

Széchenyi István Egyetem
Gépészszmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar
Informatika Tanszék

SZAKDOLGOZAT

Székely Dániel

Mérnökinformatikus BSc

2024

SZAKDOLGOZAT

**Digitális audio - Dante protokollra épülő
hangrendszer tervezése, építése,
optimalizálása, beüzemelése**

Székely Dániel

Mérnökinformatikus BSc

2024

FELADATKIÍRÁS

A feladatkiíró lapot két példányban kell leadni a tanszéki adminisztrációban. Beadás előtt az egyiket visszakapod és a leadott munkába eredeti, tanszéki pecséttel ellátott és a tanszékvezető által aláírt lapot kell belefűzni (ezen oldal *helyett*, ez az oldal csak útmutatás).

Nyilatkozat

Alulírott, **Székely Dániel (JAXC3C)**, Mérnökinformatikus BSc szakos hallgató kijelentem, hogy a *Digitális audio - Dante protokollra épülő hangrendszer tervezése, építése, optimalizálása, beüzemelése* című szakdolgozat feladat kidolgozása a saját munkám, abban csak a megjelölt forrásokat, és a megjelölt mértékben használtam fel, az idézés szabályainak megfelelően, a hivatkozások pontos megjelölésével.

Eredményeim saját munkán, számításokon, kutatáson, valós méréseken alapulnak, és a legjobb tudásom szerint hitelesek.

Győr, 2024. szeptember 16.

Székely Dániel
hallgató

Kivonat

Szakdolgozatomban egy olyan digitális hangtechnikai rendszer tervezését és megvalósítását mutatom be, amely teljes mértékben digitális alapokra helyezi a hangsúlyt. Be fogom mutatni a rendszer tervezésének lépéseiit, a különböző protokollok közötti választást, a rendszer felépítését, és a rendszer működését.

Abstract

This document is a L^AT_EX-based skeleton for BSc/MSc theses based on the official template developed and maintained at the Electrical Engineering and Informatics Faculty, Budapest University of Technology and Economics. The goal of this skeleton is to guide and help students that wish to use L^AT_EX for their work at Széchenyi István Egyetem Gépészsmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar. It has been tested with the *TeXLive* T_EX implementation, and it requires the PDF-L^AT_EX compiler.

Many thanks to the Fault Tolerant Systems Research Group who maintain the repository this template is based on: <https://github.com/FTSRG/thesis-template-latex>

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
1.1. A kezdetek	2
1.2. Téma választás	2
2. Hangtechnikai alapok	4
2.1. Az analóg kezdetek	4
2.2. Digitális térhódítás	4
2.2.1. ADC és DAC konverterek - mintavételezés	5
2.2.2. PCM - Pulse Code Modulation	5
2.3. Pontsugárzó hangforrás	6
2.4. LineArray hangforrás	7
3. Audio over IP rendszerek bemutatása	8
3.1. Bevezetés az Audio over IP világába	8
3.1.1. Előnyök és hátrányok	10
3.1.2. Fázishelyesség	10
3.1.3. Szinkronizáció	12
3.1.3.1. Jitter kompenzáció	12
3.1.3.2. Késleltetés mérése	13
3.1.4. Mintavételi frekvencia és bitmélység	14
3.1.5. Késleltetés	14
3.1.6. IP címek és maszkok	15
3.2. IP-cím hozzárendelési módszerek	15
3.2.1. Hálózati topológiák	17
3.2.2. Unicast és Multicast	18
3.2.3. Eszköz- és Adatfolyam-felfedezés	19
3.2.4. Redundancia	19
3.2.4.1. Spanning Tree Protocol (STP)	19
3.2.4.2. Link Aggregáció	20
3.2.4.3. Adatfolyam redundancia	20
3.3. AES67	20
3.4. Audinate Dante	21
3.4.1. A cégről [3]	21
3.4.2. A Dante hálózatok áttekintése	22
3.4.3. Dante hálózatok technikai részletei	22
3.4.3.1. Több mintavételi ráta és bitmélység	23
3.4.3.2. Hálózati topológiák	23
3.4.3.3. Késleltetés	24
3.4.3.4. Órajel	24
3.4.4. Összehasonlítás a hagyományos hangrendszerrel	25
3.4.5. Firmware frissítés	26

3.4.6. Chipek	26
4. Rendszertervezés és telepítés elő környezetben	28
4.1. Követelmények	28
4.2. Rendszerterv	28
4.2.1. Martin Audio Wavefront Precision hangrendszer	31
4.2.1.1. Martin Audio Display 2.3.4 b1 tervező szoftver [4]	31
4.2.1.2. Martin Audio VU-NET rendszer szoftver [8]	40
4.2.2. Dante hálózat kialakítása és optimalizálása	42
4.2.2.1. Dante Controller	42
4.2.2.2. IP kiosztás	43
4.2.2.3. Dante rendszer monitorozása	44
4.2.3. Mélyláda rendszer	44
4.2.4. Allen & Heath digitális keverőrendszer	44
4.2.5. Dante audio szerver	45
4.2.6. A rendszer mérése	46
4.2.7. A rendszer monitorozása	48
5. Üzemeltetési tapasztalatok és továbbfejlesztési lehetőségek	49
5.1. Üzemeltetési tapasztalatok	49
5.2. Továbbfejlesztési lehetőségek	49
5.2.1. További eszközök integrálása	49
5.2.1.1. Shure Axient Digital rendszer	49
5.2.1.2. TASCAM multitrack recorder	50
5.2.1.3. Allen & Heath ME Personal Mixing System	50
5.2.1.4. Martin Audio WPL LineArray rendszer	50
5.2.2. Bővítés nagyobb interfészre és keverőpultra - Allen & Heath dLive .	51
Köszönetnyilvánítás	52
Ábrák jegyzéke	55
Táblázatok jegyzéke	55
Irodalomjegyzék	55
Függelék	57

1. fejezet

Bevezetés

1.1. A kezdetek

Kisgyermek koromtól kezdve érdekelnek a hangtechnikához fűződő eszközök és azok elméleti-gyakorlati működése. Első élményeim egyike közé tartozik az, amikor szüleim egy új fajta rádiólejátszót vásároltak otthonra, amelyen már nem csak a rádióadásokat lehetett hallgatni, hanem lejátszhatóak voltak kazetták is. A készüléket akkoriban jobban tudtam kezelní gyermekként, mint a szüleim, egyértelmű volt már akkoriban is, a technika és a zene iránti érdeklődésem.

Ezek után általános iskolában a fizika tanárommal együtt kezdtük el a sulirádió működtetését, amelynek a telepítési részében is részt vetttem. Korábban az egyszerű klasszikus csengők voltak felszerelve az épületben. Szükség volt hangsugárzókra, erősítőkre, mikrofonokra, és egyéb kiegészítőkre. A rádió működtetése is az én feladatom lett két barátommal együtt, az iskolával kapcsolatos híreket és információkat mondta be röviden a szünetekben, hosszabb szünetekben pedig zenéket is játszottunk.

Mindeközben zeneiskolába is beiratkoztam, ahol ütőhangszeresként tanultam egészen egyetemi tanulmányaim kezdetéig. A több mint tíz év alatt, sok új ismeretet és tapasztalatot szereztem, amit a későbbiekben mint zenész és hangtechnikával aktívan foglalkozó szakember tudtam hasznosítani. Megismerkedtem a különböző zenei stílusok egyedi hangzásvilágával, ami a későbbiekben a hangosításban is nagy segítségemre volt.

Középiskolai tanulmányaim alatt kezdtem el komolyabban foglalkozni a hangtechnika világával. Előbbiekbén említett tanárommal ugyanis korábban nem csak a sulirádiót működtettük, hanem az összes sulibulit és helyi rendezvényt mi szolgáltuk ki technikailag. Mikor már középiskolába jártam, egy feltörekvő fiatalos és modern gondolkodású magánvállalkozáshoz ajánlottak be engem, ahol fiatal és motivált munkaerőt kerestek.

Már az első munkalehetőségnél éreztem, hogy ez egy nagyon jó lehetőség lehet a számomra, mindenki szeretné ebben a szakmában tevékenykedni. A cég fő profilja a hangrendszerek rendezvényekre való kiépítése és üzemeltetése volt, de későbbiekben bővült a portfólió és már fénytechnikával és színpadtechnikával is el kezdett foglalkozni. Ettől a ponttól kezdve kezdtem el aktívan dolgozni a rendezvényiparban és a hangrendszerek világában. Az évek során egyre több tapasztalatot szereztem. Évente több mint száz rendezvényen tudtam folyamatosan fejlődni, rutint és ismeretséget szerezni a szakmában.

1.2. Téma választás

A hangrendszerek világa az elmúlt évtizedekben nagy változásokon ment keresztül. A digitális technika térhódítása a hangtechnikában is megjelent, és egyre több fajta új

megközelítés jelent meg a piacon. Ezekből a fejlesztésekben mi sem szerettünk volna kimaradni, hogy hangtechnikai apparátusunk korszerű és versenyképes maradjon.

Ekkor jött a fejlesztési ötlet, egy olyan rendszert tervezni, amely teljes mértékben digitális alapokra helyezi a jelenlegi hibrid megoldásunkat. A cégevezetőtől azt a feladatot kaptam mint leendő informatikus mérnök, hogy tervezzék egy olyan rendszert, amely megoldja a jelenlegi hibrid rendszerünk teljes digitális megoldásra való átállását. Az alapvető szempontok közé tartozott, hogy a rendszer legyen könnyen skálázható, bővíthető, valamint a jelenlegi rendszert minden tekintetben műlja felül.

Különböző Audio over IP protokollok léteznek, ezért választanom kellett, amely a leginkább megfelel az aktuális igényeinek és anyagi helyzetünknek. Ehhez a piacon lévő protokollokat kellett megvizsgálnom, és egy optimális megoldást választani.

Szakdolgozatomban sok idegen nyelvű szóra nincsen megfelelő és pontos fordítás ami teljes mértékben tükrözne az adott kifejezés jelentését. A továbbiakban ebből kifolyólag feltételezve azt, hogy az olvasó tisztában van a szakmai terminológiával angolul fogom említeni a szakmai kifejezéseket. Ezek a kifejezések megjelenhetnek írt szövegként és ábrás illusztrációkban is. Egyes ábrák rendkívüli komplexitásuk végett a szakmai helyesség és precízió érdekében külső forrásból származnak, ezeket az ábrákat a forrásukkal együtt fogom megjeleníteni.

2. fejezet

Hangtechnikai alapok

2.1. Az analóg kezdetek

Az analóg hangrendszerek története az audio technológia hajnalára nyúlik vissza. Az ilyen rendszerek alapját az elektromos analóg jelek képezik, amelyek az akusztikus hangot elektromos árammá alakítják, a hangjelet közvetlenül, torzítás nélkül próbálják átadni az erősítőnek majd ezáltal hangszóróknak. Az analóg rendszerek egyik legfontosabb alapelve az elektromos jelek folyamatos feldolgozása. A hangot analóg módon rögzítik, és az áramkörök szigorú tervezése biztosítja, hogy az eredeti akusztikus jel minél pontosabban tükröződjön az outputban. A legnagyobb hátrány az analóg rendszerek skálázhatóságában rejlik. Ahogy a rendszer bonyolultsága nőtt, úgy a karbantartás és az állandó finomhangolás is egyre több problémát okozott. Az analóg technológiáknál a jel erősítése és kezelése gyakran jelentős torzulásokat és zajokat okozott, amelyeket nehéz volt kezelni. A kábelezést tekintve sem volt egy leányalom az analóg rendszerek használata, mivel a nagyobb távolságokon a jel torzulása és a zajok könnyen bekerülhettek a rendszerbe. Egy sokcsatornás produkciónál szép spagettitáncokat is eredményezett, még a legtapasztaltabb hangmérnökök számára is kihívást jelentett. Továbbá, a rendszer hibái nem mindig voltak könnyen diagnosztizálhatók, ami a szervizelési időket jelentősen megnövelte. A hangrendszerek technológiai hátterét tekintve, az analóg rendszerekben a transzformátorok, kondenzátorok és ellenállások kulcsszerepet játszottak. Ezek az alkatrészek feleltek a jel szűréséért, erősítéséért és átalakításáért. Azonban ezek az elemek gyakran voltak érzékenyek a környezeti hatásokra, mint például a hőmérséklet-ingadozások és a páratartalom, amelyek további kihívások elő állították a hangmérnököket.

2.2. Digitális térhódítás

A digitális technológia térhódítása a professzionális audio rendszerekben jelentős paradigmaváltást hozott az audioiparban. Az utóbbi évtizedekben a digitális rendszerek folyamatosan felváltották az analóg megoldásokat, számos előnyvel rendelkezve, amelyek hozzájárultak a hangtechnikai rendszerek fejlődéséhez. Az egyik legfontosabb tényező, amely a digitális technológia előnyére szolgál, a jelminőség és a stabilitás drasztikus javulása. A digitális rendszerekben a hangjelek bitstream formájában kerülnek feldolgozásra, amely lehetővé teszi a zajok és torzítások minimalizálását, a jelfeldolgozás során.

A digitális rendszerek jelentős előnye, hogy magasabb jel-zaj viszonyt biztosítanak, amely fokozza a jel tisztaságát és mérsékli a zavaró hatásokat. Ezáltal a hangminőség jelentős javuláson megy keresztül, mivel a digitális feldolgozás során a hasznos jel és a háttérzaj közötti különbség egyértelműbbé válik. Szélesebb dinamikatartományt nyújt,

amely lehetővé teszi a nagyobb hangerő eltérések hatékony kezelését. A digitális rendszerek egyik további előnye, hogy a digitális adatok másolása során nem történik minőségrömlás. A másolatok pontosan ugyanolyan minőséget képviselnek, mint az eredeti felvétel, így garantált a tökéletes reprodukálás. Stabil működést biztosítanak változó hőmérsékleti és tápfeszültség-ingadozások mellett. Az analóg rendszerek által okozott torzulások elkerülhetőek, így nincs jelen jelatorzulás a digitális rendszerekben. Képesek kezelni az együttfutás és hangmagasság-ingadozás problémáit, amelyeket az analóg rendszerek nehezebben tudnak kezelni. A digitális rendszerek emellett képesek visszaállítani az egyenfeszültségű jelkomponenseket, és biztosítják a lineáris frekvenciamenetet, amely pontos hangátvitelt eredményez.

2.2.1. ADC és DAC konverterek - mintavételezés

A mintavételezés olyan folyamat, amely során egy analóg hangjelet digitális formába alakítanak át, azaz mintákat vesznek az időben folytonos hanghullámokból. Ez az alapja annak, hogy a hangot számítógépes rendszerekben kezelni lehessen. A hangminták gyakorisága meghatározza a mintavételi frekvenciát, ami meghatározza a digitális hangminőséget és a frekvencia tartományt. Általában minél magasabb a mintavételi frekvencia, annál jobb a hangminőség, de nagyobb sávszélességet is eredményez.

Az ADC (Analog-to-Digital Converter) konverter az analóg hangjelet digitális jelekké alakítja át, míg a DAC (Digital-to-Analog Converter) konverter a digitális jeleket visszaalakítja analóg hangjelekké. A professzionális ADC és DAC konverterek nagymértékben befolyásolják a hangminőséget.

2.2.2. PCM - Pulse Code Modulation

A hangfrekvenciás jelek digitális feldolgozása a PCM (Pulse Code Modulation, impulzuskód-moduláció) elvén alapul. Ennek során az analóg jelet diszkrét impulzusok sorozatára bontják, ahol az impulzusok amplitúdóértékei bináris kódokkal kifejezett információt hordoznak.

A PCM jel előállítása az A/D (analóg-digitális) átalakításon keresztül történik. Az analóg jelek időbeli és értékbeli folytonossága diszkrét minták sorozatává alakul, miközben az információtartalom megőrzi az eredeti jelhez hasonló értékét. Ezt a mintavételi tételel (C. E. Shannon) bizonyította, amely alapján az eredeti jel visszaállítható információveszteség nélkül, ha a mintavételi frekvencia legalább kétszerese az analóg jel legmagasabb frekvenciájának.

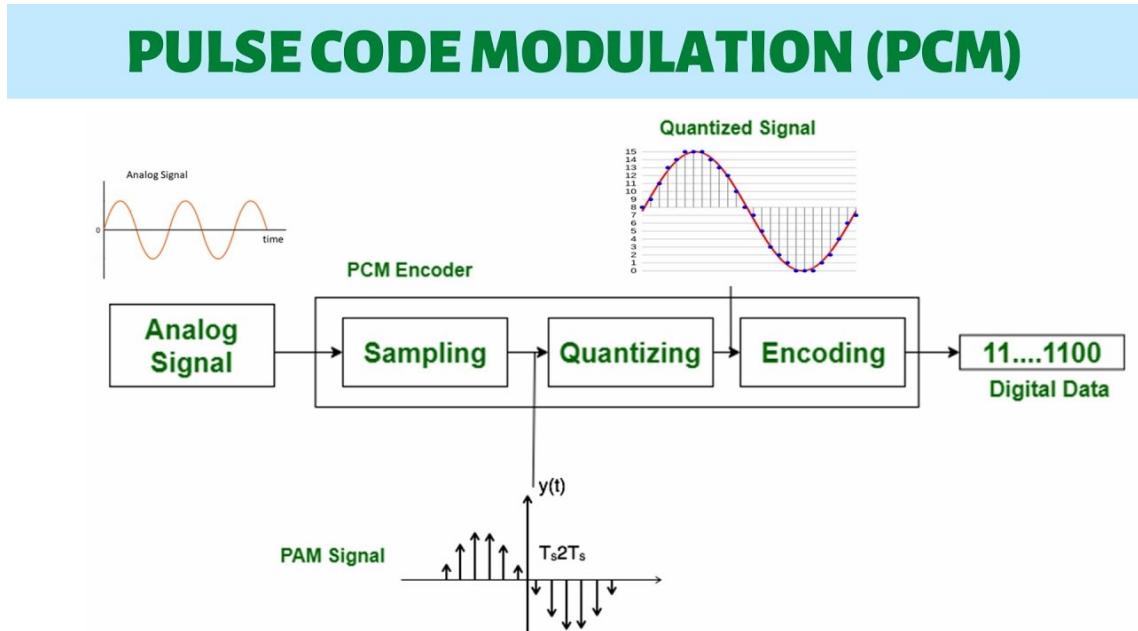
Az analóg jelben előforduló maximális frekvenciát Nyquist frekvenciának nevezik. Ennek megfelelően a mintavételi frekvencia határozza meg a digitális hangfeldolgozó rendszer sávszélességét. Figyelembe véve, hogy a hangfrekvenciás jel felső határa 20 kHz, a hifi hangminőség eléréséhez a mintavételi frekvencia minimálisan 40 kHz-nél nagyobb kell hogy legyen. A digitális hangfeldolgozás során jellemző mintavételi frekvenciák az alábbiak:

- CD minőség: 44.1 kHz
- DVD minőség: 48 kHz
- Studio minőség: 96 kHz
- Ultra minőség: 192 kHz

A digitális hangfeldolgozás során jellemző bitmélységek az alábbiak:

- CD minőség: 16 bit

- Studio/live minőség: 24 bit
- Ultra minőség: 32 bit



2.1. ábra. Pulse Code Modulation (PCM) folyamat [12]

A digitális hangfeldolgozás területén fontos szerepet játszik az A/D átalakítók kialakítása, a kódolás folyamata, a D/A (digitális-analóg) átalakítás, valamint a hibafelismerés és hibajavítás.

A digitalizáció során az időbeli mintavételezés történik. Folyamatos mintavételezéskor a hang intenzitásával arányos diszkrét értékek, azaz feszültségimpulzusok jönnek létre. A mintavétel során az impulzusok a beérkező amplitúdó értékek alapján végtelen számú értéket vehetnek fel, ám a rendelkezésre álló bináris adatszók száma véges. Ezt a jelenséget kvantálásnak vagy tartományokba való felosztásnak nevezzük.

A kvantálás során a hangtartomány véges számú lépcsőre oszlik. A kvantálás finomsága, amely a mintavételi frekvenciával együtt a digitális jelfeldolgozás egyik legfontosabb paramétere, meghatározza a hang digitalizálásának részletességét. Gyakorlatilag a hangfrekvenciás jelek digitalizálásánál általában 14 vagy 16 bites kvantálást alkalmaznak. A kvantálásnál figyelembe kell venni a kvantálási zajt is, amely a tartományok növelésével csökkenhető. A kódolás során a hangsintek szerint kvantált pontok kódkombinációk sorozataként, digitális jelekként jelennek meg.

2.3. Pontsugárzó hangforrás

A pontsugárzó hangforrások azok a hangfalak, amelyeket olyan módon modelleznek, mintha a hang egyetlen pontból származna, és a hangnyomás arányosan csökken a távolsággal. Ez a modell elsősorban olyan hangfalak esetében alkalmazható, amelyek önállóan működnek, például hangfalak dobozokban vagy mennyezetbe szerelve. Ezt a modellt főként olyan helyeken használják, ahol könnyen kell elérni a hangerőszintet, például előadótermekben vagy kis koncerttermekben. Amikor több hangforrás kombinálódik, például kétutas hangfalrendszerben, a transzducerek közötti kombináció bonyolultabb

irányítottságot eredményez a fizikai távolság és a szűrők kölcsönhatása miatt. Ennek eredményeként az irányítottság frekvenciától függően változik, ami kihívást jelent a hangrendszer tervezése során.

2.4. LineArray hangforrás

A LineArray hangforrások olyan hangfalrendszerök, amelyekben több hangdoboz egymás fölött van elrendezve, hogy egy közös lineáris hangforrást alkossanak. Ezt a technikát használják nagyobb hangosítási telepítésekben, mivel egyetlen hangfal nem elegendő a szükséges hangteljesítmény eléréséhez és a közönségterület lefedéséhez.

Ezeket a rendszereket DSP-kkel finomhangolják az egyes hangdobozok válaszának beállításához, lehetővé téve például a függőleges irányítottság változtatását. Ez segít a hangot pontosan irányítani a közönség felé. A DSP-vezérelt hangszórórendszer tervezése számítógépes eszközökkel igényel, amelyek lehetővé teszik a hangszórók viselkedésének részletes szimulációját a teremmel összefüggésben, és optimalizálják a haneloszlást a kívánt irányban.

3. fejezet

Audio over IP rendszerek bemutatása

3.1. Bevezetés az Audio over IP világába

A 90-es évek vége óta a szakmai hangipar elmozdult a pont-pont digitális átviteli formátumoktól mint az AES/EBU vagy a MADI az IP-alapú szabványok felé a példa kedvéért mint az AES67. Ez a csomag alapú hálózati megközelítés hatalmas rugalmasságot hozott, valamint kibővített vezérlési és monitorozási képességeket biztosít a hangmérnökök számára. Lehetőséget kapunk arra, hogy egy fizikailag már meglévő telepítést későbbi szoftverkonfigurációval és frissítésekkel bővíthetővé tegyünk. A gyártók különböző esetekben akár teljesen új funkciókkal is kiegészíthetik a már meglévő eszközöket, habár ez elsősorban csak a prémium kategóriás eszközökre igaz.

A jelutak az IP alapú gondolkodásmód miatt már nem kötődnek 1:1 fizikai kábelekhez, hanem bármikor pár egérkattintással megváltoztathatóak anélkül, hogy szükség lenne bármilyen jellegű fizikai átrendezésre, vagy dedikált audio útválasztó hardverre. A csomagorientált átvitel jellegéből adódik, hogy az audiojelek automatikusan eljutnak a kívánt helyre a hálózaton keresztül.

A Cirrus Logic által 1996-ban bevezetett CobraNetet tekintik általában az első sikeres audio-over-ethernet hálózat-implementációnak. Bár még ma is sok CobraNet telepítés létezik, magas késleltetési problémák és korlátozott skálázhatóság miatt nem ideális előhang, stúdiók és rádióállomások számára.

A mintegy tíz évvel később megjelent egy ausztrál cég az Audinate, és az általuk kifejlesztett Dante a Digital Audio Network Through Ethernet[®]. Dante sok jelentős előnyivel rendelkezik az első generációs audio-over-IP technológiákhoz viszonyítva. Ezek közé értve a jobb használhatóságot és magasabb kompatibilitást a szabványos IT infrastruktúrával. A Dante egy hatalmas hardveres ökoszisztemából is profitál, több száz gyártó által gyártott ezernél is több eszközzel szerte a világon.

Mielőtt a Dante elérte volna jelenlegi domináns pozícióját, nagy várakozás volt az AVB (Audio Video Bridging) nevű technológia körül is. Az autóipar és az ipari automatizálás, átvette az AVB-t, és általánosabb nevet adtak neki, mivel már nem csak hang és videóalkalmazásokhoz kapcsolódott. Az AVB-t a gyártók fejlesztőcsoporthja, AVnu Alliance időérzékeny hálózat (TSN) néven nevezte el.

Később a Milan munkacsoporthoz, ami egy audio/video gyártókból álló konzorcium, úgy döntött, hogy kidolgoz egy finomhangolt specifikációt a profi audio/video rendszerekben való használatra, Milan néven. Ez egy specifikus TSN verzió, amely az audio/video szolgáltatók közötti interoperabilitásra összpontosít. Fontos, hogy nem a TSN alapján

készült, mivel a TSN-hez speciális IT hardver szükséges az audio követelmények kezeléséhez, és csak korlátozott számú kapcsoló támogatja a TSN-t.

Az átmenet az IP hálózatokra összehasonlítható az analóg hangról a digitális hangra való átmenettel. Először csak néhány kezdeti telepítés, amelyek az új technológiát használják, majd esetleg hiányosságokat mutathatnak a kezelés vagy a megbízhatóság terén a hagyományos régi megközelítéshez képest, de ezek idővel a technológia fejlődésével eltűnnek.

Vannak területek, ahol az IT hálózatok alapvetően más módon működnek, mint a hagyományos audio útválasztás. Először is, egy szabványos IT hálózat nem arra van kialakítva, hogy szigorú időzítési követelményeket kelljen teljesítenie, azonban ez általában az audio esetében nagyon is szükséges. Egy hálózati környezetben az adatcsomagok útját más csomagok is akadályozhatják, ami jelentős időbeli változást eredményezhet az csomagok érkezési idejénben. A hagyományos audio kábelek esetében az adatok továbbításának időzítése nem változott meg a kábel által. Egyig végponttól a másikig a hangminták zavar nélkül (feltételezve, hogy a kábel jó minőségű és nincsen interferencia) érkeznek meg. Az IT hálózatokban azonban a csomagok útja nem garantált, és a csomagok késleltetése változhathat. Másodsor, egy csomag elvesztése elfogadhatónak tűnhet és tűnik is egy szokásos IT alkalmazás esetében, mivel azok automatikusan újraküldésre kerülnek, amennyiben valami hiba során elvesznek. Az audio alkalmazások esetében a késleltetés minimalizálása érdekében létfontosságú, hogy a csomagok az első alkalommal a korrekt helyre érkezzenek meg, mivel egyáltalán nincs semmilyi idő sem az újraküldéshez. Ha néhány csomag elveszik, az azonnal hallható megszakításokat és kimaradásokat okoz, rongálva ezzel a hang elvezetőségét.

A csomagvesztés gyakori okai a linkek túlterhelése, vagy a túl alacsony pufferméret. Tehát az audiohálózatokat oly módon kell kialakítani, hogy elegendő sávszélesség álljon rendelkezésre minden egyes eszköz számára egyidejű használat esetén is. Ha ez teljesül, és a csomagkiszállítás időben történik, ahogyan az audio alkalmazások igénylik, akkor a hálózatunk már elméletileg képes lehet hosszútávon stabilan működni. Ettől függetlenül érdemes túlbiztosítani a hálózatot oly mértékben, hogy minden csomag időben megérkezzen, anélkül, hogy további extrém finomításra lenne szükség a kapcsolók konfigurációjában. Konkrétan ez azt jelenti, hogy olyan IT hálózatokat kell építeni melyek elegendő sávszélességgel rendelkeznek, és kizárolag az audio alkalmazások számára legyen használatos, tehát ne keveredjenek általános minden nap alkalmazásokkal.

A legtöbb audio-over-IP technológia abból indul ki, hogy az alapul szolgáló hálózat megfelelően fog működni, hibamentesen végzi a dolgát. Gondolva itt arra, hogy nincsen csomagvesztés, nincs súlyos ütközés más csomagokkal a kapcsoló hardveren, és a csomagok nem késnek a hálózaton. Néhány esetben, különösen ha az audio és más forgalmat keverik, fontos lehet az audio és szinkronizációs csomagoknak elsőbbséget biztosítani másokkal szemben, például az internetes böngészéssel szemben. Ez a mai legtöbb kereskedelmi forgalmazott kapcsolóval elérhető.

Példa audio over IP hálózatokra:

- Audinate által kifejlesztett - Dante
- QSC által kifejlesztett - Q-LAN
- Lawo és Partnerei által kifejlesztett - RAVENNA



3.1. ábra. Audinate Dante logó

3.1.1. Előnyök és hátrányok

Az IT hálózatok alkalmazása hangkapcsolatokra nézve számos előnyt kínál:

- Rugalmasság hangkapcsolatok hozzáadásához vagy módosításához anélkül, hogy kábeleket cserélnénk.
- Az IT viszonylag alacsony áron széles skálájú funkciókat kínál.
- Alkalmazkodás és integráció az IT hálózati infrastruktúrákba specifikus audio vagy videokábelek alkalmazása nélkül.
- Videójel és vezérlési adatok továbbíthatók ugyanazon infrastruktúrán keresztül.

Ugyanakkor az audio-over-IP hálózatok felhasználóit számos kihívás elé is állíthatják:

- Azért mert általában több hangmintát egy csatornából egy csomagba helyeznek el a hatékonyúság érdekében, adott minimális késleltetés adódik, mivel az küldőnek meg kell várnia, hogy a hangminták rendelkezésre álljanak, mielőtt azokat átküldené a hálózaton. Ez a késleltetés általában magasabb, mint a pont-pont digitális hangszabványok esetében, de optimalizált csomagformátumok és hálózati beállítások segítségével minimalizálható és nagyon jól közelíthető.
- Mivel az IT hálózatok nem meghatározottak a csomagok úti idejét tekintve, egy biztonsági tartományt, azaz egy audio buffer-t kell beszúrni a fogadó végén. Ez a buffer további késleltetést eredményez. Minél kevesebb csomagütközés van jelen a hálózatban, annál inkább csökkenthető ez a biztonsági tartomány és ezzel a késleltetés.
- Az audio csomagformátumok változatossága miatt növekszik a komplexitás, ami azt jelenti, hogy a fogadóknak és küldőknek azonos beállításokkal kell rendelkezniük. Az audio-over-IP technológia komplexitása jelentősen magasabb, mint az előző technológiáké. Az iparág még mindig jelentős munkát végez annak érdekében, hogy csökkentse ezt a komplexitást a felhasználók számára, bevezetve intelligens és felhasználóbarát szoftvermegoldásokat az audiohálózatok kezelésére.

3.1.2. Fázishelyesség

A legtöbb audio alkalmazásban kritikus számunkra több eszköz szimultán szinkronizált viselkedése. Elengedhetetlen az egyes mikrofonok vagy hangszórók közötti fázispontosság. Amikor több hangszóró van csatlakoztatva egy erősítőhöz, és az összes csatorna egyetlen hangsomagban érkezik meg, nincs veszélye annak, hogy a csatornák ellenfázisban lennének egymással, mivel a hangminták nem változhatnak el egymás között a hálózaton kereszttüli átvitel során.

Azonban egy nagy rendszernél több erősítő és processzor függetlenül egymástól kap hangsomagokat, az is lehetséges, hogy fizikailag is távolabb vannak egymástól, miközben továbbra is szükség van arra, hogy pontosan reprodukálják a jeleket egyező fázissal. Egy

adott csomagot több hálózati eszköz is megkapja, puffereli, és ezeket pontosan ugyanabban az időben kell lejátszaniuk.

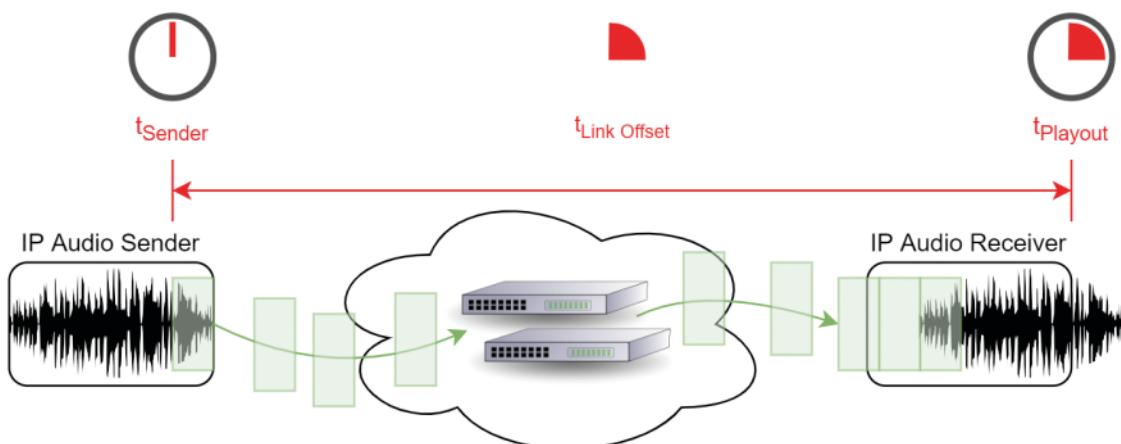
Mivel nincsenek szoros időzítési specifikációk az IT hálózatokban a csomagok továbbításának és megérkezésének időpontjára vonatkozóan, az audiohálózatoknak mindenkorban egy olyan szinkronizációs módszert kell biztosítani ami megoldja számunkra ezt a rendkívül kritikus problémát. Ez egy fontos, és egyben új probléma a audio hálózatokban, amellyel az összes audio-over-IP technológiának foglalkoznia kell, nem lehet megkerülni.

Az audiohálózaton belül minden eszköznek abszolút időben szinkronizálnak kell lennie a Precision Time Protocol (PTP) szerint. Ez azt jelenti, hogy belső óráik (PTP követők) egy referenciaóra eszközből (PTP vezető) származnak. Ez az eszköz bármilyen audioszinkronizációt lehet, amely biztosítja ezt a funkciót, vagy akár egy speciálisan erre a célra fejlesztett eszköz is lehet a pontos PTP órák előállítására. A vezetőt egy felhasználói beállítás vagy alternatívaként egy szabványos automatizmus választja ki. Az összes eszköz számára, legyen az audio adó vagy vevő, az a végső követelmény, hogy pontosan szinkronizálódjanak ehhez az adott időhöz. Az audio csomagokat küldési pillanatukban egy időbélyegzővel látják el. A felhasználó állandó időeltolást állít be az összes vevőnél, ez a linkeltolás. Amikor tehát a csomag megérkezik egy vevőhöz, a pufferben marad, míg lejátszásra nem kerül. Tehát az audio lejátszás pillanata a küldési idő plusz a linkeltolás.

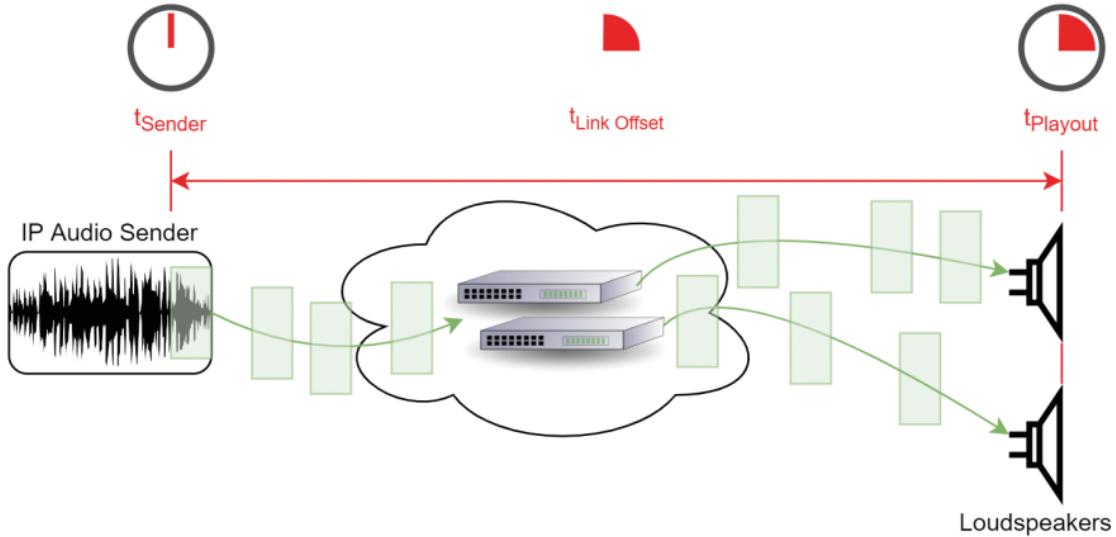
Minden vevő két feltétel mellett érheti el egymás között a fázispontosságot:

- Pontos időszinkronizálás a PTP óra vezetőjéhez (azonos időbázis).
- Azonos linkeltolási érték beállítása a felhasználó által az összes vevőszinkronizációjához.

Ezért a linkeltolást az érintett összes kapcsolat legrosszabb esetű késleltetése alapján kell kiválasztani. Javasolt bizonyos engedményt hozzáadni az esetleges csomagkiszállítási idők váratlan eltéréseinek esetére. Ez azt jelenti, hogy kicsivel nagyobb időt hagyunk az átlagos csomagfeldolgozási időnél, ezzel is biztosítva a rendelleneségektől mentes működést. Szerencsére ez a koncepció elterjedt és jelenleg minden audiohálózati szabványban használatos.



3.2. ábra. A kapcsolati eltolás meghatározza a késleltetést [1]



3.3. ábra. Fáziskoherencia azonos kapcsolati eltolással [1]

3.1.3. Szinkronizáció

Az IP küldők és fogadók szinkronizációja az alacsony késleltetéssel való szinkronban lévő működéshez elengedhetetlen. A hagyományos audio technológiákban az eszközöket vagy külön *word clock* kapcsolattal, vagy szinkronizált audio formátumokkal, például AES/EBU vagy MADI segítségével szinkronizálták.

A fogadók közvetlenül képesek frekvenciájukat és fázisukat kinyerni, mivel valamiféle *impulzust* biztosítottak, ami jelzi a pillanatot, amikor egy audio minta létrejön vagy lejátszódik, például analóg-digitális konverterek esetében is. Az PTP csomagok kicsik és nem tartják fel a forgalmat sokáig, de fontos, hogy a kapcsolókban a lehető legmagasabb prioritással továbbítsuk őket. Ez végül növelni fogja a szinkronizáció pontosságát, így a késleltetési eltérések minimalizálódnak.

A QoS (Quality of service) keretein belül a PTP csomagokat még a hangnál is magasabb prioritással kell kezelni. Az összes hálózati eszköz ugyanazon naptári időpontra szinkronizálódik a Precision Time Protocol (PTP) segítségével. Ennek az időnek a vezérője egy olyan eszköz, amelyet óraleadernek neveznek, míg az ehhez igazodó eszközöket óra követőknek hívják.

Minden eszköznek meg le kell hozzá generálnia a hagyományos helyi órát is, amelyet a PTP-n keresztül kapott abszolút időből származtat. Ez a belső óra a *médiaóra*. Ha a gyártó megfelelően implementálja, minden eszköz médiaórájának pontosan ugyan annyinak kell lennie a frekvencia és fázis terén. A magas pontosság technikailag elérhető, de kihívást jelent a gyártók számára. Ezért a PTP szinkronizált eszközök közötti fázispontosság minőségtől és árkategóriától függően változhat. Elfogadható változásnak tekinthető ha az eltérés kisebb mint $<1 \mu\text{s}$, azaz 1 mikroszekundum.

Mivel az IT hálózatok nem elégé determinisztikusak a csomag kézbesítésének időpontját illetően, a készülékek pontos szinkronizációja kifinomult megközelítést igényel. A PTP követők fő feladata két hatás kompenzációja, amelyek bármilyen hálózat esetén előfordulhatnak:

3.1.3.1. Jitter kompenzáció

A PTP vezető által a szinkronizációs üzenetekben megadott jelenlegi időt az összes követőnek egy jól ismert multicast cím (224.0.1.129) használatával mutatják be. A

hálózat és a kapcsolók természetéből adódóan ez az információ nem mindenkor érkezik meg tökéletes állandó késleltetéssel a vevő számára. Ez a változás a csomag jitter vagy csomag késleltetési változás (PDV) néven ismert effektus, ezt az elváltozást minden PTP követőnek kompenzálnia kell. Általában az audio hálózatok 1–8 üzenet/mp szinkronizálási arányt használnak. A 8-as maximális érték csak kompatibilitás érdekében javasolt, egy ilyen magas szinkronizálási arány nem szükséges a legtöbb alkalmazásban.

3.1.3.2. Késleltetés mérése

A követő második kulcsfontosságú feladata a vezető és a követő közötti csomagkésleltetés mérése a vezető által szinkronizációs üzenetekben kapott idő kijavításához. Ehhez szükség van arra az időmérésre, amely azt mutatja meg számunkra, hogy a hálózati út során mennyi időbe telik egy csomag átvitele. Ez a mérés magába foglalja az összes közöttük lévő eszköz késleltetését, beleértve a kábeleket és kapcsolókat is. A vezető és a követő közötti kábelhossz és a kapcsolók száma nem számít, csakis kizárálag a végső érték. A PTP időnek az összes követő között ugyanannak kell lennie nanoszekundum pontossággal.

Az egyetlen feltétel a PTP számára, hogy a késleltetés mindenkor irányban, a vezetőtől a követőig, állandó és szimmetrikus maradjon. A késleltetést a követő két üzenet cseréjével méri, a késleltetési kérésből és a késleltetési válaszból következően. Ezt a késleltetést általában a szinkronizálási aránnyal azonos gyakorisággal hajtják végre, azaz az előbbiekbén már említett 1 és 8 alkalom között. Mivel a hálózaton több eszköz is képes lehet PTP vezetőként működni és elosztani az időt az összes követőnek, a szabvány szabályokat hozott létre a vezető kiválasztásához. Ezt a szabályt a Best Master Clock Algorithm (BMCA), vagyis a Legjobb Mesteróra Algoritmusnak nevezik.

Minden vezetőképes eszköz küldhet bejelentő üzeneteket a prioritásairól (amelyeket a felhasználó állíthat be), valamint az oszcillátor pontosságáról. Ezenkívül figyelnie kell más eszközöket, amelyek szintén elküldhetik saját bejelentő üzeneteiket. Ha más bejövő üzenetek jobb minőséget jelentenek, az eszköz leállítja a vezetőként való bejelentkezését. Ellenkező esetben rendszeresen küldi saját üzeneteit, mintegy *szívverésként*, és ezzel jelezve minden másik eszköznek az aktív állapotát.

Ezeket az üzeneteket az *announce intervallumnak* nevezett időközönként küldik el. A bejelentő üzenetek szolgálnak *szívverésként* is, hogy mások tudják, a jelenlegi mester még működőképes. Ha a kapcsolat megszakad, az összes egység vár egy bizonyos időt (bejelentő időtúllépés), amíg elküldik bejelentő üzeneteiket, majd megismétlik a kiválasztási folyamatot. A vezetőváltás idején a követőknek folytatniuk kell saját oszcillátoruk belső működését. Az audio nem szakítható meg a vezetőváltás során. A bejelentő üzenetekben megadott minőség két értéket tartalmaz, amelyeket a felhasználó állít be: prioritás 1 és prioritás 2. Mindkettő értéke 0 és 255 között változhat, ahol a 0 érték a legjobb és legyőzi a többieket. Ha egy prioritás 1 érték kisebb egy eszközön, mint más eszközökön, akkor az lesz a vezető. A prioritás 2 alatti érték csak akkor releváns, ha minden előző érték, beleértve a prioritás 1-et is, több eszközön is ugyanaz. Ez előfordulhat két azonos típusú eszköz telepítéseknél, amelyeknek a felhasználó azonos értéket állított be a prioritás 1-hez. Ebben az esetben a prioritás 2 határozza meg, hogy melyik lesz a fő vezető, és melyik a tartalék.

Fontos megjegyezni, hogy néhány eszköz nem kínál lehetőséget a felhasználónak ezen értékének megadására. Ehelyett egyszerűen a *Preférált Vezető* megjelölésével rendelkeznek. Technikailag ezek a termékek rögzített értéket használnak bejelentő üzeneteikben, amit a gyártó határoz meg. Ezért még mindenkor lehetséges, hogy egy másik PTP vezetőnél beírva egy még alacsonyabb értéket, felül bírálhatja az ilyen típusú eszközt. Néhány eszköz támogatja azt a beállítást is, amit *Csak Követő* néven ismerünk. Ebben az esetben amikor

ez engedélyezve van, az adott eszköz sosem próbálja meg átvenni a vezetői szerepet az PTP hálózaton.

3.1.4. Mintavételi frekvencia és bitmélység

Az audio over IP rendszerekben a kifogástalan működéshez elengedhetetlen a számunkra megfelelő mintavételi frekvencia és bitmélység meghatározása.

Ezek a paraméterek alapvetően befolyásolják az audio minőségét és a hálózati teljesítményt. Fontos figyelembe venni az átviteli kapacitást, valamint az egyes eszközök maximális mintavételi frekvenciáját és bitmélységét. Amennyiben a hálózat nem képes a megfelelő sávszélesség biztosítására, a hálózatunk instabillá válhat, hangkimaradások és megszakadások, legrosszabb esetben a hálózat teljes összeomlása is előfordulhat. A gyakran alkalmazott 48 kHz-es mintavételi frekvencia széles hangsávot biztosít, és kompatibilis a legtöbb professzionális hangtechnikai alkalmazással. Nemrégiben kezdtett el jobban elterjedni szélesebb körben is a 96 kHz-es mintavételi frekvencia, ami nagyobb részletességet és jobb hangminőséget eredményez, de cserébe nagyobb sávszélességet igényel. A sávszélesség kiszámítása a következő képlettel történik:

$$\text{Sávszélességigény} = \text{Mintavételi Frekvencia} * \text{Bit Mélység} * \text{Csatornák Száma} \quad (3.1)$$

Ezzel a formulával könnyen és gyorsan kiszámíthatjuk, hogy a rendszerünknek mekkora sávszélességre lesz szüksége. Tehát ha egy 64x64 csatornás rendszerünk van, 96 kHz-es mintavételi frekvenciával és 24 bites bitmélységgel, akkor a sávszélességünk a következő lesz:

$$96000 * 24 * 64 * 2 = 294912000 \text{bit/s} = 294,912 \text{Mbit/s} \text{(nyers adatfolyam)} \quad (3.2)$$

A hálózatunkat nem centizhetjük ki, mindig kell egy bizonyos tartaléket hagyni a hálózatban. A korábbiakban már említett módon, jelen esetben javasolt egy legalább 30 százalékos túlméretezést alkalmazni nem csak elméletben hanem gyakorlatban is. Tehát a fenti példában a sávszélességünk a következő lesz:

$$96000 * 24 * 64 * 2 * 1.3 = 383385600 \text{bit/s} = 383,3856 \text{Mbit/s} \text{(teljes sávszélesség tartalékkal együtt)} \quad (3.3)$$

A számítások alapján egy átlagos 1 Gbit/s (1 Gbit/s = 1000 Mbit/s) sávszélességű hálózaton ez a rendszer már megfelelően működhet. A bitmélység a hangsáv digitális reprezentációját határozza meg, és az adatok pontosságát befolyásolja. Általában 16 vagy 24 bitmélységű rendszerek használatosak az audio over IP területén, de a Dante rendszerek a 32 bites bitmélységet is támogatják. A 16 bites reprezentáció megfelelő lehet olyan alkalmazásokhoz, ahol a nagy dinamikatartomány nem kritikus. A 24 bites felbontás lehetőséget nyújt a pontosabb és részletesebb hangátvitelhez, általában zenei stúdiókban és élőzenei környezetekben. Végül a 32 bites bitmélység a legmagasabb jelenleg elérhető minőséget biztosítja, de a sokkal nagyobb sávszélesség igénye miatt elsősorban csak a kiemelten professzionális stúdiókban limitáltan használják, de általában a 24 bites bitmélységű rendszerek is tökéletesen megfelelnek.

3.1.5. Késleltetés

Amennyiben egy csomag például 1 ms (milliszekundum) hanganyagot tartalmaz, a kapcsolat késleltetése minden nagyobb lesz, mint 1 ms. A küldőnek először 1 ms hangot kell pufferelnie, mielőtt beleteszi egy csomagba, majd elküldi a hálózaton. Ezt követi a

hálózaton történő utazás ideje az összes kapcsolóval, mielőtt végül eljutna a fogadó eszköz pufferébe.

1. Csomag idő
2. Utazási idő a hálózaton
3. Fogadási puffer

A gyakorlatban a *link offset* technikai kifejezés egyenlő a késleltetés fogalmával. A felhasználó felelőssége, hogy olyan *link offsetet* válasszon, amely elég hosszú, hogy a fogadó puffer soha ne ürüljön ki, és ezáltal soha ne szakadjon meg a folyamatos hangátvitel.

3.1.6. IP címek és maszkok

Egy hálózaton belül minden eszköznek egyedi címre van szüksége annak érdekében, hogy a csomagok sikeresen elérjék céljukat és elkerüljük a csomagok ütközését egymással. Egy ilyen cím lehet kifejezetten a hardverrel kapcsolatos (MAC-cím) vagy egy konfigurálható cím (IP-cím).

3.2. IP-cím hozzárendelési módszerek

Az IP-címeket háromféleképpen lehet hozzárendelni egy eszközhöz:

- **Felhasználói kézi beállítás:** Ez dokumentációt és felhasználói fegyelmet igényel annak érdekében, hogy egy adott IP-címet csak egyszer használjanak ugyanabban a hálózatban. Ez lehet a preferált megközelítés állandó telepítések esetén, mivel lehetővé teszi az IP-címek rendelésének bizonyos struktúrájának követését.
- **DHCP szerver általi eszközhöz rendelés:** Ez egy rugalmas, mégis strukturált módja az IP-címek elosztásának a hálózaton belül. Egy hoszt 'DHCP módban' megpróbálja megtalálni a megfelelő DHCP szervert, és minden szükséges IP-konfigurációt egy szabványosított módon szerez be. Egy felhasználó ellenőrizheti a DHCP szerverben észlelt eszközöket és azok IP-címeit. Az adminisztrátor konfigurálhatja úgy, hogy csak bizonyos IP-cím-tartományt osztanak ki, míg másokat kézi rendelésre tartalékolnak.
- **Hoszt általi önkiosztással:** Ez a mechanizmus még *Zeroconfig* néven ismert, és csak kis telepítésnél működik a korlátai miatt, mivel az összes eszköz egy alhálózatban van, és nem csatlakozhat más alhálózatokhoz.

Egy adott eszköz IP-címéről való információ beszerzése alapvetően kissé nehéz lehet, ha az nem jelenik meg egy kijelzőn vagy egy konfigurációs felületen. Azonosítani, hogy két IP-cím ugyanabba az alhálózatba tartozik-e, nem lehetséges a hozzájuk tartozó alhálózati maszkok ellenőrzése nélkül. Ha egy csomag cél-IP-címe nem ugyanabban az alhálózatban van, a küldő eszköznek a router IP-címére kell irányítania, ahelyett hogy közvetlenül a fogadó eszközhöz küldené. Két hoszt ugyanabban az alhálózaton belül hasonló IP-címekkel rendelkezik, csak az utolsó számjegyekben különbözik. Az első részt hálózati címeknek nevezik, a másodikat, amely az eszköz számára egyedi, hosztcímkének. A kettő közötti szétfelosztást az alhálózati maszkban a '0'-s számjegyek pozíciója jelzi. A hálózati címeket az alhálózati maszkban egy '0'-nál nagyobb érték jelzi, míg a hosztcím a maradék jobb oldal, ahol az alhálózati maszk '0'-át jelzi.

Host A

	Network Address	Host Address
IP address	192.168.020.079	
Subnet mask	255.255.255.000	

3.4. ábra. Host A

Host B

	Network Address	Host Address
IP address	192.168.020.182	
Subnet mask	255.255.255.000	

3.5. ábra. Host B

Host A Host B Host B ugyanabban az alhálózatban van, mint Host A, mert mindenkető ilyen címét használja (192.168.020). Az IP-cím hálózati része az a rész, ahol az alhálózati maszk 255-ös értéket mutat. Ezen két eszköz között egy router sem szükséges.

Host C

	Network Address	Host Address
IP address	192.168.134.061	
Subnet mask	255.255.255.000	

3.6. ábra. Host C

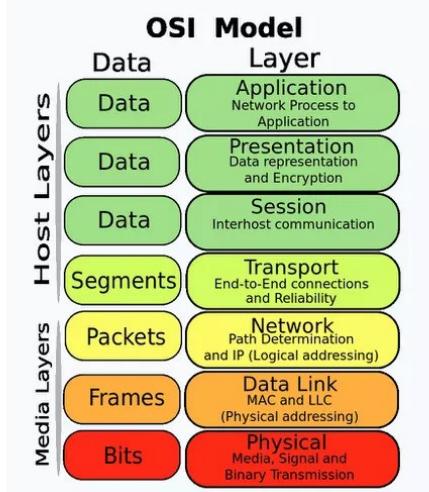
Host C más alhálózatban van, mint Host A és B, mert különbözik a hálózati címében (192.168.134, nem pedig 192.168.020). Host C nem tud csomagokat cserélni A és B eszközökkel egy router nélkül. Annak érdekében, hogy ez az eszköz kommunikálhasson A és B-vel, más IP-címet kell kapnia, kezdve a 192.168.134... címmel. Vagy más alhálózati maszk is választható az egész beállításhoz, például 255.255.0.0. A feljegyzett alhálózati maszkok decimális jelölése dot-decimális jelölésnek nevezik. Azért, hogy az információt rövidebben jelezzék, gyakran használt alternatív módszer a CIDR vagy perjeljelölés. Az IP-cím után azonnal következő perjel után az alhálózati maszkot a '0'-nál nagyobb értékeket mutatva jelöli meg. Ez a jelölés az alhálózati maszk bináris formájára utal, tehát a '255' a '11111111' -nek felel meg. A fenti példákban az alhálózati maszkok tehát bináris formájukban 24 '1'-t tartalmaznak. A fenti példában szereplő hosztok CIDR jelölése:

- **Host A:** 192.168.020.182/24
- **Host B:** 192.168.020.079/24
- **Host C:** 192.168.134.61/24

A routereket használó és több alhálózatot összekapcsoló telepítések a az OSI modell 3. rétegen működnek. Ez a modell hét rétegre osztja a hálózatok általános funkcionálitását, mindegyik egy adott készletet ír le a hálózati eszközök által nyújtott funkcionálitásokról. Gondolva itt elsősorban a csomagok továbbításáról a megfelelő címzett felé.

Az összes jelenlegi IT eszköz követi ezt a jól meghatározott absztrakciós rétegkoncepciót, hogy elősegítse a gyártók közötti interoperabilitást. A 3. rétegen működő telepítések értelmezhetik az IP-címeket, az alhálózati maszkokat, és így továbbítani tudják a csomagokat az alhálózatok között. Az itt tárgyalott összes technológia képes ilyen forgatókönyvel működni. Ezzel szemben néhány technológia korlátozott a 2. rétegre. Ez azt jelenti, hogy a csomagjaikat kizártlag MAC-címek alapján szállítják, és nem tartalmaznak alhálózati információkat. Ennek eredményeként a 2. rétegű hálózatokat nem lehet több

alhálózatokra bontani, a csomagjaikat nem lehet routerek által továbbítani, és ezáltal a skálázhatósguk korlátozott. Az egyik népszerű példa a 2. rétegű hálózatokra a már említett TSN/Milan, valamint a CobraNet.



3.7. ábra. Az OSI modell

Egy alhálózat egy logikai szegmens egy adott hálózaton belül. Az ilyen szegmenseket különféle okokból hoznak létre, ideérte az adminisztratív és biztonsági szempontokat. A hálózati adminisztrátor egy készlet szabályt alkalmazhat egy alhálózatra, míg más szabályokat választhat egy másikra. A routerek képesek összekapcsolni az alhálózatokat, így a hosztok csomagokat cserélhetnek az alhálózati határok átlépése nélkül. Egy routernek megfelelően konfigurálva kell lennie a hálózati útvonalak létrehozásához ezek között az alhálózatok között. Ezzel szemben egy tipikus kapcsoló nem képes összekapcsolni az alhálózatokat. Virtuális LAN készítése (VLAN) egy másik módszer a hálózat szegmentálására. Rugalmasabbá teszi a rendszereket, csökkenti a kapcsolatlan rendszerek közötti fölösleges kommunikációt. Szemben az alhálózatokkal, ez egy biztonságosabb módja is a hosztok elkülnítésére egymástól.

3.2.1. Hálózati topológiák

A csomópontok különböző módon kapcsolódhatnak össze. A topológia meghatározása az egyik legfontosabb döntés, amelyet egy hálózat tervezésekor hozni kell. A csillag topológia sok szempontból preferált megoldás. Több hoszt egy útválasztó eszközökhöz, például egy kapcsolóhoz vagy routerhez csatlakozik. A mai hálózatok gyakran két csillagszintet kombinálnak. Ezt gerinc/levél architektúrának nevezik. A központi kapcsoló/router (gerinc) általában több forgalmat továbbít, mint a perifériális kapcsoló (levél). Ha a gerinc és a levél közötti nagy sávszélességű kapcsolat nem képes egyszerre továbbítani az összes hoszt forgalmát, akkor ez a tervezési forma blokkoló. Az ellentéte egy nem blokkoló hálózattervezés, ahol a nagy sávszélességű kapcsolatok képesek az összes a hozzájuk csatlakoztatott hoszt teljes forgalmát folyamatosan továbbítani. A gyűrű topológiának több interfésze is lehet. Legalább kettőre van szükség egy gyűrű topológia megvalósításához. minden két csomópont közötti kapcsolat teljes sávszélességet kínál, és a csomópontokra hárul a feladat, hogy továbbítsák a csomagokat a gyűrűn belül. Ebben az értelemben mindegyik csomópont úgy működik, mint egy kapcsoló, csomagokat továbbítva két interfésze között. A gyűrű topológia választása gyakran ésszerű, amikor nagy távolságokat kell áthidalni, és a kapcsolatok költségesek. Gyakorlati példák a különböző helyszínek közötti hálózatok, de gyűrűket alkotnak olyan eszközök csatlakoztatására is,

amelyek esetében nincs hely egy további kapcsoló számára. A gyűrű topológiák beépített redundanciát kínálnak minden eszközhöz hozzáférhetünk, még akkor is, ha egy kapcsolat elszakad. A megfelelő hálózat kialakításához még elengedhetetlenek a nem blokkoló kapcsolók. A nem blokkoló architektúra egészében azt jelenti, hogy nem a kapcsolók a szűk keresztmetszet. Tehát képesek kezelni az összes rájuk táplált forgalmat, csak a szabvány port sebessége a korlát.

3.2.2. Unicast és Multicast

Amikor egy eszköz csomagot küld egy másik eszköznek, ezt unicast mechanizmusnak nevezzük. Egy ilyen kapcsolatnak pontosan egy küldője és egy fogadója van. Az unicast használhatja a Transmission Control Protocol (TCP)-t, ahol a fogadó minden egyes csomag sikeres átvételéről visszaigazolást küld a küldőnek. Ha a visszaigazolás nem érkezik meg, a küldő automatikusan újraküldi a csomagot. Az UDP (User Datagram Protocol) egy alternatíva a TCP-nek. Ebben az esetben a küldő bízik abban, hogy a csomagok sikeresen megérkeznek a fogadóhoz. Nincs visszaigazolás, és ha a csomag elveszik, a tartalma is elveszik. Ez az jelenti, hogy az UDP nem annyira megbízható? Valójában nem, csak más felhasználásra hozták létre. Bár ez sokak számára váratlan lehet, valójában ez a preferált átviteli mód a szakmai audio hálózatok számára. Mivel a késleltetésnek alacsonynak kell lennie, nem engedhető meg a csomagok újraküldése, mert az értékes időt vesz igénybe, és ezzel növelné az általános időkésletetést. Az élő redszernél csomagvesztés esetén a legjobb, ha folytatjuk a következő audio minták lejátszását, anélkül hogy megpróbálnánk helyreállítani az előzőt. A menedzselt switchek és végpontok tudják logolni a csomagvesztéseket, így monitorozható a hálózat állapota amennyiben probléma merülne fel. Audio alkalmazásokban gyakran szükség van arra, hogy egy audio jelet több helyre párhuzamosan fogadjanak, például egy mikrofonjel, amelyet párhuzamosan továbbítanak a front-of-house és a monitoring keverőpultoknak. Akár egy harmadik hely is létezhet, például egy felvétő eszköz. Amikor a küldő unicast módban továbbítja a csomagokat, az audio jel három csomagként érkezik azonos tartalommal, de különböző címzettekkel. Ez felesleges processzor terhelést jelent a küldő eszköz számára, és emellett külön sávszélességet is foglal el minden hálózati célhoz. Ezt lehet optimalizálni a multicast használatával. Számos előnye van, ideértve a küldőre nehezedő kevesebb processzor terhelést és az általános forgalom csökkenését a hálózaton. A küldő multicast címekre címezi a csomagokat, és nem hoszt címekre. Nem tudja, a csomagok címzettjeit. A multicast címek hasonlóak a rádiófrekvenciákhoz: bárki, aki érdeklődik, bekapcsolhatja és fogadhatja a tartalmat. A küldő csak egyszer helyezi az audio adatokat egy csomagba, elküldi egy multicast címre, és a vevőknek kell tudniuk, melyik multicast címre akarnak hallgatni. A multicast címek alapvetően nem kapcsolódnak alhálózatokhoz, mivel nem kapcsolódnak a csomópontokhoz és az IP-címekhez. Ezért a multicast csomagok áthaladnak az alhálózatokon, hacsak nincsenek elkülönítve VLAN-akkal. Amennyiben a hálózatunk nem kizárolag az audio jelek továbbítására készült speciálisan, néhány eszköz lehet a hálózaton, amelyeknek semmi közük az audiohoz. Ezért fontos, hogy a multicast forgalom csak azokhoz a hosztokhoz jusson el, amelyek érdeklődnek iránta. Ennek a megoldása az IGMP snooping, tehát az Internet Csoportkezelési Protokoll. Az összes tárgyalt audio hálózati technológia alapértelmezetten támogatja az IGMP snooping-ot. Ha be van kapcsolva a kapcsolóban, akkor a multicast-csomagok csak azokon az interfészeken kerülnek elküldésre, ahol a csatlakoztatott hosztoktól időszakos IGMP kérések érkeznek. Ha nincs beérkező kérés, akkor a megfelelő multicast leáll, így nem jut felesleges forgalom a kapcsolatra. Az IGMP snoopingot egyfajta zsírlemezővel lehetne összehasonlítani, amely alapértelmezetten zárva van, és csak kérésre nyílik meg. Erősen ajánlott az IGMP snooping bekapcsolása egy multicast hálózatban minden egyes kapcsolóban. Azonban egy

hálózatban kizárálag csak egy darab IGMP Querier lehet aktív, mivel az összes többi kapcsoló az aktív IGMP Querier-től kapja az információkat. Enélkül a multicast úgy fog viselkedni mint egy broadcast, ami nagy mennyiségű felesleges forgalmat eredményez, ezzel szennyezve a hálózatot. Tehát a unicast a legjobb késleltetési teljesítményt nyújtja, és a kapcsolók számára a legkönyebben mozgatható. A multicast pedig jobb sávszélességeket kezelést kínál, ahogy a csatornaszám és a sávszélességünk is nő.

3.2.3. Eszköz- és Adatfolyam-felfedezés

Az AES67 audió szabvány nem határozza meg, hogyan fedezhetik fel egymást a hálózati eszközök, vagy hogy mely adatfolyamok érhetők el a hálózaton. Az összes ismert technológia a bonjour vagy mDNS mechanizmust használja eszközeik számára az egymásról való értesítésre. minden eszköz fix és ismert multicast cím (224.0.0.251) felé küld üzeneteket, amiket más eszközök is elérnek, így értesülnek egymás létezéséről a hálózatban. Ennek a mechanizmusnak egyik korlátja az, hogy nem működik nagy telepítésekben, ahol több alcímen vagy VLAN-on vannak különböző eszközök. Ezen esetekre a gyártók kifejlesztettek saját megoldásokat (például Audinate a Dante Domain Manager-t) vagy követik az audio/video NMOS szabványt a felismeréshez és kapcsolatkezeléshez. Az audio adatfolyamokat a gyártótól függően két mechanizmus egyikével fedezik fel. Ahogy az eszközök felfedezésénél, mindenkor előre meghatározott multicast címet használ az adatfolyam-információk terjesztésére, hogy a címzettek megtalálják az elérhető adatfolyamokat és azok paramétereit:

- Session Announcement Protocol (SAP) - minden Dante termék által használt (Multicast cím: 239.255.255.255)
- Bonjour / mDNS - minden más technológiában használt (Multicast cím: 224.0.0.251)

Szerencsére a jelenlegi termékek többsége lehetővé teszi mindenkor minden protokoll egyidejű aktiválását, így egy adott audio adatfolyam mindenkor minden mechanizmuson keresztül párhuzamosan bejelenthető.

3.2.4. Redundancia

Az audiohálózatok kezdeti napjaiban egyes felhasználók kételkedtek az IT hardverek megbízhatóságában. Annak ellenére, hogy ezek a széles körben elterjedt IT-berendezések jól beváltak és gyakran megbízhatóbbnak viszonyulnak, mint a hagyományos audioberendezések. Emellett a legtöbb hálózati komponens több diagnosztikai és monitorozási mechanizmust kínál a berendezések hibájának gyors felismeréséhez és megoldásához.

3.2.4.1. Spanning Tree Protocol (STP)

Ha a kapcsolókat úgy kötik össze, hogy hurok jön létre, fennáll annak a veszélye, hogy a csomagok végtelenül áramlanak a hurokban. Ezt a *visszacsatoló hurok* jelenséget a hálózati hardver automatikusan őszleli az STP segítségével, és ha hurokra bukan, a kapcsoló automatikusan kikapcsolja egyik kapcsolatot. Az STP-t továbbá felhasználhatják a rendszerben történő véletlen kapcsolatvesztések elleni védelemre is, beleértve a kábelszakadásokat is.

Ez abból a megközelítésből áll, hogy szándékosan létrehoznak hurkokat egyes végpontok között, majd a rendszer inaktiválja az egyiket. Ha valamelyik kábel véletlenül kiesik, a rendszer másodpercen belül őszleli ezt, és újraaktiválja a passzív kapcsolatot.

Ebben az időszakban az audio néhány másodpercig ugyan megszakad, de még mindig sokkal gyorsabb, mint a manuális hibakeresés és az új kábel telepítése, ha arra egyáltalán van lehetőségünk. A legtöbb rendszerben az STP alapértelmezetten engedélyezve van. Nélküle broadcast 'viharok' alakulnának ki, ami konkrétan felemészti a sávszélességet.

3.2.4.2. Link Aggregáció

Ha egy adott kapcsolat különösen fontos egy telepítésben, két vagy több kábelt párhuzamosan lehet csatlakoztatni a biztonság érdekében. Bár az ilyen link aggregáció fő célja két kapcsoló közötti sávszélesség növelése, ez is egy költséghatékony módszer lehet a kapcsolat véletlen leválasztásának vagy kábelszakadás elleni védelemre. Tipikus eset például egy színpad, amely a FOH keverőhöz csatlakozik. A kapcsolóknak minden két végén ugyanúgy kell konfigurálni: két vagy több interfész kell kijelölni Link Aggregációs Csoportként, és azok egyetlen interfésként jelennek meg a kapcsolón. Gyakorlatban a linkaggregáció alkalmazása a kábelproblémák csökkentése érdekében nagyon hasznos lehet egyszerűsége miatt, hiszen a felhasználónak csak egy további kábelt kell biztosítania, és azonosítania kell a kapcsolók konfigurációját minden két végén. Ugyanakkor az éppen aktív kábel leválasztásakor előfordulhat, hogy az audioátvitel néhány másodpercig itt is megszakad, mielőtt a kapcsoló az alternatív kapcsolatot aktiválna.

3.2.4.3. Adatfolyam redundancia

A legbiztonságosabb de egyben legdrágább módja a redundancia megvalósításának egy hálózatban az, ha két különálló audiohálózatot hozunk létre, két független utat biztosítva a küldő és a fogadó között. Ebben a felállásban minden csomópontnak két hálózati interfész kell biztosítani. A küldő két azonos audio tartalommal rendelkező csomagot hoz létre, mindenkorra azonos PTP-időbelyegzőt nyom, majd elküldi minden két hálózaton. A fogadó végén minden két csomagot fogadják és kicsomagolják. Még akkor is, ha az egyik csomag elveszik, a megmaradt csomag tartalmazza az összes információt, és biztosítja, hogy az audio zavartalanul folytatódjon. Valójában ez a mechanizmus az egyetlen megközelítés egy hálózatban a véletlenszerű csomagvesztés kompenzációjára anélkül, hogy meg kellene ismételni azokat a küldőtől és ezzel késleltetést hozzáadva a rendszerhez. Ezzel a hangkimaradás problémáját is meg lehet oldani, mivel a redundáns csomagok egyikének elvesztése esetén a másik csomagot használja a fogadó, így ez a procedúra észrevehetetlen a felhasználó számára.

3.3. AES67

Az AES67 szabvány szerint az összes eszköznek meg kell felelnie az alábbi minimális specifikációknak:

- Unicast és multicast támogatása
- UDP/RTP protokollok használata
- DSCP címkek beállítása meghatározott értékekre, QoS támogatás
- Nincs meghatározott automatikus eszköz- és adatfolyam-felfedezés
- PTPv2 szabvány használata az időszinkronizációhoz
- PTP profil Standard (a gyakorlatban a Dante jelenleg magasabb szinkronizációs rátát igényel)

- Küldőknek ki kell adniuk egy SDP fájlt
- A fogadóknak érteniük kell egy SDP fájlt
- A fogadó puffernek legalább 3 ms hangot kell tudnia tárolni
- Adatfolyam formátumok
- Egytől nyolc csatorna (a küldő választhat egy fix számot, de a fogadóknak képesnek kell lenniük rugalmasan fogadni bármelyik lehetőséget).
- 24 bites és 16 bites felbontás (a küldő választhat egyet, de a fogadóknak mindenkorban érteniük kell)
- 48 kHz mintavételi frekvencia 1 ms csomagidő (48 minta)
- A multicast címek 239.0.0.0 és 239.255.255.255 között vannak

A szabványban sok további paraméter és érték szerepel, de ezek nem szerepelnek a fent felsorolt minimális követelmények között.

3.4. Audinate Dante

3.4.1. A cégről [3]

Az Audinate a professzionális AV hálózati technológiák vezető globális szolgáltatója, az AV és IT rendszerek konvergenciájában játszik kulcsszerepet Dante platformjával.

Az Audinate gyökerei Sydney-ben találhatók, ahol egy kis mérnökcsoport a Motorola Kutatólaboratóriumában fejlesztett új technológiákat. A Motorola 2003-ban bezárta a létesítményt, de néhány mérnök tovább dolgozott a Nemzeti Információs és Kommunikációs Technológiai Intézettel (NICTA), egy ausztrál kormányzati kutatóintézettel karoltve, amely az ipari növekedést elősegítő innovatív technológiák fejlesztését támogatta. A cég irányvonala Aidan Williams, társalapító és technológiai igazgató érdeklődése a zene iránt határozta meg, míg IT-szakértői szemlélete kijelölte a technológiai utat.

2006-ban a NICTA felismerte a technológia potenciálját, és az Audinate kivált az intézményből, hogy kereskedelmi forgalomba hozza Dante hálózati technológiáját. A csapat 2008-ban talált rá egy korai támogatóra Bruce Jackson személyében, aki a Dolby Labs élő hangosztályának alelnöke volt. A Dante technológia gyorsan elterjedt a professzionális audioiparban, számos jelentős eseményen és helyszínen, köztük az olimpiai játékokon és nagy zenei koncerteken alkalmazták.



3.8. ábra. Az Audinate logója

2014-re már több mint 170 gyártó használta a Dante technológiát, és a termékek száma meghaladta a 675-öt. 2016-ra az Audinate új termékeket mutatott be, például a Dante Analog Output Module-t, amely lehetővé tette az analóg eszközök csatlakoztatását a Dante hálózathoz. 2017-ben a Dante Domain Manager és a Dante Broadway is piacra került, melyek tovább bővítették a technológia alkalmazási lehetőségeit.

Az évek során az Audinate folyamatosan növekedett és új termékekkel jelentkezett, mint például a Dante AVIO adapterek 2018-ban, valamint a Dante AV technológia 2019-ben, amely integrálta az audio- és videojelek hálózaton kereszti továbbítását. 2020-ban, a globális járvány idején, a Dante AV termékek új lehetőségeket nyitottak meg az otthoni munkavégzés és biztonságos konferenciatermi megoldások számára.

2024-re az Audinate több mint 600 gyártóval kötött licencszerződést, és a Dante technológiát több mint 4000 termékben használják, beleértve az AV és IT rendszerek teljes integrálását és kezelését, világszerte.

3.4.2. A Dante hálózatok áttekintése

A 2020-2021-es Covid-19 járvány során lehetőségem volt részt venni egy átfogó Dante kurzuson, amelyet a Dante technológia fejlesztője, az Audinate szervezett. A kurzus részletes betekintést nyújtott a Dante hálózatok működésébe. E fejezetben a belső oktatónyagokat is fel fogom felhasználni, amelyeket a kurzus alatt kaptam. Ezek a dokumentumok csak a kurzus résztvevői számára elérhetők, így konkrét dokumentumként nem publikálhatók.

A Dante hálózatok a digitális hangátviteli technológia egy korszerű formáját képviselik, amely lehetővé teszi a hang elosztását és irányítását szabványos Ethernet alapú hálózatokon keresztül. Az ausztrál Audinate által kifejlesztett Dante technológia IP hálózatokat használ a magas minőségű, alacsony késleltetésű hangátvitel biztosítására az eszközök között.

Ez a rendszer jelentős előnyöket nyújt a hagyományos analóg hangrendszerhez képest, beleértve a nagyobb rugalmasságot és skálázhatóságot, valamint lehetőséget ad a hangrendszer integrálására meglévő IT infrastruktúrákba.

A Dante technológia széles körben elterjedt, többek között a koncerthangosítás, rádiózás, stúdiófelvételek, vállalati környezetek és konferenciaközpontok területén. Támogatja a különböző hangformátumokat és mintavételi rátákat, és lehetővé teszi akár több száz hangcsatorna egyidejű átvitelét egyetlen hálózaton keresztül. Továbbá, a Dante rendszerek távolról vezérelhetők és monitorozhatók, ami jelentősen megkönnyíti a komplex hangrendszer beállítását és kezelését.

3.4.3. Dante hálózatok technikai részletei

A Dante hanghálózatok két alapvető elemből épülnek fel: a Dante eszközökből és a Dante hálózatokból. A Dante eszközök speciálisan a Dante protokollhoz készült hangeszközök, mint például hangkártyák, erősítők és hangládák. Ezek az eszközök szabványos Ethernet kábeleken és kapcsolókon keresztül csatlakoznak a Dante hálózathoz.

A hálózat konfigurálása az Audinate Dante Controller szoftver segítségével történik, amely lehetővé teszi a hang elosztását és irányítását az eszközök között. A szoftver lehetőséget ad az eszközök távoli vezérlésére és monitorozására. A Dante hanghálózatok különböző hangformátumokat és mintavételi rátákat támogatnak, és képesek egyszerre több száz hangcsatorna átvitelére egyetlen hálózaton keresztül. Továbbá, a technológia fejlett funkciókat is biztosít, mint a Dante Domain Manager (DDM), amely a biztonságos hangátvitelt szolgálja, és a Dante Virtual Soundcard (DVS), amely számítógépes hanglejátszást és felvételt lehetővé téve.

Amennyiben több eszköz hangot küld egy adott végpontra a hálózaton, az alapértelmezett működés szerint a csomagok felgyülemlése esetén az elsőként érkezők előnyben részesülnek. A Dante hanghálózatok Quality of Service (QoS) támogatást is nyújtanak, amely a prioritások kezelését biztosítja. Ezáltal a hangátvitel előnyt élvezhet más hálózati forgalommal szemben, csökkentve a hálózati torlódás esélyét és biztosítva

a minimális késleltetést valamint a magas minőséget. Körülbelül 70 százalékos hálózati szaturációnál már javasolt a QoS alkalmazása, míg 100 Mbps sebességű hálózatok esetén a jitter csökkentésére is segít.

3.4.3.1. Több mintavételi ráta és bitmélység

A rendszer képes egyidejűleg több bitmélysséget kezelni. Ennek informatikai háttere a következő képpen néz ki: Ha egy 32 bites hangforrásunk van, de a másik eszköz csak 24 bites hangot tud fogadni, akkor a Dante a 32 bites hangot 24 bitesre alakítani.

Hangminták	Bitmélység
11110000 11110000 11110000 11110000	32 bites
11110000 11110000 11110000	24 bites

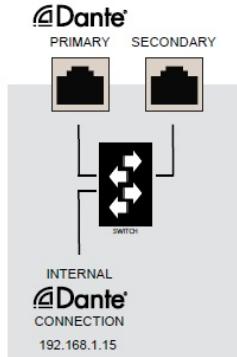
Amint a példában látszik, 32 bites hangból úgy kaptunk 24 bites hangot, hogy egyszerűen csak elhagytuk az utolsó 8 bitet. Ez a folyamat visszafelé is működik, ha 24 bites hangot kell 32 bites hanggá alakítani, akkor az utolsó 8 bitet 0-val kell feltölteni.

Hangminták	Bitmélység
11110000 11110000 11110000	24 bites
11110000 11110000 11110000 00000000	32 bites

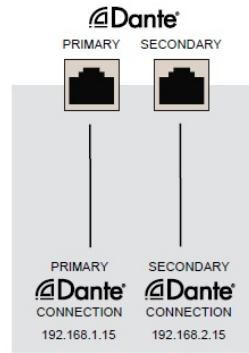
A mintavételezési frekvencia eltérése csak akkor kezelhető, ha a bitmélység is különbözik. Amennyiben a bitmélység megegyezik, de a mintavételezési frekvencia eltér, a rendszer nem képes a hang megfelelő továbbítására. Ez a mechanizmus egy egyszerű mechanikai példával érthető és szemléltethető. Képzeljünk el két fogaskereket: ha a mintavételezési frekvencia azonos, de a bitmélység eltérő, akkor a fogaskerekék egymásba illeszthetőek, és csupán a fogaskerekék mélysége fog eltérni. Viszont, ha a mintavételezési frekvencia eltérő, a fogaskerekék nem illeszthetők egymásba, így a hang továbbítása lehetetlenné válik. Ebben az esetben szükség van egy konverterre, amely képes a két fogaskereket összeilleszteni. Fontos megjegyezni, hogy a több mintavételi ráta együttes működése érdekében egységes órajel szükséges minden mintavételi frekvenciához.

3.4.3.2. Hálózati topológiák

A Dante rendszerek alapvetően két üzemmódban működhetnek. Az egyik az ún. switched (kapcsolt) mód, ahol az eszközökön található két Ethernet port egyetlen hálózatot alkot. Ebben a módban lehetőséget biztosítunk Daisy Chain (füzéres) topológia kialakítására, ahol az egyik eszköz a következőhöz csatlakozik, és így tovább. Emellett csillagtopológia is létrehozható, ahol minden eszköz egy központi kapcsolóhoz csatlakozik.



3.9. ábra. Kapcsolt mód



3.10. ábra. Redundáns mód

A másik üzemmód a redundant (redundáns) üzemmód, amelyben az eszközök két Ethernet portja két különálló hálózatot alkot. Ez a konfiguráció biztosítja, hogy a hálózat redundáns módon van kialakítva, így ha az egyik rész meghibásodik, a másik automatikusan átvállalja annak szerepét. Bizonyos Dante eszközök rendelkeznek egy harmadik Ethernet porttal, amelyet konfigurálási és vezérlési feladatokra használnak.

3.4.3.3. Késleltetés

A késleltetés az az időtartam, amely szükséges egy folyamat végrehajtásához, például a bemeneti oldalon beérkező hangjel feldolgozásához és annak megjelenéséhez a kimeneti oldalon. A késleltetés mérésére két fő mértékegységet használunk:

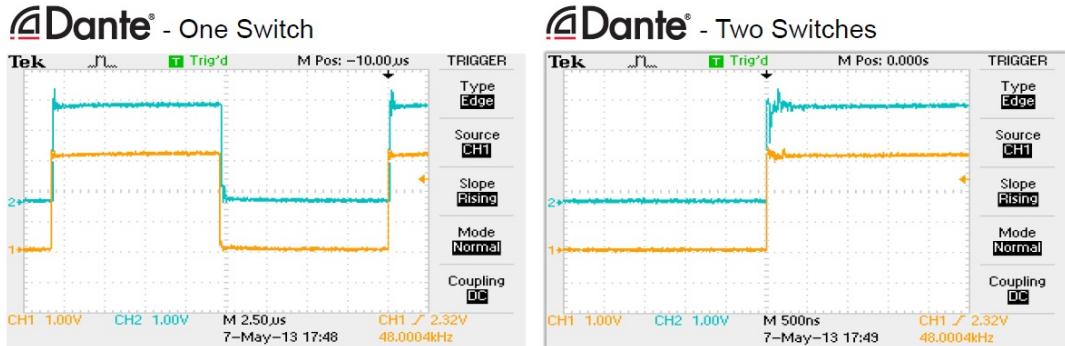
$$1 \text{ másodperc} = 1000 \text{ milli másodperc}, \quad \text{azaz} \quad 1 \text{ ms} = 0.001 \text{ s} \quad (3.4)$$

$$1 \text{ másodperc} = 1000000 \text{ mikro másodperc}, \quad \text{azaz} \quad 1\mu\text{s} = 0.000001 \text{ s} \quad (3.5)$$

A Dante eszközök lehetőséget biztosítanak a késleltetés teljesítményének meghatározására. A 0.1 milliszekundumos késleltetés az, amely már biztosítja a kapcsoló lépést. Ha két eszköz késleltetése eltérő, akkor a nagyobb érték számít irányadónak. Egy megfelelően beállított modern Dante hálózatban a késleltetés körülbelül 1 ms értéket vesz fel, ami azt jelenti, hogy például egy dobos először hallja a hangszerét a fülmonitoron, mint a saját dobját.

3.4.3.4. Órajel

Minden eszköz egy rendkívül pontos Dátum/Idő órát követ, amely biztosítja az idő szinkronizáját és az egységes sebességet. De mi a helyzet a terjedési késéssel? Miért vannak szinkronban a Dante eszközök? A PTP (Precision Time Protocol) késleltetési kéréseket (Delay Requests) indít, amelyek segítségével kiszámítják a hálózat késleltetését. Az eszközök az információátvitel késését is kompenzálják. A Dante automatikusan kiválaszt egy óra vezetőt, és minden csatlakozó csak egyetlen óra vezető létezik, függetlenül a mintavételi rátától. Szükség esetén külső óra vezetőt is beállíthatunk. A rendszer nem szinkronizál újra, hanem beállítja a sebességet és kompenzája a hálózati késést. A Dante által végzett tesztelések és tapasztalatok alapján igazolt, hogy az időzítés szinkronban marad, még akkor is, ha az óra perceken keresztül teljesen eltűnik.



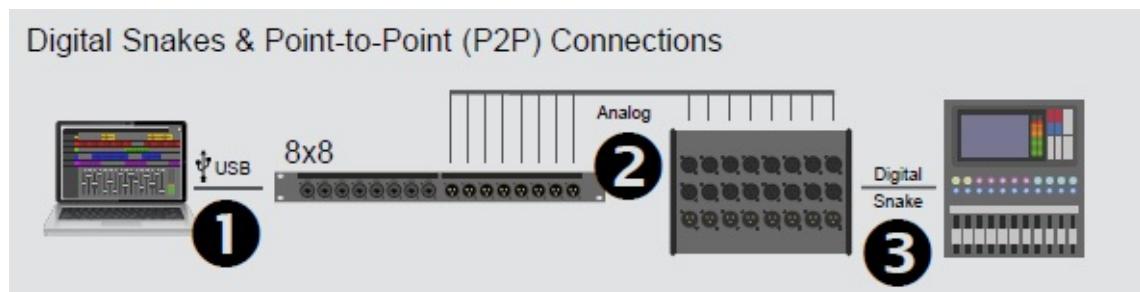
3.11. ábra. Dante órajel

3.4.4. Összehasonlítás a hagyományos hangrendszerekkel

A hagyományos hangrendszerek általában analóg kábeleken és csatlakozókon alapulnak a hangjelek eszközök közötti továbbítására. E rendszerek gyakran korlátoztak a rugalmasság, a skálázhatóság, valamint az egyidejűleg kezelhető hangcsatornák számát tekintve. Továbbá, a beállításuk és kezelési folyamatuk bonyolultabb lehet, mivel minden egyes hangcsatorna külön kábel és csatlakozás igényel. Ezzel szemben a Dante hanghálózatok jelentős előnyöket kínálnak: lényegesen több hangcsatorna támogatására képesek, lehetővé téve a nagy és összetett hangrendszerek egyszerű beállítását és kezelését. A Dante rendszer emellett képes hosszú távolságokon továbbítani a hangot anélkül, hogy a minőség romlana. Ezzel szemben a hagyományos analóg rendszerek hosszú kábelek használata során hajlamosak zajra és jelveszteségre, míg a digitális hangjelek, amelyeket Ethernet hálózatokon továbbítanak, minimális minőséghibákkal érhetők el nagy távolságokra.

3.1. táblázat. Digital Snake és DigitalAVNetwork Jelút opciók

Kérdés	Pont-pont között	Hálózati megoldás
Hová megy a jel?	Lineáris kábelút	Bárhol a hálózaton
Hogyan változtassuk meg a jelútvonalat?	Mozgassuk a kábelt	Egy egérkattintással
Szétválaszthatjuk-e a jeleket?	Nem	Igen - a hálózaton
Megosztható-e a kábel más jelekkel?	Nem	Igen - közös infrastruktúra



3.12. ábra. Digital Snake és Pont-pont közötti (P2P) kapcsolatok



3.13. ábra. Dante hálózati megoldás

A rugalmasság és a skálázhatóság további kulcsfontosságú előnye a Dante hanghálózatoknak a hagyományos analóg hangrendszerekkel szemben. Képesek alkalmazkodni különböző hangkonfigurációkhoz és követelményekhez. Könnyű eszközöket hozzáadni vagy eltávolítani, megváltoztatni a hangjelek útvonalát, és a rendszert újra konfigurálni szükség esetén. Ez lehetővé teszi testreszabott audio-megoldások létrehozását, amelyeket az adott alkalmazás vagy környezet speciális igényeihez lehet igazítani.

3.4.5. Firmware frissítés

A Dante eszközök két típusú firmware-rel rendelkeznek: a Dante Firmware-rel és az Eszköz Firmware-rel. A rendszer megfelelő működése érdekében előfordulhat, hogy minden két firmware-t frissíteni kell. A frissítések összehangolt verziói biztosítják a legjobb kompatibilitást és működést. A szükséges verziók pontos meghatározásához a gyártóval való konzultáció ajánlott.

Az eszközkategóriák között különbözik lehetnek a frissítési eljárásokban. Bizonyos eszközök esetén alternatív frissítési módszerek állnak rendelkezésre, míg a Dante Updater szoftver egy széles körben alkalmazott eszköz, amely segíti a frissítési folyamatok egyszerűsítését. A Dante Updater rendszeresen ellenőrzi az online adatbázisokat, és értesít a legfrissebb firmware verzióról.

A firmware frissítési folyamat megkönnyítése érdekében ajánlott a Dante Firmware Update Manager használata, amely lehetővé teszi a frissítési fájlok importálását, például ha a gyártó közvetlenül biztosít firmware fájlokat. Sikertelen frissítés esetén vészelyezeti helyreállítási eljárások állnak rendelkezésre, amelyek biztosítják az eszköz biztonságos helyreállítását.

A Dante eszközök támogatják a vegyes firmware verziókat, lehetővé téve az eltérő verziók együttműködését. Ezt a funkciót rendszeres automatizált regressziós tesztelés biztosítja, amely a különböző firmware verziók között kompatibilitást ellenőrzi.

3.4.6. Chipek

A Dante hálózatok különféle chipekkel építhetők fel. Az Audinate széles választékot kínál a Dante rendszerhez tervezett chipekből, amelyek eltérő hangcsatorna-számot és további funkciókat támogatnak. A Dante chipek különböző méretekben és árkategóriákban érhetők el, lehetővé téve a gyártók számára, hogy különböző méretű és költségű Dante eszközöket fejlesszenek ki, így kielégítve a változatos piaci igényeket. A Dante chipek elősegítik a gyártók munkáját azáltal, hogy lehetővé teszik a Dante-kompatibilis eszközök gyors és hatékony létrehozását, valamint egyszerű integrációjukat a meglévő termékekbe.

Chip	Leírás
	Dante Ultimo-X - 0x4, 2x2, 4x0
	Dante Broadway - 16x16
	Dante Brooklyn II - 64x64
	Dante PCIe-R - 128x128
	Dante HC (High Capacity) - 512x512
	Dante Shared Processor - IP Core 512x512 FPGA and Dante Embedded Platform 64x64 X86/ARM
	Dante AV - V:1, A:8

4. fejezet

Rendszertervezés és telepítés előkörnyezetben

4.1. Követelmények

Az új rendszer tervezésekor a következő szempontokat kellett szem előtt tartanom:

- Teljesen digitális megoldás kialakítása.
- Redundáns rendszer kialakítása biztosítva a folyamatos működést.
- Rugalmas felépítés, amely lehetővé teszi a könnyű alkalmazkodást változó körülményekhez.
- Könnyen bővíthető struktúra kialakítása a jövőbeli igényekhez való gyors reagálás érdekében.
- Magasabb hangminőség és hangnyomás elérése a korábbi rendszerrel összehasonlítva.
- Jobb lefedettség és egyenletes hangvisszaadás biztosítása a közönség területén.
- A piacon lévő termékekhez képest viszonylag költséghatékony megoldás kidolgozása.
- Legyen hosszú távon egy kompetitív és korszerű rendszer.
- Megbízható és kiforrott technológiára épüljön.

4.2. Rendszerterv

A cég alapítása óta Martin Audio termékeket használ, a régi W8LM rendszerrel nagyon elégedettek voltunk, ebből kifolyólag a választás márka szempontjából nem is volt kérdéses. A Martin új rendszerei a Wavefront Precision sorozat szériás végfokai pedig a Dante hálózatot használja a digitális hangátvitelhez. Ebből kifolyólag a választás a Dante protokollra esett, így a szakdolgozatomban megtervezésre kerülő hangrendszer lelke ez a protokoll lesz. Hangládák szempontjából a Martin Audio Wavefront Precision szériás termékein belül kétfajta rendszerre is esett választás. Ezekről a későbbiekben részletesen lesz szó. Mivel teljes mértékben digitális rendszert elérése volt a cél, ezért a Dante modullal rendelkező Martin Audio iKON iK42 és iK81 végfokok tökéletesen illeszkedtek a rendszerbe. Mindkét végfok csúcskategóriás teljesítményt és hangminőséget nyújt, és a D kategóriás erősítőknek köszönhetően rendkívül kis helyet foglalnak el a rackben miközben kiváló hatásfok mellett képesek nagy teljesítményt leadni. A két erősítő

között két fundamentális különbség van, az iK42 négy kimeneti csatornával rendelkezik, 20.000 W teljesítmény leadása mellett. Ezzel szemben az iK81 nyolc kimeneti csatornával rendelkezik, 10.000 W teljesítménnyel. [5] A végfokokat a Dante hálózaton keresztül fogjuk jellel ellátni, így a hagyományos analóg XLR, vagy AES kábelezés helyett két CAT5E kábellel (a redundancia miatt) tudjuk a végfokokat a hálózatra kötni.



iKON

4.1. ábra. Martin Audio iK42 végfok

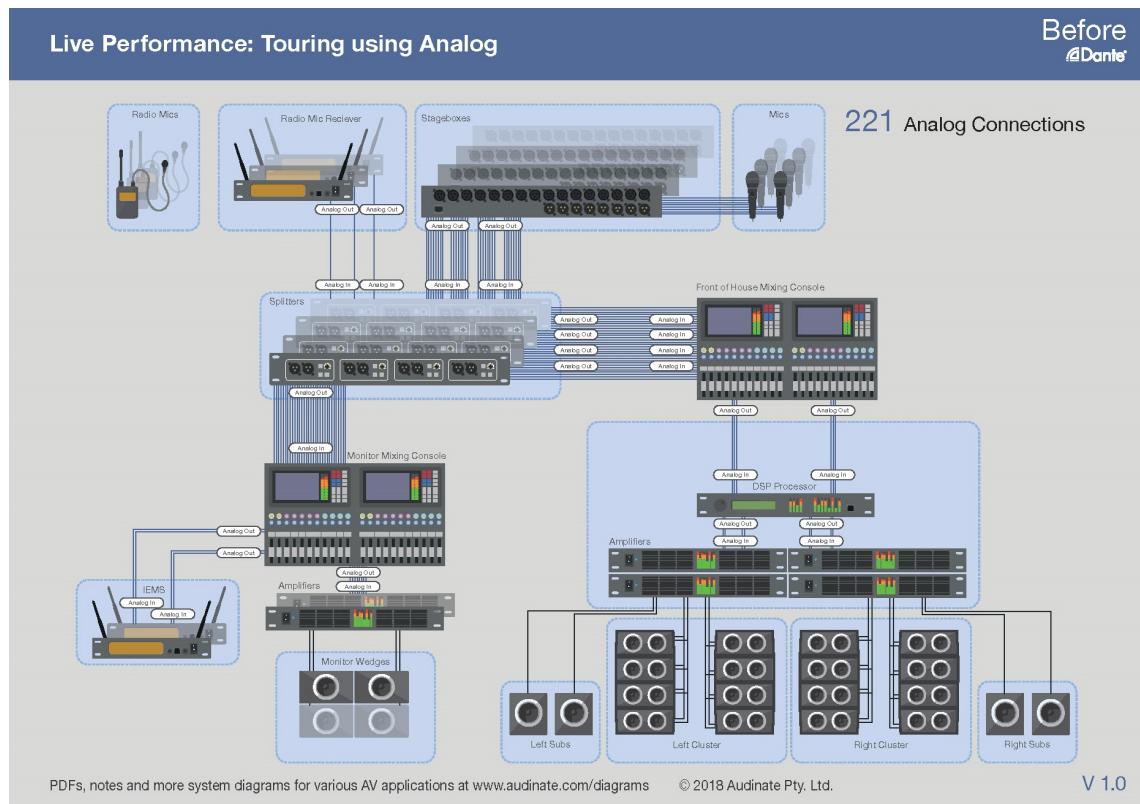


iKON

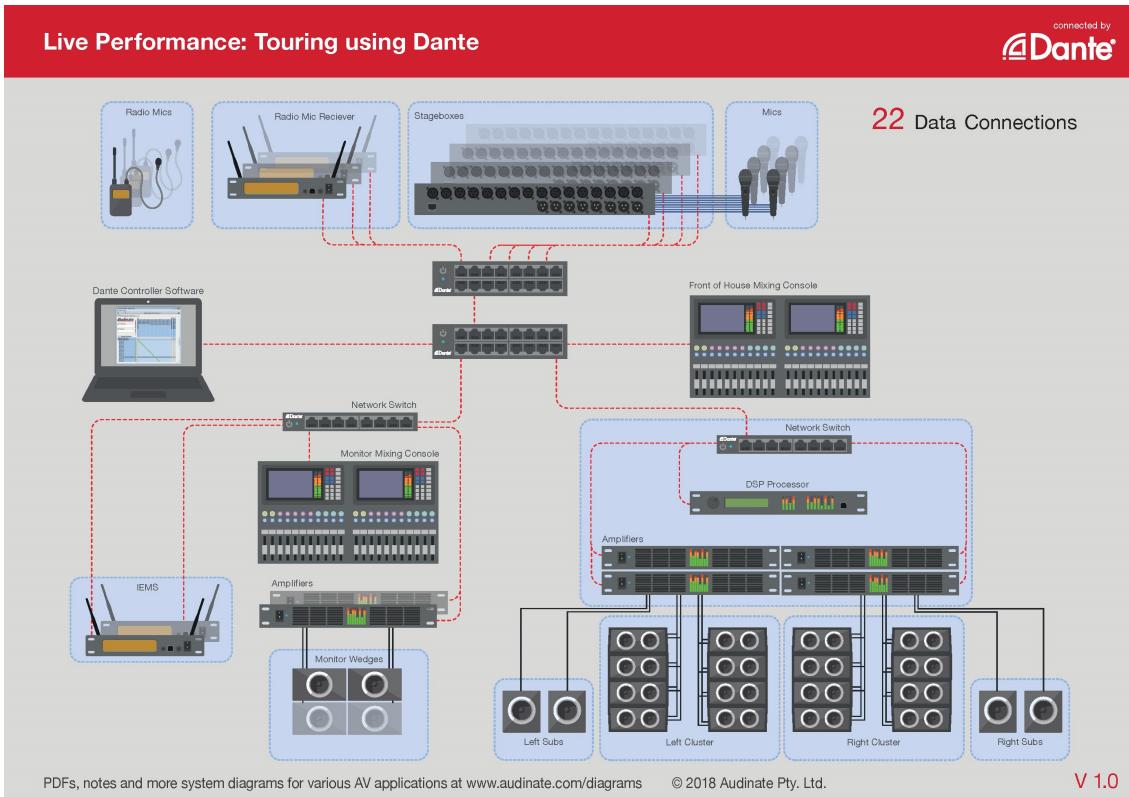
4.2. ábra. Martin Audio iK81 végfok

A végfokrendszer fő vezérző protokollja miatt szükség lesz még egy CAT5E alapú összeköttetésre, ami az egyes végfokokat köti össze egy hálózatba a switcheken keresztül. (VU-NET protokoll) minden egyes végfokrackben két MikroTik 24 portos switch lesz. Ezekre az eszközökre készítettem egy unified konfigurációt, amely minden olyan felesleges biztonsági beállítást kikapcsol, amelyekre egy normál internetes hálózatban szükség lenne, de egy zárt hálózatban ahol kizárolag a Dante eszközök kommunikálnak egymással, ezek a beállítások csak felesleges terhelést jelentenének a hálózaton. Valamint amennyiben még több eszközöt szeretnénk a hálózatra kötni, akkor a switchek gyorsan üzembe helyezhetőek, mivel a konfiguráció már előre elkészítve, csak fel kell tölni a beállításokat, valamint firmware-t egyeztetni. Az egyik switch a Dante elsődleges hálózatát fogja kizárolag kezelní. A másik switch a Dante másodlagos hálózatát, és a VU-NET hálózatot fogja kezelní. Ez a két alhálózat VLAN szegmensekbe lesz elkülönítve, hogy a hálózat biztosan stabil legyen, ne fordulhassanak elő csomagütközések. A rendszer kábelezése egyedileg készített Neutrik EtherCon csatlakozóval ellátott CAT5E és CAT6A kábelekkel fog állni. A kábelek készítésekor a T568B szabvány szerinti kábelrendezést alkalmazom, mivel a T568B jobb átviteli teljesítményt és interferencia védelmet nyújt a hosszú távú használat során. Nem szükséges a T568A szabvány által nyújtott plusz kompatibilitás a régi hálózatokkal, mivel egy teljesen új modern hálózatot fogunk kiépíteni. A csatlakozók felhelyezésekor a szabványnak megfelelően járok el, milliméterre pontosan, hogy a kábelek a lehető legjobb minőségűek legyenek. Ez a CAT6A kábelek különösen fontos, mivel a CAT6A kábelek még nagyobb frekvencia tartományban képesek adatokat továbbítani, mint a CAT5E kábelek, ezért jobban érzékenyek a külső interferenciákra. A végfokokból egy egyedi patch panel segítségével vezetjük ki a végpontokat, hogy ne az eszköz saját csatlakozóját degradáljuk a sokszori csatlakoztatás során, hanem a patch panelen lévőt, melyet amennyiben szükséges könnyen cserélhetünk. Valamint az eszközön lévő csatlakozó egy szabványos RJ45 csatlakozó nem pedig egy Neutrik EtherCon csatlakozó. Számunkra ez is fontos, mivel a Neutrik csatlakozók strapabíróbbak, és a kábelvégek is jobban védettek a sérülésektől, és nehezen vagy egyáltalán nem lehet véletlenül kihúzni a csatlakozót a helyéről. Az egyes végfokrakkék összeköttetéséért egy hibrid kábel lesz a felelős, amelyben négy darab CAT6A kábel van, mindegyik véget külön színkóddal látjuk el, annak érdekében, hogy gyorsan és egyértelműen tudjuk azonosítani a kábeleket, amikor egy adott helyszínen építjük össze a felszerelést, akár sok-sok óra munka után fáradtan. A zöld szín jelzi majd a Dante elsődleges hálózatot, a kék szín a Dante másodlagos hálózatot, a piros szín a VU-NET hálózatot, a fekete vég pedig egy tartalék kábel lesz, amennyiben valamelyik kábel megsérülne, vagy egyéb okból nem működne. Mivel az előbbiekbén már említett 24 portos switcheket használjuk, ezért ha vendég vagy bérelt eszközöket szeretnénk

a hálózatra kötni, akkor a switchekben található portokból ki tudjuk választani a megfelelő VLAN szegmenst, és a hozzá tartozó portokat, így szabványos RJ45 csatlakozóval ellátott kábeleket Ethercon nélkül is tudunk használni. Mindegyik rack hátuljában található még egy Wi-Fi router is, amely általában a VU-NET hálózatra kapcsolódik, így a teljes rendszer vezérlése Wi-Fi-n keresztül is lehetséges lesz. A Dante patch-et általában vezetékes módon fogjuk elkészíteni, de amennyiben készülékünk nem rendelkezik RJ45 csatlakozóval, ami sajnos manapság egyre gyakoribb, akkor a Wi-Fi router segítségével is tudjuk konfigurálni a shared mode bekapcsolásával a Dante vezérlőben. Az FOH (Front of House) pultot szintén egy hibrid kábel fogja összekötni a végfokrakkal, amelyben viszont már csak két darab CAT5E, két darab DMX és egy darab 230V-os tápkábel lesz. Ezzel a megoldással időt és helyet spórolunk, az építésnél, mivel nem kell külön-külön vezetékeket kihúzni, elég egy kábelt, amelyben minden szükséges vezeték benne van. Tehát összefoglalva három egymástól teljesen elkülönített hálózatot fogunk kiépíteni a rendszer kiszolgálására, a Dante elsődleges és másodlagos hálózatot, valamint a VU-NET hálózatot.



4.3. ábra. Példa hagyományos analóg kábelezésre [2]



4.4. ábra. Példa Dante digitális kábelezésre [2]

4.2.1. Martin Audio Wavefront Precision hangrendszer

4.2.1.1. Martin Audio Display 2.3.4 b1 tervező szoftver [4]

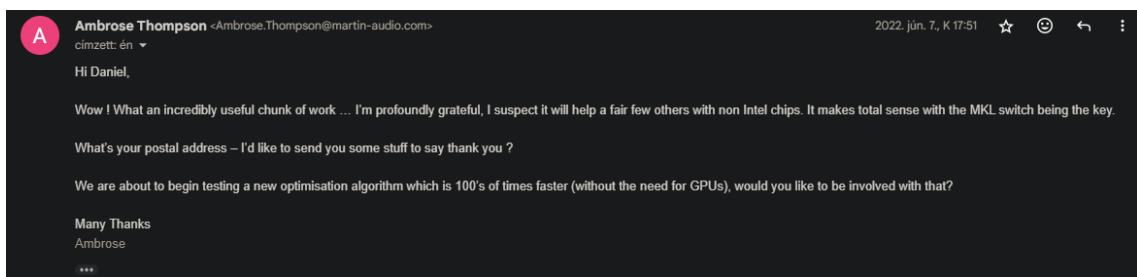
Mielőtt bele fognánk a tervezési folyamatba, fontos megemlíteni, hogy a szoftver eredetileg Intel alapú processzorokra lett tervezve és MatLab alapú. Ebből fakadóan AMD Ryzen processzorokon habár elindult a szoftver, de nem volt stabil és a számítások során minden esetben összeomlott, és használhatatlanul lassú volt. Személy szerint a saját gépem amivel dolgoztam sajnos ilyen processzorral van szerelve ezért muszáj volt megoldást találni a problémára. A Martin Audio hivatalos szoftveres támogatásához fordultam először, de sajnos nem tudtak segíteni. Ezért a szoftver használatához sok belefektetett óra olvasás után sikerült egy olyan MatLab CMD parancsot találnom, amivel a szoftver elindul és használható. Miután rájöttem a probléma gyökerére, ezt megosztottam velük, hogy a jövőben másoknak ne kelljen ezzel a problémával szembesülniük. A hiba az alábbi volt. Az új AMD Ryzen processzorok másfajta utasításkészletet használnak. Ebből kifolyólag a MatLab 2015-s runtime alapú szoftver adta alaputasításokat nem tudta értelmezni a CPU. A vezető szoftvermérnökkel való e-mail-es beszélgetésünk során megköszönte a probléma megoldását, és nemsokkal a megoldásom megosztása után a hivatalos oldalra is felekerült az indító parancsfájl. Az e-mailben további kollaborációra is adott lehetőséget. A kompatibilitási problémát rögtön a script elején megoldottam, mivel a következő parancs megadásával már használhatóvá válik a program: set MKL_DEBUG_CPU_TYPE=5

Ez a sor a program vezérlését AVX2-re állítja át, és mivel ezt az utasításkészletet már ismeri az AMD Ryzen processzor is ezért a probléma már a múlté. Az indító fájl további sorai optimalizálások a számítások gyorsítására, és a párhuzamosítására, ezzel jobban kihasználva a rendelkezésre álló hardver erőforrásokat.

```
@echo off
set PATH=%PATH%;C:\Program Files\Martin Audio\Display2_3_4_b1\application
```

```
set MKL_DEBUG_CPU_TYPE=5
set options=optimoptions('ga','UseParallel',true,'UseVectorized',false)
set options=optimoptions('gamultiobj','UseParallel',true,'UseVectorized',false)
set options=optimoptions('paretosearch','UseParallel',true)
set options=optimoptions('particleswarm','UseParallel',true,'UseVectorized',false)
set options=optimoptions('patternsearch','UseParallel',true,'UseCompletePoll',true,
    'UseVectorized',false)
set options=optimoptions('surrogateopt','UseParallel',true)
set GPUAcceleration=on
start "Martin Audio" Display2_3_4_b1.exe
pause
```

4.1. lista. A Display 2.3.4 b1 indító ".bat" scriptje AMD Ryzen processzorokhoz



4.5. ábra. E-mail a Martin Audio vezető szoftvermérnökétől

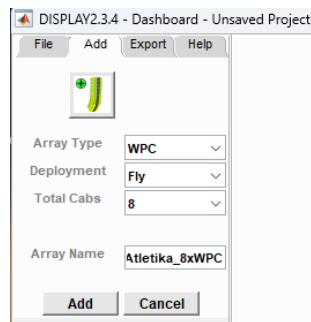
Most, hogy már a szoftver használható és teljes mértékben működőképes, kezdjük el a tervezést. A modellezés során a budapesti Millenáris B csarnoka lesz a referencia helyszín. Két LineArray rendszert fogunk tervezni, mivel a terem hosszúsága és a lefedettség növelése miatt szükségünk lesz Delay kiegészítésre a fő hangrendszerhez. Első lépésekben a fő hangrendszert tervezem meg, ami oldalanként (bal és jobb) 8 darab WPC LineArray modulból fog állni. Ez a láda 2 darab 10"-os mélysugárzót (LF), 2 darab 5"-os közép sugárzót (MF) és 4 darab 0.7"-os magassugárzót tartalmaz (HF). Három utas Bi-amp meghajtású külső végfokot igénylő rendszer, ahol a mély tartományt (+1,-1) és a középmagas tartományt (+2,-2) külön kezeljük, a négy pólusú Neutrik Speakon csatlakozókon keresztül. A láda maximális hangnyomás szintje 135 dB, és 65 Hz-től 18 kHz-ig terjed a frekvencia átvitele +- 3 dB pontossággal. [9]



4.6. ábra. Martin Audio WPC LineArray modul

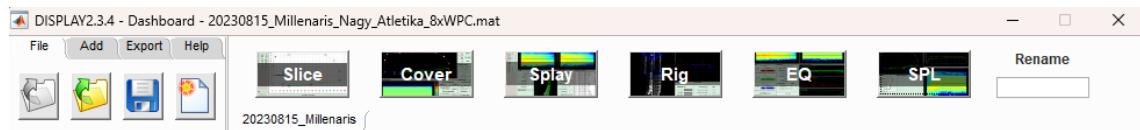
A program megnyitásakor a legelső lépés, hogy kiválasztjuk a termékpallettából a megfelelő hangrendszert. Jelen esetben az előbbiekben említett WPC-t. A produkciónyírásai, a nagy létszámos közönség és a látogatások miatt a rendszert „riggeln” fogjuk. (maximálisan 6 darab WPC-t lehet „stackeln”, azaz a földre vagy mélyládákra helyezni) A helyszín felmérése után a hangrendszer „riggelése” lehetséges, mivel a csarnokban található tartószerkezet biztonságosan és tartósan képes elviselni a rendszer súlyát. A telepítés

módja kiválasztása után megadjuk a szoftvernek a tervezni való hangláda mennyiséget, ez az esetünkben már említett 8 darab. A hozzáadás gombra kattintva a elénk kerül a fő kezelőfelület, ahol a hangrendszert tudjuk lépésről lépésre tervezni.



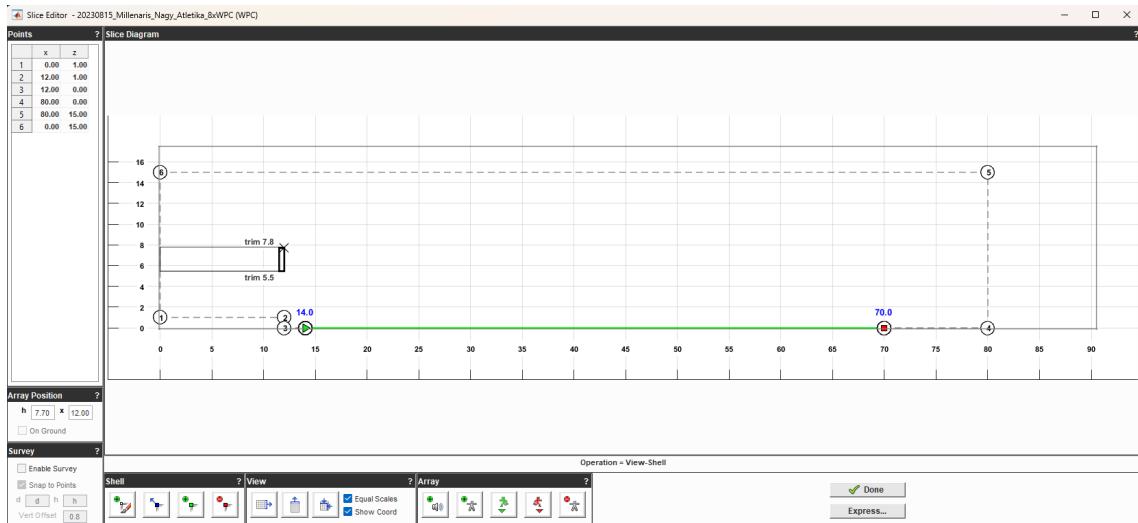
4.7. ábra. Display 2.3.4 b1 kezdőképernyője (WPC)

A tervezési folyamat öt részre osztható, amiket a szoftverben külön kezelünk. Ezeket a „Slice”, „Cover”, „Splay”, „Rig” és „EQ” kezelőfelületeken tudjuk elvégezni, balról jobbra haladva. Mivel a különböző részegységek egymásra épülnek, ezért fontos a sorrend betartása. (tervezés utáni módosításokra természetesen van lehetőség, de az adott projekt első tervezési folyamata során ezeket a lépéseket kell követni)



4.8. ábra. Display 2.3.4 b1 fő kezelőfelülete (WPC)

A „Slice” panelen meghatározzuk a rendszer fizikai pozíóját térben. A csarnok pontos lemodellezése érdekében a mérésekhez lézeres távolságmérőt használtam. Mivel minden egyes rendezvényen más és más a különböző elemek elhelyezkedése, ezért a rendszert minden alkalommal újra kell tervezni, még akkor is ha maga a helyszín nem változik. „Vertex” pontok segítségével tudjuk a méreteteket és a pozíciókat meghatározni. A 2D-s modellen figyelembe kell venni a terem önálló méretén kívül a színpadod és a színpad mögötti területet is. A rajznak tartalmazni kell azokat a falfelületeket is amelyeknél a hangvisszaverődést minimalizálni szeretnénk, ennek az optimalizáció későbbi fázisában lesz jelentősége. A terem pontos rajza után még két fontos paramétert kell megadni ezen a felületen. El kell helyeznünk magát a hangrendszert a teremben, és meg kell határoznunk milyen magasra szeretnénk a rendszert emelni. Mivel a csarnok rendkívül hosszú, és a adottságai megengedik, ezért a rendszert minél magasabba szeretnénk emelni, a jobb lefedettség érdekében. A másik fontos paraméter az optimalizációhoz, a közönség területének meghatározása. Kezdő és végpont segítségével tudjuk a területet meghatározni, ahol a hallgatóközönség tartózkodni fog.



4.9. ábra. Display 2.3.4 b1 „Slice” kezelőfelülete (WPC)

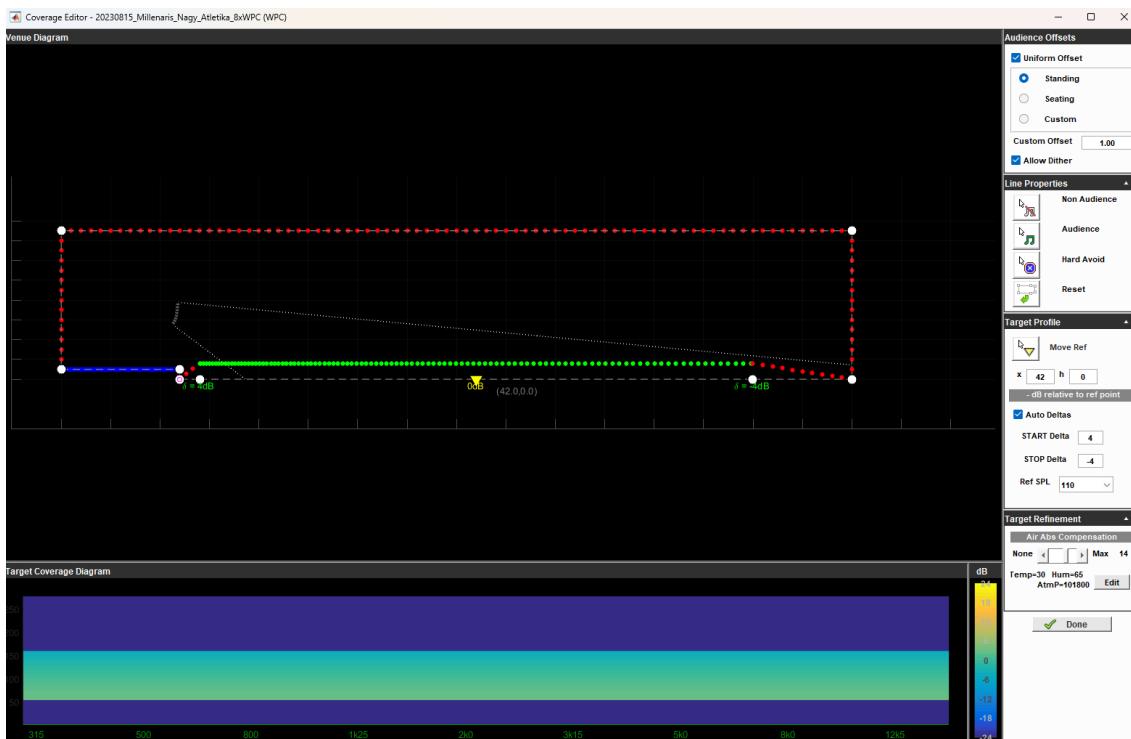
A következő lépések a „Cover” kezelőfelületen történnek. Első és legfontosabb beállítás amit el kell végezni, hogy a hallgatóság az esemény során ülni vagy állni fog-e. Lehetőségünk van a nézőteret különböző részekre is osztani, amennyiben a rendezvény során különböző helyeken eltérő típusú részeket szeretnénk egyenletesen lefedni. Lehetőség van egyedi magasság beállítására is, de jelen esetben a közönség egyhangúan állva fogja hallgatni a produkciót, ezért a „Standing” opciót választottam. Az előző lépésben elkészített rajzunkon definiálhatunk a program számára három fő régiót.

Ezek az alábbiak:

- „Non Audience” - a közönség területén kívül eső terület
- „Audience” - a közönség területe
- „Hard Avoid” - a közönség területén kívül eső terület, ahol a hangvisszaverődést szeretnénk minimalizálni

Jelen esetben a fő hangrendszer nem jelöltet meg a „Hard Avoid” területet, mivel a teremben az első olyan felület ami a hangvisszaverődést okozna már olyan távol helyezkedik el a hangrendszertől, hogy a hangvisszaverődés már nem okoz problémát. A következő lépéseket előkészítve meg kell határoznunk a hangrendszertől egy adott távolságra lévő pontot a teremben, amit referencia pontként fogunk használni. Ezt a pontot a „Move Ref” gombra kattintva tudjuk megadni, vagy manuálisan beírva az X és Y koordinátákat. Automatikusan a terem közepére van pozicionálva a referencia pont, de ezt erősen ajánlott mozgatni attól függően mit szeretnénk elérni. Jelen esetben a mix pultot fogjuk a referencia pontnak megadni. A „Start” és „Stop” mezőkben meg kell adnunk, hogy a referencia ponttól véve mekkora hangnyomás deltával szeretnénk dolgozni. Ez azt jelenti, hogy a kezdő, a referencia és a végpont közötti hangnyomás hány dB-el térhet el egymástól. Ezt az értéket a szoftver az eddig megadott információk alapján automatikusan kiszámolja, de manuálisan is megadhatjuk. Az automatikus számítás az esetek többségében megfelelő eredményt ad, ezért most is ezt választottam. A „Target SPL” mezőben megadhatjuk a referencia ponton elérni kívánt hangnyomás szintet. Így a rendszer „Gain” struktúrája úgy lesz beállítva, hogy a referencia ponton 0 dB bemeneti szint mellett elérjük a megadott hangnyomás szintet. Magas frekvenciák csökkennek ahogy a távolság nő a forrástól, azaz a hangrendszertől. Ha egyenletes frekvencia választást szeretnénk elérni nagyobb távolságokon, akkor a rendszernek nagyobb energiára lenne

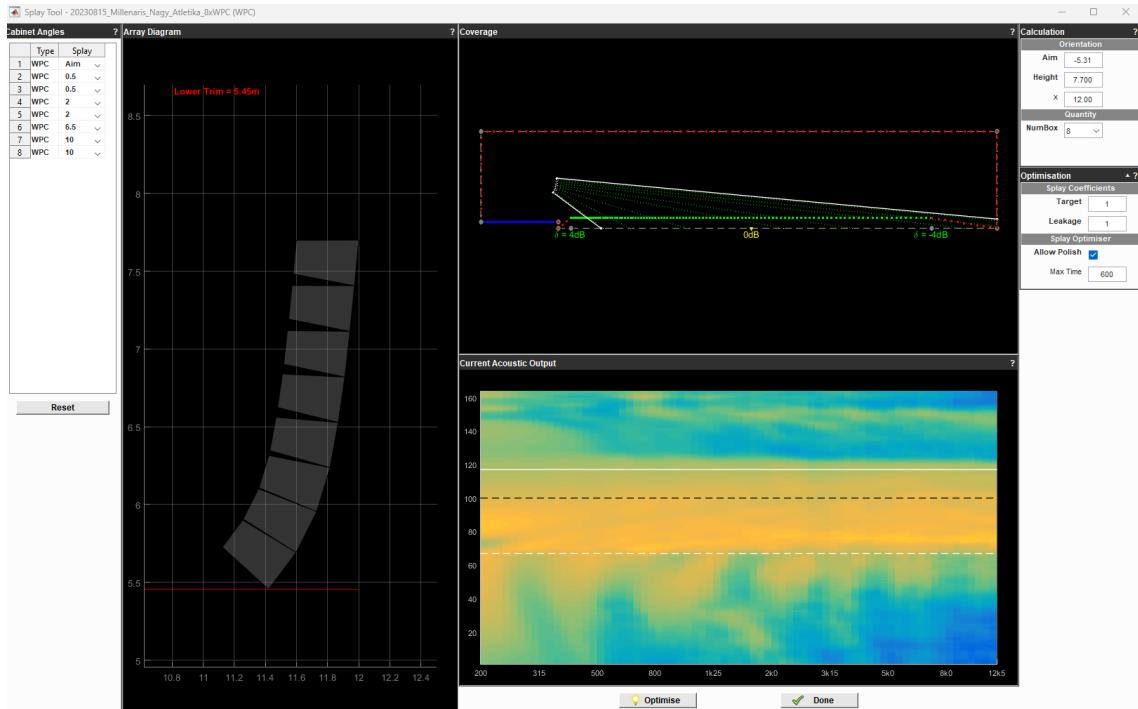
szüksége a magas frekvenciákon, és kifutna a dinamika tartalékból, ezért jobb megoldás, ha a magas frekvenciák fokozatosan csökkennek a távolság növekedésével. Beállíthatjuk a levegő veszteség kompenzációját, teljesen balra állítva nincs kompenzáció (figyelmen kívül hagyva a levegő abszorpcióját). Teljesen jobbra állítva a maximális kompenzáció (a rendszernek 17dB headroom-ra van szüksége, hogy egyenes választ kapjunk). Viszont ezekből az következik, hogyha túlságosan sok a kompenzáció, akkor a rendszernek nem lesz elég dinamika tartaléka, és a hang torzulni fog. A változások hatását a „*Target Response*” ábrán láthatjuk. Ahhoz, hogy a számítások pontosak legyenek, elengedhetetlen, hogy pontosan megadjuk a környezeti változókat, a hőmérsékletet, a páratartalmat és a légnyomást. Ezeket a paramétereket a „*Edit*” gombra kattintva tudjuk megadni. Jelen esetben mivel a teremben alapból is meleg van, a mérés időpontjában 28 fok, és a rendezvény során a közönség is melegíti a termet, ezért a hőmérsékletet harminc fokra állítottam. A páratartalom értéke a méréskor 57%-os volt, de én 65%-ra állítottam, mivel a rendezvény során a közönség által kibocsátott vízgőz miatt a páratartalom nagy valószínűséggel magasabb lesz ennél. A légnyomás értékét pedig a helyi időjárás jelentésből vettettem, ami azon a napon 101800 Pa volt. Ezek beállítása után mivel az adott hangládához a gyári beállítások nagyon jók, ezért nem változtattam rajtuk, a 14-es érték egyenletes és dinamikus hangvisszaadást biztosít.



4.10. ábra. Display 2.3.4 b1 „*Cover*” kezelőfelülete (WPC)

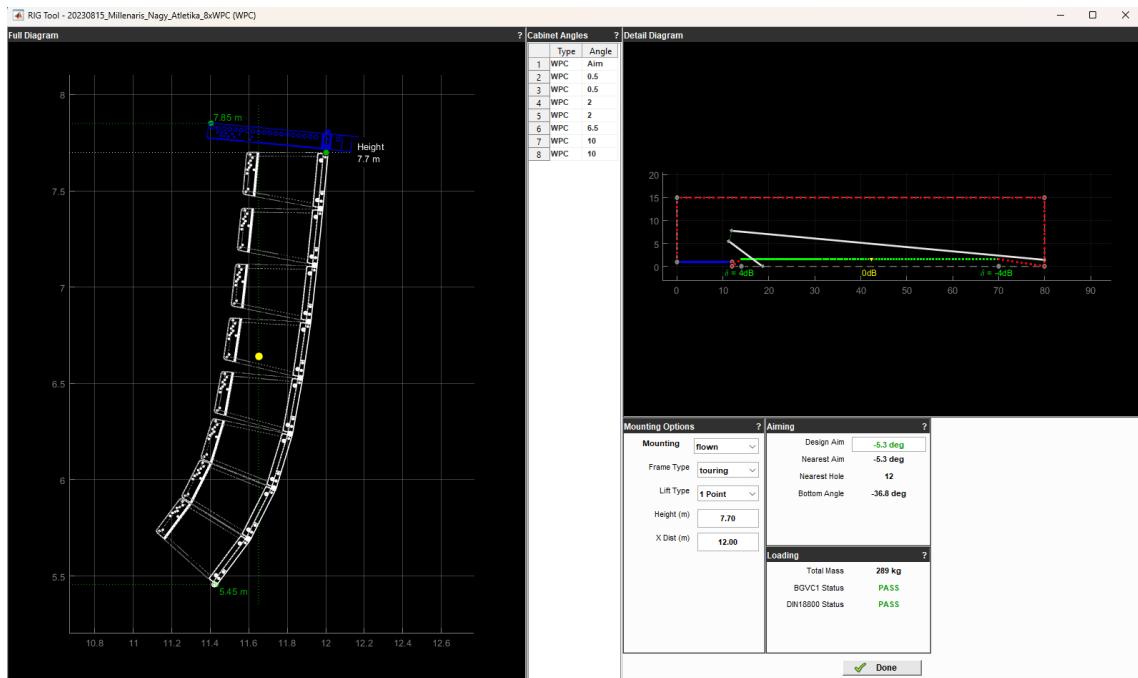
Miután a „*Cover*” kezelőfelületen elvégeztük a szükséges beállításokat, a „*Splay*” kezelőfelületen folytatjuk a tervezést. Az optimalizáció ezen részén a hangrendszer fogjuk a hallgatószám területére irányítani, a fokolási szögek beállításával. A szoftver által biztosított optimalizációs algoritmus a lehető legjobb lefedettségre törekzik a tervezett területen. Lehetőség van az optimalizáció súlyozási tényezőinek beállítására, de jelen esetben a gyári beállításokat használtam. Amennyiben módosítani szeretnénk a súlyozást a „*Target*” és a „*Leakage*” mezőkben tudjuk megadni a súlyozási tényezőket. A „*Target*” mezőben megadott érték a közönség terület súlyozása, a „*Leakage*” mezőben megadott érték pedig a közönség területén kívül eső szivárgás súlyozása. Az „*Allow*

„Polish” opció engedélyezi a szoftvernek, hogy egy második körben finom hangolja a splay szögeket az első próbálkozás után. Ezt az opciót előnyös bekapcsolni, mivel a szoftver így pontosabb eredményt tud produkálni, ezért ezt a beállítást mindig használom. A „Max Time” mezőben megadhatjuk, hogy a szoftvernek mennyi idő álljon rendelkezésére az optimalizáció elvégzéséhez. Mivel a mai modern számítógépek olyan gyorsak, hogy a szoftver általában 1-2 perc alatt elvégzi az optimalizációt, ezért ezt az értéket nem szoktam módosítani. A „Max Time” mezőben megadott érték másodpercben értendő.



4.11. ábra. Display 2.3.4 b1 „Splay” kezelőfelülete (WPC)

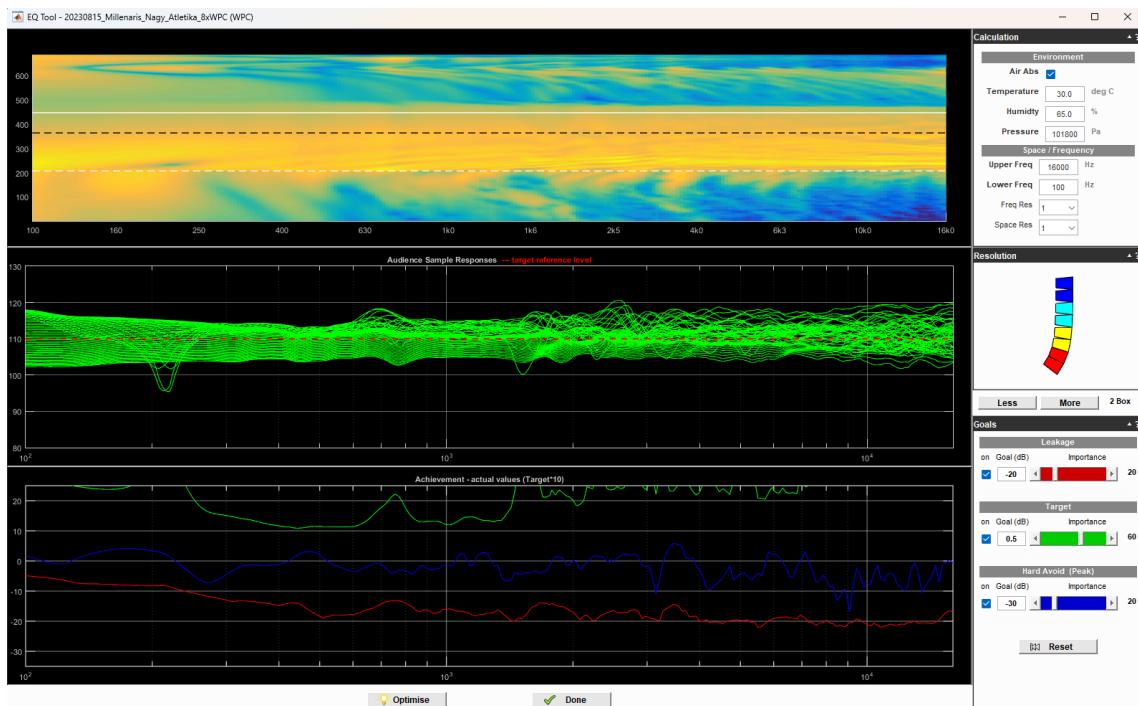
A következő lépés a „Rig” kezelőfelületen történik. Ez a felület elsősorban az eddig elkészített rendszerünket fogja megjeleníteni térben. Elsődleges beállítási paraméter ezen a panelen, hogy egy vagy két pontos rögzítést szeretnénk-e használni. Jelen esetben egy pontos rögzítést fogunk használni. Amennyiben valamilyen okból szeretnénk változtatni a rendszer fizikai elhelyezkedésén, még megtehetjük, de ez a lépés ezen a ponton már nem ajánlott. Bármely kis apró változtatás kardinálisan más végeredményhez vezethet. A tervezési folyamatot újra kell kezdeni, ellenkező esetben a szoftver nem fogja tudni a megfelelő eredményt produkálni, és a rendszerünk nem úgy fog viselkedni a valóságban, ahogy azt mi szeretnénk. A hangrendszer függésztéséhez és összeszereléséhez az összes információ megtalálható itt. Gondolva itt a riggvas fokolási helyére, a látás közti szögekre, a rendszer legfelső és legalsó pontjára. Ezekben az információkon kívül még a rendszer súlyát és súlypontját is megkapjuk. Esetünkben a teljes súly 289 kilogramm, amit a csarnok tartószerkezete biztonságosan elbír, valamint az egy tonnás emelőkapacitású láncos emelők is képesek biztonságosan emelni. A súlypont a rendszer relatíve közepén helyezkedik el, ami stabil függésztést tesz lehetővé. Ezek után a rendszert az említett paraméterek alapján össze építjük, figyelve az összes program által megadott információra.



4.12. ábra. Display 2.3.4 b1 „Rig” kezelőfelülete (WPC)

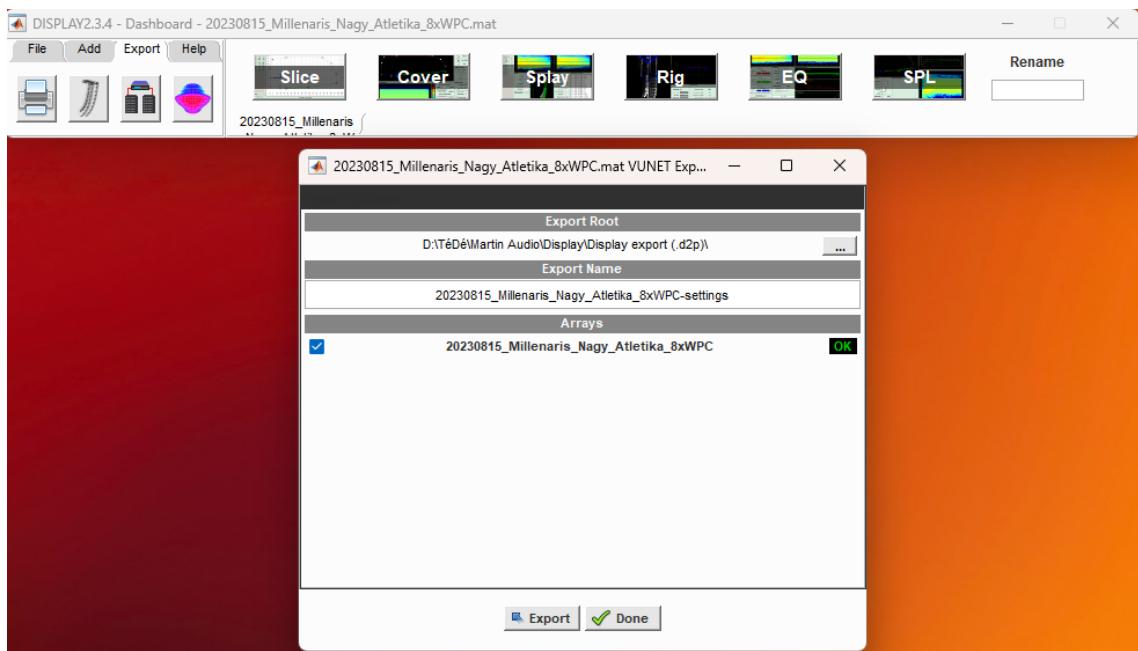
Az utolsó lépés mielőtt ki tudnánk menteni a tervezett rendszert, az a „EQ” kezelőfelületen történik. Ha a „Cover” kezelőfelületen már megadtuk a környezeti változókat, akkor ezt már nem kell újra megtennünk, mivel a szoftver automatikusan átveszi az ott megadott értékeket. Beállíthatjuk az alsó és felső határfrekvenciákat, de mivel a program a kiválasztott hangrendszerhez tartozó gyári beállításokat automatikusan betölti, ezért ezeket az értékeket sem kell módosítani. Amit viszont érdemes és erősen ajánlott módosítani, az a „Freq Res” és a „Space Res” értékek. Az előbbi a frekvencia felbontást, az utóbbi pedig a térbeli felbontást jelenti. Ezek az értékek határozzák meg, hogy a szoftver milyen felbontásban végezze el a számításokat. Minél kisebb értéket adunk meg, annál pontosabb eredményt fogunk kapni, viszont a számítások hosszabb ideig fognak tartani. A „Freq Res” értékét 1-re, a „Space Res” értékét pedig szintén 1-re állítottam, mivel ez az elérhető legnagyobb felbontás, és a számításokat is a lehető legpontosabban szeretném elvégezni. A gyári érték mindegyiknél a kettő. Minél pontosabbak a számítások, annál jobban fog viselkedni a rendszer a valóságban és egyenletesebb hangvisszaadást fog produkálni. Ha már a kiegyensúlyozott hangvisszaadásnál tartunk, akkor a „Resolution” panelen meg kell adnunk, hogy milyen konfigurációban szeretnénk használni a rendszert. A WPC szériás hangládákat tudjuk akár egyesével hajtani, azaz egy láda egy végfok csatorna párral (mivel Bi-Amp hangládáról beszélünk). De a gyártó lehetőséget biztosít arra is, hogy a lánckat párosával vagy hármasával is hajtsuk. Ennek költséghatékonyiségi és rugalmassági előnyei vannak, viszont a hangvisszaadás kevésbé lesz egyenletes. Jelen esetben az arany középutat választottam, és párosával fogom hajtani a lánckat. Így a WPC rendszer összesen 4 darab iK42 végfokot fog igényelni, ami 16 darab végfokcsatornát jelent. A WPC rendszer csak iK42 végfokkal hajtható, a 8 csatornás iK81 végfokkal nem kompatibilis. Lehetőség van az optimalizációs algoritmus befolyásolására is, a három előbbiekben már definiált súlyozási tényezők segítségével. A fő hangsúlyt a „Target” súlyozásra helyeztem, mivel a közönség területén szeretném a lehető legjobb hangvisszaadást elérni, ezért 60%-os súlyozást adtam neki. A „Hard Avoid” és a „Leakage” súlyozását 20%-ra állítottam. Továbbá minden résznek megadhatjuk mekkora hangnyomás értéket szeretnénk elérni a tervezett területen. Ezeket az értékeket

nem szükséges módosítani, mivel a gyári értékek megfelelők, de ha mégis szeretnénk, akkor megtehetjük. A paraméterezés után az optimalizáció után megkapjuk a teljes rendszer EQ beállítását és vizuális ábrázolást kapunk a referencia értéktől való eltérésekéről.



4.13. ábra. Display 2.3.4 b1 „EQ” kezelőfelülete (WPC)

Az utolsó dolgunk ebben a programban mielőtt tovább lépünk, hogy exportáljuk a tervezett rendszert. Az exportálás során egy D2P kiterjesztésű fájlt fogunk kapni, amit a VU-NET szoftver fog tud majd importálni a későbbiekben.



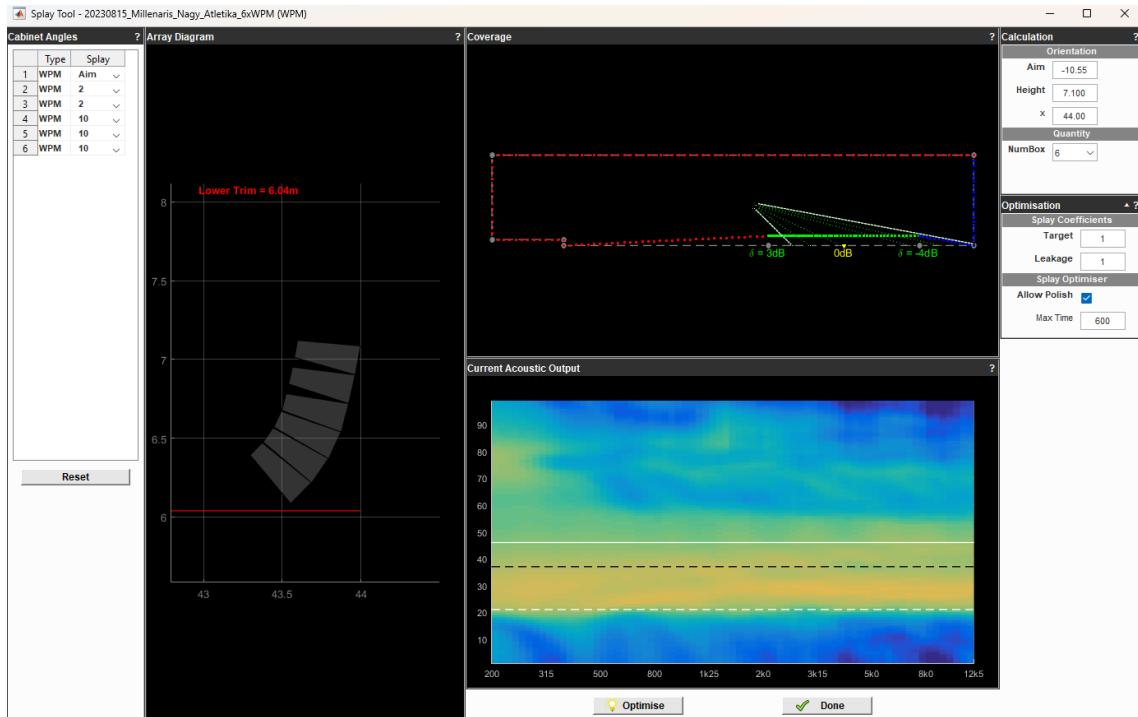
4.14. ábra. Display 2.3.4 b1 exportáló kezelőfelülete (WPC)

A fő hangrendszer megtervezése után a következő részegység aminek a tervét el kell készíteni, az a Delay hangrendszer. A Delay hangrendszer a fő hangrendszerrel együtt fog működni, és a közönségtér hátsó-közép részétől kezdve fogja kiegészíteni azt. Erre azért van szükség, mert a csarnokban a közönség ezen része olyan távolságra helyezkedik el, hogy a WPC rendszer már nem tudja a megfelelő hangnyomás szintet egyenletesen biztosítani. Ezt a feladatot a Wavefront Precision sorozatból a WPM típusú hangládák fogják ellátni, oldalanként 6-6 darab LineArray modullal. Ez a láda egy két utas passzív hangrendszer, 2 darab 6.5"-os mély hangszóróval (LF) és 3 darab 1.4"-es magas hangszóróval (HF). Maximásan 130 dB hangnyomás szintet tud biztosítani, nagy előnye ennek a fajta rendszernek a súly-teljesítmény aránya, mivel egy darab láda mindössze 14 kilogramm. [10]



4.15. ábra. Martin Audio WPM LineArray modul

A tervezési fázisok nagy része megegyezik az előbbi rendszer tervezésével, ezért ezeket a részeket nem ismétlem meg. A hangsúlyt a eltérésekre helyezem, és azokat fogom részletezni. A fő különbség a „Cover” kezelőfelületen történik, ahol a „Hard Avoid” területet kell megjelölni. Ezen a rajzon már radikálisan szükség van erre a funkcióra, mivel a közönség területén kívül eső területen beton nagy felületek találhatóak, amelyek jelentős hangvisszaverődést okoznának. Ebből kifolyólag, szépen látható, hogy a program pontosan úgy optimalizálja a rendszert, hogy a „Hard Avoid” területre, minél kevesebb hangnyomás jusson. Már a kék színnel jelölt terület első pár méterén radikálisan csökken a hangnyomás, és a rendszer a lehető legkevesebb energiát fordítja erre a területre. A gyártó a WMP rendszert végfog csatornák szempontjából úgy tervezte, hogy a költség és a rugalmasság szempontjából akár négyesével is hajthatóak legyenek. Ez persze nem jár kompromisszumok nélkül, a hangvisszaadás egyenletereiből lenne, ha egyesével hajtanánk a látákat, de a jelenlegi rendszerben hármasával fogom hajtani a látákat, mivel ez a legköltséghatékonyabb megoldás, és végeredményben így is kielégítő hangvisszaadást fog produkálni mint kiegészítő egység. A WPM-eket tudjuk egyesével is hajtani, mivel rendelkezésünkre áll 2 db iK81 végfok.

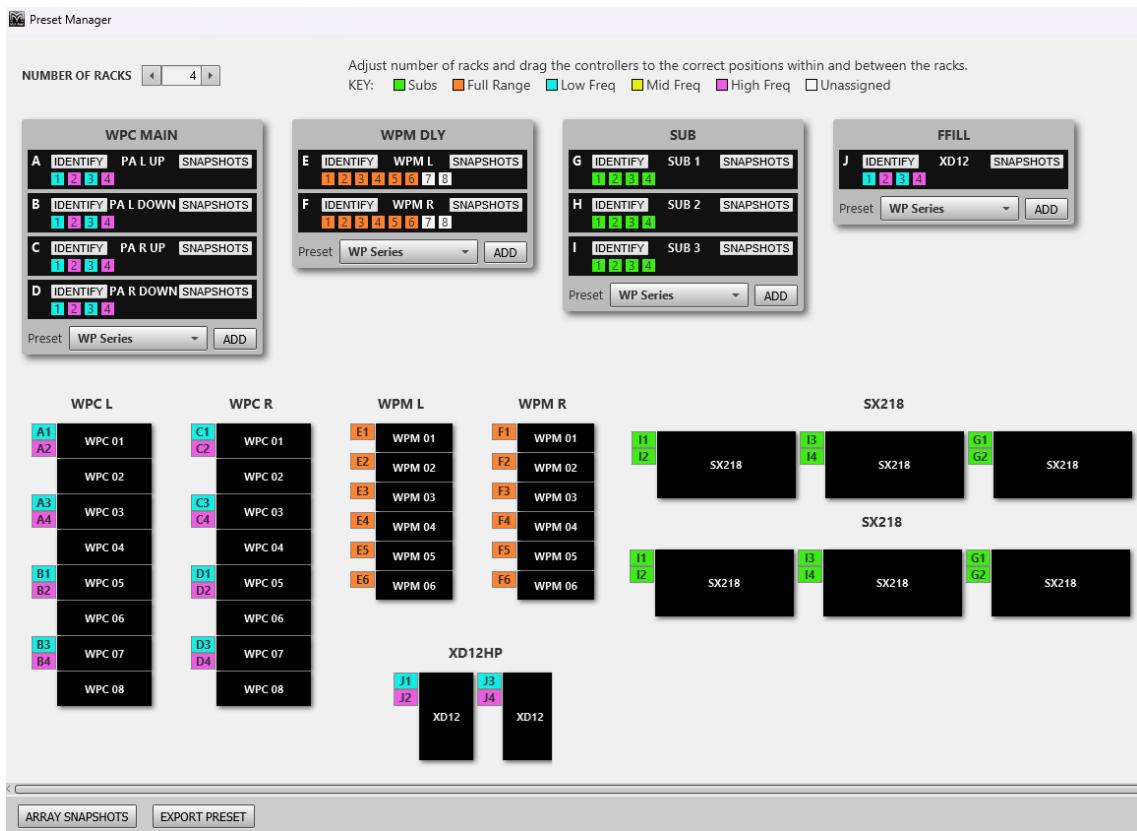


4.16. ábra. Display 2.3.4 b1 „*Splay*” kezelőfelülete (WPM)

Az előbbiekben már tárgyalt exportáló felületen az összes többi optimalizációs lépést követően mentjük az elkészített tervet a WPC rendszerhez hasonlóan.

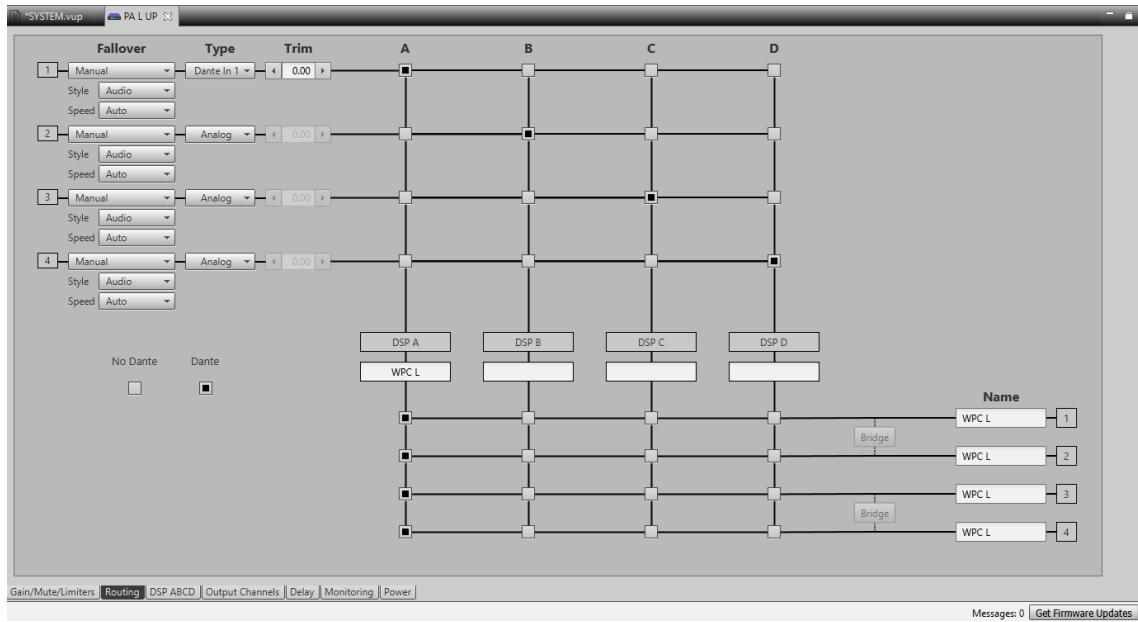
4.2.1.2. Martin Audio VU-NET rendszer szoftver [8]

Első és legfontosabb feladatunk, hogy az összes végfoknak egyedi IP címet adjunk a hálózaton. Enélkül a rendszerünk használhatatlan lesz, mivel a VU-NET szoftver nem fog tudni kommunikálni a végfokokkal. Ezután győződjünk meg, hogy számítógépünk ugyan abban az alhálózatban és cím tartományban van mint a többi eszköz. Miután már rendelkezünk az összes számunkra szükséges rendszer patch fájljával, el tudjuk kezdeni felütni a végfokparkot amelyek a hangszórókat fogják hajtani. Tehát a következő lépések a VU-NET szoftverben történnek a végfokok beállításával. A VU-NET szoftver egy olyan alkalmazás, amely lehetővé teszi a Martin Audio hangrendszerek teljes körű vezérlését és monitorozását. Jelen esetben az iK42 és iK81 típusú eszközöket fogjuk tudni kezelni. Rendszerünk ha minden összeszámolunk, akkor 8 darab iK42 és 2 darab iK81 végfokot fog tartalmazni. Ebből 4 db iK42 a WPC LineArray rendszert, 2 db iK81 a WPM LineArrayt, 3 db iK42 az SX218 mélyládákat, és 1 db iK42 a FrontFill hangfalakat (XD12) fogja hajtani. A Discover Devices gombra kattintva a szoftver megkeresi az összes végfokot a hálózaton, és megjeleníti azokat a cím szerint növekvő sorrendben. Szinkronizáció után szabadon vezérelhetővé válnak az eszközök. Egy kiválasztott eszközre jobb egérkombbal kattintva megjelenik egy menü, ahol az Open Preset Manager opcióra kattintva betölthetjük az előre elkészített és gyári preseteket. Az alábbi képen látható az a felület ahol bele kell tölteni a preseteket az egyes erősítőkbe külön-külön.



4.17. ábra. VU-NET rendszer áttekintő diagram

Így már szépen látható, hogy a rendszerünk hogyan fog kinézni, és melyik végfok melyik csatornán mit fog hajtani. Ez kábelezés és rendszerstruktúra szempontjából is nagyon fontos információ, mivel kizárolag a megfelelő helyre kötött hangládákkal fog megszólalni helyesen a rendszer. Ezen felül ha valamit rossz helyre kábelezünk le, tegyük fel egy mélyládat hajtó végfokra egy Line Array modult, akkor a benne lévő hangszórók nagy valószínűséggel tönkrementenek ha terhelés alá kerülnek. Tehát fontos az precíz és átgondolt munkavégzés. A hibák elkerülése után is hasznos számunkra a rendszer áttekintő diagram, mivel ha valami nem működik a rendszerben, akkor könnyen és gyorsan megtalálhatjuk a hibát, és azonosíthatjuk a hibás komponenst. Miután sikeresen betöltöttük az összes presetet amire szükségünk van, be kell állítanunk, hogy az erősítők milyen forrásból fognak jelet kapni. A következő lépésekben a routing fülön be kell állítanunk, hogy az input csatorna Dante hálózatról fogja kapni a jelet. Ez a beállítás a következőképpen néz ki:



4.18. ábra. VU-NET Dante routing

Most, hogy a megfelelő alapbeállításokat elvégeztük, a rendszer készen áll arra, hogy zajjal, például Pink Noise-al teszteljük. Ezalatt a rendszer minden egyes komponensét külön-külön lehallgatjuk, és ellenőrizzük, hogy minden egyes hangszóró megfelelően működik-e. Ha rendellenességet észlelünk, akkor azonnal kikapcsoljuk a rendszert, és megnézzük, hogy mi okozza a problémát. Ha a probléma nem oldható meg, akkor a rendszert nem szabad tovább használni, és az adott komponenst cserélni kell. Ha minden rendben van, akkor a rendszer készen áll a további feladatokra, mivel még koránt sem értünk a végére a folyamatnak. A programba a mérési és optimalizálási folyamat közben még sok beállítást kell elvégezni, amelyekről a későbbiekben lesz szó.

4.2.2. Dante hálózat kialakítása és optimalizálása

4.2.2.1. Dante Controller

Ezen a felületen tudjuk a hálózaton összekapcsolni a különböző hang vevőket és adókat. Egy nagyobb rendszerben a konfigurálása rendkívül nagy odafigyelést és precíziót igényel, pontosan tudnunk kell mit, hogyan és miért kötünk össze. Mielőtt neki álnánk konfigurálni az adott eszközt, fontos eldöntenünk, hogy milyen módon szeretnénk használni. Lehetőségünk van két fő közül választani, a redundáns és a váltott mód közül. A „*redundant*” mód mint ahogy azt a neve is sugallja redundáns kommunikációt valósít meg az eszközök között szoftveresen és hardveresen egyaránt. Az összes Dante kártya a jelenlegi rendszerben gyári konfigurációban két RJ45-s csatlakozóval rendelkezik. Jelen esetben ezt a módot választjuk az üzembiztoság és a kritikus hibák minimalizálása miatt. A másik lehetőség a „*switched*” pedig eszközök láncolását teszi egyszerűbbé. Amennyiben a redundancia nem elsődleges szempont számunkra, nem kell minden egyes eszköz mögé switch, hanem a másodlagos RJ45 port direktbe köti az arra csatlakoztatott eszközt az elsődleges hálózatra. Így gyorsabban és költséghatékonyabban tudjuk kiépíteni a hálózatot, azonban a redundancia lehetősége megszűnik.

4.2.2.2. IP kiosztás

A rendszer képes automatikusan IP címeket osztani az egyes eszközöknek, ezzel megygyorsítva a munkafolyamatot. Viszont ez nem bizonyul jó megoldásnak. Egy fixen előre megtervezett rendszer praktikusabb és üzembiztosabb megoldás, ha minden eszköznek manuálisan mi adjuk meg a címét a hálózaton. A tervezett rendszerben minden egyes eszköznek fix IP címet adtam, hogy könnyen és logikusan átlátható legyen az előbb említett előnyökön kívül. A címeket egy online is elérhető Excel táblázatban tároltam, hogy amennyiben szükség van rá bármikor könnyen elérhető legyen. Ez a táblázat a cégnél dolgozó összes munkatárs számára látható, aki a rendszerrel foglalkozik. Így amennyiben új eszköz kerül a hálózatra, vagy egy eszköz IP címét valamilyen okból meg kell változtatni, egyszerűen elérhető a szükséges naprakész információ. A kiosztás logikája a következőképpen néz ki: A Dante Primary hálózat a 192.168.1.X címeket használja, a Secondary hálózat pedig a 192.168.2.X címeket. A két hálózat között nincsen semmilyen kapcsolat, és egymástól teljesen függetlenek hardveresen és szoftveresen is. A Vu-Net vezérlés a 192.168.100.X címeket használja, és egy switchen keresztül üzemel a secondary hálózaton, viszont a két hálózat között nincsen átfedés, az előbbiekbén már említett módon függetlenek egymástól. Az eszközök egyedi címei pedig az alábbi módon kerültek kiosztásra: Vegyük példának a 192.168.1.111-es címet, a 111-ben az első számjegy arra utal, hogy egy végfokról van szó, minden végfok 1XX címet kap. A második számjegy az eszköz rack száma, a harmadik pedig az eszköz sorszáma a rackben felülről lefelé. Tehát az előbbi cím a következőt jelenti számunkra: Az 1-es sorszámú végfokrackben lévő legfelső végfok. A keverőpultok a címezés elején 1-től indulva 20-ig kapnak címeket. A stageboxok 30-tól 50-ig kapnak címeket. Ezekben felül a háló legvégre vannak kiosztva a speciális eszközök melyek nem mindig vannak a rendszerben, de ha mégis akkor azoknak is megvan a saját címük. A háló 250-es címén helyezkedik el a Dante Audio szerver.

	Eszköz	Dante Elsőleges	Dante Másodlagos	Maszk	Ethernet IP	Switch Neve	Switch IP	Groove Neve/SSID	Jelszó	Groove IP	DHCP tartomány
Pultok											
SQ5_01	SQ5 (01)	192.168.1.1	192.168.2.1	255.255.255.0	-	-	-	Titkos információ	Titkos információ	-	-
SQ6_01	SQ6 (01)	192.168.1.10	192.168.2.10	255.255.255.0	-	-	-	Titkos információ	Titkos információ	-	-
SQ6_02	SQ6 (02)	192.168.1.20	192.168.2.20	255.255.255.0	-	-	-	Titkos információ	Titkos információ	-	-
QU-SB_01	QU-SB (01)	-	-	-	-	-	-	Titkos információ	Titkos információ	-	-
Boxok											
DT168_01	DT168 (01)	192.168.1.31	192.168.2.31	255.255.255.0	-	DT168_01_P	DHCP	-	-	-	-
					-	DT168_01_S	DHCP	-	-	-	-
DT168_02	DT168 (02)	192.168.1.32	192.168.2.32	255.255.255.0	-						
DT168_03	DT168 (03)	192.168.1.33	192.168.2.33	255.255.255.0	-						
PA Racks											
PA WPC 01	IK42 UP IK42 MID IK42 DOWN	192.168.1.111 192.168.1.112 192.168.1.113	192.168.2.111 192.168.2.112 192.168.2.113	255.255.255.0 255.255.255.0 255.255.255.0	192.168.100.111 192.168.100.112 192.168.100.113	PA_WP_01_P PA_WP_01_S	DHCP	Titkos információ	Titkos információ	192.168.100.1	192.168.100.10-49
PA WPC 03	IK42UP IK42DOWN	192.168.1.131 192.168.1.132	192.168.2.131 192.168.2.132	255.255.255.0 255.255.255.0	192.168.100.131 192.168.100.132	PA_WP_03_P PA_WP_03_S	DHCP	Titkos információ	Titkos információ	192.168.100.1	192.168.100.10-49
PA WPC 04	IK42UP IK42DOWN	192.168.1.141 192.168.1.142	192.168.2.141 192.168.2.142	255.255.255.0 255.255.255.0	192.168.100.141 192.168.100.142	PA_WP_04_P PA_WP_04_S	DHCP	Titkos információ	Titkos információ	192.168.100.1	192.168.100.10-49
PA WPC 05	IK81UP IK42DOWN	192.168.1.151 192.168.1.152	192.168.2.151 192.168.2.152	255.255.255.0 255.255.255.0	192.168.100.151 192.168.100.152	PA_WP_05_P PA_WP_05_S	DHCP	Titkos információ	Titkos információ	192.168.100.1	192.168.100.10-49
Audio Szerverek											
AMD_Prof	LiveProfessor	192.168.1.250	192.168.2.250	255.255.255.0	-	-	-	-	-	-	-

4.19. ábra. Dante eszközök IP címei a hálózaton

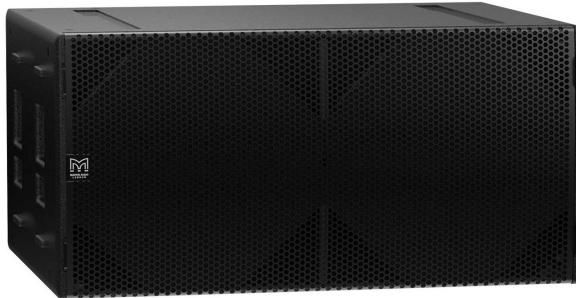
Meg kell adnunk az audio hálózatunk master órajelét. Ehhez az órajelhez szinkronizál a többi eszköz. Az időszinkronizáció kulcsfontosságú előzenei produkcióknál. A mi esetünkben a keverőpult lesz a master órajel, ő fogja a hálózatot vezérelni. A felületen egyszerűen bepipáljuk a „Preferred leader” opciót a keverőpult mellett, és a hálózat többi eszköze automatikusan ehhez az órajelhez szinkronizálódik. Az órajelen kívül a késleltetési értékeket is be kell állítanunk. A default érték minden eszköznél jelen esetben 1 ms, mivel ennél az értéknél a legtöbb eszköz képes probléma nélkül működni. Ez az érték azonban nem minden esetben optimális, ezért fontos, hogy minden eszköz késleltetését ellenőrizzük

és beállítsuk. Amennyiben problémákat, zavaró pattanásokat vagy hangkimaradásokat tapasztalunk, akkor a késleltetési értékeket növelni kell mindenkor, amíg a probléma nem szűnik meg. Fontos megjegyezni, hogy a késleltetési értékek növelésével egyre több és több időt vesz igénybe a jelek feldolgozása, előzenei produkcióknál ez kritikus. A mi esetünkben mivel az útválasztók is kifejezetten csak erre a célra vannak használva és semmiféle más adatforgalmat nem bonyolítanak, a 1 ms-os késleltetési érték csökkenthető is akár a felére is. Rövid kábelhosszak esetén egyes eszközök között akár 0.25 ms-os késleltetési értéket is beállíthatunk amennyiben hosszútavon nagy biztonsággal stabil a hálózat.

4.2.2.3. Dante rendszer monitorozása

4.2.3. Mélyláda rendszer

A mélyláda hangja hosszabb hullámhosszú, mint a többi komponensé, ezért az optimális helymeghatározásuk és elhelyezésük kulcsfontosságú a megfelelő hangzás érdekében. A rendszerben a Martin Audio SX218 típusú mélyládáit fogjuk használni. Ezek a ládák dupla 18"-os mély hangszórókkal vannak felszerelve, 2000W AES és 8000W csúcsteljesítményre képesek, és maximálisan 144 dB hangnyomás szintet tudnak biztosítani. [7] Jelen esetben 12 darab ilyen láda fogja biztosítani a megfelelő mély tartományt a rendezvényen.



4.20. ábra. Martin Audio SX218 mélyláda

A „SUB” tervezést egy általam készített Excel kalkulátor segítségével végzem el. Ez a táblázat egyesíti a Martin Audio és Merlin van Veen által készített kalkulátorokat (S.A.D), valamint kiegészítésre került további modulokkal és funkciókkal. [13] [6] A egy EndFire konfigurációs mélyláda elrendezést terveztem. (Egy EndFire Pack = két láda egymás előtt adott távolságra és késleltetési értékkal) A táblázatba megadhatjuk, hogy éppen helyileg hol van a rendezvény, és egy időjárás API segítségével megkapjuk az adott napra/napokra a teljes időjárás előrejelzést. Majd ezekből egy adott időintervallumra átlagolva megkapjuk az optimális értékeket a tervezéshez. A program kiszámolja, hogy milyen távolságra kell a ládákat helyezni egymástól előrefelé, valamint mekkora „delay” értéket kell alkalmazni. Majd az egyes EndFire Pack-ok egymáshoz képesti távolságot oldalirányban és azok közötti delay értéket is megkapjuk. A „SUB array”-t 63 Hz-re optimalizáltam, mivel ez az a frekvenciatartomány, ahol a mélyláda rendszer a legtöbb energiát tudja leadni.

4.2.4. Allen & Heath digitális keverőrendszer

A jelenlegi rendszer két keverőpultot fog tartalmazni, egyet a fő hangrendszerhez, és egyet a monitor rendszerhez. Mindkét keverőpult Allen & Heath SQ-6 típusú digitális keverőpult lesz. A pultok 96 kHz-es mintavételezési frekvenciával operálnak és 48 csatornát képesek maximálisan kezelni, melyek közül 24 csatornával rendelkezik fizikailag beépített mikrofon előerősítővel. A konzolokon található 16 programozható gomb, 25

fader melyek 6 rétegben helyezkednek el és a felhasználó személyre szabhatja őket a saját igényei szerint. Emellett 12 sztereó mix áll a rendelkezésünkre, melyeket szintén a felhasználó konfigurálhat saját igényei szerint. A sztereómixek testreszabásával tudunk csoportokat is létrehozni. A konzolokon 8 sztereó effekt motort is megtalálunk, ezekbe a virtuális effekt processzorokba a pulton található ingyenes és fizetős pluginokat tudjuk betölteni. (amennyiben megvásároltuk a fizetős csomagokat, jelen rendszerben ezek nincsenek megvásárolva) További előnye a platformnak, hogy egy 32x32 csatornás USB audio interfésszel rendelkezik, így a számítógéphez csatlakoztatva egy nagy felbontású hangkártyaként is használhatjuk. [11]



4.21. ábra. Allen & Heath SQ-6 digitális keverőpult

Az I/O bővítőkártyák közül a rendszerben minden két pultban megtalálható egy darab SQ Dante kártya ami 64x64 csatorna kezelésére képes. Az A&H SQ szériás pultjai csak egy darab I/O bővítőkártyát tudnak kezelni, de léteznek olyan rendszerek mint például az Avantis és a DLive szériás pultok, amelyek több I/O bővítőkártyát is tudnak kezelni. Jelen esetben ez teljes mértékben felesleges, mivel a rendszerben kizárálag a Dante protokollra támaszkodunk.



4.22. ábra. A&H SQ Dante kártya



4.23. ábra. A&H DT168 Dante stagebox

4.2.5. Dante audio szerver

Ez a kiegészítő szerver egység lehetővé teszi bármilyen alacsony késleltetéssel dolgozó VST3 plugin használatát a rendszerben elő környezetben. Olyan komplex funkcionálitásokat is elérhetünk, amelyek a keverőpulton csak limitáltan, vagy egyáltalán nem elérhetők. Gondolva itt a dinamikus EQ használatára, különböző kompressziós technikákra (például Opto, Multiband Compressor), A legnagyobb előnye ennek a fajta megoldásnak, hogy költségek szempontjából egy magasabb kategóriás keverőpult rendszer sokkal drágább lenne, valamint nem vagyunk korlátozva a keverőpult által biztosított funkcionálitásokkal, bármikor tudunk igényeink szerint újabb és újabb pluginokat telepíteni a rendszerbe, amíg

a számítógép hardveres erőforrásai ezt lehetővé teszik. Az általam épített szerver egy AMD Ryzen 7950X processzorral és 32 GB DDR5 memóriával, és a Focusrite RedNet PCIe kártya veszi fel a harcot a komplex hangfeldolgozási feladatokkal. Ezekre a hardverekre azért esett a választás, mert mivel a Dante kártya 128 csatornát tud kezelni, (az épített rendszer 64 csatornás, de a bővítés lehetősége fent áll) erős számítási kapacitásra van szükség, hogy a rendszer a beállított rendkívül alacsony késleltetési értékek mellett is képes legyen késés nélkül a csatornák feldolgozására. Amennyiben nem sikerül a jelet a beállított időn belül produkálni, furcsa zavaró pattogó hangokat hallhatunk, vagy rosszabb esetben hangkimaradás is előfordulhat. Ezért fontos a megfelelő hardveres erőforrások biztosítása, és a pontos beállítások elvégzése. A példában szereplő rendszer kifogástalanul képes elvégezni a feladatát, és a beállított 1 ms-os késleltetési értéket is képes folyamatosan tartani.



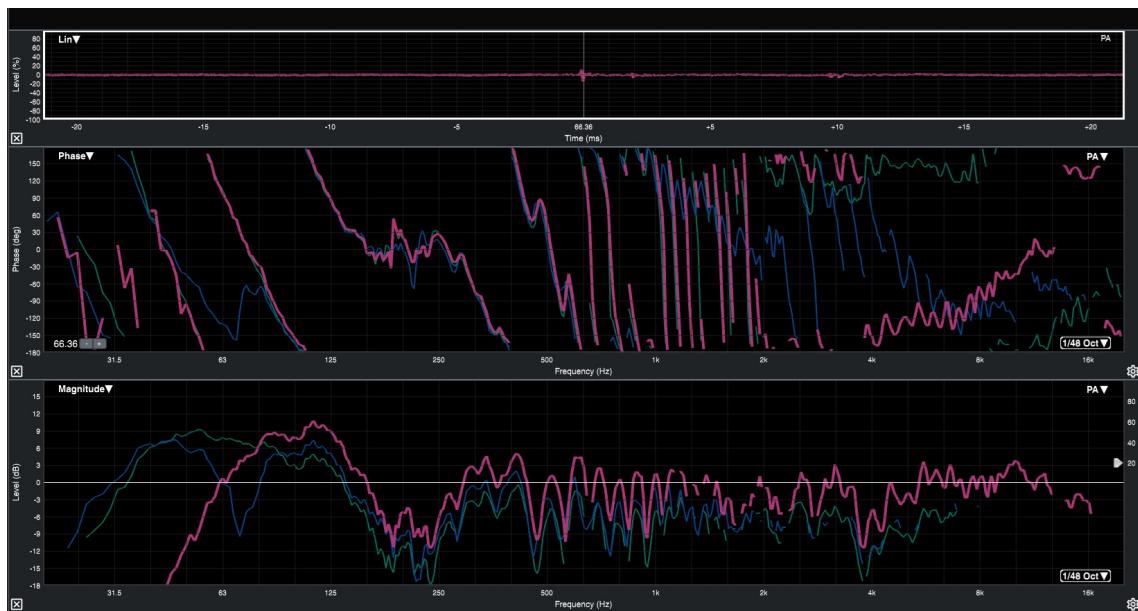
4.24. ábra. Focusrite RedNet PCIe kártya

Szoftveres oldalról a gépen egy speciális Windows 11 rendszer került telepítésre. A neve *Ghost Spectre Windows 11 Superlite SE*, amely egy teljesítmény és tárhely optimalizált Windows 11 verzió. A szakdolgozat írásakor elérhető legfrissebb stabil verzióját használtam fel, ami a 23H2-es 22631.3593 verziószámú. A rendszerben csak a legszükségesebb alap szoftverek vannak telepítve, és a többi alkalmazás, amely nem szükséges a rendszer működéséhez, törölve lett. A lehető legkevesebb erőforrást használja, miközben egy stabil és megbízható munkakörnyezetet biztosít. A frissítések automatikusan letiltásra kerültek, hogy a rendszer ne legyen kitéve a Windows frissítések által okozott esetleges hibáknak, valamint a világhálóra való csatlakozás is letiltásra került. Kizárolag külső adathordozókról lehet adatokat átvinni a rendszerbe. A számunkra szükséges drivereket és programokat kizárolag így tudjuk telepíteni a rendszerbe.

4.2.6. A rendszer mérése

A rendszermérések elkészítésére a Rational Acoustics által fejlesztett Smaart nevű szoftvert fogom használni, mivel az iparágban ez a legelterjedtebb és legmegbízhatóbb szoftver a mérések pontos elvégzésére. A szoftver legújabb verzióját fogom használni, ami az írás pillanatában a 'Smaart Suite 9.4.1' verzió. Első lépésként a számítógéphez csatlakoztatott hangkártyát kell konfigurálni, hogy el tudjunk kezdeni méréseket végezni. Jelen esetben a hangkártya maga a keverőpult, aminek az USB interfészére egy 32x32-es kapcsolatra képes a számítógéppel. A mérőmikrofon egy Behringer ECM8000 típusú mérőmikrofon lesz, ami XLR csatlakozóval kapcsolódik a keverőhöz, a mikrofon tápellátását a keverőpult biztosítja 48V fantomtáppal. Annak érdekében, hogy a mérés működőképes legyen, a mikrofont a keverőpulton be kell szintezni, minden processzálást kikapcsolni. A mikrofon kimenetét utána Direct Out móddal el kell küldeni az USB interfészre, ahol a Smaart szoftver fogja tudni a jelet feldolgozni. Ezen kívül egy másik bemenetre is szükség lesz a keverőpulton, ahol a Smaart szoftver a referencia jelet fogja küldeni, ezt szintén Direct Out módban vissza kell küldeni a számítógépre. Tehát a példa kedvéért még egyszer: Local Input 1: Behringer ECM8000 mérőmikrofon, majd Direct Out Output USB 1-re. USB Input 1: Smaart szoftver referencia jele, majd Direct Out Output USB 2-re.

Az első mérés amit végezni fogok a rendszeren a mélyláda rendszer mérése lesz. Az EndFire konfigurációban elhelyezett mélyláda rendszer mérése során a cél az, hogy maximalizáljuk a hangnyomást a közönség távolabbi részein is, miközben hátrafelé kioltást érünk el. Ezen felül fontos a rendszer nyitása is, ha túl keskeny sávban működik, akkor a középső területek hangnyomása túl magas lesz, a szélső területeken pedig túl alacsony. Tehát fel van adva a lecke, hogy a rendszer a lehetőségekhez mérten egyenletes hangnyomást biztosítson a teljes területen. Fontos, hogy a mérési környezet a lehetőségekhez mérten minél csendesebb legyen, valamint ne legyenek olyan tárgyak a nézőtéren, amelyek a rendszer elő működése közben nem lesznek jelen és mérés közben a mért hangot visszaverik. Ezzel minimalizálhatjuk a hibákat és a mérések pontatlanságát, valamint a mérés reprezentatívabb lesz. Mivel a mélyláda rendszer és a Main PA fizikai elhelyezkedésük miatt (A Main PA riggel van, míg a mélyládák a földön helyezkednek el) egy adott távolságra vannak egymástól, fontos, hogy a két rendszer fázishelyes és időhelyes legyen. Amennyiben a rendszer fázishelytelen, a rendszer elemei egymás ellen dolgoznak, kioltást okozva, és ezzel csökkentve a hangnyomást. Ezenkívül hiába van fázisban a rendszer, fontos, hogy a két rendszer időben is helyes legyen. Előfordulhat, hogy fázisban vagyunk de 180 fokkal el vagyunk tolva az egyik irányba, így a mélyek vagy késnek vagy előbb érnek a hallgatóhoz ezzel rongálva a hangképet. Aggodalomra azonban nincs ok, mivel megfelelő szakértelemmel és a megfelelő mérési eszközökkel ezek a problémák orvosolhatóak, ezzel biztosítva a kiváló hangminőséget a rendezvényen. Az alábbiakban a mérési eredmények láthatóak. Fontos megjegyezni, hogy a mérési eredmények csak a mérés helyszínén érvényesek, és a mérési körülményektől függően változhatnak. A reflexiók és a mérési bizonytalanság mennyisége infidecimális a mérési eredményben. Az ábrán a következőket láthatjuk különböző színekkel jelölve: - A kék szín a teljes rendszer viselkedése mérés nélkül. - A zöld szín a teljes rendszer viselkedése mérés után. - A magenta szín csak a main PA rendszer viselkedése.



4.25. ábra. SUB - TOP mérések

Az ábrán egyértelműen látható, hogy a rendszer mérése után a hangnyomás szintje jelentősen nőtt, a crossover frekvencia környékén 57-87 Hz között. A kék mérésnél egy óriási beesést láthatunk 70 Hz-nél, ami azt jelzi számunkra, hogy a rendszer nincs fázisban és időben. A korrekt időértékek beállítása után a zöld színű mérésnél egyértelműen látható, hogy a hangnyomás szintje jelentősen nőtt, és a 70 Hz-es beesés teljes mértékben eltűnt,

sőt a hangnyomás szintje a crossover frekvencia környékén jelentősen nőtt. Ez azt jelzi számunkra, hogy a rendszer fázishelyes és időben is helyes már, készen áll a produkcíóra.

4.2.7. A rendszer monitorozása

Az időzítési értékek megfelelő beállítása után a rendszer hangnyomásának monitorozása a fontos. A rendszer monitorozására a Smaart szoftverben található SPL monitor funkciót fogom használni. Ehhez szükséges egy kalibrált mikrofon, amelynek a kalibrációs értékeit a Smaart szoftverben be kell állítani. Ez általában egy 94 dB-es referencia hangnyomás szintet jelent 1 kHz-en, melyet egy mikrofon kalibrációs eszközzel tudunk elvégezni ami képes pontosan kiadni ezt a hangnyomás szintet. Így a mérési értékek pontosak lesznek, és a rendszer hangnyomás szintjét valósan tudjuk mérni. Többféle módszerrel lehet a hangnyomás szintet monitorozni, jelen esetben háromat választottam ki: - dB SPL C Slow => A frekvencia súlyozott hangnyomás szintet mutatja, a mikrofon érzékenységéhez igazítva. - dB SPL A Slow => A frekvencia súlyozott hangnyomás szintet mutatja, az emberi hallás érzékenységéhez igazítva. - dB Leq 1 => A hangnyomás szint átlagértékét mutatja 1 perces időtartamra.



4.26. ábra. SPL monitorozás a produkciók közben

5. fejezet

Üzemeltetési tapasztalatok és továbbfejlesztési lehetőségek

5.1. Üzemeltetési tapasztalatok

A megvalósított rendszer üzemeltetése a tervezett módon történt. A rendszer tökéletesen megfelelt a kitett elvárásoknak, és üzemeltetése során nem tapasztaltunk semmilyen rendellenességet. A teljesítménye és megbízhatósága is megfelelőnek bizonyult, nem voltak csomagvesztések a hálózaton, egyetlen egyszer sem kellett a másodlagos redundáns hálózatra váltani, nem fordultak elő kiugró késések, minden eszköz bőven a beállított buffer méretben belül maradt. minden komponens megfelelően végezte a rá bízott feladatot, és a rendszer stabilan kihagyás nélkül működött a teljes üzemiidő alatt.

5.2. Továbbfejlesztési lehetőségek

5.2.1. További eszközök integrálása

A Dante networking keresztrendszer lehetővé teszi a rendszer folyamatos bővítését a hálózati limitációk megfelelő kezelésével. A rendszer bővítésekor figyelembe kell venni a még rendelkezésre álló, a sávszélességet és a késleltetést mértékét. Amennyiben tarjuk magunkat ezekhez a paraméterekhez, a rendszer bővítése nem okozhat problémát, és megfelelő overhead mellett elméletileg a teljes hálózatot is szaturálhatjuk mindenféle probléma nélkül. A Martin Audio Wavefront sorozatú hangfalak skálázható felbontása lehetővé teszi, hogy a rendszer bővítésekor a már meglévő hangrendszerünket több végfokkal hajtva tovább növeljük a rendszer teljesítőképességét. A korábbiakban már említett felbontás növelés javítja a rendszer hangminőségét, frekvenciafelbontását és az adott területen való pontosabb hanglemezszintet. Ebből kifolyólag nagy fejlesztés lehet a jövőben a rendszer egy láncháttartásra való kibővítése. Ez azt jelenti, hogy az összes Line Array egységet külön-külön végfok csatornával hajtjuk meg. További fejlesztés a rendszerben a LineArray hangfalak számának növelése megfelelő számú végfok egységgel, amely tovább növeli a rendszer teljesítményét és a maximálisan lefedhető területet.

5.2.1.1. Shure Axient Digital rendszer

A Shure Axient Digital vezeték nélküli mikrofon rendszer a szakma egyik legjobb vezeték nélküli mikrofon rendszere. A rendszer kiváló hangminőséget, megbízhatóságot és rugalmasságot kínál, és a Dante hálózaton keresztül könnyen integrálható a már meglévő rendszerbe. A jelenlegi Shure ULXD vezeték nélküli mikrofon rendszerünk is kiváló minőségű, azonban sajnálatos módon csak 48 kHz-es mintavételezési frekvenciával

rendelkezik, míg az Axient Digital rendszer 96 kHz-es mintavételezési frekvenciával rendelkezik. Ezáltal a hangminőség jelentősen javulna a rendszerben, valamint így integrálhatóvá válna direkt módon a Dante hálózaton keresztül a keverőbe, így nem lenne szükség a hangot analóg jelekké alakítani, majd vissza. Ezáltal a hangminőség még kevésbé romlik. Mint ez eddig Dante eszközökkel, ezt is a Dante Controller segítségével könnyen konfigurálhatjuk, akár egy fixen kijelölt csatornában, amelyet a keverőpulton is könnyen beállíthatunk. Így mikor rendezvényre érkezünk, plug and play módon azonnal használhatjuk a mikrofonokat, nem kell a csatornákat újra össze párosítani. A Shure Wireless Workbench segítségével a mikrofonokat könnyen monitorozhatjuk, és a rendszer állapotát is ellenőrizhetjük távolról is. A rendszer bővítése jelentős költségekkel jár, így a bővítés előtt alaposan mérlegelni kell, hogy valóban szükséges-e.



5.1. ábra. Shure Axient Digital vezeték nélküli mikrofon rendszer

5.2.1.2. TASCAM multitrack recorder

Egy másik fejlesztési lehetőség a rendszerben egy multitrack recorder beszerzése. Ez a készülék lehetővé teszi a koncertek soksávos rögzítését, amelyeket később visszahallgathatunk, vagy akár további feldolgozásra is továbbíthatunk. A TASCAM DA-6400 egy 64 csatornás, 1U magas rackbe szerelhető multitrack recorder, amely Dante hálózaton keresztül képes a hangot fogadni és rögzíteni. A felvétel készítése során a hangot a Dante hálózaton keresztül kapja meg, így nem szükséges a hangot analóg jelekké alakítani, majd vissza. Ezáltal a hangminőség nem romlik a felvétel készítése során, és a felvétel készítése is egyszerűbb és gyorsabb lesz. A felvétel készítése után a felvételt a TASCAM DA-6400-ról egy USB meghajtóra menthetjük, majd további feldolgozásra továbbíthatjuk.



5.2. ábra. TASCAM DA-6400 multitrack recorder

5.2.1.3. Allen & Heath ME Personal Mixing System

5.2.1.4. Martin Audio WPL LineArray rendszer

Amennyiben egy sokkal nagyobb rendezvényről van szó, és a jelenlegi rendszerünk már nem tudná lefedni a területet, akkor a rendszer bővítése mellett egy nagyobb szériás

LineArray rendszer beszerzése is szükséges lehet. A Martin Audio WPL sorozatú lánckádai a jelenleg elérhető legnagyobb terméke a Wavefront Precision sorozatban. Ebben az esetben a fő rendszert a WPL képviselné és WPC lenne az in-out fill rendszer. A WPM szériás lánckák pedig delayként szolgálnának a terület hátsó részén. Viszont az említett teljes rendszerbővítésnek jelentős költségei vannak, így a rendszer bővítése előtt alaposan mérlegelni kell, megtérül-e a befektetés hosszabb távon.



5.3. ábra. Martin Audio WPL LineArray modul

5.2.2. Bővítés nagyobb interfészre és keverőpultra - Allen & Heath dLive

Tegyük fel, hogy egy szimfonikus zenekar koncertjét szeretnénk hangosítani, ahol a zenekar tagjainak száma meghaladja a 64 főt és mindenki dedikált mikrofonnal rendelkezik. Ebben az esetben a 64x64-es Dante interfész már nem elegendő, mivel a zenekar tagjainak száma meghaladja a csatornaszámot. Ebben az esetben a rendszer bővítésére van szükség. Így az Allen & Heath SQ sorozatú keverőpultjai már nem elegendők, mivel ezekbe a keverőkbe ez az interfész a maximális. Ebben az esetben egy nagyobb csatornaszámú keverőpultot kell választanunk, amelyek közül a az Avantis és a dLive sorozatú keverők jöhetnek szóba. Ezek a keverők már kaphatóak 128x128-as Dante interfésszel is, így megnövelve a csatornaszámot. Azonban ezek a keverők jelentősen magasabb árkategóriába tartoznak, mint az SQ sorozatú keverők, így a bővítés költsége is nagyobb lesz. A keverőpultok fejlesztése mellett szükséges további stageboxokat is beszerezni az igényelt csatornaszám eléréséhez.



5.4. ábra. Allen & Heath dLive S7000 keverőpult

Köszönetnyilvánítás

Szeretném őszinte hálámat és köszönetemet kifejezni belső konzulensemnek, Paál Dávidnak, aki a szakdolgozat megírásában nyújtott felbecsülhetetlen segítségével, szakértelmével és támogatásával végigkísért. Külső konzulensemnek, Tamás Dávidnak szintén mély hálával tartozom az általa munkámra szánt számos óráért, amelyeket gondos átnézésre, hasznos visszajelzések adására fordított, és hálás vagyok türelméért, valamint megértéséért. Valamint megtiszteltetés volt számomra, hogy ez a hangrendszer a szakdolgozatom keretein belül valósulhatott meg.

Köszönetet szeretnék mondani a TéDÉ Rendezvényeknél dolgozó kollégáimnak is, akik minden ötletemet, legyen az bármilyen különleges, támogatták, és segítettek azok megvalósításában. A közös munka eredménye önmagáért beszél a sok pozitív visszajelzés és sikeres rendezvény után.

A csapattal végzett munkából szerzett tapasztalatok és élmények értékes betekintést nyújtottak a mérnöki szakma gyakorlati oldalába. Rávilágítottak arra, hogy a valóságban gyakran más képp alakulnak a dolgok, mint ahogy azt a tervezés során elképzeljük. Megtanultam alkalmazkodni, gyorsan reagálni a változásokra és kihívásokra, valamint nagy hangsúlyt fektetni a csapatmunkára. Emellett lehetőséget kaptam arra is, hogy szakdolgozatomhoz releváns adatokat gyűjtsek és felhasználjak, továbbá a sok raktári workshop nélkül a dolgozat nem jöhetett volna létre. Támogatásuk és bátorításuk a projekt minden szakaszában rendkívül értékes volt.

Végezetül, de nem kevésbé fontos módon, szeretném megköszönni minden barátomnak és családtágnak a szakdolgozatom elkészítése során nyújtott állandó támogatásukat és bátorításukat. Értékes meglátásaik és építő jellegű visszajelzései kulcsszerepet játszottak a szakdolgozat sikerében. Hálás vagyok az irántam tanúsított kitartó támogatásukért és biztatásukért ezen az úton.



5.5. ábra. A szakdolgozat szerzője a megépített WPC Line Array mögött az adott rendezvényen

Ábrák jegyzéke

2.1. Pulse Code Modulation (PCM) folyamat [12]	6
3.1. Audinate Dante logó	10
3.2. A kapcsolati eltolás meghatározza a késleltetést [1]	11
3.3. Fáziskohärenz azonos kapcsolati eltolással [1]	12
3.4. Host A	16
3.5. Host B	16
3.6. Host C	16
3.7. Az OSI modell	17
3.8. Az Audinate logója	21
3.9. Kapcsolt mód	24
3.10. Redundáns mód	24
3.11. Dante órajel	25
3.12. Digital Snake és Pont-pont közötti (P2P) kapcsolatok	25
3.13. Dante hálózati megoldás	26
4.1. Martin Audio iK42 végfok	29
4.2. Martin Audio iK81 végfok	29
4.3. Példa hagyományos analóg kábelezésre [2]	30
4.4. Példa Dante digitális kábelezésre [2]	31
4.5. E-mail a Martin Audio vezető szoftvermérnökétől	32
4.6. Martin Audio WPC LineArray modul	32
4.7. Display 2.3.4 b1 kezdőképernyője (WPC)	33
4.8. Display 2.3.4 b1 fő kezelőfelülete (WPC)	33
4.9. Display 2.3.4 b1 „Slice” kezelőfelülete (WPC)	34
4.10. Display 2.3.4 b1 „Cover” kezelőfelülete (WPC)	35
4.11. Display 2.3.4 b1 „Splay” kezelőfelülete (WPC)	36
4.12. Display 2.3.4 b1 „Rig” kezelőfelülete (WPC)	37
4.13. Display 2.3.4 b1 „EQ” kezelőfelülete (WPC)	38
4.14. Display 2.3.4 b1 exportáló kezelőfelülete (WPC)	38
4.15. Martin Audio WPM LineArray modul	39
4.16. Display 2.3.4 b1 „Splay” kezelőfelülete (WPM)	40
4.17. VU-NET rendszer áttekintő diagram	41
4.18. VU-NET Dante routing	42
4.19. Dante eszközök IP címei a hálózaton	43
4.20. Martin Audio SX218 mélyláda	44
4.21. Allen & Heath SQ-6 digitális keverőpult	45
4.22. A&H SQ Dante kártya	45
4.23. A&H DT168 Dante stagebox	45
4.24. Focusrite RedNet PCIe kártya	46
4.25. SUB - TOP mérések	47
4.26. SPL monitorozás a produkciók közben	48

5.1. Shure Axient Digital vezeték nélküli mikrofon rendszer	50
5.2. TASCAM DA-6400 multitrack recorder	50
5.3. Martin Audio WPL LineArray modul	51
5.4. Allen & Heath dLive S7000 keverőpult	51
5.5. A szakdolgozat szerzője a megépített WPC Line Array mögött az adott rendezvényen	53

Táblázatok jegyzéke

3.1. Digital Snake és DigitalAVNetwork Jelút opciók	25
---	----

Irodalomjegyzék

- [1] Wolfgang Ahnert – Dirk Noy (szerk.): *Sound Reinforcement for Audio Engineers*. Abingdon, Oxon and New York, NY, 2023, Routledge, 12–842. p. ISBN 978-1-032-11518-4 (hbk).
- [2] Audinate: Application diagrams for dante systems.
URL https://my.audinate.com/sites/default/files/Live_Performance_Touring_Venue_Audio_System_Diagrams_Dante.pdf. Accessed on: 2024.02.25.
- [3] Audinate: Audinate history. URL <https://www.audinate.com/company/history>. Accessed on: 2024.09.11.
- [4] Martin Audio: *Display v2.3 USER GUIDE v1.5*. URL <https://martin-audio.com/downloads/userguides/Display-2.3-User-Guide-v1.5.pdf>. Accessed on: 2024.01.04.
- [5] Martin Audio: *iKON Amplifier User Guide*. URL <https://martin-audio.com/downloads/userguides/iKON-Amplifier-User%20Guide.pdf>. Accessed on: 2024.01.04.
- [6] Martin Audio: Subwoofer calculator.
URL <https://martin-audio.com/support/subwoofer-calculator>. Accessed on: 2024.01.08.
- [7] Martin Audio: *SX Subwoofer User Guide*. URL <https://martin-audio.com/downloads/userguides/SX-Subwoofer-User-Guide.pdf>. Accessed on: 2024.01.04.
- [8] Martin Audio: *VU-NET 2.2 User Guide v4.7*. URL <https://martin-audio.com/downloads/userguides/VU-NET%202.2%20User%20Guide%20v4.7.pdf>. Accessed on: 2024.01.04.
- [9] Martin Audio: *WPC User Guide*.
URL <https://martin-audio.com/downloads/userguides/WPC-User-Guide.pdf>. Accessed on: 2024.01.04.
- [10] Martin Audio: *WPM User Guide*.
URL <https://martin-audio.com/downloads/userguides/WPM-User-Guide.pdf>. Accessed on: 2024.01.04.
- [11] Allen & Heath: Sq series.
URL <https://www.allen-heath.com/hardware/sq>. Accessed on: 2024.01.08.
- [12] Shah Nurun Nabi: Pulse code modulation (pcm). URL <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=k7L52z-IQmQ>. Accessed on: 2024.09.16.
- [13] Merlijn van Veen: Calculators.
URL <https://www.merlijnvanveen.nl/en/calculators>. Accessed on: 2024.01.08.

Függelék