absorpci **obou** materiálů, což vede na zvýšení řádu kmitočtového filtru a o to větší další **navýšení** výpočetní náročnosti.

Následující struktura již není založena na zpožďovací lince jako doposud popsané struktury. Mezi jednotlivá zpoždění jsou vloženy kmitočtové filtry  $FS_i(z)$  nízkého řádu s malou výpočetní náročností. Tato struktura simuluje **postupné** odrážení zvukové vlny od jednotlivých překážek s kmitočtově závislou absorpcí.



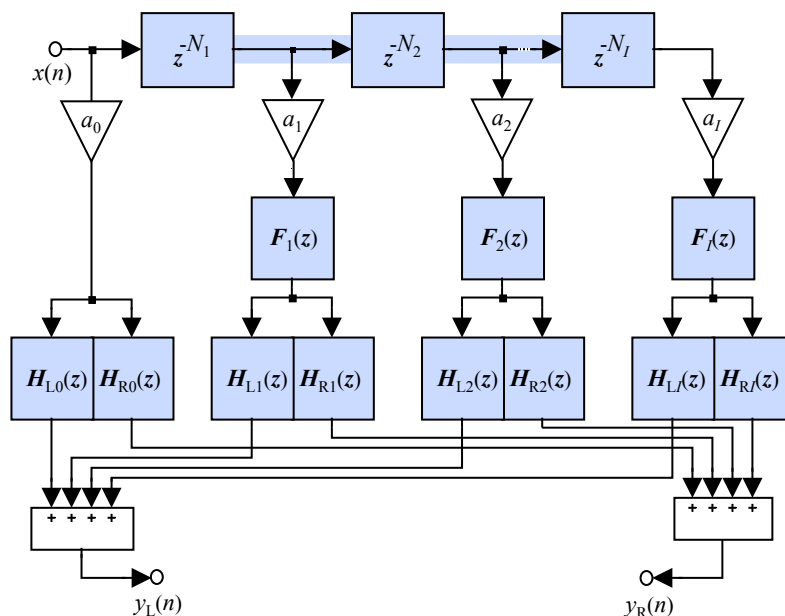
**Obrázek 12.5:** Zpožďovací linka se zavedenými filtry mezi jednotlivými zpožděními

Výsledkem je celkově **nižší** výpočetní náročnost, než v případě samostatných filtrů pro každý z výstupů jako v případě předcházející struktury. Řád kmitočtových filtrů se „zvýšuje“ jejich **sériovým řazením** přímo ve struktuře. Strukturu je vhodné použít **několikrát** pro cesty zvukového paprsku od zdroje k posluchači, které k němu dorazí s největší velikostí.

Doposud byly struktury schopné simulovat zpoždění, velikost a kmitočtovou závislost odražených vln. V žádném případě se však nejednalo o zavedení **směrnosti**, že by posluchač mohl jasně vnímat **azimut** a **elevaci** zdroje zvuku v poslechovém prostoru. Panoramování bylo tzv. **spekulativního** charakteru, nejčastěji je snahou dosáhnout **maximální** šířky báze.

Na následujícím obrázku je struktura, ve které jsou použity podsystémy, které realizují přenosové funkce hlavy HRTF na každou z významných odražených zvukových vln (dvojice přenosových funkcí  $H_{Li}(z)$ ,  $H_{Ri}(z)$ ) včetně vlny přímé  $H_{L0}(z)$ ,  $H_{R0}(z)$ ). Tato struktura realizuje **vjemovým přístupem binaurální simulaci prvotních odrazů**. Její výpočtová náročnost je násobně vyšší, než u jednoduchých struktur vycházejících jen ze zpožďovací linky.

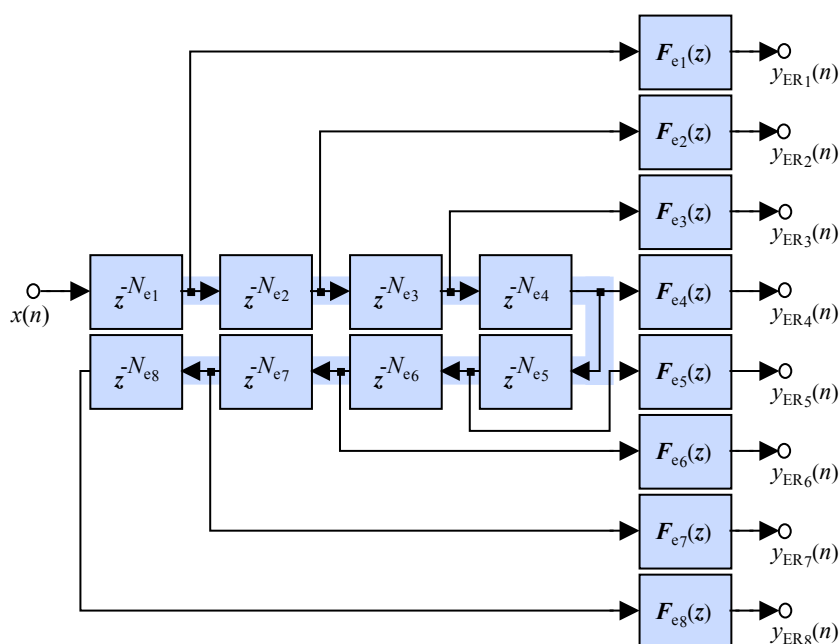




**Obrázek 12.6:** Zpožďovací linka se zavedenými filtry a HRTF za výstupy ze zpožďovací linky

Pro nejvýznamnější prvotní odrazy je tak možné nastavit kromě velikosti, zpoždění a kmitočtově závislé absorpce také azimut a elevaci. Všechny parametry je možné měnit **nezávisle na sobě**, změny parametrů jsou **nekorelované**. Pro vyšší hodnoty  $I$  může být výpočetní náročnost struktury vyšší, než v případě fyzikálního přístupu.

Všechny doposud popsané struktury pro simulaci prvotních odrazů **přímo nezohledňují požadavky na vícekanálové simulace**. Na následujícím obrázku je struktura  $\mathbf{H}_{ER}(z)$ , která je přímo optimalizovaná na vícekanálový výstup simulace, konkrétně v tomto případě osmikanálový.



**Obrázek 12.7:** Blokové schéma zpožďovací linky pro sběrníkové propojení struktur

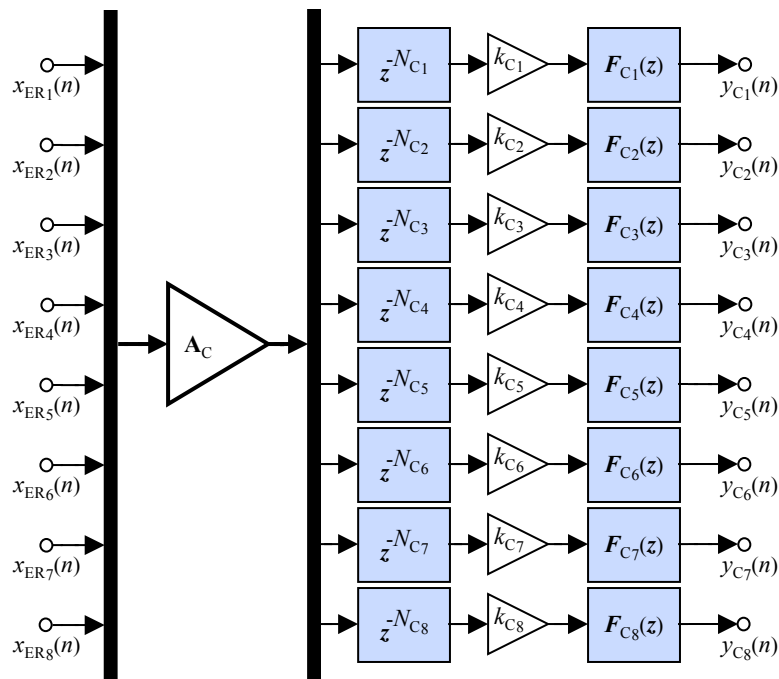
Snahou je s **minimálním** nárůstem výpočetní náročnosti dosahovat **většího** počtu výstupů struktury. Základním rozdílem od předcházejících struktur je její **sběrníkový výstup**. **Nedochází** k sečtení jednotlivých odrazů, které mají zavedenu kmitočtovou závislost, ale jsou přímo výstupy SIMO struktury. Tímto je zajištěna možnost **nezávislého** následného zpracování **každého** z prvotních odrazů. Počet simulovaných prvotních odrazů je spíše **menší**, pracuje se sběrníci s šířkou mocniny dvou, nejčastěji pak s šířkou 4 a 8. V konkrétním případě tak dochází k simulaci až 8 nejvýznamnějších prvotních odrazů v poslechovém prostoru, každý z odrazů má zavedenu **vlastní** kmitočtovou závislost absorpce.

### 12.3.2 Struktura pro simulaci následných odrazů

Jedním z dalších parametrů, s kterými se při vjemovém přístupu pracuje, a který vychází ze **statistického modelu** poslechového prostoru, je **počet odrazů za jednu sekundu**  $D_i(t)$ . Počet odrazů **narůstá** se zvyšujícím se **časem kvadraticky** a je **nepřímo úměrný objemu** poslechového prostoru. Během simulace tedy musí docházet ke **snížování** počtu nulových vzorků impulsové odezvy mezi vzorky nenulovými. Tento jev se zjednodušeně popisuje jako tzv. **zahušťování** impulsové odezvy. V impulsové odezvě pak od jejího určitého vzorku nastane stav, kdy v ní nejsou **žádné** vzorky.

Zahuštění impulsové odezvy je nejčastěji řešeno vložením **fázovacích článků** do konkrétní struktury, což je velmi efektivní způsob, je možné nastavit míru zahuštění a velikost nových vzorků. Není však možné zahuštění impulsové odezvy **více** řídit.

Pokročilé struktury používají výpočetně **náročnější** postup, který umožňuje **lepší** kontrolu nad **postupným** zahušťováním impulsové odezvy. Dále popsaná struktura se používá pro simulace pracující se **sběrníkově propojenými** strukturami, navazuje přímo na předcházející strukturu  $H_{ER}(z)$ . Tato struktura zajišťuje řízené **zahuštění prvotních odrazů**, simuluje vznik **následných odrazů**.



**Obrázek 12.8:** Blokové schéma zpožďovací sítě se zavedenou individuální kmitočtovou závislostí jednotlivých výstupů

Struktura je poměrně jednoduchá a realizována konkrétní **zpoždovací sítí**  $H_C(z)$ . Na každém ze vstupů je díky předcházející struktuře vždy jeden odraz. Odrazy jsou zpracovány váhovací maticí LSM  $8 \times 8$  s označením  $A_C$ , na každém z jejich výstupů je pak 8 odrazů, které jsou lineární kombinací odrazů ze všech vstupů, celkem je tedy ve struktuře 64 odrazů. Každý z 8 sběrníkových signálů obsahující 8 odrazů je následně zpožděn o různý počet vzorků  $N_{Ci}$ , je změněna jejich velikost vahami  $k_{Ci}$  simulujícím absorpci a následně je simulována kmitočtová závislost absorpce  $F_{Ci}(z)$ .

Pokud je zahuštění prvotních odrazů nedostatečné je možné tuto strukturu ve sběrnici **řadit** i vícekrát **za sebe** s jinými parametry. Např. při použití sběrnice s šířkou 8 je možné získat po jejím druhém zařazení celkem 512 odrazů, každý z 8 sběrníkových signálů obsahuje 64 kmitočtově závislých odrazů.

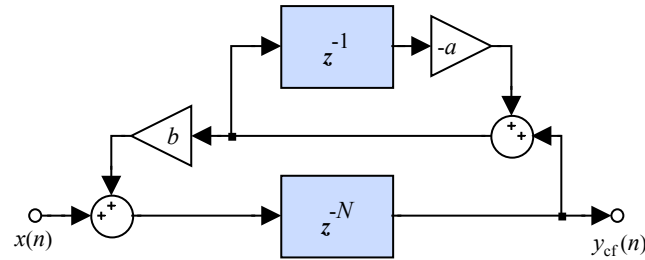
Zatímco struktury pro simulaci prvotních odrazů popsané v předcházející kapitole vyžadují **navýšení výstupů** ze zpoždovací linky, aby bylo dosaženo potřebného **zahuštění** impulsové odezvy pro každý z kanálů, tato struktura následných odrazů generuje současně 8 kanálů a zahuštění impulsové odezvy lze dosáhnout jen opakováním struktury. Navíc dochází k „automatickému“ **zahuštění** impulsové odezvy s **druhou mocninou** času, což odpovídá statistickému modelu poslechového prostoru.

### 12.3.3 Struktury pro simulaci mnohonásobných odrazů

Struktury pro simulaci prvotních a následných odrazů jsou založeny na zpoždovacích linkách nebo zpoždovacích sítích **bez** zavedených **zpětných vazeb**. V podstatě se tedy jedná o struktury realizující FIR systémy, které jsou obohaceny o filtry pro simulaci kmitočtové závislé absorpce, případně o systémy HRTF. Filtry pro simulaci kmitočtové závislé absorpce jsou téměř vždy filtry typu IIR velmi nízkého řádu, u jednoduchých struktur jsou to jednopólové dolní propusti, u pokročilých systémů se pak používají parametrické LSF a HSF 1. řádu. Naproti tomu jsou struktury pro **simulaci mnohonásobných odrazů** založeny výhradně na **zpětnovazebních** strukturách.

**Ideální** strukturu pro simulaci mnohonásobných odrazů lze popsat jako diskrétní systém s **nekonečnou** impulsovou odezvou, která je náhodná a je popsatelná jako **bílý šum**. Mezi základní požadavky na takovou strukturu patří možnost nastavení **doby dozvuku**  $T_{60}$ , která by odpovídala poklesu hladiny akustického tlaku v poslechového prostoru na úroveň -60 dB od okamžiku excitace. Dalším základním požadavkem je možnost zabarvení simulované impulsové odezvy, odezva tedy nebude mít charakter bílého, ale barevného šumu. Zjednodušeně lze tento požadavek popsat pomocí **kmitočtové závislosti doby dozvuku**  $T_{60}(f)$ . Kmitočtová závislost doby dozvuku je daná kmitočtově závislou absorpcí materiálů použitých v poslechového prostoru. Typicky je v běžných reálných poslechového prostorech doba dozvuku na **nižších** kmitočtech **delší**, než na kmitočtech **vyšších**.

**Základní** zpoždovací strukturou s nekonečnou impulsní odezvou, která již byla dříve popsána, je IIR hřebenový filtr. Jeho impulsová odezva však **nemá** charakter bílého šumu, vzorky impulsové odezvy jsou **rovnoměrně** rozloženy v čase, jejich velikost může být konstantní, dobu dozvuku bude možné simulovat velikostí **zpětné vazby** a tím změnit obálku nenulových vzorků na exponenciálně klesající. Kmitočtovou závislost doby dozvuku je pak možné simulovat zařazením **kmitočtového filtru do zpětné vazby**. U nejjednodušších struktur je základním požadavkem minimální výpočetní náročnost, také tento kmitočtový filtr musí být co **nejjednodušší**. Jak již bylo řečeno, doba dozvuku na nízkých kmitočtech je téměř vždy větší než doba dozvuku na vyšších kmitočtech. Řešením je tedy zařazení **dolní propusti** do zpětné vazby. Nejjednodušší realizací je již zmíněná **jednopólová dolní propust**, jejíž zařazení do IIR hřebenového filtru je patrné na následujícím obrázku.



**Obrázek 12.9:** IIR hřebenový filtr se zařazenou jednopólovou dolní propustí.

Přenosová funkce tohoto lineárního časově invariantního systému vycházejícího z IIR hřebenového filtru je definována rovnicí

$$H_{cf}(z) = \frac{z^{-N} + az^{-(N+1)}}{1 + az^{-1} - bz^{-N}}, \quad (12.1)$$

kde jsou koeficienty systému pro zpětnovazební dolní propust definovány jako  $a = -g_c$ ,  $b = g_c - 1$ . Parametr  $g_c$  je pak definován rovnicí

$$g_c = 2 - \cos(2\pi f_c T_{vz}) - \sqrt{(\cos(2\pi f_c T_{vz}) - 2)^2 - 1}, \quad (12.2)$$

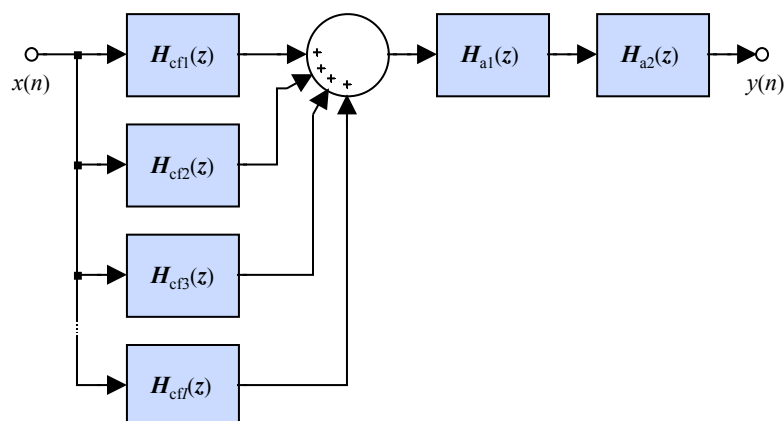
kde  $T_{vz}$  je vzorkovací perioda a  $f_c$  je mezní kmitočet dolní propusti.

Historické experimenty se simulací poslechového prostoru byly založeny na simulaci vlastních kmitů poslechového prostoru. K tomu byly použity **paralelně** řazené IIR hřebenové filtry. Byly použity pouze 4 tyto filtry, byly tedy simulovány pouze 4 vlastní kmitů, jejichž kmitočet se řídil dobou **zpoždění** každého z paralelně zapojených hřebenových filtrů. Tato primitivní simulace nedosahovala **dostatečné** hustoty impulsové odezvy a počet nenulových vzorků **nenarůstal** s časem. Proto byly za strukturu paralelních IIR hřebenových filtrů vloženy dva fázovací články, které impulsovou odezvu zahustily a zajistily nárůst počtu nenulových vzorků s časem. Tuto první strukturu publikoval Shroeder v roce 1962 a struktura byl dále rozvinuta Moorem.

Nevýhodou Shroederova modelu byla nemožnost zavedení kmitočtové závislé doby dozvuku, která je zásadní pro tzv. **přirozeně znějící** simulaci poslechového prostoru. Navíc díky simulaci malého počtu vlastních kmitů poslechového prostoru neměla odezva charakter bílého, ale poměrně intenzivně **zabarveného** šumu, v odezvě byly patrné příliš výrazné **rezonance**.

Moorer do zpětných vazeb všech IIR hřebenových filtrů přidal **dolní propusti**, čímž zavedl kmitočtovou závislost dozvuku a tím také možnost docílení přirozeně znějící simulace poslechového prostoru. Aby **potlačil** zabarvení odezvy, **zvýšil** počet paralelně řazených IIR hřebenových filtrů na 6. Z dnešního pohledu je tento počet stále **malý**, běžně se jich používá více než 10, aby bylo zabarvení odezvy **minimální**. Na dalším obrázku je blokové schéma struktury pro simulaci mnohonásobných odrazů v poslechovém prostoru, které vychází z Moorerovy struktury. Kmitočtově závislé IIR hřebenové filtry jsou značeny  $H_{cf1}(z)$  až  $H_{cf6}(z)$  a fázovací články pak  $H_{a1}(z)$  a  $H_{a2}(z)$ . V obou popsanych strukturách jsou použity pouze 2 fázovací články, běžně se jich používá až 5, přičemž jsou kombinovány jak **sériově**

řazené tak **vnořené** fázovací články. Tím se dosahuje **různé** míry a různého způsobu **zahuštění** impulsové odezvy.

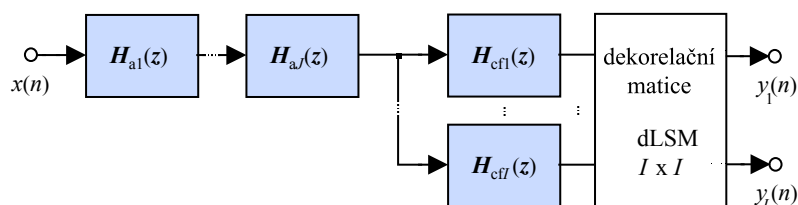


**Obrázek 12.10:** Moorova kmitočtově závislá struktura

Byly také vyvinuty struktury pro simulaci mnohonásobných odrazů v poslechovém prostoru, které vychází z principu **sériového** řazení několika vnořených fázovacích článků, např. Gardnerova nebo Dattorova struktura. Jejich výhodou je poměrně malá výpočetní náročnost, tu však výrazně převyšuje jejich nevýhoda, struktura **neumožňuje nezávislé změny parametrů** simulace poslechového prostoru. Díky sériovému nebo vnořenému řazení struktur změna jednoho parametru **ovlivní** i ostatní parametry.

Doposud popsaná struktura je pouze jednokanálová, prakticky je však vždy nutná alespoň **dvoukanálová** nebo dokonce **vícekanálová** struktura pro simulaci mnohonásobných odrazů. Je možné použít **dvě** a **více** jednokanálových struktur s odlišným nastavením parametrů, aby jejich odezvy byly **nekorelované**. Pokud by byly odezvy korelované nebo dokonce stejné, docházelo by k jevu **internalizace**, tedy vytracení **prostorovosti** odezev (jak širokou bázi posluchač během simulace vnímá). Požadována je naopak maximální **externalizace**, jejíž výsledkem je maximální prostorovost odezev. Jiným nedostatkem je skutečnost, že se zvyšujícím se počtem struktur pro simulaci mnohonásobných odrazů výpočetní náročnost úměrně narůstá.

Jiným postupem, který zajišťuje **externalizaci**, je použití **jednokanálové** struktury pro simulaci mnohonásobných odrazů a více výstupů vytvořit tzv. **dekorelační** maticí.

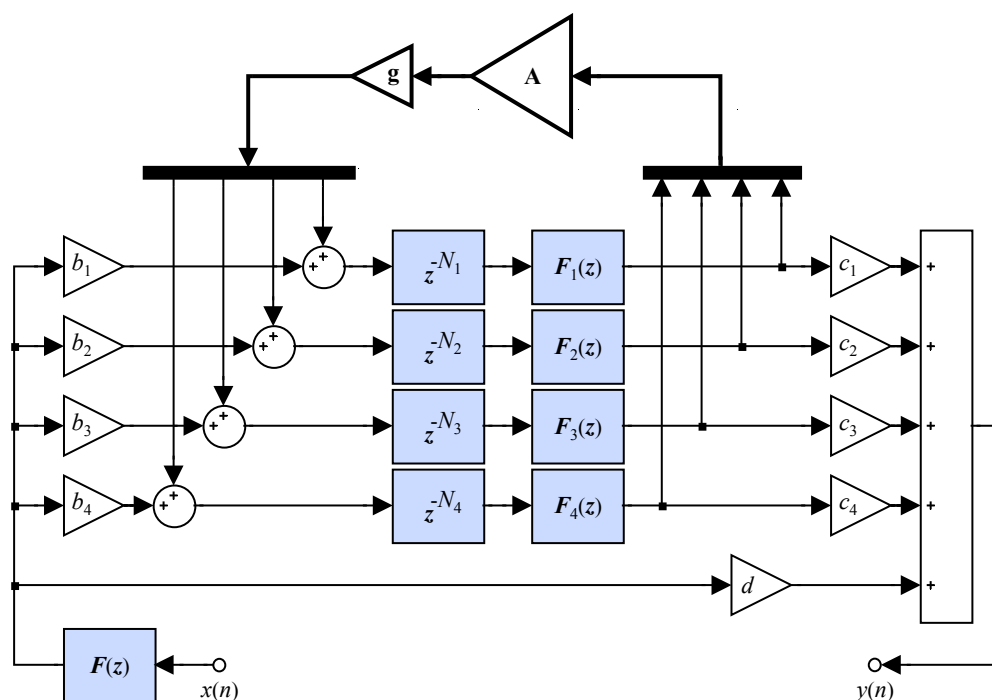


**Obrázek 12.11:** Použití dekorelační matice při simulaci mnohonásobných odrazů

Nejdříve dochází stále na jednokanálové úrovni k **zahuštění** impulsové odezvy pomocí série nebo vnoření celkem  $J$  fázovacích článků. Následně je signál veden do  $I$  kmitočtově závislých IIR hřebenových filtrů. Výstupy z těchto hřebenových filtrů **nejdou sečteny**, ale

jsou použity na vstup lineární váhovací matice  $I \times I$ , která v tomto případě realizuje **dekorelační matici** dLSM. Jako dekorelační matice se používá matice **unitární**, např. Hadamardova matice. Hadamardova matice je vždy čtvercová a její rozměr má vždy velikost  $2^a$  a není přímo unitární, je nutné ji pro zachování unitárnosti váhovat hodnotou  $1/\sqrt{I}$ . Každou unitární matici je možné transformovat na **jinou** unitární matici. K transformaci je možné použít např. **Jacobiho** rotaci, kterou je možné opakovat a generovat tak vždy novou unitární matici. Výsledkem je  $I$  nekorelovaných výstupů struktury pro simulaci mnohonásobných odrazů.

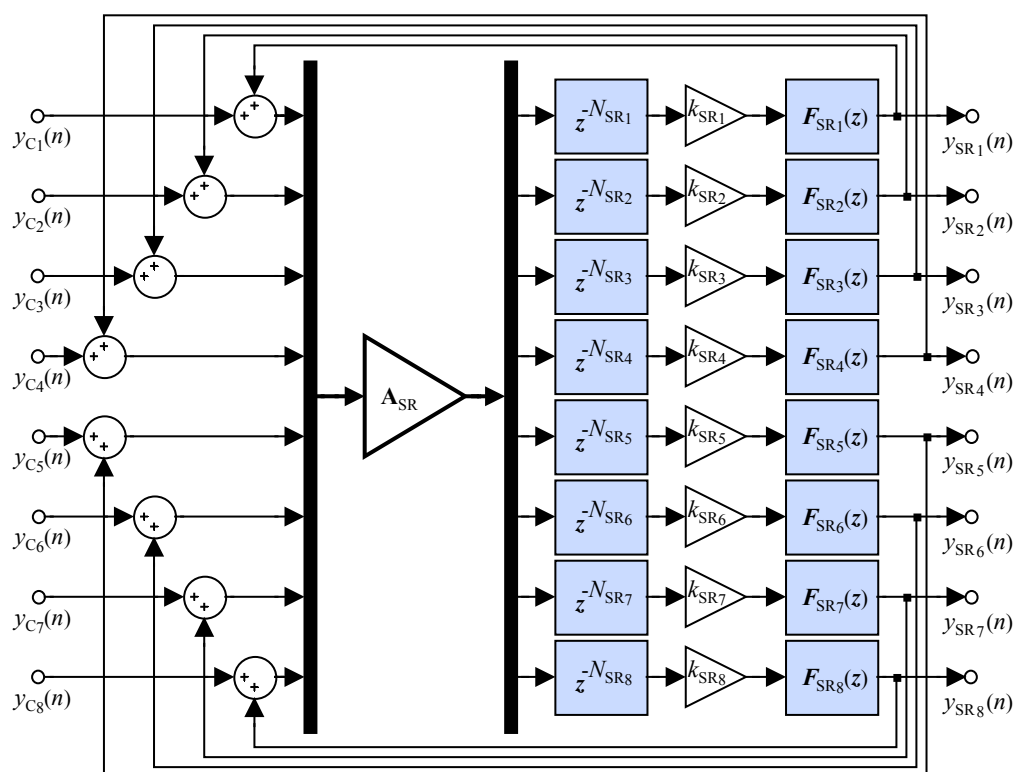
Pro **pokročilou** simulaci mnohonásobných odrazů se hodí **zpětnovazební zpožďovací síť FDN**, jejichž kmitočtově nezávislá podoba byla popsána v kapitole o pokročilých zpětnovazebních strukturách. Jot v roce 1991 zařadil do každé z cest FDN kmitočtové filtry  $F_1(z)$  až  $F_4(z)$ , kmitočtový filtr  $F(z)$  také zařadil do cesty vstupního signálu. Na obrázku je ukázka 4-cestné kmitočtově závislé FDN.



**Obrázek 12.12:** Kmitočtově závislá FDN dle Jota

Význam jednotlivých parametrů již byl dříve popsán. Zpětná vazba je zde definována pomocí dvou parametrů, součinem matice a vektoru  $\mathbf{Ag}$ . Pro simulaci mnohonásobných odrazů poslechového prostoru musí být zpětnovazební matice  $\mathbf{A}$  **unitární** a vektorem  $\mathbf{g}$  se řídí doba **dozvuku**  $T_{60}$ , jednotlivými filtry  $F_1(z)$  až  $F_4(z)$  se pak řídí **kmitočtově závislá** doba dozvuku  $T_{60}(f)$ . Pokud bude vektor  $\mathbf{g}$  jednotkový a budou vyřazeny všechny filtry, bude se impulsová odezva této struktury blížit **bílému** šumu s **narůstajícím počtem** jejich nenulových vzorků, čímž dochází k simulaci postupného nárůstu počtu odrazů v poslechovém prostoru.

Na následujícím obrázku je **modifikovaná zpětnovazební zpožďovací síť**  $\mathbf{H}_{SR}(z)$ , která je upravena pro **sběrníkové** propojení struktur. Modifikovaná FDN vychází z **modifikovaného hřebenového filtru**, jehož zpětná vazba je vždy rovna 1, původní zpětná vazba je pak v **přímé cestě signálu**. Při pozornějším náhledu je patrné, že je tato struktura **téměř shodná** se strukturou pro simulaci **následných odrazů**  $\mathbf{H}_C(z)$ , rozdílem je pouze zavedená **jednotková zpětná vazba** nad všemi 8 cestami.

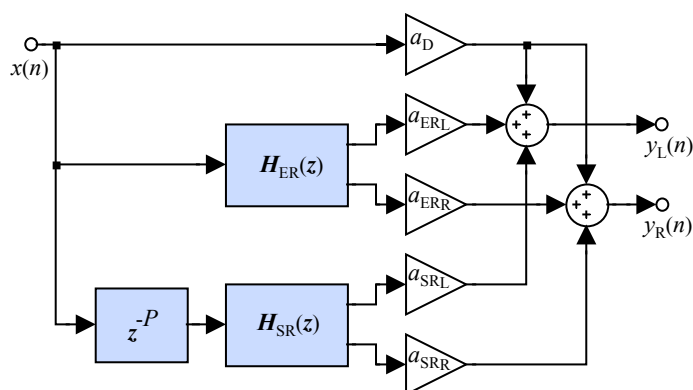


**Obrázek 12.13:** Blokové schéma modifikované zpětnovazební zpožďovací sítě s kmitočtově závislou dobou dozvuku pro sběrníkové propojení struktur

Matice  $\mathbf{A}_{SR}$  zde musí být jako v předcházejícím případě **unitární**, doba dozvuku je v každé z cest nezávisle řízena vahami  $k_{SRi}$  a její kmitočtová závislost pak filtry  $F_{SRi}(z)$ . Pro dosažení nízké výpočetní náročnosti se opět používají jednopólové dolní propusti, pro pokročilejší simulace se používají shelving filtry.

#### 12.3.4 Propojení struktur pro simulaci poslechového prostoru

Již popsané struktury je nutné spojit do **nadstruktury**, která jako celek realizuje určitý typ simulace daného poslechového prostoru na základě vjemového přístupu. Nejdříve je popsáno **paralelní** propojení struktur, které se používá pro **dvoukanálovou** simulaci poslechového prostoru. Na následujícím obrázku je blokové schéma takové struktury.



**Obrázek 12.14:** Paralelní propojení struktur pro dvoukanálový výstup

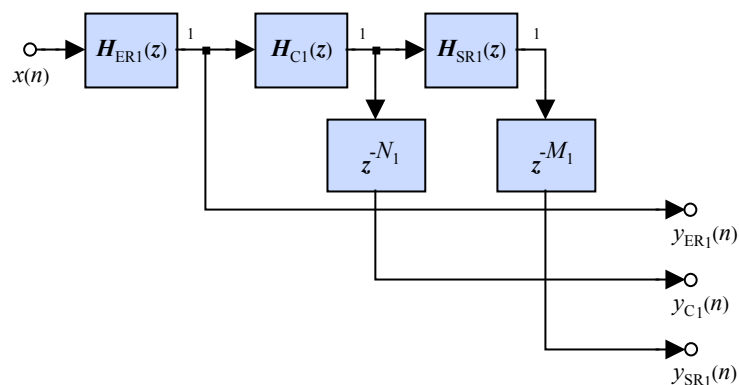
V blokovém schématu je mezi setrvačnými systémy **dvoukanálová** struktura pro simulaci prvotních odrazů, blok zpoždění o  $P$  vzorků a **dvoukanálová** struktura pro simulaci mnohonásobných odrazů. Zpoždění o  $P$  vzorků (Predelay) specifikuje časové **zpoždění**, od kterého má být na výstupu přítomna kromě odezvy struktury prvotních odrazů **také** odezva struktury mnohonásobných odrazů. Tímto parametrem je možné na sebe potřebným způsobem **časově navázat odezvu** struktury pro simulaci prvotních a mnohonásobných odrazů. V nadstruktuře jsou ještě váhy na **vstupu** a na každém z **výstupů** použitých struktur. Těmito vahami se realizuje **panoramování** všech typů simulovaných **odrazů** zvukové vlny v poslechovém prostoru. Je možné nastavit poměr prezence prvotních  $a_{ERL}$ ,  $a_{ERR}$  (Early Reflections) a mnohonásobných  $a_{SRL}$ ,  $a_{SRR}$  (Subsequent Reverberation) odrazů vzhledem k původnímu zdroji signálu a také v rámci dvoukanálové L – R báze. Jelikož je váha  $a_D$  (Direct) shodná pro oba kanály - původní vstupní signál má stejnou váhu pro levý i pravý kanál, není možné panoramovat zdroj zvuku. Pokud je nutné panoramovat i zdroj zvuku je i tato váha zdvojená pro levý a pravý kanál.

Je nutné si uvědomit, že panoramování v případě dvoukanálové stereofonní simulace má velice **omezené** možnosti. Naopak v případě dvoukanálové binaurální simulace je nutné, aby si váhy pro levý a pravý kanál především prvotních odrazů byly sobě **rovny**, k simulaci polohy zdroje zvuku dochází již **přímo** ve struktuře se zavedenými HRTF.

Popsaná nadstruktura je velice jednoduchá především díky malému počtu kanálů a použití pouze dvou struktur. V případě vícekanálových simulací je nadstruktura podstatně **složitější** především díky **většímu** počtu kanálů, které je nutné **panoramovat**. V případě pokročilejších simulací je složitější i díky použití struktury pro simulaci **následných odrazů** a také díky větším možnostem parametrizace simulace následných odrazů. Je možná kontrola zahušťování impulsové odezvy právě v její části odpovídající následným odrazům.

Vícekanálový výstup simulace poslechových prostorů lze samozřejmě docílit velice podobným způsobem, jako v případě dvoukanálové simulace, ale výpočetní náročnost s počtem kanálů **narůstá**. Dále je popsána nadstruktura, která umožňuje výpočetně **efektivní simulaci** až 8 kanálů a která vychází ze **sběrníkového** propojení struktur.

Následující obrázek prezentuje možnosti takové nadstrukтуры při **postupném** zahušťování impulsní odezvy pro **první** sběrníkový signál. V nadstruktuře jsou použity již dříve popsané 8-kanálové struktury pro simulaci prvotních  $\mathbf{H}_{ER}(z)$ , následných  $\mathbf{H}_C(z)$  a mnohonásobných  $\mathbf{H}_{SR}(z)$  odrazů, které jsou typu SIMO a MIMO. Sběrníkové propojení je z pohledu **vstupu** strukturou **sériovou** a z pohledu **výstupu** pak **paralelní** strukturou.



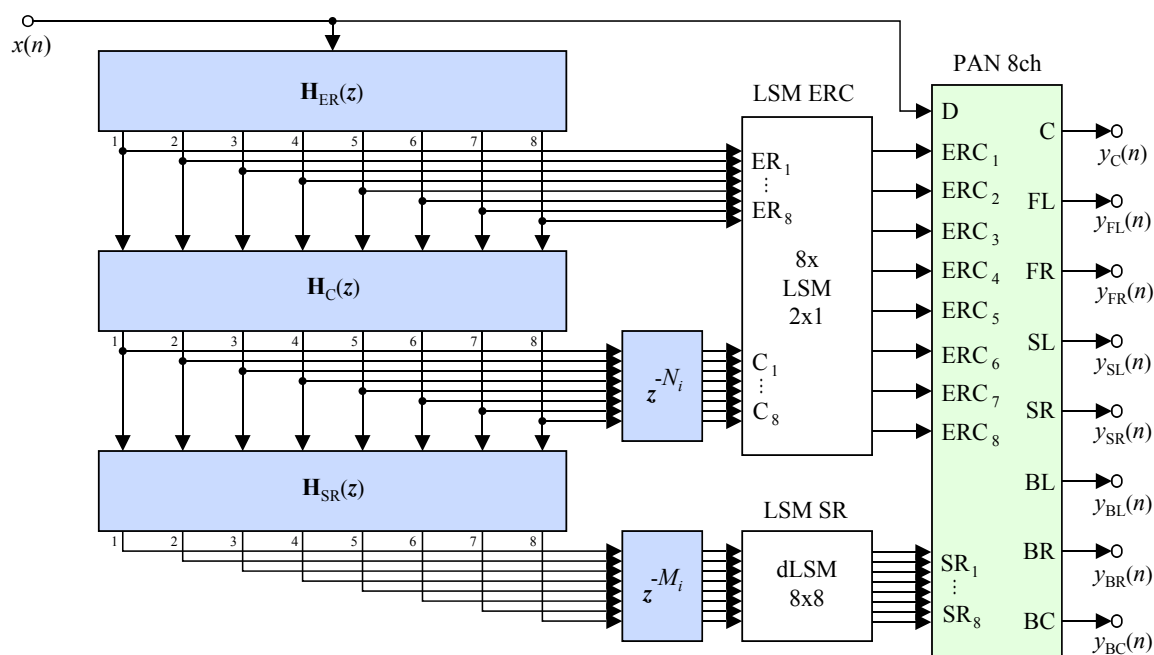
**Obrázek 12.15:** Sběrníkové propojení struktur pro vícekanálový výstup s použitím panoramovacího bloku



Vstupní signál je v **sérii** nejdříve transformován na 8 prvotních odrazů, čímž je **vytvořen** sběrnicevý výstup, následně je pak vytvořeno 8 **následných** odrazů v **každém** kanále sběrnice, celkem je tedy simulováno 64 následných odrazů. Pak je každý sběrnicevý signál z 8 simulovaných odrazů přiveden na vstup zpětnovazební zpožďovací sítě, která může generovat **nekonečný** počet odrazů, ale nad jejich vlastnostmi již není taková kontrola jako v případě prvních dvou sériových struktur. Pokud je požadována větší kontrola nad větším počtem následných odrazů, zařadí se **větší** počet struktur pro simulaci **následných** odrazů, obvykle však není nutné použít více než 2.

Výstupní signály ze struktury pro simulaci následných a mnohonásobných signálů jsou pak ještě **zpožděny** pomocí násobných zpoždění o  $N_i$  a  $M_i$  vzorků, čímž je možné v každém kanále **nezávisle** na sebe **časově navázat** jednotlivé části odezvy simulace podobným způsobem jako v případě dvoukanálové struktury. Zpožděné výstupy jsou dále zpracovány lineárními váhovacími maticemi, kde dochází ke sčítání, tedy k **paralelnímu** řazení výstupu.

Na následujícím obrázku je pak kompletní zapojení nadstruktury včetně panoramovacího bloku. V tomto případě se panoramuje do **8-kanálového rovnoměrně obklopujícího formátu** kolem posluchače, kdy jednotlivé reproduktory jsou na kruhu a směrnice sousedních reproduktorů svírají úhel  $45^\circ$ . V této konfiguraci jsou reproduktory obvykle značeny C (Center), FL (Front Left), FR (Front Right), SL (Side Left), SR (Side Right), BL (Back Left), BR (Back Right) a BC (Back Center). Nadstruktura včetně panoramovacího bloku bude generovat tyto typy signálů.



**Obrázek 12.16:** Sběrnicevé propojení struktur pro vícekanálový výstup s použitím panoramovacího bloku

Tyto signály jsou výsledkem zvolené **panoramovací metody**, nejčastěji se používá metoda VBAP (Vector Based Amplitude Panning), kdy dochází vždy ke komplexnímu panoramování **zdroje** zvuku včetně všech **odrazů** zvukové vlny v poslechovém prostoru. Zatímco **azimut** zdroje zvuku (v této konfiguraci není možné simulovat elevaci) je určen především panoramováním vstupního signálu označeného jako D, vnímání **vzdálenosti** zdroje

od posluchače je dán především panoramováním prvotních a následných odrazů společně označených jako  $ERC_i$ . Tyto signály se také menší měrou podílí na vnímání azimutu zdroje zvuku. Signály označené jako  $SR_i$  slouží především k simulaci **velikosti** prostoru jako takového, k simulaci jeho vnitřního objemu, s narůstající dobou dozvuku je vnímán **objemnější** poslechový prostor.

Panoramovací blok je realizován jako časově variantní lineární systém, jehož řízení samo o sobě je poměrně složitý systém. Jsou používány dvě rozdílné metody řízení při panoramování odrazů v poslechovém prostoru.

- **Spekulativní panoramování** odrazů v poslechovém prostoru - do azimutu zdroje zvuku je panoramován signál  $D$ , do azimutů **blízkých** zdrojů jsou panoramovány signály  $ERC_i$  a **za posluchače vzhledem k zdroji** zvuku jsou panoramovány s **menší** mírou opět signály  $ERC_i$  a **především** pak signály  $SR_i$ . Spekulativní panoramování je výpočetně **nenáročné**, vjem však není zcela autentický.
- **Precizní panoramování** odrazů v poslechovém prostoru – nejdříve je zvolen konkrétní 2D **virtuální** poslechový prostor, poloha **zdroje** a **posluchače**. Je použita některá z metod pro modelování šíření zvukového paprsku v poslechovém prostoru, výsledkem modelování nejsou pouze zpoždění a velikosti odrazů, ale také jejich **směr**, ze kterého k posluchači dopadají. Všechny signály  $ERC_i$  jsou pak **panoramovány** také dle těchto směrů. Signály  $SR_i$  jsou obvykle panoramovány pouze spekulativně. Precizní panoramování je výpočetně **náročné**, je prováděno modelování šíření zvukových paprsků v poslechovém prostoru. Výsledkem je však velmi realistické vnímání virtuálního poslechového prostoru.

Všechny signály, které slouží jako vstupní signály do panoramovacího bloku, jsou výstupem **lineárních váhovacích matic**. Systém s označením LSM ERC je složen s celkem 8 lineárních váhovacích matic, v tomto konkrétním případě s rozměrem pouze  $2 \times 1$ . Lineární váhovací matice  $A_C$  ve struktuře  $H_C(z)$  na každém ze sběrníkových signálů vytvoří určitou lineární kombinaci vstupních sběrníkových signálů. Zpoždění mezi jednotlivými odrazy na každém ze sběrníkových signálů  $y_{C_i}(n)$  je shodné, nakonec se jen každá ze sad odrazů na sběrnici v rámci této struktury celkově zpozdí o jiný počet vzorků. LSM ERC provádí další **lineární kombinaci**, tentokrát sběrníkových signálů  $y_{ER_i}(n)$  se všemi  $y_{C_i}(n)$ , které jsou předtím ještě zpožděny o  $N_i$  vzorků. Proces vytváření a zahušťování prvních 8 odrazů a následných odrazů tak může být velmi dobře řízen.

Výstupní sběrníkové signály  $y_{SR_i}(n)$  ze zpětnovazební zpožďovací matice jsou ještě zpožděny o  $M_i$  vzorků a následně jsou **dekorelovány** lineární váhovací maticí dLSM s rozměrem  $8 \times 8$ . Důvod použití je zcela stejný, jako v již popsané dvoukanálové struktuře.

