

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA**

**RAČUNALNA FORENZIKA**

**Analiza FLAC formata**

Matteo Samsa

Zagreb, sječanj 2020.

## Sadržaj

1. Sažetak.....	1
2. Uvod.....	2
3. Kodiranje FLAC formata.....	4
3.1. Rastavljanje podataka na blokove (engl. Blocking).....	4
3.2. Dekorelacija kanala .....	4
3.3. Predikcija .....	5
3.4. Rezidualno kodiranje (engl. Residual coding) .....	5
4. Format .....	6
5. Sažimanje podataka bez gubitka (engl. lossless).....	9
6. Usporedba audio formata .....	10
7. Analiza spektra audio formata .....	12
8. Zaključak .....	20
9. Izvori .....	21

# 1. Sažetak

Ovaj seminarski rad analizira format koji služi za sažimanje audio podataka bez gubitka podataka - FLAC. U radu je opisan proces kodiranja FLAC datoteka te definiran sam format te njegovi blokovi. Razmatrani su metapodaci koji se mogu nalaziti u FLAC formatu, nakon čega su uspoređene različite razine sažimanja. FLAC format je uspoređen s nekoliko drugih formata za audio podatke te su analizirani spektrogrami uz pomoć kojih se može zaključiti o kojem je audio formatu riječ.

## 2. Uvod

FLAC je najbrži audio kodek bez gubitka podataka (engl. lossless će biti korišten dalje u tekstu). FLAC je akronim od engleskih riječi „Free Lossless Audio Codec“, gdje se riječ „Free“ odnosi na to da su specifikacije formata u potpunosti javno objavljene i da se format smije koristiti u bilo koje svrhe te metode kodiranja i dekodiranja formata nisu patentirane. Također, izvorni kod je dostupan pod open-source licencom.



*Slika 1 Logo FLAC formata*

Prva verzija FLAC formata je izdana 20. srpnja 2001. godine, a 29. siječnja 2003. godine ga je preuzela neprofitna organizacija Xiph.org koja se fokusira uglavnom na Ogg familiju formata: Vorbis, Theora, Speex, i slični.

FLAC format je sličan MP3 formatu po tome što ima mogućnost sažimanja audio datoteka, no on to radi bez gubitka podataka. Ta vrsta sažimanja je slična sažimanju ZIP datoteke, no FLAC ima puno veći faktor sažimanja jer je projektiran specifično za audio podatke.

Bitne značajke FLAC formata su:

- **Lossless:** kodiranje audio podataka pulsno-kodnom modulacijom (PCM) ne gube se nikakvi podaci, dekodirani podaci su identični onima koji su se početno kodirali.
- **Brzina:** FLAC je asimetričan tako da favorizira brzinu dekodiranja. Dekodiranje zahtijeva samo aritmetiku cijelih brojeva (engl. integer).
- **Sklopovska podrška:** FLAC format podržava većina modernih uređaja od pametnih telefona (android 3.1+), linija pa do radio uređaja u automobilima.
- **Fleksibilni metapodaci:** FLAC format podržava oznake (engl. tag), naslovne slike glazbenog albuma, tablice za pretraživanje (engl. seek table) i „cue tablice“.
- **Mogućnost pretraživanja (engl. Seekable):** zbog toga je FLAC pogodan i za korištenje u programima za uređivanje audio datoteka.
- **Prenositi na zahtjev (engl. Streamable):** svaki FLAC okvir sadrži dovoljno podataka za dekodiranje tog okvira. FLAC koristi kodove za sinkronizaciju i CRC-ove koji, uz okvire, omogućuju dekodiranje sa sredine toka s minimalnim kašnjenjem.
- **Pogodan za arhiviranje:** FLAC je lossless format te ako u budućnosti bude bilo potrebe za pretvaranjem podataka u drugi format svi podaci će biti sačuvani. Uz CRC-ove okvira i MD5 potpis, FLAC nudi i opciju provjere kodiranja tako da paralelno s procesom kodiranjem dekodira kodirani tok podataka i uspoređuje rezultat s originalnim podacima, prekidajući kodiranje u slučaju pogreške

- **Pogodan za presnimavanje na CD:** FLAC ima blok metapodataka namijenjen za „cue tablicu“ u kojoj se nalazi popis audio datoteka na CD-u s točnim početnim i krajnjim točkama, tako omogućujući identičnu replikaciju podataka s CD-a.
- **Otporan na greške:** zbog načina na koji su sastavljeni okviri FLAC formata, pogreške toka su ograničene tako da prave štetu samo okviru u kojem su se dogodile – desetak milisekundi.

Kroz cijeli seminar će biti analizirana pjesma Motherboard grupe Daft Punk, to je 10. pjesma po redu na albumu Random Access Memories iz 2013. godine.

## 3. Kodiranje FLAC formata

Kodiranje se izvodi u četiri koraka.

### 3.1. Rastavljanje podataka na blokove (engl. Blocking)

U FLAC formatu razlikujemo blokove i okvire, blokovi se odnose na nekodirane audio podatke (engl. raw) koji služe kao ulaz u enkoder, dok se okviri odnose na kodirane podatke.

Blok je jedan ili više audio uzoraka u više kanala. Uz blokove imamo i podblokove (engl. subblock) koji sadrže jedan ili više audio uzoraka u jednom kanalu. Blok sadrži po jedan podblok po kanalu, a svi podblokovi imaju jednak broj uzoraka. Veličina bloka je broj uzoraka u bilo kojem podbloku nekog bloka.

Okvir (engl. frame) se sastoji od zaglavlja okvira i jednog ili više podokvira (engl. subframe), dok podokvir sadrži zaglavlje podokvira s informacijom o kodiranju i jedan ili više kodirani uzorak iz jednog kanala. Svi podokviri koji se nalaze u nekom okviru će sadržati isti broj uzoraka.

Veličina bloka nije predodređena nego se s obzirom na frekvenciju uzorkovanja, karakteristike spektra kroz vrijeme i slične parametre određuje optimalna veličina bloka. Iako FLAC podržava promjenjivu veličinu blokova u jednom toku podataka, no današnji enkoder koristi konstantnu veličinu bloka.

Veličina bloka ima veliki utjecaj na faktor sažimanja. Ako je blok premalen, datoteka će imati veliki broj okvira te će više bitova biti utrošeno na zapisivanje zaglavlja okvira. S druge strane, ako je blok prevelik, karakteristike signala mogu previše varirati te enkoder neće biti u stanju pronaći dobar prediktor (engl. predictor). Kako bi se pojednostavilo projektiranje enkodera i dekodera, FLAC ima određenu minimalnu veličinu bloka od 16 uzoraka i maksimalnu veličinu od 65535 uzorka.

Blokovi se prenose u korak predviđanja podblok po podblok. Svaki podblok se zasebno kodira u podokvir, i onda se podokviri konkatenuju u okvir. S obzirom da se svaki kanal zasebno kodira, moguće je da jedan kanal bude kodiran kao konstantni podokvir, a drugi kao linearno prediktivno kodirani (LPC, engl. Linear predictive code) podokvir.

### 3.2. Dekorelacija kanala

U stereo tokovima, često postoji korelacija između lijevog i desnog kanala koja se može iskoristiti. Enkoder tada može iz okvira u okvir birati najbolji način kodiranja:

- Nezavisni (engl. independent): lijevi i desni kanali se nezavisno kodiraju
- Srednji-strana (engl. mid-side): enkoder stvara srednji (engl. mid) kanal iz prosjeka lijevog i desnog kanala dok iz njihove razlike, lijevi minus desni, stvara kanal sa strane (engl. side).
- Lijevo-strana (engl. left-side): kodiraju se lijevi kanal i kanal sa strane.
- Desno-strana (engl. right-side): kodiraju se desni kanal i kanal sa strane.

### 3.3. Predikcija

FLAC koristi četiri metode modeliranja ulaznog signala

Doslovni prediktor (engl. verbatim): koristi se prediktor nultog reda. Predviđeni signal je nula, odnosno signal pogreške je originalni signal te nema sažimanja. To je osnovica prema kojoj se ostali prediktori mjere. Ako se na ulaz enkodera dovedu slučajni podaci, najvjerojatnije će se doslovni prediktor koristiti za svaki podblok. Kodirani podaci će se razlikovati od linearnog prediktora nultog reda jer su rezidualno kodirani.

Konstantni prediktor: Koristi se kada je podblok čisti DC signal, odnosno, signal konstantne vrijednosti za cijelo trajanje podbloka.

Konstantni linearni prediktor: FLAC koristi efikasne konstantne linearne prediktore kao i slični formati, no uz prediktore nultog do trećeg reda koji se koriste u formatu „shorten“ dodaje još i prediktor četvrtog reda. S obzirom da su prediktori konstante, potrebno je pohraniti samo red prediktora u sažeti tok. Signal pogreške se tada prosljeđuje rezidualnom enkoderu.

FIR linearni prediktor: Za točnije modeliranje signala, FLAC podržava linearni FIR prediktor do 32 reda, no to usporava proces kodiranja. Enkoder koristi Levinson-Durbin metodu za izračun LPC koeficijenta iz koeficijenata autokorelacije. Koeficijenti se kvantiziraju prije rezidualnog kodiranja. FLAC dopušta da kvantizirani koeficijenti budu različiti u svakom podokviru. Enkoder procjenjuje optimalnu potrebnu preciznost s obzirom na veličinu bloka i dinamički opseg početnog signala.

### 3.4. Rezidualno kodiranje (engl. Residual coding)

FLAC definira dvije metode kodiranja signala pogreške iz faze predviđanja. Signal pogreške se kodira koristeći Rice kodove na jedan od sljedeća dva načina

1. Enkoder procjenjuje jedan Rice parametar s obzirom na varijancu signala pogreške i kodira cijeli signal Rice kodovima prema tom parametru.
2. Signal pogreške se podijeli na nekoliko dijelova jednakih veličina te se za svaki dio kodira sa svojim Rice parametrom koji se temelji na srednjoj vrijednosti tog dijela.

FLAC format ima rezervirana polja i za druge metode kodiranja, na primjer, Huffman kodiranje, LOCO-I i purcrunch.

## 4. Format

FLAC u sebi ne sadrži informaciju o verziji formata, ali sadrži rezerviranog prostora na nekim mjestima. Buduće verzije formata moći će koristiti ta rezervirana mjesta bez da utječu na format starijih tokova. Stariji dekoderi mogu prekinuti proces dekodiranja ili preskočiti dio informacija ako je datoteka kodirana novijim metodama. Osim rezerviranog prostora, definirana su i mjesta u koje se ne smije upisivati uzorke jer služe za osiguravanje robusnosti sinkronizacijskog mehanizma.

Svi brojevi koji se koriste u FLAC toku su cijeli (engl. integer) – ne koriste se brojevi s pomičnim zarezom. Također, koristi se big-endian kodiranje i osim nekoliko iznimaka svi su brojevi bez predznaka (engl. unsigned).

Na početku svakog FLAC toka nalazi se oznaka „fLaC“, odnosno u heksadekadskom sustavu 66 4C 61 43. Nakon toga se nalazi blok obaveznih metapodataka koji se naziva STREAMINFO blok, zatim ostali metapodaci te tek onda audio okviri.

```
Offset(h) 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F Decoded text
00000000 66 4C 61 43 00 00 00 22 10 00 10 00 00 04 55 00 fLaC...".....U.
00000010 32 96 0A C4 42 F0 00 E5 E7 20 C8 18 A5 00 1B 33 2-„ÄBß.âç È.¥..3
```

*Slika 2 Početak FLAC datoteke u HxD programu*

FLAC podržava do 128 vrsta blokova metapodataka, no samo je sljedećih sedam definirano:

1. STREAMINFO: Ovaj blok sadrži informacije o cijelom toku kao što su frekvencija uzorkovanja, broj kanala, ukupan broj uzoraka i slično. Uvijek mora biti prvi blok metapodataka u toku. Nakon njega se mogu, ali ne moraju nalaziti drugi blokovi metapodataka, ako dekodeer ne „razumije“ neke metapodatke tada ih preskoči.
2. APPLICATION: ovaj blok koriste aplikacije trećih strana. Jedini obavezni blok je 32-bitni identifikator koji se dodjeljuje aplikacijama koje ga zatraže. Ostatak bloka definiraju registrirane aplikacije.
3. PADDING: ovaj blok omogućava proizvoljan broj nula, te ne sadrži informacije. Ovaj blok je koristan kada je unaprijed poznato da će se metapodaci uređivati nakon kodiranja. Korisnik tada može pri kodiranju rezervirati PADDING blok potrebne veličine kako bi se naknadno mogli dodavati metapodaci. Dodani metapodaci će prepisati PADDING blok umjesto da se podaci moraju ubacivati na točno mjesto u datoteci što bi zahtijevalo prepisivanje cijele datoteke.
4. SEEKTABLE: ovo je neobavezan blok u koji se pohranjuju točke za pretragu (engl. seek). Moguće je kretati se kroz cijeli FLAC tok i bez tablice za pretraživanje, ali će kašnjenje biti nepredvidivo s obzirom da se brzina podataka (engl. bitrate) razlikuje kroz tok. Dodajući točke za pretragu to kašnjenje se može znatno smanjiti. Svaka točka zauzima 18 bajtova. U toku se smije nalaziti samo jedan SEEKTABLE blok, no on može sadržavati bilo koji broj točaka za pretragu. Postoji i posebno definirana točka koja služi za rezervaciju prostora (engl. placeholder) za točke koje će biti dodane u budućnosti.
5. VORBIS\_COMMENT: ovaj blok služi za pohranu podataka u parovima ime\_podatka=vrijednost koji su kodirani koristeći UTF-8. Ovaj blok se temelji na



specifikaciji Vorbis komentara, ali ne sadrži zaglavlje. Također, ovo je jedini službeno podržani način upisivanja oznaka (engl. tag) u FLAC format. U toku se smije nalaziti samo jedan VORBIS\_COMMENT blok. U nekoj literaturi se Vorbis komentari nazivaju FLAC oznake.

```

00000290 10 00 00 00 00 00 00 00 E4 C0 00 00 00 00 02 13 .....dA.....
000002A0 29 87 10 00 04 00 00 00 E7 20 00 00 00 72 65 66 65 )+.....ç ...refe
000002B0 72 65 6E 63 65 20 6C 69 62 46 4C 41 43 20 31 2E rence libFLAC 1.
000002C0 32 2E 31 20 32 30 30 37 30 39 31 37 0A 00 00 00 2.1 20070917....
000002D0 11 00 00 00 54 49 54 4C 45 3D 4D 6F 74 68 65 72 ...TITLE=Mother
000002E0 62 6F 61 72 64 1C 00 00 00 41 6C 62 75 6D 3D 52 board....Album=R
000002F0 61 6E 64 6F 6D 20 41 63 63 65 73 73 20 4D 65 6D andom Access Mem
00000300 6F 72 69 65 73 10 00 00 00 41 72 74 69 73 74 3D ories....Artist=
00000310 44 61 66 74 20 50 75 6E 6B 0A 00 00 00 47 65 6E Daft Punk....Gen
00000320 72 65 3D 46 75 6E 6B 09 00 00 00 44 61 74 65 3D re=Funk....Date=
00000330 32 30 31 33 15 00 00 00 41 4C 42 55 4D 41 52 54 2013....ALBUMART
00000340 49 53 54 3D 44 61 66 74 20 50 75 6E 6B 0E 00 00 IST=Daft Punk...
00000350 00 54 52 41 43 4B 4E 55 4D 42 45 52 3D 31 30 0D .TRACKNUMBER=10.
00000360 00 00 00 54 52 41 43 4B 54 4F 54 41 4C 3D 31 33 ...TRACKTOTAL=13
00000370 0C 00 00 00 44 49 53 43 4E 55 4D 42 45 52 3D 31 ...DISCNUMBER=1
00000380 0B 00 00 00 44 49 53 43 54 4F 54 41 4C 3D 31 06 ...DISCTOTAL=1.
00000390 05 38 7D 00 00 00 03 00 00 00 0A 69 6D 61 67 65 .8}.....image
000003A0 2F 6A 70 65 67 00 00 00 00 00 05 DC 00 00 05 /jpeg.....Û...
000003B0 DC 00 00 00 00 00 00 00 00 00 05 38 53 FF D8 FF Û.....8Sÿÿ
000003C0 E1 13 41 45 78 69 66 00 00 4D 4D 00 2A 00 00 00 á.AExif..MM.*...
000003D0 08 00 0C 01 00 00 03 00 00 00 01 05 DC 00 00 01 .....Û...

```

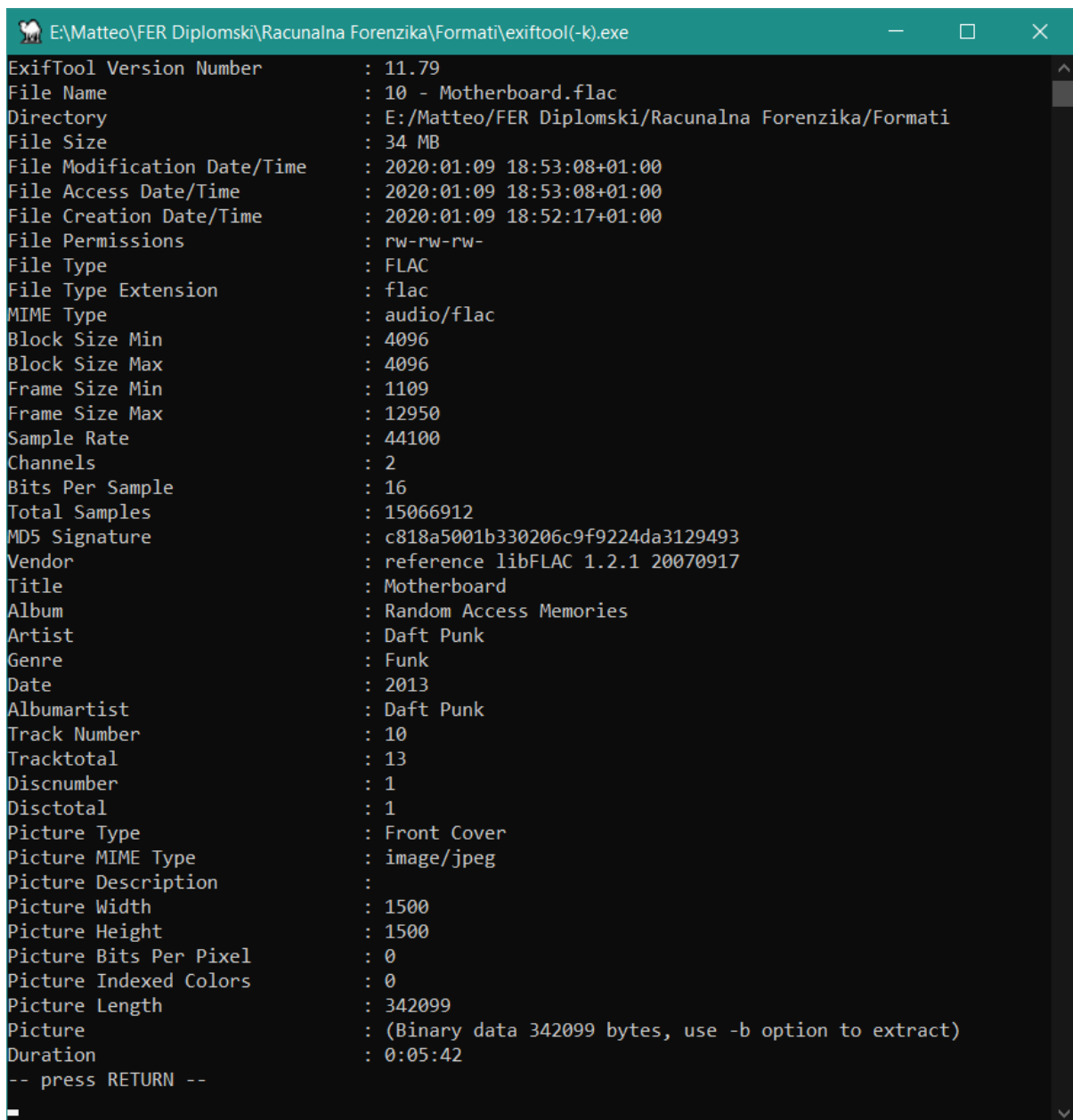
Slika 3 VORBIS\_COMMENT blok vidljiv je i „normalno“ čitljiv. Slika iz HxD programa.

6. CUESHEET: ovaj blok služi za pohranu informacija koje se mogu koristiti u cue tablici. Od posebne je važnosti pri pohrani i kopiranju CD-DA diskova jer sadrži podatke o točnim lokacijama audio datoteka na disku.
7. PICTURE: ovaj blok služi za pohranu slike koja se povezuje s određenom audio datotekom, najčešće se radi o naslovnoj slici glazbenog albuma. Moguće je imati više od jednog PICTURE bloka. Blok je tipa MIME, dok je opis kodiran s UTF-8 kao u ID3v2 te podržava povezivanje vanjskih slika putem URL-a. U bloku se nalaze i podaci o rezoluciji slike, dubini boje (engl. color depth), i veličini palete.

Audio podaci se sastoje od jednog ili više okvira. Svaki se okvir sastoji od zaglavlja koje sadrži kod za sinkronizaciju, informacije o okviru kao što su veličina bloka, frekvencija uzorkovanja, broj kanala i slično te 8-bitni CRC. U zaglavlju okvira se također nalazi ili broj uzorka prvog uzorka u okviru, ako je riječ o promjenjivoj veličini bloka u toku, ili broj okvira, ako je riječ o konstantnoj veličini bloka u toku. To omogućuje brzo pretraživanje (engl. seeking). Nakon zaglavlja okvira nalaze se podokviri, po jedan za svaki kanal, te se nakon njih dodaju nule do veličine koja je djeljiva s 8, odnosno na bajtove.

S obzirom da je moguće da dekodirer započne dekodiranje sa sredine toka, postoji metoda za određivanje početka okvira. Svaki okvir započinje s 14-bitnim kodom za sinkronizaciju koji se ne pojavljuje nigdje drugdje u zaglavlju okvira, no moguće je da se pojavi u zaglavlju podokvira pa se koriste još dvije metode potvrde točne sinkronizacije. Najprije se provjerava ako ostatak okvira ne sadrži nevažne podatke te zatim dekodirer generira 8-bitni CRC zaglavlja okvira te ga uspoređuje s CRC-om koji je pohranjen na kraju zaglavlja okvira. S obzirom da dekodirer može započeti dekodiranje iz proizvoljnog okvira u toku, svaki okvir mora sadržavati osnovne informacije o toku jer je moguće da dekodirer nema pristup STREAMINFO bloku metapodataka koji se nalazi na početku toka. Uzimajući u obzir da je zaglavlje okvira dodatna ponovljena

informacija (engl. overhead), ono direktno utječe na faktor sažimanja. Da bi veličina zaglavlja okvira smanjila FLAC koristi pregledne tablice (engl. lookup table) za najkorištenije podatke.



```
ExifTool Version Number      : 11.79
File Name                    : 10 - Motherboard.flac
Directory                   : E:/Matteo/FER Diplomski/Racunalna Forenzika/Formati
File Size                   : 34 MB
File Modification Date/Time  : 2020:01:09 18:53:08+01:00
File Access Date/Time       : 2020:01:09 18:53:08+01:00
File Creation Date/Time     : 2020:01:09 18:52:17+01:00
File Permissions            : rw-rw-rw-
File Type                   : FLAC
File Type Extension         : flac
MIME Type                   : audio/flac
Block Size Min              : 4096
Block Size Max              : 4096
Frame Size Min              : 1109
Frame Size Max              : 12950
Sample Rate                 : 44100
Channels                    : 2
Bits Per Sample             : 16
Total Samples               : 15066912
MD5 Signature               : c818a5001b330206c9f9224da3129493
Vendor                     : reference libFLAC 1.2.1 20070917
Title                      : Motherboard
Album                      : Random Access Memories
Artist                     : Daft Punk
Genre                      : Funk
Date                      : 2013
Albumartist                : Daft Punk
Track Number                : 10
Tracktotal                 : 13
Discnumber                 : 1
Disctotal                  : 1
Picture Type                : Front Cover
Picture MIME Type          : image/jpeg
Picture Description         :
Picture Width               : 1500
Picture Height              : 1500
Picture Bits Per Pixel      : 0
Picture Indexed Colors      : 0
Picture Length              : 342099
Picture                    : (Binary data 342099 bytes, use -b option to extract)
Duration                   : 0:05:42
-- press RETURN --
```

Slika 4 Metapodaci koji se mogu pronaći u datoteci koristeći exiftool program.

## 5. Sažimanje podataka bez gubitka (engl. lossless)

Za sažimanje FLAC datoteka koristi se libFLAC, knjižnicu referentnih enkodera i dekodera, i sučelje za metapodatke. libFLAC ima 9 razina sažimanja koje se kreću od level-0 koji je najbrži, ali sažeta datoteka zauzima i najviše prostora (oko 70% nesažete datoteke), pa do level-8 koji je najsporiji, ali je veličina sažete datoteke najmanja (oko 60% nesažete datoteke). Sažete datoteke, bez obzira na razinu sažimanja, uvijek sadrže sve informacije kao i nesažeta datoteka te za njih kažemo da su lossless. Iako se pri procesu sažimanja može primijetiti da za bolje sažimanje treba više vremena, dekodiranje datoteka traje približno jednako bez obzira na razinu sažimanja.

Tablica 1 Usporedba veličina datoteka s obzirom na razinu sažimanja

Format	Veličina [KB]	Postotak nesažete datoteke [%]
Nesažeto	59228	100
Level-0	36064	60.89
Level-1	35650	60.19
Level-2	35480	59.90
Level-3	35061	59.20
Level-4	34657	58.51
Level-5	34586	58.39
Level-6	34535	58.31
Level-7	34419	58.11
Level-8	34407	58.09

## 6. Usporedba audio formata

Audio formati se dijele na tri skupine:

- Nesažeti lossless formati (engl. uncompressed lossless)
- Sažeti lossless formati (engl. compressed lossless)
- Sažeti formati s gubitcima (compressed lossy)

Brzina prijenosa podataka (engl. bitrate) je definirana kao broj bitova koji se prenesu u jedinici vremena. Kada je riječ o audio datotekama brzina prijenosa podataka se iskazuje u kilobitima po sekundi – kbps. Pri usporedbi dviju audio datoteka, datoteka s većom brzinom prijenosa podataka će biti bolje kvalitete.

Nesažeti lossless formati sadržavaju sve informacije originalne snimke audio signala. S obzirom da se tišini pridjeljuje isti broj bitova kao i zvuku, nesažete lossless datoteke su velike. Primjeri ove vrste formata su:

- Waveform Audio File Format – WAV
- Audio Interchange File Format – AIFF

Sažeti lossless formati također sadržavaju sve informacije originalne snimke audio signala no u ovom slučaju se tišini pridaje vrlo malo bitova po sekundi i zvuk se sažima što rezultira u datoteci koja je gotovo upola manja od nesažete datoteke. S obzirom da i nesažeti i sažeti lossless formati sadrže sve informacije originalne snimke, moguće je transkodirati iz jednog u drugi i obrnuto bez gubitka podataka. Primjeri sažetih lossless formata su:

- Free Lossless Audio Codec – FLAC
- Apple Lossless Audio Codec – ALAC
- Monkey's Audio – APE

Lossy formati su uvijek sažeti. S obzirom da se sažimanjem nepovratno gubi dio podataka, lossy datoteke su uvijek manje od sažetih i nesažetih lossless datoteka. Najčešće se uklanjaju podaci koji odgovaraju višim frekvencijama koje ljudi ne mogu čuti. Lossy formati se ne smiju (iako je to moguće) transkodirati u bilo koji format, bilo da je lossless, neki drugi lossy format ili čak isti lossy format. Ako se lossy transkodira u lossless, nova datoteka će sadržavati samo podatke koji su se nalazili u lossy formatu, a ne podatke originalne snimke, dok ako se lossy transkodira u lossy biti će izgubljeno još više podataka originalne snimke.

- Primjeri lossy formata su:
- MPEG Layer 3 Audio – MP3
- Advanced Audio Encoding – AAC
- Windows Media Audio – WMA
- Dolby Digital Audio Codec 3 – AC3
- DTS Coherent Acoustic Codec – DTS

Tablica 2 Usporedba veličina datoteka različitih audio formata

Format	Veličina [KB]
WAV	59190
FLAC level-5	34586
MP3 320 (CBR)	13684
MP3 256 (CBR)	11014
MP3 192 (CBR)	8345
MP3 128 (CBR)	5675

**Transparentnost** (engl. Transparency) je termin koji se koristi za opisivanje kvalitete audio zapisa lossy formata. Audio zapis se smatra transparentnim ako prosječni slušatelj ne može razlikovati lossy i lossless datoteku istog audio zapisa samo slušajući oba zapisa bez da zna koji je koji. Za većinu ljudi, MP3 192 kbps (CBR) se smatra transparentnim. CBR (engl. Constant BitRate) znači da je brzina prijenosa konstantna kroz cijelu datoteku.

**Transkodirati** datoteku znači konvertirati je iz jednog u drugi format. Kod transkodiranja audio formata razlikujemo dobro i loše transkodiranje.

Dobro transkodiranje je ono tijekom čijeg se procesa datoteka nikada ne konvertira u lossy format ili je datoteka samo u zadnjem koraku konvertira u lossy format. Primjeri dobrih transkodiranja:

- Nesažeti lossless -> sažeti lossless
- Sažeti lossless -> nesažeti lossless
- Sažeti lossless -> sažeti lossless
- Nesažeti lossless -> lossy
- Sažeti lossless -> lossy

Loše transkodiranje je ono tijekom kojega je datoteka konvertirana jedan ili više puta u lossy format ili je datoteka konvertirana iz lossy u lossless format. Primjeri loših transkodiranja:

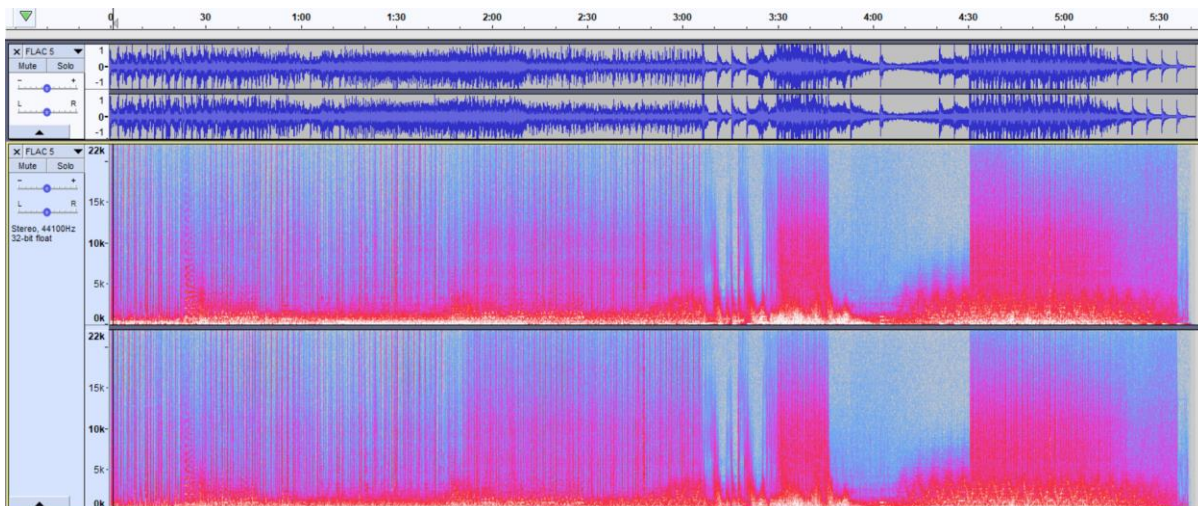
- Lossy format više brzine prijenosa podataka -> lossy format niže brzine prijenosa podataka
- Lossy format iste brzine prijenosa podataka -> lossy format iste brzine prijenosa podataka
- Lossy format -> lossless format

## 7. Analiza spektra audio formata

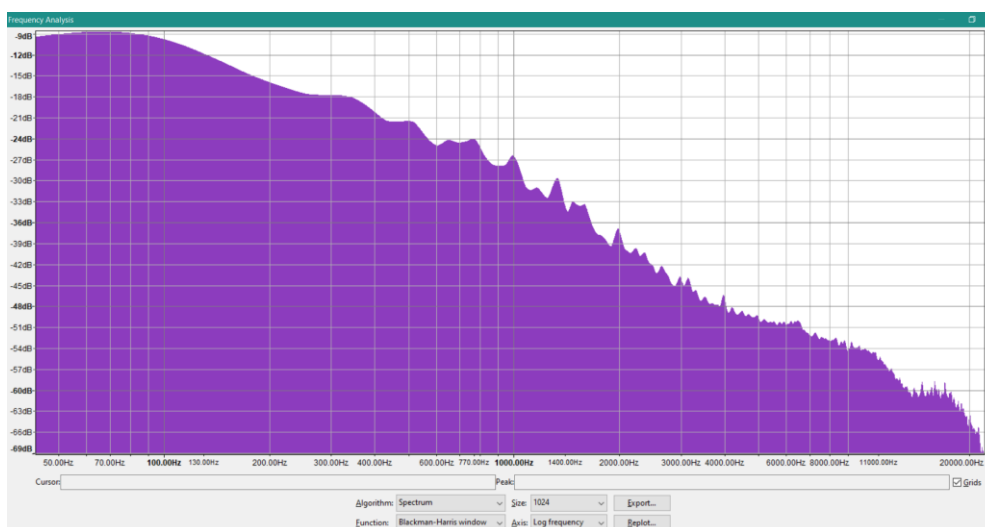
Spektar audio signala je način prikaza podataka o frekvencijama tog signala. Analizirajući spektre audio signala moguće je zaključiti radi li se o lossless ili lossy formatu te ako je lossy je moguće zaključiti i točan format i brzinu prijenosa podataka s obzirom da različiti formati imaju različite gornje granične frekvencije. Spektrogram je prikaz frekvencija signala u vremenu.

Za transkodiranje je korišten program dBpoweramp koji za MP3 transkodiranje ima implementiran LAME enkoder. Spektrogrami i spektri su analizirani pomoću programa Audacity.

Na slikama 5. i 6. nalaze se spektrogram i spektar FLAC datoteke. S obzirom da je datoteka uzorkovana frekvencijom 44.1 kHz, prema Nyquistovom teoremu se filtriraju podaci niskopropusnim filtrom granične frekvencije 22050 Hz, te to vidimo i na grafovima. Ponekad lossless podaci mogu imati graničnu frekvenciju od 21.5 kHz ili postepeno smanjenje amplitude (engl. fade out) od 19 kHz prema višim frekvencijama.

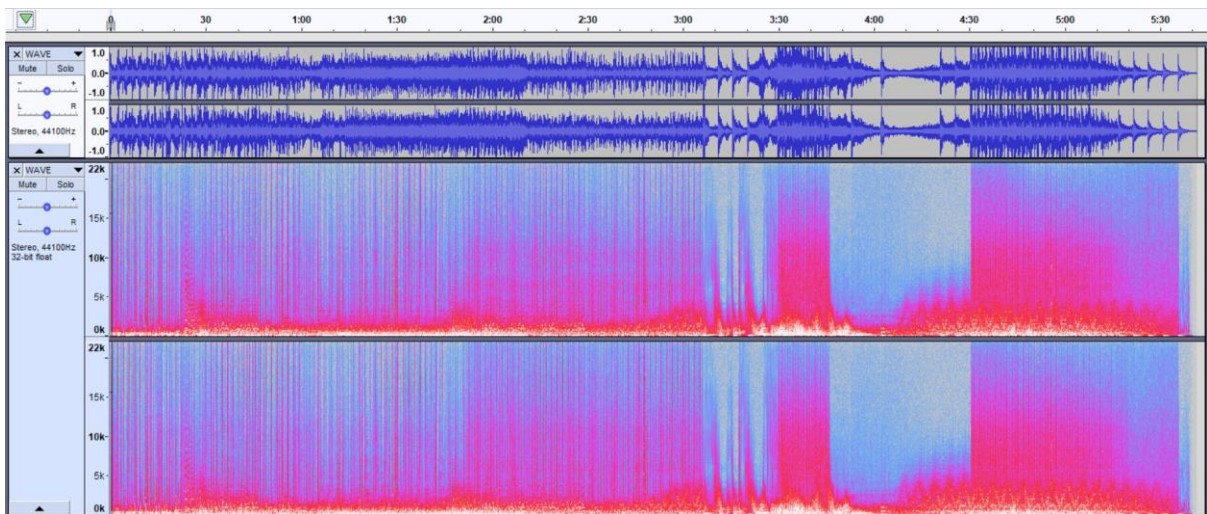


Slika 5 Spektrogram FLAC datoteke

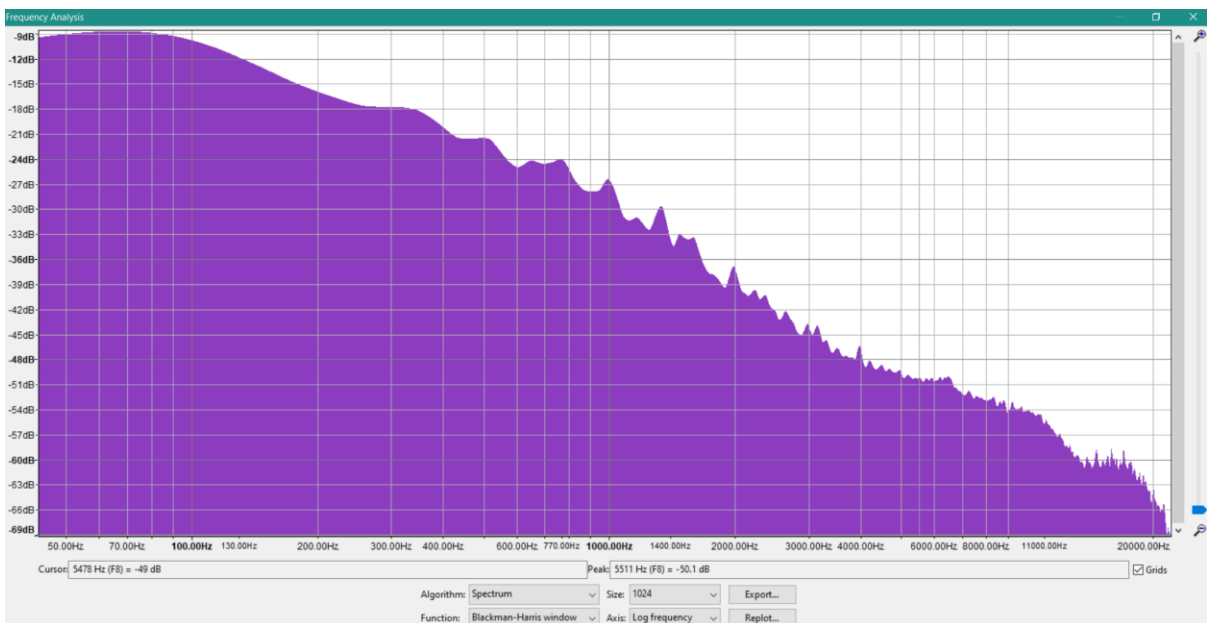


Slika 6 Spektar FLAC datoteke

Na slikama 7. i 8. nalaze se spektrogram i spektar WAV datoteke, uspoređujući te grafove s grafovima na slikama 5. i 6. ne primjećujemo nikakve razlike jer su oba formata lossless i sadrže sve informacije o zapisu.

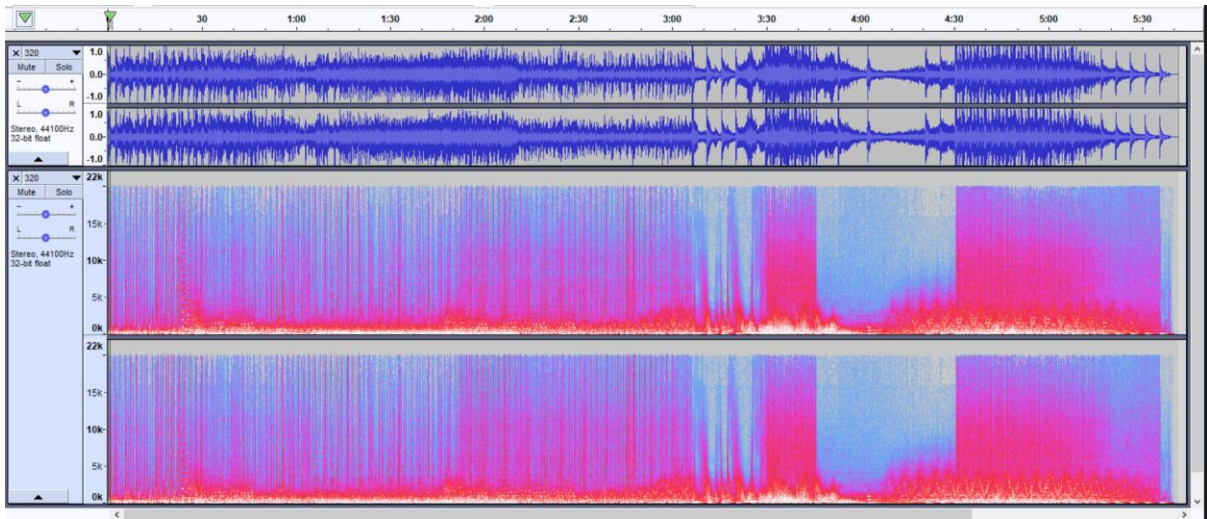


Slika 7 Spektrogram WAV datoteke

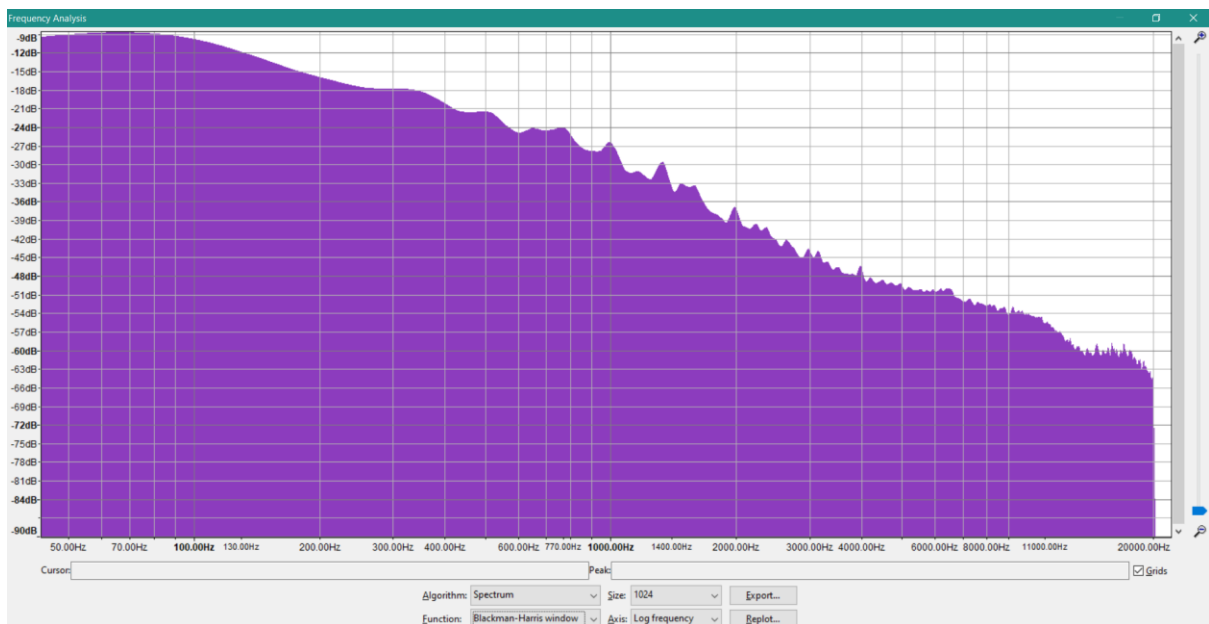


Slika 8 Spektar WAV datoteke

Na slikama 9. i 10. se nalaze spektrogram i spektar MP3 320 kbps (CBR) datoteke, uspoređujući ih s grafovima lossless formata možemo odmah uočiti da je granična frekvencija pomaknuta na 20.5 kHz. Uz to kod MP3 formata može se primijetiti i „stepenica“ na 16 kHz, iznad koje se uklanjaju i tiši zvukovi radi uštede memorijskog prostora.



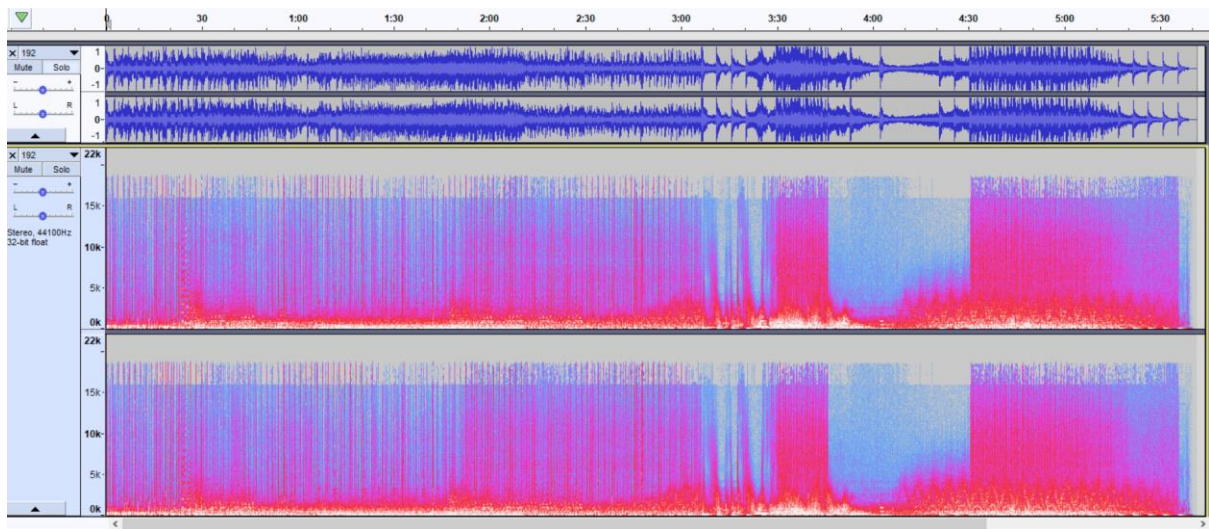
Slika 9 Spektrogram MP3 320 kbps (CBR) datoteke



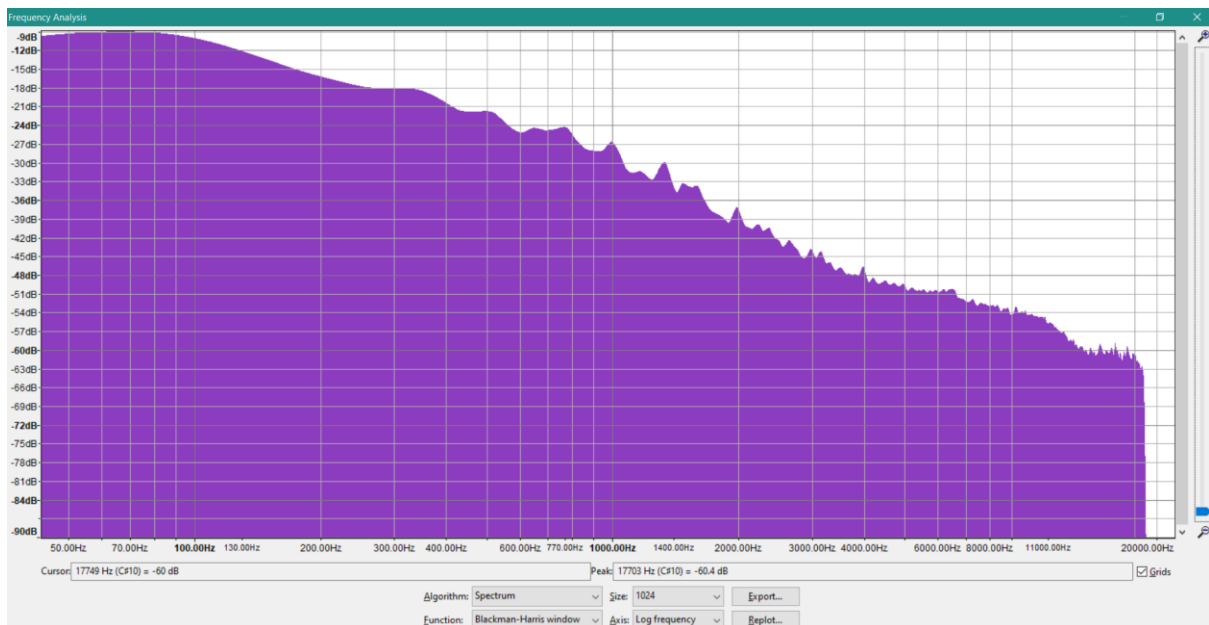
Slika 10 Spektar MP3 320 kbps (CBR) datoteke



Na slikama 11. i 12. se nalaze spektrogram i spektar MP3 192 kbps (CBR) datoteke. Pri ovoj brzini prijenosa podataka primjećujemo da je granična frekvencija 19.5 kHz, te je „stepenica“ na 16 kHz još izraženija nego na slikama 9. i 10..

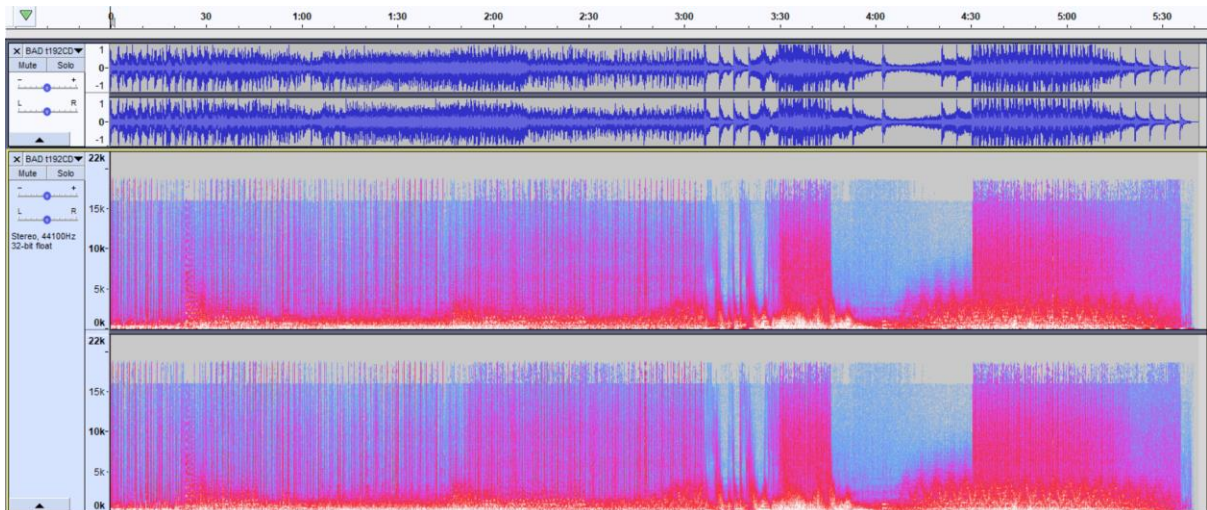


Slika 11 Spektrogram MP3 192 kbps (CBR) datoteke

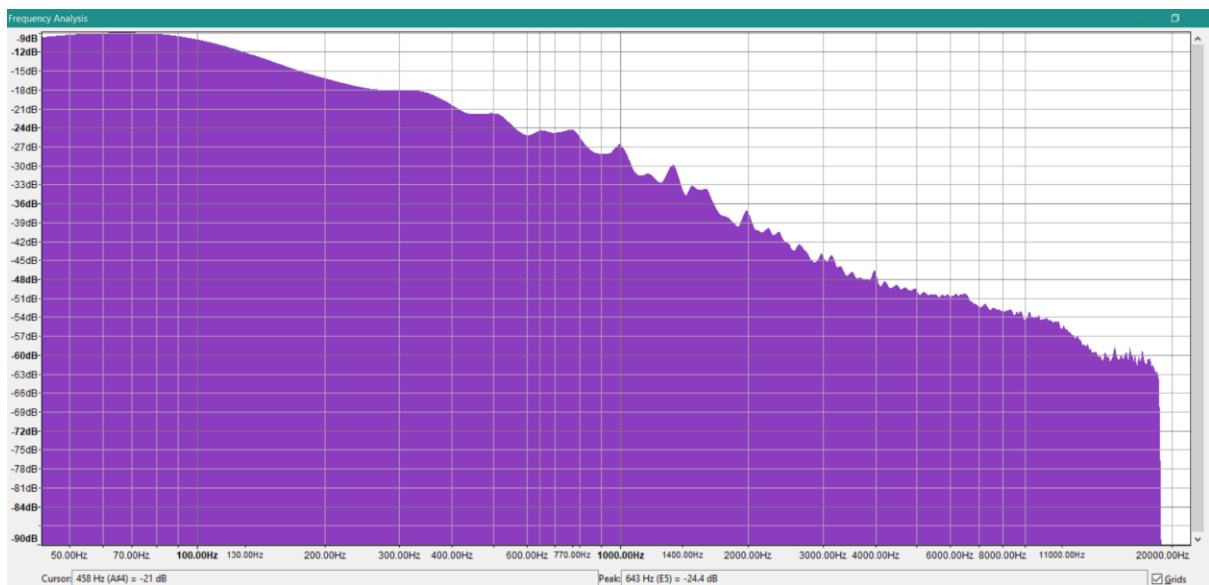


Slika 12 Spektar MP3 192 kbps (CBR) datoteke

Na slikama 13. i 14. nalaze se spektrogram i spektar FLAC datoteke koja je dobivena transkodiranjem iz datoteke čiji su grafovi na slikama 11. i 12. Ova datoteka ima ekstenziju .flac i zauzima 32.3 MB, dok je MP3 192 kbps (CBR) datoteka zauzimala 8.14 MB, ali iz grafova vidimo da ovo nije lossless datoteka i da ima karakterističnu „stepenicu“ na 16 kHz od MP3 formata i da joj je granična frekvencija 19.5 kHz iako je uzorkovana s 44.1 kHz te možemo zaključiti da je ovo loše transkodiranje.



Slika 13 Spektrogram FLAC datoteke koja je dobivena transkodiranjem iz formata MP3 192 kbps (CBR)

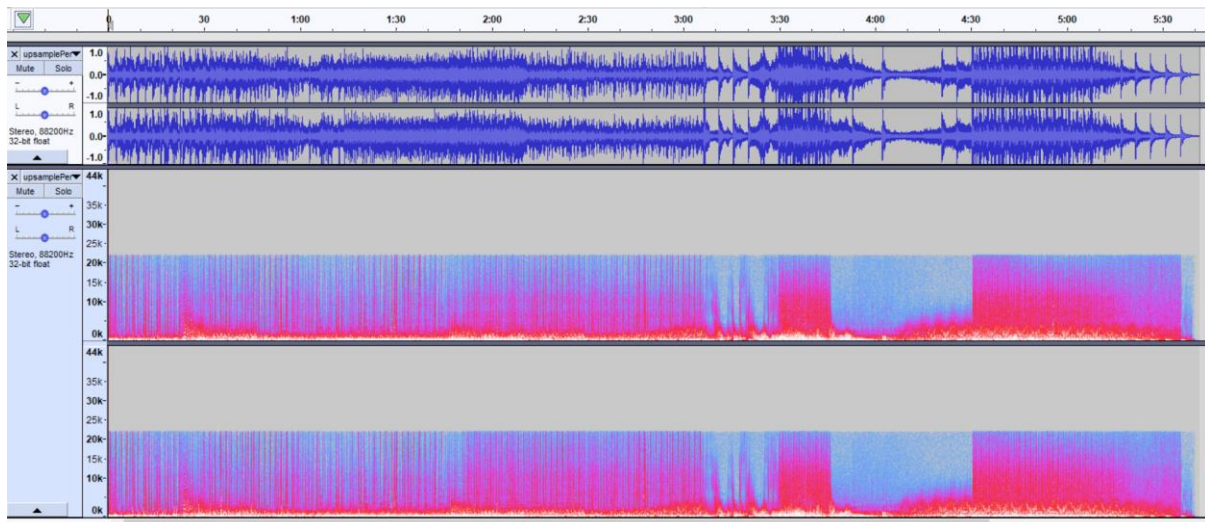


Slika 14 Spektar FLAC datoteke koja je dobivena transkodiranjem iz formata MP3 192 kbps (CBR)

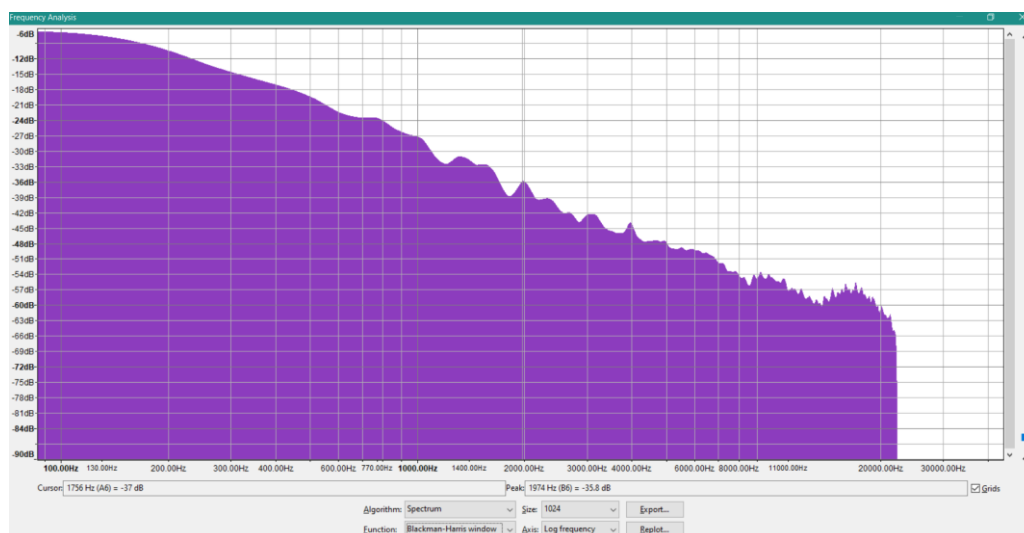
Na slici 15. nalazi se dio metapodataka datoteke čiji je zapis ponovno uzorkovan dvostrukom frekvencijom (engl. upsample), odnosno frekvencijom 88.2 kHz. Na slikama 16. i 17. primjećujemo da je granična frekvencija samo 22050 Hz, a ne 44100 Hz kako bi trebala biti da je originalni zapis bio uzorkovan frekvencijom uzorkovanja od 88.2 kHz.

```
E:\Matteo\FER Diplomski\Racunalna Forenzika\FORMAT\exiftool(-k).exe
ExifTool Version Number      : 11.79
File Name                    : upsamplePerfect (Lossless).flac
Directory                   : E:\Matteo\FER Diplomski\Racunalna Forenzika\FORMAT
File Size                    : 48 MB
File Modification Date/Time  : 2020:01:09 19:51:26+01:00
File Access Date/Time       : 2020:01:09 19:51:26+01:00
File Creation Date/Time     : 2020:01:09 19:51:25+01:00
File Permissions            : rW-rW-rW-
File Type                    : FLAC
File Type Extension         : flac
MIME Type                    : audio/flac
Block Size Min              : 4608
Block Size Max              : 4608
Frame Size Min              : 1231
Frame Size Max              : 10805
Sample Rate                  : 88200
```

Slika 15 Metapodaci iz exiftoola – primijetiti Sample Rate:88200

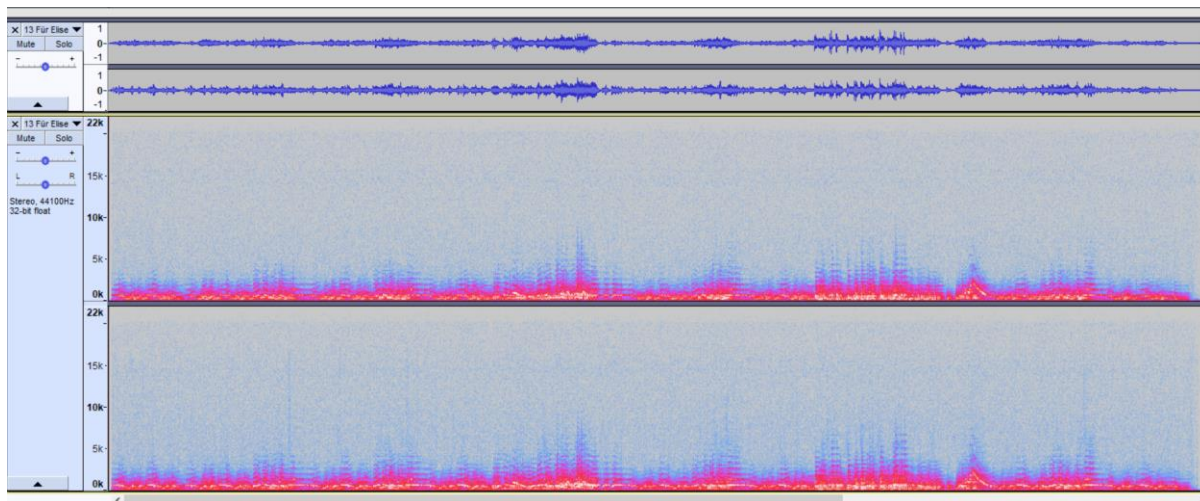


Slika 16 Spektrogram FLAC datoteke ponovno uzorkovanog zapisa dvostrukom frekvencijom

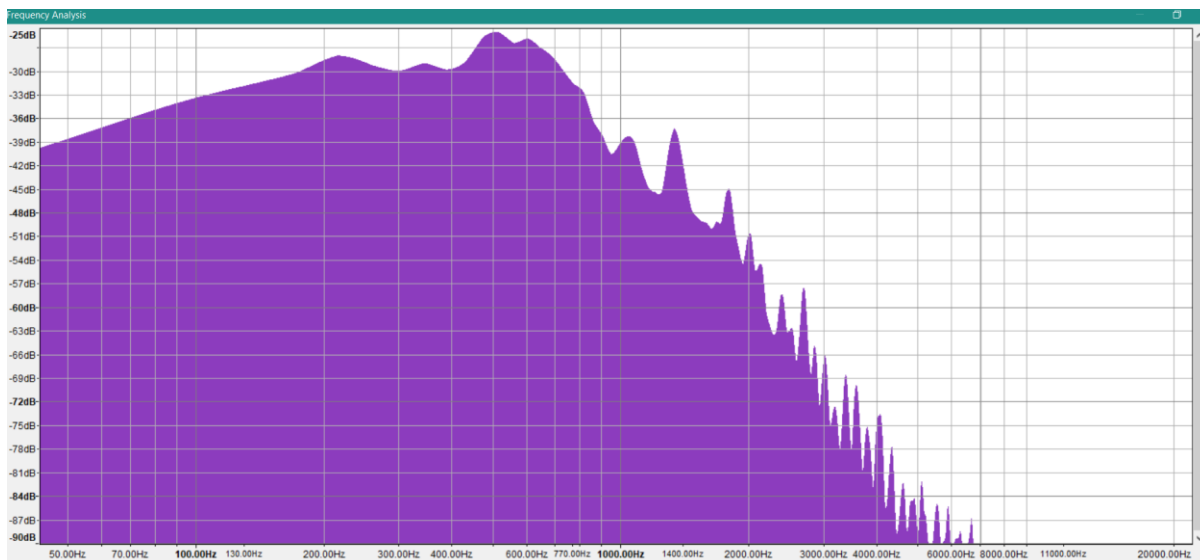


Slika 17 Spektar FLAC datoteke ponovno uzorkovanog zapisa dvostrukom frekvencijom

Na slikama 18. i 19. nalaze se spektrogram i spektar skladbe Fur Elise Ludwiga Van Beethovena. Na prvi pogled moglo bi se doći do pogrešnog zaključka da ovo nije lossless datoteka, iako ona to jest što možemo primijetiti prema tihom bijelom šumu na visokim frekvencijama (plave točkice). Ovakav izgled spektrograma i spektra je normalan za klasičnu glazbu zbog frekvencija koje reproduciraju klasična glazbala.

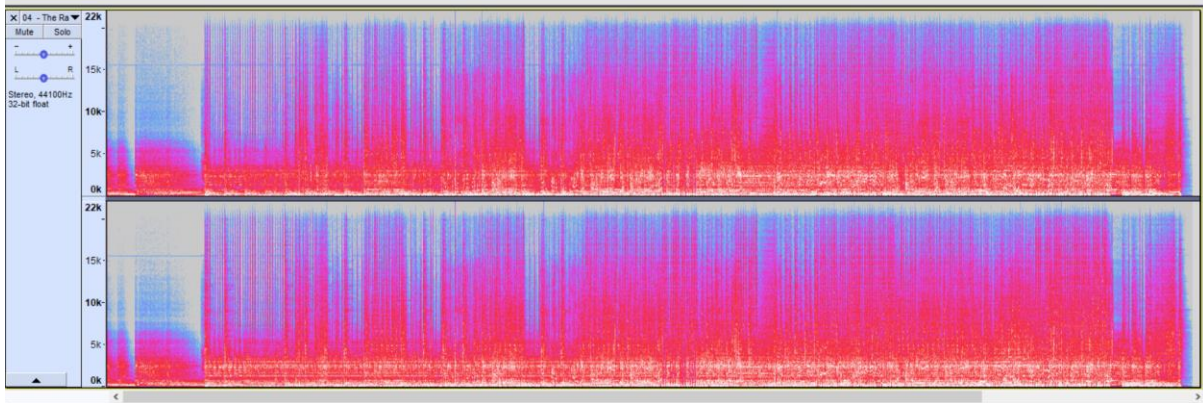


Slika 18 Spektrogram FLAC datoteke skladbe Fur Elise

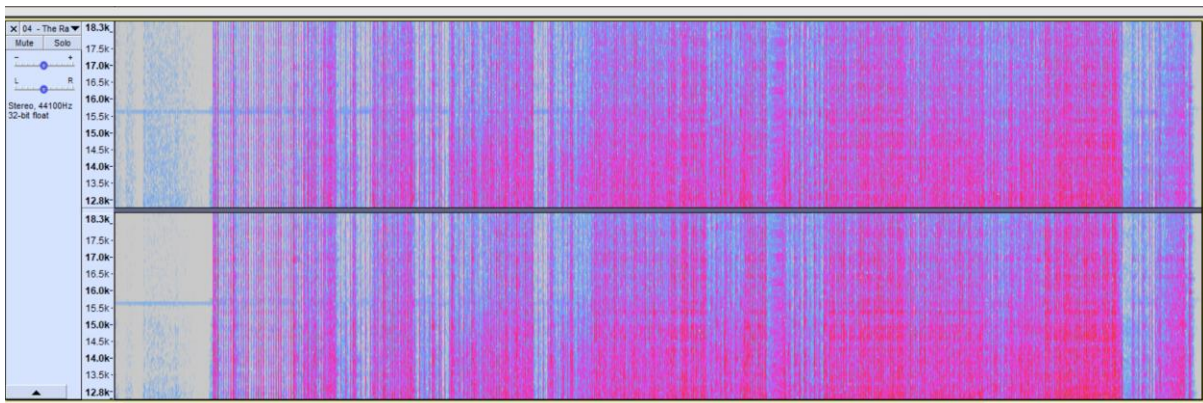


Slika 19 Spektar FLAC datoteke skladbe Fur Elise

Na slici 20. se nalazi spektrogram FLAC datoteke pjesme The Razors Edge grupe ACDC iz 1990. godine. Na slici možemo primijetiti liniju iznad 15 kHz, no u ovom slučaju iznad te linije nema brisanja tihih zvukova kao što smo mogli primijetiti na spektrogramu MP3 datoteka. Na slici 21. je поближе prikazana ta linija te uočavamo da se nalazi oko frekvencije 15625 Hz. Nekada su se u studijima za snimanje nalazili CRT monitori koji su „zujali“ upravo na toj frekvenciji. To nije oznaka lošeg transkodiranja niti lossy signala.



Slika 20 Spektrogram FLAC datoteke pjesme The Razors Edge grupe ACDC iz 1990. godine



Slika 21 Približni spektrogram FLAC datoteke pjesme The Razors Edge grupe ACDC iz 1990. godine oko frekvencije 15625 Hz

## 8. Zaključak

FLAC je lossless format koji, iako je sažet, sadržava sve podatke originalne snimke audio signala. Uz to, može sadržavati i razne metapodatke što ga čini izvrsnim formatom za arhiviranje audio datoteka. Iako proces kodiranja ovisno o faktoru sažimanja može biti relativno spor, dekodiranje datoteke je brzo te gotovo da ne ovisi o razini sažimanja. Analizom spektra moguće je prepoznati radi li se o „pravoj“ FLAC datoteci koja sadrži sve podatke originalne snimke ili o lošem transkodiranju te u kojem je formatu ta datoteka bila prije.

## 9. Izvori

[1] Službena stranica FLAC formata: <https://xiph.org/flac/>

[2] Teorija za pripremu za intervju za privatni tracker za audio torrente:  
<https://opentrackers.org/whatinterviewprep.com/index.html>

[3] Pjesma „10 – Motherboard.flac“ s albuma Daft Punk - Random Access Memories (2013)

[4] Skladba „13 Für Elise.flac“ s albuma Ludwig van Beethoven - 25 Beethoven Favorites (1996)

[5] Pjesma „04 - The Razors Edge.flac“ s albuma ACDC - The Razors Edge (1990)