DR. KERPÁN ISTVÁN
Kandó Kálmán Villamosipari Műszaki Főiskola

A vezetékes jelátvitel idődimenziójú jellemzőiről

ETO 619.272:621.391.814.092

A téma minden lényeges részletében elméletileg kidolgozott, az irodalomban megtalálható. E cikkben megkíséreljük viszonylag egyszerű módon bevezetni, értelmezni és rendszerezni a jelátvitel idődimenziójú jellemzőit egy körülhatárolt — s a közleményből kitűnő —, gyakorlati céllal, kiegészítve a terminológiára tett javaslatokkal (lásd a T_d, T_k, T_s jelű mennyiségek megnevezéseit).

*

A jelek az információt általában valamely elektromos paraméter meghatározott időbeli lefutásával kódolva hordozzák. Egy konkrét jel $S(t)$ időfüggvénye helyettesíthető meghatározott (ω) frekvenciájú, (S_ω) amplitúdójú, ($\varphi\omega$) fázisszögű, $\bar{S}(\omega)=S_\omega \cdot \sin\,(\omega t+\varphi_\omega)$ alakú, a ($-\infty t<\infty$) tartományban értelmezett (állandósult) harmonikus időfüggvények általunk $\{\bar{S}(\omega)\}$-val jelölt (folytonos vagy diszkrét) halmazával. A halmaznak, azaz $S(t)$ frekvenciaspektrumának a jellemzőit a Fourier-analízis valamely módszerével lehet (elvben, s igen sok fontos esetre a gyakorlatban is) meghatározni.

A vezetékes jelátvitel idődimenziójú jellemzőinek a megvilágításához a jel időfüggvénye mellett annak frekvenciaspektrumát is tekintetbe kell venni.

Az idődimenziójú jellemzők két csoportját fogjuk tárgyalni.

Az első csoportba soroljuk a *terjedési időket*, úgy mint:

— a (kinematikai) definíció szerinti terjedési időt (T_d),

— a (valamely kitüntetett fázisú pontra tett) konvención alapuló terjedési időket (T_k) és

— a (keresztkorreláció alapján értelmezett) statisztikus terjedési időt (T_s).

A második csoportba soroljuk a *futási időket*, úgymint:

— a csoportfutási időt (T_c) és

— a fázisfutási időt (T_f).

A két csoport tagjai között általában legfeljebb statisztikus kapcsolat állapítható meg, egyszerű függvényszerű kapcsolat csak különleges feltételek mellett.

Tárgyalásunkban kizárólag egységnyi hosszúságú, hullámimpedanciákkal lezárt szimmetrikus vezetőket tartunk szem előtt, s így az összes tárgyalásra kerülő mennyiség (T_d, T_k, T_s, T_c, T_f, $\Delta\alpha$, ΔT_c) az egységnyi hosszúságú szimmetrikus vezető hullámjellemzői.

Ismertnek tételezzük fel az egységnyi hosszú vezeték $\alpha(\omega)$ hullámcsillapítását (mértékegysége: néper/hosszegység), valamint $\beta(\omega)$ hullám-fázisforgatását (mértékegysége: radián/hosszegység).

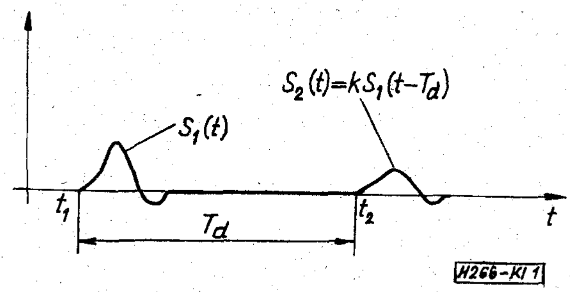
Az L hosszúságú, de ugyancsak hullámimpedanciákkal lezárt vezeték megfelelő jellemzői az egységnyi hosszúságú vezeték jellemzőiből L mérőszámmal való szorzással nyerhetők. A hullámimpedanciától eltérő üzemi lezárás esetén viszont az üzemi jellemzőket külön meg kell határozni.

A kinematikailag definiálható terjedési idő

Torzításmentesnek tekintjük a jelátvitelt az áramkör (esetünkben: egységnyi hosszúságú, hullámimpedanciákkal lezárt szimmetrikus vezető) bemenetére adott $S_1(t)$ jel és kimenetén megjelenő $S_2(t)$ jel közötti lineáris kapcsolat esetén, nevezetesen ha

$$S_2(t)=kS_1(t-T_d) \tag{1}$$

Lásd az 1. ábrát.



1. ábra

Ekkor a k konstansnak megfelelő erősítés (vagy csillapítás) alkalmazásával $S_2(t)$-ből $S_1(t)$ visszaállítható, természetesen T_d időbeli késedelemmel, mivel T_d időre egységnyi vezetékhossz befutásához volt szükség, T_d nem más, mint a jel tényleges terjedésisebességének (v) a reciproka, azaz a kinematikai definíciónak megfelelő terjedési idő.

Az (1) összefüggést „felboríthatják"

— a zajok,

— az áramkör nemlineáris torzítása és

— az áramkör lineáris torzítása.

A lineáris torzítás hatásaként is megváltoznak a jel harmonikus összetevői amplitúdóinak az arányai és/vagy megváltozik az összetevők kölcsönös fázishelyzete — a jel eredeti frekvenciaspektruma diszperziót szenved.

Vizsgáljuk meg a diszperziómentes jelátvitel feltételeit. A zajok és a nemlienáris torzítás hatásától itt eltekintünk.

Beérkezett: 1974. I. 9.

Amplitúdó feltétel

A jel spektrumában a harmonikus összetevők amplitúdóinak változatlan arányai megkövetelik, hogy az áramkör csillapítása frekvencia független legyen. Tehát:

$$\alpha(\omega) = \text{konstans}. \quad (2)$$

Fázisfeltétel

Ragadjuk ki a jel spektrumának ω_1 és ω_2 frekvenciájú összetevőit, melyek az áramkörön állandósult állapotban jelen vannak és az időben harmonikus függvényként változnak.

A (radián/szekundum mértékegységű) frekvencia (ω) a harmonikus jel szögargumentumának (radiánban kifejezett) egységnyi idő alatti megváltozását adja meg. Az $(\omega_2-\omega_1)$ különbség két harmonikus jel szögargumentumának relatív megváltozását, vagyis a két jel relatív fázisváltozását adja meg egységnyi idő alatt. T_d idő alatt pedig $(\omega_2-\omega_1)$. T_d relatív fázisváltozás következik be a két összetevő között.

A (radián/hosszegység mértékegységű) $\beta(\omega)$ vezeték jellemző ω frekvenciájú jel radiánban kifejezett fázistolását adja meg egységnyi vezetékhosszon. $\beta(\omega_2)-\beta(\omega_1)$ pedig a két harmonikus összetevő relatív fázisváltozása egységnyi vezetékhossz mentén.

Ha egységnyi vezetékhossz „bemenetéről" a „kimenetére" előre pillantva a vezeték mentén ugyanolyan relatív fázisváltozást találunk a két harmonikus összetevő között, mint amekkora a teljes jel egységnyi hosszon való áthaladásának T_d ideje alatt észlelhető az áramkör bármely pontján, akkor — mint belátható — a harmonikus összetevők relatív fázishelyzete a kimeneten minden pillanatban ugyanolyan, mint a bemeneten. E felismerésből:

$$(\omega_2-\omega_2)T_d = \beta(\omega_2) - \beta(\omega_1). \quad (3)$$

Ha két változó differenciái között lineáris a kapcsolat — mint (3)-ban, T_d konstans lévén —, akkor a változók között is lineáris kapcsolatnak kell fennállnia. Tehát:

$$\beta(\omega) = \omega \cdot T_d + \beta(0)$$

Tudjuk, hogy szimmetrikus vezetékeknél $\beta(0)=0$, s ezzel a diszperziómentes jelátvitel fázisfeltétele:

$$\beta(\omega) = \omega \cdot T_d = \omega \cdot \text{konstans} \quad (4a)$$

A (4*a*) feltétel $\beta(0)=0$ kikötéssel így is megfogalmazható:

$$\frac{d\beta}{d\omega} = T_d = \text{konstans}. \quad (4b)$$

És így is:

$$\frac{d\beta}{d\omega} = \frac{\beta}{\omega}. \quad (4c)$$

A nyert összefüggések az egységnyi vezetékhosszra vonatkoztatott hullám-terjedési idő meghatározására is alkalmasak, ha (legalább a jel frekvenciasávjában) teljesülnek a diszperzió mentes átvitel (2) és (4) feltételei.

Ha $\alpha \neq$ konstans és/vagy $\beta \neq \omega$. konstans, akkor az áramkörnek lineáris torzítása van, a jel diszperziót szenved a vett jel alakja eltér (és nem csak egy konstans erősítés, vagy csillapítás erejéig!) az adott jel alakjától és (a kinematikailag definiált) T_d terjedési idő nem értelmezhető.

A futási időkről

A (4*b*)-ben megjelenő differenciálhányados létezhet akkor is, ha T_d nem értelmezhető.

Ez a differenciálhányados a *csoportfutási-idő:*

$$T_c = \frac{d\beta}{d\omega} \quad (5)$$

A (4c)-ben megjelenő hányados — mely csak a (2) és (4) kikötések teljesülése mellett egyenlő T_c-vel, egyébként nem — a *fázisfutási idő:*

$$T_f = \frac{\beta}{\omega} \quad (6)$$

A $\beta(\omega)$-ból meghatározott T_c és T_f éppen úgy az egységnyi hosszú vezeték hullámjellemzője, mint $\beta(\omega)$.

Ha lineáris torzítás nincs [és $\beta(0)=0$], akkor — és csakis akkor —:

$$T_d = T_c = T_f = \text{frekvencia független konstans}. \quad (7)$$

A konvencionális jelterjedési idő

Lineáris torzítás esetén az átviendő jel frekvenciasávjában

$$\alpha(\omega) \neq \text{konstans}$$

és/vagy

$$T_c \neq \text{konstans}.$$

A lineáris torzítás mértékeként (egyéb mértékek, pl. a „szem-ábra" jellemzői vagy a PAR-szám mellett) a csillapításnak és a csoportfutási időnek az átviendő jel (ω_{min}; ω_{max}) frekvenciasávján belüli legnagyobb változását szokás használni. Ezen mértékek megnevezése:

csillapítás-torzítás

$$\Delta\alpha = \alpha_{max}(\omega) - \alpha_{min}(\omega), \quad \text{ha:} \quad \omega_{min} < \omega < \omega_{max} \quad (8)$$

illetve

futási-idő-torzítás

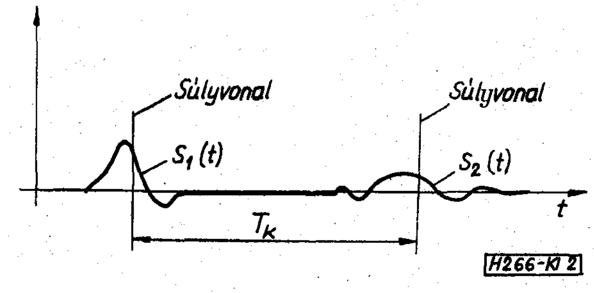
$$\Delta T_c = T_{c\,max}(\omega) - T_{c\,min}(\omega), \quad (9)$$

ha:

$$\omega_{min} < \omega < \omega_{max}$$

$\Delta\alpha$ és ΔT_c szintén az egységnyi hosszú, hullám impedanciákkal lezárt szimmetrikus vezeték jellemzői.

A lineáris torzítás diszperziót okoz: az adott jeléhez képest a vett jelben megváltoznak a harmonikus összetevők arányai és/vagy relatív fázishelyzetük, a



2. ábra

vett jel nemlineáris függvénye (1) értelmében az adott jelnek (lásd 2. ábra). A jel terjedési idejét ilyen körülmények között csak úgy értelmezhetjük, ha megállapodásszerűen $S_1(t)$ és $S_2(t)$ valamely azonosítható fázishelyzetű pontját kitüntetjük. A kitüntetett fázishelyzetű pont terjedési idejét neveztük el a T_k-val jelölt *konvencionális terjedési időnek.*

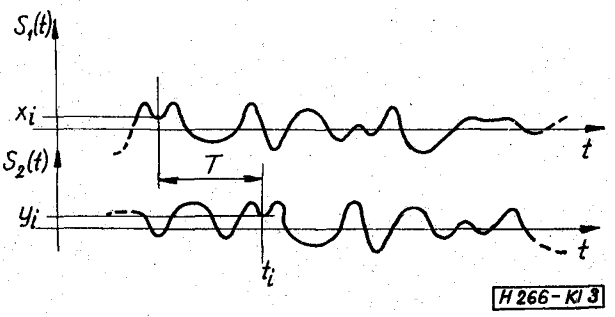
T_k-t szokásos a jel súlyvonalának terjedési idejeként értelmezni. Azonban lehet kitüntetni a jel más fázishelyzetű pontjait is.

Azt, hogy adott $S_1(t)$-ből pontosan milyen lefutású $S_2(t)$ lesz, a lineáris torzítás mértékeiből még ún. determinisztikus jelekre sem lehet pontosan megállapítani. Ha $S_1(t)$ ismert paraméterű egyszerűbb impulzusjel vagy bekapcsolási folyamat, akkor $\alpha(\omega)$ és $\beta(\omega)$ ismeretében pl. a Laplace-transzformáció segítségével lehet $S_2(t)$-t meghatározni. Véletlenszotochasztikus jeleknek pedig legfeljebb a statisztikus jellemzőire (pl. véletlen impulzuskombinációk impulzushiba arányára) lehet statisztikus jellegű (1-nél kisebb valószínűséggel érvényes) megállapításokat tenni a nemlineáris torzítás jellemzőiből (pl. a futási idő-torzításból és a csillapítás-torzításból).

Véletlenszerű jelsorozatra nézve a konvencionális futási idő is véletlen ingadozásokat mutat (adott lineáris torzítású hálózaton). Ez esetben T_k is csak statisztikus jellemzőként értelmezhető (meghatározható pl. súlyozott középértéke, ingadozása stb.)

A statisztikus terjedési idő — a keresztkorreláció alapján

Véletlen jelsorozat elemeinek véletlen ingadozást mutató T_k értékeit statisztikusan felvenni és értékelni igen nehézkes. A digitális számítástechnika és a korrelátor-műszerek megjelenése nyomán célszerűbb a



3. ábra

keresztkorreláció alapján értelmezett T_s statisztikus terjedési idő megállapítása.

Pillantsunk a 3. ábrára. $S_1(t)$-nek $(t_i - T)$időpontokban mutatott értékeit x_i-vel, S_2-nek (t_i) időpontokban felvett értékeit y_i-vel jelöljük.

Ha kellően nagy (N) számú t_i időpontot kiválasztunk (akár véletlenszerűen, akár oly módon, hogy elég kicsiny Δt lépésekként az időtengelyen előre haladunk), s mindegyikhez (az előbbiek szerint) megállapítjuk az x_i és y_i értékeket, akkor két számhalmazt, nevezetesen

$$\{x_i\} \quad \text{és} \quad \{y_i\} \quad \text{halmazokat nyerjük.}$$

A tapasztalat szerint aktív hírközlőcsatornák jelei ún. stacionárius jelek. Tulajdonságaik közé tartozik az, hogy bármikor kezdjük is el a vizsgálatot (feltéve, hogy elég hosszú ideig folytatjuk azt és elég sok pillanatérték mintát veszünk), adott N mintaszám és T időköz mellett csaknem ugyanolyan x_i, ill. y_i tagokból álló $\{x_i\}$, ill. $\{y_i\}$ halmazokat kapunk (csak a konkrét x_i, ill. y_i értékek sorrendjei változnak). Továbbá: a T mintavételi időköz nagysága sem változtat az $\{y_i\}$ halmaz elemein, legfeljebb az elemek sorrendjén.

Más a helyzet az összetartozó x_i és y_i értékek szorzatának $\{x_i \cdot y_i\}$ halmazával, ezen halmaz tagjainak $\sum_i x_i \cdot y_i$ összegével és az $x_i \cdot y_i$ szorzatok

$$R_{xy}(T) = \frac{1}{N} \sum_i x_i y_i \tag{10}$$

átlagával. Mindezek (változatlan t_i időpontok és N mintaszám mellett) már függenek a T mintavételi időköz nagyságától.

Tekintsük az $\{x_i\}$ és az $\{y_i\}$ halmazok összetartozó (t_i, illetve $t_i - T$ időpontban felvett) elempárjainak mindegyikét egy-egy derékszögű parallelogramma egymásra merőleges két oldalának. Ismeretes, hogy (két, egymásra merőleges oldal összegének azonossága mellett) a legnagyobb területet akkor kapjuk, ha a két (x_i és y_i nagyságú) oldal egyenlő (a négyzet a maximális területű derékszögű parallelogramma). Arra az egyszerű esetre, melyben

$$S_2(t) = S_1(t - T_d),$$

fentiek alapján közvetlenül belátható:

$$R_{xy}(T) = \frac{1}{N} \sum_i x_i y_i \text{ akkor maximális, ha } T = T_d.$$

Ha:

$$S_2(t) = kS_1(t - T_d)$$

és

$$k \neq 1,$$

akkor megfelelő erősítés (csillapítás) alkalmazásával visszajutunk az iménti egyszerű esethez.

Mi a helyzet akkor, ha a lineáris torzítás és a véletlen zajok miatt (de itteni vizsgálódásunk szempontjából elhanyagolhatóan kismértékű nemlineáris torzítás mellett)

$$S_2(t) \neq kS_1(t - T_d)?$$

Ebben az esetben T_d nem értelmezhető és az

$R_{xy}(T)=\frac{1}{N}\sum x_i y_i$ maximális értékéhez tartozó

$$T=T_s$$

időközt nevezzük *statisztikus terjedési időnek.*

Igazolható: T_s az az időintervallum, mellyel $S_2(t)$-t az időtengelyen visszatolva $S_1(t)$ és $S_2(t)$ különbségei négyzeteinek az átlagértéke a legkisebb, vagyis $S_2(t)$ „statisztikusan" akkor hasonlít leginkább $S_1(t-T)$-hez, ha $T=T_s$.

Bizonyítás

$S_1(t-T)$-t pillanatértékeinek $\{x_i\}$ diszkrét halmaza, $S_2(t)$-t pedig pillanatértékeinek $\{y_i\}$ diszkrét halmaza reprezentálja ($t=1, 2, \ldots N$, és a statisztikus kiértékelés szempontjából N elég nagy).

Keressük annak a feltételét, hogy $S_1(t-T)$ és $S_2(t)$ különbségei négyzetének az átlaga, vagyis az

$$\frac{1}{N}\sum_i (x_i-y_i)^2=\frac{1}{N}\sum_i (x_i^2+y_i^2)-2\frac{1}{N}\sum_i x_i y_i$$

kifejezés minimális legyen. Vizsgáljuk a kifejezésnek az egyenlőség jobb oldalán álló alakját. Ez (adott x_i és y_i értékek mellett) akkor minimális, ha az (első tagból levonandó) második tagban szereplő

$$\frac{1}{N}\sum_i x_i y_i=R_{xy}(T)$$

mennyiség maximális. Márpedig (definíciónk alapján) $T=T_s$, ha $R_{xy}(T)$ maximális.

Az $R_{xy}(T)$ mennyiség az $S_1(t)$ és $S_2(t)$ (esetünkben: adott és vett jel) közötti keresztkorrelációs függvény. Felvételére, regisztrálására (változó T érték mellett) alkalmas korrelátorok a világpiacon néhány év óta kereskedelmi forgalomba kerültek. Segítségükkel a T_s statisztikus jelterjedési idő a

$$T=T_s,$$

feltéve, hogy:

$$R_{xy}(T_s)=[R_{xy}(T)]_{max} \qquad (11)$$

összefüggés alapján közvetlenül leolvasható.

T_s ilyen méréséhez mind az adott, mind a vett sztochasztikus véletlen jelet be kell vezetni a korrelátorba.

IRODALOM

[1] *Simonyi Károly:* Elméleti villamosságtan. Tankönyvkiadó, 1955.

[2] *Géher Károly:* Lineáris hálózatok. Műszaki Könyvkiadó, 1968.

[3] *Lajtha György:* Távközlő-hálózatok elmélete és tervezése. Műszaki Könyvkiadó, 1968.

[4] *R. W. Lucky—J. Salz—E. J. Weldon:* Adatátvitel. Műszaki Könyvkiadó 1973.

[5] *Csernoch János:* Csoportfutási idő méréstechnikája. BHG Műszaki Közlemények, 1968. 4. sz.

[6] *Mezőcsáti Lászlóné:* Hullámforma-torzulás mérése PAR mérővel. Posta Kísérleti Intézet Közleményei, XI/2. kötet, 1971.

[7] The Model 3721A Correlator. Field Training Manual. Hewlet-Packard Limited. May 1970.