

Prostornost u produkciji zvuka: od monofonije do uranjajućih sustava

Pekas, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Academy of Music / Sveučilište u Zagrebu, Muzička akademija**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:116:035807>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-14**



Repository / Repozitorij:

[Academy of Music University of Zagreb Digital Repository - DRMA](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU MUZIČKA AKADEMIJA

II. ODSJEK

LUKA PEKAS

**PROSTORNOST U PRODUKCIJI ZVUKA:
OD MONOFONIJE DO URANJAJUĆIH SUSTAVA**

DIPLOMSKI RAD



ZAGREB, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU MUZIČKA AKADEMIJA

II. ODSJEK

**PROSTORNOST U PRODUKCIJI ZVUKA:
OD MONOFONIJE DO URANJAJUĆIH SUSTAVA**

DIPLOMSKI RAD

Mentorica: doc. dr. sc. Sanja Kiš Žuvela

Komentor: prof. dr. sc. Kristian Jambrošić

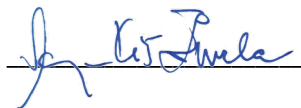
Student: Luka Pekas

Ak. god. 2022./2023.

ZAGREB, 2023.

DIPLOMSKI RAD ODOBRILA MENTORICA

doc. dr. sc. Sanja Kiš Žuvela



Potpis

U Zagrebu, 19. 9. 2023

Diplomski rad obranjen 29. 9. 2023. ocjenom izvrstan (5)

POVJERENSTVO:

1. prof. dr. sc. Dalibor Davidović, predsjednik
2. izv. prof. dr. sc. Marko Horvat, član
3. prof. dr. sc. Kristian Jambrošić, član, komentor
4. doc. dr. sc. Sanja Kiš Žuvela, članica, mentorica
5. prof. art. Vjekoslav Nježić, član
6. prof. art. Krešimir Seletković, član

OPASKA:

PAPIRNATA KOPIJA RADA DOSTAVLJENA JE ZA POHRANU KNJIŽNICI MUZIČKE
AKADEMIJE

Zahvala

Moram se zahvaliti prvo svojim roditeljima koji su me strpljivo bodrili kroz cijelo školovanje. Veliko hvala i bratu Josipu koji me je također bodrio i nasmijavao sve ove godine. Zahvalio bi se i mojoj djevojci Maji koja mi je bila najveća potpora tijekom školovanja, i koja je učinila ove godine najsretnijima do sada.

Studentski dani ne bi bili smisleni bez druženja i šale, pa se zato moram zahvaliti i svim kolegama i prijateljima koji su ispunili moja sjećanja brojnim anegdotama.

Veliko hvala i svim profesorima koji su mi prenijeli razna znanja, a posebno želim zahvaliti profesorima iz modula Glazbene produkcije, koji su na nas studente prenijeli ne samo tehničko znanje, već i strast prema glazbenoj produkciji.

Naposljetku, najveće hvala komentoru prof. Kristianu Jambrošiću i mentorici prof. Sanji Kiš Žuveli. Prof. Jambrošić me je proteklu godinu usmjeravao i izvlačio iz mnogobrojnih slijepih ulica. Isto tako mi je mnogo puta uštedio vrijeme zbog sposobnosti da jednostavno raščlani i objasni napredne koncepte. Ovaj rad svakako ne bi bio isti da nije bilo prof. Kiš Žuvele koja je izvukla najbolje iz mene i konstantno ispravljala moje tekstove i nadopunjavala bibliografiju.

Sadržaj

Zahvala	i
Sažetak	1
Abstract.....	2
Uvod	3
Monofonija.....	7
Manjak prostornosti u monofonim snimkama	8
Monofonija danas.....	10
Monofilija	11
Stereofonija	12
Stereosnimanje	13
Podudarni parovi.....	14
Razmaknuti parovi.....	21
Gotovo podudarni parovi	24
Zaključak o tehnikama stereosnimanja	28
Stereofona reprodukcija	29
Binauralno i pseudobinauralno snimanje i reprodukcija.....	32
Binauralno snimanje.....	32
Binauralni mikrofoni.....	35
Binauralna reprodukcija	37
Binauralno u umjetnosti	38
Pseudobinauralne tehnike snimanja.....	40
Madsenov par i Jecklinov disk	40
SASS i SAAM	42
Kvadrofonija.....	45
Kvadrofonija u kontekstu umjetničke glazbe	47
Kvadrofonija u kontekstu popularne glazbe	49
Kvadrofonija i filmska industrija	50
Okružujući zvuk.....	52
Tehnike snimanja okružujućeg zvuka	54
Podudarne tehnike snimanja okružujućeg zvuka	54
Gotovo podudarne tehnike snimanja okružujućeg zvuka	56

Razmaknute tehnike snimanja okružujućeg zvuka	57
Reprodukcijski sustavi okružujućeg zvuka	58
Standardizacija reproduksijskih sustava	58
Zaključak o sustavima okružujućeg zvuka	61
<i>Ambisonics</i> i uranjajuća tehnologija	62
<i>Ambisonics</i>	62
<i>Ambisonics</i> prvog reda	64
<i>Ambisonics</i> viših redova	67
Uranjajuća reprodukcija.....	69
Objektno zasnovan zvuk.....	71
Uranjajući sustavi	72
<i>Ambisonics</i> i uranjajuća tehnologija u umjetnosti	74
Zaključak	76
Bibliografija	78
Prilozi.....	86
Popis kratica	86
Popis slika	87

Sažetak

Tema su ovoga diplomskog rada različite vrste, tehnike i načini snimanja i reprodukcije zvuka sa naglaskom na prostornost i uranjajuće iskustvo slušatelja. Pojavom fonografa zvuk se snima i reproducira jednokanalno, što je dostatno za valjan doživljaj zvuka u domeni frekvencijskog i dinamičkog raspona, međutim inherentna mana monofonije je manjak prostornosti zbog nedostatka informacija o položaju izvora zvuka. Nadalje, pojavom stereofonije i dvokanalne produkcije zvuka javljaju se razlike između dvaju kanala, što omogućuje pokretanje lokalizacijskih mehanizama i posljedično omogućuje lokalizaciju izvora zvuka. Različitim mikrofonskim tehnikama moguće je snimiti različite prostorne kvalitete, što audioinženjeru omogućava veliku fleksibilnost u oblikovanju završnog proizvoda. Stereofonija predstavlja značajan pomak u smislu prostornosti zvuka i dan danas je temeljni način produkcije zvuka. U 1970-im godinama, pojavom kvadrofonijske pokušava se riješiti prostorni problem stereofonije tako da se slušatelj okruži četirima zvučnicima postavljenim u kutove prostorije. Kvadrofonijska predstavlja začetak ideje okružujućeg zvuka, u kojoj slušatelj lokalizira zvuk iz svih smjerova, a ne samo ispred sebe. Zbog tehničkih manjkavosti ideja kvadrofonijske propada, a desetljeće kasnije pojavljuju se sustavi okružujućeg zvuka. Ti se sustavi uglavnom koriste unutar filmske industrije i često se sastavljaju za potrebe kućnog kina. Najčešće su varijante takvih sustava šestokanalne (5.1) ili osmokanalne (7.1). Tehnike snimanja okružujućeg zvuka uglavnom su derivati stereotehnika s povećanim brojem kanala. Naposljetku, način snimanja *Ambisonics*, koji se u teorijskom obliku pojavio 1970-ih, predstavlja najveći potencijal u realističnom snimanju kompletne sfere određenoga zvučnog polja. Usto je *Ambisonics* je unikatan i drukčiji od ostalih načina snimanja jer nije baziran na kanalnoj produkciji zvuka. Međutim, zbog tehničke kompleksnosti, *Ambisonics* se razvija sporije od prethodno navedenih načina snimanja. Takav način snimanja prate uranjajući (engl. *immersive*) reprodukcijski sustavi koji omogućuju reprodukciju kompletne zvučne sfere. U radu se prikazuje povijesni razvoj svih navedenih tehnika s njihovim prednostima i nedostacima. Cilj je rada je prikazati kako se razvijala prostorna rezolucija snimaka o na koje načine audioinženjeri mogu manipulirati mikrofonomima kako bi dobili željeni rezultat u kontekstu prostornosti snimke.

Ključne riječi: snimanje zvuka, reprodukcija zvuka, prostornost zvuka, *Ambisonics*, uranjajući sustavi

Abstract

The subject of this master's thesis are various types, techniques, and methods of sound recording and reproduction, with a focus on spatiality and the immersive experience of the listener. With the advent of the phonograph, the sound was recorded and reproduced monophonically, which was sufficient for a valid sound experience in terms of frequency and dynamic range. However, the inherent limitation of monophony is the lack of spatiality due to the absence of information about the position of the sound source. Furthermore, with the introduction of stereophony and two-channel sound production, differences between the two channels emerged, enabling the activation of localization mechanisms, and consequently allowing sound source localization. Different microphone techniques can capture various spatial qualities, providing audio engineers with great flexibility in shaping the final product. Stereophony represents a significant advancement in terms of sound spatiality and remains a fundamental method of sound production today. In the 1970s, the concept of quadraphonics attempted to address the spatial limitations of stereophony by surrounding the listener with four speakers placed in the corners of the room. Quadraphonics marked the inception of the idea of surround sound, where the listener can localize sound from all directions, not just in front. Due to technical limitations, the quadraphonics idea failed, but a decade later, surround sound systems emerged. These systems are mainly used in the film industry and are often created for home theater purposes, with common variants being six-channel (5.1) or eight-channel (7.1) systems. Surround sound recording techniques are generally derivatives of stereophonic techniques with an increased number of channels. Finally, the Ambisonics recording method, which first appeared in theoretical form in the 1970s, represents the greatest potential in realistic recording of the complete sphere of a specific sound field. Ambisonics is unique and different from other recording methods because it does not imply channel-based sound production. However, due to its technical complexity, it has been developing more slowly than the previously mentioned recording methods. This recording method is accompanied by immersive playback systems that enable the reproduction of the complete sound sphere. The thesis explores the historical development of all the mentioned techniques, along with their advantages and disadvantages. The thesis aims to demonstrate how spatial resolution in recordings has evolved and, likewise, the methods audio engineers can employ to manipulate microphones to achieve the desired outcomes within the context of spatiality in recordings.

Keywords: sound recording, sound reproduction, spatial audio, ambisonics, immersive systems

Uvod

Pitanje “uranjanja” slušatelja u kontekstu zvuka jednako je objektivno (ili fizičko) koliko i subjektivno (ili perceptivno). U literaturi na engleskom jeziku najčešće se koristi termin *immersion*, a u ovome će se radu koristiti hrvatski termin uranjanje. Iako bi bilo moguće razgraničiti prostornost kao fizičko okruživanje zvukom, a uranjanje kao subjektivni osjećaj uranjanja u zvuk, u radu će se koristiti isključivo termin uranjanje kako bi se istakla jednaka važnost kako objektivnoga, tako i subjektivnoga.

Njemački akustičar Jens Blauert napominje kako ne postoji neprostorno slušanje.¹ Netom nakon pojave snimanja jednokanalnog zvuka krajem 19. stoljeća razvija se svijest o prostornosti snimke, o čemu svjedoče razni eksperimenti s početka 20. stoljeća,² kao i činjenica da se kroz povijest produkcije zvuka aktivno radi na poboljšanju prostornosti snimke u svrhu kvalitetnijega slušnog iskustva. Težnja ka poboljšavanju uranjajućeg iskustva, međutim, ne započinje tek krajem 19. stoljeća. U spilji Chavín de Huántar u Peruu otkriveno je dvadeset trublji od školjaka, a važno je napomenuti kako ta spilja ima posebno izraženu reverberaciju, što je dokaz da su rane civilizacije također imale težnju okruživanja zvukom prilikom muziciranja.³ Osim toga, kroz antičku povijest grade se različite građevine koje su imale funkciju pojačavanja zvuka, ali i okruživanja slušatelja zvukom. Jedan od tih primjera bile su natkrivene dvorane za scenske priredbe, *odeoni*. Te su dvorane imale veliko vrijeme odjeka, što je smanjivalo jasnoću direktnog zvuka, ali je i povećavalo okruživanje zvukom.⁴ Također se može zaključiti kako i velike katedrale imaju vrlo slične karakteristike kao i grčki *odeoni*.⁵

Okruženost zvukom ne mora proizlaziti samo iz reverberacije, već joj pridonose i sami izvori zvuka u okolini, uslijed čijeg položaja zvukovi dolaze iz različitih smjerova. Upravo je lokalizacija zvuka⁶ kao mehanizam preživljavanja produkt evolucije u sisavaca,⁷ što je važno i prilikom slušanja audiosnimke, jer slušatelji uvijek svjesno ili nesvjesno

¹ Boren, 2018, s. 40.

² Vidi 2. poglavlje – stereofonija.

³ Boren, 2018, s. 41.

⁴ Boren, 2018, s. 42.

⁵ Boren, 2018, s. 42.

⁶ Lokalizacija - proces u kojemu je zvučni događaj povezan s atributima događaja u prostoru kroz percepciju smjera, udaljenosti i prostornog opsega, Pulkki, 2015, s. 219-220.

⁷ Pulkki, 2015, s. 219.

procjenjuju smjer, udaljenost ili prostorni opseg izvora zvuka. Manipulacija smjerom izvora zvuka prilikom snimanja zapravo znači snimanje izobličenja izvora zvuka između različitih kanala, što ljudski mozak interpretira kako bi dobiva informacije o smjeru iz kojega zvuk dolazi.⁸

Lokalizacijski mehanizmi ključni su za lokaliziranje zvuka, a samim time i za percepciju prostornosti snimke. Mozak interpretira i različita izobličenja zvučnih valova koji nastaju uslijed sudaranja sa glavom, ramenima i torzom slušatelja.⁹ Pritom su odlučujuće razlike između dva uha. Prema načinu izobličenja zvučnoga vala razlikuju se dva glavna lokalizacijska mehanizma: razlike u intenzitetu i vremenske razlike dolaska zvučnih valova.¹⁰ Interauralne razlike u intenzitetu nastaju tako da glava djeluje kao zvučna barijera zbog čega je isti zvučni val glasniji u jednom uhu, dok je tiši u drugome.¹¹ Zbog toga mozak može precizno lokalizirati zvuk u spektru iznad 1400 Hz,¹² dok lokalizacija ispod navedene granice nije moguća jer glava u tom spektru nije dostatna zvučna barijera. Međutim, pomoću interauralnih vremenskih razlika moguće je lokalizirati i spektar ispod 1400 Hz.¹³ Taj lokalizacijski mehanizam nastaje interpretacijom razlika u dolasku zvučnog vala između dva uha. Ako je izvor zvuka bliže jednom uhu, zvučni će val stići prije u bliže uho nego u udaljenije.

Ovi su lokalizacijski znakovi temeljni u produkciji zvuka, iako nisu jedini. Spektralni lokalizacijski mehanizam aktivira se interpretacijom refleksija i difrakcija koje nastaju u ušnoj školjci.¹⁴ Na taj način mozak dobiva informacije o vertikalnom položaju izvora zvuka, zbog čega taj lokalizacijski mehanizam nije bio relevantan za snimanje zvuka sve do pojave ambisoničnih mikrofona. Nadalje, dinamički lokalizacijski mehanizam posebno je važan u domeni snimanja binauralnog zvuka. Nastaje rotacijom glave slušatelja u svrhu poboljšavanja lokalizacije u slučajevima kada interauralne razlike u vremenu i intenzitetu

⁸ Bosun, 2013, s. 20.

⁹ Bosun, 2013, s. 20.

¹⁰ Glavni mehanizmi u kontekstu snimanja dvokanalne snimke (što danas predstavlja produkcijski standard).

¹¹ Judaš i Kostović, 1997, s. 257; Pulkki, 2015, s. 228.

¹² Navedena granica nije fiksna i ovisna je o veličini i obliku glave pojedinca, Judaš i Kostović, 1997 navode 1400 Hz kao granicu, dok Bartlett, 1990 navodi 1500 Hz kao granicu.

¹³ Judaš i Kostović, s. 257.

¹⁴ Bosun, 2013, s. 14.

zvuka ne odaju dovoljno jasno položaj izvora zvuka.¹⁵ Navedene su informacije važne u kontekstu mikrofonskih tehnika jer različite tehnike naglašavaju različite lokalizacijske mehanizme.

Ovaj rad pruža povijesni pregled i razvoj prostornosti kroz različite sustave snimanja i reprodukcije zvuka. Međutim, razvoj različitih sustava ne podrazumijeva evoluiranje, u smislu da pojava novog sustava produkcije zvuka nužno ne podrazumijeva i prestanak korištenja starijega sustava. Početak središnjega dijela rada posvećen je monofoniji i općenito počecima snimanja i reprodukcije zvuka. U tekstu je prikazano kaka su prvi mikrofoni i zvučnici bili adekvatni isključivo za potrebe snimanja i prenošenja zvuka ljudskoga glasa, i to glasa čija je primarna funkcija komunikacija verbalnoga sadržaja. Jasno je iz istraživanja i eksperimenata Harveya Fletchera da se netom nakon pojave monofonije javlja potreba za dvokanalnim snimanjem i reprodukcijom kako bi se mogla snimiti prostornost i time približiti iskustvo slušanja snimke načinu na koji pojedinac sluša zvukove u stvarnom svijetu.

Iz manjka prostornosti kod monofonije proizlaze prvi izumi koji omogućuju dvokanalno snimanje i reprodukciju zvuka u dvadesetim godinama 20. stoljeća. Međutim, tek nakon izuma Alana Blumleina započinje prava dvokanalna produkcija zvuka. Stereofonija omogućava snimanje razlika između dvaju kanala što omogućava aktiviranje lokalizacijskih mehanizama tijekom slušanja. Ta velika razlika predstavlja bitan odmak u odnosu na monofono slušanje, što potvrđuju i ankete iz perioda ranog razvoja stereofonije u kojima su slušatelji preferirali stereofonu snimku, čak i ako je spektralno degradirana.¹⁶

Međutim, mana je stereofonije da se na taj način ne može postići prava prostornost koja podrazumijeva reprodukciju kompletnog zvučnog polja. Binauralno snimanje i reprodukcija predstavlja potencijalno najrealističniji sustav produkcije zvuka jer oponaša način na koji osoba sluša zvuk oko sebe, međutim, taj potencijal neće biti iskorišten u potpunosti sve dok se tehnološki ne riješi problem prilagođavanja snimke svakom pojedincu ponaosob.

¹⁵ Bosun, 2013, s. 13-14.

¹⁶ Boren, 2018, s. 50.

1970-ih godina razvija se kvadrofoniya, koja postavom zvučnika teoretski omogućava reprodukciju zvuka u 360°. Međutim, ideja kvadrofoniye bila je naprednija od tehničkih sredstava toga vremena, zbog čega ta tehnika ipak nije bila uspješna u jednakoj mjeri kao stereofoniya nekoliko desetljeća prije.

Ideja je kvadrofoniye pak ostala aktualna pa je na tim temeljima nastala i tehnologija okružujućeg zvuka. Inženjeri iz tvrtke Dolby unaprijedili su četverokanalnu reprodukciju, nakon čega su nastale popularnije šestokanalne (5.1) i osmokanalne (7.1) varijante. Takvi se sustavi najčešće koriste u sklopu kućnih kina. Predstavljaju dodatno okruživanje slušatelja zvukom, a samim time i bolju prostornu rezoluciju snimki.

Ambisonics je sustav snimanja koji je nastao još 1970-ih godina, međutim, tek je nedavno doživio procvat zbog tehnoloških postignuća. Ambisonični mikrofoni rekreira kompletno zvučno polje oko točke u prostoru, što predstavlja najbolji način snimanja u smislu prostorne rezolucije snimke. Noviji ambisonični mikrofoni viših redova prilikom snimanja postižu dosad najbolju prostornu rezoluciju. Takvu tehnologiju prate novi uranjajući reprodukcijski sustavi. Dodavanjem visinskih zvučnika moguće je rekreirati i sintetizirati kompletnu sferu zvuka.

Ovaj će rad prvenstveno poslužiti studentima koje zanima audioinženjerstvo jer pruža sažet pregled različitih tehnika snimanja i reprodukcije sa specifičnim karakteristikama, prednostima i manama. Može biti koristan audioinženjerima i služiti kao podsjetnik za određene tehničke specifikacije. Rad može poslužiti i svima koje zanima snimanje zvuka, a žele naučiti što više tehnika snimanja, kao i onima koje zanima kako postaviti određeni reprodukcijski sustav kako bi se osigurali optimalni uvjeti slušanja. Naposljetku, rad će poslužiti i svim muzikolozima koje zanima povijesni razvoj i pregledan popis različitih načina produkcije zvuka te njihova primjena u umjetnosti.

Monofonija

Pojava snimanja značajno je utjecala na ljudsku svijest o zvuku. Izumom fonografa i kasnijih sustava za snimanje i reprodukciju stvara se mogućnost odvajanja zvuka od njegova izvora. Rezultirajuća *shizofonija*¹⁷, kako ju je definirao R. Murray Schafer, imala je dalekosežne posljedice za glazbu, ali i druge umjetnosti u kojima zvuk ima određenu funkciju. Ideja bilježenja zvuka seže duboko u povijest ljudske civilizacije. U zapisima babilonske mitologije pronalazimo podatke o prostorijama u ziguratima u kojima zvukovi ostaju vječno zarobljeni. Primjer realizacije takvih misli dio je palače Ali Quapu u Isfahanu. U toj se palači nalazi soba jedinstvene geometrije s akustički visoko reflektivnim materijalima.¹⁸ Kao rezultat javlja se neuobičajeno velika količina odjeka, što stvara dojam hvatanja zvuka. Nakon više tisućljeća, šezdesetih godina 19. stoljeća, pojavom fonautografa, snimanje zvuka postaje realnost. Međutim, budući da je fonautograf bio uređaj isključivo za snimanje, a ne i reprodukciju zvuka,¹⁹ potonja je ideja ostvarena tek izumom fonografa 1877. godine.²⁰ Tako od kraja 19. stoljeća postoji mogućnost da pojedinac doživi zvukove koje prethodno nije mogao iskusiti, ili da one zvukove koje je već doživio iskusi ponovno. Fenomen snimljenog zvuka ujedno podrazumijeva i kraj jedinstvenosti zvukovnih pojava, zbog čega više ne vrijedi pravilo da se izvorni zvuk u prirodi praktički nikada ne može pojaviti dva puta u identičnom obliku.²¹

Prvi audiozapisi snimljeni su i pohranjeni u monofonom obliku. Monofonija podrazumijeva snimanje i reprodukciju zvuka preko jednog kanala.²² U skladu s time, snimanje jednim mikrofonom preko jednoga kanala podrazumijeva monofoniju, međutim, zvuk se može snimiti i višekanalno, što ne mora značiti da reprodukcija zvuka u tom slučaju ne može biti monofona. Zbroje li se svi snimljeni kanali u jedan kanal također se može govoriti o monofonoj reprodukciji. Nadalje, monofona reprodukcija može biti i ona s više zvučnika. Nije važno preko koliko se zvučnika audiozapis reproducira: ako svaki zvučnik reproducira istu jednokanalnu snimku, i reprodukcija je

¹⁷ Shizofonija je podjela na izvorni zvuk i njegovu reprodukciju; Schafer, 1993, s. 90.

¹⁸ Schafer, 1993, s. 89.

¹⁹ Hoffmann, Ferstler, 2005, s. 1094.

²⁰ Hoffmann, Ferstler, 2005, s. 349.

²¹ Schafer, 1993, s. 91.

²² Toole, 2008, s. 272; Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 297.

monofona. Nadalje, često se poistovjećuju pojmovi *monofonija* i *monauralno*, koji se, međutim, moraju jasno razgraničiti. Monofonija, kako je već rečeno, pretpostavlja snimanje i reprodukciju preko jednog kanala zvuka, dok termin monauralno pretpostavlja slušanje jednim uhom i najčešće je povezan s patologijom slušnog sustava.

Pojava monofonog snimanja i reprodukcije revolucionarna je i znatno je utjecala na razvoj snimljenog zvuka. Međutim, ta tehnologija nije bila bez nedostataka. Prvi mikrofoni, koji je patentirao Alexander Graham Bell 1876. godine, kao ni poboljšana verzija toga mikrofona Clementa Adera, nisu vjerno snimali izvorni zvuk. Frekvencijski je raspon rezultirajućih snimaka bio vrlo uzak, dinamički raspon vrlo malen, a razina harmonijskih izobličenja jako velika.²³ Iako su navedene mane značile da je prvotna tehnologija mikrofona bila nedostatna za kvalitetno snimanje glazbe, to nije vrijedilo i za govor. Frekvencijski spektar koji su hvatali prvi mikrofoni bio je dovoljan da se osigura razumljivost govorenog teksta, a harmonijska izobličenja, koja su prilikom snimanja glazbe uglavnom nepoželjna, zapravo su pridonosila razumljivosti teksta jer su pojačavala spektar visokih frekvencija.²⁴ Da je prvotna funkcija snimljenog zvuka bila prijenos govora i ljudskog glasa svjedoči i činjenica kako je korijen riječi *fon* dio naziva većine prvih izuma snimljenog zvuka. Daljnjim razvojem tehnologije riješeni su svi navedeni problemi pa je danas moguće monofono snimanje visoke rezolucije bilo kojeg izvora zvuka.

Manjak prostornosti u monofonim snimkama

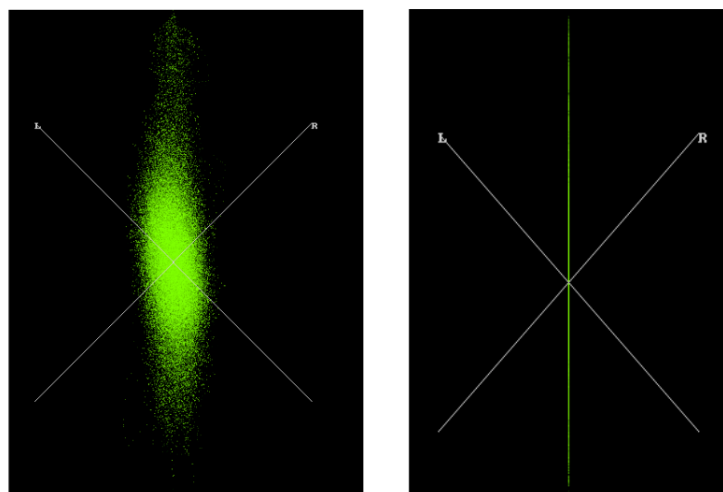
Prilikom snimanja glazbe monofona snimka može kvalitetno i vjerno uhvatiti gotovo sve važne glazbene komponente kao što su visina tona, ritam, harmonija i reverberacija prostora u kojemu se snimalo. Međutim, postoje problemi inherentni monofoniji koji se ne mogu riješiti, što je upravo i razlog zbog kojeg su audioinženjeri tražili nove načine snimanja i reprodukcije zvuka.

Prilikom reprodukcije monofone snimke nastaje problem binauralne dekolracije. Rane refleksije prostora u kojemu se izvor zvuka snima izobličuju spektar prilikom miješanja

²³ Rayburn, Eargle, 2012, s. 1-3.

²⁴ Rayburn, Eargle, 2012, s. 3.

s izvornim zvukom. Ljudski je mozak sposoban kompenzirati učinak ranih refleksija prostorije u kojoj se sluša, ali ne i učinak ranih refleksija prostorija u kojoj se snimao zvuk.²⁵ Zbog toga svaka monofona snimka sadrži određeni stupanj izobličenja izvornog zvuka, što je ujedno i razlog zašto snimljeni audiozapis ne može biti identičan izvornome zvuku. Nadalje, iako monofona snimka sadržava elemente reverberacije i pritom slušatelju otkriva veličinu prostorije u kojoj se snimalo, ona ipak ne sadržava prostornu komponentu pojedinih izvora zvuka. Usporedi li se monofona i stereofona snimka istog koncerta koji izvodi određeni simfonijski orkestar, može se primijetiti kako je kvaliteta i količina reverberacije jednaka u obje snimke. Međutim, prilikom slušanja monofone snimke stvara se dojam kao da se svi instrumenti nalaze točno u sredini, dok se slušajući stereofonu snimku jasno lokaliziraju položaji određenih instrumenata na pozornici.



Slika 1. Goniometarski prikaz razlika u prostornosti između stereofone (prikazano s lijeva) i monofone (prikazano s desna) snimke.

Upravo je manjak prostorne komponente najveća mana monofonog snimanja i reprodukcije zvuka. Još u tridesetim godinama 20. stoljeća Harvey Fletcher zaključio je da iskustvo prostornosti zvuka ima veze s interakcijom između dva uha,²⁶ tj. da su potrebna dva kanala za obuhvaćanje prostornosti. Dakako, kada se sluša monofona snimka, slušatelj sa zdravim slušnim aparatom i dalje sluša binauralno, ali ne doživljava

²⁵ Pulkki, 2015, s. 285.

²⁶ Boren, 2018, s. 50.

prostornost snimke. Upravo je Fletcher tijekom 1930-ih godina otkrio da prosječni slušatelj preferira dvokanalnu, a ne jednokanalnu snimku, čak i kad je dvokanalna degradirana.²⁷ To je dokaz kako je prostorna komponenta zvuka iznimno važna za slušno iskustvo pojedinca.

Monofonija danas

Iako se danas smatra da stereofonija, dijelom zbog prostornosti snimke, dominira nad monofonijom, to ipak nije u potpunosti istina. Mnoštvo elektroničkih uređaja koji podržavaju reprodukciju zvuka i dalje zbrajaju standardiziranu dvokanalnu snimku u jednokanalnu zbog toga što uređaji najčešće nemaju dovoljno prostora za integraciju dvaju zvučnika.²⁸ Čak i ako postoji prostor za dva zvučnika, oni će najvjerojatnije biti previše blizu jedan drugome, što znači da će dvokanalna reprodukcija u tom kontekstu biti praktički identična jednokanalnoj. Zbog toga je, iz tehničkih razloga u smislu današnjih reproduksijskih standarda, monofonija i dalje itekako aktualna. Audioinženjeri stoga moraju biti sigurni da se standardizirani dvokanalni audiozapis može bez većih gubitaka u audiosignalu reproducirati i na monofonom sustavu. Prilikom zbrajanja dvokanalne snimke u jednokanalnu glavni problem predstavljaju razlike u fazi između dvaju kanala, što posljedično degradira spektralnu ravnotežu i pritom značajno mijenja percepciju kvalitete audiozapisa.²⁹ Nadalje, upravo je zbog navedenih razlika u fazi dvokanalna reprodukcija superiorna jednokanalnoj. Dakle, audioinženjer najčešće mora napraviti određene kompromise kako bi zadovoljio standarde i dvokanalne i jednokanalne reprodukcije.

²⁷ Boren, 2018, s. 50.

²⁸ Watkinson, 1998, s. 211.

²⁹ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 297.

Monofilija

Iako stereofonija značajno povisuje standarde i poboljšava slušno iskustvo, ponajviše zbog dodavanja prostorne dimenzije zvuka, zanimljiv je cijeli pokret monofilije koji se javlja od četrdesetih do sredine šezdesetih godina 20. stoljeća.³⁰ Iako navedena Fletcherova istraživanja dokazuju koliko je prostornost (pa samim time i stereofonija) važna za slušno iskustvo, John W. Campbell u utjecajnom članku *Listening is Believing* preispituje tu tvrdnju. Njegova kritika ponajviše je usmjerena prema tada novome Hi-Fi (eng. *High-Fidelity*) pokretu. Campbell je smatrao da su reproduksijski sustavi daleko manje važni od povjerenja pojedinca u vlastiti sustav. Dakle, osoba doživljava bolje slušno iskustvo slušajući sustav A ako vjeruje da je isti dostatan, a zapravo je tehnički lošiji od sustava B. Poklonici monofilije ponosili su se idejom oslobađanja od tehnoloških okova i mogućnošću da mašta nadomjesti tehničke nedostatke.³¹

Iako podrazumijeva stanovite manjkavosti poput binauralne koloracije i izostanka prostornosti snimke, monofonija je i dalje i aktualna. Monofona reprodukcija ne omogućuje okruženost zvukom, niti dostatno uranjajuće iskustvo, ali ipak predstavlja početak reprodukcije zvuka.

³⁰ Hoffman, Ferstler, 2005, s. 409.

³¹ Dineen, 2014, s. 16.

Stereofonija

Stereofonija omogućuje hvatanje prostornosti zvuka snimanjem i reprodukcijom na dva kanala, zbog čega predstavlja početak razvoja tehnologije prostornog zvuka. Potreba da reprodukcija zvuka bude prostorno što sličnija izvornome zvuku postoji od samih početaka snimanja. Tomu svjedoči patent Edwarda Ameta iz 1911. godine. Ametov uređaj bio je namijenjen projekciji filmova, a omogućuje namještanje panorame monofonog audiozapisa, pritom sinkronizirajući filmski projektor sa zvučnicima u kinodvorani.³² Potreba da slušatelj iskusi prostornost zvuka prilikom reprodukcije na zvučnicima razvija se kroz dvadesete i tridesete godine 20. stoljeća. Prvo je radijski inženjer Franklin Doolittle 1921. godine prijavio patent za dvokanalno snimanje, a potom, 1924. godine, i za prijenos dvokanalne snimke preko radija. Međutim, tek je patent Alana Blumleina, koji se smatra ocem stereofonije, pružio cjelovito rješenje snimanja i reprodukcije dvokanalnog audiozapisa.³³ Iako nije prvi koji je snimio niti vršio prijenos dvokanalne snimke, Blumleinov patent iz 1931. godine bio je najutjecajniji u procesu snimanja i reprodukcije dvokanalnog audiozapisa. Mnoga načela koja Blumlein postavlja u patentu i dalje su standardi audioprodukcije.

Iako se danas stereofonija poistovjećuje s dvokanalnim snimanjem, u prvim je desetljećima podrazumijevala prostorni zvuk i uranjajuće iskustvo. Sama riječ *stereo* podrazumijeva trodimenzionalnost,³⁴ što govori o zvukovnoj revoluciji koju donose dva kanala i prostorni element zvuka u 1930-im godinama. William B. Snow 1953. godine u članku *Basic Principles of Stereophonic Sound* svjedoči o “nevjerojatnom porastu realističnosti zvuka.”³⁵ Zanimljiv je također i razvoj misli o stereofoniji, koja je u počecima više bila koncept nego fiksni, jasno određeni sustav snimanja i reprodukcije. Stereofonija je u počecima označavala prostornost. Harvey Fletcher 1940-ih godina navodi kako stereofonija nije sustav s fiksnim brojem kanala, nego da se mora iskoristiti onoliko kanala koliko je potrebno kako bi se stvorila iluzija beskonačnog broja zvučnika.³⁶ S druge strane, desetljeće kasnije, Snow također iznosi tezu da stereofonija podrazumijeva

³² Boren, 2018, s. 51.

³³ Boren, 2018, s. 51.

³⁴ Toole, 2008, s. 272.

³⁵ Snow, 1953, s. 567.

³⁶ Hull, 2008, s. 1600.

snimanje i reprodukciju na dva ili više kanala,³⁷ premda je iz njegove daljnje analize jasno kako „više kanala“ nije pravilo, već iznimka, iz čega se nedvojbeno daje zaključiti kako 1950-ih stereofonija prestaje biti koncept prostornosti i postaje standardizirani dvokanalni sustav snimanja i reprodukcije zvuka.

Stereosnimanje

Stereosnimanje nudi više mogućnosti od monosnimanja pa zbog toga i postoji daleko više tehnika dvokanalnoga negoli jednostavnijega jednokanalnog snimanja. Mnoge varijable utječu na završni rezultat stereosnimke u smislu lokalizacije izvora i prostornosti. Prvenstveno je važan izvor zvuka koji se snima,³⁸ kao i prostorija u kojoj se vrši snimanje.³⁹ Oblik prostorije i materijali od kojih su načinjene njezine površine značajno utječu na reverberaciju, što također značajno uvjetuje lokalizaciju izvora zvuka koji se snimaju. I izbor mikrofona isto tako značajno utječe na spektralne i dinamičke karakteristike snimke, kao i lokalizaciju izvora. Izbor vrste mikrofona najčešće ovisi izvoru zvuka, dok izbor usmjerne karakteristike kapsule najčešće ovisi o željenom odnosu direktnog zvuka izvora i reverberacije prostorije u kojoj se snima.⁴⁰ Dakako, značajan je i ostatak opreme za snimanje koji se nalazi na putu između izvora zvuka i medija za pohranjivanje zapisa, međutim, uzme li se u obzir isključivo lokalizacija i prostornost, ta ostala oprema nije toliko važna koliko prije spomenute varijable.

Možda je najvažnija i najzanimljivija varijabla ona koja ovisi o međusobnoj interakciji dviju mikrofonskih kapsula, uzimajući u obzir udaljenost kapsula i njihov kut u odnosu na središnju os. Upravo interakcija kapsula stvara razlike između kanala zbog kojih se pokreću lokalizacijski mehanizmi s pomoću kojih mozak dobiva informacije o položaju zvučnog izvora u prostoru. Različitim konfiguracijama mikrofonskih parova potiču se različite razine interauralnih vremenskih razlika, kao i interauralnih razlika u intenzitetu. Stereotehnike se mogu razvrstati u tri kategorije u odnosu na međusobnu interakciju dviju kapsula: podudarni parovi, gotovo podudarni parovi i razmaknuti parovi.

³⁷ Snow, 1953, s. 568.

³⁸ Sigismondi, Vear, Waller, 2014, s. 11-12.

³⁹ Sigismondi, Vear, Waller, 2014, s. 14-15.

⁴⁰ Sigismondi, Vear, Waller, 2014, s. 22-32.

Podudarni parovi

Podudarni mikrofonski parovi podrazumijevaju istovremeno primanje zvučnog vala za obje mikrofonске kapsule.⁴¹ Idealna postava kapsula stoga bi značila da one budu postavljene u istoj točki u prostoru, što međutim nije moguće. Stoga se u praksi prilikom snimanja mikrofoni najčešće postavljaju jedan iznad drugoga nastojeći da kapsule budu vertikalno poravnate.⁴² Lokalizacija izvora zvuka koji su snimljeni nekom tehnikom podudarnih parova izvrsna je i temelji se na interauralnim razlikama u intenzitetu. Tako mikrofoni čija je kapsula usmjerena prema izvoru zvuka prima jači zvučni signal od kapsule koja nije usmjerena prema izvoru zbog čega se stvara razlika u intenzitetu između dvije kapsule.⁴³ Ta razlika pokreće lokalizacijske mehanizme u mozgu nakon čega se dobivaju informacije o položaju izvora zvuka u prostoru. U usporedbi s vremenskim razlikama, razlike u intenzitetu stvaraju jasniju i detaljniju predodžbu položaja izvora zvuka, zbog čega se različite tehnike podudarnih parova često koriste prilikom snimanja kada je potrebna oštra (eng. *point-like*) lokalizacija zvučnih izvora.

Budući da lokalizacija izvora zvuka uvelike određuje prostornu dimenziju snimke, ne čudi da je Alan Blumlein u prvim patentima stereofonije predlagao upravo snimanje podudarnim mikrofonским parovima.⁴⁴ Nadalje, podudarni parovi izuzetno su popularni zbog toga što su monokompatibilni. To znači da, kada se dvokanalna snimka zbroji u jednokanalnu, nestaje prostornost, ali spektralni balans ostaje praktički nepromijenjen.⁴⁵ Tomu je razlog konfiguracija kapsula koja onemogućuje postojanje vremenskih razlika, zbog čega se spektralni balans prilikom zbrajanja dvokanalnog zapisa u jednokanalni ne mijenja. S druge strane, upravo nepostojanje vremenskih razlika znači i da se lokalizacijski mehanizam interauralnih vremenskih razlika ne pokreće,⁴⁶ zbog čega se snimkama nastalim korištenjem neke od tehnika podudarnih parova često pripisuje nedostatak prostornosti zvuka. Interauralne vremenske razlike vrlo se često vežu uz

⁴¹ Zotter, Frank, 2019, s. 1; Ballou, Ciaudelli, Schmitt, 2008, s. 542.

⁴² vidi sliku 3.

⁴³ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 80.

⁴⁴ Rayburn, Eargles, 2012, s. 217.

⁴⁵ Pulkki, 2015, s. 286.

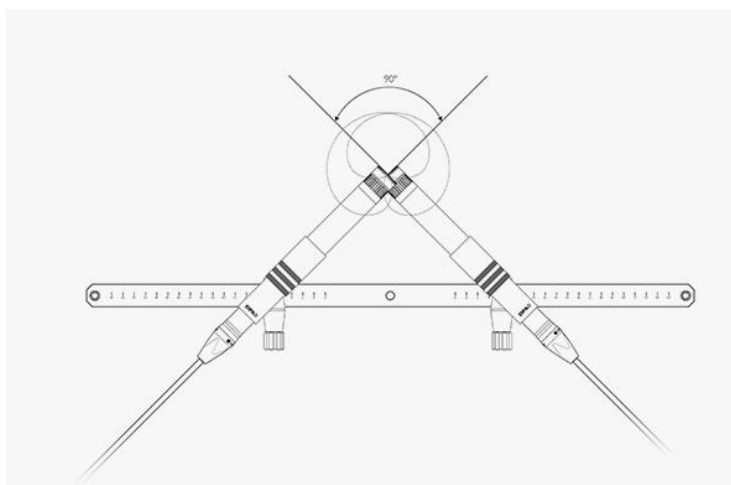
⁴⁶ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 545.

prostorni zvuk i uranjajuće iskustvo, a na taj se način lokalizira niski spektar frekvencija ispod 1500 Hz.⁴⁷

Prostornost snimaka nastalih podudarnim parovima mikrofona na neki je način oksimoron – s jedne strane, lokalizacija je iznimno oštra zbog interauralnih razlika u intenzitetu, a s druge strane, osjećaj prostornosti loš je zbog nedostatka interauralnih vremenskih razlika. Dodatna je slaba točka podudarnih parova kut između mikrofonskih kapsula i izvora zvuka. Najbitniji elementi najčešće se nalaze na središnjoj osi, što znači da je pozicija izvora zvuka najčešće izvan osi kapsula. Odziv mikrofona izvan osi umnogome ovisi o kvaliteti mikrofonske kapsule i može biti vrlo dobar, ali nikada nije jednake kvalitete kao i odziv mikrofona na osi kapsule.⁴⁸ Zbog toga su spektralna izobličenja izvora zvuka neizbježna. Međutim, razina izobličenja ipak ovisi o kvaliteti korištenih mikrofona.

XY

XY je najčešće korištena tehnika podudarnih mikrofonskih parova. Kapsule mikrofona postavljaju se jedna iznad druge, dok njihov međusobni kut varira. Audioinženjeri se općenito koriste rasponom kutova od 90° do 135°.⁴⁹



Slika 2. Dijagram XY-para.⁵⁰

⁴⁷ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 545.

⁴⁸ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 545.

⁴⁹ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 222.

⁵⁰ Williams, 2019.

Variranjem kuta između kapsula mijenja se percepcija lateralne širine zvučnog prostora i lokalizacije izvora zvuka,⁵¹ ali i spektralni odziv. Odnos percepcije širine snimke i spektralnog odziva recipročan je - što je kut veći, to je snimka šira, ali je i spektralni odziv manje vjeran izvoru zvuka zbog toga što je izvor pozicioniran još više izvan osi kapsule.



Slika 3. Primjer postave XY-para pod kutom od 90°.⁵²

Kut između kapsula najčešće je 90°. U toj konfiguraciji obično se koriste kondenzatorski mikrofoni s kardiodnom usmjernom karakteristikom. Kut od 90° toliko se često koristi zato što ima najbolji balans između širine snimke i vjernoga spektralnog odziva zvučnog izvora. Međutim, vrlo se često XY 90° snimka opisuje kao da je “sužena”. Prilikom reprodukcije takve snimke slušatelj ne čuje cijelu panoramu od zvučnika do zvučnika, već je percipira kao suženu.⁵³

Zbog toga mnogi audioinženjeri biraju veći kut, kao npr. 120°. I dalje se koriste kondenzatorski mikrofoni, međutim, može se koristiti i hiperkardiodna usmjerna karakteristika, ovisno o tome koji je željeni odnos direktnog zvuka iz izvora i reverberacije prostorije u kojoj se snima. Nužna je posljedica korištenja dvaju mikrofona s hiperkardiodnom usmjerenom karakteristikom snimanje više zvuka iza mikrofonskog para, što znači da se mijenja odnos direktnog zvuka i reverberacije prostorije u kojoj se snima.⁵⁴

⁵¹ Rayburn, Eargles, 2012, s. 221.

⁵² Williams, 2019.

⁵³ Rayburn, Eargles, 2012, s. 221.

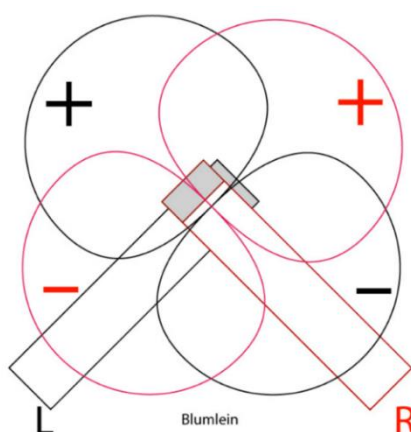
⁵⁴ Rayburn, Eargles, 2012, s. 221.

Osim toga, uobičajen je i kut od 135° , što je ujedno i najširi kut koji se učestalo koristi. S tim kutom percepcija lateralne širine daleko je bolja, međutim, izobličenja spektra su neizbježna zbog izvanosnog odziva. Također se koriste kondenzatorski mikrofoni s kardiodnom usmjernom karakteristikom.⁵⁵

Sve prednosti i mane navedene za podudarne mikrofone posebno vrijede za tehniku XY. Glavna je prednost XY-para izvrsna monokompatibilnost koja osigurava reproduksijsku kvalitetu na širokom spektru uređaja. Korištenje kardiodne usmjerenosti znači i da je moguće značajno varirati odnos direktnog zvuka i reverberacije, zbog čega je XY izvrsna tehnika za snimanje u prostorima koji nisu adekvatno akustički tretirani. Nadalje, snimke nastale XY-tehnikom imat će izvrsnu lokalizaciju, međutim snimci nedostaje element prostornosti i zbog toga slušanje snimke nastale snimanjem isključivo navedenom tehnikom ne može pružiti dostatno uranjajuće iskustvo.

Blumlein

Mikrofonski par Blumlein naziv nosi po možda najznačajnijoj osobi zaslužnoj za razvoj stereofonije, Alanu Blumleinu, koji je u patentu 1931. godine opisao tu tehniku snimanja.⁵⁶ Postoje dvije vrste mikrofona koji se mogu koristiti u paru Blumlein: kondenzatorski mikrofoni i mikrofoni s trakom. Mikrofoni mora biti osmičaste usmjerne karakteristike. Kapsule se postavljaju jedna iznad druge pod kutom od 90° .⁵⁷



Slika 4. Dijagram Blumlein-para.⁵⁸

⁵⁵ Rayburn, Eargles, 2012, s. 221.

⁵⁶ Rayburn, Eargles, 2012, s. 217.

⁵⁷ Zotter, Frank, 2019, s. 2.

⁵⁸ Mulko, 2021.



Slika 5. Primjer postave Blumlein-para.⁵⁹

Zanimljivo je kako jedna od najstarijih tehnika stereosnimanja ujedno pruža i najbolju lokalizaciju izvora zvuka,⁶⁰ a samim time i najbolju prostornost i uranjajuće iskustvo. Ipak, audioinženjeri češće koriste druge tehnike podudarnih parova, iz više razloga. Prvenstveno, konfiguracija dviju kapsula s osmičastom usmjernom karakteristikom znači da se prostor hvata jednako ispred, kao i iza mikrofonskog para, ali budući da su osmičaste kapsule postavljene pod kutom od 90°, to znači da se zvuk hvata gotovo jednako sa svih strana. Ta činjenica zapravo podrazumijeva da prostorija u kojoj se snima bude akustički prikladna,⁶¹ međutim, audioinženjeri jako često rade u uvjetima u kojima refleksije zvuka pogoršavaju frekvencijski odziv i lokalizaciju izvora zvuka. Dakle, završna snimka izrađena tehnikom para Blumlein iznimno ovisi o prostoriji u kojoj se snima. Nadalje, iako je par Blumlein stereotehnika u kojoj se možda najbolje očituje prostornost snimke, i dalje je podudarna tehnika zbog čega nema vremenskih razlika među kapsulama i zbog toga se ne pokreće mehanizam interauralnih vremenskih razlika.⁶² Međutim, inženjeri diskografske kuće EMI (eng. Electric and Musical Industries) često su koristili tehniku Blumlein pod nazivom Stereosonic te su, kako bi kompenzirali nedostatak vremenskih razlika među kapsulama, smislili tehniku premetanja. Tehnika

⁵⁹ ***, Stereo, n. d.

⁶⁰ Zotter, Frank, 2019, s. 2; Bartlett, Billingsley, 1990, s. 545.

⁶¹ Rayburn, Eargles, 2012, s. 221.

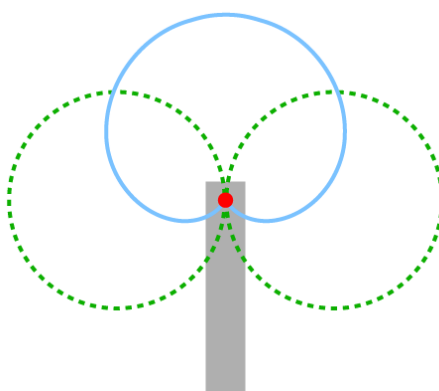
⁶² Rayburn, Eargles, 2012, s. 221.

premetanja zapravo je uvođenje frekvencijski selektivnog preslušavanja ispod 700 Hz, što značajno poboljšava osjećaj prostornosti, ali ujedno i pogoršava monokompatibilnost.⁶³

Najveća je mana para Blumlein manjak fleksibilnosti, što je ujedno možda i glavni razlog zašto ipak nije postala najkorištenijom stereotehnikom. U usporedbi s XY, koji snima uglavnom zvuk ispred mikrofona, zbog čega je moguće dodati i naglasiti prostornost umjetnom reverberacijom naknadno, kod para Blumlein to nije slučaj. Dakako, i dalje je moguće dodati umjetnu reverberaciju, ali nije moguće maskirati (najčešće loše) rane refleksije prostorije u kojoj se snimalo. Dakle, par Blumlein izvrsna je opcija kada je potrebna precizna lokalizacija i osjećaj prostornosti, zbog čega se takav par često koristi za snimanja klasične glazbe, ali zbog nefleksibilnosti tijekom snimanja i u postprodukciji rjeđe se koristi u drugim slučajevima.

MS

MS (eng. *Mid-side*) stereotehnika razlikuje se od XY i parova Blumlein zbog toga što koristi dva različita mikrofona. Prvi, M-mikrofon⁶⁴ kondenzatorski je mikrofon s različitim opcijama usmjerenosti. Može se koristiti neusmjerena kapsula, ili kardioidna ili hiperkardioidna usmjerenost, ovisno o tome koliko zvuka iza mikrofonskog para audioinženjer želi snimiti. Drugi, osmičasti S-mikrofon⁶⁵ može biti ili kondenzatorski ili mikrofon s trakom. Pritom je M-mikrofon postavljen uz središnju os, dok je S-mikrofon postavljen uz lateralnu os zbog čega su kapsule u odnosu 90°.⁶⁶



Slika 6. Dijagram MS-para.⁶⁷

⁶³ Rayburn, Eargles, 2012, s. 221.

⁶⁴ M označava mono mikrofon.

⁶⁵ S označava mikrofon koji snima zvuk sa strana u odnosu na M-mikrofon.

⁶⁶ Rayburn, Eargles, 2012, s. 222-224.

⁶⁷ Plava boja označava M-mikrofon, dok zelena boja označava S-mikrofon, Andersson, 2014.



Slika 7. Primjer postave MS-para.⁶⁸

Najveća je razlika para MS u odnosu na XY i Blumlein ta što se dva kanala koja se snimaju moraju dodatno obraditi kako bi snimka postala MS-snimka. MS-matrica funkcionira na način da se duplicira kanal koji se dobiva snimanjem S-mikrofonom te se dupliciranoj verziji invertira faza. Ta dva S-kanala u suodnosu s M-kanalom čine MS-signal.⁶⁹ Posljedica, a ujedno i velika prednost MS-para jest iznimna postproduksijska fleksibilnost. Matrica omogućava razdvajanje audiosignala na prvi kanal, koji sadrži sve informacije zajedničke dvama mikrofonima, i drugi kanal koji sadrži sve informacije koje nisu zajedničke dvama mikrofonima. Zbog toga je moguće odrediti širinu i prostornost snimke nakon snimanja.⁷⁰ U odnosu na XY, MS-par ima jasniji i bolji zvuk na središnjoj osi zbog M-mikrofona, a također snima i bolji signal sa strana i praktički isključuje ovisnost o kvaliteti izvanosnog odziva.⁷¹ Međutim, najveća mu je mana, kao i kod ostalih podudarnih parova, manjak prostornosti. Iako je moguće proširiti i povećati prostornost snimke postproduksijski, i dalje se MS oslanja isključivo na mehanizme interauralnih razlika u intenzitetu bez interauralnih vremenskih razlika, zbog čega je percepcija prostornosti manjkava.

⁶⁸ McAllister, 2023.

⁶⁹ Rayburn, Eargles, 2012, s. 222-223.

⁷⁰ Zotter, Frank, 2019, s. 3.

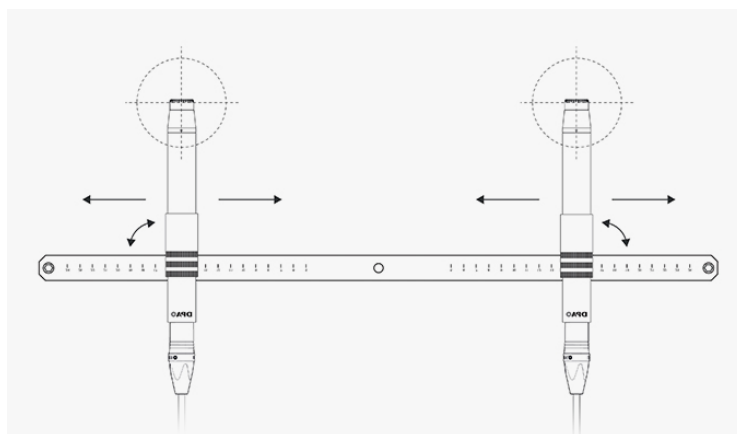
⁷¹ Ballou, Ciaudelli, Schmitt, 2008, s. 548.

Zaključak o podudarnim parovima

Podudarnim mikrofonskim parovima, dakle, lokalizacijske mogućnosti baziraju se na razlikama glasnoće izvora zvuka između dviju kapsula zbog čega se aktivira lokalizacijski mehanizam interauralnih razlika u intezitetu prilikom reprodukcije snimke. Međutim, reprodukcijom takvih snimki ne aktiviraju se mehanizmi interauralnih vremenskih razlika, zbog čega snimkama često nedostaje prostornosti jer se ne iskorištava puni potencijal lokalizacijskih mehanizama.

Razmaknuti parovi

Tehnika razmaknutih parova označava postavu mikrofona čije su kapsule razmaknute 20 centimetara ili više.⁷² U tom slučaju kut između kapsula više nije važan jer ne postoji područje u kojemu se zvučno polje između dviju kapsula preklapa u značajnijoj mjeri.



Slika 8. Dijagram razmaknutog para.⁷³

Tehnika razmaknutih parova koristi se od samih početaka dvokanalnog snimanja i reprodukcije, od ranih eksperimenata inženjera koji su radili u Bell Telephone Laboratories Inc.⁷⁴ U praktičnom smislu, postavljanje razmaknutog para najjednostavnije je jer podrazumijeva namještanje mikrofona na dva mikrofonska stalka na određenoj udaljenosti, bez računanja točnog kuta između kapsula ili korištenja posebnog stalka koji

⁷² Pulkki, 2015, s. 286.

⁷³ Williams, 2019.

⁷⁴ Rayburn, Eargles, 2012, s. 224.

omogućuje montiranje mikrofona jedan iznad drugoga (kao npr. za postavljanje tehnike XY).



Slika 9. Primjer postave razmaknutog para.⁷⁵

Najčešće se koriste kondenzatorski mikrofoni, a upotrebljavaju se i različite usmjerne karakteristike, ali većina audioinženjera preferira prostornost i lokalizaciju neusmjerenih mikrofona.⁷⁶ Ogromna je prednost neusmjerenih kapsula visoka razina definicije i vjernosti izvoru zvuka. Izvanosni odziv neusmjerenih kapsula najbolji je, kao i odziv frekvencija niskog spektra, zbog čega se neusmjerene kapsule toliko cijene. Međutim, neusmjerene kapsule podrazumijevaju da se zvuk snima jednako sa svih strana, što znači da se snimaju i potencijalno loše rane refleksije prostora u kojemu se snima. Zbog toga se, ako su akustički uvjeti neadekvatni, mogu koristiti subkardioidne ili kardioidne usmjerene kapsule.⁷⁷ Udaljenost mikrofona ovisi o izvoru zvuka koji se snima u odnosu na željenu širinu snimke. Ako se, na primjer snima mali ansambl u koncertnoj dvorani, poželjna je manja udaljenost u odnosu na snimanje simfonijskog orkestra. S druge strane, ako se tražena širina postiže dodatnim udaljavanjem mikrofona, može se pojaviti problem zvučne rupe u sredini stereofonijske panorame. Rješenje problema jest postavljanje trećega mikrofona u sredini kojim se popunjava zvučna praznina.⁷⁸ Dakako, treći mikrofoni dovodi do terminoloških problema jer se u tom slučaju ne radi o paru, ali literatura uglavnom ne posvećuje značajniju pažnju navedenom terminološkom problemu. Jedan od najpoznatijih i najkorištenijih mikrofonskih postava u okviru

⁷⁵ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 141.

⁷⁶ Rayburn, Eargles, 2012, s. 228, Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 83.

⁷⁷ Rayburn, Eargles, 2012, s. 228.

⁷⁸ Rayburn, Eargles, 2012, s. 227.

snimanja klasične glazbe i velikih simfonijskih orkestara je Decca Tree,⁷⁹ koji su osmislili inženjeri koji su radili u engleskoj izdavačkoj kući Decca 1950-ih godina. U postavi se koristi razmaknuti par s mikrofonom udaljenim dva metra, dok se središnji mikrofoni u pravilu nalaze 1,5 metara ispred razmaknutog para. Sva tri mikrofona postavljena su na istom, posebno izrađenom stalku. U postavi se tradicionalno koristi mikrofoni Neumann M50 koji ima posebne, frekvencijski selektivne usmjerne karakteristike (iako je službeno isključivo mikrofoni s neusmjerenom kapsulom).⁸⁰

U usporedbi s ostalima, snimka nastala tehnikom razmaknutih parova rezultira najboljom percepcijom prostornosti zbog toga što se lokalizacija izvora temelji na vremenskim razlikama dolaska izvornog zvuka u kapsule mikrofona. Mikrofoni koji je bliži izvoru zvuka prima zvučni signal prije mikrofona koji je udaljeniji od izvora. Kašnjenje zvuka pokreće mehanizam interauralnih vremenskih razlika koji djeluje u spektru do 1500 Hz, što se često povezuje s percepcijom prostornosti snimke.⁸¹ Međutim, točno određivanje pozicije zvučnog izvora nije ni približno oštro kao kod tehnike podudarnih parova. Naime, kod snimanja tehnikom razmaknutih parova nije moguće precizno odrediti točnu poziciju izvora zvuka, što je neizbježna posljedica lokalizacijskog mehanizma interauralnih vremenskih razlika. Međutim, slušatelji zapravo preferiraju to lokalizacijsko zamućivanje.⁸²

Dodatni razlog zamagljivanja, uz lokalizacijski mehanizam, jest korištenje neusmjerenih kapsula koje zahvaćaju više prostora od usmjerenih kapsula, što dodatno naglašava percepciju prostornosti.⁸³ Upravo zbog toga je kod razmaknutih parova monokompatibilnost razmjerno slaba, ovisno o međusobnoj udaljenosti mikrofona. Zbroji li se dvokanalna snimka u jednokanalnu, kao posljedica se uvijek javlja neki oblik češljastog filtera što značajno izobličuje frekvencijski spektar. U kontekstu snimanja i reprodukcije klasične glazbe to može značiti da se neki ton određenog instrumenta (koji zauzima određeni frekvencijski raspon) uopće ne čuje, dok je neki drugi ton daleko glasniji, a te razlike u spektru slušatelj itekako prepoznaje kao tehničku grešku.

⁷⁹ Rayburn, Eargles, 2012, s. 232.

⁸⁰ Rayburn, Eargles, 2012, s. 232-233.

⁸¹ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 546.

⁸² Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 82; Pulkki, 2015, s. 287.

⁸³ Pulkki, 2015, s. 287.

Gotovo podudarni parovi

Tehnike gotovo podudarnih parova kombiniraju prednosti podudarnih i razmaknutih parova. Gotovo podudarni parovi mikrofonske su postave u kojima su kapsule udaljene do 30 centimetara i zbog toga je, osim udaljenosti, važan i njihov međusobni kut. Veća udaljenost između kapsula podrazumijeva širu snimku, dok veći kut podrazumijeva također širu snimku, no usto su i izvori u središtu para postavljeni dalje od osi kapsula.⁸⁴ Pritom se u obzir mora uzeti i monokompatibilnost: što je udaljenost između kapsula veća, to je veća mogućnost izobličenja spektra kada se dvokanalna snimka zbroti u jednokanalnu.

Lokalizacija gotovo podudarnih parova naizgled je idealna jer se kombiniraju i razlike u glasnoći, ali i vremenske razlike između kapsula.⁸⁵ Zbog toga se prilikom slušanja snimke nastale nekom od tehnika gotovo podudarnih parova aktiviraju lokalizacijski mehanizmi interauralnih razlika u intenzitetu, kao i interauralnih vremenskih razlika, zbog čega bi prostornost takve snimke trebala biti najbolja od tri različite vrste stereosnimanja. Međutim, udaljenost između kapsula često je vrlo mala, zbog čega vremenska kašnjenja djeluju na spektar koji je viši od traženoga spektra kako bi se iskoristio puni potencijal za pokretanje mehanizma interauralnih vremenskih razlika. Te razlike također nužno znače i da su gotovo podudarni parovi manje monokompatibilni od podudarnih parova. Osim toga, kao i kod podudarnih parova, zbog kuta između kapsula kvaliteta i vjernost snimke u spektralnom smislu ovisi o kvaliteti mikrofonske kapsule i njezinu izvanosnom odzivu.⁸⁶

ORTF

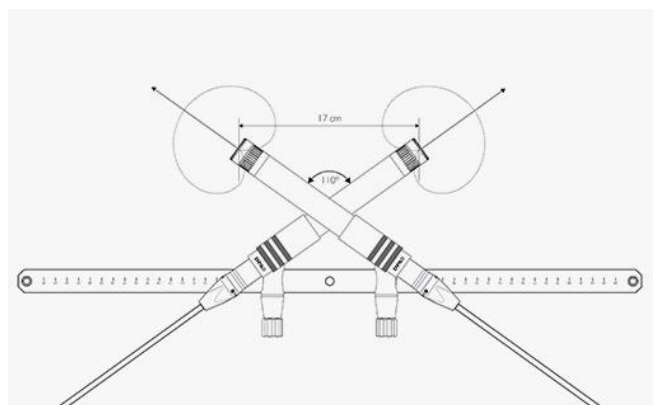
Naziv tehnike snimanja ORTF kratica je naziva francuske nacionalne radiotelevizije Office de radiodiffusion-télévision française. Tehniku su razvili francuski inženjeri Jean-Pierre Vernier i Roger Modjeski šezdesetih godina 20. stoljeća na Francuskoj radioteleviziji.⁸⁷

⁸⁴ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 83.

⁸⁵ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 545; Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 83; Rayburn, Eargles, 2012, s. 229.

⁸⁶ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 545.

⁸⁷ Rayburn, Eargles, 2012, s. 316.



Slika 10. Dijagram ORTF-para.⁸⁸

Mikrofoni koji se koriste za snimanje ORTF-tehnikom kondenzatorski su mikrofoni kardiodne usmjerne karakteristike. Mikrofone kapsule moraju biti udaljene 17 centimetara pod kutom od 110°.⁸⁹



Slika 11. Primjer postave ORTF-para.⁹⁰

Vernier i Modjeski osmislili su ORTF-tehniku imajući na umu anatomiju ljudske glave.⁹¹ Uši su kod prosječne osobe udaljene oko 17 centimetara, što je upravo udaljenost kapsula, a kut od 110° također su odabrali tako da se oponaša lokalizacija zvučnih izvora onako kako ih pojedinac doživljava u stvarnom svijetu. Upravo zbog toga, mnogi audioinženjeri preferiraju lokalizaciju izvora snimljenih ORTF-parom u odnosu na druge tehnike gotovo

⁸⁸ Williams, 2019.

⁸⁹ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 84.

⁹⁰ Williams, 2019.

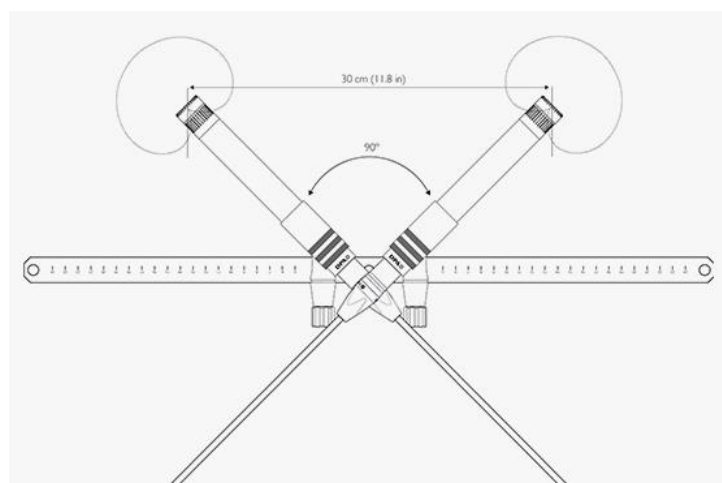
⁹¹ Rayburn, Eargles, 2012, s. 230.

podudarnih parova.⁹² Usto, zbog relativno male udaljenosti, ORTF ima dobru monokompatibilnost. Međutim, upravo zbog te male udaljenosti nema značajnih kašnjenja u zvuku između kapsula, zbog čega mehanizam interauralnih vremenskih razlika nije značajnije izražen. Kao rezultat, usporedbom snimke nastale razmaknutim parom i ORTF-parom dobiva se dojam da razmaknuti par rezultira boljom percepcijom prostornosti u odnosu na ORTF.

NOS

NOS (nizoz. *Nederlandse Omroep Stichting*) je tehnika koja je nastala na Nizozemskoj nacionalnoj radioteleviziji.⁹³

Kao i kod ORTF-tehnike, koriste se kondenzatorski mikrofoni s kardioidnom usmjernom karakteristikom. Kapsule su udaljene 30 centimetara pod kutom od 90°.⁹⁴



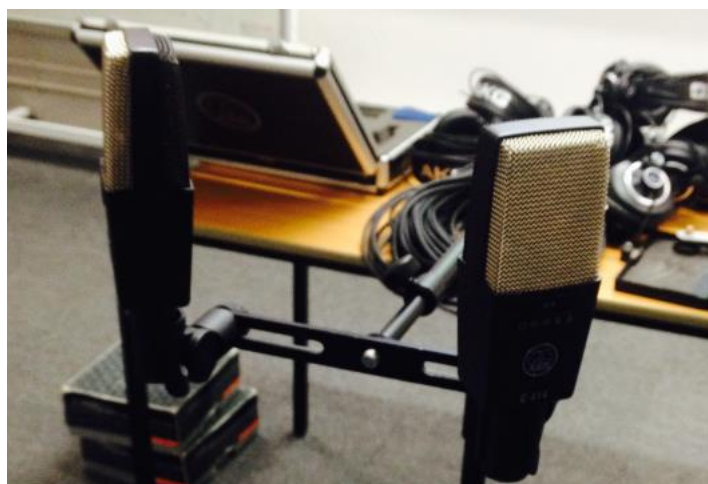
Slika 12. Dijagram NOS-para.⁹⁵

⁹² Rayburn, Eargles, 2012, s. 230.

⁹³ Toft, 2020, s. 52.

⁹⁴ Toft, 2020, s. 52.

⁹⁵ Williams, 2019.



Slika 13. Primjer postave NOS-para.⁹⁶

Međutim, u odnosu na ORTF, NOS-par ima slabiju lokalizaciju. U prvom redu, iako su kapsule udaljenije od ORTF-para, NOS ima značajniji odnos razlika u glasnoći u odnosu na vremenske razlike, zbog čega je mehanizam interauralnih razlika u intenzitetu dominantniji. Stoga snimci nastaloj tehnikom NOS-para fali još više prostornosti.⁹⁷ Osim toga, NOS-par je manje monokompatibilan od ORTF-para zbog toga što su kapsule udaljenije, i to ponajviše u spektru ispod 250 Hz.⁹⁸

DIN

DIN je mikrofonska tehnika koju su razvili njemački inženjeri koji su radili na njemačkom institutu koji propisuje različite standarde, Deutsches Institut für Normung.⁹⁹

Kao i tehnike ORTF i NOS, DIN također koristi kondenzatorske mikrofone s kardioidnom usmjernom karakteristikom. Kapsule su udaljene 20 centimetara s međusobnim kutom od 90°. Tehnika je dakle vrlo slična NOS-tehnici s manjom udaljenošću između kapsula, što bolje rješava problem monokompatibilnosti.¹⁰⁰

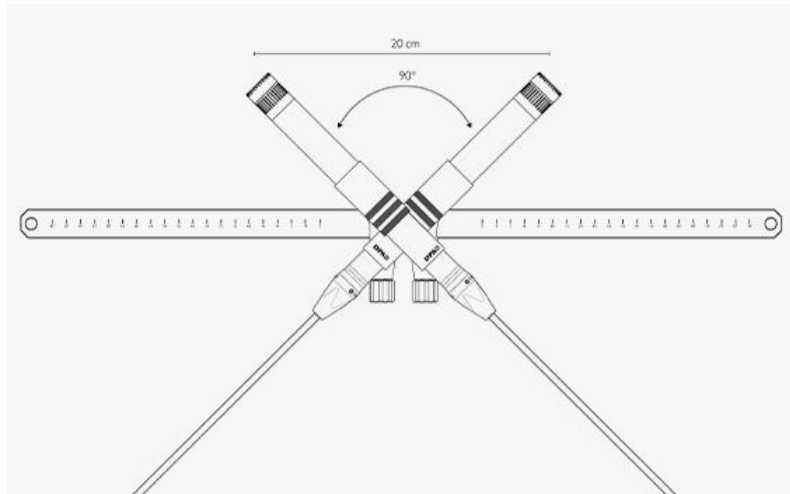
⁹⁶ Kaywhole, 2015.

⁹⁷ Toft, 2020, s. 52.

⁹⁸ Toft, 2020, s. 52.

⁹⁹ Toft, 2020, s. 53.

¹⁰⁰ Toft, 2020, s. 53.



Slika 14. Dijagram DIN-para.¹⁰¹

Zaključak o gotovo podudarnim parovima

Gotovo podudarni parovi zapravo su kombinacija podudarnih i razmaknutih parova koja proizlazi iz potrebe da se prostornost izvora zvuka snimi što vjernije. U radu su navedene najčešće korištene tehnike koji su standardizirane, najvjerojatnije stoga što su nastale u okvirima institucija u kojima su se koristile. Međutim, gotovo podudarni par mikrofona može biti bilo koja kombinacija udaljenosti kapsula do otprilike 30 centimetara i određenoga kuta.

Zaključak o tehnikama stereosnimanja

Iz pregleda najčešće upotrebljavanih tehnika stereosnimanja jasno se razaznaje kako je ključna riječ stereosnimanja kompromis. Ograničenja dvokanalnog snimanja dovode do neizbježnih odluka zbog kojih je potrebno žrtvovati jedan element kako bi se istaknuo drugi element. Upravo zbog činjenice da je monoreprodukcija i dalje itekako aktualna, audioinženjerima je često vrlo važna i monokompatibilnost, zbog čega potencijal prostornosti snimke u tim slučajevima nije iskorišten, jer su monoreprodukcija i prostornost snimke u recipročnom odnosu.

Uzme li se u obzir glazba, važnost prostornosti varira ovisno o glazbenom žanru. Slušatelji žanrova kao što su *pop* ili *rock* često slušaju glazbu na uređajima koji podržavaju samo monofonu reprodukciju, zbog čega se prilikom snimanja tih žanrova jako često koriste

¹⁰¹ Williams, 2019.

podudarni parovi koji osiguravaju monokompatibilnost, a da se pritom žrtvuje prostornost. S druge strane, pretpostavlja se kako slušatelji klasične glazbe slušaju na kvalitetnome stereofonom sustavu, zbog čega se često koristi prostorno bolja tehnika razmaknutih parova ili ORTF-para. Tehnike stereosnimanja predstavljaju početak snimanja tijekom kojega se u obzir uzima prostornost i te su tehnike još uvijek relevantne i važne.

Stereofona reprodukcija

U odnosu na monofonu reprodukciju, stereofonija predstavlja značajan pomak u slušateljskom iskustvu zbog toga što se dodaje iznimno važna komponenta prostornosti. Kao što je već spomenuto, čak i rana istraživanja Harveya Fletchera svjedoče o tome koliko je prostornost važna za slušateljsko iskustvo. Upravo zbog toga većina slušatelja preferira prosječan stereofoni sustav nad izvanrednim monofonim sustavom.¹⁰² Međutim, nekoliko je desetljeća prošlo od pojave stereofone reprodukcije do njezine standardizacije i komercijalizacije. Patenti za stereofonu reprodukciju Franklina Doolitlea i Alana Blumleina pojavili su se u dvadesetim i tridesetim godinama 20. stoljeća, međutim tek 1950-ih godina stereofonija postaje reproduksijski standard. Dva su glavna razloga takvomu kašnjenju. Prvi razlog bila je pogibija Alana Blumleina. On je 1931. godine prijavio patent koji je sadržavao revolucionaran proces snimanja i reprodukcije zvuka, međutim, poginuo je u zrakoplovnoj nesreći prije nego što je uspio svoj patent provesti u djelo, a nije ostavio nikakvu građu u kojoj detaljno objašnjava svaki dio procesa, zbog čega su prošle godine prije no što se Blumleinova ideja provela ostvarila. Drugi razlog bio je Drugi svjetski rat, zbog kojega su se svi ekonomski resursi i naponi prebacili na razvoj vojne industrije.¹⁰³ Iz tih je razloga standardizacija stereofonije kasnila, međutim, ostala je standardom sve do danas.¹⁰⁴

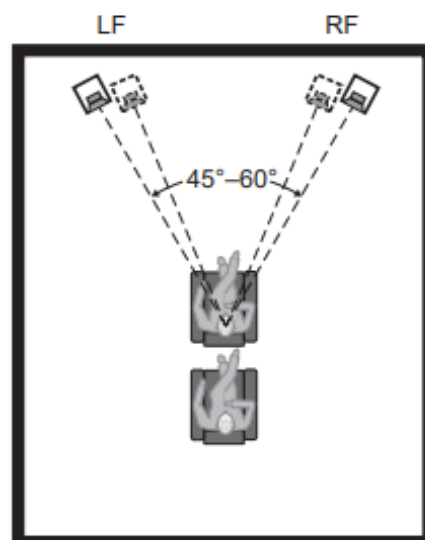
Velika je prednost stereofonije u odnosu na monofoniju prostornost, a upravo je to omogućilo audioinženjerima da pozicioniraju različite zvučne izvore u prostoru. Inženjeri u procesu produkcije i miješanja dvokanalnog zvuka imaju kontrolu nad lateralnom

¹⁰² Watkinson, 1998, s. 194.

¹⁰³ Watkinson, 1998, s. 194.

¹⁰⁴ Watkinson, 1998, s. 194.

panoramom, u smislu da mogu određivati koji će prostor određeni izvor zvuka zauzimati slijeva nadesno. Upravo je zbog toga odnos dva zvučnika i slušatelja iznimno važan. Slušali slušatelj dvokanalni zapis na stereofonom sustavu u neadekvatnim uvjetima, ne čuje panoramski balans onako kako je to zamislio audioinženjer koji je izradio snimku, i percepcija fantomskih zvučnih slika¹⁰⁵ nije ispravna. Upravo je zbog toga stereofona reprodukcija, u usporedbi s monofonijom, antisocijalan način slušanja,¹⁰⁶ u smislu da samo jedna osoba u prostoriji može čuti audiozapis s ispravnim panoramskim balansom. S tim na umu, najbolja konfiguracija odnosa slušatelja i dva zvučnika jest jednakostranični trokut¹⁰⁷ u kojemu su glava slušatelja i dva zvučnika međusobno jednako udaljeni pod kutom od 60°.



Slika 15. Primjer stereofone postave zvučnika kojom se osiguravaju optimalni uvjeti slušanja.¹⁰⁸

Iako stereofona reprodukcija predstavlja značajan pomak u odnosu na monofonu reprodukciju, a ujedno predstavlja i početak prostornog zvuka, postoje problemi koji su inherentni dvokanalnoj reprodukciji i ne mogu se riješiti. Kao što je slučaj i sa stereosnimanjem, stereofona reprodukcija predstavlja kompromis lokalizacije izvora

¹⁰⁵ Fantomske (ili virtualne) zvučne slike pojavljuju se kada uho percipira izvor zvuka iz smjera na kojem se taj izvor ne nalazi. Riječ je zapravo o percepciji rezultata reprodukcije zvuka kroz dva ili više kanala.

¹⁰⁶ Toole, 2008, s. 277.

¹⁰⁷ Toole, 2008, s. 277.

¹⁰⁸ Toole, 2008, s. 276.

zvuka.¹⁰⁹ Zbog fenomena fantomskih izvora zvuka postoji bezbroj mogućih lokacija izvora zvuka, ali unutar prostora omeđenog zvučnicima. Dakle, nije moguće lokalizirati izvor zvuka izvan jasno određenog prostora koji se nalazi između zvučnika, što znači da stereofona reprodukcija nikada ne može pružiti percepciju zvuka onako kako ga osoba doživljava u stvarnom svijetu, tj. stereofoni sustav projicira zvuk plošno, dok ljudi u stvarnom svijetu doživljavaju zvuk sferno.

Još je 1956. godine Roelof Vermeulen zaključio kako za pravu rekreaciju iskustva koncertne dvorane nije dovoljno samo reproducirati direktan zvuk orkestra koji se nalazi sprijeda (i koji je moguće kvalitetno reproducirati preko para zvučnika), već je potrebno reproducirati i rane refleksije sa strana koje nisu jasno čujne slušatelju u dvorani, ali nedvojbeno doprinose iskustvu slušanja u koncertnoj dvorani.¹¹⁰ To će iskustvo koncertne dvorane slušatelji moći iskusiti tek pojavom kvadrofonije, a možda čak i kasnije, pojavom tehnologije okružujućeg zvuka (eng. *surround sound*).

¹⁰⁹ Toole, 2008, s. 276.

¹¹⁰ Vermeulen, s. 124-125.

Binauralno i pseudobinauralno snimanje i reprodukcija

Binauralno snimanje

Sve dosad spomenute tehnike snimanja funkcioniraju tako da se određeni mikrofoni ili mikrofoni u međusobnom odnosu postavljaju bez barijera između njih. Međutim, to se razlikuje od načina na koji osoba inače prima zvučne signale, kada se zvuk značajno izobličuje sudarajući se s glavom, torzom i vanjskim uhom. Tako kada zvučni val dopiše do bubnjića, kojemu je ekvivalent membrana mikrofonske kapsule, dolazi s brojnim izobličenjima. S obzirom na to, ORTF-par, koji oponaša način na koji ljudi slušaju, nije dovoljno precizan u oponašanju izvornoga zvuka upravo zbog nepostojanja prepreka koje uzrokuju izobličenja. Najrealističnija prepreka koja vjerno oponaša izobličenja koja nastaju prilikom sudara zvučnog vala s određenom osobom jest umjetna glava kojoj se mikrofonske kapsule umeću u umjetne uši. Korištenjem umjetne glave s dvama mikrofona montiranima u uši glave nastaje binauralna snimka. Na taj način nastaju modifikacije spektra koje uzrokuje nos, lice i ušna školjka, a za još preciznije oponašanje izobličenja mogu se dodati i ramena.¹¹¹ Prvi primjer javnoga korištenja umjetne glave i binauralnih snimki bila je glava Oscar prezentirana na svjetskoj izložbi u Chicagu 1933. godine.¹¹² Harvey Fletcher, koji je osmislio i patentirao glavu 1927. godine,¹¹³ koristio je krojačku lutku, a u njezinu je glavu instalirao dva mikrofona. Međutim, budući da su mikrofoni u tom periodu bili puno veći nego što su danas, Fletcher je morao pozicionirati mikrofone na mjestima gdje inače stoje jagodične kosti, zbog čega udaljenost između kapsula nije bila jednaka prosječnoj udaljenosti bubnjića.

Recepcija snimaka nastalih korištenjem umjetne glave *Oscar* bila je izvrsna, a slušatelji su govorili o iznimnoj realističnosti reprodukcije.¹¹⁴ Iako Fletcher nije razumio lokalizacijske mehanizme, niti točan razlog zašto binauralna glava dobro funkcionira, pretpostavio je da to ima veze s interakcijom između ušiju i preprekama između kapsula. Međutim, početno ushićenje novim načinom snimanja splasnulo je, a binauralne snimke

¹¹¹ Ballou, Ciaudelli, Schmitt, 2008, s. 554.

¹¹² Roginska, 2018, s. 96.

¹¹³ Boren, 2018, s. 50.

¹¹⁴ Boren, 2018, s. 50.

ni danas nisu postale standardom, iako imaju potencijal da budu najrealističniji način snimanja i slušanja zvuka.



Slika 16. Prikaz prvoga binauralnog mikrofona koji je osmislio i patentirao Harvey Fletcher.¹¹⁵

U početku su binauralna snimanja bila rijetka zbog tehnoloških manjkavosti.¹¹⁶ Mikrofonu su bili veliki, zbog čega je montiranje bilo nemoguće, a one varijante kapsula koje su bile manje imale su previše šuma, zbog čega je snimka vrlo često bila neupotrebljiva. Osim toga, tada se svaka binauralna snimka morala slušati preko slušalica, a kvaliteta slušalica u 1930-im godinama nije bila dostatna.

U odnosu na tehnike stereosnimanja, binauralne snimke ne predstavljaju kompromis, već sadrže sve informacije potrebne pokretanje mehanizama za lokalizaciju jednako kao što bi ih primio i slušatelj koji je pozicioniran na istom mjestu kao i umjetna glava. Dakle, izobličenja koja nastaju prilikom sudara zvučnoga vala s umjetnom glavom jednaka su kao i kod prosječne ljudske glave, što znači da kapsule postavljene u umjetne uši hvataju isti zvučni signal kao i bubnjići.¹¹⁷ Izobličenja koja nastaju na taj način stvaraju binauralne, ali i monauralne razlike.

Ipak, postoji specifičan problem lokalizacije binauralnih snimaka koji je desetljećima bio nepremostiv, a ujedno i razlog zbog kojeg binauralne snimke ne nastaju češće, a to su

¹¹⁵ Roginska, 2018, s. 97.

¹¹⁶ Toole, 2008, s. 274.

¹¹⁷ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 159-160.

HRTF-setovi (eng. *Head-Related Transfer Functions*). HRTF-setovi predstavljaju cjelokupnu promjenu frekvencijskog spektra koje uzrokuju jedinstvene anatomske karakteristike pojedinca.¹¹⁸ Upravo ta jedinstvenost predstavlja najveći problem. Svaka osoba ima drukčiji oblik ušnih školjki, drukčiji oblik ramena itd. Osim toga, jako varira i veličina glave, pa time i udaljenost između bubnjića. Mozak je sposoban kompenzirati izobličenja tako da se prilagodi anatomiji pojedinca, ali ne može kompenzirati izobličenja neke druge osobe ili umjetne glave.

Postoje dva moguća načina rješavanja tog problema prilikom snimanja i reprodukcije binauralne snimke. Prvi je način pokušaj generaliziranja, tj. izrade binauralne glave na temelju prosječnih vrijednosti prikupljenih HRTF-setova kako bi reprodukcija snimke funkcionirala za što veći broj slušatelja.¹¹⁹ Drugi je način prilagođavanje snimke za reprodukciju na temelju vlastitih HRTF-setova. Izrada HRTF-seta (još uvijek) je uglavnom kompliciran i skup proces koji zahtijeva da pojedinac sjedi u gluhoj komori s mikrofonom u svakom uhu. Zvučnici postavljeni oko slušatelja reproduciraju signale koje hvataju mikrofoni što omogućuje izradu HRTF-profila.¹²⁰ Iako danas postoje jednostavnije, brže i jeftinije metode izrade, one još uvijek nisu komercijalizirane, zbog čega vrlo mali broj osoba ima izrađene vlastite HRTF-setove. Također, važni su i HRIR-setovi (eng. *Head-related impulse responses*). Kao što HRTF-setovi sadrže frekvencijska izobličenja, tako i HRIR-setovi sadrže izobličenja u vremenskoj domeni.¹²¹

Jedan od problema lokalizacije izvora nastalih binauralnim snimanjem jest krivo određivanje smjera izvora, najčešće naprijed-straga. Tada slušatelj ne lokalizira zvuk ispravno na poziciji na kojoj bi se inače isti izvor trebao lokalizirati. Prvi je razlog zbog pojave toga problema dešava nedostatak mikropokreta, što je posljedica korištenja umjetne glave na statičnome mikrofonskom stalku.¹²² Ljudi često nesvjesno rade mikropokrete glavom kada je lokalizacija izvora neodređena, što je fenomen poznat pod nazivom konus konfuzije. Nedostatak mikropokreta može rezultirati pogrešnom lokalizacijom zvuka. Drugi je razlog korištenje slušalica za reprodukciju koje

¹¹⁸ Bosun, 2013, s. 20, 22.

¹¹⁹ Ballou, Ciaudelli, Schmitt, 2008, s. 554.

¹²⁰ Cirone, 2017, s. 2.

¹²¹ Bosun, 2013, s. 22.

¹²² Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 162-163.

onemogućavaju rezonanciju ušne školjke. Najčešće je to tip slušalica koje počivaju na uhu. Rješenje problema može biti ili korištenje slušalica čiji jastučići počivaju oko uha, ili ekvilizacija problematičnog spektra prilikom reprodukcije.¹²³

Dakle, potencijal binauralnog snimanja i reprodukcije izniman je, pogotovo uzme li se u obzir prostorni zvuk i uranjajuće iskustvo, međutim postoji niz problema koje nova tehnologija, koja tek treba nastati, mora premostiti.

Binauralni mikrofoni

Binauralni mikrofoni tehnički je mikrofonski par koji snima zvuk ili kapsulama ugrađenim u umjetne uši ili mikrofoni koji su montirani u uši snimatelja. Usporedi li se binauralno snimanje s tehnikama stereosnimanja, riječ je o gotovo podudarnome mikrofonskom paru koji koristi tehnologiju površinskih mikrofona.¹²⁴

Većina binauralnih snimki nastaje korištenjem umjetne ljudske glave koja odgovara dimenzijama prosječne glave odrasle osobe. Važno je pritom uzeti u obzir da se koriste materijali koji odgovaraju gustoći i apsorpcijskim karakteristikama ljudske glave, a važan je i vanjski materijal koji također mora imati refleksijske karakteristike slične ljudskoj koži.¹²⁵ U protivnome zvučna barijera neće biti slična ljudskoj glavi, a binauralna snimka neće biti realistična. Zvukovod se ne koristi prilikom konstrukcije ljudske glave jer ne utječe na lokalizacijske mehanizme. Funkcija je zvukovoda provođenje zvučnih valova ka bubnjiću¹²⁶ i amplificiranje spektra ljudskog glasa.¹²⁷ To znači da zvukovod izobličuje frekvencijski spektar, a nema prostornu funkciju, zbog čega se ne koristi u umjetnim binauralnim glavama. Najčešća udaljenost između dviju mikrofonskih kapsula je 16.5 centimetara,¹²⁸ što je vrlo slično udaljenosti kapsula kod ORTF-para.

Važna je i problematika ekvilizacije binauralne snimke. Spektralna izobličenja, koja služe kao važni okidači za lokalizacijske mehanizme, predstavljaju značajan problem zbog toga što ljudski mozak kompenzira učinke izobličenja, što dakako mikrofoni ne može

¹²³ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 162-163.

¹²⁴ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 162.

¹²⁵ Ballou, Ciaudelli, Schmitt, 2008, s. 555.

¹²⁶ Judaš i Kostović, 1997, s. 251.

¹²⁷ Pulkki, 2015, s. 113.

¹²⁸ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 162.

automatski učiniti.¹²⁹ Zbog toga, kao i zbog činjenice da je psihoakustika znanstvena grana u razvoju, postoje različite teorije i prakse ekvilizacije binauralne snimke kako bi ona bila što vjernija izvorima zvuka. Pritom je važno napomenuti da se ekvilizacija uglavnom dešava u binauralnoj glavi bez potrebe da snimatelj utječe na proces. Najčešće se koristi ekvilizacija po difuznom polju, što predstavlja evaluaciju spektralnih izobličenja koja bi nastala kad bi se izvor zvuka nalazio u zatvorenom prostoru tako da do mikrofona stiže zvuk sa svih strana zbog refleksija u prostoru. Takav tip ekvilizacije koristi se u danas najčešćim i najpoznatijim umjetnim glavama, Neumann KU-81i i Neumann KU-100.



Slika 17. Prikaz jednog od najčešće korištenih binauralnih mikrofona, Neumann KU-100.¹³⁰

Drugi je način snimanja korištenje minijturnih kondenzatorskih mikrofona, najčešće u obliku slušalica koje se montiraju u ušni kanal snimatelja, pri čemu se također snimaju i HRTF-setovi onoga tko nosi mikrofone.¹³¹ Dakle, ako snimatelj zadržava snimku za vlastitu reprodukciju, daleko je najbolja opcija korištenje binauralnih slušalica-mikrofona. Velika je prednost korištenja takvih mikrofona dodatak dinamičkoga lokalizacijskog mehanizma koji nastaje uslijed pokreta glavom i mijenjanja interauralnih razlika u intenzitetu i interauralnih vremenskih razlika za isti izvor zvuka. Međutim, velika su mana takvog snimanja šumovi koji nastaju zbog pomicanja snimatelja. Kondenzatorski mikrofoni najčešće su jako osjetljivi, zbog čega snimaju i najtiše šumove, što je inače velika prednost jer pridonosi boljoj rezoluciji zvuka, no ujedno je za potrebe

¹²⁹ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 162.

¹³⁰ <https://www.neumann.com/en-en/products/microphones/ku-100/>, pristup 19. rujna 2023.

¹³¹ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 162.

ovakve vrste snimanja i velika mana jer šumovi neizbježno odvlače pozornost prilikom slušanja snimke i zasigurno se interpretiraju kao smetnja u snimci. Osim toga, budući da binauralni mikrofoni ovoga tipa najčešće omogućavaju i istovremenu reprodukciju preko slušalica, glasni izvori zvuka mogu biti opasni za zdravlje slušnog aparata te mogu dovesti i do različitih oštećenja sluha.¹³²

Binauralna reprodukcija

Reproducira li se binauralna snimka preko slušalica, lijevo uho slušatelja sluša lijevi kanal snimljen lijevom mikrofonskom kapsulom na umjetnoj glavi, a desno uho sluša desni kanal. Budući da se zvučnik na slušalicama nalazi na gotovo istoj poziciji na uhu kao i kapsula umjetne glave, moguća je gotovo potpuno vjerna reprodukcija binauralne snimke. Osim navedenoga, tu vjernost reprodukcije omogućuje i blokiranje preslušavanja između dvaju kanala zbog korištenja slušalica. Zbog toga je čest zaključak kako je binauralna snimka s reprodukcijom preko slušalica možda i najprecizniji način snimanja i slušanja prostornosti zvuka.¹³³ Međutim, reprodukcija binauralne snimke preko zvučnika iznimno je loša¹³⁴ jer nužno dovodi do efekta češljastog filtera, što značajno degradira prvotni spektralni balans. Spektar frekvencija ispod 700 Hz najčešće snimaju obje kapsule otprilike istog intenziteta jer glava ne može apsorbirati te frekvencije, ali postoji vremenska razlika dolaska niskog spektra istog izvora zvuka u obje kapsule zbog čega nastaje češljasti filter prilikom reprodukcije preko zvučnika¹³⁵. Taj problem nastaje upravo zbog preslušavanja.¹³⁶ Međutim, postoje rješenja toga problema, a jedno je od rješenja tehnologija transauralne stereofonije. Za transauralnu reprodukciju potrebno je koristiti transauralni pretvarač koji pretvara binauralni signal u signal adekvatan za stereofonu reprodukciju preko zvučnika tako da se uklanja preslušavanje uzrokovano izobličenjima HRTF-seta¹³⁷. Na taj je način moguća reprodukcija preko zvučnika, međutim, i dalje ostaju problemi stereofone reprodukcije koji onemogućavaju reprodukciju prostornosti zvuka u dovoljnoj mjeri. U usporedbi sa stereofonom

¹³² Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 162.

¹³³ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 545; Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 160.

¹³⁴ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 545.

¹³⁵ Rayburn, Eargle, 2012, s. 240.

¹³⁶ Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 164.

¹³⁷ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 545; Bartlett, B., Bartlett, J., 2014, s. 164.

reprodukcijom preko zvučnika, slušanje binauralne snimke preko slušalica omogućuje znatno bolji doživljaj prostornosti snimke ako se koriste jedinstveni HRTF-setovi osobe koja sluša snimku.

Binauralno u umjetnosti

Prostornost koju pojedinac može iskusiti slušajući binauralnu snimku preko slušalica predstavlja možda najveći potencijal od svih reproduksijskih sustava, a praktičnost koju podrazumijevaju slušalice je svakako velika prednost. Upravo je izražena prostornost i mogućnost manipulacije lokaliziranjem izvora zvuka po cijeloj zvučnoj sferi najveća prednost koju skladatelj može iskorištavati pri skladanju.¹³⁸ Binauralnom reprodukcijom preko slušalica moguće je odrediti i prokomponirati rutu kojom izvor zvuka putuje. Jedan od dramatičnih primjera pomicanja izvora zvuka u prostoru je iskorištavanje Dopplerova učinka,¹³⁹ ali mogućnosti kreiranja rute daleko su veće. Tako izražena prostornost skladateljima otvara nove, svježije načine baratanja tenzijom i otpuštanjem zvuka.¹⁴⁰

Kanadska umjetnica Janet Cardiff iskorištavala je kombinaciju binauralnih snimki i reprodukcije tih snimki preko slušalica za izradu zvučnih šetnji. Cardiff je prvu zvučnu šetnju izradila 1991. godine, tijekom umjetničke rezidencije u Banffu.¹⁴¹ Svoje zvučne šetnje opisuje kao „fizičko kino“¹⁴² (eng. *physical cinema*), što je vrlo zanimljiva tvrdnja: pojedinac ima priliku iskusiti nešto nestvarno, ali ne u kontroliranim uvjetima kinodvorane ili koncertne dvorane, već u stvarnom svijetu. Zvučne šetnje sadržavaju dijalog kojim Cardiff usmjerava slušatelja po željenoj ruti, a dok slušatelj hoda u slušalicama čuje kombinacije zvukova koji su snimljeni na lokaciji, ali i *foley*¹⁴³-zvukova i dodane glazbe.¹⁴⁴

Binauralne snimke i reprodukcija preko slušalica zvučnim šetnjama omogućuju paradoksalnu uronjenost – s jedne strane slušatelj je potpuno uronjen u zvučnu okolinu

¹³⁸ Cheng, Wakefield, 2001, s. 57

¹³⁹ Cheng, Wakefield, 2001, s. 67

¹⁴⁰ Cheng, Wakefield, 2001, s. 72

¹⁴¹ Cardiff, Miller, 2023

¹⁴² *Janet Cardiff talks sound*, n. d., s. 1.

¹⁴³ Foley (nazvani po pioniru dizajna zvuka, Jacku Foleyu) zvukovi su naknadno snimljeni i sinkronizirani zvukovi, najčešće korišteni za potrebe određenog filma.

¹⁴⁴ *Janet Cardiff talks sound*, n. d., s. 1.

oko sebe jer su binauralne snimke snimljene na toj lokaciji, a s druge strane, slušatelj uopće ne čuje stvarne zvukove u tom trenutku. Cardiff je kroz zvučne šetnje uspjela pokazati i iskoristiti potencijal binauralnog načina snimanja i reprodukcije zvuka. Zvučne su šetnje pak s druge strane zanimljive i zbog aktivne uloge slušatelja, što prikazuje još jedan snažan potencijal binauralne tehnologije¹⁴⁵, interaktivnost. Slušatelj ne može šetati gdje želi, jer tada zvučna šetnja više nije fizičko kino. U tome slučaju zvukovi u slušalicama postaju odvojeni od okruženja. Podrazumijeva se kako slušatelj slijedi narativni glas kojim se određuje ruta i tempo.¹⁴⁶ Interaktivna komponenta zvučnih šetnji ne može se poistovjetiti s onom u industriji igara, gdje pokret igrača glavom mijenja smjer izvora zvuka i relativne balanse svih zvukova. To pak samo naglašava koliki potencijal ima kombinacija binauralnih snimki s reprodukcijom preko slušalica.

Njemačka skladateljica Christina Kubisch također je stvarala zvučne šetnje, koje su međutim različite od onih koje je stvarala Cardiff. Kubisch je dala izraditi posebne indukcijske slušalice koje imaju integrirani par elektromagnetskih mikrofona,¹⁴⁷ pa tako slušatelj može izravno slušati zvukove koje inače čovjek ne može slušati. Kubisch dakle zanimaju elektromagnetska polja velikih gradova, zanima je zvučni svijet skriven običnom ljudskom uhu.¹⁴⁸ Njezine *Električne šetnje* (eng. *Electrical Walks*) također podrazumijevaju aktivnu ulogu slušatelja, međutim na drukčiji način nego kod Cardiff. Svaki slušatelj dobije kartu s preporučenim mjestima koja su zvukovno zanimljiva, ali svatko za sebe određuje kojom će točno rutom proći.¹⁴⁹ Možda su *Električne šetnje* također jedan oblik fizičkog kina, ali tada bi svakako bili kategorizirane pod znanstvenu fantastiku. Kubisch slušatelju otkriva nešto novo, a elektromagnetski mikrofoni zapravo dovode binauralno u pitanje, jer je poanta binauralnog snimanja realistično rekreiranje načina na koji prosječna osoba sluša. Međutim, *Električne šetnje* mogu se shvatiti kao svojevrsne proširene binauralne snimke.

¹⁴⁵ Taj se potencijal danas sve uspješnije iskorištava u industriji igara; Baxter, 2022, s. 6

¹⁴⁶ Schaub, 2002, s. 23

¹⁴⁷ Kubisch, n. d.

¹⁴⁸ Kubisch C, n. d.

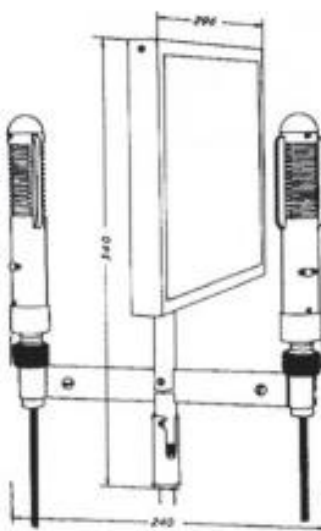
¹⁴⁹ *Električne šetnje* Zagreb, 2021.

Pseudobinauralne tehnike snimanja

Postoje, međutim, razne tehnike snimanja kojima su audioinženjeri pokušavali zadržati iznimnu prostornost snimke koju nudi binauralno snimanje, a da istovremeno omoguće i ispravnu reprodukciju preko zvučnika bez korištenja kompliciranog i skupog transauralnog pretvarača.

Madsenov par i Jecklinov disk

Jednu od prvih takvih tehnika smislio je Erik Madsen 1957. godine.¹⁵⁰ Madsen je koristio par osmičastih mikrofona s trakom sa zvučnom barijerom u obliku kvadrata.



Slika 18. Dijagram postave Madsenova para.¹⁵¹

Madsenova tehnika, međutim, nije izvršila značajniji utjecaj, za razliku od tehnike koju je osmislio švicarski inženjer Jürg Jecklin, koja se koristi daleko više.¹⁵² Jecklinova varijanta mikrofonskog para sa zvučnom barijerom između mikrofona vrlo se često koristi za potrebe snimanja klasične glazbe, kao i snimanja terenskih snimaka u prirodi. Zvučna barijera zapravo je tip akustičke pregrade u obliku kvadrata ili kruga, koji je izrađen od drveta ili pleksiglasa s apsorpcijskim materijalom. Jecklin je svoju tehniku nazvao

¹⁵⁰ Rayburn, Eargle, 2012, s. 244.

¹⁵¹ Rayburn, Eargle, 2012, s. 246.

¹⁵² Toft, 2020, s. 53.

Optimum Stereo Signal, a bazirao je na inicijalnoj Blumleinovoj tehnici *Baffled Difference Technique*.¹⁵³ Kao i kod gotovo podudarnih parova i binauralnih snimki, Jecklinova tehnika snimanja također pokreće lokalizacijske mehanizme interauralnih razlika u intenzitetu i interauralnih vremenskih razlika.¹⁵⁴ Jecklinova tehnika posebno dobro oponaša kašnjenje zvuka, zbog čega iznimno vjerno podražava i interauralne vremenske razlike. Ako se izvor zvuka nalazi točno na lateralnoj osi, zvuk će kasniti u dalji mikrofonski za otprilike 0.7 milisekundi, što je vrlo slično kašnjenju u drugo uho u istom slučaju.¹⁵⁵ Ipak, binauralna tehnika točnije oponaša ljudsko slušanje i sva izobličenja zbog kompleksnosti glave kao zvučne barijere. Jecklinova tehnika najčešće koristi pregradu u obliku kruga, zbog čega se tehnika često zove Jecklinov disk. Zbog toga je difrakcija zvuka kod primjene Jecklinove tehnike znatno jednostavnija od difrakcija koje nastaju uslijed odbijanja zvuka o glavu.¹⁵⁶



Slika 19. Primjer postave Jecklinova diska.¹⁵⁷

Konfiguracija mikrofona prvotne Jecklinove tehnike iz 1981. godine nalaže korištenje kondenzatorskih mikrofona s kapsulama neusmjerene karakteristike. Kapsule trebaju biti udaljene 16.5 centimetara s kutom od 20°. Osim toga, promjer diska mora biti 28 centimetara. Međutim, češće se koristi udaljenost od približno 36 centimetara s kutom od

¹⁵³ McRobbie, Moffat, Clark, 2012, s. 1.

¹⁵⁴ Toft, 2020, s. 54.

¹⁵⁵ Rayburn, Eargle, 2012, s. 244.

¹⁵⁶ Rayburn, Eargle, 2012, s. 244.

¹⁵⁷ Owsinski, n. d.

20° i promjerom diska od 35 centimetara¹⁵⁸. Moguća su različita rješenja, a jedino je važno da disk koji se koristi sadrži materijal koji apsorbira zvuk s obje strane diska.

SASS i SAAM

SASS (eng. *Stereo Ambient Sampling System*) je patentirani model mikrofona tvrtke Crown koji su osmislili Bruce Bartlett i Michael Billingsley. Dizajn ovoga mikrofona toliko je drukčiji od ostalih konvencionalnijih mikrofona da se i sam mikrofoni može nazvati tehnikom snimanja. SASS je pseudobinauralni mikrofoni, što znači da su njegovi tvorcii pokušali zadržati lokalizaciju i prostornost snimke koja nastaje binauralnom umjetnom glavom, a da se pritom zadrži mogućnost ispravne reprodukcije snimke preko dvokanalnog sustava¹⁵⁹. Po Bartlettu, SASS je iznimno raznovrstan mikrofoni s različitim primjenama. Tako bi se ta mikrofoni trebao moći koristiti za snimanja klasične glazbe, različitih pozadinskih zvukova namijenjenih audiovizualnoj produkciji, različitih filmskih zvučnih efekata itd¹⁶⁰. SASS-mikrofoni koristio se vrlo često za potrebe snimanja klasične glazbe kada se počeo proizvoditi 80-ih godina 20. stoljeća, no danas je vrlo popularan i među onima koji snimaju zvukove prirode¹⁶¹ zbog iznimno dobre lokalizacije, ali i činjenice da se snimke nastale takvim mikrofonom mogu jednako dobro reproducirati preko slušalica kao i preko zvučnika.

Bartlett i Billingsley su dizajnirajući SASS-mikrofoni uzeli u obzir sve važne sastavnice i mehanizme ljudskog slušnog aparata i načina na koje ljudi lokaliziraju izvore zvuka.¹⁶² Kapsule su međusobno udaljene 17.2 centimetara,¹⁶³ što približno odgovara prosječnoj udaljenosti bubnjića. Kapsule su montirane na površinu veliku točno 12.7cm² što SASS čini mikrofonom koji koristi tehnologiju površinskih mikrofona, jednako kao i kod binauralne umjetne glave. Osim toga, kapsule moraju biti postavljene pod kutom od 70°. Za ispravno imitiranje binauralnog načina snimanja iznimno je važna zvučna barijera. SASS-mikrofoni ne nalikuje na umjetnu glavu, iako je efekt vrlo sličan. Koristi se pjena čija je gustoća vrlo slična gustoći ljudske glave,¹⁶⁴ što proizvodi vrlo slične razlike u

¹⁵⁸ Toft, 2020, s. 53.

¹⁵⁹ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 543.

¹⁶⁰ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 546.

¹⁶¹ Mulier 2022; Blake, 2021; Powys, 2017.

¹⁶² Bartlett, Billingsley, 1990, s. 553-554.

¹⁶³ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 546.

¹⁶⁴ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 556.

intenzitetu tako da se smanjuje prolaz visokih frekvencija iznad 1500 Hz na strani mikrofona koja je udaljenija od izvora. Postoje dva modela mikrofona Crown SASS.¹⁶⁵ Prvi je model manje napredan i ne koristi kapsule studijske kvalitete, što znači da snimke imaju veliku razinu šuma inherentnog lošijoj kapsuli. Drugi model koristi studijske mikrofone, što osigurava izvrstan frekvencijski odziv, dinamički raspon, i najvažnije, najbolju prostornost snimke. Kod drugoga modela moguće je koristiti i druge mikrofone, međutim, vrlo je važno da oni imaju kapsule neusmjerene karakteristike. To omogućava da svaka kapsula prima zvučni signal jednake glasnoće u svim smjerovima kod frekvencija niskog spektra. To je iznimno važno jer upravo ta činjenica daje prednost SASS mikrofону u odnosu na binauralnu umjetnu glavu. Dolazak niskih frekvencija iz svih smjerova u isto vrijeme omogućuje kompatibilnost reprodukcije preko zvučnika zbog toga što ne postoje fazne razlike u niskim frekvencijama pa se i zbog toga ne javljaju ni izobličenja spektra¹⁶⁶.



Slika 20. Prikaz mikrofona Crown SASS.¹⁶⁷

SASS-mikrofon vrlo je zanimljiv mikrofon koji se nažalost ne koristi toliko često jer tvrtka Crown, koja ga je patentirala, nije ponudila dovoljno dobra rješenja za različite potrebe snimanja, zbog čega se SASS-mikrofon više ne proizvodi, ali se još uvijek vrlo često koristi za potrebe snimanja zvuka u prirodi. Tvrtka Wildtronics proizvodi inačicu SAAM (eng. *Stereo Ambient Array Microphone*), međutim, zbog jednostavnosti njihova dizajna,

¹⁶⁵ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 546.

¹⁶⁶ Bartlett, Billingsley, 1990, s. 555.

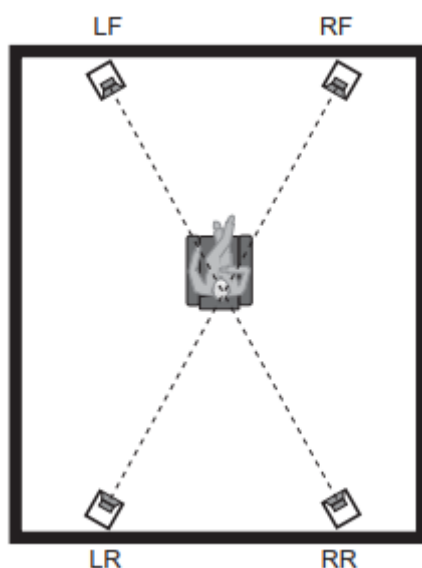
¹⁶⁷ <https://coutant.org/sass/126982.pdf>, pristup 19. rujna 2023.

snimatelji puno češće izrađuju vlastite varijante SASS-mikrofona.¹⁶⁸ Neke od tih varijanti bitno su i unaprijeđene: još su portabilnije i lakše, a njihove kapsule imaju još manje šuma, što kao rezultat daje izvrsnu snimku s lokalizacijom i prostornošću koja je vrlo slična, ako ne i jednaka kao kod snimaka nastalih korištenjem binauralne umjetne glave.

¹⁶⁸ Vidi bilj. 159.

Kvadrofonija

Do sedamdesetih godina 20. stoljeća stereofonija već postaje standard pa se traže nova rješenja kojima je cilj unaprjeđenje slušateljskog iskustva¹⁶⁹. Tada je frekvencijski i dinamički raspon zvučnika već postigao dostatnu kvalitetu pa je primarna potreba za poboljšanjem zapravo bila u domeni lokalizacije i uranjajućeg iskustva. Napredak na tome području podrazumijeva povećanje broja kanala. Kvadrofonija je bila prvi komercijalni pokušaj podizanja standarda reprodukcije zvuka za više od dva kanala. Glavna ideja bila je da se četiri zvučnika postave u četiri ugla prostorije u kojoj se sluša glazba, što omogućuje da slušatelj bude okružen zvukom. Iz toga proizlaze sljedeći zvučni kanali: *lijevo-naprijed*, *desno-naprijed*, *lijevo-straga* i *desno-straga*. Kvadrofonija, dakle, proizlazi iz potrebe da se zadovolji iskustvo svakodnevnoga života u kojemu osoba percipira i lokalizira zvukove iz svih smjerova. Iz toga proizlazi zaključak da stereofonija nakon dvadeset godina dominacije više nije pružala traženo uranjajuće iskustvo.



Slika 21. Primjer kvadrofone postave zvučnika kojom se osiguravaju optimalni uvjeti slušanja.¹⁷⁰

David Hafler prvi je industrijalizirao ideju kvadrofonije. Hafler je 1970. godine predstavio Dynaco QD-1 Quadapter, uređaj koji procesira i sinkronizira dva različita stereofona

¹⁶⁹ Toole, 2008, s. 278.

¹⁷⁰ Toole, 2008, s. 278.

sustava, što rezultira četverokanalnom reprodukcijom¹⁷¹, kvadrofonijskom. Hafler je također iznio komplementarni prijedlog o kvadrofonom četverokanalnom snimanju, što je od velike važnosti jer reprodukcijom bez odgovarajućeg formata snimanja nije kompletan.

Tijekom 1970-ih godina pojavili su se brojni patenti kojima su se proizvođači nastojali popeti na pijedestal sustava reprodukcije zvuka. Od svih patenata najvažniji je bio izum tiskanja četiriju kanala na postojećem vinilnom mediju prilagođenome dvokanalnoj stereofonoj reprodukciji. Dakle, četverokanalna vinilna ploča zapravo je adaptacija dvokanalne vinilne ploče. Takvo rješenje nije bez manjkavosti; dapače, proizvođači nikada nisu uspjeli riješiti određene probleme, zbog čega je kvadrofonijska jednostavno iščezla.

Dva glavna tehnička problema zbog kojih je kvadrofonijska proglašena neuspjehom bili su preslušavanje i premala frekvencija uzorkovanja¹⁷². Preslušavanje je problem koji rezultira reprodukcijom dijela audiosignala s jednog kanala na drugi kanal zvukovnog zapisa. Tako se različiti kanali miješaju, što znatno smanjuje separaciju kanala. Posljedica tog problema očituje se kao pogoršana lokalizacija izvora zvuka. Dakle, tehnologija u tom slučaju pobija samu ideju kvadrofonijske, a to je pružanje iskustva uranjanja u zvuk, kao i poboljšanja lokalizacije izvora oko slušatelja.

Premala frekvencija uzorkovanja s druge strane smanjuje raspon visokih frekvencija što dovodi do degradacije audiozapisa. Upravo su visoke frekvencije jedna od najvažnijih komponenti kvalitetnog slušateljskog iskustva¹⁷³. Percepcija kvalitete zvuka bolja je na stereofonome nego na kvadrofonom sustavu jednakih tehničkih specifikacija zbog bolje definicije visokih frekvencija. Paradoksalno, kako su proizvođači radili na poboljšanju navedenih nedostataka, smanjujući negativne efekte preslušavanja i male frekvencije uzorkovanja, poboljšavali su stereofonu reprodukciju i time osigurali dominaciju stereofonijske i propast kvadrofonijske u isto vrijeme. S druge strane, propast kvadrofonijske imala je, osim tehničkih, i društvene aspekte. Naime, postavile se zvučnici u svakom kutu, idealna pozicija slušanja bi bila točno u sredini kvadrata konfiguracije zvučnika. U odnosu

¹⁷¹ Toole, 2008, s. 277.

¹⁷² Toole, 2008, s. 278.

¹⁷³ Harley, 2010, s. 37.

na stereofoniju, koja promjenom pozicije sjedenja može pogoršati lateralni balans, kod kvadrofonije postoji i medijalni balans pa se može upropastiti odnos naprijed-straga. Zbog toga kvadrofonija još manje omogućuje socijalizaciju od stereofonije.

Kvadrofonija u kontekstu umjetničke glazbe

Iako ima brojne nedostatke zbog kojih je proglašena komercijalnim neuspjehom, ideja kvadrofonije bila je iznimno važna u povijesnom razvoju umjetničke glazbe. Karlheinz Stockhausen bio je jedan od prvih skladatelja koji su na sličan način razmišljali o prostornosti.¹⁷⁴ Tijekom 1955. i 1956. godine skladao je vrlo utjecajno djelo *Gesang der Jünglinge*. Prvotno je htio stvoriti elektroničku misu koja se trebala praizvesti u katedrali u Kölnu, međutim ideja je propala jer crkvene vlasti nisu dopustile korištenje zvučnika u katedrali.¹⁷⁵ Zbog toga je koncept prebacio u formu neliturgijskoga sakralnog djela.

Glavna Stockhausenova ideja bila je sinteza snimljenog i procesiranog ljudskog glasa s elektroničkim zvukovima koji nalikuju na glas.¹⁷⁶ Glas je snimio jedan dvanaestogodišnji dječak kako bi se postigao timbralni kontinuitet, a elektroničke zvukove izradio je sam skladatelj u elektroničkom studiju Zapadnonjemačkoga radija u Kölnu. Kako bi realizirao ideju, Stockhausen je izrezivao analogne magnetske vrpce sa snimkom glasa, pritom rastavljajući tekst koji nosi značenje na pojedine samoglasnike i suglasnike. Analizom je utvrdio kako su samoglasnici vrlo slični sinusoidnim tonovima, što je mogao lako rekreirati elektronički, dok su praskavi suglasnici sličniji različitim šumovima¹⁷⁷. Jedanaest stihova, koji su uglavnom nerazumljivi zbog rastavljanja na slogove, Stockhausen je preuzeo iz *Knjige o Danijelu*, a razumljivi stih koji se više puta ponavlja kroz kompoziciju glasi: „Blagoslovljen i hvaljen budi Gospode.“

Svim navedenim elementima Stockhausen dodaje komponentu prostornosti. *Gesang der Jünglinge* prva je elektronička skladba sa serijalizacijom lokalizacije zvuka u prostoru.¹⁷⁸ Tako Stockhausen otvara kompletno novu dimenziju zvuka u domeni elektroničke glazbe. Upravo je najvažnija i najutjecajnija ideja te skladbe postizanje onoga što prije nije uopće

¹⁷⁴ Sterne, 2015, s. 74.

¹⁷⁵ Smalley, 2000, s. 1.

¹⁷⁶ Stockhausen, 1963, s. 51-52.

¹⁷⁷ Smalley, 2000, s. 1.

¹⁷⁸ Smalley, 2000, s. 10.

bilo moguće – dojma pomicanja izvora zvuka.¹⁷⁹ Tako po prvi puta u povijesti glazbe izvori zvuka imaju vlastitu putanju. U skladbi *Gesang der Jünglinge* te su putanje jednostavne, i to najčešće u obliku kruga, jer je Stockhausenova ideja bila da stvori dojam kruženja izvora zvuka oko slušatelja. Na taj način dinamička promjena smjera izvora zvuka postaje još jedan glazbeni element koji doprinosi dramatizaciji i dinamici glazbenog djela.

Iako je Stockhausenov rad na *Gesang der Jünglinge* revolucionaran, treba uzeti u obzir da se radi o vrlo jednostavnim kružnim putanjama, ali kvadrofonija naravno omogućuje i lokalizaciju statičnih izvora zvuka oko slušatelja, što također znatno poboljšava osjećaj uronjenosti u zvuk. Također treba uzeti u obzir da je djelo praizvedeno 1956. godine. Dakle Stockhausen je baratao kvadrofonijom bitno prije njezine komercijalizacije 1970-ih godina. Prvotno je zamislio da *Gesang* bude petokanalno djelo, a tako je i praizvedeno.¹⁸⁰ Pet skupina zvučnika bilo je postavljeno oko slušatelja u koncertnoj dvorani – četiri skupine zvučnika postavljene su u kutovima dvorane, dok je peta skupina postavljena na pozornicu. Međutim, u vrijeme praizvedbe postojale su isključivo četverokanalne vrpce, pa je Stockhausen morao dodatni kanal snimiti i ručno sinkronizirati s četverokanalnom vrpcom nadajući se da će svi kanali pritom biti usklađeni. Vrlo je vjerojatno da Stockhausen cilj nije ispunio, ili je ručna sinkronizacija bila previše teška, pa je naknadno pomiješao pet kanala u četiri. Tek nakon praizvedbe *Gesang der Jünglinge* postaje kvadrofonijsko djelo.

Od 1958. do 1960. godine Stockhausen je radio na još jednom četverokanalnom djelu, *Kontakte*. Ideja o rotiranju zvukova oko slušatelja bila mu je u središtu pozornosti.¹⁸¹ Zbog toga je izradio posebnu platformu koja mu je omogućavala fino prilagođavanje efekta rotiranja. Platforma se rotirala brzinom koju je sam Stockhausen određivao. Na platformi se nalazio zvučnik visoke usmjerenosti, a oko platforme kvadrat su činili mikrofoni usmjereni prema zvučniku. Na taj je način Stockhausen reproducirao bilo koji izvor zvuka preko zvučnika, dok su efekt rotiranja snimali mikrofoni.¹⁸² Efekt koji je Stockhausen postigao radom na *Kontakte* toliko je snažan da je rotiranje čujno čak i na

¹⁷⁹ Stockhausen, 1963, s. 49-50.

¹⁸⁰ Smalley, 2000, s. 11.

¹⁸¹ Tee, 2015, s. 156.

¹⁸² Holmes, 2008, s. 67.

stereofonoj verziji djela. Stockhausenova su djela komponirana, snimljena i namijenjena reprodukciji u kontroliranim uvjetima koncertnih prostora.

Kvadrofonija u kontekstu popularne glazbe

S druge strane, Stockhausenove tehničke i umjetničke ideje znatno su utjecale i na stvaratelje popularne glazbe. Stockhausen je toliko utjecao na *The Beatlese* da se njegov lik nalazi na naslovnici albuma *Sgt. Pepper's Lonely Hearts Club Band*. Ponajviše se njegov utjecaj prepoznaje u manipulaciji vrpcom i izradi različitih petlji (eng. *tape loops*). Tijekom produkcije i snimanja pjesme *Tommorow Never Knows*, Paul McCartney je bio inspiriran Stockhausenovom skladbom *Gesang der Jünglinge*, zbog čega je izrađivao različite petlje kao i Stockhausen, što je kasnije iskoristio za nosač zvuka.¹⁸³

S druge strane, članovima benda *Pink Floyd* kvadrofonija je bila način podizanja reproduksijskih standarda i razine uronjenosti slušatelja tijekom koncerata uživo. *Floydi* su u svijetu popularne glazbe bili prepoznati kao predvodnici kvadrofonije, kako na albumima, tako i na koncertima¹⁸⁴. Ideja okruženosti zvukom i uronjenosti u nj u njihovoj je karijeri bila prisutna i prije pojave kvadrofonije. Još su 1967. godine na koncertu koristili poseban reproduksijski sustav koji im je omogućio reprodukciju snimljenih efekata preko zvučnika koji su bili postavljeni iza publike¹⁸⁵ – međutim, tada su svirali u kontroliranom koncertnom prostoru i nikada kasnije više nisu iskoristili taj sustav, što dovodi do zaključka da je bio eksperimentalan i nepouzdan u kontekstu izvedbe uživo.

Nekoliko godina poslije, pojavom uređaja Azimuth Coordinator, *Floydi* sviraju turneje s kvadrofonijskim sustavom. Klavijaturist benda, Richard Wright imao je Azimuth Coordinator montiran na svojoj klavijaturi i pomoću palice na uređaju mogao je ručno rotirati zvuk za 270°. ¹⁸⁶ Nadalje, u prosincu 1972., *Floydi* su započeli turneju svirajući pjesme koje će kasnije biti dio albuma *Dark Side of the Moon*. Na toj turneji bend je želio dodatno povisiti reproduksijske standarde, pa su naručili novi prilagođeni uređaj koji omogućuje još bolje kvadrofonijsko iskustvo slušanja i rotiranje zvukova za 360°. ¹⁸⁷

¹⁸³ Brothers, 2018.

¹⁸⁴ Donnelly, 2015, s. 60.

¹⁸⁵ Donnelly, 2015, s. 60.

¹⁸⁶ Blake, 2008, s. 86-87.

¹⁸⁷ Harris, 2005, s. 61.

Pritom je važno napomenuti kako su *Floydi* u stražnjim zvučnicima reproducirali samo unaprijed snimljeni materijal koji su istodobno sinkronizirali s vlastitim sviranjem. Amplifikacija instrumenata koje su svirali odvijala se preko prednjih zvučnika. Snimljeni materijali najčešće su bili različiti efekti. Recepcija kvadrofonijskog iskustva na spomenutoj turneji bila je izvrsna, čime su *Pink Floyd*i znatno doprinijeli u poboljšavanju uranjajućeg iskustva koncertnih izvedbi uživo. Osim toga, od albuma *Atom Heart Mother* koji je izašao 1970. godine, *Floydi* su objavljivali kvadrofonijske vinilne ploče, a vrhunac kvadrofonijskih ploča kulminira sa izlaskom albuma *Dark Side of the Moon* 1972. godine.

Kvadrofonija i filmska industrija

Iako su određene mane kvadrofonije dovele do propasti sustava u kasnim 1970-im godinama, iz navedenih primjera lako je zaključiti kako je ideja glazbe koja okružuje slušatelja itekako poprimila maha – ideja je ostala, a sustavi su se mijenjali. Međutim, nije okruženost zvukom privlačila samo glazbenike, već i pripadnike filmske industrije koji su težili okruženosti zvukom još od samih početaka zvučnog filma, ali tehnologija nije bila dorasla toj ideji iz ranih 1920-ih godina. S pojavom kvadrofonije inženjeri iz Dolby Laboratories Inc. u toj su ideji prepoznali velik potencijal i način kako pružiti bolje uranjajuće iskustvo u odnosu na ustaljenu konfiguraciju¹⁸⁸. Umjesto standardnih kanala kvadrofonije, Ln-Dn-Ls-Ds¹⁸⁹, inženjeri iz Dolbyja postavili su sljedeću konfiguraciju kanala: lijevo, desno, centar i stražnji kanal¹⁹⁰. Takav su sustav nazvali Dolby Stereo, što je vrlo indikativno jer predstavlja značajan odmak od prvotne ideje kvadrofonije koja pretpostavlja jednaku važnost svakog zvučnog kanala i zvučnika.

Dolby Stereo počiva na stereofonom sustavu s dvama dodatnim kanalima koja dodaju osjećaj uronjenosti. Pritom je važno naglasiti konvencije i standardizaciju panoramskih postavki različitih elemenata filmskog zvuka u navedenome četverokanalnom okruženju. Lijevi i desni kanali, izvedeni iz stereofonog zvuka, najčešće su bili nositelji filmske glazbe i važnih zvučnih efekata. Stražnji kanal imao je funkciju poboljšavanja efekta uronjenosti dodavanjem odjeka različitih izvora zvuka koji su se reproducirali na nekim od prednjih

¹⁸⁸ Toole, 2008, s. 280.

¹⁸⁹ Lijevo-naprijed, desno-naprijed, lijevo-straga, desno-straga.

¹⁹⁰ Hull, 2008, s. 1593.

kanala, kao i dodavanjem manje važnih zvučnih efekata. Međutim, najveći napredak predstavlja središnji kanal na kojem se gotovo uvijek reproducirao samo dijalog¹⁹¹. Odluka uvođenja središnjeg kanala vrlo je važna. Prvenstveno, znači da je Dolby Stereo daleko manje „osjetljiv“ na položaj recipijenta u prostoru. Budući da je središnji kanal zapravo monofoni kanal namijenjen gotovo isključivo za govor, nije toliko važno gdje se recipijent nalazi u prostoru jer će svakako čuti taj vrlo važan zvučni element filma.

Nadalje, stražnji kanal uvijek je znatno tiši od ostalih triju kanala pa položaj u prostoru ne mijenja znatno balans naprijed-nazad. U tome je smislu Dolby Stereo daleko društveniji način slušanja i gledanja od kvadrofonijske. Osim toga, čak i ako slušatelj ne posjeduje zvučnike koji su namijenjeni reprodukciji stražnjeg kanala, neće izgubiti nikakve važne elemente filmskog zvuka dokle god se reproducira ostatak kanala, što čini Dolby Stereo raznovrsnim i na neki način prilagodljivim sustavom. Naposljetku, filmska industrija je s četverokanalnom reprodukcijom postigla uspjeh u odnosu na kvadrofonijsku glazbene industrije ponajviše zbog redefiniranja i standardizacije uloga kanala, ali i standardizacije opreme.¹⁹² Kvadrofonijska je previše ovisila o kućnim uvjetima - prostoru, položaju slušanja i kvaliteti zvučnika. S druge strane, recipijenti filmova daleko su više vremena provodili u kinodvoranama, tj. prostorima namijenjenim za gledanje i optimizaciju različitih sustava, zbog čega je Dolby Stereo uspješniji sustav od kvadrofonijske i predstavlja jako važan pomak u razvoju prostornoga zvuka te postavlja temelj za kasnije okružujuće formate.

¹⁹¹ Geluso, 2018, s. 66.

¹⁹² Hull, 2008, s. 1593.

Okružujući zvuk

Razvoj iz monofonije u stereofoniju, a potom iz stereofonije u kvadrofoniju, zapravo je dodavanje broja kanala i pripadajućih zvučnika oko slušatelja, zbog čega se slušatelja okružuje zvučnicima. Prvi oblik okružujućeg zvuka (engl. *surround sound*), kvadrofonija, nije imala dostatan broj kanala, pa su fantomske slike bile lokalizacijski nedovoljno točne. Dolby Stereo, kao varijanta kvadrofonije, stvara puno bolju i precizniju lokalizaciju oko slušatelja. Međutim, budući da se zvukovi straga reproduciraju preko samo jednog kanala, stražnja zvučna slika nije dostatna za pravu rekreaciju kompletnog zvučnog polja oko slušatelja. Zbog toga dolazi do povećanja broja kanala oko slušatelja kako bi se poboljšala prostornost slušateljskog iskustva.

Okružujući sustavi reprodukcije omogućuju znatno veću fleksibilnost i realističnost prostorne komponente snimke. Kako je Vermeulen zaključio još 1950-ih godina,¹⁹³ rekreiranje iskustva slušanja u koncertnoj dvorani puno je bolje u odnosu na stereofoni sustav zbog fleksibilnosti manipulacije reverberacijom po kanalima sustava. Međutim, prednost okružujućih sustava nije samo rekreiranje nečega što postoji, već i pružanje mnoštva novih opcija koje prije nisu bile moguće onima koji stvaraju i oblikuju zvuk na bilo kakav način. Praizvedba djela Karlheinz Stockhausena *Gesang der Jünglinge* zapravo je preteča skladbi stvorenih specifično za sustave okružujućeg zvuka. Pet kanala omogućilo je Stockhausenu veću lokalizacijsku rezoluciju koju kvadrofonija nije mogla ponuditi.

Međutim, umjesto glazbene industrije, glavni pokretač stvaranja i razvoja sustava okružujućeg zvuka zapravo je bila filmska industrija.¹⁹⁴ Još od samih početaka razvoja zvučnog filma postojala je potreba za okruživanjem gledatelja zvukom u svrhu uranjajućeg iskustva. Patent Edwarda Ameta iz 1911. godine u kojemu zvuk prostorno prati glumca na platnu¹⁹⁵ svjedoči o tome koliko su rano redatelji i dizajneri zvuka promišljali o okružujućem zvuku. Francusko-američki skladatelj Edgard Varèse je 1928. godine stupio u kontakt s tada vodećom tvrtkom Bell Labs i vodećim istraživačem Harveyem Fletcherom kako bi uspostavio eksperimentalni studio koji bi mu omogućio

¹⁹³ Vidi poglavlje stereofonija.

¹⁹⁴ Toole, 2008, s. 273.

¹⁹⁵ Boren, 2018, s. 51.

istraživanje prostornosti zvuka.¹⁹⁶ Nažalost, taj zahtjev nije odobren zbog sumnji u isplativost projekta.

Međutim, Fletcher je umjesto Varèsea zaposlio dirigenta Leopolda Stokowskog. On je tada još uvijek razmišljao o stereofoniji kao o načinu koji će omogućiti okruživanje zvukom i pružiti slušatelju trodimenzionalnost prilikom slušanja glazbe.¹⁹⁷ Ideja Stokowskoga bila je stvaranje posebnih dvorana u kojima bi se slušatelja okružilo zvučnicima postavljenima na zidovima dvorane. Takva „antifona“ reprodukcija, kako ju je Stokowski nazivao, bila je njegova ideja okružujućega dvokanalnog zvuka. Rani eksperimenti Fletchera i Stokowskog doveli su do realizacije filma *Fantasia*, prvog filma koji koristi okruživanje zvukom.¹⁹⁸ Taj film Walta Disneya prvi je put prikazan 1940. godine, a gledatelje su okruživale tri skupine zvučnika koje su prenosile tri kanala snimljena preko tri različita mikrofona. Sustav koji je reproducirao zvuk zapravo je bio kompleksan za svoje vrijeme, zbog čega je i patentiran i nazvan po filmu, *Fantasound*. Bilo je još filmova koji su se prikazivali na sličan način u to doba, međutim, sve ih se može nazvati eksperimentima iz jednostavnog razloga što takva tehnologija nije opstala, odnosno, zaustavila se isključivo na prikazivanju jednoga filma. Troškovi izrade takvog sustava i svih sljedećih reprodukcija bili su vrlo visoki, zbog čega su to mogli biti samo filmovi unutar holivudskih okvira.¹⁹⁹

Pojavom kvadrofonijske razvija se spomenuti sustav Dolby Stereo koji je bio vrlo važan za filmsku industriju jer je zvukovno vrlo jasno razdvajao standardne monofone i stereofone sustave koji su se koristili u televizijskoj industriji.²⁰⁰ Na taj je način filmska industrija osigurala zvukovni primat nad slabijim televizijskim sustavima. Nadalje, u 1980-im godinama dolazi do pravog razvoja okružujućih sustava. Prvi audiovizualni pokušaji s dvama različitim stražnjim kanalima bila su eksperimentalna prikazivanja filma *Superman* 1978. godine. Sljedeće, 1979. godine prikazivao se i film *Apocalypse Now* u petnaest posebno opremljenih kinodvorana.²⁰¹ Upravo su kontrolirani uvjeti kinodvorane stvorili pretpostavke za standardizaciju i razvoj kvalitetnih reprodukcijских

¹⁹⁶ Valiquet, 2011, s. 42.

¹⁹⁷ Valiquet, 2011, s. 42-43.

¹⁹⁸ Boren, 2018, s. 51.

¹⁹⁹ Toole, 2008, s. 273.

²⁰⁰ Hull, 2008, s. 1593.

²⁰¹ Hull, 2008, s. 1595.

sustava zbog toga što su se proizvođači zvučnika mogli osloniti na činjenicu da će njihovi zvučnici biti postavljeni u akustički kontroliranim i predvidivim uvjetima. Zbog toga tijekom 1980-ih godina nastaje THX²⁰² kao sustav kontrole kvalitete koji proizlazi iz potrebe standardizacije sustava, kako u kino dvoranama, tako i u kućnim kinima.²⁰³ Prije prikazivanja svakog filma, u dvorani opremljenoj THX sustavom pušta se kratki zvukovni komad nazvan *Deep Note*. Taj kratki komad služi tome da se gledatelj uvjeri kako se nalazi u prostoriji s izvrsnim zvukovnim sustavom. *Deep Note* zapravo pokazuje mogućnosti iznimnoga frekvencijskog i dinamičkog raspona što je bio velik nedostatak većine reproduksijskih sustava. Pojavom kućnih kina 1980-ih godina proizvođači su iskorištavali početno ushićenje gledatelja tako da su stvarali lošije reproduksijske sustave kako bi iskoristili prosječan postojeći stereofoni sustav i još dodali jeftine zvučnike koje okružuju gledatelje. U tome je smislu filmska industrija imala naizgled nerješiv problem poput onoga kakav je imala i glazbena industrija s kvadrofonijom. Međutim, pojavom THX-a dolazi do značajnog poboljšanja zvuka u kinodvoranama, zbog čega je rasla i kvaliteta sustava u kućnim kinima te je stoga filmska industrija stekla primat nad glazbenom industrijom u smislu razvoja reproduksijskih sustava.

Tehnike snimanja okružujućeg zvuka

Okružujući zvuk najčešće ima naglašenu prostornost, što je ujedno i razlog zbog kojeg je takav način reprodukcije uopće i stvoren. Zbog toga se prilikom snimanja izvora zvuka najčešće i naglašava snimanje prostorne komponente.

Okružujući zvuk nema fiksni broj kanala kao npr. stereofonija pa je prilikom snimanja važno izjednačiti broj snimljenih i reproduciranih kanala.²⁰⁴ Manjak snimljenih kanala znači gubitak prostornosti, a višak znači da se neće reproducirati sve zvučne informacije.

Podudarne tehnike snimanja okružujućeg zvuka

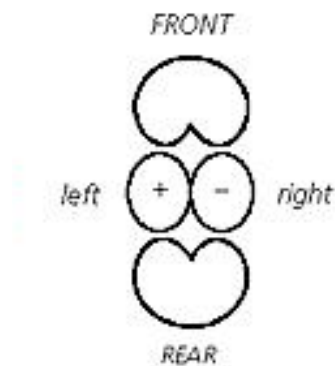
Najčešće se koristi podudarna tehnika snimanja okružujućeg zvuka nazvana dvostrukom MS-tehnikom koja je derivat već navedene tehnike stereosnimanja. U odnosu na

²⁰² TH označava inicijale tvorca sustava, Tomlinsona Holmana, dok X označava eksperiment.

²⁰³ <https://www.thx.com/about/>, pristup 19. rujna 2023.

²⁰⁴ Pulkki, 2015, s. 287.

standardnu tehniku dodan je još jedan kanal, tj. M-mikrofon koji je postavljen 180° u odnosu na prvi M-mikrofon.²⁰⁵



Slika 22. Dijagram dvostruke MS-tehnike.²⁰⁶



Slika 23. Primjer postave za dvostruku MS-tehniku.²⁰⁷

To omogućuje snimanje i stražnje zvučne slike. Kao i kod standardnog MS-para, zadržava se postproduksijska fleksibilnost, što je iznimno korisno jer na taj način audioinženjer može snimiti kompletnu zvučnu sliku i naknadno odlučiti koliko je za određeni zvučni

²⁰⁵ Rayburn, Eargle, 2012, s. 224.

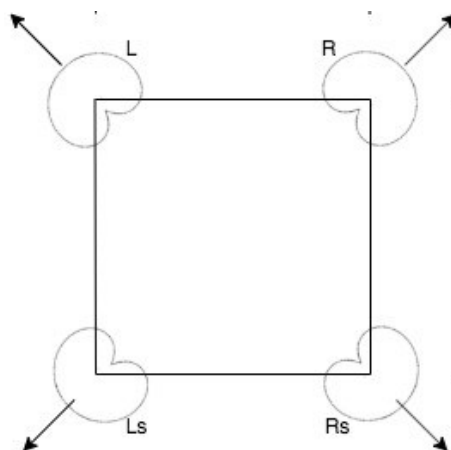
²⁰⁶ Wittek, Haut, Keinath, 2010, s. 6.

²⁰⁷ Wittek, Haut, Keinath, 2010, s. 1.

izvor važna prostornost zvuka. Osim toga, ovaj mikrofonski sustav zauzima jako malo prostora i ima odličnu monokompatibilnost što dvostruki MS čini iznimno korisnom i fleksibilnom tehnikom snimanja.

Gotovo podudarne tehnike snimanja okružujućeg zvuka

Vrlo često korištena gotovo podudarna tehnika je i IRT (njem. Institut für Rundfunktechnik), koja je zapravo derivat tehnike stereosnimanja NOS. Postojećem NOS-paru dodaje se još jedan par s istim udaljenostima što međusobno tvori kvadrat. Može se zaključiti kako se tehnika IRT vrlo često koristi za snimanja zvuka za filmove zbog toga što u njoj nema petoga kanala koji je u filmovima najčešće namijenjen isključivo govoru.



Slika 24. Dijagram IRT-tehnike.²⁰⁸



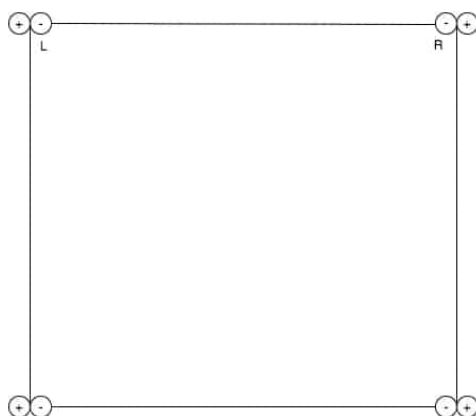
Slika 25. Primjer postave za IRT-tehniku.²⁰⁹

²⁰⁸ Fox, n. d.

²⁰⁹ <https://schoeps.de/en/products/accessories/accessories-surround-3d/irt-250.html>, pristup 19. rujna 2023.

Razmaknute tehnike snimanja okružujućeg zvuka

Okružujući oblik razmaknutog para je Hamasaki. Kod takve tehnike koriste se kondenzatorski mikrofoni ili mikrofoni s trakom, a važno je da im usmjerna karakteristika bude osmičasta. Kao i kod tehnike IRT, mikrofoni kod tehnike Hamasaki međusobno tvore kvadrat s udaljenošću kapsula od 250 centimetara. Kapsule su postavljene u međusobnom kutu od 90°, a strane kapsula s negativnim polaritetom okrenute su prema sredini sustava.



Slika 26. Dijagram Hamasaki tehnike.²¹⁰



Slika 27. Primjer postave Hamasaki tehnike.²¹¹

²¹⁰ Fox, n. d.

²¹¹ <https://lewisholmes1825.wixsite.com/lhsoundengineer/single-post/2015/05/31/ambient-miking-hamasaki-square>, pristup 19. rujna 2023.

Iz navedenog je jasno kako su mikrofonske tehnike okružujućeg zvuka najčešće derivati koji počivaju na tehnikama stereosnimanja s dodavanjem broja kanala kako bi se izjednačili snimljeni i reproducirani kanali.

Reprodukcijski sustavi okružujućeg zvuka

Prostornost snimke i uranjajući doživljaj znatno se poboljšavaju uvođenjem novih kanala počevši od osamdesetih godina 20. stoljeća. Lokalizacija izvora zvuka ispred slušatelja još je od pojave i razvoja stereofonih sustava iznimno dobra, a kvadrofoniya je trebala riješiti lokalizaciju cijeloga kruga oko slušatelja, što međutim nije uspjela. Međutim, konfiguracija sustava okružujućeg zvuka omogućuje vrlo preciznu lokalizaciju kompletno oko slušatelja. Osim pozicije izvora zvuka, vrlo je važna prednost okružujućeg zvuka manipulacija reverberacijom pomoću koje se varira percepcija udaljenosti.²¹² Kao što je zaključio Vermeulen, stereofoniya ne može pružiti potpuno uranjajuće iskustvo koncertne dvorane jer slušatelja ne okružuju refleksije dvorane, što je međutim slušajući snimku sustavom okružujućeg zvuka moguće.

Sustavi okružujućeg zvuka nemaju fiksni broj kanala kao npr. monofoniya ili stereofoniya. Iz japanskih istraživanja²¹³ moguće je zaključiti kako ipak postoji optimalan broj kanala kojim se postiže iznimno dobra lokalizacija, a da se pritom ne koristi prevelik broj kanala, što bi podrazumijevalo komercijalni neuspjeh jer bi takav sustav bio neisplativ. Pomnom postavom i konfiguracijom šestokanalnog ili osmokanalnog zvuka i pripadajućih zvučnika moguće je postići preciznost lokalizacije koje nudi dvanaestokanalna ili dvadesetčetverokanalna reprodukcija.²¹⁴

Standardizacija reprodukcijskih sustava

Međunarodna telekomunikacijska unija krovna je telekomunikacijska institucija koja, između ostaloga, raspisuje različite standarde vezane uz reprodukciju zvuka. Tehnički dokument koji je unija izdala 2006. godine, *ITU-R BS.775-2*, danas je standard po kojemu se postavlja većina sustava okružujućeg zvuka.²¹⁵ Iz tog je dokumenta jasno kako

²¹² Toole, 2008, s. 294.

²¹³ Tohyama, Suzuki, 1989; Hiyama, Komiyama, Hamasaki, 2002; Muraoka, Nakazato, 2007.

²¹⁴ Toole, 2008, s. 299-300.

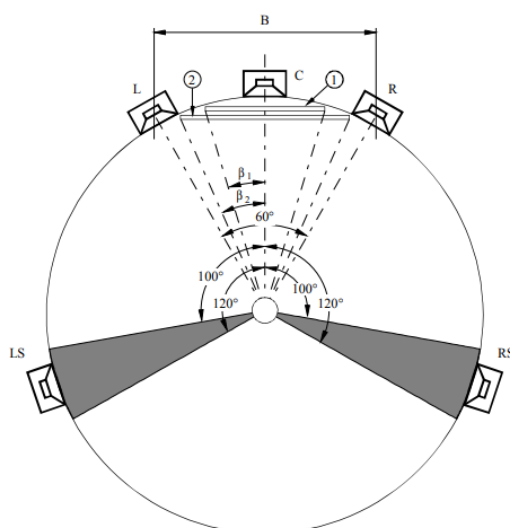
²¹⁵ Brixen, 2020, s. 203.

konfiguracija zvučnika okružujućeg zvuka proizlazi iz standarda postavljenih za stereofonu reprodukciju. *ITU* preporučuje da se centralni zvučnik nalazi na središnjoj osi slušatelja, dok se glavni lijevi i desni zvučnici postavljaju u odnosu od 30° , baš kao i za potrebe stereofone reprodukcije. Svi ostali, dodani zvučnici, bilo za peterokanalnu ili sedmerokanalnu reprodukciju, postavljaju se ovisno o prostoru u kojemu se postavljaju.

Označavanje sustava okružujućeg zvuka klasificira se kao XX – prva brojka označava broj lateralnih kanala, dok druga brojka označava broj kanala namijenjenih za reprodukciju niskih frekvencija. Filmski audioinženjeri gotovo nikada ne koriste $.X$ kanale za glazbu, već za zvučne efekte koji imaju niske frekvencije poput grmljavine ili različitih zvukova kojima je vibracija snažna komponenta doživljaja zvuka. Tako bi se monofoni sustav označio kao 1.0, dok bi se stereofoni sustav označio kao 2.0.

Reprodukcijski sustav 5.1

Reprodukcijski sustav 5.1. osnovna je konfiguracija okružujućeg zvuka iz kojega proizlaze svi drugi sustavi okružujućeg zvuka. 5.1 se bazira na prethodnom kvadrofonom sustavu Dolby Stereo. Postoje različite varijante takvog sustava, kojemu se uglavnom varira međusobni odnos slušatelja i zvučnika: Dolby Stereo SR-D, Surround EX, Digital Theater Systems, Digital Theater Systems Extended Surround, Sony Dynamic Digital Sound, itd. Svi navedeni sustavi zapravo su kreirani za potrebe filmske industrije.



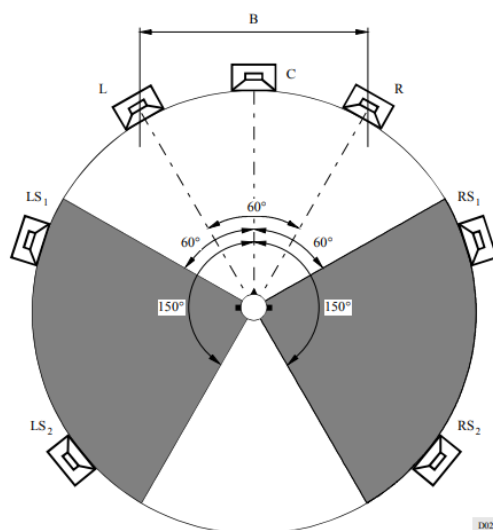
Slika 28. Preporuka Međunarodne telekomunikacijske unije o postavi reprodukcijskog sustava 5.1..²¹⁶

²¹⁶ ITU-R, 1994, s. 3.

Kao što je već rečeno, središnji zvučnik mora biti postavljen na središnjoj osi slušatelja, dok glavni lijevi i desni zvučnici trebaju biti postavljeni u odnosu od 30° , i skupa sa glavom slušatelja moraju činiti odnos jednakostraničnog trokuta. Stražnji lijevi i desni zvučnici mogu biti postavljeni od 100° do 120° u odnosu na slušatelja, a točan odnos ovisi o prostoriji u kojoj se postavljaju zvučnici.²¹⁷

Reprodukcijski sustav 7.1

Dodatno lateralno širenje i dodavanje kanala predstavljaju reprodukcijski sustavi 7.1, koji proizlaze iz potrebe da se još preciznije lokaliziraju izvori sa strana slušatelja. Iako 5.1 sustav ima iznimno dobru lokalizaciju stražnjih izvora, nema tako dobru lokalizaciju sa strana jer su prednji i stražnji zvučnici udaljeniji što čini fantomske slike nepreciznijima.



Slika 29. Preporuka Međunarodne telekomunikacijske unije o postavi reprodukcijskog sustava 7.1.²¹⁸

Analogno tehnikama snimanja, kao što tehnika XY ovisi o kvaliteti mikrofonske kapsule, tako i lokalizacija izvora reprodukcije preko sustava 5.1 iznimno ovisi o kvaliteti zvučnika i prostorije. Sustav 7.1 rješava navedeni problem, međutim velik mu je nedostatak visoka cijena, što ga čini i manje komercijalnim.

²¹⁷ Toole, 2008, s. 301.

²¹⁸ ITU-R, 1994, s. 4.

Zaključak o sustavima okružujućeg zvuka

Okružujući zvuk značajno poboljšava lokalizaciju zvučnih izvora i pruža bolje uranjajuće iskustvo u odnosu na prethodne sustave. Međutim, zvuk koji se sluša preko takvih sustava uglavnom je filmski. Glazba se i dalje najčešće sluša preko slušalica, monofonih i stereofonih sustava, a slušatelji najčešće traže i žele bolje uranjajuće iskustvo, ali pritom ne žele mijenjati već postojeće reproduksijske sustave.²¹⁹

Važno je napomenuti i kako postoje načini okruživanja zvukom bez da se govori o sustavu okružujućega zvuka. Različiti su skladatelji kroz 20. stoljeće okruživali slušatelje zvukom na različite načine. Pierre Boulez 1955. godine piše kako je prostornost posljednji problem izvedbe serijalne glazbe i potom zaključuje kako je stereofonija (tj. sustavi koji poboljšavaju prostornost) dio rješenja toga problema.²²⁰ John Cage je između 1967. i 1969. komponirao djelo *HPSCHD* u kojem 51 monofona magnetska vrpca s pripadajućim zvučnicima reproducira unaprijed izrađene vrpce, s čembalima koja sviraju preko pojačala.²²¹ To je samo jedan od primjera kako su skladatelji okruživali zvukom bez okružujućih sustava.

²¹⁹ <https://news.dolby.com/en-WW/206271-new-survey-from-dolby-reveals-shifts-in-music-listening-behavior-among-adults-in-the-u-s>, pristup 19. rujna 2023.

²²⁰ Valiquet, 2011, s. 44.

²²¹ https://www.johncage.org/pp/John-Cage-Work-Detail.cfm?work_ID=97, pristup 19. rujna 2023.

Ambisonics i uranjajuća tehnologija

Ambisonics

Ambisonični mikrofoni su po Peteru Fellgettu svesmjerni (eng. *omnidirectional*) u pravom smislu riječi.²²² Iako audioinženjeri i danas svesmjernost interpretiraju kao neusmjerenost, Fellgett, Gerzon i Craven su dizajnirali mikrofoni koji ne sadrži samo jednu neusmjerenu kapsulu, već četiri usmjerene kapsule koje pokrivaju kompletno zvučno polje. Sam naziv te tehnologije, *ambisonics*, odražava svesmjernost zvuka. *Ambi* (lat. *ambo*) označava obostranost.²²³ Kao da ta obostranost predstavlja nadogradnju na postojeće mikrofoni s osmičastom usmjernom karakteristikom, koji jesu obostrani, ali svakako nisu svesmjerni. Sonika (eng. *sonics*, lat. *sonus*) označava zvukovlje.

Način na koji se okružujući zvuk snima i reproducira koristeći ambisoničnu tehnologiju potpuno je drukčiji od prethodnih načina produkcije zvuka. Sva je prethodna tehnologija bazirana na kanalima, tj. jedan kanal zvuka se snima i isti se taj kanal može reproducirati preko jednog zvučnika ili više njih spojenih serijski. Takav je način predstavljao, i dalje predstavlja, problem u postizanju realistične prostornosti zvuka zbog toga što previše različitih varijabli utječe na slušno iskustvo. Varijable kao što su kvaliteta reprodukcijanskog sustava i akustičko okruženje u kojemu se sluša značajno utječu lokalizaciju zvuka i prostornost. Svaka tehnika snimanja spomenuta u prethodnim poglavljima ima određene prednosti i nedostatke, poglavito u smislu prostornosti snimke. Također je vrlo važan i reprodukcijanski sustav preko kojega se snimka reproducira, a naposljetku je važan i prostor i akustika u kojemu se nalazi reprodukcijanski sustav. Sve navedene komponente slušanja izrazito utječu na lokalizaciju zvuka. Tehnologija *ambisonics* funkcionira tako da se najprije snimi trodimenzionalno zvučno polje u određenoj točki prostora,²²⁴ a potom s prikladnom postavom zvučnika rekonstruira to snimljeno zvučno polje u bilo kojem drugom prostoru.²²⁵

²²² Thornton, 2009.

²²³ https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=fFthWA%3D%3D&keyword=ambo, pristup 19. rujna 2023.

²²⁴ Toole, 2008, s. 285; Baxter, 2022, s. 49.

²²⁵ Rozenn, 2018 s. 279.

Pritom je važno razumijevanje zvučnog polja, koje se definira kao rezultat kompleksnih kombinacija zvučnih valova koji stvaraju izvori zvuka u određenoj točki u prostoru.²²⁶ Dakle, između ambisonične i prethodne tehnologije znatna je razlika u načinu razumijevanja onoga što se snima. Stereotehnike snimanja uvijek imaju određeni dio zvučnog polja u fokusu, a njihova reprodukcija uvijek izuzima vertikalne informacije i reproducira samo horizontalne zvučne informacije. U prostornom smislu cilj je različitih tehnika stereosnimanja snimanje vremenskih razlika i razlika u intenzitetu radi aktiviranja lokalizacijskih mehanizama, dok je cilj ambisoničnih snimaka rekonstrukcija kompletnog zvučnog polja.²²⁷ Podudarne tehnike i dvostruka MS-tehnika okružujućeg zvuka zapravo su vrlo slične određenim načinima ambisoničnog snimanja i predstavljaju model na kojemu se prvi ambisonični mikrofoni izradio,²²⁸ međutim, kod svih tih tehnika izostaju vertikalne informacije, što znači da rekonstrukcija zvučne sfere nije moguća.

Binauralno je snimanje u tome slučaju izuzetak i posebnost, ali još uvijek nije komercijalno rašireno jer se još nije riješio problem izrade vlastitih HRTF-setova za svakog slušatelja. Osim toga, tehnike snimanja okružujućeg zvuka imaju bolje lokalizacijske mogućnosti, ali se također fokusiraju isključivo na lateralne informacije. *Ambisonics* je u tom pogledu drukčiji jer snima i po mogućnosti reproducira cijelu zvučnu sferu, dakle prilikom snimanja ambisoničnom tehnikom, ne postoje važniji i manje važni smjerovi zvuka, već je cijela zvučna sfera jednako važna.²²⁹ Zvučnu sferu potrebno je raščlaniti na određene dijelove, zbog čega se prilikom snimanja ambisoničnom tehnikom koriste sferni harmonici za analizu prostornih informacija.²³⁰ Sferni harmonici su matematički modeli pomoću kojih se zvučno polje može raščlaniti oko određene točke u prostoru²³¹ što omogućuje određivanje točnog položaja izvora zvuka u snimci. U skladu s time, broj i oblik sfernih harmonika određuje prostornu rezoluciju snimke: što je više sfernih harmonika, to je lokalizacija izvora zvuka preciznija.²³²

²²⁶ Baxter, 2022, s. 48.

²²⁷ Pfanzagl-Cardone, 2023, s. 192.

²²⁸ Pfanzagl-Cardone, 2023, s. 194.

²²⁹ Nicol, 2018, s. 279.

²³⁰ Nicol, 2018, s. 279.

²³¹ Baxter, 2022, s. 47.

²³² Baxter, 2022, s. 48.

Pojam *ambisonics*, kao i teoriju iza takvog načina snimanja, osmislili su Michael Gerzon i Peter Craven sedamdesetih godina 20. stoljeća. Gerzonova je prvotna teorija bazirana na teoriji funkcija sfernih harmonika, koje su, međutim, limitirane na harmonike nultog i prvog reda. Da je nastanak takve tehnologije bio neizbježan svjedoči činjenica da su i Peter Fellgett i Michael Gerzon prijavili vrlo sličan patent za ambisonični mikrofonski sistem iste godine (1983.), a da međusobno nisu znali jedan za drugoga.²³³ Vrlo slično kao i kod tehnike snimanja MS, ambisonične snimke nije moguće reproducirati bez dekodiranja.

Postoje različiti formati snimaka, pa tako i različiti koderi i dekoderi. Ciljni formati ovise o internim formatima snimanja i formatima reprodukcije.²³⁴ Postoje tri najčešće korištena formata ambisoničnih snimaka. Prvi, A-format nije iskoristiv u smislu reprodukcije snimke i prvi je korak ka reprodukciji.²³⁵ Smislio ga je Michael Gerzon, a zapravo pretvara zvučne signale u četiri različita izlaza koji se potom dekodiraju u reprodukcijski iskoristivu snimku. Drugi, B-format predstavlja izlaznu varijantu A-formata koji je spreman za reprodukciju.²³⁶ Postoje dva različita tipa B-formata: stariji, Fu-Ma i noviji, AmbiX. C-format je napravljen za potrebe televizijskoga i radijskoga prijenosa. Taj je format razvijen u prvom redu radi povećavanja kompatibilnosti svih reprodukcijskih sustava preko istog formata.²³⁷

***Ambisonics* prvog reda**

Snimanje

Ambisonične snimke prvoga reda (ili FOA) osmislili su Peter Craven i Michael Gerzon 1977. godine.²³⁸ To je izvorni oblik ambisoničnih snimaka s fiksnim brojem sfernih harmonika, mikrofonskih kapsula i izlaznih kanala. Sferni harmonik nultog reda *W* neusmjerena je komponenta, harmonik *X* razlaže sferu u smjeru naprijed-nazad, harmonik *Y* u smjeru lijevo-desno, a *Z* u smjeru gore-dolje, nakon čega se dobiva osnovna separacija i analiza zvučne sfere oko mikrofona.

²³³ Toole, 2008, s. 285.

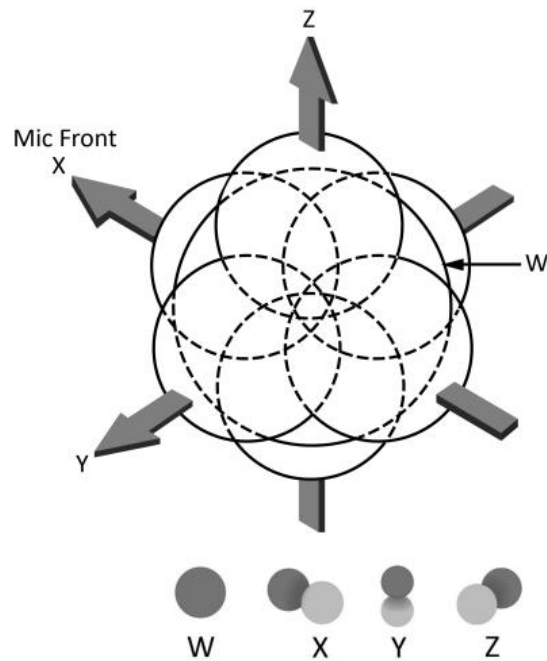
²³⁴ Nicol, 2018, s. 299.

²³⁵ DeLouise, Ottenriter, 2020, s. 167.

²³⁶ Nicol, 2018, s. 299.

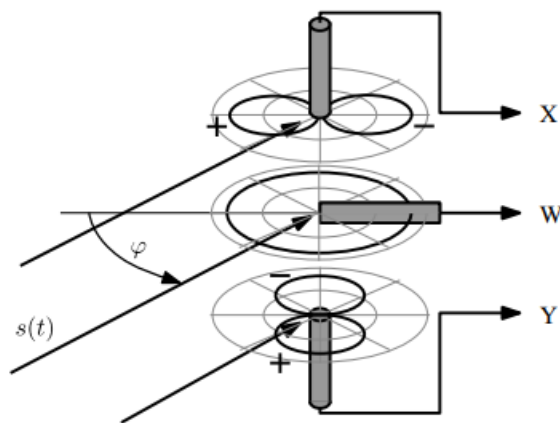
²³⁷ Nicol, 2018, s. 299.

²³⁸ Nicol, 2018, s. 279.



Slika 30. Dijagram koji pokazuje na koji se način sferni harmonici razlažu oko točke u prostoru prilikom snimanja ambisonične snimke prvoga reda.²³⁹

Postoje dva načina realizacije FOA-snimaka. Prvi podrazumijeva korištenje više mikrofona koji se nalaze u određenom odnosu. Taj sustav čini jedan mikrofonski neusmjerenom kapsulom u središtu sustava i tri dodatna mikrofona s osmičastom kapsulom usmjerena poput osi Kartezijeva koordinatnog sustava.²⁴⁰



Slika 31. Dijagram tehnike FOA.²⁴¹

²³⁹ Nicol, 2018, s. 281.

²⁴⁰ Zotter, Frank, 2019, s. 9-10.

²⁴¹ Zotter, Frank, 2019, s. 6.



Slika 32. Primjer postave tehnike FOA.²⁴²

Drugi je način korištenje posebnog FOA-mikrofona. Takav mikrofoni ima kapsule blisko postavljene u tetraedarsku konfiguraciju.²⁴³ Zbog toga što je to jedan mikrofoni, a ne sustav građen od nekoliko mikrofona, jednostavniji je i brži način za snimanje FOA-snimaka. FOA-mikrofoni vrlo je sličan već postojećim podudarnim parovima sa svim prednostima i nedostacima takvih parova – prednosti su fleksibilnost i jednostavnost, dok je glavna mana nedovoljna prostornost rezultirajuće snimke.²⁴⁴ Međutim, reproducira li se FOA snimka preko adekvatnoga uranjajućeg (eng. *immersive*) reprodukcijanskog sustava, prostornost je daleko bolja u odnosu na podudarne stereoparove.

Reprodukcija

Filozofija reprodukcije ambisoničnih snimaka posve je drukčija od one prethodnih tehnologija. Primjerice, dvokanalna stereofona snimka reproducira se tako da lijevi zvučnik rekreira isti zvučni val po frekvencijskom spektru i amplitudi koji je snimio lijevi mikrofoni na lijevom kanalu, a ista stvar vrijedi i za desni kanal. Tomu naprotiv, reprodukcija ambisonične snimke zapravo je sinteza zvučnog polja koje je snimljeno ambisoničnim mikrofonom tako da se rekombiniraju amplitude snimljenih sfernih harmonika, što kao rezultat daje zvučno polje koje točno odgovara onomu što je

²⁴² Zotter, Frank, 2019, s. 6.

²⁴³ Nicol, 2018, s. 279.

²⁴⁴ Pfanzagl-Cardone, 2023, s. 194.

snimljeno.²⁴⁵ Dakle, ključno je kodiranje i dekodiranje: valjano kodiranje omogućuje ispravnu analizu na četirima različitim sfernim harmonicima, a valjano dekodiranje omogućava ispravnu reprodukciju snimljenoga.

Nadalje, budući da se snima zvučna sfera – dakle, i vertikalne informacije koje ulaze u sferni harmonik Z – potrebni su i zvučnici koji moraju biti postavljeni iznad slušatelja kako bi se ispravno reproducirala cijela zvučna sfera. Upravo dodavanje vertikalnih kanala predstavlja najveći pomak i najveću razliku između uranjajuće reprodukcije i reprodukcije okružujućeg zvuka. Međutim, nedostatak kod reprodukcije takvih snimaka jest potreba da slušatelj bude pozicioniran na točno određenom mjestu kako bi balans amplituda bio ispravan. U tom je slučaju reprodukcija FOA-snimki nedruštven način slušanja jer u jednoj prostoriji samo jedna osoba može čuti pravi balans snimke.²⁴⁶ Upravo je to i najveća mana FOA-snimaka: prostor unutar kojega se može čuti apsolutno ispravan balans toliko je skučen²⁴⁷ da se može zaključiti kako zapravo nitko ne može čuti apsolutnu rekreaciju zvučnog polja preko zvučnika. Međutim, takve snimke i dalje imaju iznimnu prednost u pogledu fleksibilnosti: prilagođavaju se različitim reproduksijskim sustavima, pa primjerice reproducira li se takva snimka preko dvokanalnoga stereofonog sustava, i dalje se zadržavaju lateralni balans, a još je važnije da se reproducira i kompletan spektralni sadržaj bez izostavljanja ikakvih zvučnih informacija.

***Ambisonics* viših redova**

Zbog navedenih nedostataka FOA-snimanja i reprodukcije, kroz osamdesete godine 20. stoljeća razvija se koncept ambisoničnih snimaka viših redova, što zapravo predstavlja generalizaciju i širenje prvotne ideje Gerzona i Cravena koja je bila limitirana na početne sferne harmonike.²⁴⁸ Dakle, *ambisonics* viših redova (ili HOA) format je koji je neovisan o internim formatima snimanja i reprodukcije: nije važno kojim će se mikrofonom snimati ili s koliko mikrofona, niti preko kojeg će se reproduksijskog sustava snimka slušati, već

²⁴⁵ Baxter, 2022, s. 48.

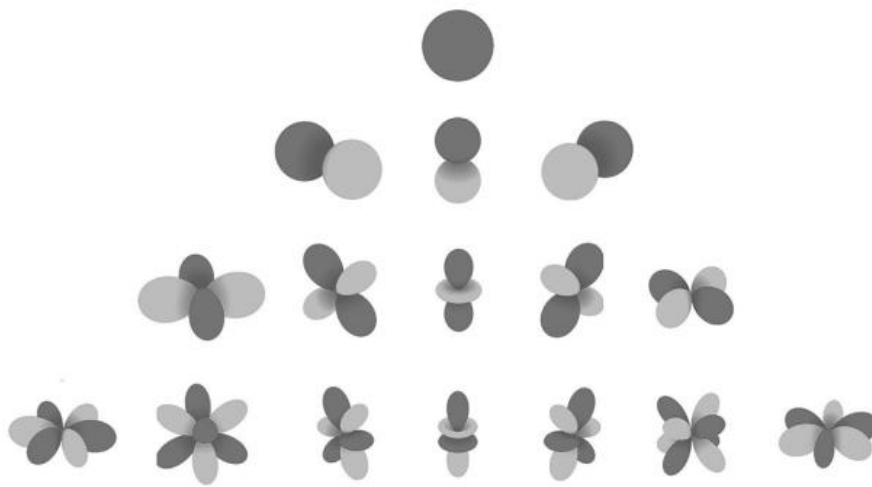
²⁴⁶ Nicol, 2018, s. 288.

²⁴⁷ Pfanzagl-Cardone navodi kako je prostor jednak otprilike veličini loptice za tenis - Pfanzagl-Cardone, 2023, s. 194.

²⁴⁸ Pfanzagl-Cardone, 2023, s. 190.

je to fleksibilan format koji sadržava zvučne informacije koje se razlažu na određeni broj sfernih harmonika.²⁴⁹

HOA nastaje iz potrebe da se generalizira i poboljša Gerzonov koncept, i to ponajviše radi bolje prostornosti snimke. FOA zapravo predstavlja početnu ideju potpuno nove filozofije i razmišljanja o produkciji zvuka, dok HOA bolje i potpunije iskorištava potencijal ideje *ambisonicsa*. Što je veći broj kapsula, to je više sfernih harmonika, a rezultirajući harmonici imaju kompleksnije usmjerne karakteristike, što omogućava daleko bolju lokalizaciju izvora zvuka.²⁵⁰



Slika 33. U odnosu na FOA-mikrofon (prvi i drugi red prikazan na slici), HOA-mikrofon ima bolju prostornu rezoluciju zbog toga što se zvučno polje može raščlaniti na više sfernih harmonika (slika prikazuje harmonike do trećeg reda).²⁵¹

Viši red snimke naravno povećava i broj potrebnih mikrofonskih kapsula, kao i broj potrebnih kanala za snimanje, što dakako povećava cijenu mikrofona.

²⁴⁹ Nicol, 2018, s. 293.

²⁵⁰ Nicol, 2018, s. 288.

²⁵¹ Nicol, 2018, s. 286.



Slika 34. Usporedba FOA-mikrofona (prikazan s lijeve strane) i HOA-mikrofona (prikazan s desne strane).²⁵²

Osim toga, veći broj kapsula smanjuje mogućnost podudarnosti kapsula, što može značiti da monokompatibilnost nije dobra. Zbog toga se vrlo često koriste kapsule s MEMS-tehnologijom. Velika je prednost tih kapsula vrlo mala veličina i niska cijena, međutim, imaju i velik nedostatak: naime, MEMS-kapsule još uvijek nisu jednako kvalitetne kao standardne kapsule koje se koriste u klasičnim studijskim mikrofona. Vjerojatno je upravo to razlog zbog kojega HOA-mikrofon studijskih standarda još uvijek nije proizveden.²⁵³

Nadalje, velika je reproduksijska prednost HOA-snimaka ta što se povećava prostor unutar kojega je moguće slušati ispravan balans snimke, što značajno olakšava slušanje i poboljšava slušno iskustvo. HOA predstavlja značajan napredak u polju ambisoničnog snimanja i reprodukcije, međutim problem kvalitete snimke još uvijek ostaje neriješen.

Uranjajuća reprodukcija

I u tehnologiji sustava za reprodukciju zvuka javljaju se slične novosti kao i kod ambisoničnog snimanja, kod kojega su sam način snimanja i razmišljanje o njemu bitno drukčiji nego kod prethodnih tehnika. Novi format reprodukcije, koji se danas najčešće naziva uranjajućim (eng. *immersive*) ili trodimenzionalnim audiom (3D *audio*), razlikuje

²⁵² <https://rode.com/en/microphones/360-ambisonic/nt-sf1>, pristup 19. rujna 2023.; <https://www.zylia.co/zylia-pro.html>, pristup 19. rujna 2023.

²⁵³ Pfanzagl-Cardone, 2023, s. 194.

se od starijih tehnologija okružujućeg zvuka po tome što se dodaju i zvučnici koji se postavljaju iznad slušatelja, čime se dobiva nova, visinska komponenta zvuka, Z. Na taj način, dodavanjem visinskih zvučnika, sustav okružujućeg zvuka postaje uranjajuć,²⁵⁴ a ključna je razlika u tome što zvuk slušatelja više ne okružuje samo lateralno, već i sferično, zbog čega se po prvi puta uistinu može govoriti o reprodukciji kompletnoga zvučnog polja. U tome smislu prostornost i uranjajuće iskustvo reprodukcije preko zvučnika s *immersive*-tehnologijom dostiže vrhunac.

Prostornost se iznimno poboljšava zbog toga što se po prvi puta počinje aktivirati spektralni lokalizacijski mehanizam. U istraživanju koje su proveli Kim, Lee i Pulkki²⁵⁵ ispitanici su morali procijeniti razinu prostorne rezolucije, kao i opću kvalitetu zvuka snimki koje su slušali preko različitih reproduksijskih sistema. Autori zaključuju kako većina ispitanika preferira sustave s dodanim visinskim zvučnicima, kako u poboljšanju prostorne rezolucije, tako i u općeg dojma kvalitete snimke. Rezultati njihovog istraživanja upućuju na zaključak da je za takvu optimizaciju potreban minimum od tri ili četiri visinska zvučnika. Međutim, budući da je tehnologija zvučnika napredovala toliko da su spektralni i dinamički elementi dovedeni gotovo do vrhunca, u daljnjem će razvoju tehnologije ključno biti poboljšati veze i međudjelovanja različitih zvučnika, tj. prostornost zvuka.

U odnosu na prethodne tehnologije višekanalne reprodukcije, uranjajući zvuk uistinu je drukčiji pristup reprodukciji zbog toga što je više format negoli sustav. U tehnologiji okružujućeg zvuka postoje različiti sustavi kao što su 5.1 ili 7.1, koji, međutim, nisu međusobno kompatibilni, tj. snimka koja je namijenjena reprodukciji 5.1 ne može se valjano reproducirati na sustavu 7.1 bez narušavanja ciljanog iskustva slušanja. Međutim, snimka pohranjena u uranjajućem formatu može se reproducirati preko mnoštva različitih konfiguracija zvučnika i različitog broja kanala, a da se pritom zadrže svi važni balansi snimke i prvotna intencija audioinženjera koji je izmiješao sve zvukove u jednu traku.

²⁵⁴ Brixen, 2020, s. 202.

²⁵⁵ Kim, 2018, s. 232.

Objektno zasnovan zvuk

Kanalno zasnovan zvuk do nedavno je bio jedini format snimanja i reprodukcije zvuka. Svaki je izvor zvuka dodijeljen unaprijed definiranim kanalima, bila to monofona, stereofona ili slična produkcija zvuka. Glavna je mana toga formata nekompatibilnost s različitim načinima reprodukcije. Primjerice, ako je snimka izrađena u dvokanalnom formatu, reprodukcija na šestokanalnom okružujućem formatu neće biti zadovoljavajuća jer će se tada iskorištavati samo dva kanala od mogućih šest.

Objektno zasnovan zvuk (eng. *object-based audio*) suvremen je format kojim se svaki izvor zvuka tretira kao zaseban objekt s vlastitim informacijama o položaju i glasnoći. Na osnovu tih informacija, koje određuje audioinženjer, format prilagođava položaj i glasnoću svakoga objekta svakom pojedinom sustavu preko kojega se snimka reproducira.²⁵⁶ Objektno zasnovan zvuk uistinu je radikalna promjena zbog toga što izvor zvuka u procesu miješanja zvuka postaje neovisan o ciljnome reprodukcijском sustavu.²⁵⁷ Audioinženjera više ne zanima ciljni sustav, već on stvara balanse i zvučnu sliku unutar jedinstvene virtualne zvučne sfere u kojoj miješa zvuk. Ta je činjenica iznimno važna jer omogućava slobodu (posebice za one koji se bave umjetnošću u kojoj se stvara zvuk) i ne opterećuje umjetnika tehničkim okvirima ciljnog sustava na kojem će se snimka slušati. Na taj način svi mogu uživati u kreaciji i ideji onoga tko je načinio zvukovni zapis, neovisno o tome kakav reprodukcijски sustav posjeduju.

Prije pojave uranjajućeg formata audioinženjeri su morali odabrati format snimanja svjesni da time ograničavaju publiku na one koji posjeduju odgovarajući reprodukcijски sustav. Uranjajući format rješava taj problem, i to upravo kroz objektno zasnovan zvuk. Izvor zvuka postaje objekt kad mu se dodaju metapodaci s točnim vremenskim (kada zvuk započinje i kada završava) i prostornim koordinatama (informacije o relativnoj glasnoći zvučnog izvora za svaki zvučnik).²⁵⁸ Taj format nadalje rješava i problem spajanja snimaka nastalih u različitim formatima. Tako je npr. snimku orkestra nastalu višekanalnim snimanjem ambisoničnim mikrofonom HOA moguće pridružiti monofonim

²⁵⁶ <https://www.linkedin.com/advice/0/what-benefits-drawbacks-using-object-based>, pristup 19. rujna 2023.

²⁵⁷ Brixen, 2020, s. 206.

²⁵⁸ Brixen, 2020, s. 206.

snimkama pojedinačnih instrumenata, a ispravnu reprodukciju u prostornom smislu omogućava upravo format objektno zasnovanog zvuka.

Uranjajući sustavi

Trenutno postoji više sustava koji omogućuju kodiranje i dekodiranje uranjajućeg formata, a to su najčešće ujedno i sustavi koji omogućuju i samu produkciju zvuka. Najpoznatiji je sustav Dolby Atmos, za koji Brixen kaže da “nije specifični kodek, već filozofija *immersive* produkcije *immersive* zvuka i njegove prezentacije”²⁵⁹ za različite primjene i reproduksijske sustave. Atmos je sustav koji je prezentirala tvrtka Dolby 2012. godine, a iste je godine premijerno prikazan i Pixarov animirani film *Brave* čiji je zvuk produciran s pomoću toga sustava. Opet je, kao i slučaju tehnologije okružujućeg zvuka, moguće zaključiti kako filmska industrija predvodi i ulaže u novu tehnologiju, dok glazbena industrija zaostaje. Međutim, uranjajući se format itekako koristi i u glazbenoj industriji, u kojoj se za produkciju uranjajućeg formata također najčešće koristi sustav Dolby Atmos. Zbog toga što dominira filmskom i glazbenom industrijom Atmos je trenutačni industrijski standard, a radovi nastali a pomoću toga sustava nude se na svim danas utjecajnim servisima kao što su Netflix, iTunes, Hulu, Amazon Prime, itd.²⁶⁰

Iako je konfiguracija zvučnika promjenjiva i stoga manje važna nego kod prethodnih višekanalnih tehnologija, inženjeri iz tvrtke Dolby ipak preporučuju konfiguriranje sustava na postojećim konfiguracijama 5.1 ili 7.1 s dodanim visinskim kanalima.²⁶¹ Kod uranjajućih sustava u oznaku se dodaje novi broj koji označava broj vertikalnih kanala; tako primjerice 5.1.4 označava već spomenutu konfiguraciju 5.1 s dodatnim četirima vertikalnim zvučnicima.

Postoji još sličnih sustava. Poslije sustava Dolby Atmos sustava najčešće se koristi sustav Sony 360, nastao kad i Atmos. Ta su se dva sustava razvijala usporedno, međutim, Atmos je postao industrijski standard, iako se ne može se zaključiti da je on u tehničkom smislu superioran sustavu 360. Razlog se možda krije u činjenici da je Dolby kao tvrtka već dugo

²⁵⁹ Baxter, 2022, s. 126-127.

²⁶⁰ DeLouise, Ottenriter, 2020, s. 169; Baxter, 2022, s. 126.

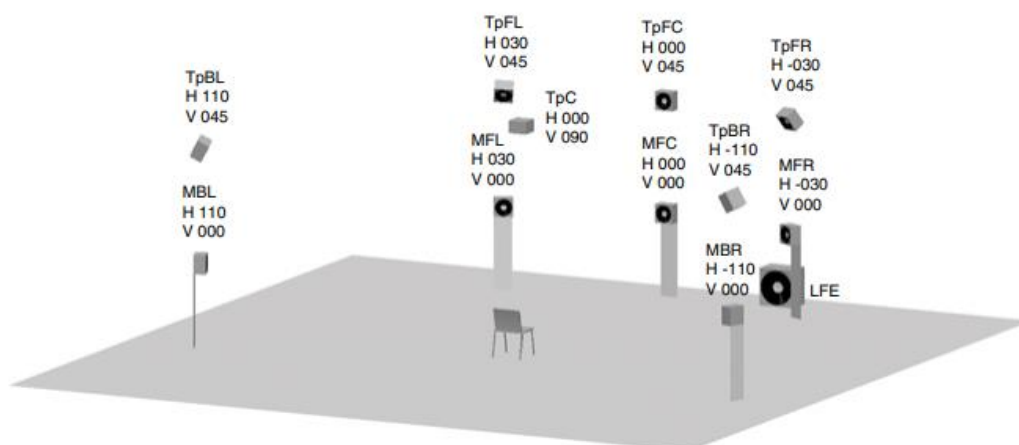
²⁶¹ https://www.dolby.com/siteassets/technologies/dolby-atmos/atmos-installation-guidelines-121318_r3.1.pdf, pristup 19. rujna 2023.

autoritet u filmskoj i glazbenoj industriji (u okvirima reprodukcije zvuka) i stoga u tom pogledu možda ima možda veću važnost od tvrtke Sony.

Različite konfiguracije

Prvi uspješni uranjajući sustav koji se pojavljuje u kinima i u kućnim kinima, a također se koristi i u automobilske industriji i industriji igara, jest Auro 3D. To je prvi format koji omogućuje prijenos velikoga broja kanala bez gubitka kvalitete preko već postojećih standarda za reprodukciju tehnologije okružujućeg zvuka. Dakle, kao i kod nastanka kvadrofonijske, kada su inženjeri prilagodili opremu stereofonije za potrebe kvadrofonijske, tako su i formati okružujućeg zvuka prilagođeni novomu uranjajućem formatu.

Auro 3D gradi se na konfiguraciji zvučnika 5.1 kojima se, međutim, dodaje od 4 do 6 visinskih kanala. Sustav se pokazao iznimno učinkovitim za mnoštvo različitih sustava reprodukcije zvuka i zato se vrlo često koristi u izgradnji kina i kućnih kina.²⁶²

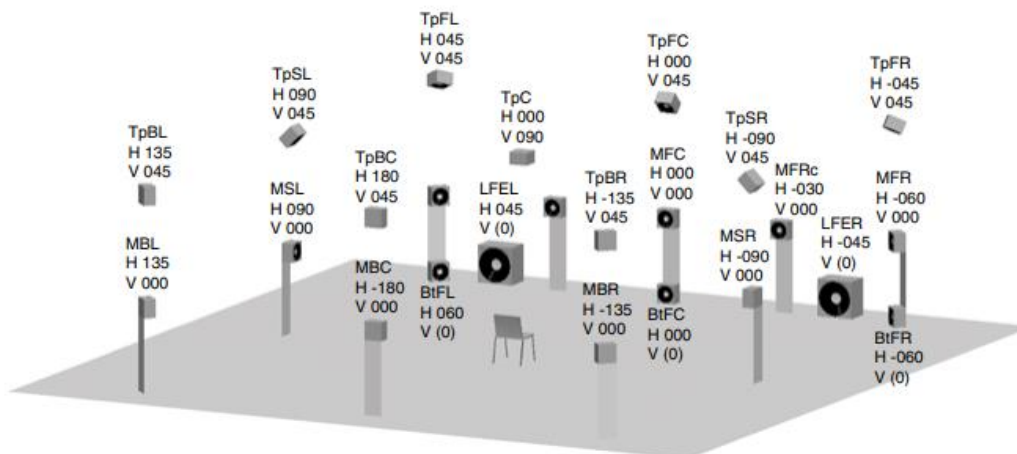


Slika 35. Primjer 11.1 Auro 3D konfiguracije zvučnika.²⁶³

Postoje različite konfiguracije uranjajućih sustava, a čest je slučaj u kojemu državne institucije raspisuju preporuke postave zvučnika za kućna kina kako bi se slušateljima omogućilo optimalno slušno iskustvo.

²⁶² Brixen, 2020, s. 204-205.

²⁶³ Brixen, 2020, s. 205.



Slika 36. Primjer preporuke japanske državne radiotelevizijske ustanove: NKH 22.2.²⁶⁴

Međutim, indikativno je kako postojeća literatura i sami proizvođači formata, sustava i opreme ciljaju ponajviše na gledatelje, a ne slušatelje. Dakle, još od pojave i rekonfiguracije sustava kvadrofonije, prostornost zvuka važnija je filmskoj industriji negoli onoj glazbenoj. Međutim, pojavom iznimno prilagodljivoga uranjajućeg formata, možda će i glazbena industrija prihvatiti mogućnost lokalizacije zvuka unutar cijele sfere, a ne samo plohe između dvaju zvučnika.

***Ambisonics* i uranjajuća tehnologija u umjetnosti**

Ambisonics i uranjajuća tehnologija omogućavaju umjetnicima veliku kreativnu slobodu i priliku da stvaraju zvuk na način na koji to prije nije bilo moguće. Dobar primjer toga je kompozicija *Sama-zan Trip* britansko-iranske skladateljice Shive Feshareki. U kompoziciji se koristi ambisonični DJ gramofonkoji izvođaču omogućuje izmjenu različitih zvukovnih parametara u stvarnom vremenu. Orkestar svira, dok u gramofon ulazi signal preko postavljenih mikrofona, a potom izvođač preko naprave određuje kako i na koji način će se izmijenjena snimka reproducirati preko uranjajućega reproduksijskog sustava u dvorani.²⁶⁵ Na taj način ambisonična tehnologija omogućuje interakciju izvornoga i procesiranog signala u stvarnom vremenu, što je doduše i prije

²⁶⁴ Brixen, 2020, s. 205.

²⁶⁵ Bratić, 2022.

bilo moguće, ali sada je cijela koncertna dvorana zvučno polje, uključujući i visinsku komponentu zvuka.

Zanimljiv je primjer iskorištavanja ambisonične tehnologije i prototip sferičnog zvučnika kojim se koristio Marko Ciciliani prilikom izvedbe djela *SkylAR* na 32. Muzičkom *biennalu* Zagreb,. Sferični zvučnik zapravo je višekanalni sustav koji sličí velikoj verziji HOA-mikrofona, a omogućuje reprodukciju kompletnog zvučnog polja iz jedne točke u prostoru. Ciciliani je stvorio niz multimedijских minijatura za proširenu stvarnost, u čemu mu zvukovno uvelike pomaže iskorištavanje ambisonične tehnologije.²⁶⁶

²⁶⁶ <https://www.mbz.hr/hr/program-2023/16-04/mbz-predavanje-razvoj-reprodukcije-zvuka-u-umjetnosti-i-tehnologiji> ; <https://www.mbz.hr/hr/program-2023/15-04/skylar-multimedijски-koncert-s-elementima-instalacije> ; <https://www.ciciliani.com/skylar.html>, pristup 19. rujna 2023.

Zaključak

Prostorna rezolucija snimaka danas je bolja no ikada prije, a ambisonično snimanje i novi uranjajući reproduksijski sustavi predstavljaju perjanicu tehnologije produkcije zvuka. Ipak, stereofonija ostaje standard u većini industrija koje se bave zvukom, ponajviše zbog jednostavnosti i kompatibilnosti s prosječnim reproduksijskim sustavima potrošača. S jedne strane, ambisonični mikrofoni učestalo se koriste pri snimanju zvukova prirode zbog izražene prostornosti i fleksibilnosti u postprodukciji, međutim, nisu na razini studijskih mikrofona zbog toga što još uvijek nije moguće proizvesti ambisoničan mikrofoni koji će parirati studijskom mikrofoni kako kvalitetom, tako i cjenovno. S druge strane, prostorni reproduksijski sustav ima daleko veći potencijal od kvadrofonijske i sustava okružujućeg zvuka ponajviše zbog prilagodljivosti dekodera, što omogućuje prilagođavanje snimke svakom sustavu posebno. Jasno je kako i filmska, glazbena i industrija igra prepoznaje potencijal takvog sustava, zbog čega danas sve veći broj audiosnimaka nastaje u prostornim sustavima poput Dolby Atmos.

Tema ovoga rada široko je postavljena pa zbog toga ne može sve obuhvatiti. Ponajviše bi bilo zanimljivo istražiti i promotriti sav potencijal koji donose binauralno snimanje i reprodukcija preko slušalica. Danas velik broj slušatelja sluša glazbu preko slušalica, što audioinženjerima predstavlja velik problem jer se isti zvučni izvor manifestira drukčije preko zvučnika nego preko slušalica. Glavni razlog tomu je preslušavanje kada se koriste zvučnici, što kod slušalica fizički ne postoji. Međutim, na tržištu postoji više softverskih rješenja koja simuliraju preslušavanje i tako bolje aktiviraju mehanizam interauralnih vremenskih razlika. Navedeni primjer samo je jedan u nizu različitih problema koje budući inženjeri tek trebaju premostiti kako bi slušanje preko slušalica dostiglo puni potencijal. Također, problem slušanja binauralnih snimki uglavnom je vezan uz HRTF-setove koji se moraju izraditi po mjeri za svakog pojedinca ponaosob. Iako razvijanje trodimenzionalnog skeniranja preko prosječnih mobilnih uređaja nudi moguće rješenje problema, jednostavna, brza i jeftina izrada HRTF-setova još uvijek nije moguća i zbog toga velika većina slušatelja ne može slušati binauralne snimke na pravi način. Ono što također izostaje u radu, a što je izrazito zanimljiva tema, jest sustav WFS (eng. Wave Field Synthesis) koji također ima izniman potencijal u uranjajućoj reprodukciji zvuka; međutim teško je zaključiti kako će biti relevantan široj publici zbog kompleksnosti njegova dizajna.

Različiti pojedinci koji se bave produkcijom zvuka - od popularnih glazbenika, do kompozitora koji se bave umjetničkom glazbe – koristili su različite načine izražavanja prostornosti, ovisno o sustavu unutar kojega su stvarali. Rani pionir stereofonije i višekanalnog zvuka, Leopold Stokowski, razmišljao je u kontekstu klasične glazbe kada je govorio o antifonalnom reprodukcijom sustavu. On je želio približiti publici dojam koncertne dvorane. S druge strane, njegov suvremenik Edgard Varèse imao je drukčije ideje o kreativnoj manipulaciji prostornom komponentom, a te je ideje proveo skladajući *Poème électronique*. John Cage postizao je prostornost korištenjem niza monofonih magnetskih vrpca i pritom je zaobišao višekanalni sustav. Cardiff i Kubisch međutim ne razmišljaju o prostornosti u glazbi, nego o prostornosti zvukovnog doživljaja općenito. Zbog toga koriste binauralne snimke i reprodukciju preko slušalica. Današnja ambisonična tehnologija u kombinaciji sa uranjajućim sustavima omogućava različitim umjetnicima prostorne mogućnosti kakve nikad prije nisu bile moguće, a vrlo je važna činjenica da se sustavi razvijaju i približavaju prosječnom slušatelju što znači da prostornost njihovih djela može iskusiti nikad šira lepeza publike.

Svaki sustav koji je obrađen u ovome radu – monofonija, stereofonija, binauralni sustav, kvadrofonija, okružujući zvuk, Ambisonics i uranjajući zvuk – ima vlastite prednosti i nedostatke, pa je upravo zbog toga teško govoriti o evolucijskom razvoju tehnologije. Danas je monofona produkcija zvuka zastupljena u gotovo jednakoj mjeri kao i stereofona ili uranjajuća produkcija. Razlog tomu vjerojatno leži u međudjelovanju pojedinaca koji stvaraju i onih koji uživaju u produktu. Činjenica da kvadrofonija ima bolju prostornost ne mora nužno značiti da će pojedinac kupiti skuplji reprodukcijom sustav i postaviti ga u zasebnu prostoriju namijenjenu samo slušanju glazbe; možda mu je stereofonija dovoljna. Mislim da je upravo to razmišljanje dovelo do razvijanja uranjajućeg sustava koji se prilagođava postojećemu, a ne nameće nešto novo, te da će upravo zbog toga postati novim produkcijskim standardom.

Bibliografija

Andersson, H. (2014). *Record with MS (mid-side)*.

<https://www.heamusic.com/Documents/Sound/MS-Recording.html>, datum pristupa 19. rujna 2023.

Ballou, G., Ciaudelli, J., i Schmitt, V. (2008). Microphones. U: G. Ballou (ur.), *Handbook for sound engineers*. New York: Focal Press.

Bartlett, B., i Bartlett, J. (2014). *Recording music on location: capturing the live performance*. New York: Focal Press.

Bartlett, B., i Billingsley, M. (1990). An Improved Stereo Microphone Array Using Boundary Technology: Theoretical Aspects. *Audio Engineering Society Journal*, 543-552.

Bartlett, B., i Billingsley, M. (1990). Practical Field Recording Applications An Improved Stereo Microphone Array Using Boundary Technology. *Audio Engineering Society Journal*, 553-565.

Baxter, D. (2022). *Immersive sound production: a practical guide*. New York: Routledge.

Blake, J. (2021). *DIY SASS Microphone w/EM272 Capsules*.

<https://acousticnature.com/journal/how-to-make-diy-sass-microphone>, datum pristupa 19. rujna 2023.

Blake, M. (2008). *Comfortably Numb: the Inside Story of Pink Floyd*. New York: Da Capo Press.

Boren, B. (2018). History of 3D Sound. U: A. Roginska, & P. Geluso (ur.), *Immersive sound: the art and science of binaural and multi-channel audio*. New York: Routledge.

Bosun, X. (2013). *Head-Related Transfer Function and Virutal Auditory Display*. Plantation: J. Ross Publishing.

Bratić, M. (2022). *Ženski koncertni diptih festivala musikprotokoll - "Ići dalje i ne odustati"*. <https://glazba.hr/citaj/izvjestaj/zenski-koncertni-diptih-festivala-musikprotokoll/>, datum pristupa 19. rujna 2023.

Brixen, E. B. (2020). *Audio metering: measurements, standards and practice*. New York: Routledge.

Brothers, T. D. (2018). *Help! the Beatles, Duke Ellington, and the magic of collaboration*. New York: W. W. Norton & Company.

Cardiff, J., i Miller, G. (2023). *Cardiff Miller*. <https://cardiffmiller.com/walks-explanation/>, datum pristupa 19. rujna 2023.

Cheng, C., i Wakefield, G. (2001). Moving Sound Source Synthesis for Binaural Electroacoustic Music Using Interpolated Head-Related Transfer Functions (HRTFs). *Computer Music Journal*, 57-80.

Cirone, J. (2017). Head Related Transfer Functions (HRTFs). *ECE Senior Capstone Project*, (str. 1-3).

DeLouise, A., i Ottenritter, C. (2020). *Nonfiction sound and story for film and video: a practical guide for filmmakers and digital content creators*. New York: Routledge.

Dineen, M. (2014). The Historical Soundscape of Monophonic Hi-Fidelity. *Current Musicology*, 9-20.

Donnelly, K. J. (2015). *Magical musical tour: rock and pop in film soundtracks*. New York: Bloomsbury Academic.

Fox, A. (n.d.). *Top 4 Best Surround Sound Miking Techniques (With 3 Extras)*. <https://mynewmicrophone.com/top-4-best-surround-sound-miking-techniques-with-3-extras/>, datum pristupa 19. rujna 2023.

Geluso, P. (2018). Stereo. U: A. Roginska, i P. Geluso (ur.), *Immersive sound: the art and science of binaural and multi-channel audio*. New York: Routledge.

Harley, R. (2010). *The complete guide to high-end audio*. Carlsbad: Acapella Pub.

Harris, J. (2005). *The Dark Side Of The Moon: The Making Of The Pink Floyd Masterpiece*. Cambridge: Da Capo Press.

Hiyama, K., Komiyama, S., i Hamasaki, K. (2002). The minimum number of loudspeakers and Its arrangement for reproducing the spatial impression of diffuse sound field. *Audio Engineering Society*.

Hoffmann, F. W., i Ferstler, H. (ur.). (2005). *Encyclopedia of recorded sound*. New York: Routledge.

Holmes, L. (n.d.). *Ambient miking: Hamasaki square*.
<https://lewisholmes1825.wixsite.com/lhsoundengineer/single-post/2015/05/31/ambient-miking-hamasaki-square>, datum pristupa 19. rujna 2023.

Holmes, T. (2008). *Electronic and experimental music: technology, music, and culture*. New York: Routledge.

Hull, J. (2008). Surround Sound. U: G. Ballou (ur.), *Handbook for sound engineers*. New York: Focal Press.

ITU-R. (1994). BS.775-1. *Multichannel stereophonic sound system with and without accompanying picture*. International Telecommunications Union.

Judaš, M., i Kostović, I. (1997). *Temelji neuroznanosti*. Zagreb.

Kaywhole. (2015). *The NOS recording technique*.
<https://rtjonathanmillis.wordpress.com/2015/05/01/the-nos-technique/>, datum pristupa 19. rujna 2023.

Kim, S. (2018). Height Channels. U: A. Roginska, i P. Geluso (ur.), *Immersive sound: the art and science of binaural and multi-channel audio*. New York: Routledge.

Kubisch, C. (n.d.). *Electrical Walks*. <https://electricalwalks.org/electrical-walks/>, datum pristupa 19. rujna 2023.

Kubisch, C. (n.d.). *Vita*. <https://christinakubisch.de/vita>, datum pristupa 19. rujna 2023.

- McAllister, M. (2023). *Decoding Mid/Side miking techniques*.
<https://producelikeapro.com/blog/mid-side-miking-techniques/>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- McRobbie, G., Moffat, M., i Clark, F. (2012). Modeling of a Jecklin Disk for Stereophonic Recordings. *COMSOL*, (str. 1-4). Boston.
- Mulier, F. (2022). *SASS-style Stereo Microphone for Nature Recording*.
<https://hackaday.io/project/188609-sass-style-stereo-microphone-for-nature-recording>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- Mulko, M. (2021). *Alan Dower Blumlein, the Forgotten Engineer With 128 Patents*.
<https://interestingengineering.com/innovation/alan-dower-blumlein-the-forgotten-engineer-with-128-patents>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- Muraoka, T., i Nakazato, T. (2007). Examination of multichannel sound field recomposition utilizing frequency dependent interaural cross correlation (FIACC). *Journal of the Acoustical Society of America*, 236-256.
- Nicol, R. (2018). Sound Field. U: A. Roginska, i P. Geluso (ur.), *Immersive sound: the art and science of binaural and multi-channel audio*. New York: Routledge.
- Owsinski, B. (n.d.). *Improve Your Stereo Recordings With A Jecklin Disc*.
<https://bobbyowsinskiblog.com/jecklin-disc/>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- Pfanzagl-Cardone, E. (2023). *The art and science of 3D audio recording*. Cham: Springer.
- Powys, V. (2017). *Recording gear 1*. https://caperteebirder.com/?page_id=284, datum pristupa 19. rujna 2023.
- Pulkki, V. (2015). *Communication acoustics: an introduction to speech, audio, and psychoacoustics*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Rayburn, R. A., i Eargle, J. (2012). *Eargle's Microphone book: from mono to stereo to surround: a guide to microphone design and application*. New York: Focal Press.

Roginska, A. (2018). Binaural Audio Through Headphones. U: A. Roginska, & P. Geluso (ur.), *Immersive sound: the art and science of binaural and multi-channel audio*. New York: Routledge.

Roginska, A., i Geluso, P. (ur.). (2018). *Immersive sound: the art and science of binaural and multi-channel audio*. New York: Routledge.

Schafer, M. R. (1993). *The soundscape: our sonic environment and the tuning of the world*. Rochester: Destiny Books.

Schaub, M. (2005). *Janet Cardiff: The Walk Book*. Köln: Walther König.

Sigismondi, G., Vear, T., & Waller, R. (2014). *Microphone techniques for live sound*. Shure Educational Publication.

Smalley, J. (2000). Gesang der Jünglinge: History and Analysis. *Columbia University Department of Music*, 1-13.

Snow, W. B. (1953). Basic Principles of Stereophonic Sound. *Journal of the Society of Motion Picture and Television Engineers*, 567-589.

Sterne, J. (2015). The Stereophonic Spaces of Soundscape. U: P. Théberge, K. Devine, i T. Everett (ur.), *Living stereo: histories and cultures of multichannel sound*. New York: Bloomsbury Academic.

Stockhausen, K. (1963). *Texte zur elektronischen und instrumentalen Musik*. (D. Schnebel, Ur.) Köln: Verlag M. DuMont Schauberg.

Tee, J. (2015). Looking Past the Stereo Loudspeakers: From the Home to the Amplified Concert Hall. U: P. Théberge, K. Devine, i T. Everett (ur.), *Living stereo: histories and cultures of multichannel sound*. New York: Bloomsbury Academic.

Thornton, S. (2009). *Ambisonics*.

<https://www.michaelgerzonphotos.org.uk/ambisonics.html>, datum pristupa 19. rujna 2023.

Toft, R. (2020). *Recording classical music*. New York: Routledge.

- Tohyama, M., i Suzuki, A. (1989). Interaural cross-correlation coefficients in stereo-reproduced sound fields. *Journal of the Acoustical Society of America*, 780-786.
- Toole, F. E. (2008). *Sound reproduction: loudspeakers and rooms*. Amsterdam: Elsevier.
- Valiquet, P. (2011). The spatialisation of stereophony: taking positions in post-war electroacoustic music. *International Computer Music Conference* (str. 41-48). Huddersfield: University of Huddersfield.
- Vermeulen, R. (1958). Stereo-Reverberation. *Journal of the audio engineering society*, 124-130.
- Watkinson, J. (1998). *The art of sound reproduction*. New York: Focal Press.
- Williams, M. (2019). *Stereo recording techniques and setups*.
<https://www.dpamicrophones.com/mic-university/stereo-recording-techniques-and-setups>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- Wittek, H., Haut, C., & Keinath, D. (2010). Double M/S – a Surround recording technique put to test. *Tonmeistertagung*, (str. 1-38).
- Zotter, F., & Frank, M. (2019). *Ambisonics: a practical 3D audio theory for recording, studio production, sound reinforcement, and virtual reality*. Cham: Springer Open.
- ***. (n.d.). *Ambi*.
https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=fFthWA%3D%3D&keyword=ambo, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.). *Crown SASS-P MkII*. <https://coutant.org/sass/126982.pdf>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.). *Dolby Atmos® Home Theater Installation Guidelines*.
https://www.dolby.com/siteassets/technologies/dolby-atmos/atmos-installation-guidelines-121318_r3.1.pdf, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.) *Električne šetnje Zagreb 2021*. (2021).
https://www.kontejner.org/projekti/device_art-festival/device_art-7021/izlozba-21/elektricne-setnje-zagreb-2021/, datum pristupa 19. rujna 2023.

- ***. (n.d.). *HPSCHD*. https://www.johncage.org/pp/John-Cage-Work-Detail.cfm?work_ID=97, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.). *Janet Cardiff Talks Sound*. <https://15questions.net/interview/janet-cardiff-talks-sound/page-2/>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.). *Neumann KU-100*. <https://www.neumann.com/en-en/products/microphones/ku-100/>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.). *New Survey from Dolby Reveals Shifts in Music Listening Behavior Among Adults in the U.S.* <https://news.dolby.com/en-WW/206271-new-survey-from-dolby-reveals-shifts-in-music-listening-behavior-among-adults-in-the-u-s>, datum pristupa 19. rujna 2023
- ***. (n.d.). Razvoj reprodukcije zvuka u umjetnosti i tehnologiji: od mono signala preko kupole zvučnika do višesmjernih zvučnika iz 3D printera. <https://www.mbz.hr/hr/program-2023/16-04/mbz-predavanje-razvoj-reprodukcije-zvuka-u-umjetnosti-i-tehnologiji>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.). *Rode NT-SF1*. <https://rode.com/en/microphones/360-ambisonic/nt-sf1>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.). *Schoeps IRT 250*. <https://schoeps.de/en/products/accessories/accessories-surround-3d/irt-250.html>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.). *SkylAR*. <https://www.ciciliani.com/skylar.html>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.). *SkylAR: multimedijски koncert s elementima instalacije*. <https://www.mbz.hr/hr/program-2023/15-04/skylar-multimedijски-koncert-s-elementima-instalacije>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.). *Stereo*. <https://madeupinbritain.uk/Stereo>, datum pristupa 19. rujna 2023.
- ***. (n.d.). *THX*. <https://www.thx.com/about/>, datum pristupa 19. rujna 2023.

***. (n.d.). *What are the benefits and drawbacks of using object-based vs channel-based audio formats for spatial audio?* <https://www.linkedin.com/advice/0/what-benefits-drawbacks-using-object-based>, datum pristupa 19. rujna 2023.

***. (n.d.). *Zyia Pro*. <https://www.zyia.co/zyia-pro.html>, datum pristupa 19. rujna 2023.

Prilozi

Popis kratica

DIN – njem. Deutsches Institut für Normung [Njemački zavod za normiranje]

Dn – desno-naprijed

Ds – desno-straga

EMI – eng. Electric and Musical Industries

FOA – eng. First Order Ambisonics

HRTF - eng. Head-Related Transfer Functions

HRIR - eng. Head-Related Impulse Responses

Hi-Fi – eng. High-Fidelity

Hz – herc

IRT - njem. Institut für Rundfunktechnik

ITU – eng. International Telecommunication Union

Ln – lijevo-naprijed

Ls – lijevo-straga

MEMS – eng. Micro-ElectroMechanical Systems

MS – eng. Mid-Side

NOS – nizoz. Nederlandse Omroep Stichting

ORTF – franc. Office de radiodiffusion-télévision française

SAAM - eng. Stereo Ambient Array Microphone

SASS - eng. Stereo Ambient Sampling System

THX - TH označava inicijale tvorca sustava, Tomlinsona Holmana, dok X označava eksperiment

WFS – eng. Wave Field Synthesis

Popis slika

Slika 1. Goniometarski prikaz razlika u prostornosti između stereofone (prikazano s lijeva) i monofone (prikazano s desna) snimke.....	9
Slika 2. Dijagram XY-para.....	15
Slika 3. Primjer postave XY-para pod kutom od 90°.....	16
Slika 4. Dijagram Blumlein-para.....	17
Slika 5. Primjer postave Blumlein-para.....	18
Slika 6. Dijagram MS-para.....	19
Slika 7. Primjer postave MS-para.....	20
Slika 8. Dijagram razmaknutog para.....	21
Slika 9. Primjer postave razmaknutog para.....	22
Slika 10. Dijagram ORTF-para.....	25
Slika 11. Primjer postave ORTF-para.....	25
Slika 12. Dijagram NOS-para.....	26
Slika 13. Primjer postave NOS-para.....	27
Slika 14. Dijagram DIN-para.....	28
Slika 15. Primjer stereofone postave zvučnika kojom se osiguravaju optimalni uvjeti slušanja.....	30
Slika 16. Prikaz prvoga binauralnog mikrofona koji je osmislio i patentirao Harvey Fletcher.....	33
Slika 17. Prikaz jednog od najčešće korištenih binauralnih mikrofona, Neumann KU-100.....	36
Slika 18. Dijagram postave Madsenova para.....	40
Slika 19. Primjer postave Jecklinova diska.....	41
Slika 20. Prikaz mikrofona Crown SASS.....	43
Slika 21. Primjer kvadrofone postave zvučnika kojom se osiguravaju optimalni uvjeti slušanja.....	45
Slika 22. Dijagram dvostruke MS-tehnike.....	55
Slika 23. Primjer postave za dvostruku MS-tehniku.....	55
Slika 24. Dijagram IRT-tehnike.....	56
Slika 25. Primjer postave za IRT-tehniku.....	56
Slika 26. Dijagram Hamasaki tehnike.....	57
Slika 27. Primjer postave Hamasaki tehnike.....	57

Slika 28. Preporuka Međunarodne telekomunikacijske unije o postavi reproduksijskog sustava 5.1.	59
Slika 29. Preporuka Međunarodne telekomunikacijske unije o postavi reproduksijskog sustava 7.1.	60
Slika 30. Dijagram koji pokazuje na koji se način sferni harmonici razlažu oko točke u prostoru prilikom snimanja ambisonične snimke prvoga reda.	65
Slika 31. Dijagram tehnike FOA.	65
Slika 32. Primjer postave tehnike FOA.	66
Slika 33. U odnosu na FOA-mikrofon (prvi i drugi red prikazan na slici), HOA-mikrofon ima bolju prostornu rezoluciju zbog toga što se zvučno polje može raščlaniti na više sfernih harmonika (slika prikazuje harmonike do trećeg reda).	68
Slika 34. Usporedba FOA-mikrofona (prikazan s lijeve strane) i HOA-mikrofona (prikazan s desne strane).	69
Slika 35. Primjer 11.1 Auro 3D konfiguracije zvučnika.	73
Slika 36. Primjer preporuke japanske državne radiotelevizijske ustanove: NKH 22.2.	74