

KAKSIKANAVAINEN SIGNAALIEN YHDISTÄJÄ JA SIGNAALITIEN JAKAJA

Rauno Kuusisto, OH3FR

Joulukuu 2024



Vastuuvapauslauseke:

*Tämä artikkeli käsittelee radioamatöörikäyttöön tarkoitettuja laitteita. Artikkelissa mainittujen piirien tehonkesto on rajallinen. Niiden kytkemisessä muihin piireihin on noudatettava tarvittavaa varovaisuutta. Kytken-
täkaavioiden puhtaaksi piirtämisen oikeellisuudesta ei anneta takuuta. Laite on itse rakennettu prototyyppi.
Artikkelin kirjoittaja ei vastaa tämän artikkelisarjan soveltamisesta aiheutuneista virheistä, vaaratilanteista
tai vahingoista.*

KAKSIKANAVAINEN SIGNAALITIEN JAKAJA JA SIGNAALIEN YHDISTÄJÄ

1. Mikä se on, miksi sellaista tarvitaan ja miksi rakentaa semmoinen itse?

Signaalitien jakaja ja signaalien yhdistäjä kulkee myös nimellä tehonjakaja. Englanniksi se on spitter/combiner tai power divider tai Wilkinson divider. Sen olemassaolon tarkoitus on joko yhdistää signaaleita yhdeksi tai jakaa signaalia useampaan väylään. Tällöinen vehje voidaan toteuttaa laajakaistaisena tai yhdelle taajuudelle, se voidaan valmistaa vastuksista, suodattimista, joita myös koaksiaalikaapeleista voidaan väsäätä, tai laajakaistamuuntajista. Se voi olla kaksi- tai useampikanavainen. Eri tavalla toteutettujen sovellusten ominaisuudet poikkeavat toisistaan ja niitä käytetäänkin eri tarkoituksiin. Varsin selkeä kertomus tällöisen vehjeen toiminnasta on viitteessä [1]. Laajemmin teoriaan en tässä syvenny, koska sitä on tarjolla interwebin syövässä yllin kyllin. Hakusanat "power splitter schematics" on aika hyvä lähtö. Tästä omatoimisuuden kehotuksesta seuraa ainakin joillekin helpotuksen huokaus, sillä yhtään laskukaavaa ei tämä juttu sisällä. Vain kertomuksen käytännön toteutuksesta. Lähdeviitteet on merkitty näin [0].

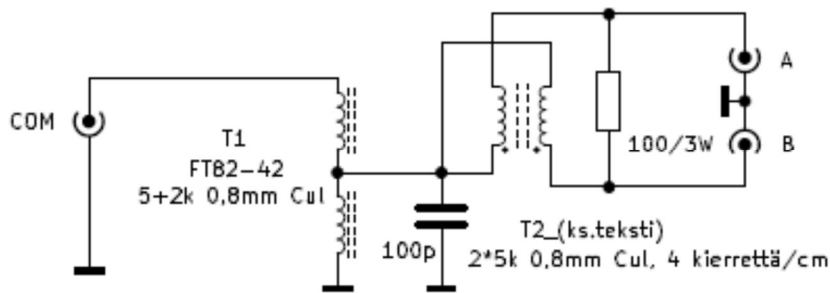
Miksi tällöinen sitten pitäisi rakentaa itse, kun kaupastakin saa valmiita? No, hinnat lähtevät viidenkymppin paremmalta puolelta ja kipuavat satasiin. Toki laatukin on sitten hintansa mukainen. Siinä on yksi syy. Toinen syy on käyttötarkoitus. Voi rakentaa juuri semmoisen, kuin tarvitsee. Kolmas syy on, että sattuu olemaan tarpeet valmiina rompelootassa. Neljäs syy on oppia jotain ja ymmärtää harrasteensa eri osa-alueita. Viides syy on "koska voin". Sepä vasta hyvä syy onkin! Jep.

Tässä jutussa käsitellään vain laajakaistaista, muuntajilla toteutettua radiotaajuuksilla käytettävää kaksikanavaista mallia, jonka impedanssi on 50Ω ja tehonkesto pieni. Eli pikku otoksesta koko splitteri-kirjossa on kyse. Tässä esiteltävän jakajan käyttötarkoitus on kahden antennin kombinaation kokeilu QRP-tehoilla sekä erilaisten RF-piirien, kuten vahvistinten ja sekoittajien ominaisarvojen mittaaminen. Sen pitää täyttää ainakin nämä määrittelyt:

- ominaisimpedanssi 50Ω
- tehonkesto muutama watti
- toimii hyvin vähintään HF-alueella ja MF-alueen loppupäässä
- kahden kanavan erotusvaimennuksen pitää olla vähintään 20dB
- kahden kanavan amplitudibalanssin pitää olla parempi kuin 1 % (20dB)
- kahden kanavan välisen vaihe-eron pitää olla parempi kuin 3° (20dB)
- tarvittavat osat löytyvät rompelootasta

2. Miten se tein?

Niinpä sitten piirtelin kytkentäkaavion, jonka lopullinen versio on kuvassa 1. Vehje toimii karkeasti ottaen niin, että jakomuuntaja T2 jakaa yhteisportista COM tulevan signaalin kahtia niin, että muuntajan eri päissä olevat portit A ja B eivät näe toisiaan. Koska A ja B asettuvat rinnakkain, ne näkyvät COM-suuntaan impedanssiltaan puolikkaana. Sitä varten impedanssimuuntaja T1 muuntaa sen kokonaiseksi kierroslukusuhteella 7/5. Näin COM-portin 1W signaali jakautuu tasan A:n ja B:n 0,5W signaaleiksi. Luonnollisesti piiri toimii myös toisinpäin eli se summaa A:n ja B:n signaalit COM-signaaliksi. Impedanssin pitää olla kaikissa kolmessa portissa sama.



Kuva 1. Signaalitien jakaja-yhdistäjän kytkentä.

Aluksi muutama sana komponenttien valinnasta. Aloitetaan muuntajien T1 ja T2 runkotoroideista ja niille käämityistä muuntajakämeistä. Toroidien valinta osui aluksi kahteen samanlaiseen, rompetorilta hankittuun tuntemattoman valmistajan runkoon. Ne mittasin menetelmällä, joka on kuvattu viitteessä [2] ja joka löytyy OH2AP:n verkkosivuilta. Valitun toroidin strategiset mitat ovat:

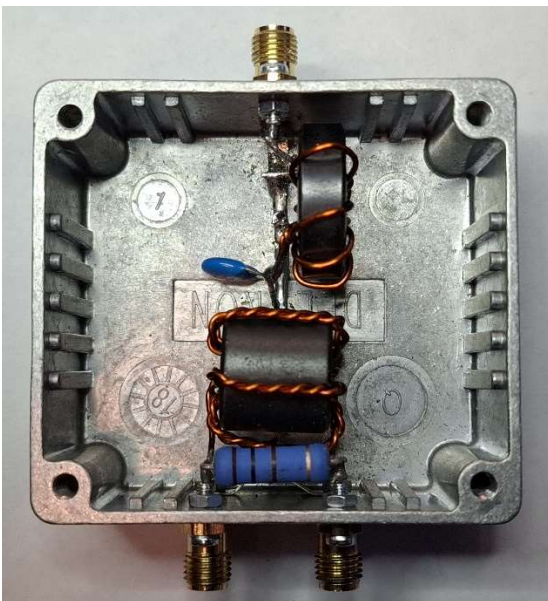
- d_o 15,8 mm
- d_i 7,8 mm
- s 14,3 mm
- A_l 1250 nH/N²
- μ_r 620
- magneettinen resonanssi on n. 25MHz
- 7 kierroksen induktanssi taajuusalueella on n. 40 μ H (alle 3MHz) – 8,1 μ H (52MHz). Viiden kierroksen kelan vastaava on luonnollisesti puolet siitä ja kymmenkierroksen tuplat.

Muuntajat on käämitty 0,8 mm Cul langasta. Impedanssin sovittimessa on 7 kierrosta ja väliulosotto on 5 kierrosta maapäästä lukien. Jakomuuntajassa on 2*5 kierrosta. Ne on kierretty toisiinsa niin, että 1 cm matkalla on 4 kierrosta. Helppo tapa saada tasaista kierrettä on laittaa riittävän pitkä johdin kaksin kerroin ja puristaa irtopäät ruuvipuristimen leukojen väliin sekä kiinnittää lenkipää pienoistorakoneen istukkaankin ja antaa koneen kiertää rauhallisella nopeudella. Tulos on myös sähköisesti tasalaatuinen. Impedanssimuuntajassa ilmeni kuitenkin ongelma, kun sen impedanssivastetta mittasin. Sen ikioma resonanssi löytyi n. 45MHz kohdalta, Se ei ollut kovin hyvä aiotun käytön kannalta. Splitteri kuitenkin toimi ihan kohtuullisesti taajuusalueella 300kHz – 30MHz. Laite oli käyttökelpoinen välillä 100kHz – 34MHz.

Jotenkin jäi kaivertamaan kuitenkin, sillä ehkä pienellä muutoksella sen saisi toimimaan vielä 50MHz:kin. Päätelin, että impedanssimuuntajan kelan kierrosten välinen kapasitanssi oli liian suuri. Se resonoi yhdessä käämin induktanssin kanssa. Käämilankaa kului kierrokseen tällä rungolla n. 31cm. Koikeilin FT82-43:a, jossa lankaa kuluu vastaavaan rakenteeseen n. 20cm. Samoin kierrosten välinen etäisyys riippuu toroidin halkaisijasta. FT82:ssa kierrokset ovat n. 1,5 kertaa harvemmassa. Induktanssi on myös FT82:lla pienempi (mitattuna ja laskettuna viitteen [2] menetelmällä) kuin ensimmäisessä versiossa. Laskin, että resonanssin pitäisi osua n. 77MHz taajuudelle. Mittauksessa se löytyi 79MHz kohdalta! Hämmästyttävä sattuma. Tällä jatkuu! Odotettavissa kuitenkin oli taajuusalueen alarajan nousu, jonka vaikutus selvisi lopputuloksen mittauksessa.

Reaktanssin tasaamiseen tarkoitettu kondensaattori oli helpompi mitoittaa koeyhteyttäasetelmassa. Tuon kondensaattorin homma on tasata lähellä taajuusalueen yläpäättä liiallinen induktiivinen reaktanssi pois. SWR pienenee ja sovitin jakomuuntajan kanssa paranee. Hain sille oikean arvon laskemalla impedanssimittauksen perusteella, mutta lopullinen kapasitanssin arvo piti hakea trimmerillä ja mitaamalla sen kapasitanssi. Optimaalinen arvo C:lle COM-A väylän SWR mittauksen ja laskemisen perusteella oli n. 80pF. Niinpä tein koeasetelman, jossa C:nä oli 100pF trimmeri ja sen rinnalla 47pF kiinteä konkka. Paras tapa löytää mahdollisimman hyvä arvo on mitata SWR yhteisestä portista ja tarkastaa sitten A–B erotusvaimennus. Kun molemmat ovat sopivan hyvät, on konkan arvo löytynyt. Näin mittailin vuorotellen kumpaakin NanoVNA:lla ja löysin mieleiseni optimin, jossa SWR pysyi kurissa ja A-B erotusvaimennus oli mahdollisimman hyvä niin korkeille taajuuksille, kuin mahdollista. C:n arvoksi löytyi 104pF. Tämä jättää COM-porttiin näkymään kapasitanssia, mutta A-B erotusvaimennus saadaan sen hinnalla riittäväksi. Niinpä etsin kapasitanssimittarin kanssa 104pF kondensaattorin 100pF 3kV keräämisten konkkien joukosta, niitä kun sattui rompelootassa olemaan. Noin neljänkymmenen otoksessa hajonta oli 66pF ja 140pF välillä ja löysin 103pF konkan, jonka juottelin paikalleen. Yhden prosentin toleranssin pintaliitoskonkilla homma olisi ollut paljon helpompi. Sen kuin olisi vain ottanut yhden. On hyvä käyttää vähintään 100V jännitekestoista kondensaattoria.

Vastuksena on 3W 100Ω metallikalvovastus. Sen mittasin NanoVNA:lla ja totesin olevan impedansseiltaan käyttökelpoinen ainakin 100MHz saakka ja määrittelyn mukaisella taajuusalueella aivan oivallinen. Koteloksi löytyi valmis 60 x 55 x 38 mm valukotelo ja liittimet ovat SMA. Jokunen M2 ja M3 koneruuvi ja mutteri myös, ja hiukan akryylimuovia ja printteripaperia, vähän 4mm kuparisukkaa ja pari juotoskorvaa tarvittiin. Piirisuunnittelun ohjaava tekijä oli saada kytkentäjohtojen pituudet minimoitua. Kuva 2 näyttää laitteen sisälmykset.



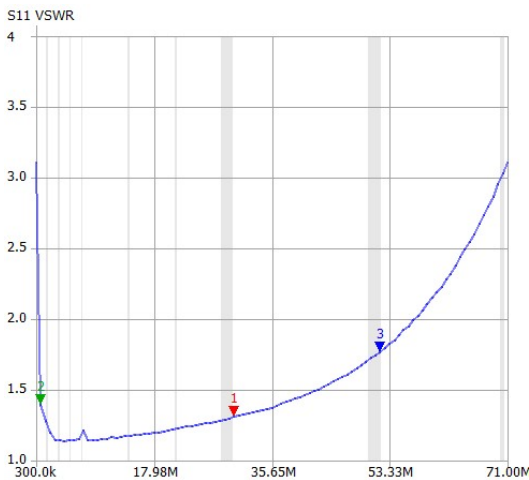
Kuva 2. Splitterin toteutus. Ylhäällä on yhteisportti. Sen ja kanavaporttien välissä menee 3 mm kuparisukkaa yhteisenä maatasona. 2:1 muuntaja on heti liittimen jälkeen. Sen alapäässä on yhteinen maadoituspiste, johon on myös kytketty 100pF reaktanssin kompensointikondensaattori. Heti sen alapuolella on jakomuuntaja. Sen jälkeen ovat kanavien A ja B liittimet ja niiden signaalihohtimiin on juotettu suoraan 100Ω tasausvastus. Toteutuksessa ei ole senttimetriä (=10nH) pidempiä kytkentäjohtimia.

Tein ensiksi koekytkennän ilman koteloa. Mittaaminen ja toimivuuden kokeilu oli sillä tavalla helpompaa. Tässä vaiheessa impedanssimuuntajan ongelmat löytyivät. Alkuperäisellä runkovalinnalla toimivuuden ehdoton yläraja oli noin 34MHz ja alaraja 100kHz. FT82-43:lla tilanne muuttui paljon paremmaksi ja rajat asettuivat välille 300kHz-70MHz. Mittauksen avulla lopulliset komponenttivalinnat selkiytyivät. Löytyi impedanssimuuntajalle toimivampi runko ja impedanssin tasauskondensaattorille optimaarivo. Kun tekee juttuja alusta lähtien, pitää siten olla valmis näkemään vähän vaivaa. Kun vempelle oli koossa lopullisessa muodossaan, oli toimivuuden todentamisen aika. Siitä seuraavassa luvussa.

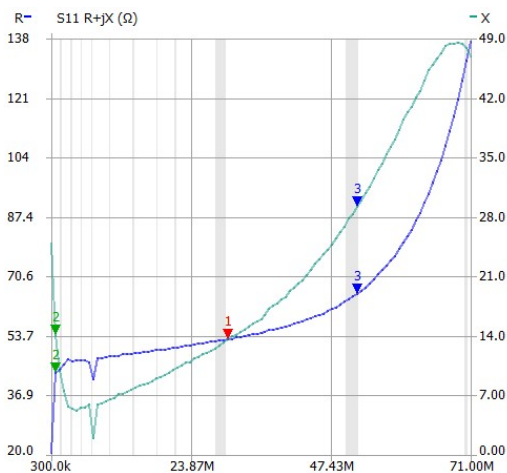
3. Mitä siitä tuli?

Tällä tavalla toteutetun splitterin jokainen portti pitää käytön aikana olla päätetty yhtä suureen, esim. 50Ω kuormaan. Muuten se ei toimi oikein. Teoriassa portit A ja B jakavat COM-portissa näkyvän tehon tasan eivätkä ne näe toisiaan ollenkaan. Siis sekä A että B vaimentavat COM-portissa näkyvää tehoa 3dB ja niiden välinen vaimennus on ääretön. Käytännössä näin ei ole, vaan läpäisyvaimennus on suurempi kuin 3dB ja erotusvaimennuksella on jokin realistinen arvo, joka on korkeintaan ehkä noin 40dB. Jos toisesta jakoportista puuttuu kuorma, näkee COM portti 100Ω kuorman ja on epäviireessä, ylijäämäteho palaa osin takaisin ja loput tehosta menee 100Ω tasausvastukseen ja teho vaimenee 6dB. Jos taas lähtöportti on oikosulussa, COM-portti näkee 17Ω kuorman ja on jälleen epäviireessä. Jos molemmat portit A ja B ovat auki, kaikki teho palaa teoriassa takaisin COM-porttiin. Käytännössä siitä taajuusriippuva osa hukkuu laitteen piireihin. Jos toinen portti on oikosulussa ja toinen auki, COM näkee 50Ω kuorman ja teho menee tasausvastukseen. Jos portit on kuormitettu 50Ω poikkeavilla kuormilla, SWR ja signaalitien vaimennus kasvavat ja A-B erotusvaimennus heikkenee. Jos taas COM portti on auki, näkevät A ja B 100Ω kuorman ja A-B vaimennus on 6dB ja teho palaa osin takaisin ja osin hukkuu tasausvastukseen. Jos COM on oikosulussa, näkevät A ja B 17Ω kuorman ja A-B vaimennus on 6dB ja teho palaa osin takaisin ja osin hukkuu tasausvastukseen. Näin teoriassa. Käytännössä tässä esitetyllä tavalla tehdyssä splitterissä on aina reaktiivisia impedansseja, joten todellinen sähköinen käytös voi olla hyvinkin eksoottista. Ennen käyttöä on siis hyvä todentaa, että kaikissa porteissa on oikean kokoinen kuorma. Tästä on hyvä selitys viitteessä [1].

Siispä tällainen pitää mitata signaalitien näkökulmasta pitkittäin ja poikittain. Tässä on pitkittäinsuunta, jossa signaalin pitää kulkea ja poikittain-suunta, jossa signaali ei saa kulkea. Pitkittäin mitataan SWR, impedanssit ja vaimennus. Mittasin SWR:n ja impedanssin yhteisportista NanoVNA:lla. Tällöin signaali syötetään NanoVNA:n PORT 1:stä splitterin COM-porttiin ja sen toinen, esim. A-lähtö on kytketty NanoVNA:n PORT 2:een. Tällöin B-lähtö pitää terminoida 50Ω keinokuormalla. Varmuuden vuoksi mitataan samat mittaukset vaihtamalla porttien A ja B rooleja. Tein mittaukset taajuusalueella 300kHz – 71MHz. Kuvat 3 ja 4 kertovat.

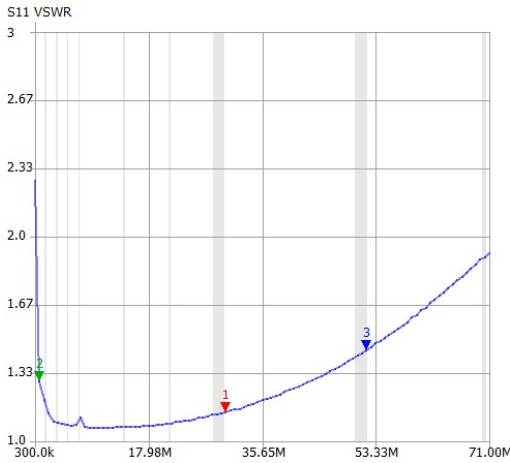


Kuva 3. SWR portista COM mitattuna A:n suuntaan. B on terminoitu 50Ω :lla. SWR on alle 1:1,5 välillä 800kHz – 40MHz ja alle 1:2 välillä 500kHz – 55MHz. Parhaiten homma hoituu välillä 1MHz – 30MHz. Mennee hyvin spekseihin.

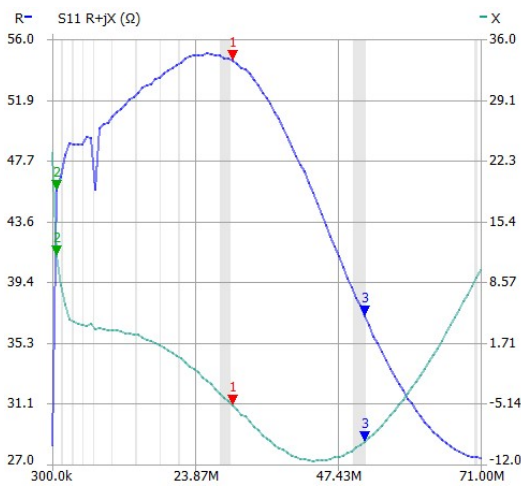


Kuva 4. Impedanssi mitattuna portista COM suuntaan A. Impedanssi nousee jyrkästi 50MHz jälkeen ja putoaa kiihtyen kohti nollaa alle 300kHz. Tässä näkyy myös impedanssin tasauskondensaattorin C liian suuri arvo tuloimpedanssin kannalta. A-B vaimennuksen optimointi huomioiden tämä oli kuitenkin lo-pullinen kompromissi C:n kapasitanssille.

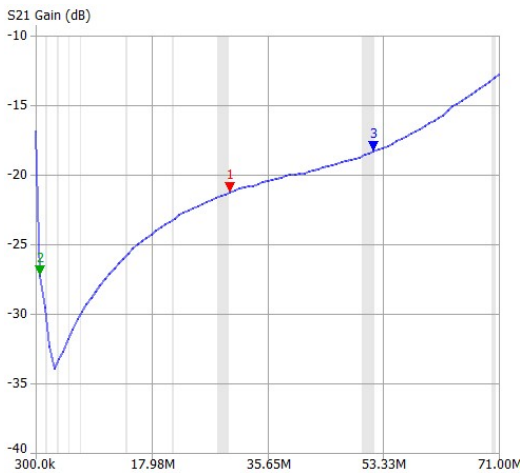
Seuraavaksi mittasin porttien A ja B keskinäiset ominaisuudet. Tässä tärkein on porttien välinen erotusvaimennus, mutta myös porttien välinen balanssi, SWR ja impedanssi ovat tietämisen arvoiset. Mittaus tehdään niin, että COM-portti terminoidaan 50Ω keinokuormalla ja NanoVNA:lla mitataan vuoroin signaalisuuntana A->B tai B->A. Balanssiin palataan kuvien 5 – 7 jälkeen.



Kuva 5. Portista A mitattu SWR on alle 1:2 koko toiminta-alueella. Portin B tulos oli samanlainen. Lupaa hyvää porttien väliselle balanssille. Parhaimmillaan SWR on HF-alueella.



Kuva 6. Portista A mitattu impedanssi suuntaan B. Portin B tulos suuntaan A ei juurikaan tästä poikennut. Reaktanssikäyrä on aika hyvä. Resisttiivinen osa alkaa olla aika pieni yli 50MHz:n. Samoin se romahtaa alle 300kHz:n. Sillä välillä käyttökelpoinen, mutta parhaimmillaan välillä 1MHz – 40MHz.



Kuva 7. Porttien A ja B välinen erotusvaimennus. Se on parempi kuin 20dB välillä 300kHz – 40MHz ja 52MHz kohdalla se on vielä 18dB. Sen sijaan 70MHz:n, jossa se on vielä 13dB, jälkeen se nopeasti heikkenee kohti muutamaa desibeliä.

Lopuksi mittasin vaimennukset portista COM portteihin A ja B sekä niiden välisen balanssin. Tämän mittauksen vaatimaan tarkkuuteen ei NanoVNA enää kyennyt, joten käytin NanoVNA:n signaaligeneraattoria ja oskilloskooppia. Mittasin oskilloskoopin samalla kanavalla ensin COM-porttiin tulevan signaalin ja sen jälkeen porttien A ja B signaalit. Laskin myös epäsovituksen aiheuttamat lisävaimennukset ja paljon muuta. Laitoin taulukkoon ja kone laski tulokset. Tulokset olivat ymmärrettävässä määrin NanoVNA:n tulosten suuntaiset. Taulukossa 1 on läpäisyvaimennus ja A – B balanssi.

Taulukko 1. Läpäisyvaimennus ja A-B balanssi eri taajuuksilla.

A [dB]	8,9	4,0	3,3	3,0	3,0	3,0	3,2	3,4	3,1	3,8	4,0	4,4	4,2	4,2	4,6	5,5	8,2
Bal [%o]	6,3	1,2	-0,5	-0,4	-1,8	-1,7	-0,9	-3,2	-3,6	0,8	-3,4	-6,5	-2,3	-8,3	-16	-1,8	-27
f[MHz]	0,1	0,3	0,5	1	2	5	7	10	14	18	21	25	30	40	50	60	71

Kanavan A signaali on keskimäärin noin 4‰ kanavan B signaalia heikompi. Se on noin -0,09dB eli aika hyvä. Vaihebalanssin mittasin oskilloskoopilla. Koska oskilloskoopini kanavat kulkivat noin 8° eri vaiheissa, niin piti hiukan kikkailla kanavien vaihdon ja näyttöruudulla työntömitan kanssa. Sain tulokseksi 0,6°/360° eli noin 28dB.

Mittauksissa löytyi myös tämän laitteen käytettävyyden semmoiset reunat, joiden sisällä toimien voi vielä myös luottaa tuloksiin niin paljon, että niitä voi käyttää jatkolaskennan perusteina. Määrittelyn mukainen kanavien välinen vaimennus 20dB saavutetaan taajuuksivälillä 400kHz – 40MHz. Läpäisyvaimennus kasvaa tuolla välillä hyvin maltillisesti. Hiukan kun omaatuntoa venyttää, niin taajuuksivälillä 300kHz – 60MHz pärjää vielä, mutta tulokset eivät välttämättä ole ihan parhaat mahdolliset. Parhaimmillaan laite on taajuuksivälillä 1 – 30MHz eli juuri asetettujen tavoitteiden mukaisesti. Tehoakin vehje kestää vähintään muutaman watin, ylätaajuuksilla enemmän. Kaikki osat löytyivät rompelootasta, joten kauppaan ei tarvinnut mennä. Kun vertaa asetettujen käyttäjän määrittelyjen tavoitteisiin, niin tämä vimpain onnistui ja sopii oikein hyvin harrastekäyttöön. Se täydentää hyvin jo tehtyjen sensorien [3] joukkoa.

Lähteet:

- [1] https://www.minicircuits.com/app/AN10-006.pdf?srsltid=AfmBOorws1h9MQDFQaE_ThS3Pxsg-XteP8KoNvnAWBQB1uo4pGp403g_n
- [2] http://oh2ap.fi/?page_id=3389
- [3] http://oh2ap.fi/?page_id=3237

Kynällä ja kolvilla:

Rauno OH3FR