

# Radarberendezések középfrekvenciás impulzus-kompressziós adójel-generáló és vevő-jelfeldolgozó rendszere

A MILTECH Haditechnikai és Informatikai Zrt. portfoliója mérnöki és szolgáltatási tevékenység, amely magában foglalja a Magyar Honvédség hadrendjében található radarok és rakétairányító rendszerek fejlesztését, modernizálását, javítását, rendszerbe illesztését és oktatását. Az ezen munkák során megszerzett tapasztalatok más típusú légvédelmi eszközök vezetési rendszereinek korszerűsítéséhez is tudáshátteret építenek. A MILTECH Zrt. kutatás-fejlesztési és innovációs képességekkel, szakértőkkel, fejlesztő- és szakmérnökökkel, technikusokkal, szerelőkkel, valamint a tevékenységhez szükséges eszközparkkal és infrastruktúrával rendelkezik. A megtervezett és kifejlesztett rendszerek szoftvervezérlésűek, korszerű alkatrészbázisra épülnek, a fejlesztések hazai és nemzetközi mércével mérve is elismert magas technológiai színvonalat képviselnek. Tanulmányunkban egy középfrekvenciás impulzus-kompressziós adójel-generáló és vevő-jelfeldolgozó rendszert, valamint annak elméleti hátterét kívánjuk bemutatni.

## FELDERÍTÉSI TÁVOLSÁG ÉS FELBONTÓKÉPESSÉG

A rádiólokátor a különböző tárgyról (célokról) visszaverődő – a radar által kibocsátott – rádióhullámok által érzékeli a tárgyak helyzetét, formáját és méretét.

Egy radarberendezés felderítési képességének fontos paramétere a radar maximális felderítési távolsága és a radar felbontóképessége, amelyek értéke több tényezőtől függ.

A radar  $R_{\max}$  maximális felderítési távolsága meghatározható a radaregyenletből [1]:

$$R_{\max} = \left( \frac{1}{(4\pi)^3} \frac{P_t \tau \lambda^2 G_t G_r}{DL_s} \frac{1}{k T_s} \frac{F^4}{L_a} \sigma \right)^{\frac{1}{4}}$$

ahol:

$P_t$  – a radar adóteljesítménye,  
 $\tau$  – impulzusszélesség,

$\lambda$  – hullámhosszúság,

$G_t$  – adónyereség,

$G_r$  – vevőnyereség,

$D$  – detektálhatóság  $n$  impulzus integrálása esetén (detekcióhoz szükséges minimális jel-zaj viszony),

$k$  – Boltzmann-állandó,

$T_s$  – zajhőmérséklet,

$L_s$  – rendszerveszteségek,

$L_a$  – környezeti veszteségek,

$F$  – terjedési faktor(ok),

$\sigma$  – céltárgy átlagos radarkeresztmetszet.

A radaregyenlet összekapcsolja azon fő tényezőket, amelyek a radar felderítési tulajdonságait befolyásolják. Az egyenlet kifejtése és részletes megoldása a szakirodalomban megtalálható.

A teljes radar performancia analízishez a MILTECH Zrt. saját fejlesztésű programmal rendelkezik (1. ábra), amellyel a radarfelderítési diagram is előállítható az antenna sugárzási karakterisztikájának figyelembevételével. [2]

A radaregyenlet meghatározza, hogy milyen fő tényezők befolyásolják a radar maximális felderítési távolságát adott céltárgyra vonatkozóan:

1. a radar fő műszaki paraméterei (2. szorzótényező), mint pl. az adó, a vevő, az antenna, a jelfeldolgozás jellemzői;
2. külső vagy belső forrásból eredő zajok, mint pl. termikus zaj (3. szorzótényező);
3. radarhullám terjedését befolyásoló külső tényezők, mint pl. légköri csillapodás, refrakció, reflexió, diffrakció, interferencia (4. szorzótényező);
4. céltárgy jellemzői, mint pl. mérete, anyaga, formája (5. szorzótényező).

A 3. és 4. pontban szereplő külső tényezők adottan vehetők, így a zajhőmérséklet ( $T_s$ ) és rendszerveszteségek ( $L_s$ ) csökkentése mellett nagyobb felderítési távolság érhető el, ha:

- a) növeljük az adó-vevő antenna nyereségét, növelve a nyaláb irányítottságát;

**ÖSSZEFOGLALÁS:** A Gazdaságfejlesztési és Innovációs Operatív Program (GINOP 2.1.7-15 pályázat) keretében a MILTECH Zrt. kifejlesztett egy közép-frekvenciás impulzus-kompressziós adójel-generáló és vevő-jelfeldolgozó rendszert radarberendezésekhez. Az impulzus-kompresszió háttérnek és eljárásainak bevezetése után a tanulmány bemutatja a kifejlesztett eszköz és annak fő paramétereit.

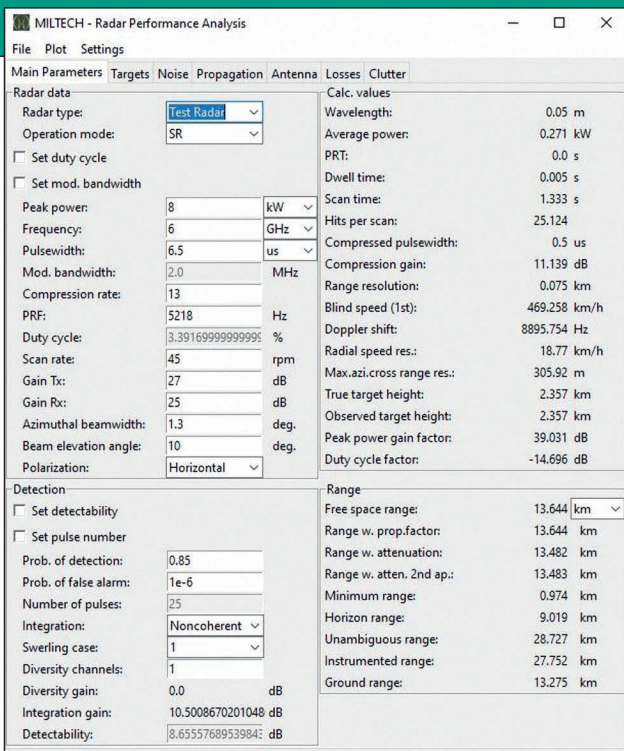
**KULCSSZAVAK:** radar, impulzus-kompresszió, DSP, FPGA, STC, jelfeldolgozás

**ABSTRACT:** Within the framework of the Hungarian Economic Development and Innovation Operational Program (GINOP 2.1.7-15), the Hungarian MILTECH Co. developed an IF pulse compression signal exciter and receiver device for radar systems. After the introduction of pulse compression methods and the background, the developed device and its main parameters are presented in this article.

**KEY WORDS:** radar, pulse compression, DSP, FPGA, STC, signal processing

\* Vezérigazgató-helyettes, MILTECH Zrt. ORCID: 0000-0002-4562-8083

\*\* Fejlesztési osztályvezető (Ph.D.), MILTECH Zrt. ORCID: 0000-0002-2658-2876



1. ábra. Radar performancia analízis program (A szerzők által készített képernyőkép)

- b) növeljük az adó csúcsteljesítményét;
- c) növeljük a kisugárzott impulzus hosszúságát (azaz az előző ponthoz hasonlóan növelve a nyaláb  $P_t \cdot \tau$  energiáját);
- d) javítjuk a D detektálhatóságot.

Egy adott radar modernizálásánál az a és b pont egységeinek cseréje – pl. nagyobb teljesítményű adóra a jobb felderítés érdekében – eléggé költséges, ezért vizsgáljuk meg a c és d pont alatti lehetőségeket.

A D detektálhatóság – azaz a detektáláshoz szükséges minimális jel-zaj viszony (SNR, Signal to Noise Ratio) – értéke több tényezőtől függ. D értéke megbecsülhető a detektálás valószínűségéből, a hamis riasztás valószínűségéből, az impulzusok számából, és a céltárgy jellegét megadó ún. Swerling<sup>1</sup>-számból [3], amely a céltárgy alakját és fluktuációját jellemzi (1. táblázat). A D detektálhatóság javítható, ha több impulzust integrálunk a céltárgyról. A javulás mértéke függ az integrálás módjától is (lásd később).

A céltárgyat ért beütések száma – így az integrálható impulzusok száma – növelhető az impulzusismétlés frekvenciájának növelésével és/vagy a megvilágítás idejének növelésével. Az impulzusismétlés frekvencianövelésének gátat szab, hogy ezzel csökken az egyértelműségi hatótáv-

volság, tehát az a távolság, amelynél még a céltárgy távolsága egyértelműen megállapítható a visszavert jelekből. A céltárgy megvilágítási ideje függ a radarnyaláb szélességétől és a pásztázás sebességétől. A felderítőradarok esetében nem preferált nagy nyalábszélesség, mivel ekkor romlik a szögfelbontás (az a minimális szög, amelynél két cél még elkülöníthető egymástól). A pásztázás sebességének csökkentésével (pl. forgó radarok esetén az antenna-fordulatszám csökkentésével) növelhető a megvilágítás időtartama, ekkor azonban a gyorsan manőverező célok követése romlik.

Egy másik lehetőség a radar felderítési távolságának növelésére, ha adott adóteljesítmény és adó-/vevőnyereség mellett a kisugárzott impulzus hosszúságát növeljük, ezzel növelve az impulzus energiáját. Az impulzus  $\tau$  hosszúságának növelésével azonban romlik a radar radiális irányban mért távolság szerinti felbontóképessége, azaz nő az a minimális  $\delta r$  távolság, amely ahhoz szükséges, hogy két céltárgyat még meg tudjunk különböztetni egymástól:

$$\delta r = c \cdot \frac{\tau}{2},$$

ahol c az elektromágneses hullám terjedési sebessége.

Az impulzus hosszúságának változtatásával elérhető nagyobb felderítési távolság, a felbontóképesség romlása nélkül, ha növeljük a jel B sáv szélességét.

### IMPULZUS-KOMPRESSZIÓ

Impulzus-kompresszió során modulációval egy hosszabb  $\tau$  impulzuson belül kisebb  $\tau_c$  hosszúságú jelsorozat keletkezik, növelve ezzel a jel sáv szélességét ( $B = \frac{1}{\tau_c} > \frac{1}{\tau}$ ). A  $\tau/\tau_c$  kompressziós arány növelésével (kisebb  $\tau_c$  hosszúsággal) már megfelelő radiális felbontás érhető el a felderítési távolság csökkenése nélkül.

Az impulzus modulálására frekvencia- vagy fázismodulációs eljárásokat alkalmaznak (az amplitúdómoduláció energiavesztéssel járna, és nehezebben megvalósítható a gyakorlatban). A radarokban leggyakrabban használt modulációs eljárások:

- frekvenciamoduláció:
  - lineáris frekvenciamoduláció (LFM),
  - nem-lineáris frekvenciamoduláció (NLFM),
- fázis(kód)- moduláció:
  - bináris (BiPhase): pl. Barker-kód<sup>2</sup> moduláció [5],
  - több fázisú (PolyPhase): pl. Frank kód.

A 2. ábrán egy szimulált 13 bites Barker-kódú fázismodulációs jel látható. Az ábrán jól látható, hogy a 13 bit

1. táblázat. Swerling-számok és a céltárgyak jellege (Forrás: [1], [4] alapján a szerzők szerkesztése)

Swerling-modell	Céltárgy típusa
SW0	nem fluktuáló céltárgyak (vagy más néven Marcum eset)
SW1	sok azonos jellegű céltárgy csoportja esetén, ha lassan fluktuálnak, impulzusról impulzusra korrelációban vannak
SW2	sok azonos jellegű céltárgy csoportja esetén, ha gyorsan fluktuálnak, impulzusról impulzusra nincsenek korrelációban
SW3	sok kis céltárgy együttese egy nagy céltárggyal (pl. rezonáns felületek), ha azok egymással korrelációban vannak, lassú fluktuáció (mint SW1)
SW4	sok kis céltárgy együttese egy nagy céltárggyal, ha azok nincsenek egymással korrelációban, gyors fluktuáció (mint SW2)



sorozatban hogyan változik a fázis ( $0^\circ$  v.  $180^\circ$ -kal): +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1. Barker-kód fázismoduláció esetén az 1 bitnek megfelelő hosszúságú szakasz adja a komprimált impulzus hosszúságát.

Az impulzus-kompressziós radar működésének megértése érdekében célszerű a cél sikeres detektálásának folyamatát végig követni az adótól a célig, majd vissza a vevőig. A szimulált példa radar és céltárgy fő adatai a 2. táblázatban látható (monosztatikus radart feltételezve, azaz a radar adó és a vevő egy helyen van).

2. táblázat. A példa radar fő adatai\*

Csúcsteljesítmény, $P_t$	8 kW
Adónyereség, $G_{tx}$	27 dB
Vevőnyereség, $G_{rx}$	25 dB
Frekvencia, $f$	6 GHz
Impulzusszélesség, $\tau$	6,5 $\mu$ s
Moduláció	13 bites Barker-kód
Cél átlagos radarkeresztmetszete, $\sigma$	1 m <sup>2</sup>
Céltárgy fluktuációs modell	Swerling 1
Hamis riasztás valószínűsége, $P_{fa}$	$10^{-6}$

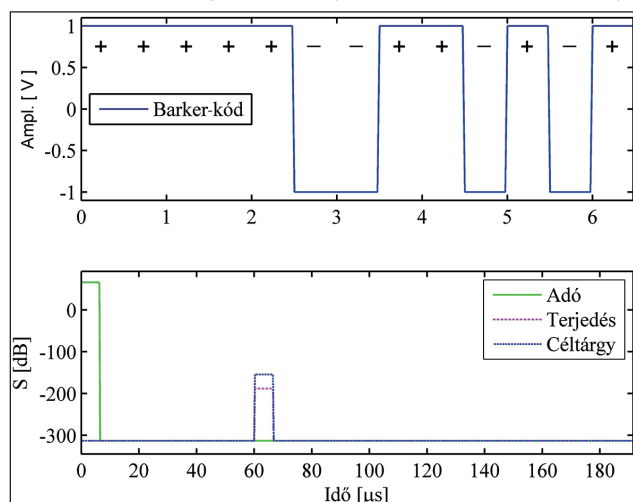
\* A táblázat a szerzők szerkesztése

### A RADARDETEKCIÓS FOLYAMAT FŐ LÉPÉSEI

1. **Adó és antenna:** a radar adója 6,5  $\mu$ s szélességű 13 bites Barker-kód modulált impulzust sugároz ki  $G_{tx} = 27$  dB antennanyereséggel és 8 kW csúcsteljesítménnyel (2. ábra). Az adóteljesítményt átváltva (kb. 39 dB), a sugárzott jel maximális szintje az antennanyereséggel így kb. 66 dB (a 2. ábrán zölddel).

2. **Terjedés (céltárgyig):** az impulzus a kb.  $R = 9$  km távolságra lévő céltárgyat eléri (mivel az oda-vissza útra  $R = c \cdot \frac{\Delta t}{2}$ , ez időben megfelel kb.  $\Delta t = 60 \mu$ s-nak a 2. ábrán). A terjedés során a jel a távolság négyzetével fordított arányosan gyengül.

2. ábra. Szimulált 13 bites Barker-kód, valamint az adójel és a terjedés utáni céltárgy jelszintjei (Forrás: a szerzők szerkesztése)



3. **Céltárgy:** a céltárgyról a jel visszaverődik, ekkor – hasonlóan egy reflektor antennához – a radar-keresztmetszetnek megfelelő antenna apertúra nyereséggel nő a jelszintje (a 2. ábrán szaggatott kék). Ez az ún. céltárgy nyereségfaktor az adott frekvencián megfelel kb. 37 dB növekménynek a jelben (a céltárgyfluktuációt is figyelembe véve).

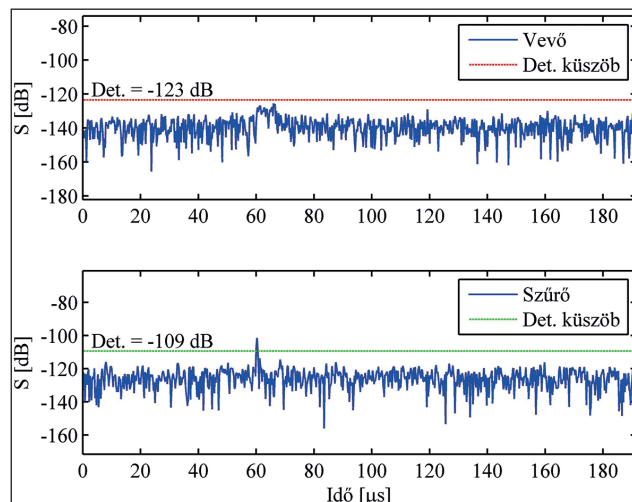
4. **Terjedés (vevőig):** a jel szintje a céltárgytól vissza a vevőig újból csökken, hasonlóan a céltárgyig történő terjedéshez. A 2. ábrán magenta szín jelöli a kétutas szabad terjedés (oda-vissza út) utáni jelszintet. Az egyszerűség kedvéért a további légköri csillapítást, terjedési faktorokat és egyéb, a jel szintjét befolyásoló tényezőket itt ideálisnak tekintjük.

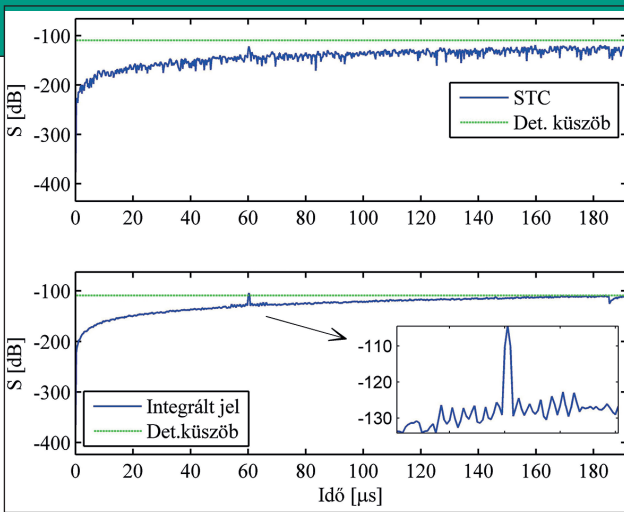
5. **Vevő:** a 3. ábra mutatja a vevőn megjelenő jelet a háttérzajjal együtt (az egyszerűség kedvéért csak termikus fehér zajt feltételezve). Az ábrán pirossal jelölt detektálási küszöb megkapható a vevő paramétereiből (zajtényező, sávészellelesség) figyelembe véve az integrált impulzusok számát és a detekciós követelményeket (hamis riasztás valószínűsége). Az ábrán látható, hogy a vett jel szintje még nem éri el a detekcióhoz szükséges küszöböt (3. ábrán piros). A képről továbbá látható, hogy az impulzus a célnál (60  $\mu$ s-nál) elég széles, amely gyenge felbontást eredményez.

6. **Szűrés és jelfeldolgozás:** A jel-zaj viszony javítása érdekében a vett jelet először szűrjük (az integrálás és a detektálás előtt). Demoduláció után a vett jel a korrelátorba jut. A szűrő korrelátora elvégzi a vett jel és az illesztett, időben fordított konjugált adóimpulzus jel konvolúcióját<sup>3</sup> (ezért illesztett szűrő). A szűrés időbeli eltolást eredményez a jelben, amelyet kompenzálni kell. A modulált jelek korrelációjával további nyereség (ún. processing gain – feldolgozási nyereség) érhető el a szűrővel, javítva ezzel a detekciós küszöb értékét (3. ábrán zölddel). Másrészt látható a moduláció másik előnye is az ábrán: az illesztett szűrő az időtartományban összenyomja a hullámformát (impulzuskompresszió), így a szűrt impulzus már sokkal keskenyebb, amely jobb felbontást eredményez radiális távolságban.

7. **Nyereségvezérlés:** a különböző távolságban elhelyezkedő, különböző méretű objektumokról széles amplitúdótartományban érkeznek jelek a radar vevőjére, amelynek dinamikátartománya véges. Közeleli, nagy méretű objektumokról érkező nagy jel nem kívánt telítést okoz a vevőben, amelyet kontrollálni kell. Nyereség vezérlésére több eljárás is létezik. A 4. ábrán az STC (Sensitivity Time Control – idő szerinti érzékenységvezérlés) eljárás látható: a vett jel úgy

3. ábra. Vevő és az illesztett szűrő utáni jelek a detekciós küszöbvel (Forrás: a szerzők szerkesztése)





4. ábra. STC nyereségvezérlés és integrálás utáni jelszintek, detekciós küszöb és oldalszirmok (nagyítva) (Forrás: a szerzők szerkesztése)

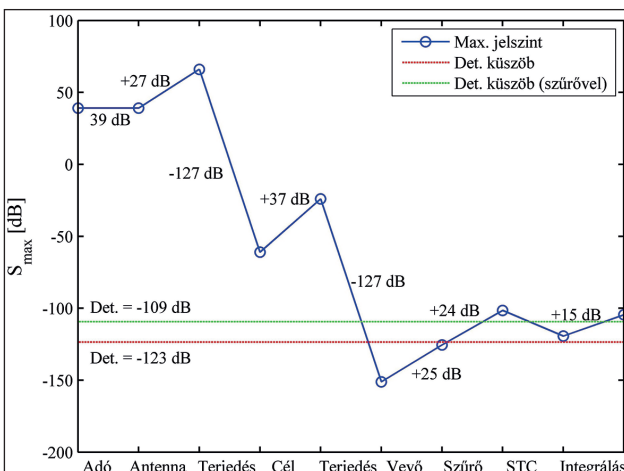
került módosításra, hogy a közelről érkező jelek szintje arányosan kisebb legyen a referencia távolságból érkező jelszinthez képest. Így a különböző célok jelszintjei már a távolságtól függetlenek.

8. *Detektálás:* jelfeldolgozás után a célról érkező jelek integrálhatók. A 4. ábrán látható, hogy integrálással a jel-zaj viszony javul, a javulás mértéke függ az integrálás módjától. Inkoherens integrálásnál a fázis információ nem kerül felhasználásra, a jelek abszolútérték-négyzet összegének a gyöke az integrált jel. Így  $n$  impulzus inkoherens integrálása esetén a jel-zaj viszony kb.  $\sqrt{n}$ -szeresére javul. Koherens integrálásnál, a fázisinformációkat felhasználva a jelek összeadhatók, így nagyobb ( $n$ -szeres) SNR javulás érhető el. A példában bemutatott radarban 25 impulzus inkoherens integrálásával a jel maximuma újra a detekciós küszöb fölé kerül (4. ábra), miközben a zaj átlagos amplitúdója csökken (összegzés miatt átlagolttá válik a véletlenszerű zaj). Így a detektor kimenetén már a háttérzaj jelszintjétől jól elkülönülő impulzusként jelenik meg a cél. Az impulzus időadatából pedig már meghatározható a céltárgy radartól mért távolsága:  $R = c \cdot \frac{\Delta t}{2}$ .

A 4. ábrán nagyítva láthatók a csúcs melletti ún. oldalszirmok. A Barker-kód-moduláció speciális bitsorrendjének köszönhetően az oldalszirmok szintje alacsony korreláció után. A kód bitszámának növelésével az oldalszirm szint tovább csökkenthető.

Az egyszerűség kedvéért az előbbi lépésekben több tényezőt ideálisként vettünk figyelembe. Az 5. ábrán össze-

5. ábra. Jelmaximumok az adótól a célig, és vissza a detekciós küszöbszintekkel (Forrás: a szerzők szerkesztése)



3. táblázat. Jelszint változása az adótól a célig, és vissza\*

Adó	$G_p = 10 \cdot \log_{10}(P_t)$	+39 dB
Antenna	$G_{tx}$	+27 dB
Terjedés (célig)	$L_p = 20 \cdot \log_{10}(\lambda/4\pi R)$	-127 dB
Cél	$G_{rcs} = 10 \cdot \log_{10}(4\pi\sigma/\lambda^2)$	+37 dB
Terjedés (vevőig)	$L_p = 20 \cdot \log_{10}(\lambda/4\pi R)$	-127 dB
Vevő	$G_{rx}$	+25 dB
Szűrő	$G_f$	+24 dB
STC	$L_{STC}$	-18 dB
Integrálás	$G_{int}$	+15 dB
Jelszint	$S = G_p + G_{tx} + 2 \cdot L_p + G_{rcs} + G_{rx} + G_f + L_{STC} + G_{int}$	-105 dB

\* A táblázat a szerzők szerkesztése

foglva így is jól látható a jel maximális szintjének trendje az adótól a célig, és vissza.

Decibel-skálán, a radaregyenlet alapján az egyes tagok összegéből megkapható az elérhető maximális S jelszint (3. táblázat).

Összefoglalva az impulzus-kompressziós radar detektálási folyamatát látható, hogy az impulzuskompresszió több előnnyel is jár:

- Relatív alacsonyabb csúcs adóteljesítmény mellett tesz lehetővé nagyobb maximális detektálási távolságot, hosszabb impulzus-alkalmazhatósága révén.
- Azonos átlagteljesítményű, de kisebb csúcsteljesítményű adó implementálása és alkalmazása gazdaságosabb.
- Az impulzus modulációjával, és így a sávzélesség növelésével, a radar felbontóképessége javul (így hosszabb impulzus is alkalmazható).
- Javul a jel-zaj viszony.
- Javul a radar pontossága, mivel a célpozíció meghatározásának pontossága egyrészt egyenesen arányos a felbontóképességgel, másrészt fordítva arányos az SNR jel-zaj viszony négyzetgyökével.
- Modulációs eljárásokkal az illetett szűrő autokorrelációs függvénye javul, így az impulzus-kompressziós oldalszirm szint csökkenthető.
- Javul a radar aktív zavarok elleni védelme.

Ahogy az felvázolt radardetektációs folyamatból is látszik, az impulzus-kompresszió megvalósításához azonban összetettebb modulátor, vevő- és jelfeldolgozó rendszer szükséges a radarban.

### SER BERENDEZÉS

A MILTECH Zrt. pályázat (GINOP-2.1.7-15-2016-00973) keretében kifejlesztett egy berendezést, amely korszerű radarrendszerek középfrekvenciás, impulzus-kompressziós adójelének előállítását és a visszavert jel feldolgozását végzi el. A berendezés rövid neve: SER (Signal Exciter and Receiver – jelgeneráló és -vevő).

A berendezés kifejlesztésének fő hajtóereje, hogy a régebbi analóg és alacsony szinten digitalizált hardver alapú megoldások költségigénye nagy volt, kompatibilitásuk azonban minimális, amely korlátozta alkalmazhatóságukat.





6. ábra. SER berendezés (Fotó: a szerzők)

Az impulzus-kompressziós jelek előállítása és feldolgozása során alkalmazott analóg SAW (Surface Acoustic Wave – akusztikus felületi hullámú) szűrők megvalósítása költséges és technológiai szempontból nehéz volt, valamint tulajdonságai üzem közben nem voltak változtathatók. A kifejlesztett berendezésben széles tartományban programozható modulációs módok biztosítják az egység általános kompatibilitását, és hatékony használatát. A növekvő interoperabilitási elvárásoknak megfelelően, így az egység egyaránt alkalmazható különböző típusú és hullámhosszúságú radarok modernizálására, és új berendezésekben történő használatra is.

Az elméleti bevezetésben már említettük, hogy a radar jelfeldolgozó rendszerének fő feladata, hogy megtalálja a célpontot a zavarjelek között. E cél érdekében ma már többféle matematikai módszer áll rendelkezésre a különböző típusú zajjelek kiszűréséhez, így az elméleti háttéranyag szerteágazó. A kifejlesztett eszközben alkalmazott legújabb generációs digitális jelfeldolgozó DSP (Digital Signal Processor – digitális jelfeldolgozó), FPGA (Field-Programmable Gate Array – helyszínen programozható kapumátrix) és multiprocessing technológia képes ezen kifinomult matematikai algoritmusok gyors alkalmazására. Speciális alkalmazói igények esetén, szükség szerint további algoritmusokkal is könnyen bővíthető az egység, ezzel is növelve alkalmazhatóságát.

## A SER FŐ RÉSZEI

A radarban a SER-egység fő feladata a modulált jelsorozat előállítása a szükséges vezérlőjelekkel együtt az adó szá-

4. táblázat: SER műszaki paraméterek\*

Kiadott modulált impulzus szintje	Állítható, > 0 dBm
KF frekvenciatartomány	30 – 490 MHz
Impulzushosszúság	0,5 – 50 $\mu$ s
Sávszélesség	Állítható, max. 2 MHz
Analóg/digitális konverzió	16 bit
Dinamikatartomány	> 60 dB
Vezérelhető csillapítás adó ágon	0 – 31,75 dB (0,25 dB lépésként)
Vezérelhető csillapítás vevő ágon	0 – 31,75 dB (0,25 dB lépésként)

\* A táblázat a szerzők szerkesztése

mára, valamint a vevőtől származó jelek fogadása és előkészítése jelfeldolgozásra, detektálásra.

A berendezés moduláris hardver és szoftver felépítése növeli az eszköz adaptálhatóságát különböző radartípusokhoz, valamint egyszerűsíti az ellenőrzési és teszt eljárásokat is. A hardveregységeket a MILTECH Zrt. által gyártott kompakt készülékhez tartalmazza (6. ábra). A berendezés fő funkcionális részei:

- adójelgeneráló egység,
- integrált középfrekvenciás impulzusmodulációs jel előállító egység,
- órajelgeneráló egység,
- jelfeldolgozó egység,
- jelszűrő egység,
- vezérlőegység,
- adatátviteli interfész és kommunikációs egység,
- tápegység,
- kiegészítő kezelői IT-eszközök és teszt egység.

A SER egység fő paramétereit a 4. táblázat mutatja.

## SER – KF JELEK

A berendezés standardizált középfrekvenciás (KF) ki- és bemenetekkel rendelkezik a nagyfrekvenciás radarrészegységek felé (7. ábra), valamint biztosítja a szükséges, megfelelően időzített logikai vezérlőjeleket is a precíz szinkronizáláshoz.

SER-kimentek:

- KF szintű modulált adójel kiadása:
  - I – csatorna,
  - Q – csatorna.
- Időzített adójelvezérlő jelek.
- STC.

SER-bemenetek:

- KF szintű vevőjel fogadása:
  - I – csatorna,
  - Q – csatorna.
- Tápellátás.

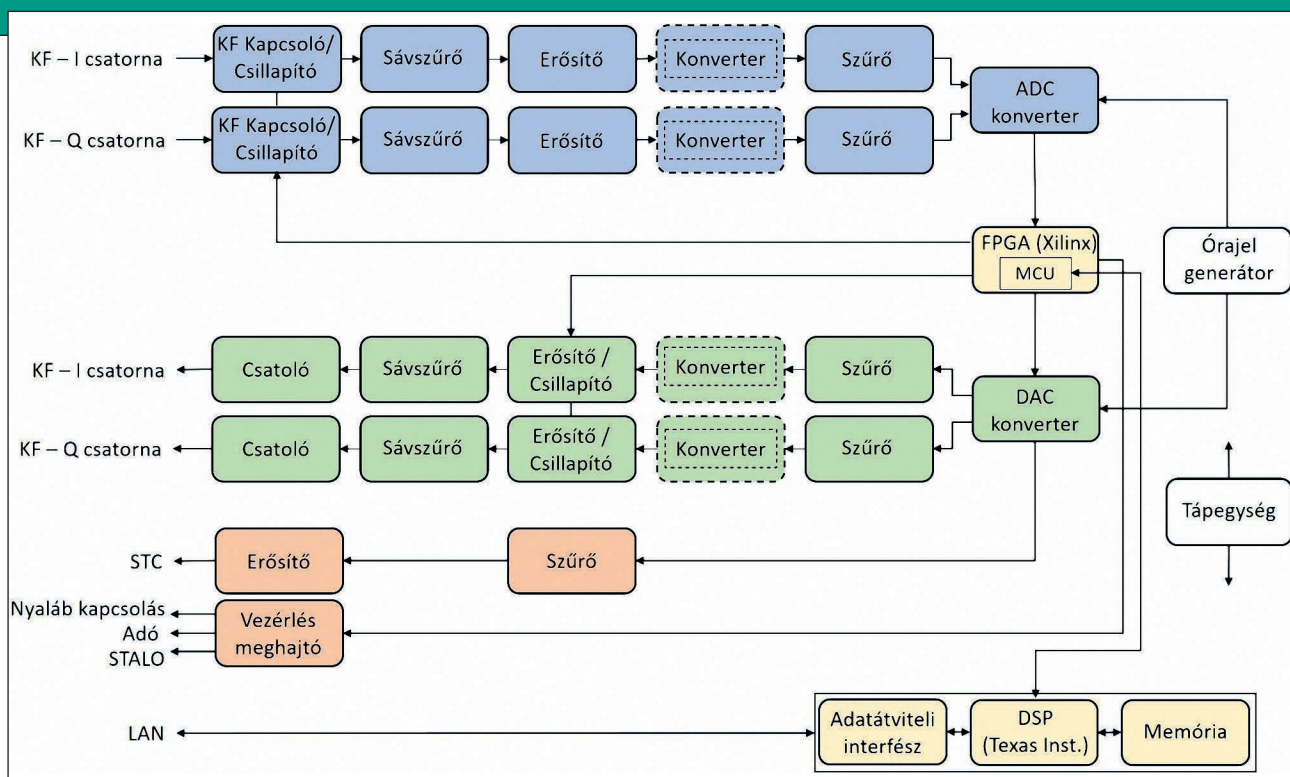
Adatkapcsolat interfész:

- TCP/IP adatkapcsolat a szabványos adatkommunikációhoz.

A berendezés hardvertulajdonságai szoftver eszközökkel állíthatók be, így az egység illesztése a különböző típusú radarokhoz széles körben megvalósítható. A hardver alkalmazásának nagyfokú rugalmasságát éppen a firmware és a kezelői/teszt munkaállomásokon futó szoftverek felhasználói igényekhez történő igazíthatósága, illetve azok parameterezhetősége biztosítja.

A különböző modulációs módoknak megfelelő jelgenerálás szoftverek által meghatározott, ezért később is lehetőség van új modulációs eljárások hatékony megvalósítására. A jelelőállítás memóriába letöltött mintázatok alapján történik, így az adott sávszélességen belül tetszőleges adóimpulzus sugározható ki. A rugalmas, akár indítójelként változtatható frekvenciájú jelek, valamint a modulációs módok szoftverből történő változtathatósága tovább növeli a radar ECCM-képességét (Electronic Counter-Countermeasures – aktív zavarvédelem).

A modulációs módok gyors változtatása és az adás és vétel közötti koherencia biztosítása érdekében közös FPGA<sup>4</sup> vezérli az adójelelőállító digitális-analóg konvertereket (DAC – Digital Analog Converter) és a vételi analóg-digitális konvertereket (ADC – Analog Digital Converter). Az adóimpulzus modulálásához generált hullámforma az FPGA-n belüli nagy sebességű memóriába kerül. A memória kiolvasását az FPGA-n belüli pontos időzítésű számlá-

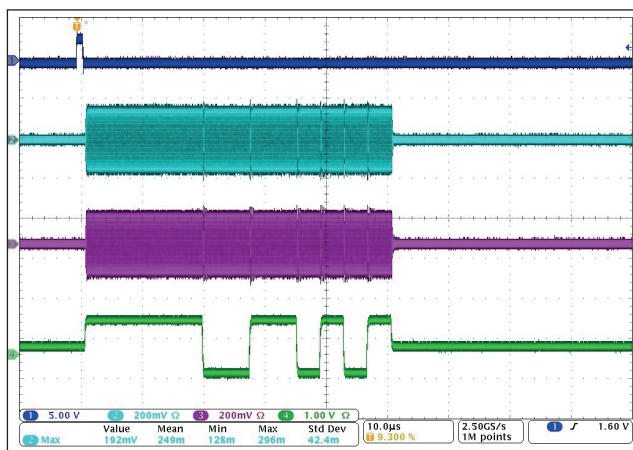


7. ábra. A SER berendezés fő részei (Forrás: a szerzők szerkesztése)

lók biztosítják, amely jelek az IQ rendszerű, 16 bites felbontású digitális-analóg átalakítóra jutnak. Ez a kialakítás teszi lehetővé az időzítések legnagyobb pontosságát, amely a mozgócél kiválasztás alapja (MTI Moving Target Indication – mozgó cél jelölés). Az adó és a vételi oldalon is két-két külön ág található az I és Q csatornák számára. Ha szükséges, ezeken az ágakon második KF-keverés megvalósítása is lehetséges, ezt mutatják a 7. ábrán a szaggatott vonallal jelölt konverterek.

Impulzus-kompresszióhoz először az adó és vételi ágak jeleinek gyors Fourier-transzformációját<sup>5</sup> (FFT – Fast Fourier Transformation) végzi el az egység. Az adójel komplex konjugálása után, a komplex multiplexer elvégzi az adó és vevő jelek FFT spektrumainak komplex összeszorozását. Az így kapott jel inverz Fourier-transzformációjával (IFFT – Inverse Fourier Transformation) visszaalakítható frekvenciatartományból időtartományba a korrelált jel. A jel maximális szintje és nemkívánatos oldalszirmai további súlyozási, szűrő ablak algoritmusokkal állíthatók.

8. ábra. 13 bites Barker-kód jellel (zöld) modulált impulzus az I és Q csatornákon (türkiz és lila) az indítójellel (kék) (Forrás: a szerzők szerkesztése)

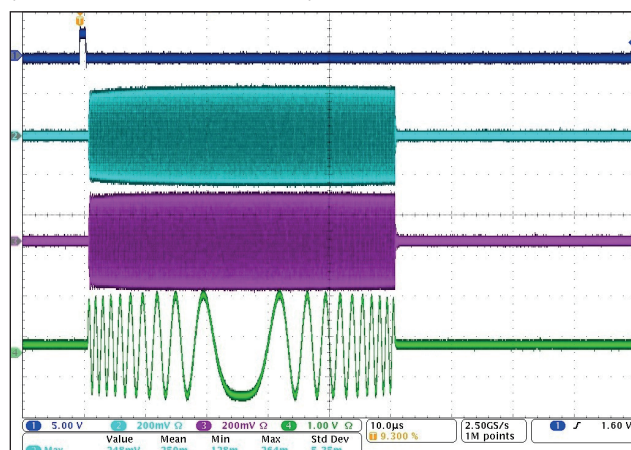


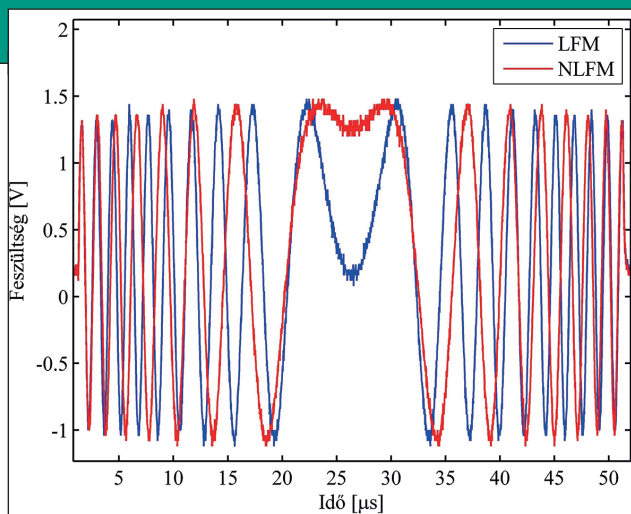
A pályázat keretében a szakemberek a SER-egység önálló tesztelését is elvégezték, szintén MILTECH fejlesztésű szoftveres kiértékelővel támogatva [6]. A 8. és 9. ábrákon látható egy 13-bites Barker-kód modulált jel és egy 2 MHz-es NLFM (nonlinear frequency modulation) modulált jel a SER egység oszcilloszkópos teszteléséről. Az ábrákon fentről lefelé láthatók: az indítójel (kék), az I és Q csatorna modulált jelei (türkiz, lila), valamint a moduláló jel (zöld). A 10. ábra pedig a SER 1,5 MHz sávzsélességű LFM (linear frequency modulation) (kék) és NLFM (piros) hullámformáinak összehasonlítását mutatja a mérési eredményeket kiértékelő program segítségével.

### SER – STC

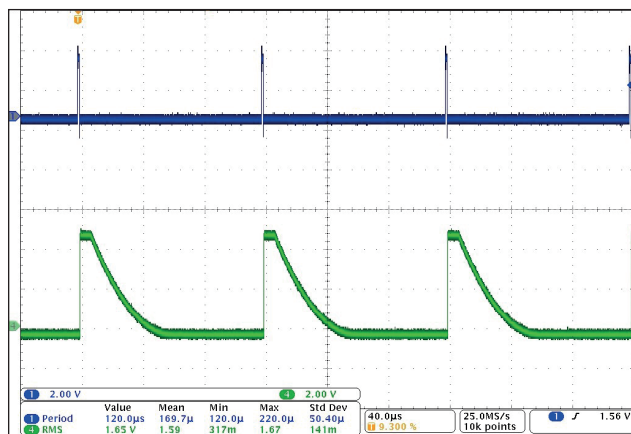
A vevő nyereségvezérlésére az STC-eljárás gyakran használt módszer a radarokban. A SER-egységben DAC konverzió után szintén az FPGA állítja elő az STC-jelet, amely

9. ábra. 2 MHz NLFM jellel (zöld) modulált impulzus az I és Q csatornákon (türkiz és lila) az indítójellel (kék) (Forrás: a szerzők szerkesztése)





10. ábra. A SER 1,5 MHz sáv szélességű LFM (kék) és NLFM (piros) hullámformái (Forrás: a szerzők szerkesztése)



11. ábra. A SER STC-jele gyors időbeli lefutással (zöld) az impulzusok között (kék) (Forrás: a szerzők szerkesztése)

képes vezérelni a vevő LNA (Low Noise Amplifier – kis zajú erősítő) előtti csillapítást, ezzel megakadályozva a vevőrendszer túlvezérlést.

A SER STC 3 üzemmódban képes működni:

- fix csillapítás,
- hagyományos idő szerint változó csillapítás,
- adaptív.

Az STC-paraméterek, mint pl. a csillapítás értéke, csillapítási mód, az időbeli lefutás jellege szintén szoftveresen állíthatók, ezzel is elősegítve a radarérzékenység könnyű beállítását a megfelelő szintre. A 11. ábrán látható SER-en mért STC-jel (zöld) gyors időbeli lefutásra állítva az impulzusok között (kék).

## ÖSSZEGRZÉS

Az impulzus-kompresszió alkalmazása több előnnyel is jár, ehhez azonban összetettebb adójelmodulátor, vevő- és jelfeldolgozó rendszer szükséges a radarban. A MILTECH Zrt. kompakt SER berendezése elvégzi a radar középfrekvenciás, impulzus-kompressziós adójelének előállítását és a visszavert jel feldolgozását. A SER képes komplex algoritmusok, szűrőmetódusok, modulációs eljárások és matematikai modellek gyakorlati megvalósítására. A moduláris felépítésű, grafikus felhasználói felületről szoftveresen vezérelhető SER nagyfokú kompatibilitást, rugalmas méretezhetőséget és többféle működési módot biztosít. Ez lehetővé teszi az eszköz alkalmazhatóságát különböző típusú és hullámhosszúságú radarokban. A SER egyaránt integrálható új és modernizált rendszerekbe, elősegítve a korábbi (analóg és digitális üzemi) radarok modernizációját

át a legújabb, gyors digitális technológiák alkalmazásával. A SER által nyújtott nagyobb számítási kapacitás, pontosabb eredményeket, új funkciókat és megbízhatóbb működést eredményez a radaroknál. A készülék fejlett zajszűrőképességgel rendelkezik, és jobb felderítési paraméterek elérését teszi lehetővé a felhasználó számára.

A GINOP 2.1.7-15 „Radarberendezések középfrekvenciás impulzus-kompressziós adójel generáló és vevő-jelfeldolgozó rendszerének fejlesztése új és modernizált rendszerek számára” című projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósult meg.

A jelen tanulmány, a fenti projekt „Prototípus, termék-, technológia- és szolgáltatásfejlesztés” nevű kiemelt kutatási területéhez kapcsolódóan készült.

## HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Barton, D.K. – Leonov, S.A., *Radar technology encyclopedia*, Boston: Artech House, 1998, 366 p., 378 p.;
- [2] MILTECH Radar Performance Analysis szoftver, fejlesztő: Rembeczki Szabolcs, MILTECH Zrt. (2021);
- [3] Marcum, J.I. – Swerling, P.; “Studies of Target Detection by Pulsed Radar.” *IRE Transactions Volume IT-6*, No. 2 dtd (April 1960);
- [4] Balajti István, „Hatásos radarcéltárgy-keresztmetszet növelési lehetőségek.” *Haditechnika* 51., 5. sz. (2017): 12–15. p. <https://doi.org/10.23713/HT.51.5.03>;
- [5] Barker, R. H., “Group Synchronizing of Binary Digital Systems. *Communication Theory*.” London: Butterworth, 1953: 273–287. p.;
- [6] Bárány Dániel, Rembeczki Szabolcs, „Átvételi teszt vizsgálatok jegyzőkönyv”, MILTECH Zrt. SER projekt dokumentum (2018): 8–66.

## JEGYZETEK

- 1 Swerling, Peter (1929–2000) a 20. század egyik legbefolyásosabb radarelméleti szakembere. Nevéhez kötődik a statisztikailag „fluktuáló cél” szórás modellek osztályozása, amelyet a RAND Corporationnál az 1950-es évek elején fejlesztett ki a pulzáló radarrendszerek teljesítményének jellemzésére. Tudományos munkájával a műholdak és rakéták pályájának optimális becsléséhez is hozzájárult, előre jelezve a Kálmán-szűrő fejlődését (a szerk.).
- 2 A kommunikációs technológiában a Barker-kód vagy Barker-szekvencia a digitális értékek véges szekvenciája, ideális autokorrelációs tulajdonsággal. Szinkronizáló mintaként használják az adó- és a vevő között. Barker, Ronald Hugh (1915–2015) ír fizikus, a digitális szinkronizáláshoz szükséges Barker-kód feltalálója 1952-ben a Barker 7–13 hosszúságú jelszekvenciát találta legmegfelelőbbnek, amely szekvenciákat napjainkig a legtöbb adatátvitel során (radar, mobiltelefon-technológia, telemetria, digitális beszéd, ultrahangos képalkotás, GPS, WiFi) alkalmazzák (a szerk.).
- 3 A konvolúció egy olyan matematikai művelet, amit függvényeken és disztribúciókon is értelmeznek. A konvolúciót széles körben alkalmazzák a valószínűségi számításban, a Fourier-sorok és a parciális differenciálegyenletek világában. Segítségével gyorsabban lehet számokat összeszorozni és egyes parciális differenciálegyenleteket megoldani (a szerk.).
- 4 FPGA (field-programmable gate array): integrált áramkör, amelyet a vevő vagy a tervező konfigurál a gyártás után – erre utal a „terepen programozható” kifejezés.
- 5 Egy időben változó jel előállítható különböző frekvenciájú, fázisú és amplitúdójú jelek összegeként. A Fourier-transzformáció az a művelet, amely egy adott jelhez megadja ezt a felbontást. A Fourier-transzformáció inverze szolgál arra, hogy a frekvencia spektrumból (frekvenciartomány) megadja az időfüggő jelet (időtartomány) (a szerk.).