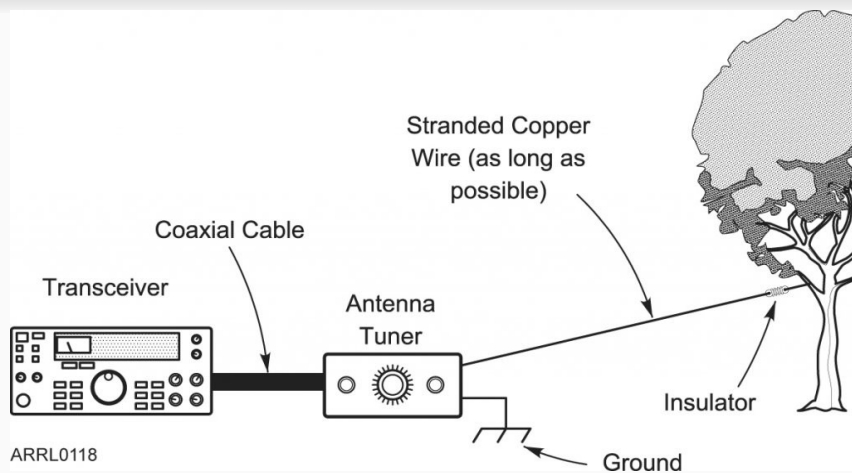


Tápvonalak



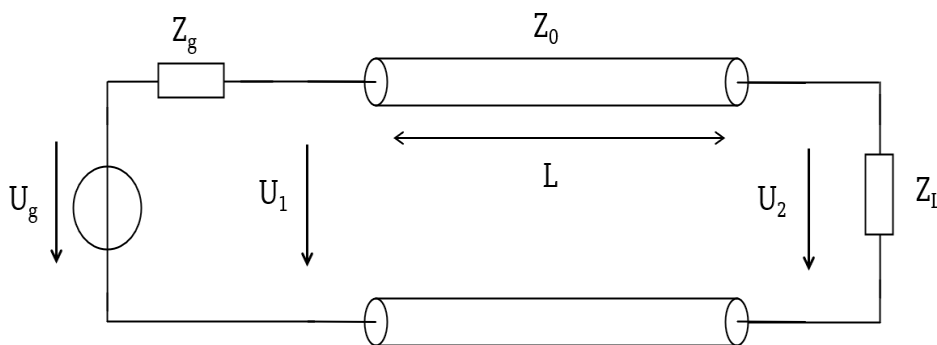
Előadó: Keresztes „Keri” Botond

Miről beszélünk?



A rádiótechnikában gyakran előfordul, hogy az antenna nem azonos helyen található az adó-vevő berendezéssel. Ennek oka lehet, hogy fizikailag nem fér oda az erősítő ki/bemenetéhez az antenna, vagy az eszközünket védett helyen szeretnénk elhelyezni. A gyakorlatban természetesen jóformán mindig találunk átviteli hálózatot az antenna és az eszköz között. Ezt nevezzük tápvonalnak (angolul feedline vagy transmission line).

Kérdés: Hogyan áll be az osztó?



$$U_2 = \frac{Z_L}{Z_g + Z_L} \cdot U_g$$

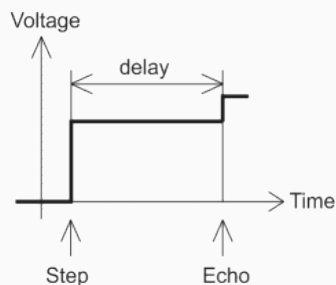
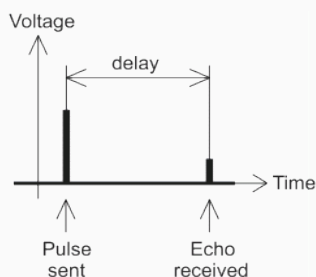
ha $Z_L = Z_0$

Előzőekben megtanultuk, hogy egy két ellenállásból álló hálózaton (ohmos osztó) hogyan oszlik meg a feszültség. De mi történik, hogy a két ellenállást egy viszonylag hosszú vezeték köti össze?

Értelemszerűen a feszültség „nem tudja” milyen arányban kell osztódnia, így „el kell mennie” a tápvonal végére, ahol odaérve kiderül, hogy jó arányban történt-e a megoszlás, vagy „módosítani” kell azt.

Reflexió

- Teljesítmény visszaverődés
- Illesztetlen lezárásról (adott frekvencián)
- Más hullámimpedanciájú közegről



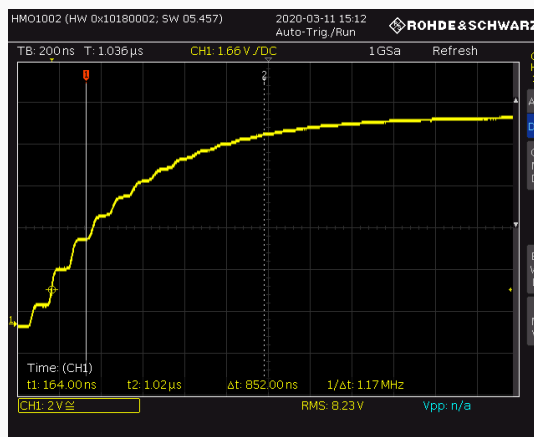
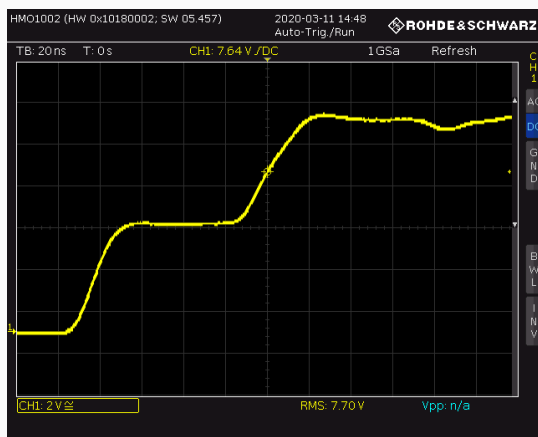
Ilyenkor beszélünk a reflexió jelenségéről, amikor is a feszültség elsőre „helytelenül feltételezte” az osztásarányt, és kénytelen „korigálni”.

A reflexió számunkra egy nem kívánatos jelenség, ugyanis teljesítmény fog visszaverődni a lezárásról, ami két okból hátrányos:

1. A visszaverődött teljesítményt nem tudjuk kisugározni (romlik a hatásfokunk)
2. A visszaérkező teljesítmény károsíthatja, akár tönkre is teheti az adókat.

A tápvezetési reflexió jelensége hasonló a fény ablakról, vagy vízfelszínről történő visszaverődéséhez.

Mérési eredmény



Ezen a két képen oszcilloszkóppal mérjük a 3. ábrán U1-el jelölt feszültséget, és vizsgáljuk, hogy különböző ZL lezárásokra milyen jelalakokat kapunk

Bal oldal: A tápvonal egy szakadással (végtelen nagy ellenállás) van lezárva

Jobb oldal: A tápvonal egy kondenzátorral van lezárva.

Mindkét esetben megfigyelhető az azonos időközönként történő „lépcsőzés”, melyek időközeiből (a terjedési sebesség ismeretében) a tápvonal hosszára lehet következtetni.

A jelalak minden esetben valamilyen végértékhez fog konvergálni.

Mi is az a tápvonal?

- Kapcsolat az adó-vevő és az antenna között

- Elvárások:

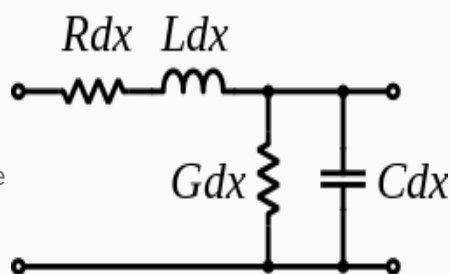
- ☐ Veszteségmentes átvitel
- ☐ Ne sugározzon

- Hullámhosszal összemérhető méretek

Szükséges a hullámjelenségek figyelembevétele

→ Távvezeték

- Elosztott paraméterű hálózat



Egy tápvonal feladata a kapcsolatlétesítés az adó-vevő és az antenna között.

Lehetőleg tegye ezt úgy, hogy minél kisebb veszteségünk legyen és ne sugározzon, ez ugyanis ronthatja az antenna karakterisztikáját és a rendszer hatásfokát.

A rádiófrekvenciás hullámok hossza gyakran összemérhető a tápvonal hosszával, így itt már szükséges, hogy figyelembe vegyünk a hullámjelenségeket. (Pl.: 145MHz-es rádióamatőr sávnak kb. 2m-es a szabadtéri hullámhossza.)

Elosztott paraméterű hálózatról beszélhetünk, a tápvonal elméletben az ábrán látható elemekből építhető fel, ezeket sorban egymás után kapcsolva kapjuk meg a tápvonal helyettesítő képét.

Hullámimpedancia

- Végtelen hosszú vezetéken kialakuló feszültség és áram aránya
- VAGY a vezetéken kialakuló elektromos tér és áramsűrűség aránya

- Tápvonal hullámimpedanciája:

- R: Hosszegységre eső ellenállás
- G: Hosszegységre eső szivárgás
- L: Hosszegységre eső induktivitás
- C: Hosszegységre eső kapacitás

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

- Ideális tápvonal esetén:

- Nincs veszteség a tápvonalon
- Gyakorlatban is jó közelítés

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

A tápvonal legfontosabb paramétere annak hullámimpedanciája.

Egy valós tápvonal hullámimpedanciája a felső képlet szerinti. Ebben R a vezetők soros ellenállása, G a két vezető közötti szivárgási feszültség, L a vezetők induktivitása, C a vezetők közötti kapacitás.

Ideális távvezeték esetén R és G elhanyagolható, így az alsó képletet kapjuk, ekkor valós a hullámimpedancia. Ez az egyszerűsítés a gyakorlatban is jól használható eredményt ad.

A hullámimpedancia mérhető például egy tápvonal rövidzárral való lezárásával és az induktivitása mérésével, azonos tápvonal szakadással való lezárása és kapacitásának mérésével, majd ezeknek a képletbe való behelyettesítésével.

Hullámterjedés a tápvezetelen

- Szabadtéri terjedés:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

- Rövidülési tényező:

- Az EM hullám dielektrikumban halad, nem vákuumban
- Lassabb a hullám terjedési sebessége

Rel. velocity ratio
RG58c/u

V rel

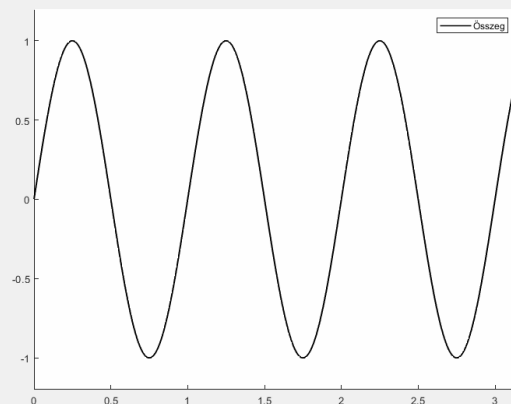
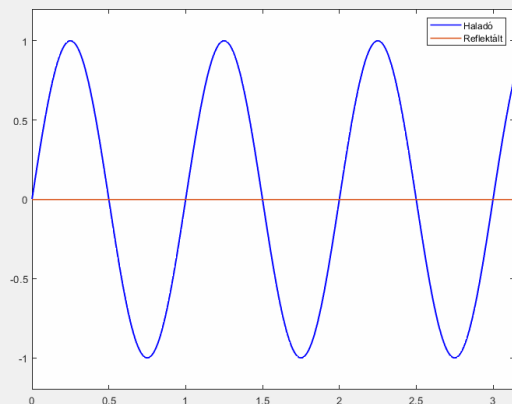
%

67,0

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot c$$

Vákuumban az elektromágneses hullámok hossza szabadtéri hullámterjedés képletével számítható ($\lambda = c/f$). A tápvezetelben ugyanakkor az EM hullám dielektrikumban terjed (pl. a koax belső ere és köpenye közötti szigetelés), melyben lassabb a hullámterjedés. Ennek leírására használják a rövidülési tényezőt (Relative velocity ratio), mely megmondja, hogy a tápvezetelben terjedő hullám hossza hány százaléka a szabadtérinek. Ez az érték közvetlenül számítható a relatív dielektromos állandóból.

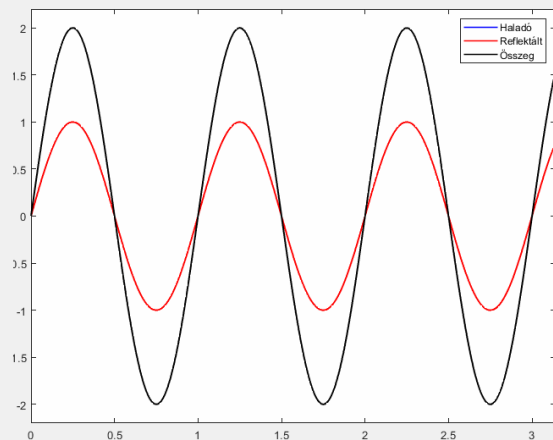
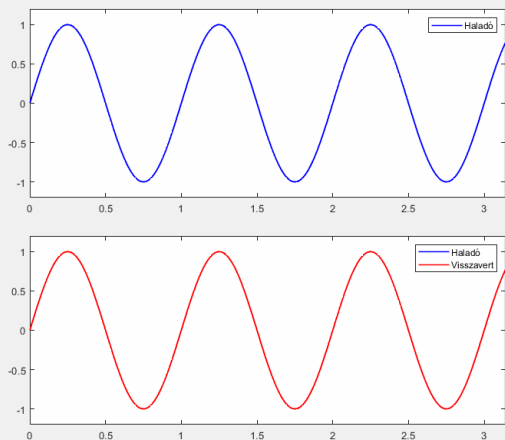
Haladó hullám (illesztett lezárás)



Ideális esetben a távvezetéken csak haladó hullámok vannak.

A horizontális tengelyen a tápvonal hossza, a vertikális tengelyen a feszültség amplitúdó látható. Ekkor a lezáró impedancia (például antenna) nyeli el a teljes befektetett teljesítményt. A bal oldali ábrán a haladó hullám látható. A jobb oldali ábrán "hold" funkcióval végignézzük a tápvonalon mérhető feszültség értékeket. Látható, hogy a tápvonal bármely pontjában ugyanazok a maximum és minimum értéke alakulnak ki. Másként fogalmazva: a tápvonal minden pontjában azonos amplitúdójú a feszültség.

Haladó és visszavert hullám

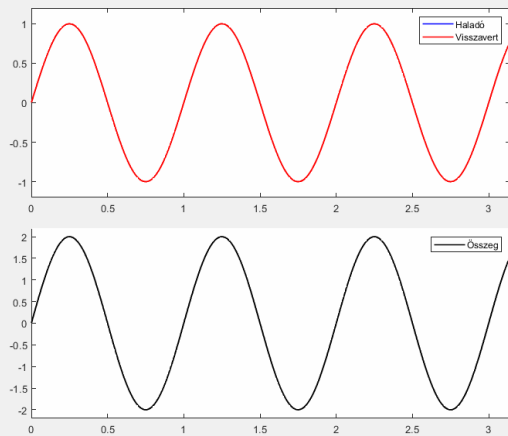


Sajnos ideális esettel ritkán találkozunk. A fenti ábrán valaki valamit nagyon elszúrt (például nem csatlakoztatott antennát a tápvonalra) és teljes reflexió van a tápvonal végénél. Ekkor a haladó és a visszavert hullámok amplitúdója megegyezik, irányuk ellentétes, vagyis az összes teljesítmény visszaverődik.

A tápvonalon állóhullámok alakulnak ki, avagy a tápvonal pontjaiban a feszültség más és más amplitúdójú lesz.

Megjegyezendő, hogy a fekete, összegzett feszültség bár szinuszosnak tűnik, valójában ciklois.

Haladó és visszavert hullám



Jobban láthatók a feszültségviszonyok, ha az előző néhány periódust “megtartjuk”. Ekkor látható, hogy teljes visszaverődés esetén a tápvonalon “végighúzva” egy feszültségmérőt, az alsó ábrákon látható görbék burkolóit kapjuk.

Bal oldal: Teljes visszaverődés, a tápvonal lezárása szakadás, vagy rövidzár.

Jobb oldal: A teljesítmény fele verődik vissza. Itt is jól megfigyelhetők az interferenciaképpen kialakuló hullámhegyek és hullámvölgyek.

Állóhullámarány - SWR

- VSWR - Voltage Standing Wave Ratio
- A tápvonal mentén a legnagyobb és a legkisebb feszültség aránya

$$SWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} \quad 1 \leq SWR < \infty$$

- Ökölszabály: $SWR < 2,3$



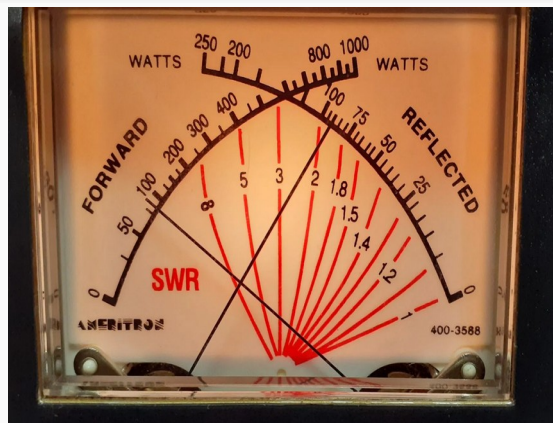
Az előző diákon elmagyarázott állóhullámok mérésére, és ezzel elsődlegesen a tápvonal illesztetlenségének jellemzésére vezették be az állóhullám arányt (SWR), melyet általában feszültségek arányaként mérnek (VSWR, de gyakran csak SWR-ként emlegetik). Értéke a tápvonalon mért maximum és minimum feszültségek hányadosa.

Ha megnézzük a maximum és minimum feszültségeket egy tápvonalon, ahol nincs reflexió, azt láthatjuk, hogy az érték 1 (lásd. 9-es dia). Ez az SWR érték tökéletes. Amennyiben növekszik a visszavert hullám amplitúdója (és így a minimum feszültség csökken), az SWR érték nő. Ez egészen növekedhet a teljes reflexióig, ahol a legkisebb feszültség 0 lesz. Bármit osztunk nullával, az végtelen lesz, tehát az SWR érték teljes reflexió esetén végtelen.

Miért rossz a visszavert hullám?

- Romlik a hatásfok
- Károsítja az adófokozatot
 - túlmelegedés
 - magasabb feszültség
- Kritikus SWR érték: 2-3 körül (10-25% visszaverődés)
- Elkerülhető:

Illesztőhálózat



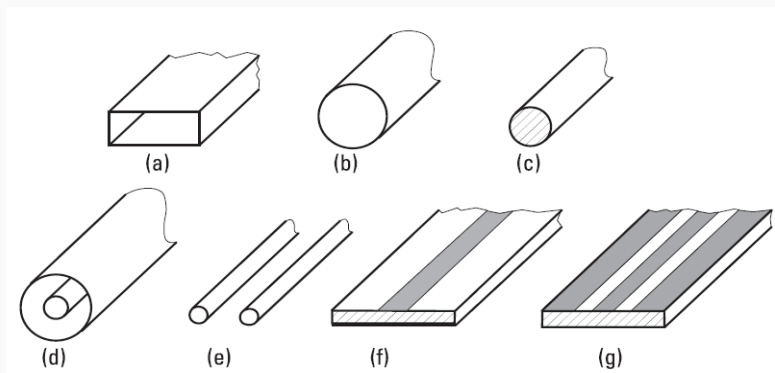
<https://coyotearc.net/>

A visszavert hullám számunkra nem hasznos, hiszen az antennára kevesebb teljesítmény jut, így kisebb területet fedhetünk le vele. Emellett, ha rossz SWR érték mellett hosszú adási ciklust folytatunk, az adót károsíthatjuk (a két jel összege nagyobb feszültségű is lehet, mint a kibocsátott jel, túlmelegedhetnek az alkatrészek).

A kritikus SWR értékek 2-3-as körül kezdődnek (ez 10-25% visszavert jel), e fölött az adót üzemeltetni hosszú távon káros lehet.

Elkerülhetők a visszavert hullámok, amennyiben a tápvonalat a hullámimpedanciájának megfelelő terheléssel zárjuk le, vagy a terhelést a hullámimpedancia értékére transzformáljuk egy illesztőhálózat segítségével.

Tápvonalak fajtái



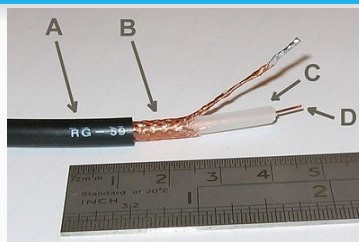
- a) Négyzetű csőtápvonal
- b) Kör keresztmetszetű csőtápvonal
- c) Dielektrikummal kitöltött csőtápvonal (üvegszál)
- d) Koax kábel
- e) Lecher vezeték
- f) Mikroszalag vonal
- g) Koplanár vonal

Sokféle mód létezik az elektromos jel továbbítására, ezekből a legelterjedtebbek vannak feltüntetve a dián.

A felső sorban láthatókkal a rádióamatőr szinte nem is találkozik, viszont az alsó sorban lévőkkel gyakran találkozhat.

Koax kábel

- Aszimmetrikus
- Korlátozott teljesítmény
- 50 vagy 75 ohm



PL-259 (Amphenol)



BNC



N csatlakozó



SMA

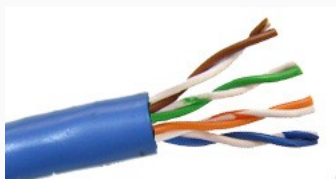
A koaxiális kábel aszimmetrikus (külső ere földpotenciálón van). Ez a leggyakrabban használt tápvezeték típus rádióamatőr körökben. Létezik belőle több hullámimpedanciájú típus is, de a legelterjedtebb az 50ohm-os. Különböző csatlakozó típusok különböző felső határfrekvenciával rendelkeznek. PL-259-es 300MHz-ig (ezt RH frekvenciákhoz használjuk általában) BNC 4GHz-ig, N csatlakozó 11GHz-ig, SMA 13GHz-ig.



A képen a solti adó antennája látható az őt tápláló koaxiális kábelvel.
(Az antenna nem a torony tetején van. A torony az antenna)

Macskalétra

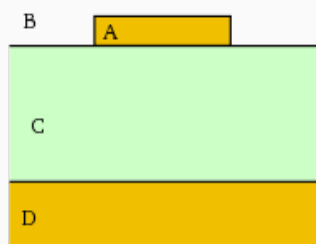
- Szimmetrikus
- Lecher-vezeték
- Néhány 100 ohm



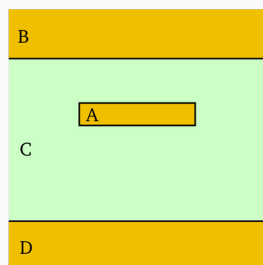
A szimmetrikus tápvonálnál a feszültség a két vezető között mérendő. Ez kicsit triviálisan hangzik, de vessük össze a coax kábelrel (aszimmetrikus tápvonál). Coax esetén is a két vezető (belső ér és köpeny) között mérjük a feszültséget, de itt a köpeny földpotenciálban van, vagyis a tápvonalon a feszültséget mindig a földpotenciálhoz képest mérjük. Szimmetrikus tápvonálnál nincs ilyen megkötés, vagyis egyik érnek sem kell a földhöz csatlakoznia (és jellemzően nem is csatlakozik).

Microstrip, stripline

- NYÁK lemezeken kialakítva
- Aszimmetrikus



Mikrostrip

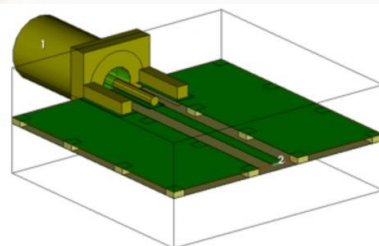
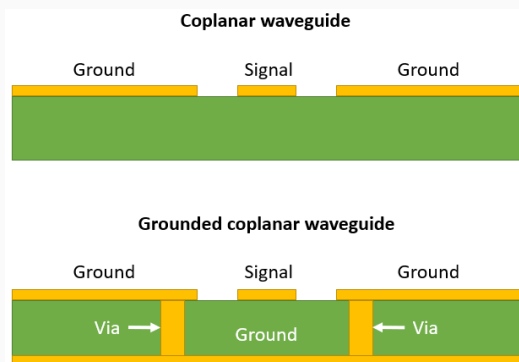


Stripline

NYÁK lemezen kialakított tápvezetőlétezés a legegyszerűbb a mikroszalag, vagy mikroszalag vonal. Ez is egy aszimmetrikus struktúra, és ez található meg leggyakrabban a nyomtatott áramkörökön.

Ennek egy fokkal „továbbfejlesztett” változata a stripline struktúra, ahol a vezető eret két földréteg között „zárják”, így az elektromágneses tér nem tud szétszóródni, így kevesebbet sugároz.

Koplanár tápvezeték



SMA csatlakozók rögzítésének egy módja

Egy másik használatos elrendezés a koplanár struktúra, ahol a meleg eret két oldalról veszi körül földréteg. Ez nem egy túl jó elrendezés abból a szempontból, hogy itt a meleg ér és a föld között létrejövő EM térnek nagy lesz a kiterjedése, vagyis sokkal érzékenyebb lesz kívülről érkező zavarokra.

Ezt úgy szokták orvosolni, hogy a meleg ér alá a NYÁK túloldalán elhelyeznek még egy földréteget, így lényegében házasítva a koplanár és a mikroszalag struktúrát. Így az EM tér a NYÁK dielektrikumában fog koncentrálni (a bal oldali ábrán világoszöld). A két földréteges szokás viákkal „összevarrni”, hogy csökkentsük az áramhurkok méretét. Ez is csökkenti a kívülről érkező zavarok hatását.

Ehhez az elrendezéshez viszonylag olcsón kapni SMA csatlakozókat, így egyedi gyártású NYÁK lemezeken előszeretettel használják.

Csőtápvonalak

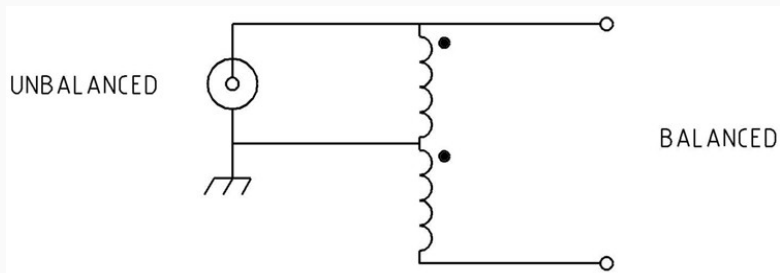
- Nagy teljesítmény
- Üregrezonátorok elve
- Kis veszteség
- A rádióamatőröknél ritkán
- Radarok, műholdas alkalmazások



Csőtápvonalakkal a rádióamatőr ritkán találkozók (ha egyáltalán)
Érdekességük viszont, hogy itt az EM tér egy zárt fém csőben, lényegében szabadtérben terjed. Ennek előnye, hogy nagy frekvenciákon kisebb veszteségű mint egy koax kábel, illetve viszonylag nagy teljesítmény szállítására is képes.

Balun transzformátor

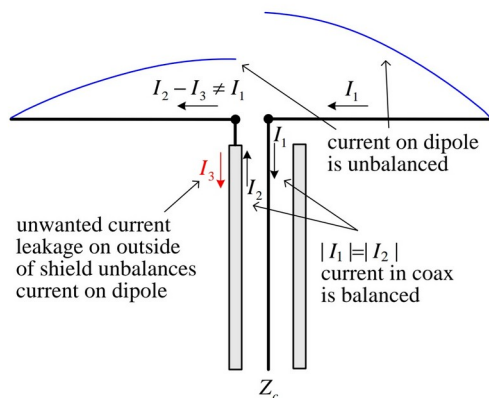
- Szimmetrikus - aszimmetrikus illesztés (BALanced - UNbalanced)
- Impedancia transzformáció
- köpenyáram megszüntetése coax kábelben



Előzőekben volt szó szimmetrikus és aszimmetrikus tápvonalakról, illetve hallhattunk szimmetrikus és aszimmetrikus antennákról.

Gyakorlatban sokszor használunk dipól antennákat, és ezeket coax kábelrel csatlakoztatni az adó-vevőkhöz. Ebben a példában az antenna szimmetrikus, míg a tápvonalunk aszimmetrikus. Ezeket nem lehet csak úgy összekötni, ilyenkor kell a kettő között valamilyen illesztés. Az ezt megvalósító elemet hívjuk balun (BALanced-UNbalanced) transzformátornak.

Miért kell balun?



- Nem kívánt köpenyáramok megszüntetése
- Nélküle romlik a távoltéri karakterisztika

Egy szimmetrikus antenna (pl. dipólus) két ágán azonosnak kell lennie az árameloszlásnak. Amennyiben egy koaxot közvetlenül csatolnánk rá, úgy a kábel külsején nem kívánt köpenyáramok folyhatnak (az ábrán I_3). Ennek elkerülésére végett szükséges a balun transzformátor használata.

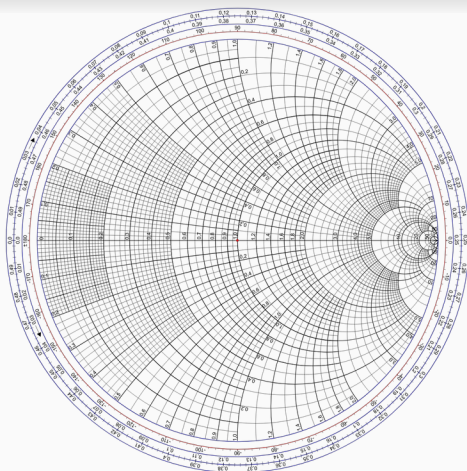
Tápvonalak egyéb felhasználásai

- Fázistolás
- Reaktáns tag - negyedhullámú tápvonal
 - Lezárva szakadással: Soros rezgőkör
 - Lezárva rövidzárral: Párhuzamos rezgőkör
- Impedancia transzformátor
- Balun



Mint a diasor elején láthattuk a tápvonalnak minden pontjában a feszültség szinuszosan változik. Ez nem csak a feszültségről, hanem az áramról is ugyanígy elmondható. Sőt, mi több, a tápvonal különböző pontjain a feszültség és az áram közötti fáziskülönbség más és más lehet, vagyis a tápvonal különböző pontjain benézve más és más impedanciát látunk (hiszen az impedancia a feszültség és az áram hányadosáról, valamint fázishelyzetéről ad nekünk információt). Ebből kiindulva, a tápvonal végén található lezárást a tápvonal hosszának megfelelő megválasztásával, átranszformálhatunk más impedanciába. Ebből érdemes megjegyezni, hogy egy negyed hullám hosszú tápvonal a végén található rövidzárat szakadásba transzformálja, és ez a másik irányba is működik.

Smith-diagram



- Grafikus eszköz bonyolult számításokra
- Impedanciák ábrázolása
- Tápvonal impedanciára gyakorolt hatásának vizsgálata
- Impedanciaillesztési feladatok megoldása

A tápvonalat lezáró terhelés hullámimpedanciához való illesztése, vagy a tápvonalnak az impedanciatranszformáló hatásának vizsgálata komoly és bonyolult matematikai problémák. Ezek egyszerűsítésére és vizualizálására Phillip H. Smith megalkotta a Smith-diagramot, mely megkönnyíti ezeket a számításokat. Joggal teszi fel a kérdést valaki, hogy gyors számítástechnikai eszközök mellett miért van szükség grafikus módszerekre. A problémák megoldásához, tulajdonképpen nincs, egy számítógép megoldja ezeket a matematikai példákat, mielőtt én előveszem a fiókból a Smith-diagramomat.

Viszont ez még mindig kitűnő eszköz bonyolult matematikai egyenletek és mechanizmusok vizuális leírására, így nagyon nagy segítség a háttérben folyó jelenségek megértésében. Ezért is sajnálatos, hogy a tanfolyam keretében nem tudunk ezzel a módszerrel bővebben foglalkozni, viszont minden érdeklődőt biztatok, hogy nézzen utána!

Kérdés, kérés, óhaj sóhaj?

A matektanárom sokszor ezzel zárta az óráit, és most én is így teszek.