

Balajti István

balajti.istvan@uni-nke.hu

AZ IKER DRÓNOK ZAVARVÉDELME

Absztrakt

A polgári felhasználású drónok egyre több feladatot vesznek át a pilóták által vezetett társaiktól miközben új különleges elvárásoknak alacsony költségekkel tesznek eleget. Amíg a katonai alkalmazású drónok általában minden alkalmazási feladatra jól előkészített, ellenőrzött és kiegészítő eszközökkel felszerelt berendezések, polgári társaikról ez nem mondható el. Ezért kiemelt jelentőségű területnek számít a polgári drónok zavarvédelme, a zavarvédelmük növelésének kutatása és a drón fedélzeti adaptív szűrés lehetőségeinek elemzése. A drón fedélzeti adaptív szűrés hatékonysága kiterjeszthető iker drónok alkalmazásával. Iker drónok esetében adott feladat ellátására két teljesen azonos párban repülő és egy telemetriával vezérelt köteléket értek. Az elmélet megvalósítása elvárja a kötelékrepülés, ezen belül a drón-drón kommunikáció 97 GHz megvalósított WIFI típusú kapcsolatát. A tanulmány áttekinti, a hatékony adaptív szűréshez szükséges megoldásokat és szimulációs eredményeken keresztül értékeli az új, elméletileg még nem feldolgozott, műszaki megoldásokat.

Civilian drones have taken over tasks from their manned counterpart and they are creating new applications simultaneously for extraordinary surveillance capabilities at low cost. While military drones are usually well controlled, managed and equipped for all requirements, civilian drones are not. One of the biggest threats that is addressed in this article is the anti-jamming resistance of the civilian drones and a possible way for improvement, utilising adaptive filters on the drones. The adaptive filter's performances can be increased by extending solutions for the twin drone applications. The author's twin drone concept means that two drones are flying in formation and controlled by one remote station, while the two drone's on board telemetry and instruments are connected to each other through a WIFI like solution at 97 GHz. The study reviews the challenges of the twin drone anti-jamming performance improvement, and demonstrates solutions based on simulation results.

Kulcsszavak: *iker drónok, fázisrács antenna, aktív zavarvédelem, adaptív szűrők ~ twin drone, phased array antenna ~ Electronic Counter-Countermeasures, adaptive filters*

BEVEZETŐ

Miért kerültek a polgári drónok az érdeklődés középpontjába? A katonai drónok mellett a polgári alkalmazások köre folyamatosan bővül, néhány felhasználási területen nélkülözhetetlenek, miközben áruk a tömegtermelés következtében folyamatosan csökken. Ennek következtében a polgári felhasználású drónok populációja gyorsan nő, és ezzel arányosan növekszik az irányítás alól elszabadult drónok okozta veszélyhelyzetek száma. [1]

A polgári drónok terjedésének legfőbb oka a felhasználási lehetőségek bővülése a befektetés/megtérülés értékarány drasztikus javulása. Napjainkra a fejlődés elérte azt a szintet, amikor a drónok feladatkörének bővülése lehetővé teszi és elvárja a kötelékrepülésből (iker drón koncepció) eredő előnyök kihasználását. Ezek az előnyök:

- a feladat végrehajtás biztonsága;
- az érzékelők hatótávolságának és felbontóképességének növekedése;
- az irányítás, tájékozódás valamint az érzékelők zavarvédelmi lehetőségeinek fokozása.

Ez utóbbi e cikk tárgya.

A cikk első része a drónok feladataival, fedélzeti eszközeinek jellemzőivel és a leggyakoribb interferenciaforrások értékelésével foglalkozik.

A második részben a drón fedélzeti adaptív szűrés rövid elméleti áttekintése, és az iker drón fedélzeti zavarszűrés hatékonyságának szimulációs eredményekkel való szemléltetése olvasható. Foglalkozni kell a szűrés algoritmusuk feladatfüggő optimalizálásával.

A harmadik rész a kötelékrepülés megvalósításának elvárásait elemzi. Ezen belül a drón–drón kommunikáció és a hatékony adaptív szűréshez szükséges antenna pozíciók és az ezt támogató repülési formációk vizsgálata emelendő ki.

A POLGÁRI DRÓNOK FŐBB JELLEMZŐI

A polgári drónok kb. 2 óra alatt elvégezhető feladatait, fedélzeti műszerezettségét, jelentősen behatárolja a szállítható hasznos tömeg nagysága. Ez a képen látható kb. 2x2 m-es nagyságú drón esetén kb. 4 kg, mely általában a drón alsó vagy orr gondolájában található. Az 1. ábrán példaként bemutatott drón legfontosabb feladatai:

- természeti katasztrófák (földrengések, árvizek és erdőtüzek) megfigyelése, hatásuk felmérése illetve a keletkező károk továbbterjedésének megakadályozásához szükséges információ gyors összegyűjtése;
- nagykiterjedésű logisztikai bázisok biztonságtechnikai célú monitorozása;
- agrokulturák fejlődésének és állapotának pontos felmérése;
- vadgazdálkodási feladatok optimalizálásához szükséges adatszolgáltatás;
- térképészeti és egyéb geodéziai információszolgáltatás;
- professzionális hobbi tevékenység támogatása.

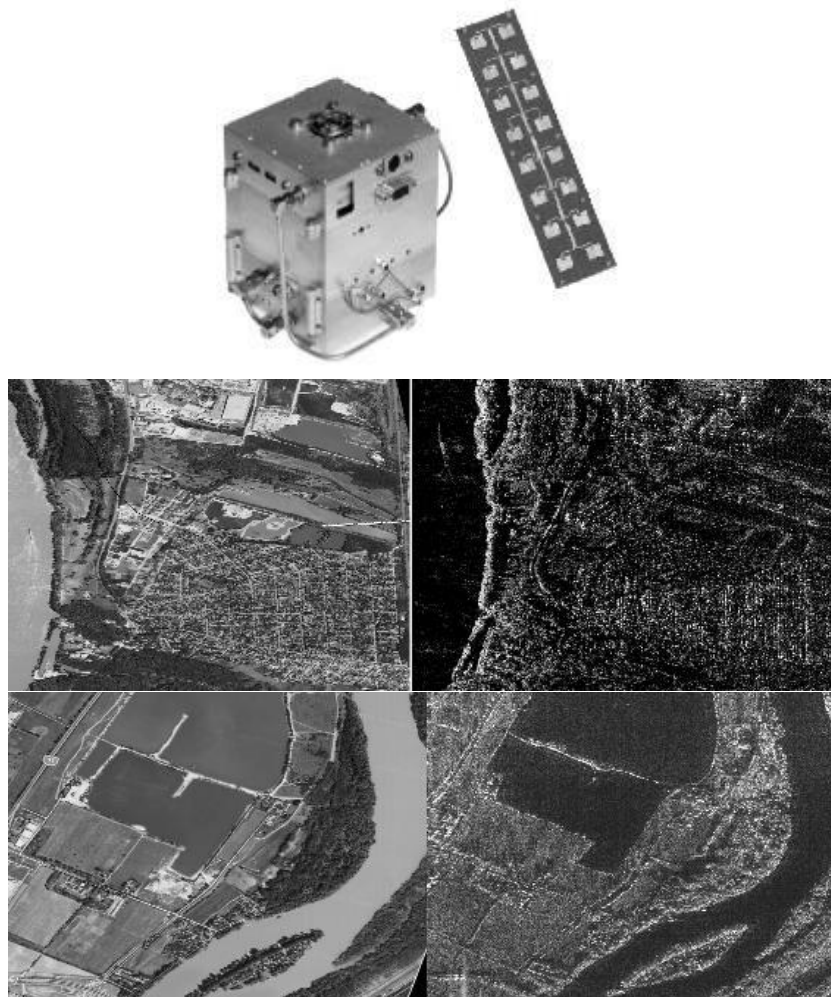


1. ábra. Polgári alkalmazásra szánt drón
(UAV <http://www.bonn-hungary.hu/> letöltés ideje: 2014. 11.26)

A csatolt linken megfigyelhetők az optikai rendszerek, melyek jól bevált érzékelők, kiegészülnek az infravörös tartományban éles képet szolgáltató hőkamerákkal.[2] Ez utóbbiak különösen árvizek és erdőtüzek esetén szolgáltathatnak nélkülözhetetlen, a katasztrófa elhárítást segítő információkat. Napjainkban egyre fontosabb, hogy a polgári felhasználású

drónok feladataik ellátására hatékony SAR (szintetikus apertúrájú radar) eszközökkel rendelkezzenek. Ezt szemlélteti a 2. ábra, mely az 1. ábrán látható drón fedélzet eszközkészletének része.

A kép tetején látható X-sávú SAR radar és antennája együtt kevesebb, mint 2 kg tömegű. Az alatta található baloldali képek az optikai tartományban, míg a jobb oldaliak, ugyanarról a területről, az X-sávú radarral készült SAR képek. A több mint 2 m-es felbontással rendelkező radar képeket az optikai tartományban készültekkel összehasonlítva megállapítható, hogy a vizsgált területekre jellemző, növényzet/vizek/épületek elnyelési és/vagy jel visszaverődési sajátossága, melyek fontosak a felsorolt feladatok minőségi adatainak minőségi végrehajtásához. A felbontóképesség tovább növelhető iker drónokra telepített SAR alkalmazásával.



2. ábra. Drón fedélzeti SAR (fent), SAR képek (jobb oldalt) optikai képek (bal oldalt)

A drónok elvárt hatékonysága csak a különböző műszercsoportok feladathoz optimalizált, modulárisan cserélhető alkalmazásával oldható meg. Így elérhető, hogy a műszerek rendkívül kis tömeggel és teljesítményfelvétellel rendelkezzenek, míg az érzékelők antennáinak mérete kicsi, de érzékenyséjük és a kapcsolódó digitális jelfeldolgozás teljesítménye nagy legyen. Ha a drón fedélzeti vevő rendszerek érzékenysége nagy, megnő a nem szándékos interferencia jelek hatása a fedezeti telemetriai, kommunikációs és érzékelő rendszerekre. A feladatok végrehajtásának további sajátossága, hogy azokat földközeli magassági tartományokban a légtér–felületesi rádiólokátorok céltárgy–detektálási lehetőségein kívül hajtják végre, közel a természetes (vagy mesterséges, de nem szándékos, pl. TV tornyok, GSM átjátszók, magas feszültségű távvezetékek, nagyteljesítményű transzformátorok) elektromágneses zavaró

hatásokhoz. A polgári felhasználású elektronikai eszközök közötti elektromágneses kompatibilitás törvényes előírások által szabályozott, de az elvárások betartása és betartatása körülményes, költséges és néha nem lehetséges. [3]

Egyre gyakrabban olvashatunk „csendes terek” kialakításának szükségességéről pl. iskolák, éttermek számára és az ezt lehetővé tevő zavaró eszközök piaci jelenlétéről. A 3. ábra a zavaró eszközök, mint üzleti vállalkozások keretében beszerezhető eseteket szemlélteti. A kép a polgári gyártású zavaró eszközök széles skálájának meglétére mutat rá. Megállapítható, hogy a GPS/GSM/WIFI „Anti-Jam Technology” egyre bővülő piaccal rendelkezik és a drónok fedélzetén elhelyezhető hasznos tömeg nagysága és a polgári életben gyorsan terjedő interferencia források terjedése jelentős veszélyforrás a drónok megbízható üzemeltetésére és az elvárható minőségű feladat végrehajtás kivitelezhetőségére. Bár a polgári gyártású zavaró eszközök nem tűnnek olyan veszélyesnek, mint a 10–20 kW kimenő átlagteljesítménnyel rendelkező katonai társaik, de mint látni fogjuk így is hatékonyak és rendkívül veszélyesek a drónok feladatainak végrehajtása vonatkozásában.



3. ábra. A GPS, WIFI és GSM berendezések zavarására szolgáló polgári eszközök

A DRÓNOK ZAVARVÉDELEMÉNEK ELVÁRÁSAI

A drónok, zavarvédelem szempontjából legérzékenyebb rendszerei a telemetriai adatszolgáltatáshoz szükséges helymeghatározás, a vezérlést biztosító kommunikáció és az érzékelők vevőrendszerei. A valós idejű helymeghatározás GPS alapú, fejlettebb rendszereknél ez kiegészül a GSM tornyok nyújtotta statikus és különböző inerciális navigációs rendszerekkel.

Az adó-vevő pontok közelsége miatt, legalább 30–50 dB-lel jobb helyzetben vannak a telemetriai adatokat továbbító rádiók. A vezérlés, a telemetriai adatok továbbítása föld – levegő – föld vagy költségesebb rendszereknél (pl. az Iridium műholdak felhasználásával) föld – műhold – drón – műhold – föld – rádiókapcsolattal valósul meg.

Teljesen vegyes a kép a passzív érzékelők területén, hiszen az optikai és lézeres eszközök védettnek tűnnek aktív zavarás ellen, de az 1980-as években folytatott rendkívül sikeres HM HTI „ÁLOM” fedőnevű téma már akkor bebizonyította sebezhetőségüket. A feladat végrehajtásra használt passzív érzékelők köre magába foglalja az optikai kamerákat, videó felvevőket, a lézer távmérőket, az infravörös tartományban működő hőkamerákat. Zavarérzékenyek a különböző típusú és hullámtartományban működő radarok: magasságmérők, ütközés előrejelzők, SLAR (oldalra néző) és SAR radarok. A drón fedélzeti radarok, magasságmérők, ütközés előrejelző, SLAR/SAR radarok zavarvédelme gyártó

specifikus, hiszen értékelni kell, hogy mi a célszerűbb: felkészülni a radar (pl.: SAR) zavarvédelmére, vagy megismételni a mérést, amikor nincs interferencia a környéken?

A drónok zavarvédelmének mélyebb értékeléséhez ismernünk kell a drón fedélzetére ésszerűen telepíthető antennák, adó-vevő és jelfeldolgozó rendszerek főbb műszaki elvárásait, illetve a megvalósítás lehetőségeit, hiszen a drónok által szállított hasznos tömeg rendkívüli mértékben behatárolja az alkalmazható megoldások körét. Ennek következtében megállapítható, hogy a drón fedélzetén, a feladat végrehajtása szempontjából alkalmazható:

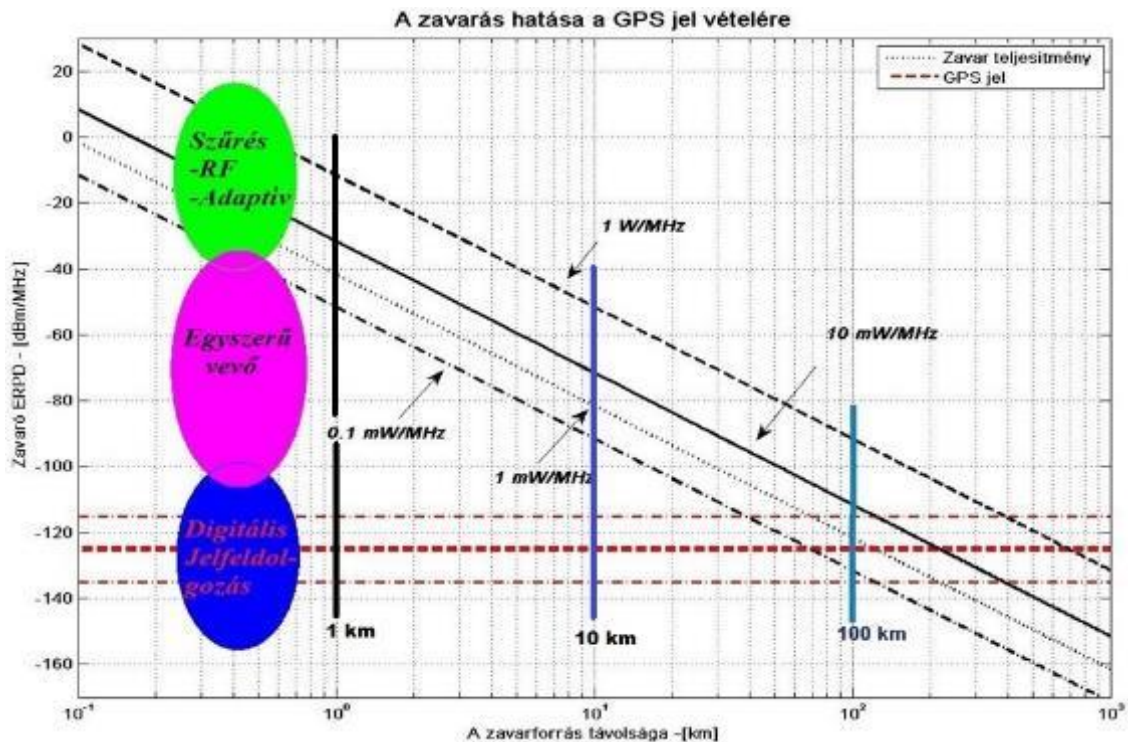
- antennák mérete elégséges minimum;
- az adóteljesítmény minimális;
- a vevőérzékenység az elérhető maximum;
- a jelfeldolgozás rendkívül korszerű, feladatorientáltan flexibilis és maximális teljesítményű legyen.

Ezért a drónok zavarvédelmi képességének értékelése és növelése napjainkra kiemelkedően fontos gazdasági–műszaki paraméter illetve a balesetek valószínűségének csökkentése miatt életvédelmi elvárás. A kérdés megválaszolásában segít a 4. ábra, ahol a rendkívül kis teljesítményű (0.0001–1 Watt) zavarforrás 100 km távolságra található a dróntól.

A drónok zavarvédelmi elvárásainak szemléltetését a polgári felhasználások területén széleskörűen elterjedt Globális Helymeghatározó Rendszer (Global Positioning System–GPS) sebezhetőségének bemutatásával célszerű kezdeni, mivel minden drón fedélzeti műszerébe beépült. Hasonló elven és műszaki paraméterekkel jellemezhetők az orosz–indiai GLONASS, az Európai Unió által fejlesztett Galileo és a kínai Beidou–2 rendszerek.

A GPS műholdak főbb polgári felhasználásra szánt műszaki jellemzői: két jogilag védett frekvencián (1227,6 MHz és 1575,42 MHz) szórt spektrumú jelet sugároznak a Föld felszíne felett kb. 3 Föld–sugárnyi (20200 km) magasságú kör alakú pályáról. A GPS műholdak polgári felhasználásra szánt kódeleme ezred másodpercenként 1023 jelet tartalmaz, míg a katonai társa 10230-at tizezred másodpercenként, melynek következtében a jel–zaj viszony jelentősen növelhető. A katonai rendszerek kihasználhatják a komplexebb kódolás feldolgozása és a hosszabb ideig fenntartható jelkorreláció nyújtotta 30–50 dB jel–zaj viszonynövekedésben rejlő előnyöket. A polgári felhasználású drónok számára is rendelkezésre áll viszont a szélessávú interferencia jelek ellen alkalmazható hatékony adaptív térbeli szűrés technológiája.

Általános esetben (4. ábra) egy GPS zavaró ERP (Effective Radiated Power Density) Effektív Teljesítmény Sűrűsége: 0,1 mW/MHz – 1 W/MHz közötti érték. A GPS műhold műszaki paraméterei és pályája miatt a kisugárzott jel erőssége úgy van meghatározva, hogy a Föld felszínén a jelszint elérje a -125 ± 10 dBm/MHz jelteljesítményt a 0 dB-s körpolarizált antenna kimeneten. A drónon elhelyezhető GPS antenna nyeresége általában 0–3 dB, míg az alkalmazható RF szűrők és a kiszajú előerősítők érzékenysége gyártó specifikus paraméter. GPS zavarás esetén további problémát jelent, hogy a helyzetkoordináta mérés nem egyszerre szűnik meg, hanem pontossága folyamatosan romlik (100–500 m), miközben lehetetlen lesz az új műholdakra való szinkronizálás. Eközben a rendszer újra éledési idő tovább növekedhet akár 1–2 percre. Tény, hogy a telemetriai adatszolgáltatás számítógépes hálózat kommunikáción nyugszik, mely szinten megszűnhet vagy instabillá válhat a GPS időjelek hibaszórásának növekedésével.



4. ábra. GPS jel zavarásával kapcsolatos jelszintek, jellemzők

Megoldhatatlan problémát jelent, hogy a katonai rendszerek bonyolult jelfeldolgozási és hosszabb jelintegrálási lehetőségei nem alkalmazhatók polgári rendszerekben azok nyilvánossá tétele előtt, de a dinamika tartomány növelés adaptív szűrők által sikeresen kiterjeszthető a polgári drónok zavarvédelmének fokozására is. Az elképzelések megvalósításánál, számunkra előnyös lehet, hogy a magyar légtérelenőrző rádiólokátor–rendszer jelentős tapasztalatokkal rendelkezik a korszerű zavarvédelemmel ellátott rádiólokátorok üzemeltetése területén, mely információk jelentős mértékben adaptálhatók a drónok zavarvédelmi megoldásainak kidolgozásánál. Igaz, hogy a gyakorlatban bevált megoldások katonai és üzleti okok miatt csak körültekintően dolgozhatók fel, de a többletmunka megéri, hiszen az ismeretek kritikus elemzése segíthet feltárni a polgári drónok zavarvédelme szempontjából fontos szempontokat.

ADAPTÍV ZAVARSZŰRÉS

A drónok zavarvédelmének növeléséhez döntő szempont a hatékonyság, mely elérhető korszerű szoftver rádió alapú algoritmusok nagyfrekvenciás áramkörökkel való rendszerintegrálásával. Megvizsgálva a drónok fedélzetén alkalmazható adaptív zavarszűrés lehetőségeit a megoldások a koherens jelfeldolgozások digitális megvalósításai köré csoportosíthatók. A tudományosan leggyakrabban vizsgált, az általam is kutatott esetekre az elméleti kiindulási modellekre vonatkozó egyszerűsítő megközelítések az alábbiak [4]:

- rendelkezzen az interferenciaforrás (a zavar forrás) pontszerű térbeli helyzettel és fehérzajhoz hasonló teljesítmény sűrűségű spektrummal;
- legyen a zavar forrás jele az antennabemeneteken erősen korrelált;
- a zavaróadó és a drón/drónok mozgásából származó Doppler–frekvenciacsúszások automatikusan kiegyenlítődjenek (gaussi bistatikus Doppler);
- az iránymérés felbontása legyen olyan nagy, hogy ne befolyásolja az adaptív zavarelyomás hatékonyságát.

Az antennarács technológia elméletéből következik, hogy a koherens antennanyaláb előállítás elvárásainak betartásával, több antennarács csoport alakítható ki egy nagy

antennarácson belül, illetve tetszőleges számú antennarács helyezhető egymás mellé. Az antennák geometriai elhelyezése, a „kiterjesztett apertúra” alkalmazásfüggő és optimalizálása az antenna nyereség valamint az adás–vételi irány karakterisztika elvárásaihoz igazodik. Az iker drónokra szerelhető antennák (általános esetben fázisrács antennák) legfontosabb jellemzői és sajátosságai az apertúra amplitúdó és fáziseloszlás függvényeiből kiindulva az FFT (Fast Fourier Transformation – Gyors Fourier Transzformáció) térbeli hullámokra történő alkalmazásával számított iránykarakteristikákon keresztül vizsgálható.

A rendszer által determinált jel¹ a lineáris (ekvidisztáns) antennarácson (Uniform Linear Array –ULA) „n” szerint mintavételezve számítható. Iker antennarács esetén, 5. ábra, az adási irány karakterisztika kialakítása két teljesen azonos (R_1 és R_2) antenna fázis és amplitúdó eloszlásfüggvényeiből és a köztük lévő, iker alkalmazás esetén néhányszor tíz méteres távolság által meghatározott eloszlásfüggvénnyel történik. Az antennák kimenetén megjelenő jelek az (1) és (2) egyenletek szerint számíthatók. Adaptív zavarűrés esetén a különböző irányokból érkező interferencia jelek fázis- és amplitúdói a (3) szerint csökkenthetők. [5]

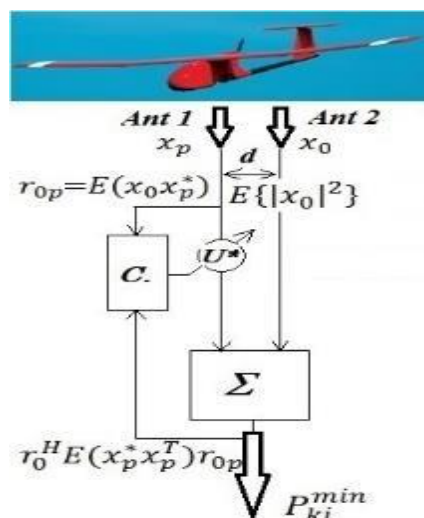
Az 5. ábra egy drón fedélzeti GPS, rádiókommunikációs és radar rendszereinek adaptív térbeli zavarűrésének általános elvét szemlélteti. A megoldás előnye az egyszerűen kivitelezhető jelstabilitás növelés, hátránya viszont, hogy meg kell duplázni a drónra szerelt vételi antennák és RF egységek számát.

Zavarviszonyok között a főcsatornában mintavételezett jel $x_0 = x(n)$ [6]:

$$x(n) = \sqrt{M}v(\phi)s(n) + w(n) \quad (1)$$

Ahol:

- $v(\phi) = \frac{1}{\sqrt{M}} [1 e^{-jk_0 d \sin(\phi)} \dots e^{-jk_0 d \sin(\phi)(M-1)}]^T$ – antenna irányvektor;
- Φ – a keskenysávú jel iránya, $(-\pi/2 < \phi < +\pi/2)$;
- $1/\sqrt{M}$ – M antenna elemszám, $\sqrt{\quad}$ – a számítási műveletek egyszerűsítésére;
- $d \leq \lambda_0/2$ – a szomszédos antenna elemek közötti távolság;
- k_0 – térhullámok esetén értelmezett hosszegységre eső hullámszám, analógiája, az időegységre eső hullámszám;
- $w(n)$ – a vevőrendszer zajhőmérséklet vektora (korrelálatlannak tekintjük, ezért a mintavételezés „n” előtti szűrők átfedéseiből és az érzékelő elemek kölcsönös egymásra hatásából eredő ideiglenes korreláció értéke elhanyagolható);
- $s(n)$ – a vett keskenysávú jel vektora.



5. ábra. Adaptív térbeli szűrésen alapuló drón zavarvédelem

¹ Lásd részletek MATLAB Phase Array Toolbox

Ennek analógiájára a segédantennán (vagy al-antennarács csoporton) vett jel:

$$x_p(n) = s(n)v(\Phi_o) + \sum_{p=1}^P i_p v(\Phi_p) + w(n) \quad (2)$$

Ahol:

- $s(n)$ – értéke legalább 20–30 dB-lel (oldalnyaláb szint) kisebb, mint a főcsatornában;
- i_p – interferencia (zajzavar) erőssége Φ_p irányában;
- $v(\Phi_o)$ és $v(\Phi_p)$ – az interferencia iránya a „o” fő és a „p” segédantennához viszonyítva.

Az adaptív szűrő kimenetén mérhető jelteljesítmény:

$$P_{ki}^{min} = E\{|x_0|^2\} - r_0^H R_p^{-1} r_{0p} = E\{|x_0|^2\} - r_0^H E(x_p^* x_p^T) r_{0p} \quad (3)$$

Ahol:

- $E\{|x_0|^2\}$ – a főcsatorna bemenetén mérhető interferencia és vevőzaj teljesítmény;
- r_0^H – a főcsatorna bemenetén mérhető interferencia és vevőzaj kovariancia (keresztkorreláció) Hermitant-mátrix;
- $R_p^{-1} = E(x_p^* x_p^T)$ – a szűrő kimenetén mért interferencia és vevőzaj kovariancia (korrelációs) mátrix, $E(\cdot)$ – statisztikai elvárás, * komplex konjugált, x_p^T – transzpóz vektora x_p -nek;
- $r_{0p} = E(x_0 x_p^*)$ – statisztikai mátrix kapcsolat a fő- és a segédcsatorna bemenetén mérhető interferencia (+vevőzaj) kovariancia (keresztkorreláció) között. A főcsatorna bemenetén $\rho_{00} = 1$. Általános esetben:

$$r_{0p} = \begin{vmatrix} 1 & \dot{\rho}_{01} & \dot{\rho}_{02} & \cdot & \dot{\rho}_{0(p-1)} \\ \dot{\rho}_{10}^* & 1 & \dot{\rho}_{12} & \cdot & \dot{\rho}_{1(p-1)} \\ \dot{\rho}_{20}^* & \dot{\rho}_{21}^* & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \dot{\rho}_{(p-1)0}^* & \dot{\rho}_{(p-1)1}^* & \dot{\rho}_{(p-1)2}^* & \cdot & 1 \end{vmatrix} \quad (4)$$

Megjegyzés: A (4) egyenletnek csak akkor van megoldása, ha a zavaró jelforrások száma kevesebb, mint a segédcsatornák száma.

A zavarelnyomási tényező („ K_z ”) (Jammer Cancellation Ratio – JCR) a vizsgált rendszer bemeneti és kimeneti jelteljesítményeinek arányából származtatható [7]:

$$K_z = \frac{P_{be}}{P_{ki}^{min}} = \frac{E\{|x_0|^2\}}{E\{|x_0|^2\} - r_0^H R_p^{-1} r_{0p}} \quad (5)$$

Legegyszerűbb esetben $p=1$, – csak egy segédcsatorna aktív.

$$K_z = 1 / (1 - r_{01}^2) \quad (6)$$

Ahol: $r_{01} = E\{|x_0 x_1^*|^2\} = (|\overline{U_{be0} U_{be1}^*}|) / \sqrt{|\overline{U_{be0}}|^2 |\overline{U_{be1}}|^2}$ – a fő- és segédcsatorna bemenete között számított zajzavar keresztkorreláció.

Megjegyzés: a korrelációs mátrix ergodik folyamatok esetén pontosan számítható a megvalósítás időállandójával, de a valós mérési környezet csak véges darabszámú mintavektor előállítását teszi lehetővé. Ezért véges dimenziójú autókorrelációs mátrixból kell megbecsülni a térbeli spektrum értékét, mely több szempontból is korlátozott.

A zavarelnyomás hatékonyságát meghatározó tényezők

A korrelációt romboló legfontosabb összetevők [8]:

1. A fő- és a referenciacsatornák jelkésleltetés különbsége:

$$\partial\tau \leq 1 / (2B_n \sqrt{K_z}) \quad (7)$$

Ha a vevő sávszélessége $B_n=5$ MHz és $K_z=40$ dB, akkor $\partial\tau \leq 10-9$ s.

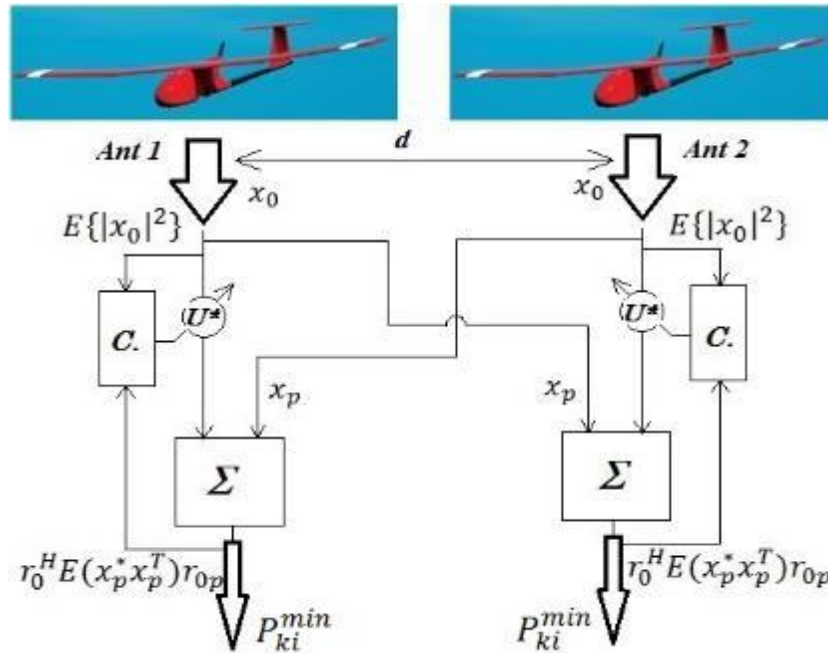
2. *A segédcsatornák érzékenysége:* Alapvetően a fő- és a segédcsatornák bementén mért zavarteljesítmény és saját zajteljesítmények korrelációromboló értéke határozza meg. Elvárás, hogy a segédcsatornák érzékenysége elérje a főcsatorna érzékenységét. A korreláció fenntartása érdekében azonosak a fő- és segédcsatornák RF szűrői, kábelezése, kis zajú erősítői, keverői és analóg digitális átalakítói.
3. *A segédantenna erősítési tényezője:* Rádiólokátorok esetén a főantenna vételi oldalnyaláb szintjeinél nagyobb és magas keresztkorrelációs értéket kell biztosítani, melyet a zajzavar-teljesítmény egységnyi antennaerősítéséhez viszonyított értéke behatárol. Ideális esetben értéke megegyezik a főnyalábéval, mely elvárás iker rádiólokátor koncepció esetén teljesül.
4. *A segédantennák iránykarakterisztikájára vonatkozó elvárás:* A segédantenna iránykarakterisztika amplitúdó- és/vagy fázisközéppontja különbözzön a főantennáétól. Ez az elvárás hasonló a monopulzusos iránymérés elvárásaihoz, de ez esetben a segédantenna fázisközéppontjának elmozdítása a jelkésleltetésre vonatkozó követelményt (7) rontja: $\partial\tau_{\text{FázisKözp}} = d\cos\Phi/c$, ahol: d – a két antenna fázisközéppont közötti távolság.
5. *Az adaptivitás sebességére vonatkozó követelmény:* Az elvárt hasznos jelre (radarok esetén a saját adójelére) nem szabad reagálnia, viszont a zajzavar változásait időben adaptívan követnie kell. Radarok esetén a megvalósításhoz általában az impulzus kompresszió kimenetén megjelenő jel sáv szélességét 2–3 szorosára csökkentik, annak figyelembe vételével, hogy így is jelentősen nagyobb legyen a zavarójel sáv szélességénél.

A (6) egyenlet szerint az adaptív szűrés hatékonysága csökken az interferenciajелеk korrelációjának csökkenésével. Leggyakrabban ez az eset akkor fordul elő, ha a fehérzajszerű nagy kitöltési tényezővel rendelkező zavarójelek változó teljesítményű impulzusokkal keverednek. Az ilyen típusú zavarás elleni védelem, kombinált SLB (Side Lobe Blanking) / SLC (Side Lobe Cancellation) technológia alkalmazását várja el, mely napjainkra már beépült néhány korszerű rádiólokátorba.

AZ ADAPTÍV ZAVARELNYOMÁS DRÓNFEDÉLZETI MEGVALÓSÍTÁSA

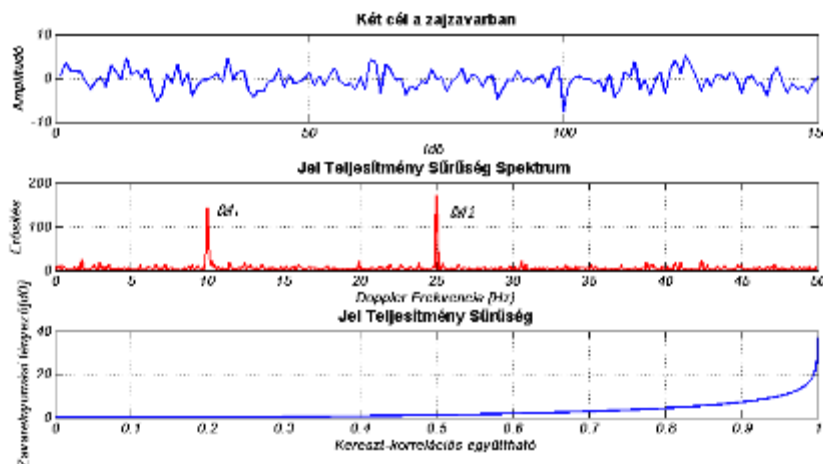
A 6. ábra az iker drón koncepció fedélzeti GPS, rádiókommunikációs és radar rendszereinek adaptív térbeli szűrésen alapuló általánosan alkalmazható, kiterjesztett képességekkel rendelkező zavarvédelmének vázlata. Ez a koncepció az adaptív szűrők hatásfokának javítására további elvi és gyakorlati lehetőségeket kínál. A megoldás előnye, hogy jelentősen kiterjeszti az egy drónra szerelt érzékelő egységek performanciáját. Hátrány viszont a drónok közötti jelstabilitás megoldásának és a bonyolultabb adaptív algoritmusok megvalósításának költsége.

A zavarvédelmi lehetőségek közül kiemelendő a vételi antennák főnyaláb védelme. Ez egy olyan adaptív szűrő, ahol a bemeneti jeleket, a fő és a kisegítő csatornák számára elvben teljesen azonos antennák szolgáltatják. Mivel az antennák erősítése, minden irányban nagyon hasonló, az adójel spektruma pontosan ismert, a zavaró adók iránya nagy pontossággal adaptívan meghatározható és az általuk injektált interferenciák (pl. doppler sebessége, mely ez esetben 10 és 25 Hz) nagy zavarelnyomással csökkenthetők.



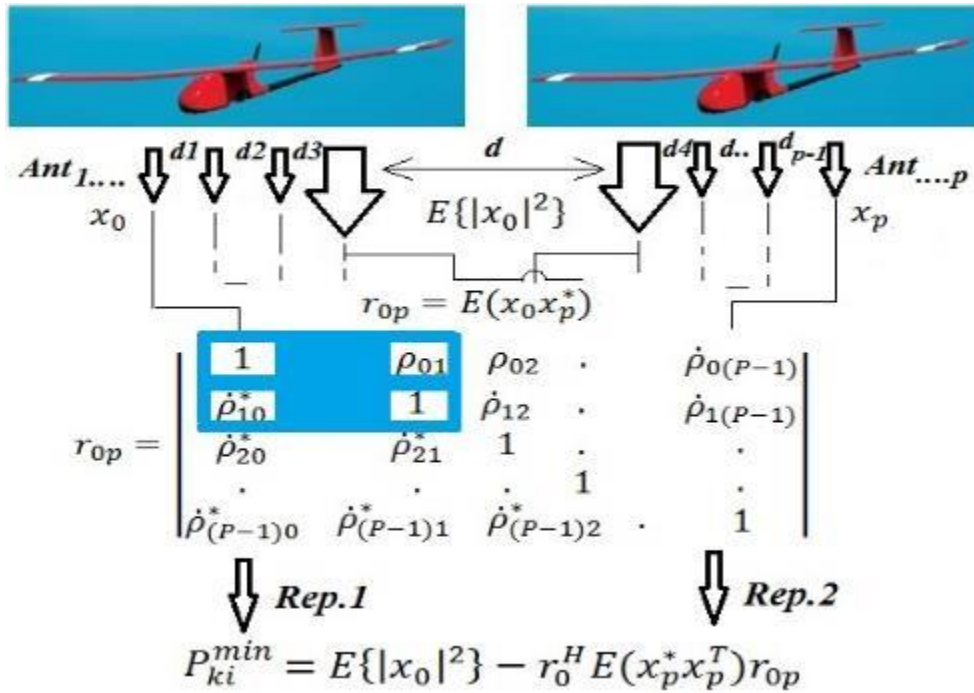
6. ábra. Iker drónokkal megvalósítható kiterjesztett zavarvédelem

A 7. ábra szemlélteti az egyszerű keresztkorrelációt kihasználó zavarűrés hatékonyságát. Az iker drónok R_1 és R_2 főantennáin megjelenő jel normál eloszlású zajzavar, melyben a két céljel ugyanabban a távolsági cellában található és radiális sebességük eltér egymástól. Így a két cél Doppler-frekvenciája FFT-vel számítható, melyet az ábra középső része szemléltet. Ez esetben is a zavarelnyomási tényező hatékonyságát a keresztkorreláció értéke határozza meg. Az ábra alsó része a zavarelnyomási tényező keresztkorrelációs tényezőtől való függését mutatja. Mivel a korrelációs tényező („ ρ ”) a vizsgált rendszer bemeneti és kimeneti jelteljesítményeinek arányából származtatható (5), egy adott, pl. $K=20$ dB zavar elnyomási érték eléréséhez $\rho=0.99$ korrelációs érték realizálása szükséges, mely már a 70-es, 80-as évek technológiai szintjén is elérhető volt. A 40 dB zavarelnyomási érték eléréséhez $\rho=0.9999$ korrelációs érték realizálása az elvárás, mely még napjaink technológiai lehetőségei tükrében is komoly kihívás.



7. ábra. Főcsatorna-védelem és a keresztkorreláció kapcsolata

A 8. ábra az iker drón zavarvédelem kiterjesztése sokcsatornás üzemmódra, a hozzá tartozó keresztkorrelációs mátrixszal. Ez utóbbi a zavarelnyomást legjobban befolyásoló, korrelációs együtttható, csatornák közötti komplex konjugált értékeit tartalmazza. [9]



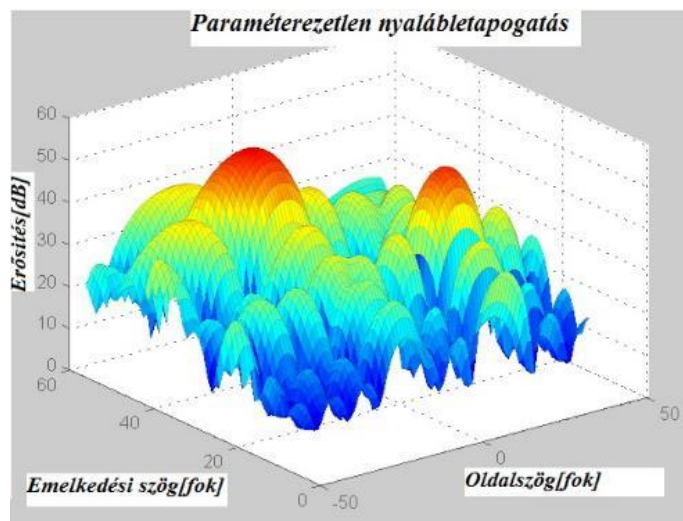
8. ábra. Az adaptív szűrők alkalmazásának szabadságfoka megnő

Általános esetben az elemi sugárzók egymáshoz viszonyított távolsága eltérő és változó, hiszen a két drón egymáshoz viszonyított helyzetének ingadozása befolyásolja. Az eltérő antenna fázisközéppontok miatt a számítások bonyolultsága a sugárzók számának négyzetével nő. A számítási igény csökkentése érdekében célszerű behatárolni az elemi sugárzók egymáshoz viszonyított távolságát és lehetőség szerint rögzíteni azt.

A ZAVARELNYOMÁS HATÉKONYSÁGÁNAK SZÖGFELBONTÁS FÜGGÉSE

A tanulmány elején elvárást fogalmaztunk meg az iránymérés felbontására, melyet gyakran nem lehet teljesíteni a drónokra szerelhető antennarendszerek méretei miatt. A lehetőségeket viszont célszerű felmérni. A 9. és 10. ábrák az iránymérési szögfelbontás fontosságát egy szimulációs példán keresztül mutatják be. A 1,227 GHz védett frekvencián üzemelő GPS antenna URA² (4x2 elemű) 0,08 és 0,16 m elemtávolsággal rendelkezik vízszintes és függőleges síkban. Legyen a drónokhoz viszonyított ismeretlen zavaradók iránya (−15°, 45°), (20°, 25°), és (−13°, 43°) oldalszögben és helyszögben. Az antennarács bemenetén a zavarójel erősségé 0,01 watt.

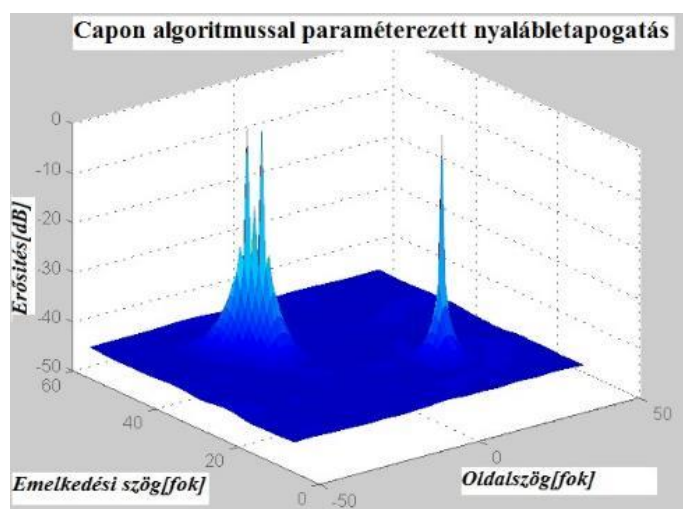
² URA (Uniform Rectangular Array), lásd további részletek: MATLAB Direction of Arrival Estimation with Beamscan and MVDR (Letöltés ideje: 2013. 10. 12)



9. ábra. Hagyományos FFT–alkalmazó térletapogítás esetén elérhető szögfelbontása

A feladat a zavarójelek irányának minél pontosabb megállapítása, majd a zavarójelek kompenzálása. Mivel a zavarójelek hatékony kompenzálása a zavarójel irányának pontos ismeretén alapszik a lehetőségek felmérésére összehasonlításra kerül a hagyományos FFT–alkalmazó térletapogítás és a pontosabb iránymérést lehetővé tevő Capon–módszer (algorithmus)³. A 9. ábra bal felső részén mutatott elméleti jelszintek szerint az egymáshoz közeli irányokban a hagyományos FFT–alkalmazó becslés bizonytalansága még nagy. Ez esetben a zavaró jelek a főnyaláb szélességén belül vannak, $(-15^\circ, 45^\circ)$ és $(-13^\circ, 43^\circ)$ irányban. A zavarelnyomás még akkor is problematikus a kis értékű SINR miatt, ha a zavarók egymáshoz viszonyítva távolsága nagy $(-15^\circ, 45^\circ)$, $(20^\circ, 25^\circ)$.

Megoldást jelenthet a számítástechnikailag bonyolultabb és némileg költségesebben megvalósítható Capon iránymérési algoritmus alkalmazása. (További 10 – 16 hasonló hatásfokkal rendelkező algoritmus ismert, így ennek bemutatásán keresztül értékelhető a többi algoritmus is.) Ennek segítségével az egymáshoz közeli zavarforrások iránya becsülhető és a zavarelnyomás növeléséhez szükséges SINR érték is nő. Ezt szemlélteti a 10. ábra.



10. ábra. Paraméterezett nyálábletapogítás szögfelbontása

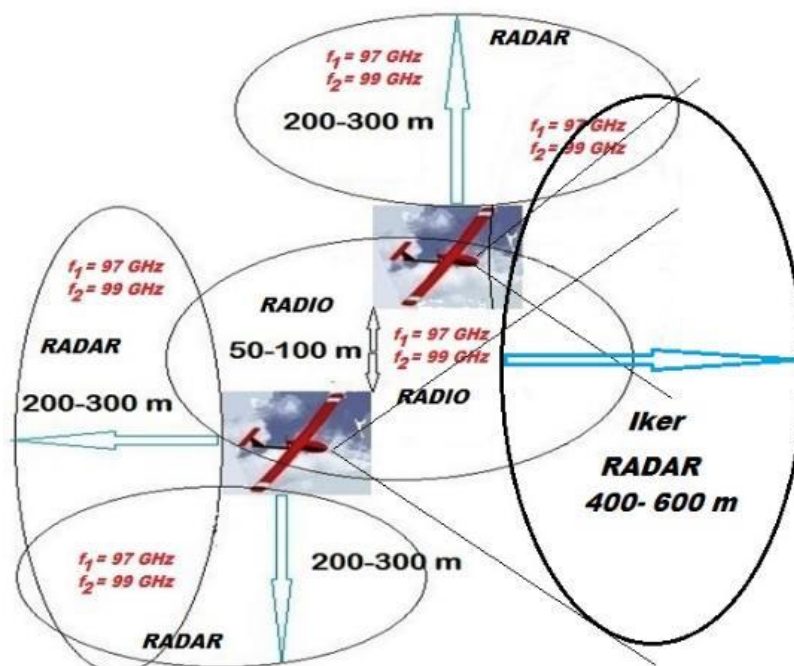
³ A Capon–módszer sajátosságainak elemzése megtalálható [4]–ben.

Fontos kiemelni, hogy az iker drónok fedélzeti antennáinak összekapcsolásával az antennák egymáshoz viszonyított megnövekedett távolsága, a nagyobb bázisvonal távolság miatt, lehetőséget ad az iránymérés és a szögfelbontás további növelésére. [9]

Az iker drón antennastruktúra legnagyobb kihívása az egymás közelében települő rendszer elemek egymásra hatásának szabályozásában van. Az „in situ” mérések eredményeként megvalósulhat a különböző reflexiók, az antenna elemek mozgása, rezgéséből eredő hullámterjedés változás folyamatos értékelése, a drónok egymáshoz viszonyított mozgásából származtatott állapot hibák csökkentése. Ezzel növelhető a korrelációjavító eljárások/eszközök pontossága, a különböző antennarácsok egymáshoz viszonyított fázisviszonyainak, illetve az üzemszerű működés során beálló változások pontos mérése és adaptív korrigálása.

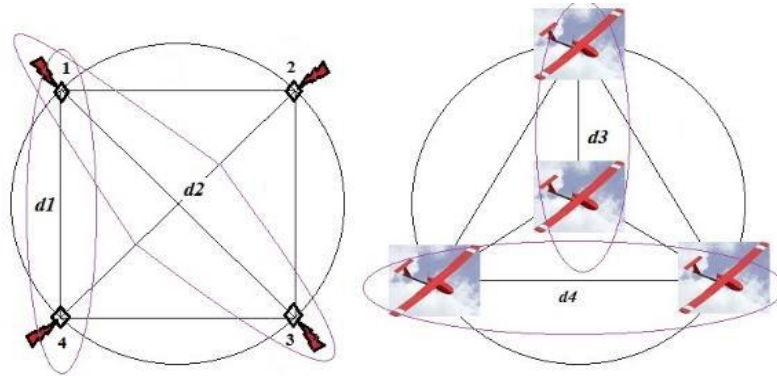
Kézenfekvő elvárás, hogy a drón felületére helyezett antennastruktúra és a kötelék repülés formációja támogassa a rendszertechnikai megoldásokat. Ilyen feladat a két drón közötti olyan adatforgalom repülés közbeni biztosítása, mellyel maximalizálható a rendszer koherens jelfeldolgozási tényezője. A 11. ábrán bemutatott megoldás a kötelék repülés kivitelezéséhez nélkülözhetetlen telemetria adatcserét is lehetővé teszi. A gyakorlatban is megvalósítható repülési formáció szerint egy központi drónhoz maximum 2x3 drón csatlakoztatható kiterjesztett iker drón (kötelékrepülés) üzemmódban, hiszen a két drón egymáshoz képest 6 lehetséges térrész valamelyikében maximálisan 50–100 m távolságon belül foglal pozíciót. A közöttük kiépülő megbízható telemetria és a vételi csatornák, a keresztkorrelációs tényező maximalizálása érdekében 100 GHz környékén pl. 97 és 99 GHz frekvencián párhuzamosan üzemelnek. Ezek a vivőfrekvenciák több mint 10-szeresei a drónok által használt kommunikációs és radar antennák működési értékeinek így megoldható a drón kötelék zavarvédelméhez szükséges jelek amplitúdó és fázishelyes átvitele.

A drónok szárnyvégein, az orrgondolában és a hátsó térrész irányába néző antennák felhasználhatók a 100 GHz-es frekvencián üzemelő térrész figyelő radarok antennáiként, így a drónok környezete a tér minden irányában megfigyelhető. A 12. ábra az antennák lehetséges elhelyezését szemlélteti a rádiók és a radarok számára. A drón fedélzeti iker radarok következtében a drónok előterében a rádiólokációs mező kiterjesztése megduplázódik. [10]



11. ábra. Kötelékrepülésre felkészített drón többfrekvenciás adatkapcsolata

A 12. ábra az általam preferált, négyzet és háromszög, ikerrepülési formációkat szemléltet.



12. ábra. Iker drón antennastruktúra és/vagy kötelékrepülési formáció

IKER DRÓN ZAVARVÉDELEM MEGVALÓSÍTÁSÁNAK TECHNOLÓGIAI ELVÁRÁSAI

Korunk technológiai színvonalán a régi katonai rendszerekben alkalmazott analóg megoldásokhoz képest újszerű RF szűrőkhöz integrált digitális jelfeldolgozással, már a polgári alkalmazású drónok is magas jel–keresztkorreláció értékekkel számolnak. Ennek okai:

- a műveleti pontosság független az alkatrészek értékének változásától;
- a nagyon nagy sebességű grafikai processzorok, az FPGA (Field Programmable Gate Array – programozható logikai kapukat tartalmazó hálózat) és DSP (Digital Signal Processor – digitális jelfeldolgozó egység) áramkörök flexibilis, könnyen átprogramozható jelfeldolgozók;
- aránylag könnyű (ha rendelkezésre áll a megfelelő tudás) a feladatok változásához alkalmazkodó, adaptív programok készítése, és a drón fedélzeti adaptív szűrőkbe történő adaptálása a számítási algoritmusok párhuzamosításával;
- a WIFI és LAN (Local Area Network –helyi–számítógépes, hálózat) hálózat beépített nagysebességű rutinjai is kiaknázhatók – pl. az adattömörítés, az adattovábbítás területén;
- az „P” and „Q” csatornák üzemmód függő illesztésével, a fázisfutási problémák megoldhatók, mivel a csatornák közötti együttfutás és a csatornák linearitása az elvárásokhoz igazítható;
- a dinamika, sávszélesség és a mintavételezés szükség szerinti, a 18 hónaponként megduplázódó számítástechnikai kapacitásokhoz igazodva, szükség szerint művelhető;
- 2^{16} bittartományon belül extrém nagy követelmények is teljesíthetők a szűrőkarakterisztikák linearitása, a fázis és amplitúdó elvárásaira vonatkozóan;
- az eredmények tetszőleges pontossággal reprodukálhatók;
- a legújabb kutatási eredményeknek megfelelő, folyamatosan javított korszerű algoritmusok aránylag egyszerűen és gyorsan adaptálhatók a meglévő rendszerekbe.

Az iker drónok egymáshoz viszonyított mozgásából, az antennák rezgéséből származó veszteségek csökkentése az elvárt jeltisztaság biztosítása elvárja különleges adójel struktúrák használatát úgy az adatkommunikációs jelutak, mint a radarok adójel struktúrájában. Ezek az adójel struktúrák, azon kívül, hogy maximalizálják az impulzus kompressziós szűrőkkel elérhető jel–zaj viszonyt és a bizonytalansági függvényük feladat specifikusan optimalizálható,

biztosítják a fáziscsúszások, a többszörös hullámterjedés, a hullámterjedési rendellenességek és reflexiók pontos mérését.

További megoldásra váró műszaki feladatok:

- az antennaelemek hatásfokának növelése 1.5–2 dB– lel, a parazita kölcsönhatások csökkentése, pl. speciálisan erre a feladatra kidolgozott vékony műanyag fémbevonatokkal;
- az antenna talpponti ellenállás az antenna irányától függően, antenna /– környezet/– felszín /– időjárási környezet/– antenna visszacsatolás következtében változik, mérések szerint 36–64 Ohm között. Ennek kompenzálása növelheti a hullámterjedési viszonyok kiaknázhatóságát;
- különlegesen hatékony adaptív fő– és oldalnyaláb elnyomó algoritmusok/rendszerek kidolgozása, mely a kombinált nagy kitöltési tényezővel rendelkező zajzavarhoz kevert nagyteljesítményű impulzus zavarok ellen is hatékony;
- az iker drónkonceptió flexibilisen változó teljesítményű adórendszereinek feladatra optimalizált kialakítása.

Jövőbeli kutatási terület a gráfelmélet eredményeinek rendszeradaptációja, hiszen természetes elvárás, hogy az antennák helyzetét az iker drónok repülési formációi feladat specifikusan támogassák.

Mivel az iker rendszerek zavarelnyomása a helyzethez flexibilisen alkalmazott algoritmus–struktúra és a jelfeldolgozást általában jellemző folyamatok nem gaussi normál eloszlásfüggvény szerinti, ezért ígéretes a „Particle” szűrők nem gaussi normál eloszlásfüggvényre optimalizált algoritmus változatainak rendszerbe integrálása.

Az iker rádiolokáció lehetőségeit is kiterjeszti az iker drónok zavarvédelmi képességeinek növekedése, hiszen kiterjeszti a levegőből történő aktív/passzív rádiolokáció nyújtotta lehetőségeket.

ÖSSZEFOGLALÁS

A polgári felhasználású drónok feladatköre folyamatosan bővül. Az új feladatok ellátásához szükség van a fedélzeten elhelyezhető hasznos műszerpark növelésére. A tanulmány bemutatja, hogy iker drónok alkalmazásával megduplázhatók az adott feladat teljesítésére rendelhető fedélzeti műszerek száma, ugyanakkor közvetlen adatkapcsolattal rendelkező új műszaki elgondolások megvalósítása kiterjesztheti az egy időben elvégezhető feladatok körét, illetve javíthatja a meg lévő feladatok végrehajthatóságának minőségét.

Bizonyításra kerül, hogy a polgári drónok rendkívül érzékenyek a zavarásra, így alkalmazhatóságukat behatárolja a környezetünkben egyre jelentősebb mértékben jelenlévő interferencia, mely ronthatja a mérések eredményét, és a telemetriai adatforgalom megbízhatóságának csökkenésével baleseti tényezővé, repülésbiztonsági kérdéssé teszi a drón fedélzeti zavarvédelmi eljárásokat. [11]

A tanulmányban a drónok zavarvédelmével kapcsolatos tények és a leghatékonyabb drón fedélzeti adaptív szűrési eljárások rövid elméleti áttekintése kiegészül az iker drón fedélzeti zavarűrés hatékonyságának szimulációs eredményekkel való szemléltetésével.

A drónok zavarvédelmi performanciáját az antenna rendszer, mint térbeli szűrő alapvetően befolyásolja. Az antennák geometriai elhelyezése, a „kiterjesztett apertúra” alkalmazásfüggő, az antennanyereség valamint az adás–vételi irány karakterisztika elvárásaihoz igazodik.

Megállapításra kerül, hogy a rendszer performanciák növelhetők az iker drónok fedélzetén található antennák topológiájának megválasztásával. A zavarűrés leghatékonyabb megoldásai szoftver központúak, ahol a csúcstechnológiát képviselő RF sávűrés, a nagy dinamika és jelkorreláció nyújtotta lehetőségeket is ki kell használni, még a legegyszerűbb egy drón fedélzeten alkalmazandó adaptív zavarűrés esetén is.

Felhasznált irodalom

- [1] SZABÓ S. A.: UAV (Pilóta Nélküli Légi jármű) műveletek humán tényezőinek elemzése repülésbiztonsági szempontból, Repüléstudományi Közlemények, Repüléstudományi Konferencia 2013, XXV. évf. 2013 2. szám.
(http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2013_cikkek/2013-2-36-Szabo_Sandor_Andras.pdf) (Letöltés ideje: 2014. január 19.)
- [2] SOLYMOSI J. – BHE Ltd– UAV(robotrepülő) előadás, Vác, 2012 Október.
(<http://www.youtube.com/watch?v=B2DMJaeArj8>) (Letöltés ideje: 2014. január 19.)
- [3] PADOS L.: A digitális hozadék sáv felhasználásának szabályozása, 2013. augusztus 22,
(http://bme.videotorium.hu/hu/recordings/details/6793,A_digitalis_hozadek_sav_felhasznalasanak_szabalyozasa_a_valtozasok_kovetkezmenyeidmenyhirdetese)
(Letöltés ideje: 2014. január 19.)
- [4] SELLER R.: Módszerek céltárgyparaméterek rádiólokációs mérési pontosságának növelésére, Egyetemi doktori értekezés, BME, Budapest 1996.
- [5] BALAJTI I., VASS S. : Az elektronikai védelem alapjai, ZMNE, 2000, Budapest, 72. p.
- [6] MANOLAKIS, D.G., INGLE, V. K., KOGON, S. M. (2005): Statistical and adaptive signal processing. London, Artech House. 796 p. ISBN 1–58053–610–7
- [7] SKOLNIK, Merrill I. (2008): Radar handbook. 3rd ed. New York, McGraw–Hill, Chapter 6.
- [8] BONDARENKO, B. F. (pod red.) (1987): Osznovü posztroenija RLSZ. Kiev, KVIRTU PVO
- [9] CHERNYAK, Victor S. (1998): Fundamentals of multisite radar systems. Amsterdam, Gordon & Breach Science Publ. 475 p. ISBN 90–5699–165–5
- [10] BALAJTI I. Short Study on Performances of Air Surveillance Augmented by Twin Radars, In AARMS, 2014, (kiadás alatt)
- [11] VÁNYA L.: Hogyan védekezzünk a drónok ellen? Repüléstudományi Közlemények XXV. évf. 2013/2. szám. 255–261. pp