

Mobilná aplikácia na výpočet akustických difúzorov

Oliver Béres

3AIB, 2017 – 2018

Abstrakt: Práca je zameraná na umožnenie zručnejším ľuďom v nie veľmi priaznivej finančnej situácii si vyrobiť svoj vlastný akustický difúzor, ktorého ceny v obchodoch sú veľmi vysoké. Aplikácia taktiež umožňuje výrobu akustického difúzora podľa vlastných potrieb (či už ohľadom veľkosti, dostupných materiálov alebo frekvencie, na kt. ho chceme navrhnuť). Má jednoduché ovládanie a mnoho výhod oproti už existujúcim počítačovým aplikáciám.

Kľúčové slová: akustický difúzor, akustika, QRD, 2D QRD, Skyline

Zoznam skratiek a značiek

c – rýchlosť zvuku (m/s), obvykle 343m/s

N – počet šachiet difúzora (alebo hranolov v 1 rade), prvočíslo

s – sekvenčné čísla difúzora (integers)

s_n – sekvenčné číslo n -tej šachty difúzora (integer)

$s_{n,m}$ – sekvenčné číslo hranola na pozícii $[n,m]$ (integer)

w – šírka jednej šachty (alebo jedného hranola) difúzora (m)

d_n – hĺbka n -tej šachty difúzora (m)

$h_{n,m}$ – výška hranola na pozícii $[n,m]$ (m)

DF – „design frekvencia“, teda frekvencia, na ktorú je difúzor navrhnutý (hz)

wl - „*wave length*“, teda vlnová dĺžka (m)

1 Úvod

Akustika miestností je téma, ktorá zahŕňa len úzku skupinku ľudí. Väčšina z nás si vôbec neuvedomuje, aká je akustika v miestnostiach kde sa nachádzame a ani sa nezamýšľa nad tým, či by ju nebolo treba aspoň čiastočne upraviť.

Viete, že zvuky, ktoré počujete v obyčajných miestnostiach s neupravenou akustikou popravde nie sú ani reálne také, aké boli vydané zdrojom? Berme do úvahy len jednoduchý tleskot. Zvuk sa vytvorí narazením dvoch rúk do seba, čo trvá fakt len veľmi krátku chvíľu. Tak prečo počujeme ten zvuk aj niekoľko sekúnd? Za všetko môže ozvena a odražanie sa zvukových vln od okolitých objektov a stien. Vďaka tomu sa daný zvuk deformuje a jeho trvanie sa predlží, čo spôsobí to, že vy ho počujete už v úplne inej podobe.

Našťastie, existujú riešenia na úpravu akustiky v miestnostiach, ktoré môžu tieto nepriaznivé faktory eliminovať až na minimum. Medzi takéto riešenia patria napríklad strategické rozmiestnenie akustických pien (ktoré slúžia ako pohlcovače zvuku) alebo akustických difúzorov (ktoré slúžia ako rozrážачe zvuku).

V tých najlepších štúdiách, najväčších koncertných a operných sálach a v tých najprofesionálnejších počúvacích miestnostiach sa používajú hlavne akustické difúzory (väčšinou v kombinácii aj

s akustickými penami). Difúzory samotné sú obvykle vyrábané z dreva a sú to zložité a matematicky komplikovane prepočítané pomôcky, ktorým sa ich zložitosť výroby odráža aj na cene.

Práve cena akustických difúzorov bola hlavným zárodkom a **motiváciou** mojej idei vytvoriť mobilnú aplikáciu na výpočet týchto vecí a tým pádom umožniť sebe (*a neskôr aj iným zručnejším ľuďom po celom svete*) si tieto veci vyrobiť aj doma.

Medzi moje hlavné **ciele** patrilo naštudovanie teórie skrývajúcej sa za viacerými akustickými difúzormi (*aby aplikácia umožňovala vyrobiť rôzne typy*), následne naprogramovanie počítania, vytvorenie jednoduchého grafického prostredia pre používateľov a tým pádom, umožnenie vyrobiť si vlastný akustický difúzor podľa vlastných potrieb pre hocikoho, kto má o to záujem.

2 Akustické Difúzory

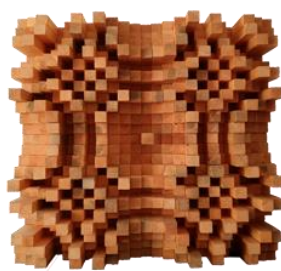
Sú to objekty rôzne od rovnej plochy, ktoré sú väčšinou matematicky dôkladne prepočítané na danú frekvenciu. Základnou funkciou akustického difúzora je rozbiť zvukovú vlnu ktorá naňho narazí a následne rovnomerne rozdistribuovať po celej miestnosti, tým pádom nevzniká odraz zvuku veľkej energie v jednom smere, ale odraz do rôznych smerov pričom každá vlna má malú energiu (*ktorá sa skôr vytratí a nevzniká tak ozvena ale zostáva zachovaná aj energia zvuku, akurát je lepšie rozložená po miestnosti. V prípade pohltení tých zvukových vln by sa tá energia vytratila a žiadny hudobný nástroj by neznel tak, ako má*). Základy teórie QRD difúzorov položil známy fyzik M. R. Schroeder. Neskôr vo výskumoch a experimentoch pokračovali aj mená ako Trevor J. Cox, Peted D'Antonio a ďalší.

Po dôkladnom preskúmaní už existujúcich počítačových aplikácií (*napr. QRDude, Acoustic Calculator*) som sa rozhodol urobiť niečo, v čom sa nachádza to dobré už z existujúcich aplikácií a to, čo tam nefunguje dobre alebo sa to dá nejako vylepšiť, som v tej svojej zahrnul už opravené alebo vylepšené.

Moja aplikácia ponúka možnosť si vyrobiť 3 typy difúzorov (*Prienik oboch známych PC aplikácií na výpočet difúzorov*), a to: **QRD** (tzv. *Quadratic Residue Diffuser*), **2D QRD** (*Two Dimensional Quadratic Residue Diffuser*) a tzv. **Skyline** difúzor.



QRD



2D QRD



Skyline

Obr. 1 – 3 typy akustických difúzorov aj s ilustračným obrázkom

Difúzor s označením **QRD** je asi ten najčastejšie používaný v profesionálnych inštaláciách. Je jednoduchý na stavbu, má dobré a celkom jednoducho vypočítateľné vlastnosti a aj napriek nevyzývavému dizajnu dokáže po zvukovej stránke urobiť naozaj veľa.

Difúzor s označením **2D QRD** je asi to najkrajšie s pomedzi difúzorov. Po posunutí vygenerovaných sekvenčných čísiel v dvojrozmernom poli sa dá vyrobiť perfektne symetrický a veľmi zaujímavý difúzor. Od QRD sa líši hlavne tým, že dokáže rozrážať zvukové vlny aj vertikálne, aj horizontálne, čím má lepšie zvukové vlastnosti od jeho jednorozmerného súrodenca. Nevýhoda je okrem enormných cien (*až cez 5000€*) hlavne to, že keď si vyrobíte tento typ difúzora, je veľmi ťažký (*niektoré prekročia aj hranicu 300kg*) a tým pádom vzniká problém: Ako to zavesiť na stenu?

Difúzor s označením **Skyline** by som nazval takým ľudovým difúzorom. Je asi najčastejšie robený DIY (*do it yourself*) difúzor a existuje veľa youtube videí s tutoriálom na to, ako si niečo také vyrobiť (*pomocou PC aplikácie: Acoustic Calculator*). Väčšina však netuší, že tá aplikácia nepracuje úplne správne ale aj napriek svojim chybám patrí medzi najznámejšie medzi ľuďmi, ktorí sa do toho moc nerozumejú.

2.1 QRD – Teória



Obr. 2 – QRD N17 + 1 difúzor

Jeden z najvýznamnejších vynálezov vo svete difúzorov bol jednoznačne QRD (*a samozrejme jeho dvojrozmerná varianta 2D QRD*) difúzor. Na rozdiel od dovtedy existujúcich jednoduchých konštrukcií, pri tomto difúzore sa dalo dokonale predvídať jeho chovanie pomocou niekoľkých jednoduchých vzorcov.

QRD sa skladá zo série šachiet ($N = \text{počet štrbín}$ a je stále prvočíslo! Jedinou výnimkou pri QRD je prípad, keď ho chceme urobiť symetrickým, a tak na koniec dodáme rovnakú šachtu, aká bola na začiatku, vid' na obrázku (č. 9), vtedy sa to značí ako $N + 1$), ktoré majú rovnakú šírku a rôzne hĺbky. Šachty sú od seba väčšinou oddelené tenkými plátmi dreva (*po anglicky „fins“*). Od 2D QRD sa odlišuje tým, že rozráža zvukové vlny len v jednej rovine (*horizontálnej alebo vertikálnej, záleží od po-otočenia difúzora*). Zvuková vlna vstúpi do šachty, dostane sa na jej spod, odkiaľ sa odrazí s určitým časovým oneskorením. Vďaka tomu majú odrazené vlny rôznu fázu a zmenu smeru ich šírenia zabezpečujú hlavne oddeľovacie pláty.

Pláty dreva oddeľujúce jednotlivé šachty sú potrebné pri QRD difúzoroch. Mali by byť čo najtenšie, ale nie až tak tenké, aby vibrovali a tým pádom spôsobili čiastočné pohltie danej vlny.

Sekvencia kvadratických zvyškov je najpopulárnejšia sekvencia použitá pri počítaní pri počítaní hĺbky danej štrbiny difúzora. Sekvenčné číslo n -tej štrbiny sa vypočíta pomocou vzorca:

$$s_n = n^2 \text{ modulo } N \quad (1)$$

Napríklad pre QRD kde $N=7$ bude sekvencia: $\{0,1,4,2,2,4,1\}$ (*V prípade QRD 7 + 1 by sme dodali ešte sekvenčné číslo 0 na koniec*).

Následne si vypočítame vlnovú dĺžku design frekvencie (**DF**) ako:

$$wl(DF) = 343 / DF \quad (2)$$

Pomocou vypočítaného sekvenčného čísla vieme vypočítať aj hĺbky jednotlivých šachiet. Hĺbka n -tej šachty sa vypočíta cez vzorec:

$$d_n = \frac{s_n * wl(df)}{2N} \quad (3)$$

Hĺbky jednotlivých štrbín sa pohybujú od 0 až po $wl(DF) / 2$.

Minimálna vzdialenosť „počúvacieho miesta“ od difúzora sa vypočíta vzorcom:

$$3 * wl(DF) \quad (4)$$

DF nie je najnižšia frekvencia, na ktorej difúzor produkuje viac disperzie (*rozptýlenie*) ako rovný objekt, je to iba prvá frekvencia na ktorej sa objaví aj difrakcia (*ohyb alebo zmena smeru šírenia v dôsledku prekážky*). Bolo dokázané, že QRD difúzor dokáže odrážať odlišne od rovného povrchu jednu alebo až dve oktávy nižšie, ako je DF (*všeobecne sa berie do úvahy o jednu oktávu nižšie*).

Šírka periódy difúzora je v podstate šírka celého difúzora (*okrem bočných kusov dreva, ktoré nemajú žiadny súvis s jeho fungovaním*). Vypočíta sa vzorcom:

$$N * w + (N - 1) * f_w \quad (5)$$

Na výpočet šírky šachty difúzora platí asi najviac pravidiel ktoré navzájom súvisia a treba ich dodržať všetky, aby bol nami navrhnutý difúzor efektívny a dobre vypočítaný. Schroeder pôvodne navrhol vzorec na výpočet šírky šachty nasledovne:

$$w = wl(DF) * 0.137 \quad (6)$$

ale experimenty a nasledovné štúdiá poukázali na 2 hlavné pravidlá:

Pravidlo č.1: šírka periódy difúzora má byť $\geq wl(DF)$, teda šírka šachiet by mala byť aspoň tak veľká, aby bola táto podmienka splnená.

Pravidlo č.2: Difúzor, ktorý má šachty hlboké do 40cm, má minimálnu odporúčanú šírku šachty: 25mm (*teda menšia by sa nemala použiť*). Minimálna šírka šachty v prípade difúzora, ktorý má hĺbky šachiet nad 40cm sa vypočíta vzorcom:

$$w = \frac{d_{max}}{16} \quad (7)$$

Ak je šírka periódy príliš malá oproti $wl(DF)$, prípadne ak je šírka jednej šachty príliš malá oproti odporúčanému minimu, tak difúzor nemusí fungovať správne a svojim fungovaním sa nemusí vo veľkej miere odlišovať od rovnej plochy (*čo asi nechceme*).

Ukážeme si to na príklade z knihy:

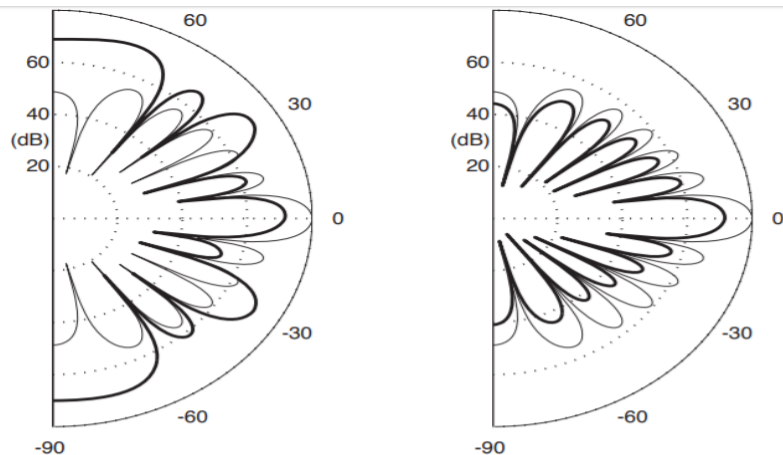
Majme 2 QRD difúzory $N = 7$ s $DF = 500\text{hz}$, $f_w = 0.8\text{cm}$. Jeden má šírku šachty 3 cm a druhý 9 cm. Teda šírka periódy prvého je cca 27.4cm a druhého je cca 69.4cm.

Keďže hĺbka šachiet (*a celkového difúzora*) závisí od DF , obe difúzory ju majú rovnakú, čo znamená, že by teoreticky mali fungovať od 500hz (*keď už hĺbkou sú na danú frekvenciu stavané*). Jediné v čom sa líšia, je šírka šachiet a tým pádom aj šírka celého difúzora.

Počet použitých difúzorov s menšou šírkou šachty je prispôsobený tak, aby boli na šírku cca rovnaké obe difúzory (*teda z prvého difúzora s menšou šírkou je použitých viac aby sa dosiahla šírka toho druhého*).

Keďže $wl(500\text{hz}) = 0.686\text{m}$ (*vzorec: c / DF*), čo je zaokrúhlene 69cm, a je dokázané, že má platiť Pravidlo č.1 (*spomenuté vyššie*), tak môžeme predpokladať, že difúzor so šírkami šachiet 9cm a celkovou veľkosťou periódy = 69,4cm bude fungovať lepšie, ako viac difúzorov so šachtami rovnakej hĺbky ale menšej šírky poukladaných pri sebe, kde šírka periódy jedného z nich = 27.4cm.

Pozrime si simuláciu týchto 2 prípadov.



Obr. 3 – Odrazenie zvuk. vlny 1000hz.

— QRD ,šírka šachty = 9cm
 — rovná plocha

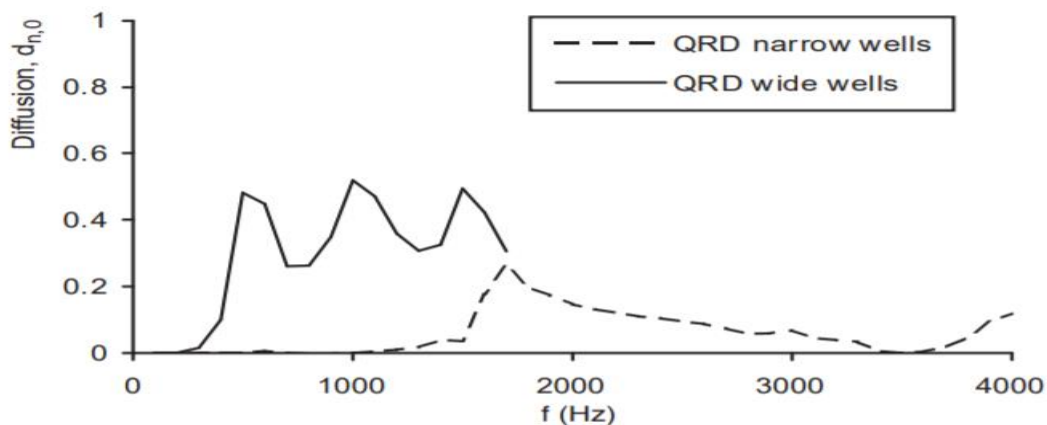
— QRD ,šírka šachty = 3cm
 — rovná plocha

Ako sme predpokladali, difúzor s väčšou šírkou funguje v tomto prípade lepšie, lebo dokáže rozložiť energiu zvukovej vlny rovnomernejšie po miestnosti, zatiaľ čo ten s menšou šírkou sa ledva odlišuje od rovnej plochy (čo znamená, že má zbytočne prispôsobené hĺbky šachiet k frekvencii, na ktorej ani nedokáže pracovať správne a je pomaly na nerozoznanie od rovnej plochy, teda je to vyhodенý peniaz za drevo!!). V mojej aplikácii som tento problém ošetril (a je to asi prvá aplikácia, v ktorej sa reálne myslí aj na túto situáciu) a to tak, že:

1. Ak sa zmení šírka šachty difúzora na menšiu a zároveň prestane platiť Pravidlo č.1, tak upravím **DF** na takú frekvenciu, pri ktorej bude Pravidlo č.1 znova platiť (tj. zvýšim ho).
2. Ak sa **DF** difúzora zmenila, tak podľa toho znova prepočítam všetky hĺbky šachiet a prispôbim ich novej **DF**. Tým dosiahneme úsporu dreva aj miesta, čo znamená efektívnejšie a lacnejšie postavený difúzor!
3. Aplikácia pri prvom výpočte (pre danú **DF**) navrhne automaticky stále taký difúzor, aby bol jeho frekvenčný rozsah čo najväčší a aby boli zachované všetky pravidlá pre správne a efektívne fungovanie zariadenia. To znamená, že aplikácia vám vypočíta to najlepšie, čo môžete pre dané **DF** postaviť! Postupnými zmenami šírky šachty sa to však môže dosť dobrať, na čo by vás mala samotná aplikácia aj upozorniť, ak sa tak stane.

Tieto pravidlá platia rovnako aj pre 2D QRD a Skyline difúzory.

Podme teda skúmať ďalšie zaujímavosti ohľadom príkladu uvedeného v knihe. Na obrázku nižšie si môžeme všimnúť ešte pár zaujímavostí, ktoré si vysvetlíme. Teda, na akých frekvenciách pracujú tieto difúzory?



Obr. 4 – Porovnanie frekvenčných vlastností spomínaných difúzorov.

Pozrime sa na prvý difúzor, so širšími (9cm) šachtami. Prvá frekvencia na ktorej sa objaví ozajstná difúzia je 500hz (čo bol presne náš zámer, keďže sme si zvolili $DF = 500\text{hz}$). Čo si ale môžeme všimnúť je, že difúzor si začína plniť svoju prácu už od cca 250hz, čo je presne o oktávu nižšie ako je DF (teda $DF/2$), a nazýva sa to **Scatter frekvencia** (vyjadruje dolnú hranicu účinnosti difúzora. Už od tejto frekvencie vyššie sa začína difúzor správať rôzne od rovnej plochy, teda zasahuje do zlepšenia akustiky).

Horná hranica účinnosti difúzora sa nazýva **HF cutoff frekvencia** a vypočíta sa vzorcom:

$$c / 2 * w \quad (8)$$

V tomto prípade pre difúzor so šírkou šachiet = 9cm (teda 0.09m) je to: $343 / 2 * 0,09$, čo je cca 1900hz, čo graf na obrázku aj približne naznačuje, keďže jeho účinnosť sa končí blízko pri hranici 2000hz.

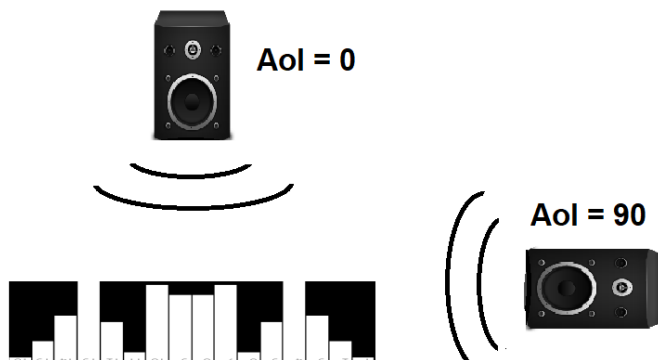
V prípade druhého difúzora, so šírkou šachiet = 3cm vidíme, že začína fungovať niekde pod 1300hz, čo je aj logické, keďže celková šírka periódy predstavovala 27.4cm, a veľkosť vlnovej dĺžky 1300hz = 26.4cm, čo je veľmi blízko k šírke periódy. Celkovo ide o veľmi zle navrhnutý difúzor s nízkym koeficientom difúzie v porovnaní s druhým a so zbytočne hlbokými šachtami prispôbenými hĺbkou na $DF = 500\text{hz}$, pričom kvôli úzkym šachtám a celkovo malej šírke periódy vzhľadom na 500hz nie je vôbec schopný pracovať na tejto frekvencii.

Čo si ale môžeme všimnúť je, že pri 3500hz je difúzia nulová, teda rovnaká, ako v prípade hocijakej rovnej plochy. Čím to je spôsobené?

Ak má difúzor „spracovať“ vlnu frekvencie $N * DF$, teda v tomto prípade $7 * 500 = 3500\text{hz}$, tak sa stane niečo zaujímavé. Vlna o frekvencii 3500hz bude mať vlnovú dĺžku = 9,8cm, čo je presne $1 / N$ -tina z $w(DF)$, teda $(w(DF) / N = 68,6 / 7 = 9,8\text{cm})$. To jednoducho znamená, že fáza vlny bude otočená v každej šachte o celočíselný násobok jej vlnovej dĺžky, teda každá vlna sa odrazí v rovnakej fáze, ako aj v prípade rovnej plochy! Táto tzv. „plate“ frekvencia teda predstavuje nulový bod funkčnosti daného difúzora.

Dá sa ju odstrániť jednoduchým navýšením čísla N (teda počtu šachiet). Odporúča sa dodržať pravidlo: **HF cutoff frekvencia < plate frekvencia**, čo v prípade difúzora s $w = 3\text{ cm}$ dodržané nie je, keďže $5716 < 3500$ neplatí.

Čo sa ešte oplatí spomenúť je tzv. „Angle of Incidence“, skrátene **AoI**, čo znamená uhol, pod ktorým z daného zdroja dorazí zvuková vlna na difúzor. Všetky vlastnosti difúzora platia pre **AoI = 0**, teda vlny vydané zdrojom, ktorý je natočený presne tak, aby jej dopad bol priamo na prednú stranu (čím bližšie je **AoI** ku 90, tým nižšia je **HF cutoff** a spolu s ňou aj tým menej účinný difúzor). Pri **AoI = 90** difúzor stráca svoju účinnosť, keďže jeho **HF cutoff** frekvencia padá na 0 (vid' Obr. 12). Samozrejme, keď máme v miestnosti použitých viac difúzorov, sú účinné aj keď nedopadá na nich tá vlna priamo, totiž po nejakých odrazoch od stien a zmene smeru môže dôjsť pod dostatočným uhlom a následne je rozbitá samotným difúzorom.



Obr. 5 – Ukážka pre lepšie pochopenie vysvetľovaného pojmu

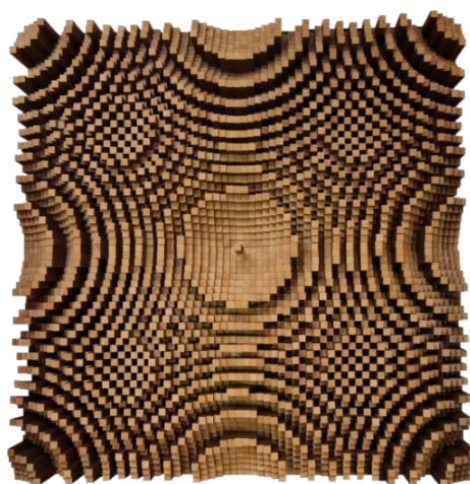
Vzorec na výpočet novej HF cutoff frekvencie na základe AoI je:

$$\text{Stará HF cutoff} * \sin(\text{abs}(90 - AoI)) \quad (9)$$

Toto bola názorná ukážka toho, ako si QRD difúzor navrhnuť správne, koľko zaujímavých vzorcov sa nachádza v pozadí tých drevených objektov, na čo si dávať pozor a aké problémy môže spôsobiť zlý návrh.

(*Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application (by Trevor J. Cox and Peter D'Antonio), The QRD Diffractal: A New One-or Two-Dimensional Fractal Sound Diffusor (D'Antonio, Peter Konnert, John)*)

2.2 2D QRD – Teória



Obr. 6 – 2D QRD N67 Inverse difúzor

Tento typ difúzora je veľmi podobný svojmu jednorozmernému súrodencovi (QRD). Hlavný rozdiel je v tom, že dokáže rozbíjať a následne odrážať zvukové vlny aj v horizontálnom, aj vo vertikálnom smere zároveň, vďaka čomu ho niektorí nazývajú aj ako 3D difúzor. Prvá vec, ktorú si ihneď všimneme je to, že okrem jeho skvelých akustických vlastností je zmienky hodný aj fakt, že je veľmi estetický a bezkonkurenčný dizajnový doplnok do domácností.

Skladá sa väčšinou z drevených hranolov (*do úvahy pripadajú aj iné, tvrdé a nerezonujúce materiály*), ktoré sú poukladané vedľa seba v 2 rozmernom prostredí. Počet riadkov je totožný s počtom stĺpcov, vďaka čomu je možné dosiahnuť symetrický tvar. Medzi nevýhody tohto typu difúzora môžeme zaradiť hlavne náročnosť na výrobu (*narezat' hranoly niekedy až na viac tisíc kusov, následne ich nalakovať alebo inak ošetriť a potom kus po kuse prilepiť na základnú dosku*) a výslednú váhu konečného produktu.

Ak pracujete na zložitejšej stavbe ($N > 31$), vzniká vám dielo, ktoré je síce krásne a má výborné akustické vlastnosti, ale pomaly začína prekračovať váhu 100kg a musíme čeliť problémom ohľadom umiestnenia. Pri difúzore $N = 73$ jeho váha bez problémov prekročí hranicu 300kg, čo už je veľmi komplikované zavesiť na stenu a vyrobiť pre to stabilný stojan tiež nie je jednoduchá záležitosť.

Podme ale na teoretické pozadie 2D QRD difúzora. Jeho sekvenčné číslo sa počíta trochu odlišne od QRD, a to vzorcom:

$$s_{n,m} = (n^2 + m^2) \text{ modulo } N \quad (10)$$

Pomocou neho dostaneme vygenerované sekvenčné čísla v 2 rozmernom prostredí. Tieto čísla sú celočíselné násobky určitej hodnoty a reprezentujú hĺbku danej pozície. Keďže nechceme pracovať s hĺbkami, hlavne z dôvodu, že predpokladáme vynechanie oddeľovacích plátov dreva kvôli ich

náročnej výrobe a následne aj použitiu, tieto čísla si vieme transformovať tak, aby reprezentovali výšku hranolov. Ako to urobiť?

Výšku hranola na danej pozícii získame odpočítaním jeho sekvenčného čísla od s_{\max} :

$$s_{n,m} = s_{\max} - s_{n,m} \quad (11)$$

Teda keď je $s_{\max} = 20$, tak zo sekvenčného čísla napr. 15 reprezentujúceho hĺbku získame jeho výšku ako $20 - 15 = 5$ (čo je asi aj logické, keď je hĺbka celého difúzora 20 a máme sekvenčné číslo 15, ktoré reprezentuje hĺbku, v akej sa nachádza hranol od prednej strany, tak jeho výška bude práve tá chýbajúca časť hĺbky k nadobudnutiu maxima, teda 5).

Inverznú sekvenciu (a teda aj následné veľkosti hranolov v inverznej podobe) dosiahneme tak, že si nájdeme druhé najväčšie sekvenčné číslo a od toho následne odpočítame aktuálne sekvenčné číslo. Teda ak je druhé najväčšie číslo 15, tak zo sekvenčného čísla napr. 2 sa stane číslo 13, z čísla 5 sa stane 10 a tak ďalej až kým neprejdeme každé jedno a prehodíme hodnoty. Zaujímavé je, že stredný hranol (ten najdlhší) ostáva nepozmenený pri inverznutí. Akustické vlastnosti sa po tomto procese výrazne nezmenia, jediné čo sa mení, je výzor.



Obr. 7 – 2D QRD N23 Nie inverznuté vs. 2D QRD N23 inverznuté

Keď už máme hotové generovanie sekvencie podľa našich predstáv, môžeme si všimnúť, že nie je symetrická. Aby sme dosiahli symetriu, musíme vykonať tzv. presunutie hodnôt poľa v 2 smeroch. Na obrázku (č. 16) je znázornená simulácia toho, ako treba vycentrovať sekvenciu presúvaním hodnôt v poli. Základný algoritmus je:

1. Presuň o $(N - 1) / 2$ doprava
2. Presuň o $(N - 1) / 2$ dole

<table border="1" style="width: 100%; text-align: center; border-collapse: collapse;"> <tr><td>6</td><td>5</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td>5</td></tr> <tr><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>5</td><td>1</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>5</td><td>1</td></tr> <tr><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>4</td></tr> </table> <p>Vygenerovaná sekvencia</p>	6	5	2	4	4	2	5	5	4	1	3	3	1	4	2	1	5	0	0	5	1	4	3	0	2	2	0	3	4	3	0	2	2	0	3	2	1	5	0	0	5	1	5	4	1	3	3	1	4	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center; border-collapse: collapse;"> <tr><td>5</td><td>6</td><td>5</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>5</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>5</td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td></tr> </table> <p>doprava o 1</p>	5	6	5	2	4	4	2	4	5	4	1	3	3	1	1	2	1	5	0	0	5	3	4	3	0	2	2	0	3	4	3	0	2	2	0	1	2	1	5	0	0	5	4	5	4	1	3	3	1	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center; border-collapse: collapse;"> <tr><td>2</td><td>5</td><td>6</td><td>5</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td><td>3</td></tr> </table> <p>doprava o 1</p>	2	5	6	5	2	4	4	1	4	5	4	1	3	3	5	1	2	1	5	0	0	0	3	4	3	0	2	2	0	3	4	3	0	2	2	5	1	2	1	5	0	0	1	4	5	4	1	3	3	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center; border-collapse: collapse;"> <tr><td>4</td><td>2</td><td>5</td><td>6</td><td>5</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>0</td><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td></tr> </table> <p>doprava o 1</p>	4	2	5	6	5	2	4	3	1	4	5	4	1	3	0	5	1	2	1	5	0	2	0	3	4	3	0	2	2	0	3	4	3	0	2	0	5	1	2	1	5	0	3	1	4	5	4	1	3
6	5	2	4	4	2	5																																																																																																																																																																																																	
5	4	1	3	3	1	4																																																																																																																																																																																																	
2	1	5	0	0	5	1																																																																																																																																																																																																	
4	3	0	2	2	0	3																																																																																																																																																																																																	
4	3	0	2	2	0	3																																																																																																																																																																																																	
2	1	5	0	0	5	1																																																																																																																																																																																																	
5	4	1	3	3	1	4																																																																																																																																																																																																	
5	6	5	2	4	4	2																																																																																																																																																																																																	
4	5	4	1	3	3	1																																																																																																																																																																																																	
1	2	1	5	0	0	5																																																																																																																																																																																																	
3	4	3	0	2	2	0																																																																																																																																																																																																	
3	4	3	0	2	2	0																																																																																																																																																																																																	
1	2	1	5	0	0	5																																																																																																																																																																																																	
4	5	4	1	3	3	1																																																																																																																																																																																																	
2	5	6	5	2	4	4																																																																																																																																																																																																	
1	4	5	4	1	3	3																																																																																																																																																																																																	
5	1	2	1	5	0	0																																																																																																																																																																																																	
0	3	4	3	0	2	2																																																																																																																																																																																																	
0	3	4	3	0	2	2																																																																																																																																																																																																	
5	1	2	1	5	0	0																																																																																																																																																																																																	
1	4	5	4	1	3	3																																																																																																																																																																																																	
4	2	5	6	5	2	4																																																																																																																																																																																																	
3	1	4	5	4	1	3																																																																																																																																																																																																	
0	5	1	2	1	5	0																																																																																																																																																																																																	
2	0	3	4	3	0	2																																																																																																																																																																																																	
2	0	3	4	3	0	2																																																																																																																																																																																																	
0	5	1	2	1	5	0																																																																																																																																																																																																	
3	1	4	5	4	1	3																																																																																																																																																																																																	
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center; border-collapse: collapse;"> <tr><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>2</td><td>5</td><td>6</td><td>5</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>0</td><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td></tr> </table> <p>dole o 1</p>	3	1	4	5	4	1	3	4	2	5	6	5	2	4	3	1	4	5	4	1	3	0	5	1	2	1	5	0	2	0	3	4	3	0	2	2	0	3	4	3	0	2	0	5	1	2	1	5	0	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center; border-collapse: collapse;"> <tr><td>0</td><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>2</td><td>5</td><td>6</td><td>5</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>0</td><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td></tr> </table> <p>dole o 1</p>	0	5	1	2	1	5	0	3	1	4	5	4	1	3	4	2	5	6	5	2	4	3	1	4	5	4	1	3	0	5	1	2	1	5	0	2	0	3	4	3	0	2	2	0	3	4	3	0	2	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center; border-collapse: collapse;"> <tr><td>2</td><td>0</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>2</td><td>5</td><td>6</td><td>5</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>0</td><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td></tr> </table> <p>dole o 1, Symetrické</p>	2	0	3	4	3	0	2	0	5	1	2	1	5	0	3	1	4	5	4	1	3	4	2	5	6	5	2	4	3	1	4	5	4	1	3	0	5	1	2	1	5	0	2	0	3	4	3	0	2																																																		
3	1	4	5	4	1	3																																																																																																																																																																																																	
4	2	5	6	5	2	4																																																																																																																																																																																																	
3	1	4	5	4	1	3																																																																																																																																																																																																	
0	5	1	2	1	5	0																																																																																																																																																																																																	
2	0	3	4	3	0	2																																																																																																																																																																																																	
2	0	3	4	3	0	2																																																																																																																																																																																																	
0	5	1	2	1	5	0																																																																																																																																																																																																	
0	5	1	2	1	5	0																																																																																																																																																																																																	
3	1	4	5	4	1	3																																																																																																																																																																																																	
4	2	5	6	5	2	4																																																																																																																																																																																																	
3	1	4	5	4	1	3																																																																																																																																																																																																	
0	5	1	2	1	5	0																																																																																																																																																																																																	
2	0	3	4	3	0	2																																																																																																																																																																																																	
2	0	3	4	3	0	2																																																																																																																																																																																																	
2	0	3	4	3	0	2																																																																																																																																																																																																	
0	5	1	2	1	5	0																																																																																																																																																																																																	
3	1	4	5	4	1	3																																																																																																																																																																																																	
4	2	5	6	5	2	4																																																																																																																																																																																																	
3	1	4	5	4	1	3																																																																																																																																																																																																	
0	5	1	2	1	5	0																																																																																																																																																																																																	
2	0	3	4	3	0	2																																																																																																																																																																																																	

Obr. 8 – Simulácia centrovania vygenerovaných sekvenčných čísiel pre 2D QRD N7 v programe QRDUde.

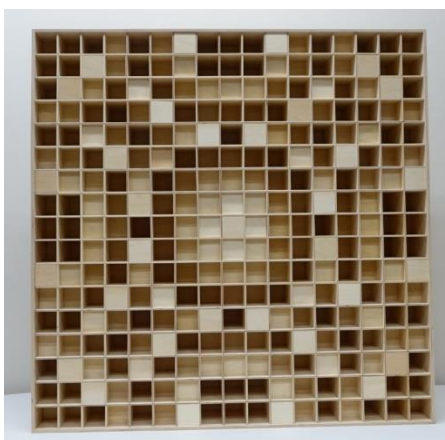
Po tom, ako máme všetky potrebné údaje, môžeme pretransformovať sekvenčné čísla do konkrétnych veľkostí daných hranolov pomocou vzorca:

$$h_{n,m} = \frac{(s_{n,m} * wl(DF))}{2N} \quad (12)$$

Šírku hranola vypočítame pomocou rovnakých pravidiel (*Pravidlo č.1, Pravidlo č.2*), ako aj šírku šachty pri QRD. Keďže predpokladáme, že oddelovacie pláty nepoužívame (*síce sú odporúčané, ale väčšinou sa vynechávajú, keďže nemajú až tak veľký vplyv na fungovanie, že by boli nevyhnutné*), šírku periódy tohto typu difúzora vypočítame ako:

$$N * \text{šírka hranola} \quad (13)$$

(Pozor! Keď objednáte napr. 30x30milimetrové hranoly, môže tam byť odchýlka aj 2 milimetre, čo pri vyššom čísle N spôsobí väčšiu výslednú šírku aj o niekoľko centimetrov, vďaka čomu následne nemusí byť základná doska dostatočne veľká. Odporúčam vyskladať vopred 1 rad vyrezaných hranolov, odmerať ich výslednú šírku a podľa toho následne vyrezať základnú dosku, na ktorú sa to bude všetko pripevňovať).



Obr. 9 – Příklad 2D QRD N17 difúzora s použitými oddelovacími drevenými plátmi

Minimálna vzdialenosť na sedenie od difúzora (*vzorec č. 3*), jeho scatter a aj HF cutoff frekvencia (*vzorec č. 7*) sa počítajú rovnako, ako aj pri QRD. Takisto pri tomto difúzore existuje tzv. plate frekvencia, ktorá sa počíta tiež ako pri QRD a malo by tu platiť rovnaké pravidlo: **HF cutoff frekvencia < plate frekvencia**.

Pri zachovaní spomenutých vlastností dodržaní napísaných pravidiel je možné postaviť veľmi dobre pracujúci difúzor, ktorý bude mať zásadný dopad na akustiku v miestnosti, kde ho plánujete použiť. Samozrejme, keď do obrovskej miestnosti vložíte akustický difúzor, ktorý sa v nej svojou veľkosťou stratí, tak nemôžete čakať veľké zmeny. Je dobré ho kombinovať aj s nejakými akustickými penami a dobre rozvrhnúť umiestnenie každého doplnku.

Slovné popísaný algoritmus na výpočet 2D QRD:

1. Zvolíme Design frekvenciu a číslo N
2. Vypočítame vlnovú dĺžku design frekvencie (*vzorec č.1*)
3. Následne vypočítame sekvenčné čísla podľa N (*vzorec č.10*)
4. Prevedieme sekvenčné čísla z hĺbky na dĺžku (*vzorec č.11*)
5. Vycentrujeme sekv. čísla pomocou shiftovacieho algoritmu:
 1. Presuň o $(N - 1) / 2$ doprava
 2. Presuň o $(N - 1) / 2$ dole
6. Vypočítame dĺžky (*resp. výšky*) jednotlivých hranolov pomocou sekv. čísel (*vzorec č.12*)

Nastavenie optimálnej šírky jedného hranola:

1. Vypočítame si odporúčanú šírku podľa Schroedera (vzorec č.6)
2. Vypočítame dĺžku periódy difúzora (vzorec č.13)
3. Ak je šírka periódy < vlnová dĺžka design frekvencie:

- zväčšíme šírku hranola o 1 mm a kontrolujeme znova

Ak je šírka periódy > vlnová dĺžka design frekvencie:

- zmenšíme šírku hranola o 1mm a kontrolujeme znova

Ak šírka periódy = vlnovej dĺžke || po zväčšení o 1 bude šírka > vlnová dĺžka:

- získali sme optimálnu šírku hranola pre najlepší frekvenčný rozsah

Popri celom tomto procese musíme dávať pozor aj na to, že keď má difúzor najdlhší hranol < 40cm tak minimálna šírka hranola je 25mm (a nie menej!). V prípade najdlhšieho hranola >= 40cm sa minimálna šírka hranola vypočíta ako: **najdlhší hranol / 16**.

2.3 Skyline – Teória

Základom tohto difúzora sú tiež drevené hranoly viacerých dĺžok, ale tu sa vyskytujú len 4 rôzne dĺžky pre každý prípad. Počet hranolov N v jednom riadku je stále 12, a takisto aj v stĺpci (ak neberieme do úvahy nulové hranoly, vid' Obrázok č.2). Sekvencia tohto difúzora sa nepočíta, ale je už dopredu daná (na základe určitých výskumov a experimentov) a vyzera takto:

0	3	4	1	2	3	3	1	4	2	3	3
3	0	1	4	2	1	1	3	3	2	1	1
3	1	1	3	1	3	2	2	1	0	2	2
2	2	2	2	0	4	3	2	3	2	1	1
3	3	1	1	3	1	1	3	4	3	1	3
2	3	2	1	2	0	3	2	4	2	1	0
2	3	2	1	3	1	2	2	3	1	3	4
2	0	2	4	4	0	1	2	1	4	2	2
3	4	1	0	1	3	3	1	0	2	3	3
1	3	3	1	2	4	1	2	0	1	3	1
2	1	2	3	1	3	3	2	4	2	3	4
2	4	2	3	3	1	1	2	0	3	1	0

Obr. 10 – Pevne daná dvoj-rozmerná sekvencia Skyline difúzora

Výška hranolov sa nasledovne vypočíta pre každú pozíciu [n,m] podľa vzorca:

$$h_{n,m} = \frac{\frac{1}{2}wl(DF)}{4*s_{n,m}} \quad (14)$$

Pre šírku hranola platia rovnaké 2 pravidlá, ako aj pri 2D QRD. Takisto nepočítame s tenkými oddeľovacími plátmi medzi každým hranolom a to znamená, že šírka periódy Skyline difúzora sa vypočíta ako: **(12 * šírka hranola)**. Horné aj dolné frekvenčné ohraničenie difúzora sa počíta rovnako ako pri 2D QRD a pre vzdialenosť počúvacieho miesta od difúzora platia tiež rovnaké pravidlá.

3 Záver

Bola vytvorená aplikácia pre zariadenia s operačným systémom android, ktorá umožňuje si vyrobiť hociktorý z vyššie spomenutých difúzorov. Aplikácia vám povie presné špecifikácie vypočítaného difúzora, vypíše každý jeden kus dreva (*jeho sekvenčné číslo, dĺžku a aj počet, koľko je z neho potrebných*) a pomôže nám aj pri stavbe, a to tak, že nám v dvojrozmernom poli pre danú pozíciu stále povie, aký kus dreva tam treba pripevniť. Každý počítaný difúzor sa dá uložiť a následne si aplikácia pamätá, kde ste prestali pracovať, teda môžete hocikedy pokračovať ďalej.

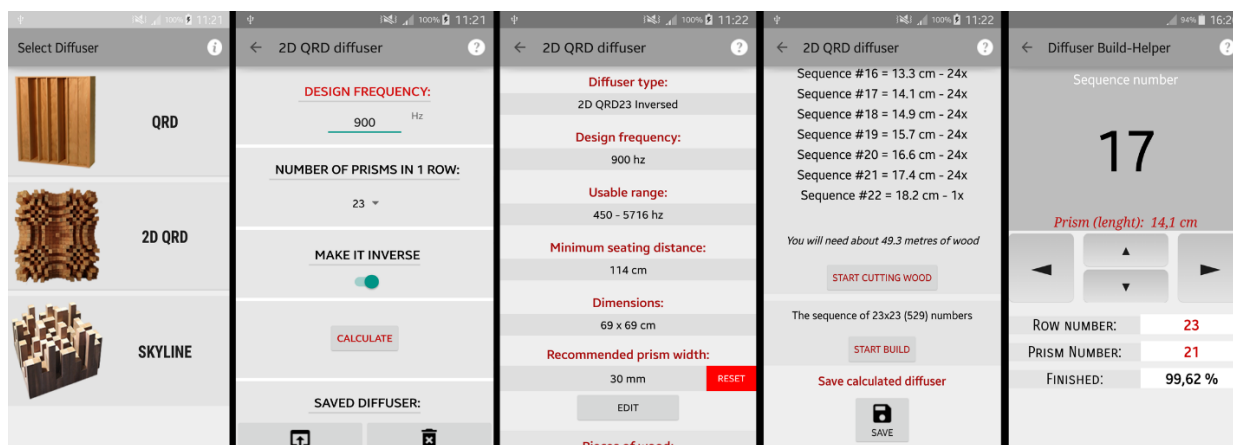
Prostredie samotnej aplikácie bolo robené tak, aby bolo čo najviac user-friendly a ľahko pochopiteľné. Na každej stránke (*activity v androide*) sa nachádza v pravom hornom rohu ikonka s otáznikom, na ktorú ak klikneme, tak sa nám zobrazia pre danú stránku vysvetlivky, ktoré pomôžu novému používateľovi sa zorientovať a pochopiť niektoré funkcie aplikácie.

Na rozdiel od PC aplikácií na výpočet akustických difúzorov sa v tejto opravilo a vyladilo veľa nezrovnalostí, napr:

1. Je použité presnejšie zaokrúhľovanie pri výpočtoch (*presnejšie postavený difúzor*)
2. Aplikácia radí používateľom z mojich vlastných skúseností pri stavbe difúzora a tým pádom si môžu dať väčší pozor a vyhnúť sa niektorým chybám
3. Je použité optimalizovanie celkovej hĺbky difúzora pri zmene dizajn frekvencie na vyššiu (*čo znamená úsporu dreva v porovnaní s inými aplikáciami, a teda aj úsporu peňazí*)
4. Aplikácia zahŕňa prostredie aj pre rezanie dreva (*píše koľko kusov hranola danej dĺžky je už vyrezaných a koľko je ešte potrebných*) a takisto aj prostredie pre stavbu difúzora (*predstavme si, že staviame napríklad 2D difúzor s počtom hranolov v jednom riadku $N = 101$, to je $101 * 101 = 10\,201$ kusov hranola. Počítačové aplikácie vám vypíšu pozíciu všetkých hranolov na obrazovku (Naraz! Čo znamená, že je to úplne neprehľadné), pričom tá moja vám ukazuje riadok a stĺpec, na ktorom sa nachádzate a vypisuje vám údaje len o jednom kuse hranola (jeho sekvenčné číslo a jeho dĺžku), ktoré sa práve chystáte pripevniť. Tým minimalizujem možnosť pomýlenia sa pri stavbe difúzora a takisto som zabezpečil to najlepšie a zároveň najjednoduchšie prostredie pre daný účel*).

Keďže je aplikácia prístupná celému svetu (*cez google play*), chystám sa do nej časom dodať ešte aj iné typy difúzorov na výpočet a následnú stavbu. Takisto sa chystám aplikáciu udržiavať a v prípade vzniknutého problému to ihneď riešiť a dať do poriadku. Používatelia majú k dispozícii aj webstránku (<http://www.diffuser-calculator.com/>), kde nájdu základné informácie o difúzoroch a môžu ma kontaktovať v prípade otázok, alebo návrhov na zmenu.

Na obrázku č.3 môžete vidieť pár screenshotov z už hotovej aplikácie.



Obr. 11 - Aplikácia na google play: <https://play.google.com/store/apps/details?id=acoustic.oliver.diffusers>

Pod'akovanie

Bill Collison – pomoc pri vysvetlení toho, ako fungujú niektoré veci v jeho aplikácii (*QRDude*).

RNDr. Ľubomír Antoni, PhD. – pomoc a vedenie bakalárskej práce.

Zdroje

1. Bill Collison (the creator of QRDude), jeho web stránka: <http://www.subwoofer-builder.com/grd.htm>
2. Acoustic Absorbers and Diffusers, theory, design and application 2nd edition (Trevor J. and Peter D'Antonio)
3. THE DESIGN AND APPLICATION OF MODULAR, ACOUSTIC DIFFUSING ELEMENTS (R. Walker, B.Sc.(Eng)., C.Eng., M.I.E.E)
4. The QRD Diffractal: A New One- or Two-Dimensional Fractal Sound Diffusor (D'Antonio, Peter Konnert, John)

Zdroje Obrázkov

1. Vlastný obrázok
2. http://www.acousticmanufacture.com.pl/en/dyfuzory-schroedera-1d-i-2d/dyfuzory-1d/1d_17_1_60/
3. **Kniha:** *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application* (by Trevor J. Cox and Peter D'Antonio)
4. **Kniha:** *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application* (by Trevor J. Cox and Peter D'Antonio),
5. Vlastný obrázok
6. <https://www.rdacoustic.cz/en/product/acoustic-diffuser-qr67/>
7. (difúzor vľavo: <http://www.gikacoustics.com/product/gotham-n23-5-inch-quadratic-diffusers/> , difúzor vpravo: vlastná výroba)
8. Screenshoty z aplikácie: **QRDude**
9. http://www.acousticmanufacture.com.pl/en/dyfuzory-schroedera-1d-i-2d/dyfuzory-2d/2d_17_100_17/
10. THE DESIGN AND APPLICATION OF MODULAR, ACOUSTIC DIFFUSING ELEMENTS (R. Walker, B.Sc.(Eng)., C.Eng., M.I.E.E)
11. Screenshoty z vlastnej aplikácie: **Diffuser Calculator**