

1 APŽVALGA

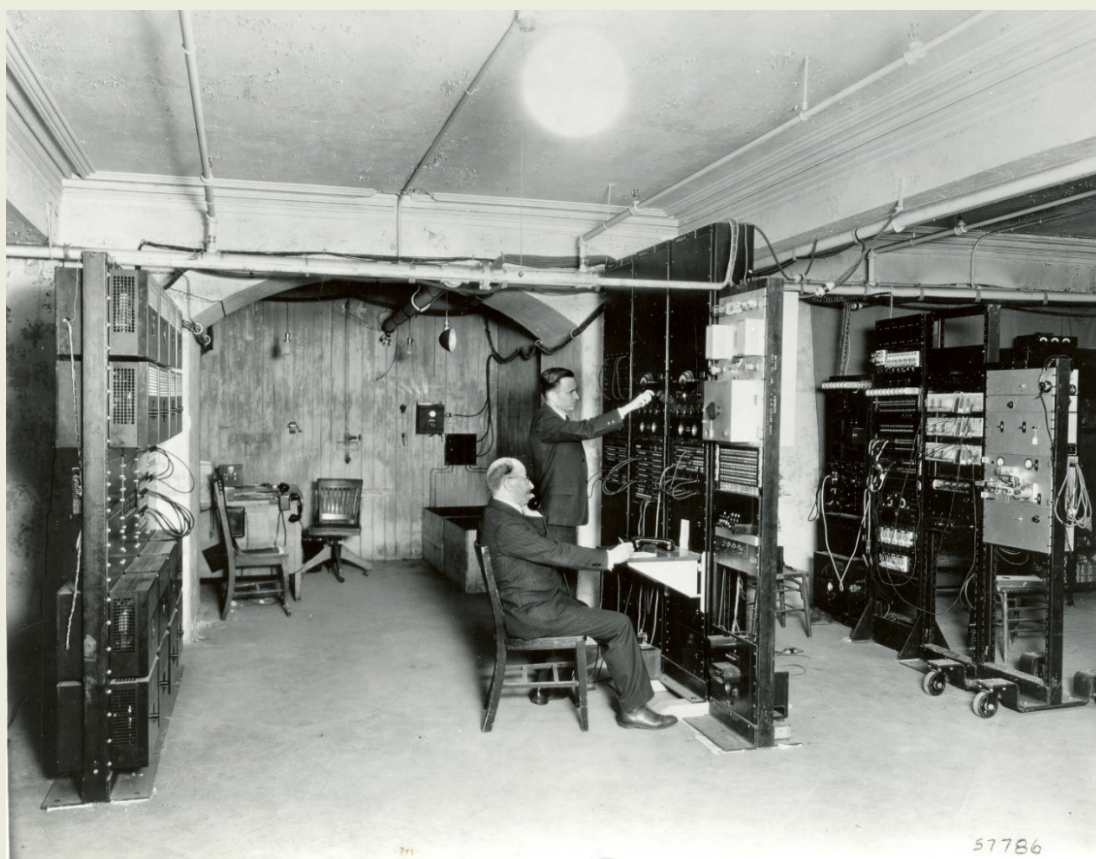
Muzikos perdavimas iš Filadelfijos į Vašingtoną 1933 metų eksperimento aprašymas, išvados ir rekomendacijos

ČESLOVAS PAPLAUSKAS

„CP AUDIO PROJECTS“,
Kaunas, 2016 m.

1933-iaisiais įvyko svarbus eksperimentas, kai simfoninio orkestro muzika buvo paimta Filadelfijos Mokslų akademijos salėje, laidais perduota į Vašingtoną ir atkurta taip, kad Vašingtono Konstitucijos salėje susirinkusiems klausytojams atrodė, jog už užuolaidos groja ne kolonėlės, bet tikras simfoninis orkestras. Tai buvo ir pirmasis erdvinio garso perdavimas, platesnio pritaikymo sulaukęs po penkių dešimtmečių.

Eksperimentas atsako į daugelį muzikos atkūrimo klausimų, todėl aktualus visiems kokybiškos muzikos mylėtojams.



Bell Labs inžinieriai derina aparatūrą Filadelfijos Muzikos Akademijos pusrūsyje, 1933 m.
(AT&T Archyvo ir Istorijos Centro nuotrauka) [3]

Kokybiškai muziką perduoti dideliu atstumu pavyko tik tada, kai koncertų salėje buvo tinkamai suformuoti atskiri garso signalai, perdavimo linijoje atsiradę nuostoliai buvo atitinkamai kompensuojami, o atkūrimo salėje aparatūra suderinta taip, kad nebūtų iškreiptas dažninis, amplitudinis ir fazinis signalų pasiskirstymas. Tik tada klausytojai girdi tokį patį kaip grojančio orkestro garsą ir būna perteiktas instrumentų erdvinis tarpusavio išsidėstymas. Kiekvienas kanalas turėjo mikrofoną, stiprintuvą, perdavimo liniją ir atkūrimo įrangą.

Ką turėjo žinoti mokslininkai, kokius įrenginius sukonstruoti inžinieriai, kad iš Filadelfijos simfoninė muzika nukeliautų 23 mylias į tarpinę stotį Holly Oak vietovėje, iš ten dar 26 mi iki Elktono, 26 mi į Abingdon, 25 mi iki Baltimore, 20 mi iki Laurel ir paskutiniąsias 17 mylių iki Vašingtono Konstitucijos salėje esančių klausytojų?

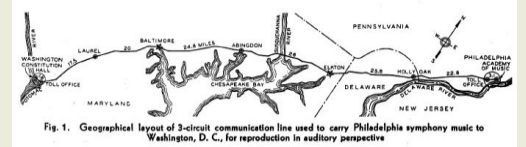


Fig. 1. Geographical layout of 3-circuit communication line used to carry Philadelphia symphony music to Washington, D. C., for reproduction in auditory perspective

Vašingtono Konstitucijos salė, kur buvo susirinkę muzikos klausytojai ir ekspertai anais laikais atrodė kaip paveikslėlyje dešinėje, o salės išorės vaizdas iki šiol nepakeitęs.



H. Fletcher padeda dirigentui L. Stokowski sureguliuoti kanalų lygius [5]

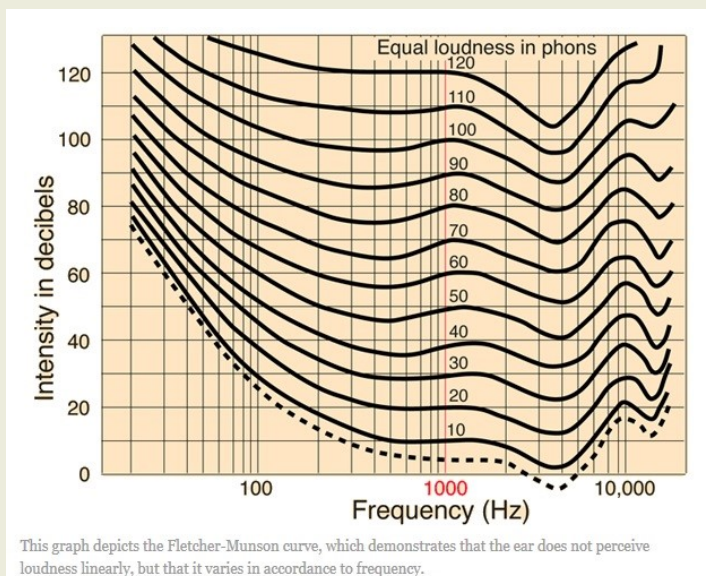
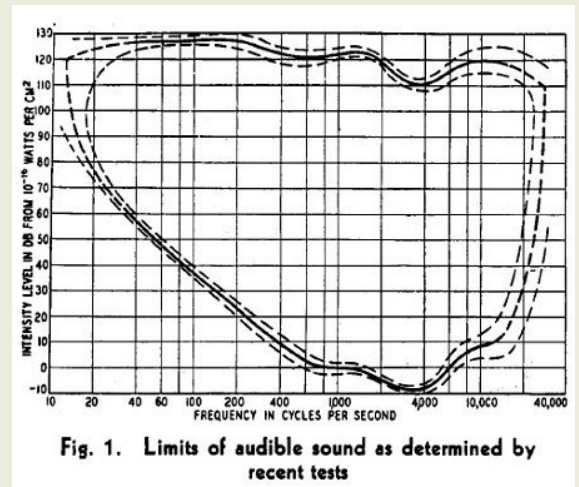
Dar prieš eksperimentą buvo suformuluoti teoriniai reikalavimai, o 1934-aisiais eksperimentas aprašytas šešiuose dokumentuose.

Apžvelkime šį labai įdomų eksperimentą, parodantį mokslo svarbą ir galimybes kokybiškai atkurti muziką.

Pirmajame dokumente **Audio Perspective-Basic Requirements** [1], kurio autorius H. Fletcher iš Bell Tel. Labs, aprašomi bendrieji reikalavimai, paaiškinama, kodėl per radiją girdima muzika labai tolima nuo tikrosios. Taip pat apžvelgiami abiejų salių ypatumai, eksperimente naudojamų mikrofonų išdėstymas, o taip pat reikalavimai perdavimo linijoms. Įdomu tai, kad eksperimente buvo naudojamos paprasčiausios laidinio telefoninio ryšio linijos.

Grafike Fig.1 matome 1933-iaisiais ištirtą klausos ribų priklausomybę nuo intensyvumo. Didžiausias muzikos garso intensyvumas yra 200-1000 Hz dažnių ruože, ten mes galime girdėti maždaug 100 dB garsumo diapazoną, o kai didelis orkestras groja įprasto dydžio koncertų salėje, garsas paprastai apima 70 dB dinaminį diapazoną. Norint išnaudoti visas klausos savybes, muzikos perdavimo sistemos dinaminis diapazonas turi būti apie 20 dB didesnis.

Anais 1933-iaisiais mokslininkų sudarytos žmogaus klausos jautrio kreivės yra svarbus atradimas, kuriuo iki šiol mes naudojames.



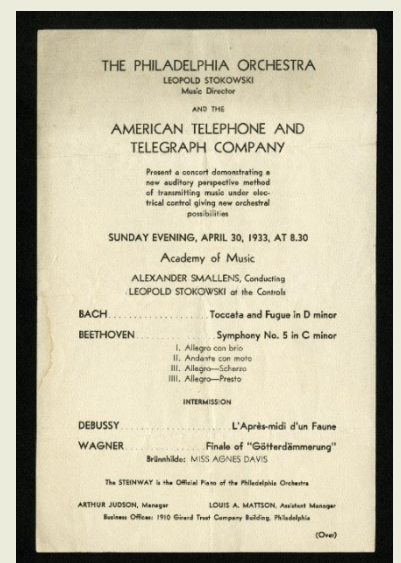
Fletcher-Munson klausos jautrio kreivės [5]

Dokumento pabaigoje rašoma, kad eksperimento dalyviams muzikos atkūrimo klausymas paliko didesnę emocinę išpūdį negu tikras simfoninio orkestro koncertas. Filadelfijos archyvų tyrinėtojas-istorikas McCarthy savo apžvalgoje [2] rašo, kad Filadelfijos salėje muziką klausė 300 pakviestų klausytojų, o Vašingtono salėje buvo apie 4500 klausytojų, muzikos žinovų ir žymių mokslo atstovų.

Balandžio 27-osios koncertas sulaukė didžiulio pasisekimo meniškumo, o taip pat garso perdavimo technologijos prasme, buvo plačiai aprašomas spaudoje. Aeronautikos ir radijo pionierius George Squier išsiuntė telegramą AT&T prezidentui Walter Gifford, pareikšdamas, kad "vakarykštis Stokowski koncertas... Konstitucijos salėje atvertė naują meno eros puslapį."

Akustikos inžinieriai kartu su Filadelfijos orkestru ir L. Stokowski toliau tęsė darbus visą ketvirtąją dešimtmetį, o dešimtmečio pabaigoje buvo atliekami stereo garso panaudojimo kine eksperimentai.

Eksperimentas pirmą kartą buvo atliktas 1933-ųjų balandžio 27 d. vakarą, jį globojo ir prižiūrėjo JAV Nacionalinė Mokslo Akademija. Vašingtono salėje garsumą reguliavo Filadelfijos orkestro vadovas [Dr. L. Stokowski](#), o Filadelfijoje grojančiam orkestrui dirigavo [A. Smallens](#). Simfoninį orkestrą "klausė" 3 mikrofonai, esantys 6 m atstume nuo orkestro, iš kurių du buvo pastatyti kraštuose, vienas centre, o visi 3 m aukštyje virš pirmosios instrumentų eilės. Muziką atkūrė trys dviejų dažnių juostų ruponinės kolonėlės, pastatytos Vašingtono salės scenoje už užuolaidos.



Antrajame dokumente **Auditory Perspective-Physical Factors** [1], kurį paruošė J.C. Steinberg ir W.B. Snow - abu taip pat iš Bell Tel. Labs., analizuojamos erdvinio muzikos perdavimo problemos. Nustatyta, kad nebūtina naudoti be galo daug mikrofonų, perdavimo linijų ir garsiakalbių, o pakankamai gerą erdvinio garso signalą galima suformuoti dviem arba trimis mikrofonais, su tiek pat linijų ir garsiakalbių, sustatytų mikrofonų pozicijose. Dokumente pateikti eksperimentų rezultatai, parodantys tikrąjį ir girdimą instrumentų išsidėstymą. Taip pat garsumo pokyčio priklausomybė nuo spinduliuotuvo horizontaliosios padėties bei nuo atstumo iki klausytojo. Nustatyti pagrindiniai ir mažiau svarbūs akustiniai faktoriai pilnos muzikinės scenos perdavimui, daroma išvada, kad 3 kanalų sistema turi kokybinių privalumų prieš 2-kanalę stereo sistemą.

Grafike Fig.5 matome apskaičiuotus girdimo garso sklaidimo kampus (lokalizaciją) dviejų ir trijų kanalų audio sistemose. Trikanalė sistema tiesiškesnė, bet ir dvikanalė gali gerai perteikti sceną. Tiesa, pastaroji prasčiau perteikia scenos centrinę dalį - gal todėl retai sutiksi stereo sistemą, kurioje garsas nebūtų *prilipęs* prie kolonėlių, kad solistas būtų girdimas raiškiai ir kad garsas būtų gerai sufokusuotas scenos viduryje?

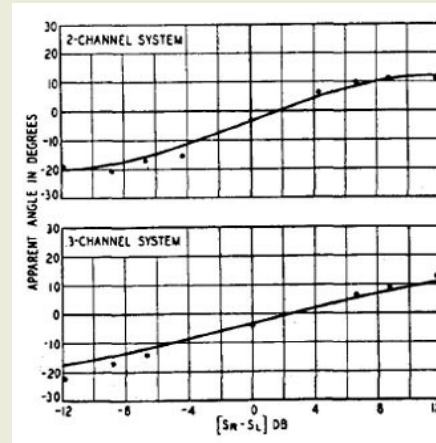
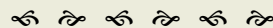


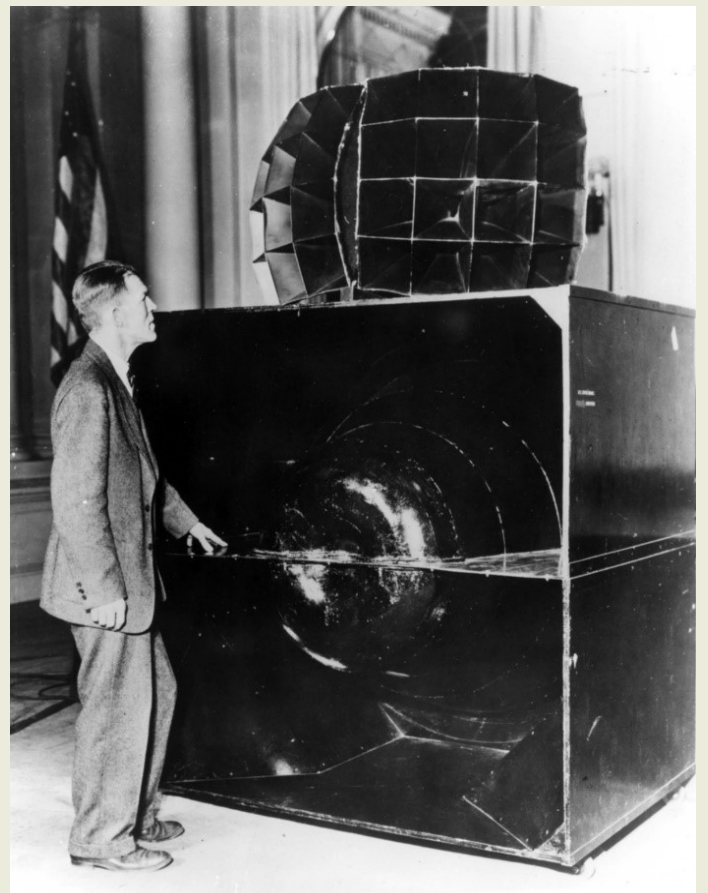
Fig. 5. Calculated and observed apparent angles for 2- and 3-channel reproduction



Trečiajame dokumente - **Loud Speakers and Microphones** [1] kalbama apie garsiakalbius ir mikrofonus. Šis dokumentas, kurį paruošė Amerikos Akustikos Asociacijos nariai E.C. Wente ir A.L. Thuras iš Bell Telephone Laboratory bene įdomiausias, nes jame atsakoma į labiausiai mus dominančius klausimus.

Trumpai stabtelkime.

Norint perteikti muzikos „emocingumą“, kai klausytojai nemato pačių muzikantų, garsas ypatingai kokybiškai turi paverstas elektriniais signalais, perduotas reikiamu atstumu ir kokybiškai ištransliuotas klausytojų salėje. Buvo ištirta, kad muzika apima visą žmogaus klausos diapazoną, tačiau klausia nepajėgi pastebėti kokybės tam tikrų degradacijų kai jos yra žemiausiųjų, o taip pat aukščiausiųjų dažnių ruožuose. Atlikti matavimai parodė, kad norint labai kokybiškai perduoti bet kokio instrumento garą, dažninė turi prasidėti maždaug nuo 40 Hz ir tęstis iki maždaug 13 kHz. Taip pat buvo nustatytas instrumentų dažnių spektras, užtikrinantis pilną instrumentų garso perdavimą. Kadangi garso kolonėlių ruporiniuose moduluose buvo naudojami dideli WE 555 kompresiniai draiveriai su krentančia dažnine, buvo nuspręsta parinkti dinامينius mikrofonus su atitinkamai kylančia dažnine. Mikrofonų dažninės pakilimas AD ruože kompensavo ruporinio modulio dažninės kritimą ir bendroji dažninė išsilygino.



Eksperimente naudota dvijuostė ruporinė garso kolonėlė.

Toliau dokumente rašoma, kad garso sistemose gali būti naudojami du pagrindiniai garsiakalbių tipai – tiesioginio spinduliavimo ir ruporiniai. Kiekvienas jų turi privalumų, bet Filadelfija-Vašingtonas eksperimente buvo pasirinkti ruporiniai: šie turi didesnę efektyvumą plačiame dažnių ruože, be to ruporais galima užtikrinti reikiamą spinduliavimo kryptingumą.

Apie kolonėlių žemųjų dažnių ruporą ir garsiakalbį.

Kadangi žemuosius dažnius (ŽD) gali atkurti tik labai dideli ruporai, ŽD moduliuose buvo nuspręsta naudoti kompaktiškesnius „sulankstytuosius“. Tokie blogiau atkuria aukštuosius ŽD ruožo dažnius, todėl buvo pasirinktas atitinkamai žemesnis dvijuosčių kolonėlių skyrimo dažnis – 300 Hz. ŽD ruporas ir garsiakalbis buvo suprojektuoti taip, kad šio modulio dažninės charakteristikos netolygumas neviršytų 1 dB. Ruporų konstrukcija ir pastatymo vieta buvo parinkta taip, kad ŽD ruporai atkurtų dažnius nuo 40 Hz. Vašingtono Konstitucijos salės scenoje ant grindų buvo padėtos 3 kolonėlės su 25 kv. pėdų (2,32 kv. m) burnos ploto ruporais ir tai buvo svarbi sąlyga žemesiems dažniams atkurti.

Nustatyta, kad orkestro dinamikai perduoti su mažais iškraipymais ruporinio ŽD modulio galia turi būti 25 vatai. Tada membranos eiga bus 1,524 mm, o modulio efektyvumas 35 – 400 Hz ruože bus maždaug 70 % (jautris >110 dB) su ne didesniu, kaip 1 dB dažninės netolygumu.

Atkuriamos muzikos dinamikos atsargai užtikrinti reikėjo naudoti 3 kartus galingesnius stiprintuvus, negu buvo nustatytas galios pasiskirstymas atitinkamame muzikos signalo dažnių ruože (Fig.1 paveikslėlis dešinėje). Vertinant reikalingą galios atsargą, kiekviename garso kanale buvo naudojami 135 W galios stiprintuvai.

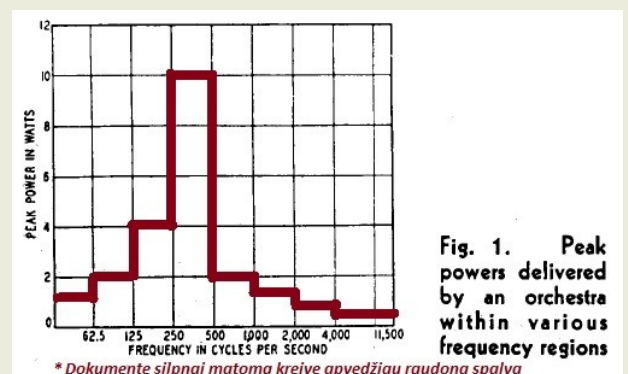
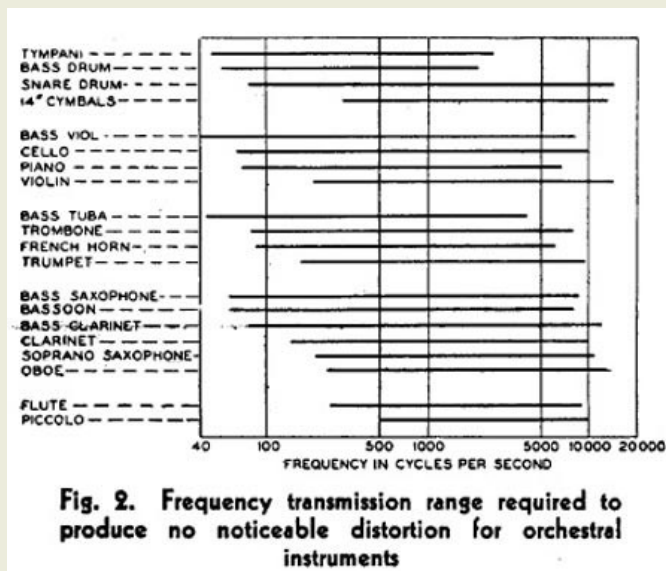


Fig. 1. Peak powers delivered by an orchestra within various frequency regions



Dokumente taip pat pateikti muzikos instrumentų spektrai (Fig.2 paveikslėlis kairėje).

Aptariamo dokumento pirmosios pastraipos pabaigoje paminėta kolonėlių sklaidos svarba – „nežiūrint į tai, kad galimi įvairūs dažninės koregavimai, **kokybiškiausią muzikos atkūrimą galima užtikrinti tik pasiekus tolygų garso spinduliavimą, o spinduliavimo kampas turi būti vienodas visuose dažniuose**“.

Apie aukštųjų dažnių modulį ir garsiakalbį (draiverį).

Įprastų ruporų kryptingumas priklauso nuo dažnio, o pačiuose aukščiausiuose dažniuose, kur garso banga pasidaro mažesnė už ruporo gerklę, ruporas garsą spinduliuoja labai siauru kampu. Norint pagerinti spinduliuojamos bangos sferiškumą, padidinti AD dažnių spinduliavimo kampą, buvo pasirinkti multiceliniai ruporai, sudaryti iš atskirų eksponentinių spinduliuotuvų. Sukonstruoto multicelinio ruporo spinduliavimo kampas horizontalioje ir vertikalioje plokštumose buvo 60°, kiekvienoje kolonėlėje buvo naudojami 2 tokie ruporai su atskirais draiveriais. Tuomet bendroji ruporinio AD modulio perdengimo zona tapo didesnė – 120 x 60°. Muzikos atkūrimui naudojant 3 kolonėles, pavyko kokybiškai įgarsinti didesniąją Vašingtono salėje sėdimų vietų kiekį.

Kadangi aukštųjų dažnių ruože bangos yra trumpesnės, žymiai lengviau sukonstruoti labai kokybišką AD modulį, kurio spinduliuojamų bangų netolygumas būtų labai nedidelis. Norint išvengti į ruporą patenkančių signalų skirtingomis fazėmis, išvengti efektyvumo sumažėjimo, buvo imtasi specialių priemonių – buvo panaudotas fazinis adapteris. Tada membranos generuojamas garsas suskaidomas į kelis fragmentus ir atskirais kanalais paduodamas į ruporą. Fazinio adapterio akustiniai kanalai parinkti taip, kad garso signalų amplitudės ir fazės pasiskirstymas ruporo gerklėje sudarytų plokščią bangą.

Nuotraukoje dešinėje *Western Electric 555 type receiver* kompresinis garsiakalbis, sukurtas prieš 85 metus ir turintis elektromagnetą, aliuminio membraną bei fazinį adapterį – tiesiog tobula konstrukcija, kurią išlaikė ir šiuolaikiniai kompresiniai draiveriai!

Paveikslėlyje *Fig.8* apačioje AD draiverio WE 555 dažninė, išmatuota mažame kambaryje.

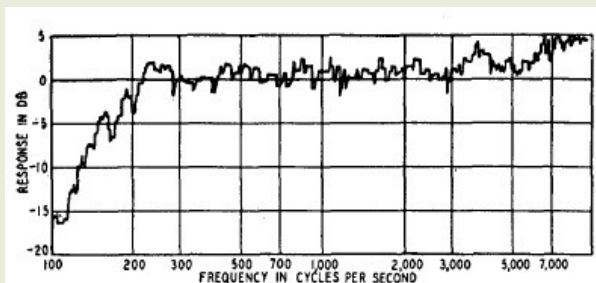


Fig. 8. Output-frequency characteristic of high frequency receiver as measured in a small room

Dėl skirtingos oro absorbcijos žemųjų ir aukštųjų dažnių ruožuose AS dažninė priklauso nuo klausymo atstumo.

Fig. 9. Output-frequency characteristic of combined low and high frequency receivers as measured in a large room

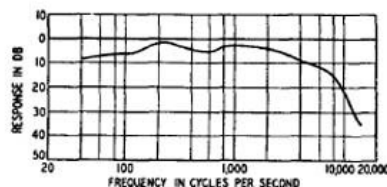
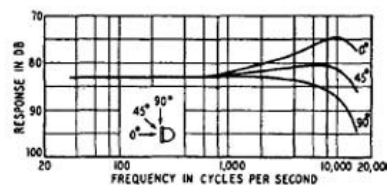


Fig. 10. Output-frequency characteristic of moving coil microphone

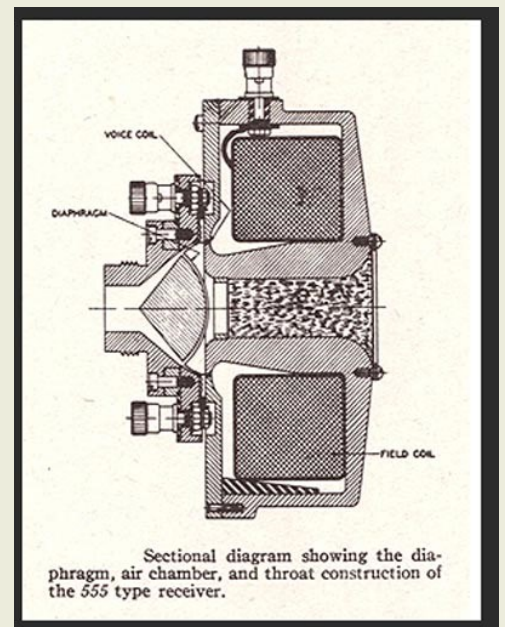


Norėčiau trumpai pristatyti kitus šio dokumento autorių darbus.

Western Electric dirbęs E.C. Wente 1916 m. išrado kondensatorinį mikrofoną. Metais vėliau jis aprašė patobulintą mikrofoną, kurio dažninė buvo praplėsta iki 15 kHz. Prisiminkime, kad tų laikų 78 RPM šelako plokštelėse buvo įrašomas garsas tik iki maždaug 3 kHz.

Dirbdamas *Bell Telephone Laboratories* kartu su inžinieriumi A.L. Thuras 1926 m. E.C. Wente sukūrė ypatingai svarbų įrenginį – specialiai ruporams pritaikytą „555W“ kompresinį akustinį keitiklį-draiverį. Šiuolaikiniai kompresiniai draiveriai yra labai panašūs būtent į šį "WE 555".

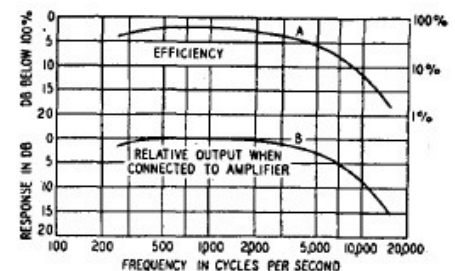
E.C. Wentei buvo išduoti 36 patentai, jis dirbo įvairiose srityse – dinaminių mikrofonų, optinių lempų kinui, beaidžių kamerų, akustinių medžiagų ir kitose. Už darbus multicelinių ruporų srityje mokslininkas 1936 m. buvo apdovanotas *Mokslo ir Inžinerijos Akademijos* premija.



Sectional diagram showing the diaphragm, air chamber, and throat construction of the 555 type receiver.

Teorinė AD draiverio dažninė forma *Fig.7* paveikslėlyje žemiau. Grafiko apačioje bendroji dažninė kartu su galios stiprintuvu.

Fig. 7. Relative computed sound output of high frequency receiver



Taip pat nuo kambario dydžio, nes kinta tiesioginių ir atspindėtų bangų santykis.

JAV mokslininkai ištyrė dažninės priklausomybę nuo kambario dydžio: viršutiniame grafike *Fig.9* (paveikslėlis kairėje) matome išmatuotos dažinės pasikeitimą, kai kambario dydis nebe 142 kub. m. o 2800 kub. m. dydžio salė. Apatiniame paveikslėlyje *Fig. 10* matome eksperimente panaudotų dinaminių mikrofonų dažninę, išmatuotą skirtingais kampais. Mikrofonai buvo parinkti taip, kad bendroji GAS dažninė prasiplėstų iki ~13 kHz.

Ketvirtąjį dokumentą **Auditory Perspective - Amplifiers** simpoziumui parengė E.O. Scriven (Bell Labs, 1933). Jame rašoma, kad lempiniai stiprintuvai yra išsamiai ištirti, tarpkontinentinio ryšio linijose stiprintuvai pradėti naudoti dar anksčiau, maždaug prieš 20 metų. Anais laikais tūkstančiai stiprintuvų taip pat buvo naudojami kine, įgarsinimo sistemose ir milijonuose radijo imtuvų.

Kokybiškam muzikos signalo sustiprinimui buvo reikalingi stiprintuvai su platesne dažnių juosta ir su labai mažais iškraipymais. Sukonstruoti stiprintuvus, galinčius kokybiškai sustiprinti silpną mikrofonų signalą taip kokybiškai, kad garsas tikų Filadelfijos simfoninio orkestro vadovo reikiams ausims, 1933-iaisias buvo didelis iššūkis.

Stabtelkime ir čia.

Dokumente Dr. H. Fletcher atskleidė, kad eliminavus signalą, kurio dažnis žemiau 40 Hz, o taip pat virš 15 kHz, simfoninės muzikos kokybė nenukenčia. Buvo suformuluotas reikalavimas stiprinamų dažnių spektrui, nustatyta, kad įrenginio stiprinimas turi būti vienodas visame dažnių diapazone, stiprintuve neturi atsirasti kažkokie nauji signalai. Ir dar - stiprintuvai turi sustiprinti silpniausius mikrofonų signalus be girdimų triukšmų išėjimuose. H. Fletcher nustatė santykį tarp garsiausios ir silpniausios orkestro muzikos ir tas santykis yra 10.000.000 prie 1, arba 70 dB. Reiškia, stiprintuvo triukšmai turi būti ne didesni, kaip -75 dB garsiausio signalo atžvilgiu. Garsumo reguliavimo diapazonas tuomet bus toks pat - 75 dB.

Užduotį palengvino jautrūs mikrofonai ir didelio jautrio garsiakalbiai, tačiau didelė problema buvo išėjimo transformatoriai: vieno Henrio induktyvumo transformatoriaus ritės varža 40 Hz dažnyje yra 250 Omų, o 15 kHz dažnyje varža išauga iki 100 kOmų. AD ruože taip pat pradeda reikštis lempos valdomojo tinklelio reaktyvumas, įtakos turi įėjimo transformatorių transformacijos koeficientas. Lempinių stiprintuvų fonavimas taip pat yra sunkiai įveikiama problema. Gerai subalansuotuose dvitaktiuose stiprintuvuose fonavimas teoriškai turi kompensuotis, bet praktiškai kompensuojasi tik iš dalies. Bendrųjų triukšmų sumažinimui buvo nuspręsta naudoti po du lygiagrečiai sujungtus dvitaktius galios stiprintuvus ir tokiu būdu užduotis buvo įvykdyta.

Lempų nėra linijskas stiprinimo įrenginys, todėl neišvengiami iškraipymai. Kruopščiai suderinus stiprintuvų darbo režimą ir atitinkamai sukonstravus transformatorius, pavyko pasiekti reikiamą linijskumą (~1 % iškraipymų lygį).

Schemoje dešinėje matome visą stiprinimo traktą:

- A1 yra +30 dB įtampos stiprinimo kaskadas su įėjimo transformatoriumi ir WE 262A lempa;
- A2 turi du stiprinimo kaskadus ir +50 dB bendrąjį stiprinimą. Pirmasis kaskadas vientaktis su WE 272A, o antrasis dvitaktis su WE 272A lempomis;
- išėjimo kaskadas A3 dvitaktis, bet čia dirba du analogiškai, lygiagrečiai sujungti galios stiprintuvai (WE 242A lempos, 4 vnt.). Maksimali išėjimo galia - 120 W.

Amplitudiniams iškraipymams, o taip pat kolonėlių tembro kompensavimui buvo naudojami išlygintojai. Garso kontrolė buvo atliekama ir Filadelfijoje, todėl schemoje matome viršutinę papildomų stiprintuvų grandinę. Bendras šios grandinės stiprinimas yra 160 dB. Nukeliavęs iki Vašingtono signalas buvo nusilpęs, todėl atkūrimo grandyno stiprinimas buvo atitinkamai didesnis - 240 dB.

Buvo minėta, kad mikrofono ir stiprintuvų išėjimuose signalų amplitudžių santykis buvo nuo 80 iki 90 dB, o maksimali pikinė visų 3 stiprintuvų galia - 720 W. Muzikos atkūrimo salėje Vašingtone buvo sumontuoti 4 stiprintuvai, kurių vienas buvo atsarginis.

Nuotraukoje Fig.2 kairėje dalis Filadelfijoje sumontuotų stiprintuvų.

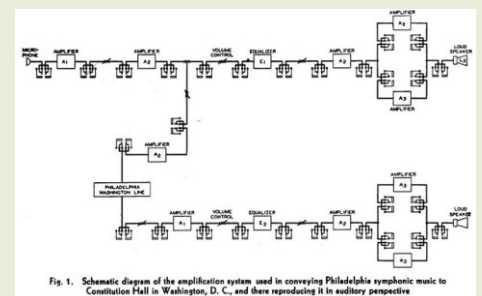


Fig. 1. Schematic diagram of the amplification system used in conveying Philadelphia symphonic music to Constitution Hall in Washington, D. C., and there reproducing it in auditory perspective

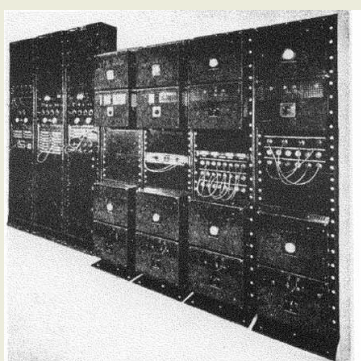
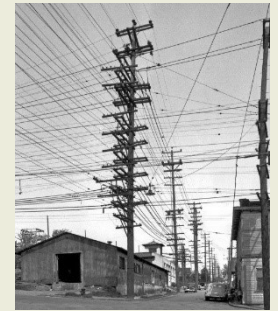


Fig. 2. Amplifying equipment used at Philadelphia. The taller racks are 8 ft high and contain A₁ and A₂ amplifiers, volume indicators, and various controls

Penktajame dokumente apibūdinamos signalo perdavimo linijos. **Auditory Perspective - Transmission Lines** paruošė H.A. Affel iš ATT, R.W. Chesnut ir R.H. Mills, abu iš Bell Tel. Labs. Visi jie taip pat buvusios A.I.E.E. (Amerikos Elektros Inžinierių Asociacijos) nariai. Anotacijoje sakoma, kad aukštos kokybės garsa galima perduoti labai dideliu atstumu. Kokybės praradimo atstatymui linijoje tarp Filadelfijos ir Vašingtono buvo naudojamos atitinkamos techninės priemonės ir visos audio sistemos sureguliuavimo būdai.

Skaitytojams noriu priminti, kad kalbame apie tai, jog eksperimente buvo naudojamos laidinio telefono oro linijos, kurias nuo 1877-ųjų JAV naudojo būtent [Bell Telephone Company](#). Dažniausiai tai buvo vario, kartais aliuminio arba net variuoto plieno laidai, sukabinti ant telefono stulpų simetrinėmis poromis maždaug 25 cm atstumu. Aptariamuoju laikotarpiu JAV jau veikė Automatinės Telefono Stotys (ATS), analogiškos telefono linijos veikė ir pas mus LTSR iki maždaug XX a. 7-ojo dešimtmečio.

Nuotraukoje dešinėje telefono linijos JAV, 1952 m.



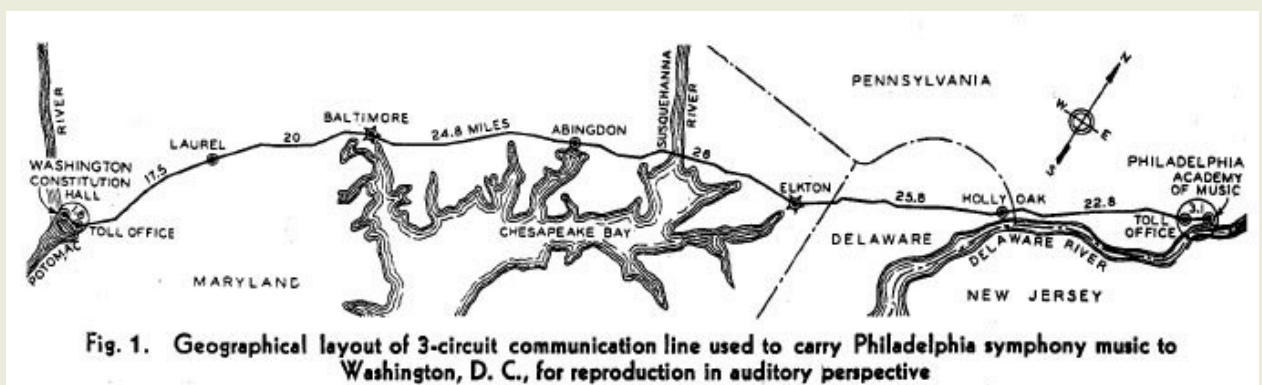
Mikrofonus ir kolonėles apžvelgėme, bet kaip muzikos signalą perduoti 100 ar 200 mylių taip, kad kitame gale klausytojai vėl išgirstų muziką, lyg ją klausytų 100-200 pėdų atstumu nuo orkestro?

Ilgoje linijoje atsiranda amplitudiniai-dažniniai iškraipymai. Taip pat fazės pokyčiai ir signalo vėlinimas. Kokybiško garso atkūrimo sąlyga paprasta - muziką turime paversti elektriniais signalais ir juos perduoti taip, kad amplitudinis, dažninis ir fazinis išsidėstymas būtų toks pat, koks buvo koncertų salėje. Taip pat signalo amplitudė turi būtų pakankamai didelė, triukšmai ir tinklo fonas neviršytų nustatytą ribą, o prasiskverbimas tarp visų 3 kanalų būtų minimalus. Tie dalykai buvo svarbūs ir telefono ryšiui, bet sudėtingas simfoninės muzikos signalas reikalavimus perdavimo linijoms sugriežtino. Netgi labiau, negu reikalavimai tuometiniam radijui: telefoniniams pokalbiams buvo naudojama 200 - 3000 Hz dažnių juosta, AM radijui - 100 - 5000 Hz, o aukštos kokybės muzikai perduoti buvo reikalinga maždaug 40 - 15000 Hz dažnių juosta. Ir dar - radijas retai kada transliuodavo didesnę kaip 30 dB dinaminę diapazoną, o simfoninei muzikai buvo reikalingas ne mažesnis kaip 65 dB diapazonas. Kitaip sakant, perduodamų galių santykis turi būti ne mažesnis kaip 3 milijonai.

Buvo pasirinktas moduliuto signalo perdavimo būdas, kai 40-15000 Hz mikrofonų signalas telefono linijomis keliavo kartu su nešančiuoju 25-40 kHz dažnio signalu. Moduluotas aukšto dažnio signalas keliavo trimis telefono linijomis, o kas 25 mylios buvo sumontuoti kartotuvai nuostoliams kompensuoti. Galiniame taške - Vašingtono telefono stotyje buvo sumontuotas demoduliatorius, signalus atstatantis į pirminę būseną. Paskutines 3 mylias nuo telefono stoties iki Konstitucijos salės, kur sėdėjo klausytojai, nemoduliuoti garso signalai keliavo paprastais nedidelio skerspjūvio laidais.

Signalu moduliavimas buvo pasirinktas dar ir dėl to, kad tai leidžia viena laidų pora perduoti kelis atskirus signalus. Pagrindinis moduliuto signalo privalumas prieš nemoduliuotą buvo tai, kad tokiu būdu pavyko išvengti kitų greta keliaujančių signalų įtakos muzikinio signalo kokybei. Šis eksperimentas buvo svarbus, nes buvo manoma, kad ateityje tokiu būdu muziką būtų galima transliuoti visoje Amerikoje - anuomet JAV turėjo platų telefono linijų tinklą!

Schemoje Fig.1 žemiau pavaizduota signalų perdavimo trasa. Kadangi buvo naudojamas aukštesnis negu telefonijoje muzikos signalo nešantysis dažnis, signalu kartotuvai turėjo būti ne kas 50 mylių, o mažesniu atstumu. Todėl tarpiniuose punktuose (Elktone ir Baltimorėje) buvo sumontuoti papildomi kartotuvai.



Signalų slopinimas priklauso nuo dažnio. Dažniui didėjant, slopinimas irgi didėja, o aukščiausiam dažniui jis siekdavo 50 dB. Tokia dažninė slopinimo priklausomybė reikalavo naudoti išlygintojus, turinčius atvirkštinę slopinimo kreivės priklausomybę.

Diagramoje Fig.3 dešinėje perdavimo linijos signalų lygiai tarpinėse stotyse.

Dokumente aprašytos kitos iškilusios problemos: Baltimorės telefonų stotyje esantys komutacinių relių triukšmai, taip pat maitinimo filtravimo problemos, kai signalo spektras prasideda ne 100, o 40 Hz dažniais. Buvo nuspręsta panaudoti selektyvius kvarcinius filtrus, o likutinius signalus filtravo filtrai su specialiomis fazinėmis charakteristikomis. Moduliatorių vaidmenį atliko nesudėtingos konstrukcijos vario oksido diskai-diodai.

Dabar žinome, kad tais tolimalais 1933-iaisiais visos problemos buvo sėkmingai išsistos ir surasti būdai jas išspręsti.

Tarpinėse stotyse įrengtu kartotuvų schema paveikslėlyje Fig.8 dešinėje. Stabilumui padidinti ir iškraipymams sumažinti stiprintuvuose buvo naudojamas neigiamas grįžtamasis ryšys. Nuostolių kompensavimui panaudotos fiksuotų parametrų koregavimo grandinės, o temperatūros įtaką buvo galima kompensuoti atskiru reguliatoriumi. Tai buvo atliekama kartą savaitėje.

Bendroji garso perdavimo schema Fig.10 paveikslėlyje dešinėje, o žemiau Fig.11 pavaizduota bendroji garso sistemos dažninė charakteristika. Tokį dažninės tolygumą pavyko pasiekti suderinant atskiras sistemos sekcijas, o taip pat Vašingtono Konstitucijos salėje esančiais kanalų lygio reguliatoriais, kuriuos sureguliuoti buvo patikėta Filadelfijos simfoninio orkestro dirigentui p. L. Stakowski. Siekiant išvengti nesklandumų, p. Stakowski buvo skirta atskira ryšio linija, kuria jis galėjo komunikuoti su Filadelfijoje grojančiu orkestru. Patikimumui padidinti buvo numatytos papildomos ryšio linijos, bet jų neprireikė.

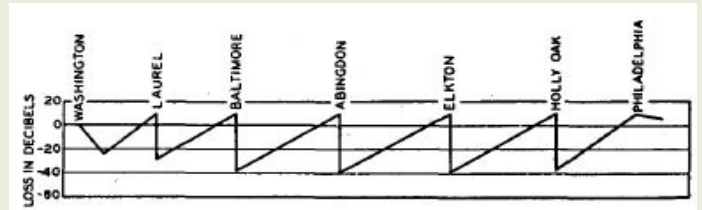


Fig. 3. Transmission level diagram

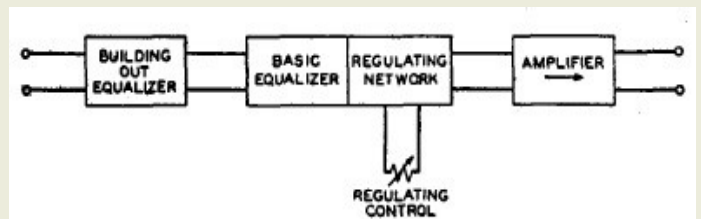


Fig. 8. Schematic diagram of repeater station apparatus

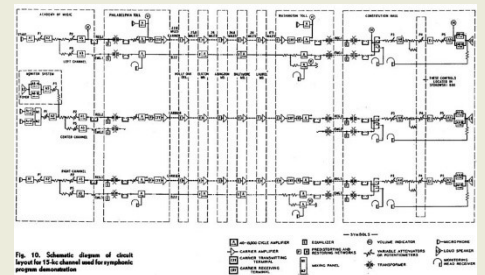
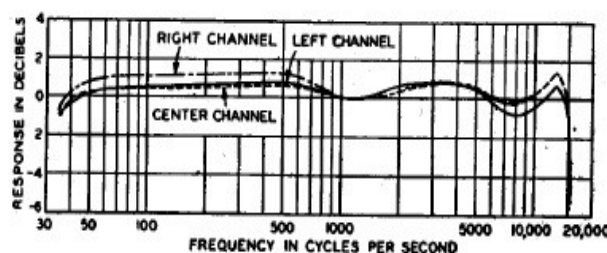


Fig. 10. Schematic diagram of circuit for the 15-channel and for symphony program transmission

Fig. 11 (right). Frequency characteristics over carrier channels used between Philadelphia and Washington, D. C.



iškraipymai net didelei signalų amplitudei neviršijo -40 dB (< 1 %).

Nors dinaminis diapazonas buvo pakankamai didelis, vėliau buvo atliekami papildomi eksperimentai diapazonui padidinti: transliuojamo signalo aukštųjų dažnių amplitudė buvo padidinama, o atkūrimo sekcijoje atitinkamai sumažinama. Tai leido sumažinti triukšmus, o tuo pačiu padidinti visos sistemos linijškumą (dinamiką). Man tai primena Dolby triukšmų mažinimo įrenginius, atsiradusius žymiai vėliau (1968 m.).

Paveikslėlyje Fig.12 apačioje dinaminio diapazono didinimo grandynų charakteristikos, leidusios +10 dB padidinti bendrąją sistemos linijškumą. 1933-iaisiais buvo išanalizuotas dar vienas sistemos gerinimo būdas, kuomet signalo generavimo sekcijoje naudojamas signalo kompresorius, o atkūrimo - ekspanderis.

Matome, kad bendroji dažninė 40 - 15000 Hz juostoje buvo labai tolygi (netolygumas ± 1 dB), o sistemos triukšmai tokie maži, kad jų nesigirdėjo tyliausiuose simfoninės muzikos pasažuose. Sistema turėjo platų linijško darbo diapazoną, o harmoniniai

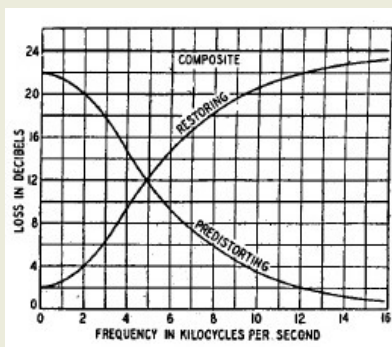


Fig. 12. Attenuation characteristics of "predistorting and restoring" networks

Kai muzikos signalas perduodamas labai dideliu atstumu arba triukšmingomis linijomis, šis būdas yra geresnis už kitus. Dar visai neseniai šis būdas buvo plačiai taikomas įrašų studijose, ekspanderiai ir kompresoriai buvo bene pagrindinė amerikiečių firmos **dbx** veiklos sričių.



Paskutiniajame dokumente rašoma apie garso įrenginių suderinimo svarbą. **System Adaptation** paruošė E.H. Bedell iš *Bell Tel. Labs* ir Iden Kerney iš *American Telephone and Telegraph*. Abu vyrukai irgi Amerikos Akustikos Asociacijos nariai.

Norint kokybiškai perduoti muzikos signalą, svarbios ne tik signalo paėmimo sąlygos simfoninio orkestro grojimo vietoje, bet ir kolonėlių išdėstymas bei atkūrimo salės akustiniai ypatumai. Čia įtaką turi reverberacijos laikas, kolonėlių garso paskirstymas (sklaida), mikrofonų ir garsiakalbių pastatymo vieta, bei bendros dažninės charakteristikos sukalibravimas.

Be tiesioginių muzikos garsų salėje visad girdime ir atspindžius. Filadelfijos Muzikos Akademijos salės reverberacijos laiko priklausomybė pavaizduota grafike Fig. 1 dešinėje.

Akustinės salės savybės taip pat priklauso nuo klausytojų skaičiaus. Optimalią šios koncertų salės reverberaciją atvaizduoja 3 kreivė. Kuomet muzikos signalas perduodamas į kitą salę su sava reverberacija, optimali reverberacijos kreivė signalo paėmimo vietoje turi būti atitinkamai mažesnė (4 kreivė).

Muzikos atkūrimo salės akustiniai ypatumai dar svarbesni, nes čia klausytojas nemato muzikantų, dėmesys koncentruojasi tik į garsą. Jei salės akustika iškreipia garso signalą, tai pakeis ir muzikos iliuziją. Tam tikrais atvejais, pavyzdžiui radijo transliacijose siekiama, kad nedideliame kambaryje esantis radijo imtuvo klausytojas jaustųsi lyg pats būtų signalo šaltinio vietoje. Kai perduodama simfoninė muzika į didelę salę, situacija kitokia - reikia sukurti iliuziją, kad salėje iš tiesų groja orkestras. Jei orkestras groja vienoje didelėje salėje, o klausytojai yra kitoje, abiejų salių akustiniai ypatumai yra labai svarbūs ir juos būtina įvertinti.

Filadelfijos Amerikos Muzikos Akademijos žiūrovų salė yra maždaug 20 tūkst. kub. m. tūrio su 3 tūkst. sėdimų vietų. Grafike aukščiau matome, kad muzikos paėmimo sąlygos pakankamai geros, kai salėje nedaug klausytojų, arba kai ji užpildyta. Kadangi naudojami 3 mikrofonai, eksperimentuojant buvo nustatyta, kad jie turi būti žymiai arčiau orkestro. Tai sumažino atspindžius ir signalo paėmimo salės reverberacijos įtaką - didesnis tiesioginio ir atspindėto garso santykis yra pageidautinas trijų kanalų audio sistemoms. Arčiau stovinčių dinaminių mikrofonų kryptingumo charakteristikos irgi yra palankesnės negu tos toliau esančių. Ši įtaka didelė, maždaug 10 dB@10 kHz.

Filadelfijos salės schema ir mikrofonų išdėstymas Fig. 2 paveikslėlyje dešinėje.

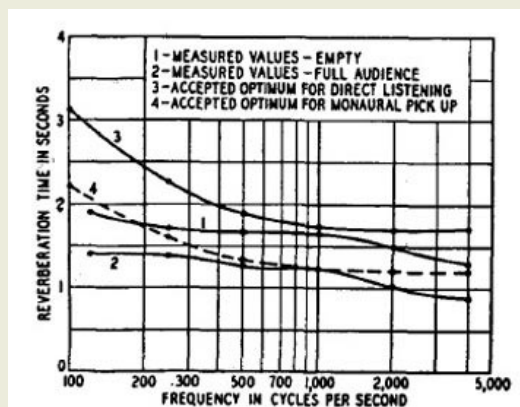


Fig. 1. Reverberation characteristics of Academy of Music, Philadelphia, Pa.

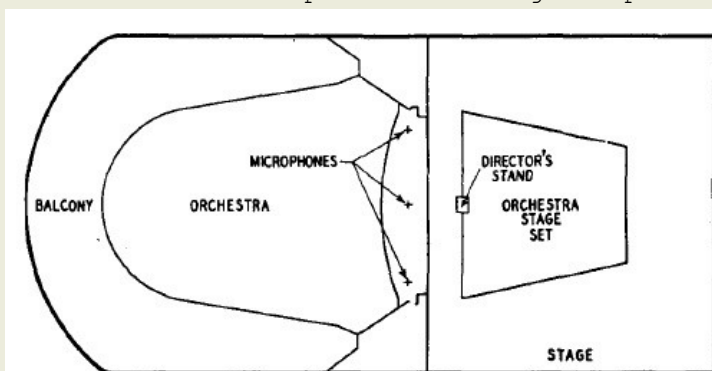


Fig. 2. Floor plan of Academy of Music, showing location of microphones

Kai koncerto metu Filadelfijos salėje buvo dainuojama, be trijų pagrindinių mikrofonų buvo naudojamas ketvirtasis. Tuomet orkestro garsas buvo perduodamas dviem linijomis, o centro kanalu – dainininko garsas. Vokalisto mikrofonas turėjo specialų ekraną, apribojantį priimamojo garso kryptį. Tai leido geriau sureguliuoti orkestro ir dainininko garsumą ir pasiekti geresnę transliacijos kokybę.

Konstitucijos salė Vašingtone didesnė – 28 tūkst. kub. m. tūrio salė talpina ~4 tūkst. žiūrovų. Kolonėlės scenoje buvo išdėstytos taip, kad garsas būtų spinduliuojamas tam tikru kampu ir įgarsintų net arti esančius klausytojus.

Salės ir kolonėlių išdėstymo schema paveikslėlyje Fig.3.

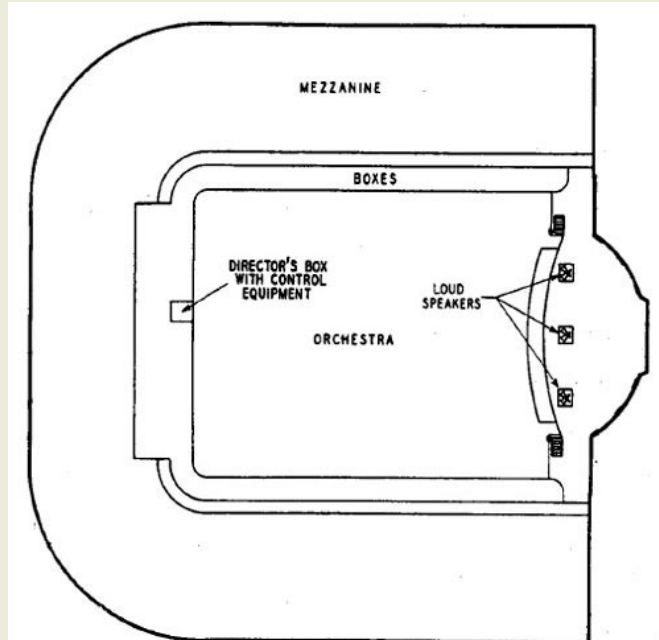


Fig. 3. Floor plan of Constitution Hall, Washington, D. C., showing locations of loud speakers

Abiejų salių reverberacija buvo matuojama greitaeigiu garso lygio matuokliu-savirašiu, o visos sistemos kalibravimas buvo atliekamas heterodininio generatoriaus signalą paduodant į stiprintuvą. Generatoriaus dažnis buvo valdomas varikliu, o 35–15000 Hz diapazone kintantis kolonėlių garsas buvo kontroliuojamas mikrofonu, pajungtu prie garso lygio matuoklio. Taip buvo išmatuoti ir sureguliuoti visi 3 kanalai tolygiai dažninei gauti. Matavimų rezultatai taip pat buvo panaudoti dažninės išlygintojo sukonstravimui.

Atlikus dažninės išlyginimą vienoje salės vietoje, kitoje nebuvo galima pasiekti to paties rezultato, nes įtaka turi ne tik pasikeitęs tiesioginės garso bangos ir atspindžių santykis, bet ir kitoks aukštųjų dažnių slopinimas dėl oro absorbcijos. Absorbavimas priklauso nuo oro

temperatūros, drėgmės, dažnio bei atstumo, o tai didelėje salėje gali siekti 10 dB pokyčius. Buvo pasirinktas toks sureguliuavimas, kad bendrasis garso laukas Vašingtono salėje būtų tolygiausias.

Vašingtono Konstitucijos salės reverberacijos charakteristikos Fig.4 paveikslėlyje.

Dažninės išlyginimui buvo naudojami 2 skirtingi dažninės išlygintojai visuose 3-juose garso kanaluose. Paveikslėlyje Fig.5 žemiau išlygintojų perdavimo charakteristikos: vienas reguliatorių rinkinys reguliudavo žemuosius dažnius, kaip parodyta A, B ir C kreivėmis, o kitas – aukštuosius dažnius (D, E, F ir G kreivės). Kontroliuojančiam muzikos atkūrimą dirigentui šios priemonės leido sureguliuoti bendrą signalo atkūrimo skambesį.

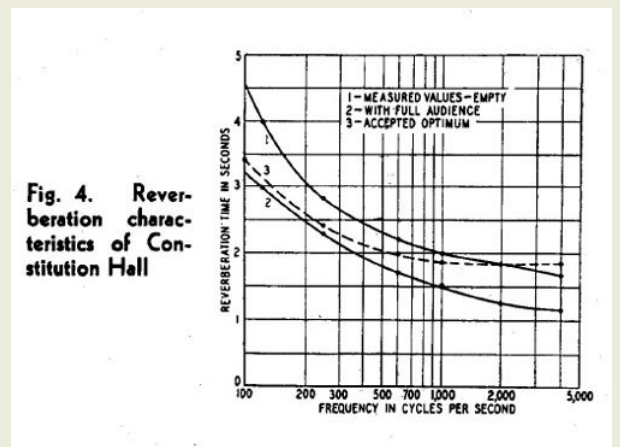


Fig. 4. Reverberation characteristics of Constitution Hall

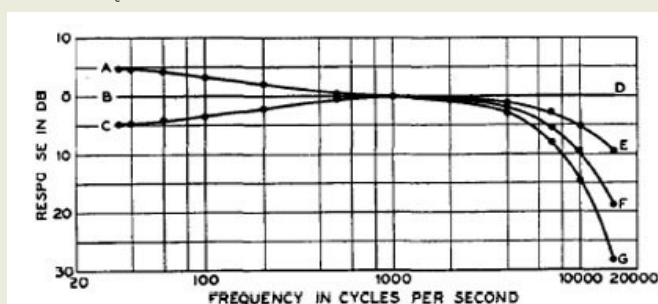


Fig. 5. Transmission characteristics of quality control networks used in the Philadelphia-Washington experiment

Garso atkūrimo sistemose (GAS) kokybė ir garsumas turi kitokią svarbą ir kitą tarpusavio santykį, negu tai būna grojant instrumentams. GAS kokybė (tembras) turi būti reguliuojamas nepriklausomai nuo garsumo. Todėl elektrinis muzikos perdavimas gali padidinti klausytojų auditoriją, o taip pat padidinti muzikinę „erdvę“, sukurti naujus muzikinius efektus. ■

Apie techninius eksperimento reikalavimus glaustai:

1. Muzikos instrumentų išsidėstymas scenoje atliekamas formuojant atskirus garso kanalus.

Norint perduoti orkestro instrumentų erdvinį išsidėstymą, nebūtina įrašyti ir perduoti visus juos atskirai, pakanka naudoti 3 arba 2 kanalus. Šiuolaikinis dvikanalis Stereo taip pat yra tinkamas būdas erdvinei muzikai įrašyti ir atkurti.

2. Dažninės charakteristikos plotis ir netolygumas.

Kokybiškam muzikos perdavimui pakanka 40 – 13000 Hz (15000 Hz max) dažninės pločio su kuo mažesniu dažninės netolygumu.

3. Dinaminis diapazonas.

Didelio simfoninio orkestro dinaminis diapazonas siekia 70 dB, tačiau vertinant atsargą, pageidautina užtikrinti 90 dB GAS dinaminį diapazoną.

4. Mikrofonų ir garsiakalbių kryptingumo/sklaidos bei jautrio svarba.

Kokybiška muzikos atkūrimo sistema turi užtikrinti kuo didesnę tiesioginių ir atspindėtų garso bangų santykį. Garsiakalbiai su ruporais turi kontroliuojamą sklaidą ir tai sumažina atspindžius. Ruporinės kolonėlės yra maždaug 100 kartų efektyvesnės už AS su įprastais garsiakalbiais, o tai leidžia naudoti atitinkamai mažesnės galios stiprintuvus ir sumažinti bendruosius GAS išskaiptumus.

5. Dviejų dažnių juostų kolonėlės su ruporais geriausiai tenkina dažninės, dinaminio diapazono, sklaidos ir išskaiptumų sąlygas.

6. Signalų perdavimas ir muzikos atkūrimo aplinka.

Jeigu signalo perdavimo trakte atsiranda nuostoliai arba išsikreipia signalas, reikia naudoti elektroninį koregavimą. Signalų koregavimas yra būdas praplėsti tiesinį GAS darbo režimą, pagerinti garso kokybę. Klausymo aplinkos akustinės savybės turi atitikti tam tikrus techninius reikalavimus. Taip pat svarbus kolonėlių ir klausytojų išsidėstymas kambaryje.

Išvados:

1. 1933-iais metais atliktas eksperimentas parodė mokslo ir technologijų lygį, leidusį muziką paversti elektriniais signalais, tuos signalus laidais perduoti bet kuriuo atstumu ir muziką vėl atkurti klausytojams.

2. Muzikos pavertimas signalais, tų signalų perdavimas ir jų atkūrimas yra elektroakustiniai procesai, vertinami techninėmis sąvokomis ir parametrais.

3. Norint kokybiškai perduoti bet kokią garsą ar muziką, įrenginių parametrų kiekis yra baigtinis.

Šaltiniai:

1. Symposium on Wire Transmission of Symphonic Music and its Reproduction in Auditory Perspective, April 27, 1933 (konferencijos [dokumentai](#))

2. Loud Speakers and Microphone For Auditory Perspective by A.L. Thuras

3. Jack McCarthy [At The Academy, The Birth Of Wire Transmission Of Music](#) (Filadelfijos istoriko apžvalga)

4. [First Surround Sound](#) (žurnalas Modern Mechanix Yesterday's Tomorrow Today)

5. [The Father of Stereophonic Sound, Harvey Fletcher, Receives Grammy 35 Years After His Death](#) by Mary Mazurek (straipsnis)

Autoriaus žodžiai šiuolaikiniam muzikos mylėtojų:

1. Akustikos mokslas įrodė galintis nuvesti tiesiausiu keliu į tikslą, perduoti klausytojui muziką tokia kokybe, kad įrašo neatskirsime nuo tikro muzikavimo. Dar daugiau, šiuolaikinėse studijose sukuriame tokie garsai ir efektai, kurių negali pagroti muzikantai.

2. Garso atkūrimo sistemos išsamiai apibūdinamos techniniais parametrais, o ne meno sąvokomis.

3. Garsiakalbiai su ruporais išlieka geriausias signalas-garsas keitiklis, leidžiantis įprastuose kambariuose atkurti visą įrašytos muzikos dinamiką ir muzikinę sceną su mažiausiais iškraipymais.

4. Šiuolaikinis garso signalas ir jo nešėjai yra kokybiški, o GAS pasiekė tokį lygį, kad galime pilnai atkurti bet kokio sudėtingumo muzikos įrašus.

5. Įrašas mums yra etalonas, tačiau kartu tai ir pirminė visos GAS kokybės sąlyga, kurios mes negalime pakeisti. Štai kodėl girdėdami prastą garsą iš nežinomos kokybės įrašo, negalime daryti išvadų apie visą GAS. O jei GAS kokybė vertinama įrašų klausymu, tai reikėtų daryti pagal atitinkamas rekomendacijas.

6. Neretai skaitome apie laidų ypatingą svarbą, tačiau laidai taip pat turi būti parenkami inžineriškai. Garso atkūrimo sistemose naudoti egzotinius ir labai brangius laidus yra beprasmiška. Jei paprastais telefoniniais laidais buvo perduoti sudėtingos muzikos signalai labai dideliu atstumu, reiškia GAS laidai ir kabeliai neturi didesnės įtakos atkuriamos muzikos kokybei.

7. Tiesiausią kelią į kokybiškiausią muzikos atkūrimą mums rodo mokslas, bet šiuolaikinė reklama šį kelią užgožia. Tai daroma siekiant rinkos aktyvumo ir suvokiant, kad trumpesnis kelias į tikslą iš rinkos išstumtų dalį mažareikšmių ar visai beprasmių prekių.