

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 2370

REPRODUKCIJA PROSTORNOG ZVUKA

Ivan Vican

Zagreb, svibanj 2012.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Kristianu Jambrošiću na uloženom vremenu i pomoći pri izradi ovog završnog rada.

Sadržaj

Uvod	1
1. Analiza višekanalnih sustava reprodukcije.....	2
1.1 Dolby i DTS 5.1 <i>surround</i> sustav.....	2
1.2 Kvadrafonija	4
1.3 Ambiophonics.....	5
2. Ambisonics	7
2.1 Razvoj	7
2.2 Princip snimanja.....	8
2.3 B-format višeg reda	11
2.4 Dekodiranje	14
2.5 Kodiranje udaljenosti izvora	16
2.6 Ostali formati	18
2.7 Tijek signala	20
2.8 Prednosti i nedostatci	20
3. Implementacija sustava	22
3.1 Priprema sustava	22
3.2 Lokalizacija zvučnog izvora	22
3.3 Zvučnička postava.....	23
3.4 Mjerenje impulsnog odziva i digitalna korekcija prostorije	24
3.5 Postupak implementacije	25
Zaključak	30
Literatura	31
Sažetak i ključne riječi	33

Uvod

U ovom radu bit će analizirani sustavi za višekanalnu reprodukciju prostornog zvuka, s naglaskom na Ambisonic sustav. Razvojem tehnike posljednjih godina došlo je do porasta broja raznih sustava snimanja, obrade i reprodukcije zvuka, od kojih je većina (izuzevši stereofoniju) bila slabo komercijalno prihvaćena. Razlozi navedenog imaju uporište u činjenici da su korisnici prosječnih stereo sustava reprodukcije mahom zadovoljni kvalitetom dobivenog, što konceptualno odgovara tezi „dva kanala-dva zvučnika-dva uha“. Međutim, višekanalni sustavi nose vidne prednosti, od kojih je veliki broj upravo ključan za primjenu u određenim pitanjima i problemima.

Krenuvši od početaka razvoja prostorne reprodukcije zvuka, nametnulo se više mogućnih implementacija i rješenja, od kojih su neki bili bolje, a neki lošije prihvaćeni. Izdvajaju se četiri sustava koji će biti analizirani: 5.1 *surround* sustav, kvadrafonija, Ambiophonics te Ambisonic sustav. Zbog prednosti koje je Ambisonic sustav razvio tokom niza godina svoje evolucije, objašnjen je njegov rad, predloženo konkretno rješenje te su navedeni postupci za implementaciju pod Linuxom.

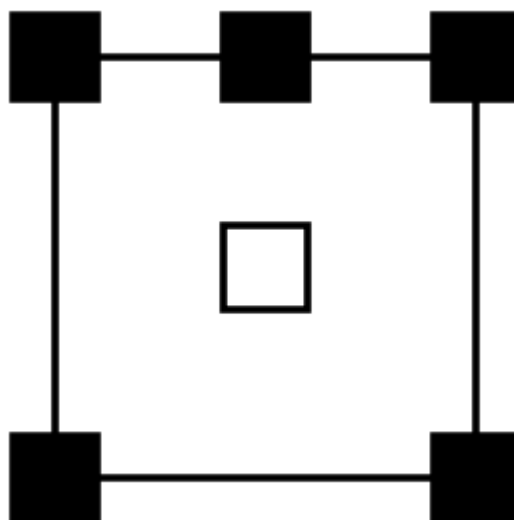
Razlozi za korištenje *open source* operativnog sustava nalaze se u domeni slabe prihvaćenosti Ambisonic sustava u komercijalnom smislu, pa tako i u podršci za komercijalne platforme (Microsoft Windows, Macintosh OS). Isto tako, Linux operativni sustav nosi dodatne pogodnosti u obliku većih mogućnosti upravljanja podacima i prilagodbe potrebama korisnika, što su ključne stavke u sferi snimanja, obrade i reprodukcije nekomercijalnih sustava s matričnom obradom kanala. Za kraj, bitno je spomenuti da je cijeli proces implementacije jednog Ambisonic sustava relativno složen, tako da je jasno zašto revolucija u obliku višekanalne reprodukcije još uvijek ne uspijeva naći dovoljno prostora u komercijalnom svijetu, te zašto je još uvijek većinski problematika audio entuzijasta diljem svijeta.

1. Analiza višekanalnih sustava reprodukcije

U ovom poglavlju analizirani su najuspješniji sustavi za višekanalnu reprodukciju, počevši od 5.1 *surround* sustava, preko kvadrafonije i Ambiophonics sustava, sve do analize primarne teme ovog rada: Ambisonic sustava. Prilikom analize, stavljen je naglasak na prednosti, nedostatke, problematiku implementacije i komercijalni uspjeh svakog od tri prvotno navedena sustava.

1.1 Dolby i DTS 5.1 *surround* sustav

5.1 *surround* se nametnuo kao najuspješniji višekanalni sustav reprodukcije zvuka, s primjenom u kinima i kućnoj DVD reprodukciji. Koristi 5 širokopolasnih zvučnika te jedan zvučnik za reprodukciju niskih frekvencija (*subwoofer*). Za reprodukciju se koriste brojni standardi i dekoderi, od kojih su najprihvaćeniji: Dolby Digital, Dolby Pro Logic II, DTS i SDSS. Zbog velikog uspjeha Dolby Digital i DTS standarda, pokazane su glavne razlike ta dva sustava i njihove sveukupne značajke. Na slici 1.1 prikazan je tlocrt postavljanja takvog sustava, gdje 5 crnih blokova označava zvučnike, a bijeli blok slušatelja, koji je okrenut na osi simetrije zvučnika prema gore.



Slika 1.1 Surround 5.1 sustav

Ovakav sustav višekanalne reprodukcije se zasniva na studijskom miješanju (*mixing*) kanala, koji se komprimiraju s gubicima (tzv. *lossy* kompresija) te potom snimaju na relativno ograničen memorijski prostor na DVD-u. Odgovarajući dekoderi amplitudno i fazno prilagođavaju kanale svakom zvučniku na osnovu psihoakustičkih značajki ljudskog sluha, koji prilikom reprodukcije dobivaju dojam prostornosti i atmosferičnosti.

Što se tiče usporedbe dva standarda (Dolby Digital i DTS), prednosti i nedostaci oba sustava su jednoznačno definirani.

Dolby Digital:

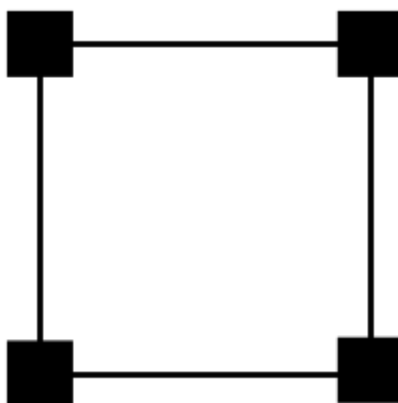
- Prednosti:
 - Industrijski standard
 - 16/20-bitni sustav
 - Razine kanala se vrlo točno prenose na disk
 - Kvalitetna reprodukcija
- Nedostaci:
 - Ne podržava Audio CD
 - Ograničeno na uzorkovanje od 48 kHz
 - Mala dinamika zbog velikog utjecaja kompresora.

DTS:

- Prednosti:
 - Većina traka zvuči bolje nego u Dolby Digital sustavu
 - 16/24-bitni sustav
 - Odličan frekvencijski i dinamički raspon
 - Mnogo viša frekvencija uzorkovanja
- Nedostaci:
 - Limitiran DVD softver
 - Potrebna dodatna atenuacija na stražnjim zvučnicima
 - Skuplji softver.

1.2 Kvadrafonija

Razvijena kao prvi *surround* sustav, kvadrafonija je imala veliki polet 60-ih godina 20. stoljeća, kao i svoj brzi komercijalni krah. Problemi su se nalazili u slaboj standardizaciji sustava, lošoj prihvaćenosti, skupoj opremi i nedovoljno razvijenoj tehnologiji.



Slika 1.2 Kvadrafonija (4.0 sustav)

Na slici 1.2 prikazan je tlocrt jednog sustava kvadrafonije, s 4 zvučnika smještena u vrhove „kvadrata“.

Najprihvaćeniji kvadrafonijski sustav je imao naziv CD-4, i koristio je sljedeći sustav snimanja i reprodukcije: lijevi prednji (LF) i lijevi stražnji (LB) kanal su bili urezivani u gramofonsku ploču kao jedan zajednički lijevi kanal, što je analogno vrijedilo i za desni prednji (RF) i desni zadnji (RB) kanal. Za razliku od klasične stereofonije, u gramofonsku ploču s obje strane brazde bio je implementiran i prijenosni signal na frekvenciji 30 kHz, koji je prenosio razliku između lijevih, odnosno desnih kanala. Obradom bi se u dekodneru ponovno dobila 4 samostalna kanala koja se u konačnici reproduciraju. Matrične jednadžbe korištene u CD-4 sustavu su:

$$(LF + LB) + (LF - LB) = 2 * LF \quad (1)$$

$$(LF + LB) - (LF - LB) = 2 * LB \quad (2)$$

$$(RF + RB) + (RF - RB) = 2 * RF \quad (3)$$

$$(RF + RB) - (RF - RB) = 2 * RB \quad (4)$$

1.3 Ambiophonics

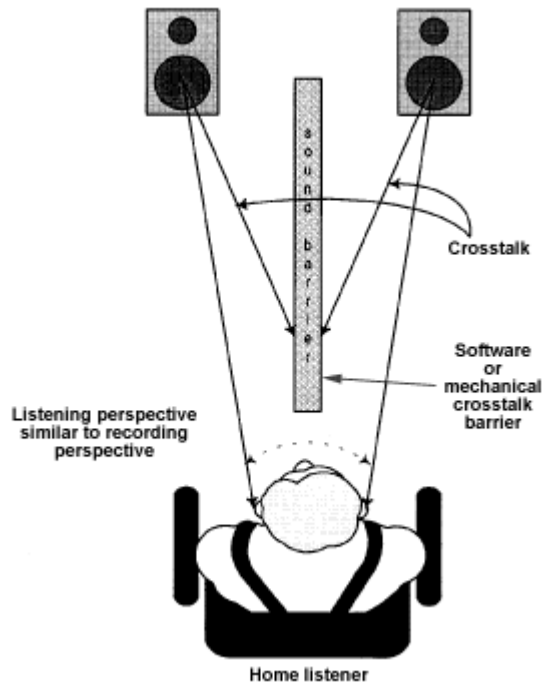
Ambiophonics je metoda obrade zvučnog signala, u svrhu dobivanja boljih rezultata u 5.1 *surround* sustavima, a poglavito u stereofoniji. Razvijena 1986. godine, navedena metoda je do današnjeg dana postala relativno dobro prihvaćena, pa tako veći broj softverskih kompanija nudi nekakvu implementaciju Ambiophonics sustava u svojim opcijama.

U stereofoniji, reproducirani zvuk se na putu do slušatelja na određenim mjestima izobličuje, u pojavi zvanoj akustičko preslušavanje (*crosstalk*). Prilikom reprodukcije u klasičnoj stereofonskoj postavi (dva zvučnika i slušatelj, u tzv. „stereo trokutu“) zvuk iz lijevog zvučnika se pojavljuje i na desnom uhu (analogno vrijedi i za zvuk iz desnog zvučnika), što dovodi do zamućenja zvučne slike, kao i problema s lokalizacijom. Problemi preslušavanja se temelje na dvjema postavkama:

- Interferencija signala koji se preslušavaju se očituje u efektu češljastog filtra (*Comb-filtering*), koji ima za posljedicu izobličenje audio signala na određenim frekvencijama, samim time i pogoršanje kvalitete tona
- Posljedica kašnjenja signala do suprotnog uha prilikom reprodukcije svakog od zvučnika jest iluzija stvaranja nepostojećih ranih refleksija, koji uvelike kvare zvučnu sliku.

Način na koji Ambiophonics eliminira preslušavanje je sljedeći: digitalnom obradom signala (DSP) definiraju se algoritmi rekursivne eliminacije preslušavanja (tzv. RACE algoritmi), koji frekvencijski selektivnim invertiranjem, atenuacijom i kašnjenjem u konačnici dolaze do optimalnih rezultata. Postavljanjem zvučnika jako blizu (s razmakom bridova zvučničkih kutija cca. 2-3 cm) anuliraju se fazne razlike, te je upravljanje refleksija mnogo lakše, a važnost dimenzija prostorije minimalna.

Prednost ove metode jest u tome da se klasična stereo zvučna slika s najčešćom širinom od 60° u Ambiophonics sustavu proširi do čak 180° za 2 zvučnika, s mnogo boljom lokalizacijom i osjećajem prostornosti. Velika većina ispitanika za vrijeme prvih pokusa s ovakvim sustavom je ocijenila razliku kao dramatičnu.



Slika 1.3 Ambiophonics sustav

Slika 1.3 prikazuje primjenu Ambiophonics sustava, na način da se mehanička pregrada ili odgovarajući softver mogu koristiti za smanjenje preslušavanja.

Nastavak na stereofonsku primjenu Ambiophonics sustava je korištenje 4 zvučnika, tako da se postave u vrhove „kvadrata“, i primijeni RACE algoritam na stražnja dva zvučnika. Na takav način zvučna slika se proširuje na punu horizontalnu sferu, odnosno 360° . 5.1 *surround* sustav se u Ambiophonics domeni implementira sa samo četiri zvučnika (centralni zvučnik je sklonjen), s vidnim uspjehom: korištenjem psihoakustičkih svojstava ljudskog sluha, pogreška u lokalizaciji je maksimalno 5° na cijelom području od 360° .

2. Ambisonics

Ostatak rada bit će posvećen sustavu Ambisonic, koji je uz osebujan način rada, implementacije, prednosti i nedostataka ostao relativno nezamijećen, u usporedbi s Dolby *surround* sustavom. Razlog za naglasak na navedenom sustavu se nalazi u njegovom ogromnom potencijalu, i naravno, vidnom napretku audio industrije tokom zadnjih godina.

2.1 Razvoj

Ambisonics je nastao kao projekt grupe britanskih istraživača, od kojih se izdvajaju Michael Gerzon i Peter Fellgett. Njihov cilj je bio, u sve većoj audio industriji, implementirati *surround* sustav koji će omogućiti glazbenu reprodukciju u konvencionalnom stambenom prostoru, tako da se, što je više moguće, očuvaju originalni zvuk i akustički parametri prostora u kojem je glazbeno djelo nastalo. Osnovna ideja je bila omogućiti snimanje sa specijalnim mikrofonom, koji je trebao u 4 kanala što kvalitetnije snimiti potpunu zvučnu sliku (npr. sa *Soundfield* mikrofonom). Također je moguće snimanje s jednim omnidirekcionalnim mikrofonom, i 3 gradijentna mikrofona, od kojih je svaki postavljen u jedan od tri zamišljena koordinatna sustava (X, Y, Z). Princip je sljedeći: od 4 kanala koja se snimaju, jedan je mono (W), dobiven preko omnidirekcionalnog mikrofona (ili superpozicijom svih kapsula *Soundfield* mikrofona), a ostala tri su snimljeni kao kao razlike tlakova na odgovarajućim osima (primjerice, kanal X je razlika u gradijentu „ispred“, odnosno „iza“ referentne točke na x-osi. Analogno vrijedi i za kanale Y i Z). Daljnjim dekodiranjem snimke moguće je za odgovarajuću postavu zvučnika dobiti reprodukciju koja odgovara zamišljenom: očuvane su lokalizacija i karakteristike izvedbe i prostorije.

Kao rezultat istraživanja, došlo se do bitnih otkrića, od koje su najvažnije sljedeće: Ambisonic sustav je radio neovisno o postavi zvučnika, na način da su se pozicije u postavi implementirale matrično u dekoderu, što se pokazalo dosta praktično. Dalje, efekt prostornosti i lokalizacija su bili stabilni na jako širokom prostoru, tako da se i izvan mreže zvučnika mogla osjetiti „prostorna“ zvučna slika koja dolazi iz

sustava. I za kraj, Ambisonics je ponudio nešto više od svih dotadašnjih *surround* tehnika: reprodukciju informacije o visini. Ovakav trodimenzionalni *surround* sustav je nazvan perifonija.

Pitanje koje se nameće je vezano uz relativno loš komercijalni uspjeh Ambisonic sustava: naime, osnovni razlog jest novac. Cijela implementacija uključuje nabavu dodatnog dekodera, te je sam način snimanja i obrade ovakvog sustava u usporedbi s drugim *surround* metodama dosta složen. Nadalje, pribavljanje patenata i franšiza se odvijalo s mnogo zastoja, tako da je konačni rezultat bio nedorečen.

2.2 Princip snimanja

Postoje tri osnovna principa dobivanja audio zapisa u B-formatu, od kojih su neki već navedeni:

- Snimanje pomoću *Soundfield* mikrofona (koji je prikazan na slici 2.1)
- „*Native*“ snimanje pomoću mikrofonskih nizova (jedan omnidirekcionalni i tri gradijentna s osmičastom usmjernom karakteristikom)
- Kodiranje mono (i inih) izvora pomoću sfernih harmonika



Slika 2.1 *Soundfield* mikrofona

Soundfield mikrofoni imaju 4 kapsule, označene na sljedeći način:

- FLU – prednja, lijeva, gornja kapsula
- FRD – prednja, desna, donja kapsula
- BLD – stražnja, lijeva, donja kapsula
- BRU – stražnja, desna, gornja kapsula

Standardni B-format signali (W, X, Y, Z) se u softveru kodiraju:

$$W = FLU + FRD + BLD + BRU \quad (5)$$

$$X = FLU + FRD - BLD - BRU \quad (6)$$

$$Y = FLU - FRD + BLD - BRU \quad (7)$$

$$Z = FLU - FRD - BLD + BRU \quad (8)$$

Snimanje zvučnim nizovima uključuje trivijalno kodiranje pomoću razlika gradijenta na „*Native*“ mikrofonskim nizovima.

Što se tiče kodiranja već snimljenih zapisa (npr. mono), sfernim harmonicima se u W, X, Y i Z kanale zapisuju podaci o izvoru kojem se definiraju parametri (azimut, elevacija). Tako se primjerice može definirati izvor s namještenim parametrima koji se mijenjaju u stvarnom vremenu (automatizacija), te se cijeli sustav zapisati u obliku B-formata.

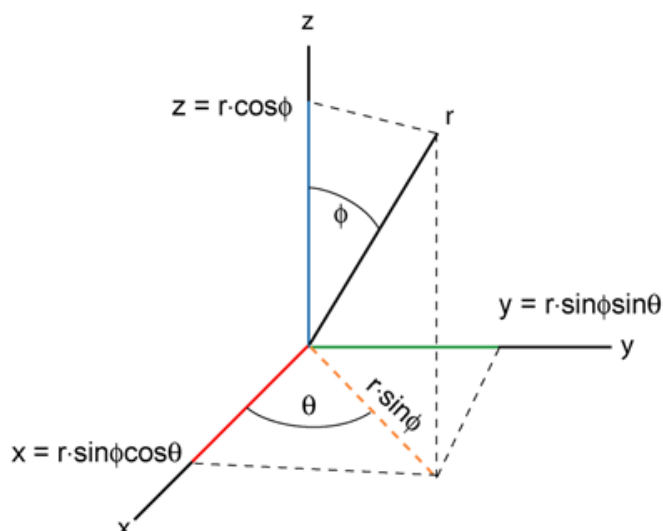
Samo kodiranje se odvija pomoću sfernih harmonika:

$$W = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \right] \quad (9)$$

$$X = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\cos \varphi_i * \sin \theta_i] \quad (10)$$

$$Y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\sin \varphi_i * \sin \theta_i] \quad (11)$$

$$Z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\cos \theta_i] \quad (12)$$

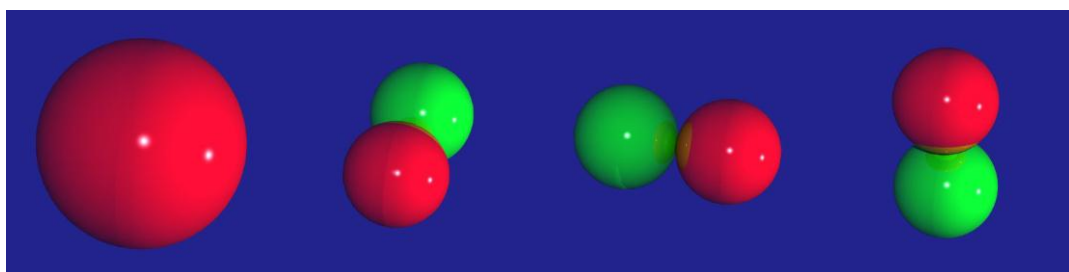


Slika 2.2 Sferni koordinatni sustav

Član s_i označava mono audio signal na određenoj poziciji, dodatno definiranoj kutem φ_i (phi) između x i y osi, te kutem θ_i (theta) između z i y osi, kao što je prikazano na slici 2.2. Ovakvo kodiranje u Ambisonic sustavu se obavlja pomoću posebnih normalizacijskih faktora, definiranih za svaki sferni harmonik korišten u procesu. Takva definicija kanala se naziva Furse-Malham set.

Bitno je naglasiti da se za definiciju sfernih harmonika, kako u trigonometrijskom, pa tako i u diferencijalnom obliku, koristi cijeli niz mogućih izvedbi. Najveća razlika se nalazi u definiciji sfernog koordinatnog sustava¹ i njegovih dijelova, kao i u pogreškama prilikom izračuna, što je pripomoglo daljnjem nestandardiziranju Ambisonic sustava.

Same funkcije sfernih harmonika prvog reda izgledaju sljedeće (redom W, X, Y, Z):



Slika 2.3 Sferni harmonici prvog reda

¹ Autor ovog rada koristi standardnu notaciju sfernog koordinatnog sustava i odgovarajućih sfernih harmonika. Elevacija je definirana kao $90^\circ - \theta$.

2.3 B-format višeg reda

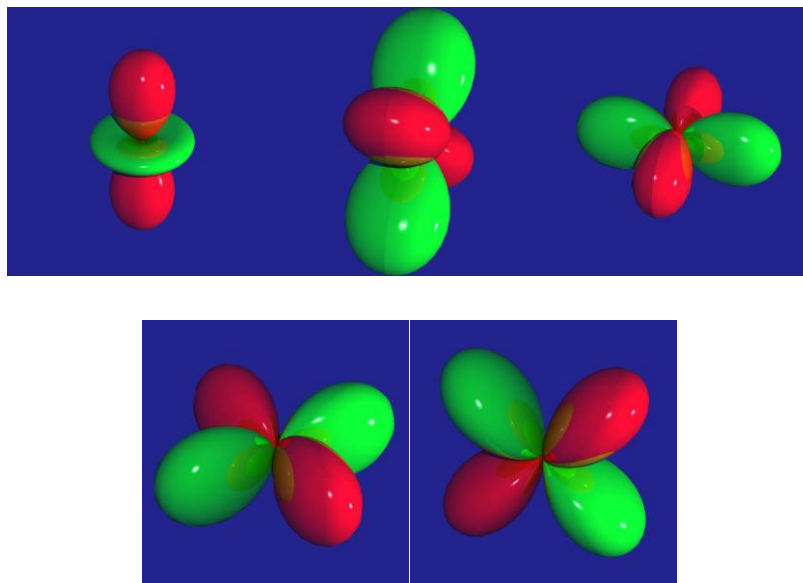
90-ih godina 20. stoljeća pokazano je da se princip Ambisonic sustava može proširiti do viših redova, povećavajući pritom prostor u kojem se zvučno polje precizno reproducira (tzv. *sweet spot*), kao i ukupnu kvalitetu lokalizacije.

Međutim, sve većim redom Ambisonic snimke raste i broj potrebnih kanala nužnih za reprodukciju. Tako je za drugi red potrebno 5 dodatnih kanala, a za treći red još dodatnih 7 kanala.

Matematička ideja iza proširenja pristupa Ambisonic sustavu se nalazi u sljedećim pretpostavkama:

- Zvučno polje se može smatrati superpozicijom ravnih valova.
Intuitivno je jasno da stoga mora biti moguće reproducirati zvučno polje koristeći ravne zvučne valove dobivene pomoću zvučnika.
- Ravni val se može predložiti beskonačnim nizom.
Korištenjem sfernih harmonika sastavljenih od trigonometrijskih funkcija moguće je razviti odgovarajuće složen red funkcije.

Tako sferni harmonici drugog reda imaju oblik (redom R, S, T, U, V):



Slika 2.4 Sferni harmonici drugog reda

Jednadžbe odgovarajućih Ambisonic signala drugog reda glase:

$$R = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i \left[\frac{1}{2} (3 * \cos^2 \theta_i - 1) \right] \quad (13)$$

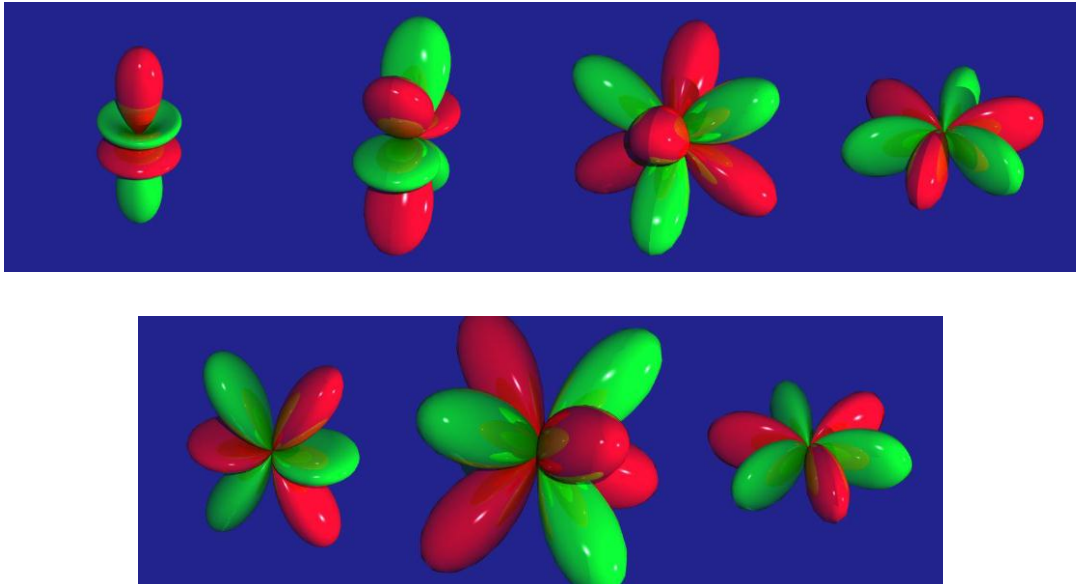
$$S = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\cos \varphi_i * \cos 2\theta_i] \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \right] \quad (14)$$

$$T = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\sin \varphi_i * \cos 2\theta_i] \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \right] \quad (15)$$

$$U = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\cos 2\varphi_i * \sin^2 \theta_i] \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \right] \quad (16)$$

$$V = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\sin 2\varphi_i * \sin^2 \theta_i] \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \right] \quad (17)$$

Sferni harmonici trećeg reda povećavaju složenost cijelog sustava dodavanjem još 7 kanala (redom K, L, M, N, O, P, Q):



Slika 2.5 Sferni harmonici trećeg reda

Jednadžbe harmonika (odnosno Ambisonic signala) trećeg reda, izvedene pomoću Furse-Malham seta, su:

$$K = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i \left[\frac{1}{2} \cos \theta_i (5 \cos^2 \theta_i - 3) \right] \quad (18)$$

$$L = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\cos \varphi_i * \sin \theta_i (5 \cos^2 \theta_i - 1)] \left[\sqrt{\frac{45}{32}} \right] \quad (19)$$

$$M = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\sin \varphi_i * \sin \theta_i (5 \cos^2 \theta_i - 1)] \left[\sqrt{\frac{45}{32}} \right] \quad (20)$$

$$N = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\cos 2\varphi_i * \cos \theta_i * \sin^2 \theta_i] \left[\frac{3}{\sqrt{5}} \right] \quad (21)$$

$$O = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\sin 2\varphi_i * \cos \theta_i * \sin^2 \theta_i] \left[\frac{3}{\sqrt{5}} \right] \quad (22)$$

$$P = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\cos 3\varphi_i * \sin^3 \theta_i] \left[\sqrt{\frac{8}{5}} \right] \quad (23)$$

$$Q = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\sin 3\varphi_i * \sin^3 \theta_i] \left[\sqrt{\frac{8}{5}} \right] \quad (24)$$

Sa svakim novim redom harmonika broj kanala kvadratno raste, i to odnosom:

$$N = (M + 1)^2 \quad (25)$$

gdje je N broj Ambisonic kanala, a M red sustava. Ovaj odnos vrijedi za 3D Ambisonic reprodukciju.

Za isključivo horizontalnu (2D) reprodukciju, odnos je sljedeći:

$$N = 2M + 1 \quad (26)$$

U dizajniranju perifonije Ambisonic sustava, psihoakustička svojstva ljudskog sluha mogu biti razmotrena tako da se iskoriste sustavi mješovitog reda, gdje se horizontalna i vertikalna komponenta zvučnog polja kodiraju međusobno neovisno, s različitim redovima. S obzirom da je prostorna rezolucija ljudskog sluha posebno dobro razvijena u horizontalnoj ravnini, taj će dio biti kodiran pomoću višeg reda nego što će to biti slučaj s vertikalnim dijelom.

Broj Ambisonic kanala u sustavu mješovitog reda je zadan ovako:

$$N = [2M_H + 1] + [(M_V + 1)^2 - (2M_V - 1)] \quad (27)$$

gdje je M_H red horizontalnog dijela, a M_V red vertikalnog dijela.

Kao posljedica ograničenja ljudskog sluha, tehnologije, te slabog napretka u kvaliteti reprodukcije vrlo visokih redova u odnosu na niže, u praksi se vrlo rijetko koristi format viši od trećeg reda. Potvrdu ovoj tezi također daje i činjenica da se rastom reda sfernih harmonika povećava potreba za sve skupljim i posebnijim mikrofonskim nizovima. U praksi se koriste već navedeni *Soundfield* mikrofoni za niže redove i izrazito složeni *Eigenmic* mikrofoni s 32 kapsule za više redove.



Slika 2.6 Eigenmic mikrofoni

2.4 Dekodiranje

U osnovi, svaki zvučnik u Ambisonic postavi prima određenu sumu svih Ambisonic kanala. Postoje dva načina dekodiranja, sa sljedećim tezama na kojima se baziraju:

- Dekodiranje pomoću projekcije:

Za svaki zvučnik „težina“ kanala koju prima je jednaka vrijednosti odgovarajućeg sfernog harmonika na poziciji tog zvučnika:

$$p_j = \frac{1}{N} \left[W\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) + X(\cos \varphi_j * \sin \theta_j) + Y(\sin \varphi_j * \sin \theta_j) + Z(\cos \theta_j) \right] \quad (28)$$

gdje je p_j signal koji se šalje na j-ti zvučnik, N broj Ambisonic kanala, a (φ_j, θ_j) pozicija j-tog zvučnika. S obzirom da se svi kanali šalju na svaki zvučnik, potrebna je normalizacija s faktorom $\frac{1}{N}$ da se izbjegne rezanje signala (*clipping*). Ova strategija dekodiranja pretpostavlja da je postava zvučnika pravilna, i u suprotnom slučaju će se ponašati kao da jest (imat će „projekciju“). Za 3D postave postoji jako maleni broj regularnih postava (pravilni poliedri). Zbog svega navedenog, pojavila se potreba za boljim načinom dekodiranja Ambisonic signala. Rješenje je pronađeno u matričnom dekodiranju.

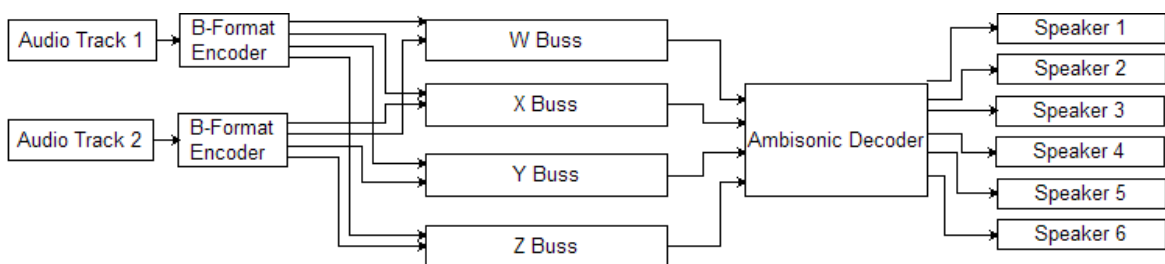
- Dekodiranje pomoću matričnog pseudoinverza:

Pretpostavljajući da je A vektor Ambisonic kanala ($A=[W \ X \ Y \ Z]^T$), p je vektor signala koji se šalju na zvučnike, a C je „re-kodirajuća“ matrica, moguće je izraziti sljedeću funkciju:

$$A = C * p, \text{ odnosno } p = C^{-1} * A.$$

C^{-1} je inverz od C, i naziva se dekodirajuća matrica. Za invertiranje matrice ona mora biti kvadratna, no s obzirom da je u Ambisonic sustavu općenito $L > N$ (L je broj zvučnika, a N broj Ambisonic kanala), koristi se pseudoinverz, pa vrijedi:

$$p = \text{pinv}(C) * A = C^T (C * C^T)^{-1} * A \quad (29)$$

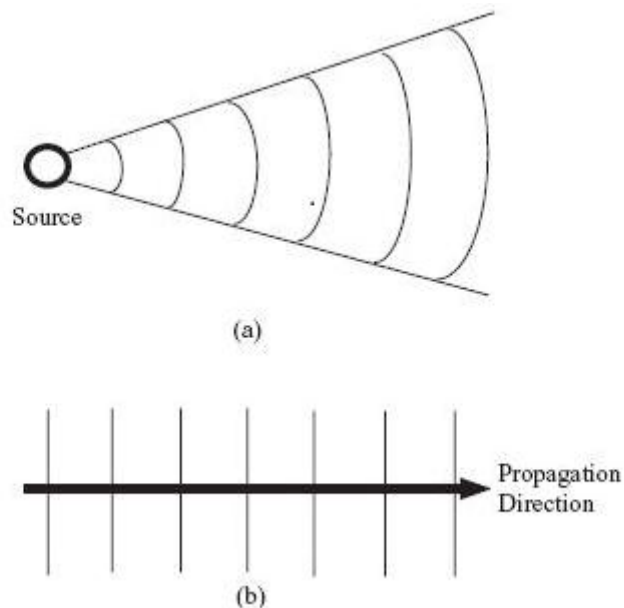


Slika 2.7 Princip kodiranja i dekodiranja B-formata iz audio zapisa

Na slici 2.7 prikazan je princip kodiranja i dekodiranja u jednoj mogućoj Ambisonic implementaciji gdje se koriste zapisi dviju posebnih audio traka, umjesto *soundfield* snimanja.

2.5 Kodiranje udaljenosti izvora

Pozicija izvora zvuka koji se kodiraju po Ambisonic principu je jednoznačno određena parom (φ_i, θ_i) samo na udaljenosti koja je jednaka radijusu mreže zvučnika koja se koristi za reprodukciju. Međutim, prirodna akustička okruženja se sastoje od izvora na različitim udaljenostima, pa je tako za reprodukciju i sintezu zvučnog polja bitno pronaći način za kodiranje udaljenosti takvih izvora. Za daleke izvore rješenje se nalazi u umjetnim algoritmima reverberacije, no bliski izvori imaju potpuno drukčiju problematiku. Postoje dva pristupa rješenju, i oba imaju korijene u kodiranju udaljenosti sintetiziranjem zakrivljenosti zvučnih valova: točkasti zvučni izvori emitiraju kuglaste valove, čija se zaobljenost smanjuje povećanjem udaljenosti. Ambisonic sustav polazi s pretpostavkom da svi zvučnici emitiraju ravne valove, što olakšava matematički pristup cijelom sustavu, no žrtvuje informacije o udaljenosti.



Slika 2.8 Kuglasti i ravni val

Slika 2.8 prikazuje propagaciju kuglastog vala (slučaj a) i propagaciju ravnog vala (slučaj b).

Kodiranje distance kompenzacijom bliskog polja:

- Ovaj pristup se bazira na pretpostavci da je udaljenost mreže zvučnika konačna. Ta konačna udaljenost rezultira u povećanju intenziteta niskih

frekvencija (*bass-boost*), što je u suštini slično efektu blizine, koji se javlja kod dinamičkih mikrofona. Ukratko, što se bliže primakne s mrežom zvučnika, to je *bass-boost* više izražen. Tako je definiran novi format kodiranja NFC-HOA, koji kompenzira *bass-boost* efekt u fazi kodiranja pomoću filtara. Ovakvim pristupom se s udaljenosti izvora upravlja na sljedeći način:

- Izvor za koji je potrebno da se nalazi na udaljenosti ekvivalentnoj udaljenosti mreže zvučnika ne treba kompenzaciju niskih frekvencija
- Za izvor koji je unutar mreže zvučnika potrebno je povećati razinu intenziteta niskih frekvencija
- Za izvor koji je izvan mreže zvučnika potrebno je smanjiti razinu intenziteta niskih frekvencija

Nedostatak ovakvog pristupa je u tome da je potrebno znati poziciju zvučnika već u fazi kodiranja, što „ruši“ čistu odvojenost kodirajuće i dekodirajuće faze. Međutim, dodatni filtri mogu kompenzirati ovaj nedostatak.

Kodiranje udaljenosti hibridnom holofonijom:

- Holofonija jest pristup *surround* sustavima, koji se bazira na tezi da je svaki zvučni val moguće rekonstruirati pomoću elementarnih zvučnih valova. Tako se, korištenjem velikog broja individualnih zvučnika, sintetiziraju virtualni zvučni izvori, odnosno zvučno polje (*Wave field synthesis*). Kodiranje distance s ovakvim pristupom ima dvije faze:
 - Prva faza: principom holofonije se kodira zakrivljenost zvučnih valova (time i udaljenost) na virtualnu mrežu zvučnika.
 - Druga faza: virtualni zvučnički signali se potom kodiraju u viši red Ambisonic sustava kao izvori sa statičkim pozicijskim informacijama.

Ovakav pristup omogućava iskorištavanje velikih prednosti holofonije bez potrebe za velikim brojem zvučnika, koji su nužni u holofonskim sustavima.

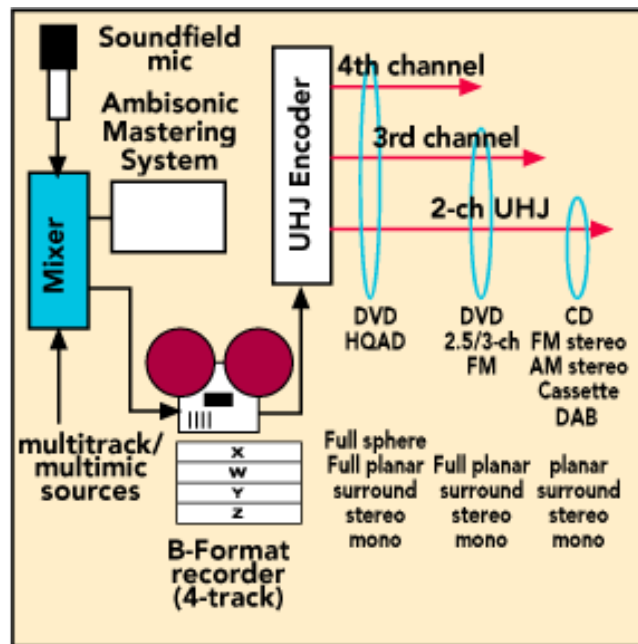
Cijela problematika udaljenosti zvučnih izvora je pokazala sve dimenzije pretpostavke o emitiranju ravnih zvučnih valova u Ambisonic sustavu, kao i prednosti holofonije.

2.6 Ostali formati

Osim već navedenog B-formata, koji je osnova svih ostalih Ambisonic formata, postoji cijeli niz ostalih formata, od kojih su najvažniji spomenuti u nastavku.

UHJ format:

- Ovaj format je posebni hijerarhijski sustav kodiranja i dekodiranja prostorne informacije unutar Ambisonic tehnologije. Ovisno o broju raspoloživih kanala, sustav može nositi više ili manje informacije, ali je uvijek potpuno mono i stereo kompatibilan. UHJ format nosi maksimalno 4 kanala, i to tako da je dekodiranje opcionalno. Ukratko, UHJ format je pokušaj komercijalizacije Ambisonic sustava, na način da se posebnim kodiranjem omogući reprodukcija na mono, stereo i kvadro sustavima.



Slika 2.9 Kodiranje UHJ formata iz B-formata

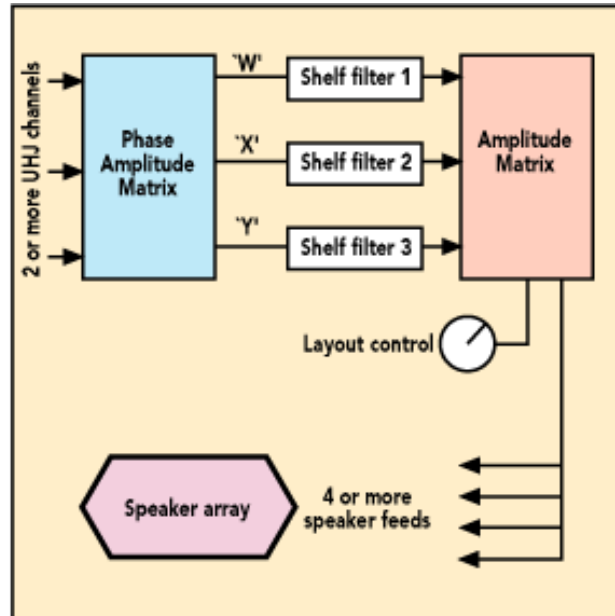
Na slici 2.9 vidljivo je kako se u UHJ koderu stvoreni B-format preslikava u UHJ format određene hijerarhije.

Ovisno o pristupu dekoderu, i o broju kanala formata, definira se sljedeća hijerarhija:

- Broj kanala: 4, s dekoderom. Mogućnosti: puni 3D *surround* zvuk.
- Broj kanala: 3, s dekoderom. Mogućnosti: puni 3D *surround* zvuk.
- Broj kanala: $2\frac{1}{2}$, s dekoderom. Mogućnosti: puni 2D *surround* zvuk.

Napomena: „ $2\frac{1}{2}$ kanalni“ sustav označava sustav s 3 kanala, od kojih jedan kanal ima smanjeni frekvencijski pojas.

- Broj kanala: 2, s dekomerom. Mogućnosti: 2D *surround* zvuk.
- Broj kanala: 2, bez dekodera. Mogućnosti: *super* stereo (mnogo šira lokalizacija od običnog stereo zvuka)
- Broj kanala: 1, bez dekodera. Mogućnosti: mono zvuk



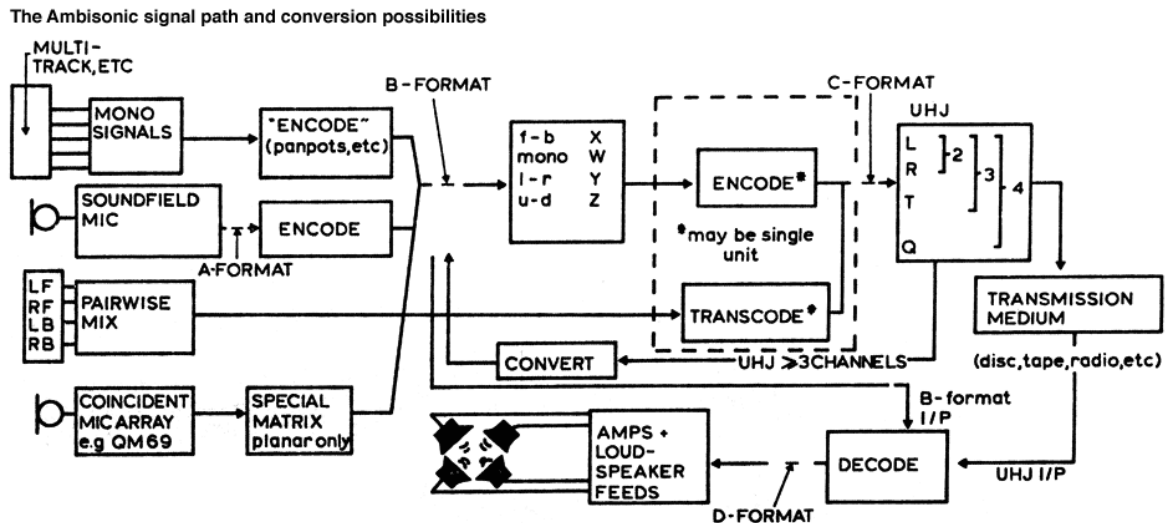
Slika 2.10 UHJ dekode

G-format:

- Manjak pristupačnosti i visoka cijena Ambisonic dekodera je dovela do prijedloga dekodiranja originalnog signala „u studiju“, a ne na slušalačkom kraju. Profesionalni softverski ili hardverski dekode je korišten za dekodiranje Ambisonic signala u konvencionalnu *surround* postavu zvučnika (primjerice 5.1), tako da se rezultirajući signali prenose na standardnim medijima, u pravilu na DVD-u. Tako je definiran G-format. Očita prednost ovakvog pristupa je u tome da svaki slušatelj *surround* sustava može doživjeti Ambisonic zvuk, i to bez dekodera. Glavni nedostatak jest nestanak fleksibilnosti originalnog Ambisonic signala: G-format je usmjeren prema određenoj postavi zvučnika, i svaka druga postava će imati manje ili veće oscilacije u lokalizaciji i kvaliteti.

2.7 Tijek signala

Na slici 2.11 dan je pregled mogućnosti tijeka Ambisonic signala:



Slika 2.11 Tijek Ambisonic signala

Prikazani su načini dobivanja B-formata: *multi-track* izvedba (odnosno sinteza zvučnog polja pomoću sfernih harmonika), i izvedba pomoću *Soundfield* mikrofona, s time da izvedba „*Native*“ mikrofona nije navedena. Nakon dobivanja B-formata slijedi kodiranje u UHJ format, koji omogućuje prijenos na standardnim nosačima zvuka (primjerice audio CD), te se nakon korištenja prijenosnog medija signal dekodira za konkretne zvučničke postave.

2.8 Prednosti i nedostaci

Za kraj analize Ambisonic sustava, bitno je opisati njegove prednosti i nedostatke u odnosu na druge *surround* metode.

Prednosti:

- Uniforman je u svim smjerovima, odnosno zvuk iz svih smjerova se tretira jednako (za razliku od većine ostalih *surround* sustava, koji pretpostavljaju da su glavni izvori zvuka na prednjoj strani slušateljeve pozicije, a stražnji kanali se koriste za ambijent i specijalne efekte)
- Svi zvučnici se koriste za lokalizaciju u svim smjerovima, što u konačnici puno popravljja lokalizaciju, pogotovo na stražnjem dijelu i sa strana

- Stabilnost i percepcija reproduciranog zvučnog polja manje ovisi o slušateljevoj poziciji nego kod velike većine ostalih sustava
- Minimalan broj od 4 kanala informacije je potreban za puni 3D *surround* zvuk, a 3 kanala za puni horizontalni *surround* zvuk, što je manje nego kod ostalih sustava.
- Zvučnici ne moraju biti postavljeni u točno predefiniran oblik: većina pravilnih likova, kao i neki nepravilni, mogu biti iskorišteni
- Ambisonic signal je neovisan o sustavu reprodukcije: originalni signal može biti dekodiran neograničen broj puta za različite postavke zvučnika.

Nedostatci:

- Nije podržan od nijedne velike izdavačke kuće ili kompanije
- Nikad nije bio dobro promoviran i, većinski zbog toga, nije široko poznat
- Konceptualno ga je teško shvatiti (kosi se s konvencionalnim „jedan zvučnik – jedan kanal“ *surround* sustavom)
- Iako je G-format riješio ovo pitanje, velika većina Ambisonic signala još uvijek treba dekodeer za reprodukciju na kraju signalnog lanca
- Minimalni broj zvučnika za horizontalnu reprodukciju je 4, što je iskoristivo za manje prostorije. U većim prostorijama sustav bi lako došao do ruba stabilnosti, pa je obično potreban veći broj zvučnika (najčešće 6).

3. Implementacija sustava

Analiza implementacije jednog Ambisonic sustava višeg reda počinje razmatranjem svih čimbenika bitnih za uspješnu finalizaciju, počevši od same pripreme, preko popisa opreme, potrebnih podešavanja, te samog zaključka.

3.1 Priprema sustava

Kao operativni sustav za implementaciju Ambisonic sustava višeg reda iskorišten je sustav otvorenog koda (*open-source*), odnosno Ubuntu, najnovije distribucije (u trenutku pisanja) 12.04. Za ispravnu reprodukciju upotrijebljen je Ardour GTK2 softver, te matrični dekodirer AmbDec autora Fonsa Adriaensena za pravilno dekodiranje unutar određene postavke zvučnika. Također, nužan je softver JACK za povezivanje virtualnih i fizičkih kanala, kao i cijeli niz dodatnih datoteka (*library*) za ispravan rad Ubuntu sustava. Od dodatnog softvera potrebnog za optimalne rezultate, moguće je koristiti AMB *plug-in* dodatke, JConv sustav za obavljanje konvolucije, te Alik softver za izračun impulsnog odziva. Filtri za impulsni odziv se računaju pomoću DRC alata, a JAPA analizator provodi brze provjere frekvencijskih odziva.

Što se hardvera tiče, osigurano je 16 Yamaha HS50M aktivnih širokopojasnih zvučnika, 2 Behringer Ultragain Pro-8 Digital ADA8000 A/D i D/A audio sučelja s ADAT mogućnostima, i jedna RME RayDat zvučna kartica sa 72 kanala. Operativni sustav se pokreće na autorovom računalu s Intel Core 2 Duo E6850 3 GHz procesorom i 4 GB DDR2 RAM memorije, na kojem je sustav radio optimalno.

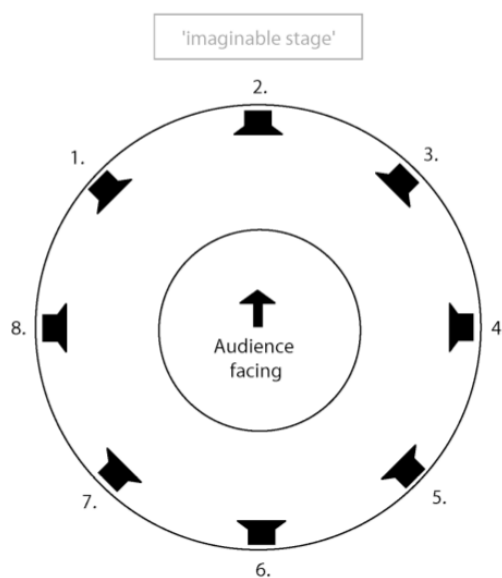
3.2 Lokalizacija zvučnog izvora

S obzirom na važnost lokalizacije izvora u *surround* sustavima, potrebno je definirati osnovne mehanizme funkcioniranja ljudskog sluha prilikom lokalizacije izvora. Ispod frekvencije od 700 Hz (zvučnog vala) čovjek se može osloniti samo

na faznu razliku između ušiju. Razlike amplitude na tim valnim duljinama su zbog ogiba oko glave zanemarive. Kada se valna duljina približi dvostrukoj udaljenosti između ušiju, fazna razlika postane dvoznačna, pa cijela mogućnost lokalizacije ovisi o amplitudnoj razlici, i to između 700 Hz i 5 kHz. Napredniji Ambisonic dekoderi (među njima i korišteni AmbDec) iskorištavaju ovu činjenicu koristeći dva različita seta dekodirajućih matrica, maksimizirajući pritom vektor brzine r_V ispod 700 Hz i gradijent intenziteta (energije) r_E na višim frekvencijama. Korištenjem filtera odvajaju se navedeni audio pojasi, koji moraju biti fazno usklađeni. S obzirom da je ovo netrivialno, većina dekodera ne koristi 2 seta dekodirajućih matrica, što rezultira lošijom zvučnom slikom, pogotovo u manjim zvučničkim postavama.

3.3 Zvučnička postava

Uspješna Ambisonic reprodukcija zahtijeva uniformni fazni odziv svih zvučnika, kao i istovjetno namještenu razinu. Miješanje zvučnika različitih proizvođača, kao i zvučnika baziranih na različitim principima obično rezultira lošijom kvalitetom. Promatrajući postavu zvučnika, za optimalne rezultate potrebna je što pravilnija postava u 2D sustavu (pravilni geometrijski likovi) i 3D sustavu (pravilna geometrijska tijela).



Slika 3.1 Pravilna Ambisonic zvučnička postava

Za nepravilne konfiguracije, trenutno ne postoji napredni algoritam koji bi određivao koeficijente matrica za optimizaciju vektora r_V i r_E . U slučaju da idealna postava nije moguća, preferiraju se blage varijacije u udaljenosti u odnosu na kut, s obzirom da se iste trivijalno rješavaju dodavanjem kašnjenja na zvučničke signale (*delay*). Jedna od ključnih stvari jest ta da svaka pozicija zvučnika mora imati dijametralno suprotnu poziciju.

U konkretnoj implementaciji vezanoj za ovaj rad, korištena je akustički obrađena prostorija s pomičnim stalcima za zvučnike. 16 raspoloživih zvučnika postavljeno je na sljedeći način:

- 4 zvučnika blizu poda, poredana u savršen kvadrat
- 8 zvučnika u razini uha, poredana u savršen oktagon
- 4 zvučnika blizu stropa, poredana u savršen kvadrat

Azimut središnjih zvučnika je iznosio 45° , elevacija ($90^\circ - \theta$) gornjih zvučnika 56° , a donjih -56° , čineći tako gotovo pravilnu „sferu“ radijusa 160 cm. Bitno je naglasiti da su svi zvučnici bili odmaknuti od tvrdih podloga, što je u konačnici pripomoglo očuvanju zvučne slike.

3.4 Mjerenje impulsnog odziva i digitalna korekcija prostorije

U slučaju nepostojanja akustički obrađene prostorije, određenim alatima pod Ubuntu sustavom moguća su dva pristupa optimiziranju performansi sustava: ispravljanje zvučnika, koje zahtijeva mjerenja na otvorenom prostoru, i ispravljanje cjelokupnog sustava zvučnika i prostorije. S obzirom na praktičnost realizacije, analiziran je potonji sustav.

Fazni i amplitudni odziv zvučnika dobiven je korištenjem *sine-sweep* tehnike, koja se bazira na ideji da se dugi sinusni signal (kojem se mijenja frekvencija) može dekonvoluirati u impuls koji ima mnogo bolji omjer signala i šuma nego impuls dobiven klasičnom metodom mjerenja impulsnog odziva. Također, impulsni odziv nastao kao produkt dekonvolucije sinusnog signala ignorira nelinearnu distorziju, s obzirom da projicira artefakte distorzije u negativnom vremenu, što je u konačnici jednostavno odstraniti.

Nakon dekonvolucije, impulsni odzivi se šalju u softver DRC, koji generira inverzne filtre. Takvi filtri se u stvarnom vremenu konvoluiraju s ulaznim signalima u JConv softveru, neutralizirajući pritom akustičke manjkavosti prostorije i zvučnika.

Glavni proces u DRC softveru jest „izravnanje“ i normalizacija impulsnog odziva. Dalje, eliminiraju se nagli skokovi nastali kao posljedica padova amplitude u originalnom odzivu, koji mogu oštetiti opremu. Uho je mnogo osjetljivije na skokove, nego na padove amplitude, pa se tako dobije optimalni kompromis.

3.5 Postupak implementacije

Za implementaciju Ambisonic sustava 3. reda osigurana je spomenuta postava zvučnika, te tri matrice za AmbDec, konstruirane od Fonsa Adriaensena za potrebe ovog rada:

- 1h1v matrica – prvi red horizontalno, prvi red vertikalno. Koriste se 4 zvučnika blizu poda, 4 zvučnika blizu stropa, i 4 zvučnika na razini uha. 3D reprodukcija.
- 3h0v matrica – treći red horizontalno, nulti red vertikalno. Koristi se isključivo 8 zvučnika na razini uha. 2D reprodukcija
- 3h2v matrica – treći red horizontalno, drugi red vertikalno. Koristi se svih 16 zvučnika u postavi. 3D reprodukcija.

Za hardver, bilo je potrebno spojiti zvučnu karticu RME Raydat na matičnu ploču osobnog računala, te povezati ADAT ulaze i izlaze s odgovarajućim utorima na Behringer audio sučeljima u svrhu sinkronizacije i prijenosa podataka. Dalje, audio sučelja su slala signale na 16 zvučnika, počevši od pozicija na razini uha, obrnuto od smjera kazaljke na satu, nastavljajući se na zvučnike blizu poda, i analogno njima na zvučnike blizu stropa.

Softverski dio se pokazao iznimno kompleksan, pogotovo u pogledu nekompatibilnosti s Windows sustavom, te brojnih prepravljanja loše postavljenog Ubuntu sustava. Nakon instalacije operativnog sustava, potrebno je izvršiti instalaciju osnovnih datoteka (*library*), u obliku python i X11 razvojnih setova.

Različite Ubuntu distribucije imaju različite manjkavosti, tako da je određen broj instalacija dodatnih „knjižnica“ moguć, ako ne i vjerojatan.

Većina naredbi u radnom okruženju Ubuntu sustava se odvija u tzv. „Terminalu“, i to na način da se instalacije obavljaju sljedećom naredbom:

```
sudo apt-get install <program>
```

gdje <program> označava zadani program kojeg će Ubuntu korištenjem Interneta locirati i instalirati.

Potrebno je instalirati: Ardour, AmbDec, AMB *plug-in*, JACK i dodatne datoteke.

Ardour i JACK se instaliraju pomoću naredbe „apt-get install“, međutim instalacija AmbDec softvera zahtijeva prvotnu instalaciju posebnih datoteka za ispravan rad, „clthreads“ i „clxclient“, koje se mogu pronaći na stranici autora AmbDec softvera. Očekivana je i instalacija dodatnih datoteka potrebnih za rad, no one ovise o konkretnoj Ubuntu instalaciji i neće se razmatrati u ovom radu. Ubuntu datoteke često dolaze u komprimiranom obliku s ekstenzijom *.tar.bz2*, pa se preko Terminala otpakiravaju na sljedeći način, nakon pristupa njenoj lokaciji:

```
tar jxf <file>.tar.bz2
```

s <file> kao nazivom komprimirane datoteke.

Također, bitno je naglasiti važnost osiguravanja JACK serveru te samom AmbDecu prioritetni rad u stvarnom vremenu (*Real-time priority*) i zaključavanje memorije (*Memory lock*). Za osiguravanje takvog načina rada, prije svega je potrebno pronaći datoteku */etc/groups*, kojoj je bitno pristupiti preko Nautilus sustava (koji osigurava da se izmjene obavljaju kao administrator, a ne kao korisnik), i to upisivanjem sljedeće naredbe u Terminal:

```
gksu nautilus
```

Nakon što je datoteka pronađena, potrebno je kod zapisa „audio“ dodati sljedeću ekstenziju:

```
audio:x:29:pulse,<username>
```

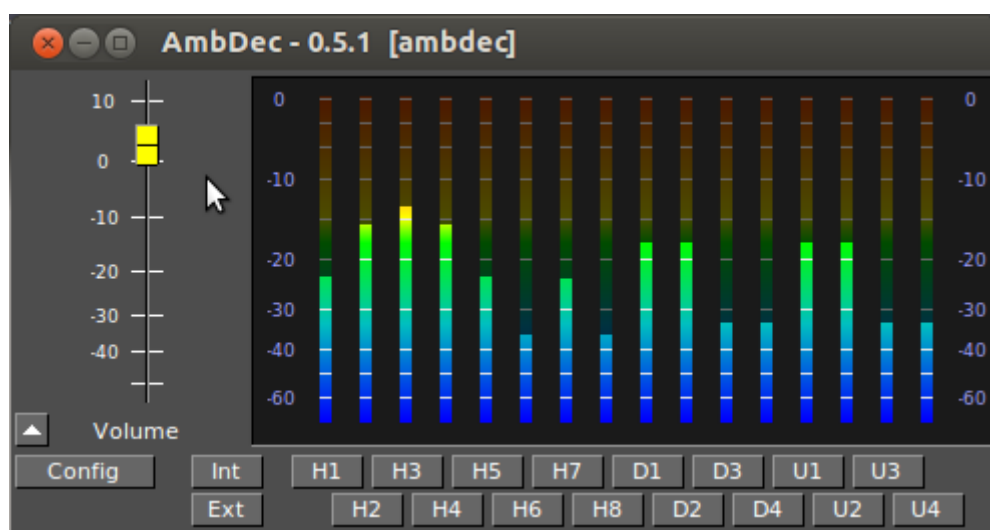
gdje <username> označava korisničko ime navedeno pri instalaciju Ubuntu sustava. Nakon ponovnog pokretanja, u Terminalu se postavlja upit:

```
ulimit -l -r
```

Izlaz bi trebao biti sljedeći:

```
max locked memory (kbytes, -l) unlimited
real-time priority (-r) 95
```

Nakon svega, izgled AmbDec miksera je sljedeći (lokacija izvršne datoteke je `/usr/local/bin`):



Slika 3.2 AmbDec 3h2v mikser

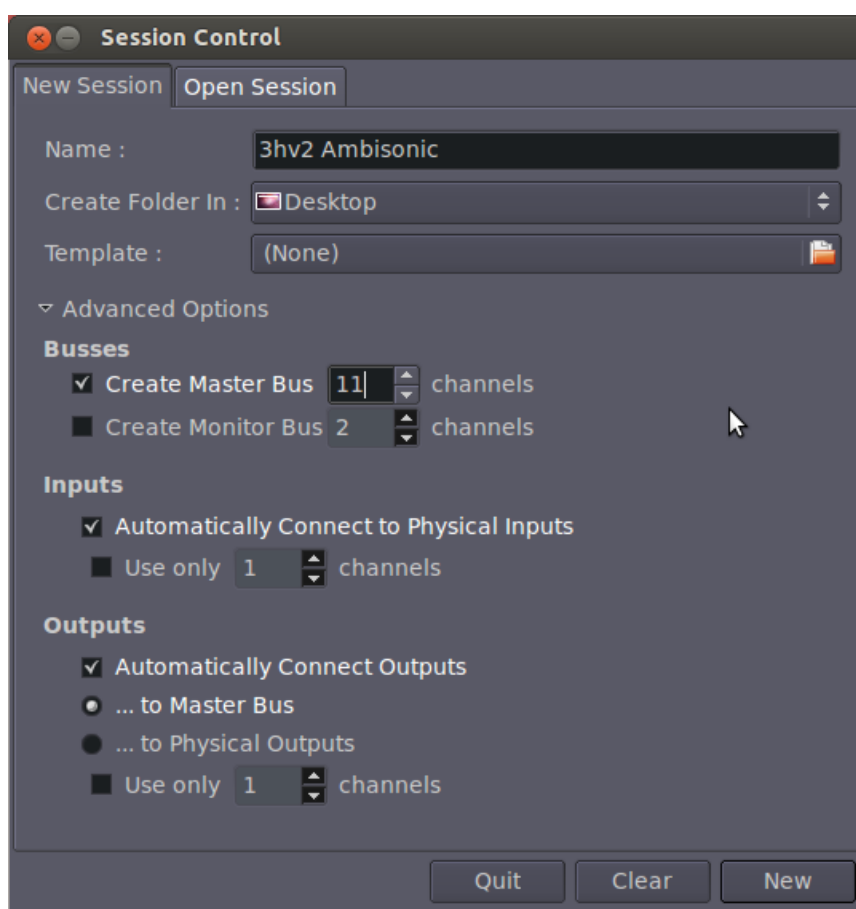
Što se tiče AMB *plug-in* softvera, potrebno je prije instalirati audio standard LADSPA, koji se pronade preko Ubuntu centra za softver (Ubuntu *software center*).

Prije korištenja softvera Ardour, AmbDec, AMB *plug-in* i JACK, bitno je objasniti funkciju svakog od njih:

- Ardour – sustav za reprodukciju, prima .wav audio zapise i šalje ih na ulaze audio procesora ili zvučnike
- JACK – generira sve virtualne i fizičke kanale sustava i povezuje ih na ispravan način
- AMB *plug-in* – služi kao Ambisonic *panner* izvora, koristi se prilikom generiranja B-formata iz mono ili stereo snimki crtanjem automatizacije
- AmbDec – visokokvalitetni dekodir B-formata

U samom procesu reprodukcije, potrebno je prvo uključiti QjackCtl (grafičko sučelje JACK servera), zatim Ardour, te AmbDec. Pri korištenju viših redova snimki potreban je veći broj kanala, a posljedično tome potrebno je povećati maksimalni broj QjackCtl priključaka na barem 512.

Ardour sustav zahtijeva pravilno postavljenu širinu *Master* sabirnice, koja ovisi o redu B-formata koji se reproducira (primjerice 4 za prvi red, 9 za drugi red, te 16 za treći red trodimenzionalno). Na slici 3.3 prikazan je izgled prozora Ardour softvera prilikom otvaranja novog projekta (širina sabirnice je 11 kanala, za treći red horizontalno, drugi red vertikalno, i to redom W, X, Y, Z, R, S, T, U, V, P, Q):



Slika 3.3 Ardour 3hv2 prozor

Nakon uključanja svih programa, potrebno je na Ardour mikseru dodati traku potrebne širine (primjerice *4-channel track* za B-format prvog reda), te uvesti (*import*) odgovarajuću snimku. Za reprodukciju na ovom projektu, korištena su tri oblika snimki: 1h1v, 3h0v, i posebna snimka trećeg reda ustupljena od autora određenog broja *AMB plug-in* uradaka, Jörna Nettingsmeiera. Nakon postavljanja odgovarajućih snimki na traku, nužno je na Ardour mikseru premostiti (*bypass*) na

svim trakama već uključene *panner* dodatke, i u konačnici, nakon uključanja odgovarajuće matrice u AmbDec softveru, povezati sve kanale *Master* sabirnice s matricom.

Za ispravan rad ugrađene zvučne kartice potrebno je prvo premostiti staru karticu kroz Alsamixer (upravljač audio hardverom), pozivajući program u Terminalu. Pregledavajući raspoložive zvučne kartice, korisnik može očitati trenutno korištenu, s indeksom 0. Korištenjem Nautilus sustava pronalazi se datoteka */etc/modprobe.d/alsa-base.conf*, u koju se prije reda

```
# Prevent abnormal drivers from grabbing index 0
```

dodaje red

```
options <soundcard> index=1
```

gdje <soundcard> označava zvučnu karticu koja je imala indeks 0.



Slika 3.4 Ambisonic implementacija u AuraLabu na FER-u

Zaključak

Cilj ovog završnog rada bio je dati osnovnu analizu višekanalnih sustava za reprodukciju prostornog zvuka, analizirati Ambisonic sustav, i opisati postupke pri implementaciji jednog takvog sustava 3. reda na Ubuntu operativnom sustavu. Korištenjem kvalitetno postavljenih matrica, ispravnih snimki, nizom zvučnika međusobno ujednačenih odziva, te osobnog računala prosječne kvalitete moguće je rekonstruirati Ambisonic ugođaj u visokoj kvaliteti, i reproducirati homogeno zvučno polje, odnosno prostorni zvuk. Prilikom implementacije otkrivene su određene poteškoće u upravljanju *open source* operativnim sustavom, za što su opisani postupci za izbjegavanje istih i osiguravanje optimalnog rada. Zaključci proizašli iz analize i implementacije su u dobrom dijelu homogeni, te ocjenjuju Ambisonic sustav (koji je, uz spektakularni krah na tržištu, ipak baziran na naprednim fizikalnim i matematičkim principima) kao vrlo kvalitetan sustav reprodukcije prostornog zvuka. Tako su se Ambisonic snimke 3. reda pokazale detaljne i ambijentalne, ostavljajući slušatelja pod dojmom da je „unutar“ događaja, omogućujući preciznu lokalizaciju izvora.

Međutim, implementacija sustava se pokazala prekompleksnom za prosječnog korisnika, te je nizak nivo standardizacije i dalje glavni problem njegovog lošeg izbijanja na tržište. Dalje, potpuni ugođaj u Ambisonic sustavu zahtijeva poziciju slušatelja unutar *sweet spot zone*, te vrlo često i ručno definiranje tijeka signala, što u konačnici djeluju kao ograničavajući faktori naglom razvoju Ambisonic sustava spremnog za tržište.

Finalni zaključci idu u korist Ambisonic sustava, i pretpostavljaju njegovu skorbu integraciju u industriju zabavnih sadržaja, poput video igara, specijaliziranih kino dvorana, i audiofilnih sustava za reprodukciju, no pod uvjetom standardiziranja protokola i formata, te ostvarivanjem veće kompatibilnosti s komercijalnim sustavima reprodukcije zvuka.

Literatura

- [1] Robjohns, H.: *Surround Sound Explained*, s Interneta, <http://www.soundonsound.com/sos/Nov01/articles/surround4.asp>, studeni 2001.
- [2] Dellasala, G.: *Dolby Digital vs. DTS: A Guide to the Strengths of the Formats*, s Interneta, <http://www.audioholics.com/education/surround-sound/dolby-digital-vs-dts-a-guide-to-the-strengths-of-the-formats>, kolovoz 2004.
- [3] Olson, D.: *Quadraphonic Sound*, s Interneta, <http://www.rdrop.com/~dano/tunes/quad.html>, prosinac 2001.
- [4] Leventhal, L.: *Understanding Ambiophonics*, s Interneta, <http://www.ambiophonics.org/Tutorials/UnderstandingAmbiophonics.html>, srpanj 2006.
- [5] Hodges, P.: *Ambisonics*, s Interneta, <http://ambisonic.info/ambisonics.html>, studeni 2005.
- [6] Rumsey, F. et al.: *Sound and Recording*, 6. izdanje, Focal Press, 2009.
- [7] Hollerweger, F.: *An Introduction to Higher Order Ambisonics*, s Interneta, <http://flo.mur.at/writings/HOA-intro.pdf>, listopad 2008.
- [8] Moreau, S.; Daniel, J.; Bertet, S.: *3D Sound Field Recording with Higher Order Ambisonics – Objective Measurements and Validation of a 4th Order Spherical Microphone*, AES, Pariz, 2006., s Interneta, http://160.78.24.2/Public/phd-thesis/aes120_hoamicvalidation.pdf
- [9] Malham, D.: *Higher order Ambisonic systems*, s Interneta, http://www.york.ac.uk/inst/mustech/3d_audio/higher_order_ambisonics.pdf, prosinac 2003.
- [10] Morrell, M.J.; Reiss, J.D.: *A Comparative Approach to Sound Localisation within a 3D Sound Field*, AES, AES, München, 2009, s Interneta, <http://www.elec.qmul.ac.uk/people/josh/documents/MorrellReiss-AES126-Comparative3DAudio.pdf>
- [11] Farina, A.: *A-format to B-format conversion*, s Interneta, <http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/B-format/A2B-conversion/A2B.htm>, listopad 2006.
- [12] Nettingsmeier, J.: *Ardour and Ambisonics*, s Interneta, http://cec.sonus.ca/econtact/11_3/nettingsmeier_ambisonics.html, rujan 2009.

- [13] Adriaensen, F.: *AmbDec User Manual*, s Interneta, <http://kokkinizita.linuxaudio.org/linuxaudio/downloads/ambdec-manual.pdf>, travanj 2012.
- [14] Nettingsmeier, J.: *A room-corrected Ambisonic listening rig made with free software*, ADT International, Leipzig, 2008., s Interneta, http://stackingdwarves.net/public_stuff/linux_audio/tmt08/Ambisonic_Listening_Rig_with_Free_Software.pdf

Slika 1.1: http://en.wikipedia.org/wiki/5.1_surround_sound

Slika 1.2: http://en.wikipedia.org/wiki/Quadraphonic_sound

Slika 1.3: <http://www.ambiophonics.org/images/NewFig4.Gif>

Slika 2.1: <http://margiesoundscape.files.wordpress.com/2010/11/soundfield.gif>

Slika 2.2: <http://www.motionscript.com/mastering-expressions/img/spherical-coords.gif>

Slika 2.3, 2.4, 2.5: <http://flo.mur.at/writings/HOA-intro.pdf>

Slika 2.6: <http://wcms.inf.ed.ac.uk/speechlabs/images/MG-6495.png/>

Slika 2.7: http://uod-true-multi-channel-mixing.wikispaces.com/file/view/Reaper_AmbisonicBuss_3.gif/30524800/Reaper_AmbisonicBuss_3.gif

Slika 2.8: http://www.globalspec.com/RefArticleImages/5749AF8421488B671A93C817E501F719_03_01.gif

Slike 2.9, 2.10: http://en.wikipedia.org/wiki/Ambisonic_UHJ_format

Slika 2.11: http://www.radio.uqam.ca/ambisonic/images/ambisonic_signal_path.png

Slika 3.1: http://www.wrango.se/wp-content/uploads/2011/03/74_tosofspkrsetupbild.png

Slike 3.2, 3.3, 3.4: djelo autora

REPRODUKCIJA PROSTORNOG ZVUKA

Napretkom audio industrije dolazi do sve većeg korištenja sustava za reprodukciju prostornog zvuka. Od sustava za takvu reprodukciju, u ovom radu obrađeni su 5.1 *surround* sustav (Dolby i DTS), kvadrafonija, Ambiophonics i Ambisonics.

Analizirane su osnove rada takvih sustava, prednosti, nedostatci, te glavne razlike. Stavljen je naglasak na Ambisonic sustav, koji je konceptualno zahtjevan za razumijevanje i kompleksan za implementaciju, no u pravilnoj primjeni nudi bolju lokalizaciju i ambijent nego većina dosadašnjih *surround* sustava. Dalje, implementiran je jedan takav sustav trećeg reda na Linux operacijskom sustavu, koji je nakon otklanjanja početnih komplikacija vezanih uz optimiziranje polučio iznimne rezultate u obliku reprodukcije prostornog zvuka.

Ključne riječi na hrvatskom jeziku:

reprodukcija prostornog zvuka; višekanalni sustavi; Ambisonics; B-format višeg reda; otvoreni kod.

Ključne riječi na engleskom jeziku (*keywords*):

surround sound reproduction; multi-channel systems; Ambisonics; Higher Order B-format; open source.