

AZ IMPULZUSKOMPRESSZIÓ RADARTECHNIKAI ALKALMAZÁSA

Szabó Gyula mérnök őrnagy*
Teréki Csaba mérnök százados*
***egyetemi tanársegéd**
Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem
Vezetés- és Szervezéstudományi Kar
Fedélzeti rendszerek tanszék

E cikk az impulzuskompresszió elméleti alapjait, valamint az impulzus kompressziós eljárást alkalmazó lokátor előnyeit és hátrányait mutatja be.

BEVEZETÉS

Az impulzuskompresszió megértésének érdekében vizsgálatunk kiinduló pontja legyen egy kereső lokátor egyenlete, s ezen alapegyenletet felhasználva határozzuk meg, mi módon növelhető a lokátor felderítési távolsága és radiális felbontása!

$$D_0(1) = \frac{\sigma}{k4\pi} \frac{T_r}{\Psi_s R_{\max}^4} \frac{P_a A_{\text{eff}}}{T_\Sigma} \frac{1}{L_\Sigma} \quad (1)$$

Ahol:

$D_0(1)$ — egy impulzus alapján történő döntés (adott minőség és adott döntési eljárás esetén);

σ — hatásos visszaverő felület

k — Boltzmann állandó $\left(k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{W}}{\text{HzK}} \right)$;

Ψ_s — a letapogatott térszög tartomány;

R_{\max} — maximális hatótávolság;

T_r — antenna körülfordulási ideje;

- T_{Σ} — a vevő bemenetére redukált rendszer zajhőmérséklete;
 P_a — az adó átlagteljesítménye;
 A_{eff} — a radar antenna hatásos felülete;
 L_{Σ} — a radar összes veszteség;

Kifejezve az alapegyenletből a hatótávolságot, látható, hogy a hatótávolság az adó átlagteljesítményének negyedik gyökével arányos:

$$R_{\text{max}} = \text{konst} \sqrt[4]{P_a} \quad (2)$$

Az alapegyenlet alapján megállapíthatjuk, hogy adott detekciós minőség mellett, adott antenna esetén, melynek a körülfordulási ideje is meghatározott, a hatótávolság növelésére a következő lehetőségek adódnak:

- csökkenteni a vevő bemenetére redukált zaj hőmérsékletét;
- csökkenteni a radar veszteségeit;
- növelni az adó átlagteljesítményét;
- növelni az antenna körülfordulási idejét.

Az első két szempont a tervezésnél maximálisan figyelembe van véve, így itt további nyereség elérésére nincs mód. Az antenna körülfordulási idő növelése csökkenti a plotok adatfrissítési idejét, ami a manőverező célok követésének igénye miatt nem megengedhető. Látszólag egyetlen lehetőségünk marad, az adó átlagteljesítményének növelése.[2]

Mi módon növelhető az adó átlagteljesítménye?

- növelni kell az impulzus csúcsteljesítményét;
- konstans impulzushossz mellett növelni az impulzus ismétlődési frekvenciát;
- az impulzus hosszának a növelése.

Az impulzus csúcsteljesítményét műszaki okok miatt nem lehet növelni. (Magnetron alkalmazásával ugyan növelhető lenne a teljesítmény, de ez az eszköz nagy mértékben megnehezítené az aktív zavarvédelmet.) Ha konstans impulzushossz mellett növeljük az impulzus ismétlődési frekvenciát, akkor az egyértelműségi hatótávolságot csökkentjük le a kívánt távolság alá.

Az egyértelműségi hatótávolság:

$$R \leq \frac{cT_i}{2} \quad (3)$$

Ahol:

- c — a fénysebesség;
- T_i — szomszédos kisugárzott impulzusok közti idő.

Ebből az következik, hogy az ismétlődési frekvencia értéke felülről korlátos.

$$f_i \leq \frac{1}{T_{\min}} = \frac{c}{2R_{\max}} \quad (4)$$

Ahol: f_i — ismétlődési frekvencia

Tehát ezen a módon nem szabad növelni az átlagteljesítményt. Ha az impulzus hosszát növeljük, akkor romlik az impulzuslokátor radiális felbontása:

$$\delta_r = \frac{c\tau_a}{2} \quad (5)$$

Ahol:

τ_a — a kisugárzott impulzus hossza,

δ_r — radiális felbontás,

Látszólag újra zsákutcába kerültünk, azonban általánosabban vizsgálva a radar radiális felbontását, az nem az alkalmazott impulzus hosszától, hanem az elfoglalt RF sáv szélességtől függ. Hiszen egyszerű impulzus modulált esetben az elfoglalt sáv szélesség:

$$B = \frac{1}{\tau_a} \quad (6)$$

Így a radiális felbontás a következő formában írható le:

$$\delta_r = \frac{c}{2B} \quad (7)$$

Ahol: B — kisugárzott jel sáv szélessége.

A megoldást az impulzuskompressziós eljárást alkalmazó lokátor adja. Az impulzus sáv szélességét úgy tudjuk megnövelni, ha a kisugárzásra kerülő impulzuson belül valamilyen szubmodulációt alkalmazunk.

A vevőben használt komprimáló szűrő kimenetén az eredeti impulzusnál jóval rövidebb impulzus fog megjelenni, amiből egyértelműen következik a jobb radiális felbontás. (A szűrőt természetesen úgy kell megválasztani, hogy az egész jelre nézve illesztett legyen.)

Az illesztett szűrő komprimálja az eredetileg hosszú jelet a rajta lévő moduláció alapján. Ez a kompresszió a jel-zaj viszony javulását eredményezi, amit úgy valósít meg az illesztett szűrő, hogy a jelre nézve koherens, míg a zajra nem koherens integrálást valósít meg. Ennek következtében a jel-zaj viszony a kompressziós arány (CR) szeresére növekszik.

A kompressziós arány definíciója:

$$CR = \frac{\tau_a}{\tau_c} \quad (8)$$

Ahol:

τ_c — a komprimált impulzus hossza;

CR — kompressziós arány;

B sávszélesség esetén a komprimált impulzus hossza:

$$\tau_c = \frac{1}{B} \quad (9)$$

Tehát a kompressziós arány:

$$CR = \frac{\tau_a}{\tau_c} = \tau_a B \quad (10)$$

Megállapíthatjuk, hogy hosszú impulzusokkal kis adó-csúcsteljesítmény esetén is növelhetjük a hatótávolságot, de a radiális felbontásnak megfelelő sávszélességű szubmodulációt kell alkalmazni.

Az impulzuskompressziós eljárások alkalmazásának következményei:

- összetett modulátor;
- összetett illesztett szűrő;
- koherens jelfeldolgozás,
- fokozott érzékenység a doppler eltolásra;
- a minimális felderítési távolság növekedése.

Az impulzuskompresszió előnyei:

- igen jó távolsági felbontás;
- redukált csúcsteljesítmény;
- erős védelem aktív és passzív zavarok ellen;
- flexibilis felbontás.

A főbb impulzuskompressziós eljárások a következők:

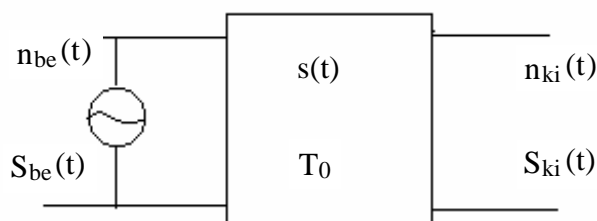
- Analóg modulációk;
 - lineáris frekvencia moduláció(LFM);
 - nemlineáris frekvencia moduláció(NLFM);
- Diszkrét kódolású jelek;
 - Fázis moduláció;
 - BiPhase moduláció;
 - PolyPhase moduláció;

- Modulálatlan vivőjű impulzus sorozatok;
- Frekvencia modulált impulzusok.

AZ IMPULZUSKOMPRESSZIÓ

AZ IMPULZUSKOMPRESSZIÓ ELMÉLETI ALAPJAI

Egy lokátort megvizsgálva, az adó, az antenna és a tápvonalrendszer paramétereit állandónak véve azt mondhatjuk, hogy a célparaméterek meghatározásának minősége a vevőben dől el. Egy vevőt igen sok paraméterrel lehet jellemezni, de talán az egyik legfontosabb a vevő kimenetén mérhető jel-zaj viszony (SNR), hiszen a hasznos információt maga a jel hordozza, a mindig jelen lévő zaj pedig megnehezíti az információ kinyerését. A vevőt úgy kell kialakítani, hogy adott pillanatban maximális jel-zaj viszonyt hozzon létre. E maximális jel-zaj viszonynak az elérhető legnagyobbnak kell lennie. A vevőt ezen feltételek mellett optimálisnak tekinthetjük. Ekkor a vevő egy szűrő, mely a visszavert jelhez illesztve van, ezért használjuk az illesztett szűrő elnevezést. Az illesztett szűrő tulajdonságainak meghatározása 1. ábra segítségével történik



1. ábra

Ahol:

$s_{be}(t)$ — a hasznos jel időfüggvénye;

$n_{be}(t)$ — a zaj időfüggvénye;

$s(t)$ — a szűrő átmenetifüggvény;

T_0 — a szűrő késleltetése.

A kimeneti jelteljesítmény (1Ω -on).

$$P_{\text{jel,ki}} = s_{\text{ki}}^2(T_0) = \left[\int_0^{T_0} s(T_0 - \tau) * h(\tau) d\tau \right]^2 \quad (11)$$

A kimeneti zajteljesítmény pedig feltételezve, hogy $n(t)$, $N_0/2$ konstans teljesítménysűrűségű fehérzaj.

$$P_{\text{zaj,ki}} = \sigma^2 = \frac{N_0}{2} \int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau \quad (12)$$

A jel-zaj viszony definíciója alapján.

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{jel,ki}}}{P_{\text{zaj,ki}}} = \frac{s_{\text{ki}}^2(T_0)}{\sigma^2} = \frac{\left[\int_0^{T_0} s(T_0 - \tau) * h(\tau) d\tau \right]^2}{\frac{N_0}{2} \int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \quad (13)$$

E kifejezés maximumát keresve felhasználjuk a Schwarz-Bunyakovszkij egyenlőtlenséget, melynek általános alakja:

$$\left(\int_{-\infty}^{\infty} f(x)g(x)dx \right)^2 \leq \int_{-\infty}^{\infty} f^2(x)dx \cdot \int_{-\infty}^{\infty} g^2(x)dx \quad (14)$$

Így az összefüggés az alábbi alakú lesz:

$$\text{SNR} \leq \frac{\int_0^{\infty} s^2(T_0 - \tau) d\tau \cdot \int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau}{\frac{N_0}{2} \int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \quad (15)$$

Maximális érték akkor adódik, ha:

$$h(t) = k s(T_0 - t) \quad (16)$$

Ezen összefüggés azt jelenti, hogy a jel csak amplitúdóban változhat és időbeli eltolást szenvedhet. Ha áttérünk frekvencia tartományra, akkor megkapjuk a szűrő átviteli függvényét.

$$H(\omega) = ks^*(\omega)e^{-j\omega T_0} \quad (17)$$

Az átviteli függvény alapján megállapítható, hogy a vevő akkor biztosít optimális jelátvitelt, ha átviteli függvénye komplex konjugáltja a visszavert (kiszűrt) jel Fourier-transzformáltjának.

Egy szűrőt leginkább a komplex átviteli függvénye jellemez:

$$W(j\omega) = |W(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)} \quad (18)$$

ahol:

$|W(j\omega)|$ — az amplitúdó karakterisztika;

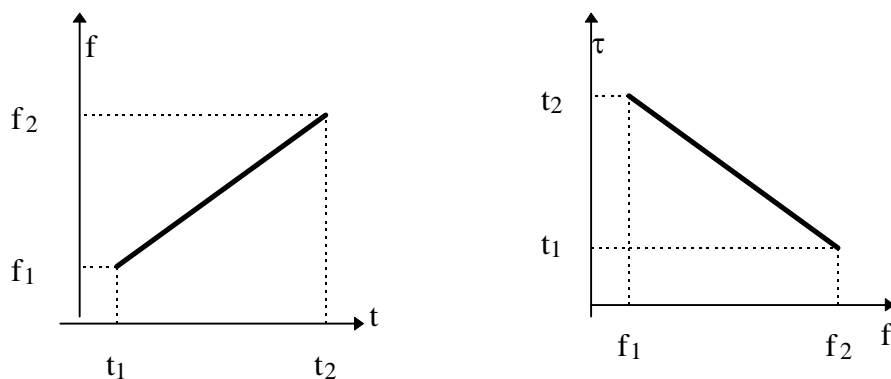
$\varphi(\omega)$ — a fáziskarakterisztika.

Van még egy fontos jellemző: $\tau(\omega)$, a csoportfutási idő, mely a fáziskarakteristikából származtatható:

$$\tau(\omega) = -\frac{d}{d\omega}\varphi(\omega) \quad (19)$$

Belátható, hogy ha a szűrő $\varphi(\omega)$ karakterisztikája frekvenciában nemlineárisan változik, akkor $\tau(\omega)$ karakterisztikája sem lesz a frekvenciában konstans értékű, vagyis különböző frekvenciákon más és más csoportfutási idővel jut át a szűrő bemenetére adott jel.

Tételezzük fel, hogy a visszavert jel egy olyan impulzus, melynek frekvenciája az idővel lineárisan növekszik. Ezt a jelet visszük rá egy olyan szűrőre, melynek futási idő karakterisztikája olyan, hogy a frekvencia növekedésével egyre kisebb késleltetési idővel rendelkezik. Ez látható a 2.ábrán.



2. ábra

Az ilyen szűrő a magasabb frekvenciájú jelkomponenseket kisebb késleltetési idővel, míg az alacsonyabb frekvenciájúakat jobban késleltetve engedi át, így az impulzushossz kisebb lesz, vagyis az impulzus komprimálódik. A kompresszió létrehozásához a kisugárzott jelet modulálni kell. A példa egy lineáris frekvencia-modulációt mutatott be. (Ezen kívül számos más modulációs eljárás létezik.)

AZ IMPULZUSKOMPRESSZIÓS RADAR

Az impulzuskompresszió magában foglalja a hosszú, kódolt impulzus kisugárzását, és a visszavert jelnek relatív keskeny impulzussá való alakítását. Az impulzuskompressziós radar megnövelt detekciós képességét úgy éri el, hogy közben megtartja a keskeny impulzusú radar felbontóképességét.

Előnyei:

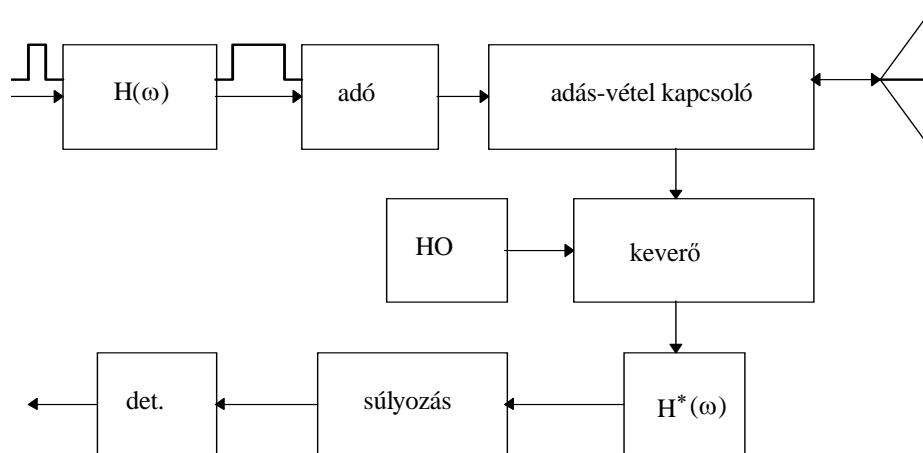
- a hosszú impulzusok kisugárzása lehetővé teszi a radar átlagteljesítményének jobb kihasználását;
- a nagy teljesítményű adó jelek elkerülhetők;
- a kisugárzott átlagteljesítményt a T_i növelése és a radar egyértelmű hatótávolságának csökkentése nélkül érhető el;
- a megnövelt doppler felbontó képesség;
- a radar zavarvédettebb lesz a kóddal nem egyező jelekkel szemben.

A kisugárzásra kerülő jel előállítható keskeny impulzusból. A keskeny impulzus precíz fáziskapcsolattal rendelkező, nagyszámú frekvencia komponenset tartalmaz. Ha a relatív fázisokat egy fázistorzító szűrő megváltoztatja, a frekvenciakomponensek eredőben nyújtják, vagyis széthúzzák az impulzust. Ez az expandált impulzus kerül kisugárzásra. A visszavert jel a vevőben egy kompressziós szűrő által kerül feldolgozásra. A kompressziós szűrő visszaállítja a frekvencia komponensek közötti relatív fáziskülönbséget, így a keskeny (összenyomott) impulzus ismét előállítható.

Mint a bevezetésben látható, az impulzus kompressziós arány, az expandált és a komprimált jelalak időaránya. Ez az arány mind idő és frekvencia tartományban számítható. Az impulzus kompressziós radar lényegében egy illesztett szűrő. A kódolt jel jellemezhető frekvencia tartományban $H(\omega)$ és időtartományban $h(t)$ is.[1]

Tételezzük fel a 3. ábrán látható egyszerű kódolást. Itt a kódolt jelet egy Dirac-impulzussal gerjesztett kódszűrő ($H(\omega)$) állítja elő. A visszavert jel az illesztett szűrőbe kerül, melynek átviteli függvénye komplex konjugáltja ($H^*(\omega)$) a kódszűrőnek. Az illesztett szűrő kimenete a komprimált impulzus lesz, melynek időfüggvénye:

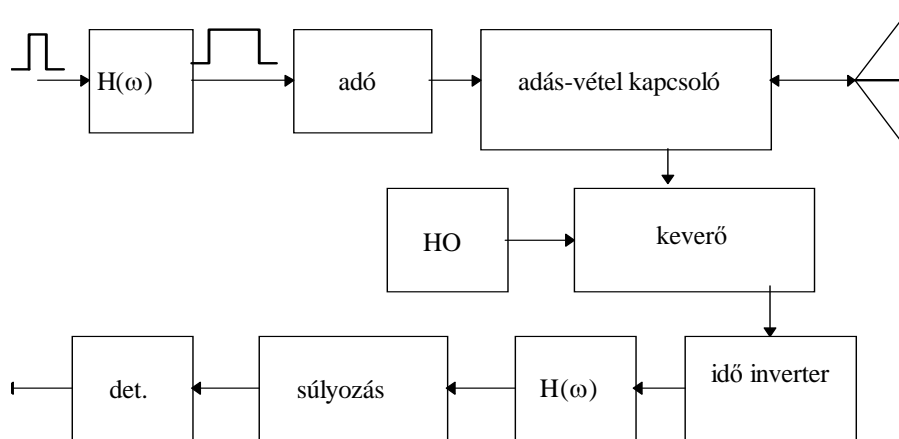
$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H^*(\omega)|^2 e^{j\omega t} d\omega \quad (20)$$



3. ábra

A 3. ábra szerinti megvalósításban tehát az expansziós és a kompressziós szűrők egymás konjugáltjai.

A szűrő a jelhez is illesztve van, amennyiben annak időfüggvénye a szűrő Dirac-impulzusra adott válaszábanak konjugáltja. Ha a visszavert jelet időben invertáljuk, mint ahogy azt a 4. ábra mutatja, azonos szűrők alkalmazhatók expanszióra és kompresszióra, vagy pedig ugyanaz a szűrő láthatja el a két feladatot az adás és a vétel közti alkalmas kapcsolattal.



4. ábra

4

Az illesztett szűrő kimenete ekkor az alábbi konvolúciós képlettel írható le:

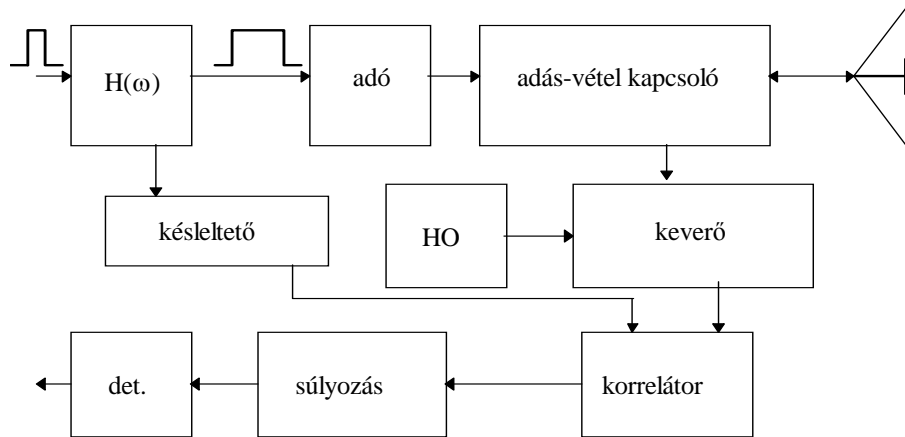
$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \cdot h^*(-t) dt \quad (21)$$

Ahol:

$h(t)$ — a jel időfüggvénye;

$h^*(-t)$ — az illesztett szűrő konjugált impulzus válasz függvénye.

Itt az illesztett szűrő a kisugárzott és a vett jel korrelációját végzi. Ennél fogva a korrelációs eljárás, ahogy az a 5. ábrán látható, megegyezik az illesztett szűréssel. A gyakorlatban a kívánt tartomány lefedésére többszörös késleltetést és korrelálást alkalmaznak.



5

.ábra

Az illesztett szűrő kimeneti jele a komprimált impulzusból és az őt kísérő egyéb termékekből, az úgynevezett oldalszirmokból áll. A nemkívánatos oldalszirmok csökkentésére gyakran frekvenciasúlyozó tagokat alkalmaznak. A mozgó céltárgyról visszavert jelben lévő doppler frekvenciás csúszás miatt szűrőbankot kell alkalmazni. Minden szűrőnek illesztettnek kell lennie egy-egy frekvenciára. A szűrőbank elemeinek száma a kívánt doppler frekvencia mérésének pontosságától és tartományától függ.

A MEGFELELŐ IMPULZUSKOMPRESSZIÓS ELJÁRÁS KIVÁLASZTÁSÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

A megfelelő eljárás kiválasztása az adott hullámformától és az alkalmazott jelfeldolgozási metódustól függ. Az alkalmas hullámforma kiválasztását befolyásoló tényezők általában a radar technikai jellemzői, ezek pedig a következők:

- a hatótávolság;
- a doppler tartomány;
- a hullámforma változtathatóság;
- a zaj elnyomás;
- a jel-zaj viszony.

A megvalósítás módszerei két csoportra oszthatók, aktívra és passzívra, attól függően, hogy a jel előállítása és feldolgozása közben aktív vagy passzív technikát alkalmazunk. Az aktív jel előállítása magában foglalja a hullámforma előállítását a vivő, fázis vagy frekvencia modulációja által valós időbeli nyújtás nélkül. Ennek egy példája a vivő fázisának digitális vezérlése. A passzív jel előállítása magában foglalja az adott eszköznek vagy hálózatnak egy rövid impulzussal való gerjesztését, melynek eredményeként egy hosszabb idejű, kódolt hullámforma adódik. Ennek egy jellegzetes megvalósítása a SAW (surface-acoustic-wave) késleltető struktúrára épül. Az aktív feldolgozás a jel előállítása és a kiszugárzott, valamint a vett jel korrelálásán alapul. Passzív jelfeldolgozás során pedig egy kompressziós hálózatot alkalmaznak, mely az expanziós hálózat konjugált párja, s így illesztett szűrőként viselkedik. Habár az aktív és passzív technikák alkalmazhatók ugyanabban a radarban, legtöbbször mégis az előállítás és feldolgozás ugyanolyan osztályú.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] M.SKOLNIK: Radar Handbook, McGraw Hill, 2nd ed, 1990.
[2] M.N. COHEN: Pulse Compression in Radar System, 1995, International Radar Conference

Nowadays, we often meet the theory of the pulse compression. This article is trying to produce the theoretical base of the pulse compression and to point the advantages and disadvantages of the process.