

A rádiócsatorna

Az elektromágneses spektrum felosztása és felhasználása

Az 1.1. Táblázatban bemutatjuk a rádiótechnikában felhasznált elektromágneses spektrum jelenlegi felosztását és az egyes frekvenciasávok tipikus alkalmazási területeit (COLLIN 1985) :

1.1. Táblázat

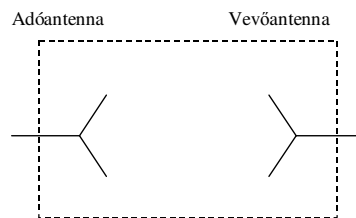
Frekvenciasáv	Tipikus alkalmazási terület
3 30 kHz	Navigáció, szonár
30 300 kHz	Rádió irányadók navigáció
300 3000 kHz	Középhullámú AM műsorszórás, tengeri rádiózás, iránymérés
3 30 MHz	Rövidhullámú műsorszórás, amatőr rádiózás,
30 300 MHz	Televíziós és FM műsorszórás, légi közlekedés irányítás, mobil rádió, navigáció
300 3000 MHz	Televíziós műsorszórás, mobil rádió, műholdas összeköttetések,
3 30 GHz	Légi radar, mikrohullámú összeköttetések, mobil rádió, műholdas összeköttetések, műsorszórás,
30 300 GHz	Radar, kísérleti célok

1. A rádiócsatorna

A rádiócsatorna definíciójához előbb tekintsük az antennák definícióját. Az antenna elektromágneses hullámok kisugárzására és vételére szolgáló eszköz. Az antenna rendszerteknikailag a tápvonal és a szabadtér közötti transzformátor, mely a tápvonalon hozzávezetett energiát kisugárzott elektromágneses hullámok (adóantenna), az antennára beeső elektromágneses hullámot pedig vezetett hullámmá alakítja (vevőantenna).

A rádiócsatorna alapvetően az a közeg, mely az adó- és vevőantenna között terjedő rádióhullámok fontosabb tulajdonságait (amplitudó, fázis, polarizáció, spektrum) meghatározza.

Rendszerteknikai szempontból a rádiócsatorna az adóantenna bemenete és a vevőantenna kimenete közötti négy-pólus (1. ábra).



1. ábra Rádiócsatorna

E négy-pólus csillapítása a szakaszcsillapítás, melynek definíciója a következő:

$$a_{sz} = 10 \log \frac{P_{be}}{P_{ki}}, \quad \text{dB} \quad (1)$$

ahol

$$\begin{aligned} P_{be} & \text{ az adóantennába betáplált teljesítmény,} \\ P_{ki} & \text{ a vevőantennából kivehető maximális hatásos teljesítmény} \end{aligned}$$

2. Hullámterjedési módok

Mint az előző fejezetben rámutattunk, a rádiócsatorna határozza meg az adó- és vevőantenna között terjedő rádióhullámok fontosabb tulajdonságait. A következőkben megvizsgáljuk, hogy milyen mechanizmusok útján valósulhat meg a hullámok terjedése. Az 1. ábrán összefoglaltuk a főbb hullámterjedési módokat.

(Ábra könyv 9.4. ábrája)

1. ábra Főbb hullámterjedési módok

A 1. ábrán bemutatott főbb hullámterjedési módok a következők

- közvetlen vagy direkt
- reflektált
- felületi
- troposzférikus szórással megvalósuló
- ionoszférikus hullámterjedés.

(A fizikai hatások közül beszélek még a reflexió, refrakció jelenségekről diffrakcióról és a Fresnel ellipszoidról)

Szabadtéri terjedés

Kialakulásának feltétele, hogy az adó- és vevőantenna között a terjedés akadálytalanul, szabad térben jöjjön létre. Akadálytalannak tekintjük a terjedést, ha a hullámfrontnak az a része terjed akadálytalanul, amely az energia nagyobb részét (98-99%-át) szállítja. (Fresnel zónák)

A G_A nyereségű adóantennába P_A teljesítményt betáplálva az antenna által a szabad térben előállított teljesítménysűrűség az antennától r távolságban

$$S_o = \frac{P_A G_A}{4\pi r^2} \quad (2.1)$$

Mivel az antenna távolterében a hullám síkhullámnak tekinthető, ezért az elektromos és mágneses térerősség vektorai itt egymásra és a terjedés irányára merőlegesen és fázisban vannak. Ekkor a teljesítménysűrűség a következőképpen írható fel

$$S = \frac{|\mathbf{E}_{csúcs}|^2}{240\pi} \quad (2.2)$$

A (2.1) és (2.2) képletekből az elektromos térerősség amplitúdója

$$E_{csúcs} = \frac{\sqrt{60P_A G_A}}{r} \quad (2.3)$$

Az S_o teljesítménysűrűség a vevőantennára jut, mely hatásos felületével arányos teljesítményt juttat a kimenetére. A vevőantennából maximálisan kivehető hatásos teljesítmény így:

$$P_{ki} = A_h \cdot S$$

A vevőantenna hatásos felülete felírható nyereségével és az üzemi hullámhosszal:

$$A_h = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_v$$

$$P_{ki} = A_h \cdot S = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_v \frac{P_A G_A}{4\pi r^2}$$

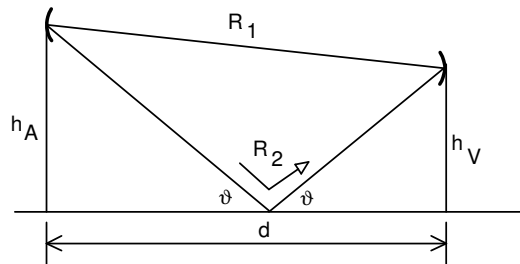
A szabadtéri csillapítás pedig így

$$a_o = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) - (G_A^{dB} + G_V^{dB}) \quad (2.4)$$

Mint a (2.3) és (2.4) képletekből látszik, az elektromos térerősség amplitudója az adóantennától mért távolsággal fordítottan, a szakaszcsillapítás pedig a távolság négyzetével egyenesen arányos.

Kétutas terjedés

Az adóantennát és a vevőantennát a sík földtől h_A és h_V magasságban elhelyezve az elektromágneses hullámok a két antenna között a 2.3. ábra alapján közvetlen és a földfelszínről reflektált úton jutnak el. A vételi térerősség a két komplex amplitudó összege a vevőantenna helyén.



2.3. ábra Kétutas terjedés

Mivel a gyakorlatban előforduló összeköttetéseknel $\vartheta \leq 5^\circ$, ezért a 2.2. ábrák alapján a földreflexió tényező értéke bármely polarizáció mellett, tetszőleges üzemi frekvencián jó közelítéssel -1 értékűnek tekinthető, így a továbbiakban

$$\Gamma_f = -1 \quad (2.10)$$

A vételi térerősség a közvetlen és földről reflektált hullám térerősségösszegeként írható fel

$$E_V = E_d + E_r \cong E_o + E_o \Gamma_f e^{-j\beta \Delta R} \quad (2.11)$$

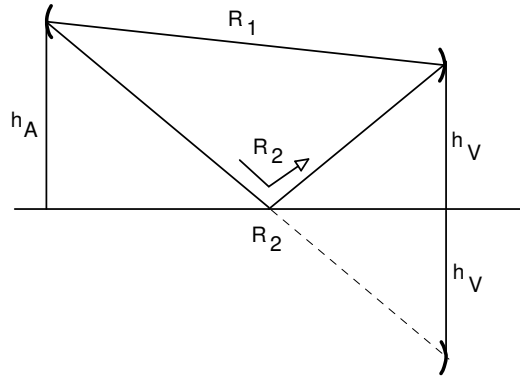
ahol

$\Delta R = R_2 - R_1$ a közvetlen és reflektált hullám úthosszának különbsége

Az úthosszak a tükrözési tétel értelmében a 2.4. ábra alapján

$$R_1 = \sqrt{d^2 + (h_A - h_V)^2} \quad (2.12)$$

$$R_2 = \sqrt{d^2 + (h_A + h_V)^2} \quad (2.13)$$



2.4. ábra Közvetlen és reflektált utak

A (2.12 és (2.13) képleteket az

$$\sqrt{1+x} \cong 1 + \frac{1}{2}x \quad ; \quad x \ll 1 \quad (2.14)$$

sorfejtés első két tagjának felhasználásával az alábbi alakban írhatjuk fel.

$$R_1 = d \sqrt{1 + \left(\frac{h_A - h_V}{d}\right)^2} \cong d \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_A - h_V}{d}\right)^2 \right] \quad (2.15)$$

$$R_2 = d \sqrt{1 + \left(\frac{h_A + h_V}{d}\right)^2} \cong d \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_A + h_V}{d}\right)^2 \right] \quad (2.16)$$

Innen az úthosszkülönbség

$$\Delta R = R_2 - R_1 \cong \frac{2h_A h_V}{d} \quad (2.17)$$

A (2.10), (2.17) képleteket a (2.11)-ba helyettesítve a vételi térerősség

$$E_V \cong E_o (1 - e^{-j\beta \Delta R}) \cong E_o (1 - e^{-j\beta 2 h_A h_V / d}) \quad (2.18)$$

$$E_V = E_o e^{-j\beta h_A h_V / d} 2j \sin\left(\beta \frac{h_A h_V}{d}\right) \quad (2.19)$$

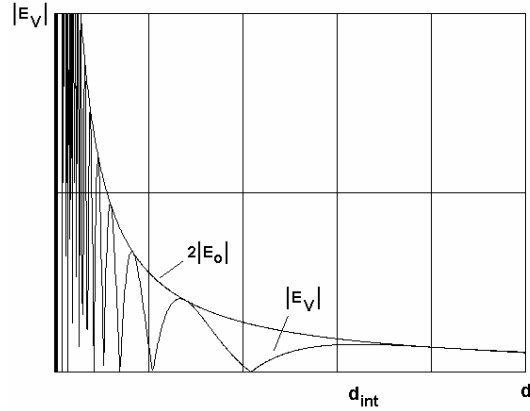
Mivel a térerősség abszolút értékét mérjük és a felhasználás szempontjából ez a fontos, ezért a fázistényezőket a továbbiakban nem vesszük figyelembe.

$$|E_V| = 2 E_o \left| \sin\left(\frac{2\pi h_A h_V}{\lambda d}\right) \right| \quad (2.20)$$

Vizsgáljuk meg a továbbiakban a térerősség változását mozgó és állandóhelyű összeköttetésekre.

Mozgó rádióösszeköttetés térerőssége

Az $|E_V|$ térerősséget ábrázoljuk a d szakasztávolság függvényében.



2.5. ábra Kétutas rádióösszeköttetés télerőssége

A rádiószakasznak az állandóhelyű antenna és d_{int} távolság közötti részét interferencia zónának nevezzük, ahol mint az a 2.5. ábrán jól látható, a télerősség minimum és maximumhelyei váltva követik egymást. Az interferencia zónán kívül a télerősség $1/d^2$ -tel arányos, szemben a szabadtéri rádióösszeköttetés $1/d$ -vel arányos télerősségével.

Kétutas terjedés szakaszcsillapítása

A szakaszcsillapítás levezetéséhez induljunk ki a szakaszcsillapítás definíciójából

$$a_{sz} = 10 \lg \frac{P_A}{P_V} \quad (2.24)$$

A P_V hatásos teljesítményt, mely a vevőantennából maximálisan kivehető, a vételi télerősségből írjuk fel.

$$|E_V| = 2E_o \sin\left(\beta \frac{h_A h_V}{d}\right) \rightarrow P_V = 4P_o \sin^2\left(\beta \frac{h_A h_V}{d}\right) \quad (2.25)$$

ahol

P_o a hatásos teljesítményt, mely a vevőantennából maximálisan kivehető szabadtéri terjedés mellett

A (2.25) összefüggést a (2.24)-ba helyettesítve és felhasználva, hogy

$$a_o = 10 \lg \frac{P_A}{P_o} \quad (2.26)$$

a kétutas hullámterjedés szakaszcsillapítását a szabadtéri csillapítással tudjuk kifejezni.

$$a_{sz} = a_o - 20 \lg \left[2 \sin\left(\beta \frac{h_A h_V}{d}\right) \right] \quad (2.27)$$

Az interferencia zónán kívül a szinuszfüggvény argumentumával helyettesíthető és a szabadtéri csillapítás (2.9) képletét felhasználva

$$a_{sz} = 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) - (G_A + G_V) - 20 \lg \left(2\beta \frac{h_A h_V}{d} \right)$$

$$a_{sz} = 20 \lg \left(\frac{d^2}{h_A h_V} \right) - (G_A + G_V) \quad (2.28)$$

Mint a (2.28) képletből látszik, a kétutas terjedés szakaszcsillapítása az interferencia zónán kívül független az üzemi frekvenciától és a távolság negyedik hatványával arányos.

Felületi hullámú terjedés

A felületi hullámok a jól vezető föld, és a levegő határfelülete mentén alakulnak ki, hullámhosszhoz képest alacsony antennamagasságok esetén, mivel ekkor a közvetlen és reflektált hullám kioltja egymást. A talaj jó vezetőképességű közegnek általában néhány kHz-től néhány MHz-ig tekinthető így a felületi hullámok ebben a frekvenciasávban tekinthető elsődleges terjedési módnak. A rádiócsatorna csillapítása ekkor közelítőleg arányos a szakasztávolság negyedik hatványával. A gyakorlatban használatos szakasztávolság néhány száz kilométer.

Troposzférikus szórás

A földi légkör törésmutatója (ahogy a refrakció jelenségénél bemutattuk) hosszú idő átlagában jól leírható módon szabályosan változik. Emellett a levegő törésmutatójában mindig előfordulnak diszkontinuitások is, melyek oka a levegő páratartalmának, hőmérsékletének és a légnyomásának hely szerinti gyors változása. Ezek a változások csekélyek, de nagy adóteljesítmény mellett jelentős szórt teljesítményt eredményeznek. A troposzférikus összeköttetések 200 MHz-től 10 GHz-ig működnek. Alacsonyabb frekvenciák használatának a szükséges nagy nyereségű antennák jelentős mérete szab határt, magasabb frekvenciákon pedig a szakaszcsillapítás válik túl nagygyá. A troposzférikus összeköttetések jellegzetessége a vételi térerősség jelentős ingadozása. Az összeköttetések tipikus távolsága néhány száz kilométer, rendszerint nem több, mint 800 km. A troposzférában rendszerint 10 km alatt jön létre az összeköttetések megvalósulásához szükséges nagyságú szórás.

Ionoszférikus hullámterjedés

Az ionoszfára a légkör 40 - 100 km-es földfelszín feletti magasságig terjedő rétegét képezi, melyben nagyszámú ionizált gáZRészecske található. Az ionizáció fő forrása a nap ibolyántúli és részecskesugárzása illetve a légkörbe jutó meteoritok ionozáló hatása. Mivel az ionizációt főképp a nap okozza ezért az ionoszféra állapota szorosan összefügg a naptevékenységgel. Az ionoszférikus rétegeket a térfogategységre eső szabad elektronok számával jellemzik.

Az elektronsűrűség helyi maximumai ill. inflexiós pontjai alapján D, E, F rétegeket különböztetünk meg. Az F réteg napközben két rétegre F1 és F2-re szakad, éjszaka viszont csak az F réteg jelentkezik.

A rádióhullámok a közeg törésmutatójának változása miatt a föld felé törnek.

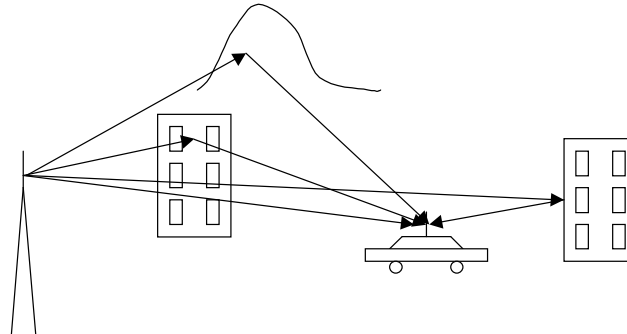
Minden réteghez tartozik egy maximális frekvencia, mely a rétegről még éppen visszaverődik és ezt az adott réteg kritikus frekvenciájának nevezzük. Az adott réteg határfrekvenciája az a frekvencia, melynél a kisugárzott impulzusok 50 %-a verődik vissza.

3. A mobil rádiócsatorna

A földi mobil hírközlő rendszerek legnagyobb része a 30 és 1000 MHz közötti (URH) sávban üzemel. Magyarországon polgári célra a 80 MHz, 160 MHz, 450 MHz, 900 MHz és 1800 MHz körüli frekvenciák használatosak.

Az antennából kilépő hullámot terjedése során számos fizikai hatás éri. A legfontosabb három hatást az alábbiakban foglaljuk össze.

Többutas terjedés



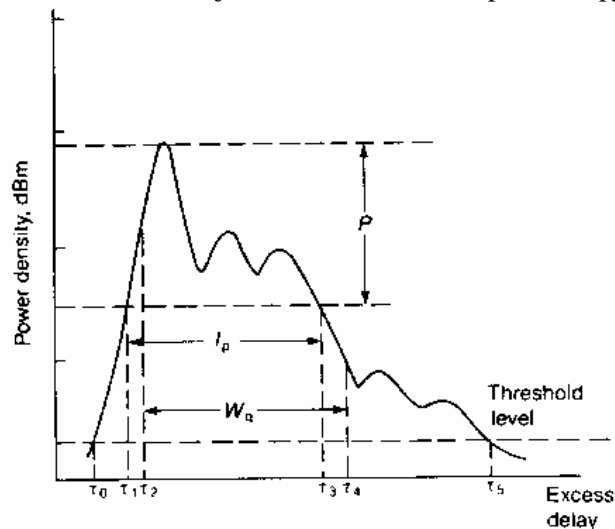
3.1. ábra Többutas terjedés

A többutas terjedést a hullámok dombokról, hegyekről, kiemelkedő épületekről történő visszaverődése vagy diffrakciója okozza, melynek következtében többféle úton, jelentős amplitúdó- és futási idő eltéréssel érkeznek a mobil készülék antennájához.

A vett jel időfüggvénye ezen diszkrét modell felhasználásával:

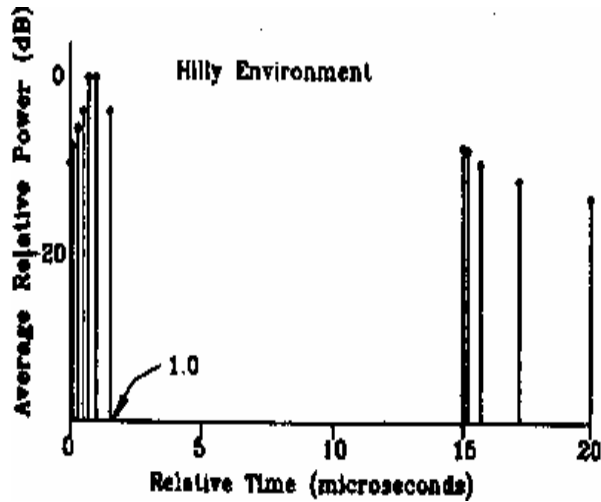
$$y(t) = \sum_m a_m(\tau) \cdot x(t - \tau_m)$$

Ha τ_m függvényében a_m -et ábrázoljuk, akkor a futási idő profilt kapjuk.



3.2. ábra Futási idő profil

A futási idő profil leggyakoribb közelítése negatív exponenciális függvénnyel történik.



3.3. ábra A GSM rendszer egyik teszt futási idő profilja
Egyes esetekben viszont (lásd fent) nem így közelítik.

Szóródás

A második hatás a mobil állomás közelében lévő épületekről, járművekről, növényzetről szóródó hullámok hatása. Ennek az a következménye, hogy a vevőantennára a vízszintes sík minden irányából véletlen beérkezési szögeloszlással, fázis- és amplitudó eloszlással hullámcsomagok érkeznek.

Ezen hullámösszetevők hozzájárulása a vett jelhez a következőképp írható:

$$u(t) = \text{Re}[r(t) \cdot e^{j\omega_c t}]$$

$$r(t) = A(t) \cdot e(t)$$

$$A(t) = \sum_{n=1}^N c_n \cdot e^{-j\Theta_n}$$

ahol

$e(t)$ a kisugárzott jel komplex burkolója

c_n a hullám n-edik szórt komponense

Θ_n a szórt komponens fázisa

ω_c a vivő körfrekvencia

Végezzük el a következő felbontást, továbbá tételezzük fel, hogy a beeső hullámok közel azonos amplitudójúak, fázisuk egyenletes eloszlású 2π -n, és N nagy.

$$\text{Re}\left[e^{j\omega_c t} \cdot \sum_n c_n \cdot e^{-j\Theta_n}\right] = \cos \omega_c t \cdot \sum_n c_n \cdot \cos \Theta_n - \sin \omega_c t \cdot \sum_n c_n \cdot \sin \Theta_n =$$

$$\cos \omega_c t \cdot I - \sin \omega_c t \cdot Q$$

Az előző feltételek alapján I és Q normális eloszlásúak,

$$\sigma^2 = E\{c_n^2\}$$

sűrűségfüggvényük pedig

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

A vett jel amplitúdója pedig $r(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}$ alapján

Rayleigh eloszlású,

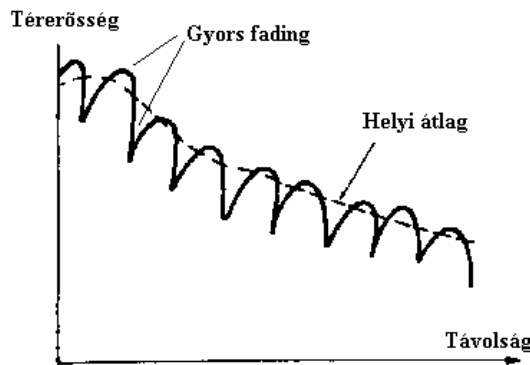
$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)}$$

sűrűségfüggvénnyel.

Az előző eredményeket akkor kapjuk, ha a mobil állomás és bázisállomás közötti átlátás nem valósul meg, ekkor ugyanis nincs a beérkező hullámkomponensek között domináns.

Ha az átlátás megvalósul, akkor az előző Rayleigh eloszlás helyett Rice eloszlás írja le a mobil állomás vett jelének amplitudó eloszlását.

A többutas terjedés és szóródás együttes hatása következtében a mobil állomás jele (térierősség az antennánál) a következőképp alakul a mobil mozgása következtében.



3.4. ábra Térierősség a távolság függvényében

Doppler hatás

A harmadik hatás a mobil állomás mozgásakor fellépő Doppler hatás. A Doppler frekvenciaeltolódás:

$$f_D = \frac{v_{mobil}}{c} f_c \cos \alpha = f_{Dmax} \cos \alpha$$

Mivel beépített környezetben a mobil állomás antennájára minden irányból érkeznek hullámok, ezért a Doppler hatás eredményeként a kisugárzott f_c frekvenciájú vivő $2f_{Dmax}$ szélességű folytonos sávva szélesedik.

A mobil állomás vett jele így a három hatás eredőjeként:

$$u(t) = \text{Re} \left[r(t) \cdot e^{j\omega_c t} \right]$$

$$r(t) = \sum_m A_m(t) \cdot e^{j(\omega_m t - \tau_m)}$$

$$A_m(t) = \sum_{n=1}^N c_{mn} \cdot e^{-j[\Theta_n + \omega_{mn} t]}$$

ω_{mn} Doppler körfrekvencia eltolódás

Zaj

Egy T abszolút hőmérsékletű passzív hálózat kapocspárján kivehető zajteljesítmény sűrűség (Planck törvény)

$$S(f) = \frac{hf}{e^{\frac{hf}{kT}}} \cong \frac{hf}{\left(1 + \frac{hf}{kT}\right) - 1} = kT$$

A közelítés a rádiófrekvenciás tartományban érvényes.

A kivethető zajteljesítmény a B zajsáv szélességgel

$$P_{zaj} = kTB$$

Átviteli rendszer jellemzése

A G teljesítményerősítésű átviteli rendszer kimeneti jel és zajteljesítménye

$$P_{ki} = GP_{jelbe} + GP_{zajbe} + P_{zaj}$$

ahol

P_{zaj} az átviteli rendszer által termelt zajteljesítmény.

A kifejezés felírásánál független jel- és zajforrásokat tételezünk fel.

Ha az átviteli rendszer bemeneti zajteljesítményét egy passzív elem szolgáltatja, akkor

$$P_{ki} = GP_{jelbe} + GkTB + P_{zaj} = GP_{jelbe} + GkB \left(T + \frac{P_{zaj}}{GkB} \right)$$

Az átviteli rendszer által termelt zaj hatását a bemenetre redukált zajhőmérséklettel (T_{red}) vesszük figyelembe.

$$P_{ki} = GP_{jelbe} + GkB(T + T_{red})$$

A bemenetre redukált zajteljesítmény a zajtényezővel is megadható, mely a kimenő és bemenő zajteljesítmény arányát jelenti $T_o=290K$ bemeneti zajforrás hőmérséklet mellett.

$$F = \frac{P_{zajki}}{GP_{zajbe}} \Bigg|_{T_o} = \frac{GkB(T_o + T_{red})}{GkBT_o} = 1 + \frac{T_{red}}{T_o}$$

Sorba kapcsolt átviteli rendszer eredő zajtényezője

(A könyv alapján)

Összetett zajforrás ekvivalens zajhőmérséklete

(A könyv alapján)