

Pécsi Péter

Microstripantennák tervezése és katonai alkalmazásának lehetőségei

Bevezetés

A vezeték nélküli kommunikációs technikák, eszközök és rendszerek gyors fejlődésének és elterjedésének köszönhetően a rádiófrekvenciás spektrum az elmúlt évtizedekben erősen zsúfolttá vált amin a használható sávok egyre magasabb frekvenciatartományra történő kiterjesztése sem segít érdemben. Ilyen bonyolult elektromágneses közegben egyre kifinomultabb megoldásokra van szükség egyrészt a frekvenciatartománybeli és térbeli szűrés, másrészt a jelfeldolgozási eljárások területén annak érdekében, hogy minimalizáljuk saját eszközeink zavartatásának és más rendszerek zavarásának mértékét. Ebben az egyik, ha nem a legfontosabb szerep az antennákra hárul, amelyek tulajdonságai alapjaiban határozzák meg egy-egy összeköttetés minőségét. Antennákat tehát széles körben alkalmaznak a legkülönbözőbb feladatokra polgári és katonai vezeték nélküli infokommunikációs, műsorszóró vagy éppen felderítő, távérzékelő rendszerekben. Speciális területet képviselnek a rádióelektronikai felderítő (SIGINT) és elektronikai hadviselési (EHV) berendezések is, amelyeknek szintén egyik legfontosabb eleme maga az antenna, amely a hozzá vezetett elektromágneses hullámokat (jeleket) kisugározza (adás), illetve a vett elektromágneses sugárzást alakítja vissza elektromos jelekké (vétel). Ezek a rendszerek általában széles frekvenciatartományban üzemelnek, mivel az alkalmazás körülményei, illetve a feladat ezt megkívánja. A korlátozott fizikai tér ugyanakkor sokszor kizárja több antenna elhelyezését, amely megoldás szűkebb sávonként biztosítaná a jó illesztést a szabad térhez, ezért olyan konstrukciót célszerű alkalmazni, amely széles frekvenciatartományban képes jó hatásfokkal üzemelni. Azonban fontos megjegyezni azt is, hogy mivel ezeket a speciális katonai feladatokat általában nagyobb távolságról végezzük, a használt antennákkal szemben elvárás a nagyobb nyereség. A fentiekben túl természetesen olyan praktikumokat is célszerű figyelembe venni az antenna kiválasztása során, mint a költséghatékonyság, az észszerű gyártási költségek és az üzemeltetés, karbantartás költségei.

Az antennatervezést, főleg a magasabb frekvenciatartományokban, sok esetben inkább nevezhetjük művészetnek, mint mérnöki tudománynak. Különösen igaz ez az antenna közeltére viselkedésének megértésére, illetve annak a tervezés során történő figyelembevételére. Az antennákra jellemző a reciprocitás elve, amely szerint viselkedésük adás és vétel esetén is ugyanazokat a karakterisztikus jellemzőket mutatja.

A különböző katonai rádiófrekvenciás eszközökben és rendszerekben széleskörűen alkalmaznak különböző típusú antennákat, illetve rendszereket, az egyszerű botantennától a forgásparaboloid antennáig. Jelenlegi kutatásom során a gyártástechnológia gyors fejlődésének is köszönhetően a 21. században egyre nagyobb teret nyerő *microstrip-patch* antennák tervezésének és katonai alkalmazásának kérdéskörével foglalkozom.

A hordozható távközlési berendezések miniatürizációs követelményeinek teljesítése érdekében a kutatók a közelmúltban sok figyelmet fordítottak a kompakt microstripantennák fejlesztésére. Számos, különböző célra optimalizált speciális antenna terve jelent már meg publikációban, mint például széles sávú, kettős frekvenciájú, duálpolarizált sugárzású, körpolarizált sugárzású, illetve nagy antennanyereségű megoldások.¹ Kétség sem fér hozzá tehát, hogy a jövőre nézve ez a terület a Magyar Honvédség vonatkozásában is releváns lehet. Ennek, valamint az antennák fejlődési tendenciái iránti érdeklődésemnek köszönhetően választottam kutatásaim tárgyául az ilyen megoldások vizsgálatát, ami közvetlenül kapcsolódik korábbi tanulmányaimhoz is. Ezen belül érdekesnek tartom megvizsgálni az ilyen technológiák elektronikai hadviselési szaktevékenységekre gyakorolt jövőbeni hatását is, így céljaim között szerepelt a különböző patch-antennák műszaki megoldásainak elemzése, a fejlesztési irányok meghatározása, valamint a katonai felhasználás lehetőségeinek vizsgálata az eszközök képe sségeinek tükrében.

Microstripantennák

Antennaelmélet

Az antenna elektromágneses hullámok kisugárzására és vételére szolgáló eszköz. A rádiórendszerekben betöltött funkciója alapján az antenna tulajdonképpen

¹ Kin-Lu Wong: *Compact and Broadband Microstrip Antennas*. New York, Wiley, 2002.

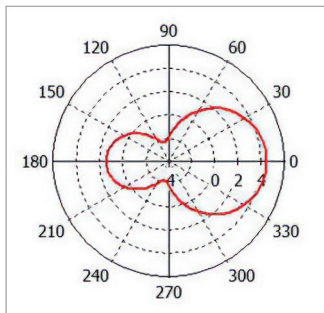
transzformátorként szolgál a tápvonal és a szabad tér között. Ez azt jelenti, hogy az adóantenna az adóberendezésből hozzávezetett elektromágneses energiát kisugárzott elektromágneses hullámokká, a vevőantenna pedig a beeső elektromágneses hullámot vezetett hullámokká alakítja. Az antenna harmadik funkciója az adás és a vétel mellett a szórás, vagyis az elektromágneses tér eloszlásának módosítása. Típusát tekintve rengeteg megoldás létezik, amelyeket szerkezetük és felépítésük szerint különböztetünk meg. Az antennák alkalmazása során a hullámterjedési adottságokat, valamint a meteorológiai sajátosságokat, a terep földrajzi adottságait, a különböző zajforrásokat, objektumokat, az adó- és vevőantenna közötti távolságot, illetve ezek irányát figyelembe kell venni. Az antenna mint berendezés szempontjából fontos tényező az antenna típusa, illesztése, hatásos magassága, az adóantenna sugárzásának iránya, a használt frekvenciatartomány, az adó által kibocsátott teljesítmény, a vevő érzékenysége. A legtöbb esetben nem tudunk minden követelménynek tökéletesen megfelelni, a gyakorlatban gyakran tapasztaljuk ezt: az általunk használt antenna mérete, kialakítása és illesztése összefüggésben van a kisugárzandó vagy venni kívánt elektromágneses energia hullámhosszával. Katonai szempontból általában nem előnyös csak egy adott frekvencián dolgozni, ezért viszonylag széles frekvenciasávokat alkalmaznak, hogy kevesebb antenna alkalmazására legyen szükség. Ez azt is jelenti, hogy a gyakorlatban mindössze néhány típusú antennát alkalmaznak, és különböző hangolóelemek segítségével illesztik az eszközt, hogy az optimális kisugárzást vagy vételt megvalósítsák.

Az elektronikai hadviselés 3 fő területéből kiindulva (elektronikai támogatás, elektronikai ellentevékenység, elektronikai védelem) meghatározhatók a katonai célú antennákra vonatkozó főbb követelmények. Elektronikai támogatás esetén követelmény, hogy minden évszakban és napszakban biztosítani tudjuk a teljes frekvenciatartományban a kedvező vételi lehetőséget. Elektronikai ellentevékenység esetén a saját eszközök zavarása nélkül kell a zavaró adók antennáinak nagy intenzitású energiát kisugározniuk az ellenséges erők vevőberendezései felé. Elektronikai védelem esetén pedig a saját elektronikai eszközök antennáinak biztosítaniuk kell a természetes vagy mesterséges, illetve szándékos zajok és zavarok kiszűrését.²

A gyakorlatban az antennák tekintetében a távoltér az, ami számunkra fontos, ezért annak iránykarakterisztikáját is itt vesszük fel. Ábrázolhatjuk 2D-ben,

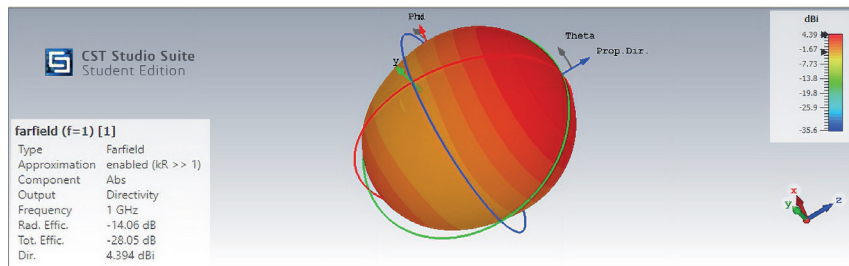
² Haig Zsolt et al.: *Elektronikai hadviselés*. Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem – Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, 2014. 66–67.

illetve 3D-ben, ahogy az 1., illetve a 2. ábra szemlélteti. Az antennák iránykarakteristikáján az elektromágneses sugárzásintenzitás térbeli eloszlását értjük.



1. ábra: 2D iránykarakterisztika

Forrás: saját szerkesztés



2. ábra: 3D iránykarakterisztika

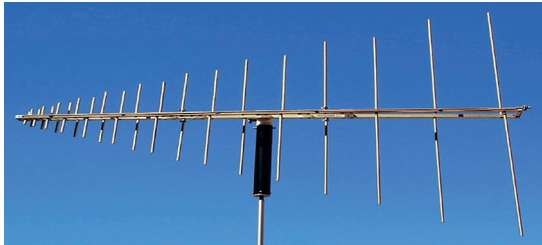
Forrás: saját szerkesztés

Elméletben létezik egy olyan antennakonstrukció, amelyet izotróp antennának neveznek. Különlegessége, hogy fizikai kiterjedése minden irányban 0, azaz pontszerű sugárzó. Iránykarakteristikája így szabályos gömb alakú, tehát minden irányban azonos térerősséget állít elő.

Amennyiben valamely előre meghatározott irányba szeretnénk sugározni, irányított antennát alkalmazhatunk, amely adó- és vevőoldalon is pozitív tulajdonságokkal bír. Nagyobb térerősséget érhetünk el, ha az energiát egy bizonyos irányba koncentráljuk azonos kisugárzott teljesítmény mellett. Minden frekvenciatartománynak vannak jellegzetes antennakonstrukciói. Jellemzően

dipólantennákat alkalmazunk hosszú- és középhullámú rádiófrekvenciás tartományokban. Mivel a hullámhossz arányos az antennamérettel, aktív elemként tornyokat, illetve kifeszített huzalokat alkalmaznak antennaként. Rövidhullámú összeköttetésnél jellemzően dipólantennákat alkalmaznak, amelyek lehetnek széles sávú dipólok, sarokdipólok, haladóhullámú antennák, keretantennák, botantennák, rombuszantennák. Műsorszórás esetén különleges esetekben, illetve a rádióamatőrök és a rádióelektronikai felderítők is alkalmaznak rövidhullámú, logaritmikusan periodikus antennát, amely akár forgatható is lehet.

Nagyságrendileg 1 GHz-ig bezárólag alacsony és magas ultrarövidhullámú frekvenciatartomány esetén dipólantennákat, Yagi-antennákat, logaritmikusan periodikus antennákat (3. ábra), tárcsás-kúpos antennákat, hélixantennákat alkalmaznak. Emellett ezek kombinációiból is készíthetők különböző antennakonstrukciók. Minden antenna esetén fontos tulajdonság, hogy táplálásuk szimmetrikus vagy aszimmetrikus (például koaxiális), mert az alapjaiban határozza meg bemeneti impedanciájukat.

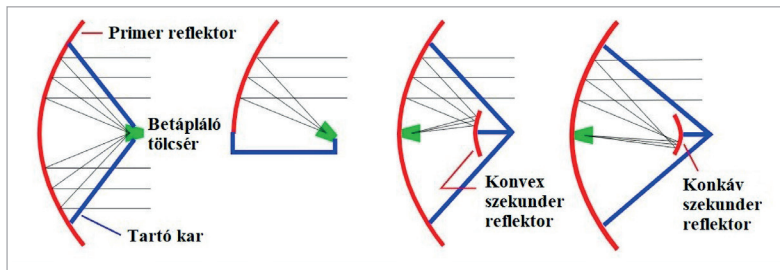


3. ábra: Logaritmikusan periodikus antenna

Forrás: José Raúl Machado Fernández: [Estimation of Frequencies for National Shortwave Network with Automatic Link Establishment Equipment](#). *Revista Ingeniería*, 26. (2016), 2. 79–91.

3 GHz felett a félhullámú dipólantenna fizikai kivitelezése már problémát okoz, hiszen a hullámhossz és ezzel együtt az antenna mérete olyan kicsi, hogy a táplálása komoly gondot jelent. Jellemzően 1,5-2 GHz felett a hullámvezetés módja is változik. Ettől a frekvenciatartománytól kezdődően jellemzően csőtápvonalat alkalmaznak az elektromágneses jelek továbbítására. Itt a leggyakoribb sugárzók tulajdonképpen szétnyitott csőtápvonalak (általában primer sugárzó), hivatalos nevükön tölcérsugárzók, amelyekkel a fázishibák csökkentése érdekében speciális geometriájú, elektromágnesesen tükröző felületet (szekunder sugárzó) világítanak meg, amely ténylegesen felelős lesz az iránykarakterisztika

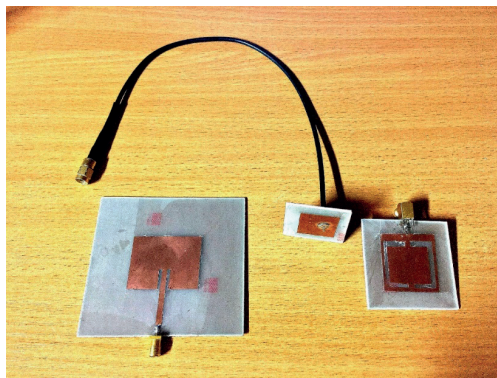
kialakításáért. Attól függően, hogy milyen a megvilágított felület, beszélhetünk például forgásparaboloid reflektorantennáról, amely lehet primfókuszos, offset-, Cassegrain-, illetve Gregory-antenna. Utóbbi kettő esetén a sugárzó először egy hiperbolafelületet világít meg, amely aztán egyenletesebben sugározza be a paraboloid felületet (4. ábra).



4. ábra: Különböző forgásparaboloid reflektorantennák: primfókuszos, offset-, Cassegrain- és Gregory-antenna

Forrás: [Parabolic Antenna Types](#). Wikimedia Commons, 2006. április 14.

A mikrohullámú tartományban ugyanakkor méreteik, stabil felépítésük, valamint sugárzási paramétereik miatt egyre nagyobb teret nyernek a nyomtatott antennák, más néven microstripantennák.



5. ábra: Az általam készített különböző táplálású microstripantennák

Forrás: saját szerkesztés

A microstripantennák jellemzői

Először 1953-ban számolt be G. A. Deschamps a microstripantenna-koncepcióról. 1955-ben Franciaországban már szabadalmat adtak ki Gutton és Biassinot néven, ugyanakkor az igazi fejlődés az 1970-es években kezdődött, amikor már viszonylag jó minőségű szubsztrátanyagok álltak rendelkezésre. Az első gyakorlatban is alkalmazott antennákat J. Q. Howell és R. S. Munson fejlesztette ki.³

A microstripantennák az elmúlt évtizedekben rohamosan fejlődtek a többi antennatípushoz képest, aminek oka, hogy méretük és tömegük kisebb, nem mellesleg jóval olcsóbbak, és előállításuk is egyszerűbb. Üzemi frekvencia tekintetében jellemzően az 1 GHz feletti mikrohullámú tartományban elterjedt a használatuk.

Gyakran nevezik egyszerűen nyomtatott antennának is őket, ugyanis felépítésük leginkább egy nyomtatott áramköri lapra hasonlít. Adott egy dielektrikum, amelynek relatív permittivitása kisebb vagy egyenlő, mint 10, és amelyre rámarunk egy fémből készült sugárzó elemet, a dielektrum másik oldalán pedig földelésként szolgáló fémfelületet alakítunk ki.

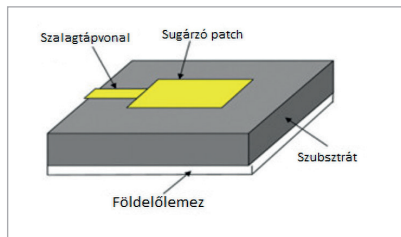
A microstripantennákat felépítésük alapján az alábbiak szerint csoportosíthatjuk:

- nyomtatott réssugárzó antenna;
- dipólantenna;
- haladó hullámú antenna;
- *patch*antenna.

Sokféle microstripantenna létezik különböző frekvenciatartományokban, egyszerű dipólantennától kezdve akár Yagi-antennát, vagy komplex antennarendszereket is megvalósíthatunk. Kutatásom során a patchantennák tervezésével és alkalmazásával foglalkoztam. Ez a típus sok hasonlóságot mutat a félhullámú dipólantennával mind a feszültség-, mind pedig az árameloszlás tekintetében. Lényeges különbség azonban, hogy a patchantennákat jellemzően az eszköz szélén kell megtáplálni. Ha a felépítését vizsgáljuk, a korábbiak szerint tulajdonképpen három réteget különböztetünk meg. A legfelső fémlap maga a sugárzó elem, amelyet gerjesztünk, a középső réteg a dielektrikum, majd az alsó réteg egy fémlap, amely a földelés funkcióját tölti be. Kis méretéből, illetve egyszerű geometriájából adódóan leggyakrabban keskeny sávú mikrohullámú antennaként

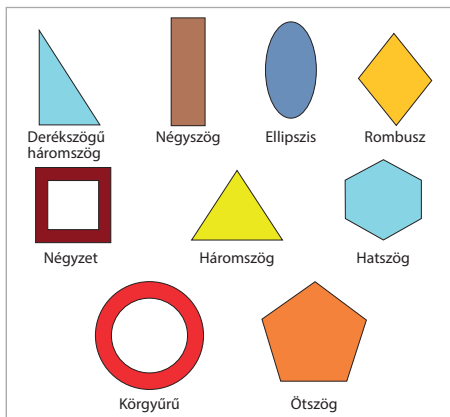
³ Robert E. Collin: *Antennas and Radio Wave Propagation*. Singapore, McGraw-Hill, 1985. 268–283.

funkcionál, iránykarakterisztikája jellemzően félgömb alakú a fő sugárzási irányban.⁴



6. ábra: Egyszerű microstripantenna felépítése

Forrás: saját szerkesztés

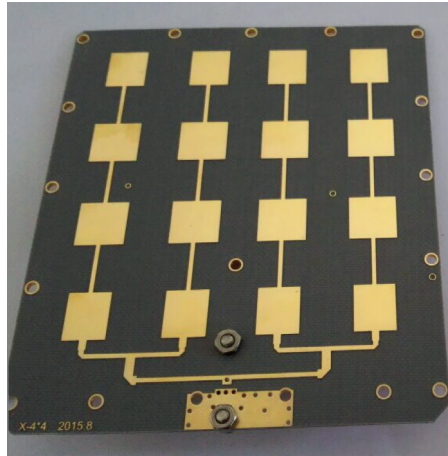


7. ábra: A leggyakrabban alkalmazott sugárzógeometriák

Forrás: Udit Raithatha – S. Sreenath Kashyap: [Microstrip Patch Antenna Parameters, Feeding Techniques and Shapes of the Patch – A Survey](#). International Journal of Scientific & Engineering Research, 6. (2015), 4. alapján saját szerkesztés

Jó integrálhatósága miatt kitűnően alkalmazhatjuk antennarendszerek kialakítására is, ahogy a 8. ábra szemlélteti.

⁴ Unger Tamás István: [Patch antennák](#). TDK-dolgozat. Győr, Széchenyi István Egyetem – Távközlési Tanszék, 2014.



8. ábra: Microstripantenna-rendszer

Forrás: X-band Microstrip Antenna Array 10.5 GHz – Half Power Beam Angle 20°, 17 dBi Gain. Newbecca, (é. n.).

Alapvetően a tápvezetékrendszert az áramköri lap felületén kell kialakítani marással, ez teszi lehetővé az antennák táplálását. A tápvezeték, a sugárzó elem és a földelés is általában rézből készül, jó vezetőképessége miatt.

A microstrip-patch antennák (MPA) leginkább magasabb frekvenciatartományokon optimálisak a méretük miatt. Rendkívül kompatibilisek, leggyakrabban kézi vezeték nélküli kommunikációs eszközökben helyezik el őket, mint például a mobiltelefon vagy a tablet. Emellett katonai célokra is hatékonyan felhasználhatók, például rakéták telemetriai és kommunikációs antennájaként, ahol fontos szempont, hogy vékony, könnyű és kompakt legyen, illetve ne befolyásolja az eszköz aerodinamikai és ballisztikus tulajdonságait. Ezenfelül műholdas kommunikációs vagy navigációs rendszerek vevőiben is alkalmazzák, például globális helymeghatározó rendszer (GPS) vevőantennájaként, illetve elektronikai hadviselési eszközökben, azon belül is leggyakrabban pilóta nélküli légi rendszerekben (UAS), a repülőgéptörzsön vagy a szárnyakon elhelyezve.⁵

⁵ Lin Shu-Kun: *Antenna Systems and Electronic Warfare Applications*. Szerk. Richard A. Poisel. New York, MDPI, 2012. 563–565.

Előnyös tulajdonságai:⁶

- Méret: A mikrohullámú patchantennák hossza fél hullámhosszú (például 3 GHz-en 5 cm), de minden paramétere ugyanígy legfeljebb pár centiméter.
- Tömeg: Kis méretük és alapanyaguk miatt össztömegük általában elhanyagolható, ezért ideálisak repülőgépekben, drónokban, rakétákban vagy hordozható eszközökben alkalmazva.
- Kivitelezés: A patchantennák előállítása során ugyanazt a technológiát alkalmazzuk, mint a nyomtatott áramkörti lapok esetén, így az gyors és gazdaságos. Ezenfelül mivel egyre elterjedtebbek a civil alkalmazások terén is, előállítási költségük folyamatosan csökken.
- Polarizáció: Lineáris, körkörös, illetve elliptikus polarizáció egyaránt alkalmazható.
- Több működési frekvencia: Megfelelő tervezéssel megoldható, hogy akár 3-4 frekvencián is alkalmazhatóvá váljon az antenna.
- Robusztusság: Mivel a patchantennák minden eleme egyetlen lapon helyezkedik el, nagy mechanikai szilárdság és akár a rázkódásokkal szembeni ellenálló képesség jellemzi. Ez teszi igazán alkalmassá katonai alkalmazásra.

Hátrányos tulajdonságai:⁷

- Működési sáv szélesség: Működési sáv szélességük korlátozott, tipikusan az üzemi frekvencia 2-5%-a az általános. Ez a keskeny sáv szélesség a legfőbb hátrány, amelynek csökkentésére a legjobb módszer, ha a szubsztátanyag vastagságát megnöveljük.
- Antennanyereség: Hagyományos antennákhoz viszonyítva a patchantennák ezen a területen is gyengébb paraméterekkel rendelkeznek. A problémát patchantennáinkból felépülő rendszerekkel lehet kiküszöbölni. Mivel a nagy gyártási kapacitások miatt ezek előállítási költsége alacsony, a többemeles antennarács könnyen kivitelezhető.
- Parazitasugárzás: A betáplálási pontoknál, illetve a microstripszalagcsonkoknál, elágazásoknál nem kívánt sugárzás lép fel, amely torzítja az antenna karakterisztikáját és megnöveli a veszteségeket. Ez befolyásolja a patchantennarácsok irányítottságát is.

⁶ Lin (2012): i. m. 12.

⁷ Lin (2012): i. m. 12.

Geometriai paraméterek

Számos paramétert kell figyelembe venni az antennatervezés során, azonban ezek közül a három legfontosabb a következő:

- a használt szubsztrátanyag dielektromos állandója: ϵ_r ,
- a szubsztrátanyag vastagsága: h ,
- működési frekvencia: f_0 .

A jellemzően felhasználható alapanyagokat az alábbi táblázatok foglalják össze:

1. táblázat: Patchantennához alkalmazható sugárzóelemek⁸

Használt alapanyag	Konduktivitás (σ) S m ⁻¹	Relatív permittivitás (ϵ_r)
Alumínium	$15,5 \times 10^7$	~ 1
Sárgaréz	$2,6 \times 10^7$	~ 1
Réz	$5,8 \times 10^7$	~ 1
Arany	$4,8 \times 10^7$	~ 1

Forrás: Lin (2012): i. m. 563–565.

2. táblázat: Patchantennához alkalmazható szubsztrát⁹

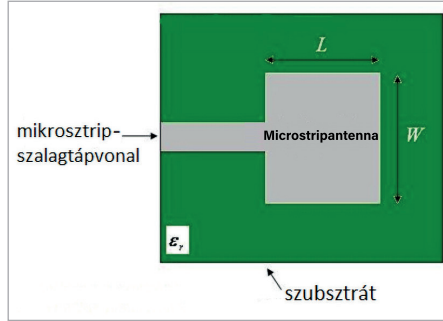
Használt alapanyag	Relatív permittivitás (ϵ_r)	Veszteségi tangens ($\tan \delta$)
Alumínium-oxid	~ 9 -10	0,0003
FR-4	$\sim 4,5$	0,025
Szilikon	$\sim 15,9$	0,004
Teflon	$\sim 2,1$	0,0004

Forrás: Lin (2012): i. m. 563–565.

A geometriai paraméter ismertetéséhez az alábbi sematikus ábrát alkalmazom.

⁸ Lin (2012): 12., 569.

⁹ Lin (2012): 12., 569.



9. ábra: Patchantenna sematikus vázlata

Forrás: [Microstrip \(Patch\) Antennas. Antenna-theory.com](http://Antenna-theory.com), 2016.

Az elem méretét a betáplálási iránnyal (áram iránya) párhuzamos irányban L , míg az arra merőleges irányban W jelöli, az ϵ_r pedig a dielektrikum relatív permittivitása (dielektromos állandó). Általánosságban elmondható, hogy $W < 2L$.

Ez alapján az f_c működési középfrekvencia az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$f_c = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_0\epsilon_{reff}\mu_0}} \quad (1.1),$$

ahol ϵ_{reff} függ a dielektrikum valós ϵ_r relatív permittivásától, illetve az antenna geometriai paraméreitől. Összefüggése az alábbiak szerint változik:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \frac{1}{\sqrt{1+12\frac{h}{W}}}, \text{ ha } \frac{h}{W} > 1 \quad (1.2),$$

ahol h a dielektrikum vastagsága, W értékét pedig az alábbi összefüggés adja meg:

$$W = \frac{c}{2f_c} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} \quad (1.3).$$

Az f_c működési középfrekvencia az egyik legfontosabb paraméter, amelyet elsőként kell meghatároznunk antennatervezésünk során. Tudjuk, hogy az $f_c = c/\lambda$,

tehát a rezonancia feltétele, hogy a sugárzóelemünk L hosszúsága megegyezzen a kívánt hullámhossz felével ($L = \lambda/2$). A W paraméter hatással van a bemeneti impedancia értékére, illetve az antennánk sávszélességére is. Abban az esetben, ha négyszögletes microstripantennát tervezünk, ott a bemeneti impedancia $\sim 300 \Omega$, amely lecsökkenthető nagy W paraméter alkalmazásával, azonban ez általában kevésbé praktikus megoldás.¹⁰

Fontos paraméter ezeken kívül az állóhullámarány (*standing wave ratio*, SWR), amely megadja a tápvonalon mérhető hullám maximális és minimális értékének arányát:

$$\Gamma = \frac{1+|r|}{1-|r|} \quad (1.4),$$

ahol a reflexiós tényező a reflektált és a haladó hullám aránya:

$$r = \frac{v_r}{v_i} = \frac{z_{in}-z_s}{z_{in}+z_s} \quad (1.5),$$

illetve a Z_{in} az antenna bemeneti impedanciája, Z_s pedig a sugárzási ellenállás.

Ehhez kapcsolódó paraméter még a reflexiós csillapítás:

$$RL = -20 \log|r| \text{ (dB)} \quad (1.6).$$

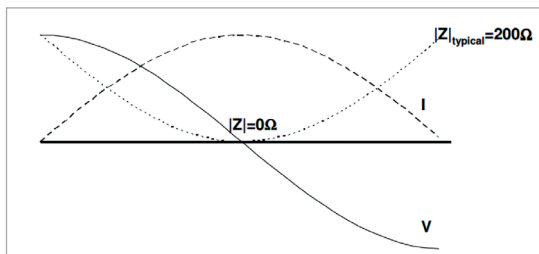
A legjobb illesztést a reflexiós tényező zérus értéke mellett kapjuk ($\Gamma = 0$). Ebben az esetben nincs visszaverődés.

A microstrip-patch antenna (MPA) működési elve

Tulajdonképpen a microstripantennákat elosztott paraméterű hálózatként kell kezelnünk, ugyanis az áram és a feszültség értéke nem állandó a sugárzóelem teljes hosszában. A 10. ábrán látható, hogy a sugárzóelem két szélé lezárásmentes, vagyis üresjáratban van, $I = 0$ (áramminimum). Ez kellően jó magyarázatot ad

¹⁰ Microstrip (Patch) Antennas. Antenna-theory.com, 2016.

arra, hogy miért rendelkezik az antennánk nagy bemeneti impedanciával, ha a végén tápláljuk meg.¹¹



10. ábra: Feszültség-, áram- és impedanciaeloszlás az antenna felületén

Forrás: *Basics of Microstrip Patch Antenna*. Patchantenna.blogspot.com, 2014. augusztus 7.

Ennek a speciális, ám annál érdekesebb antennakonstrukciónak az elve nem más, mint hogy antennánk egy üresjárásban hagyott tápvonal, ahol $I = 0$, a reflexiók tényezőnk 1. A sugárzásért pedig az antenna szegélyein létrejövő elektromos térerősség felel. A lemezek teljes hosszában csak a felületre merőleges komponensekkel rendelkezik, kivételt képeznek a szélei, ott tangenciális komponens is megjelenik. A két szélén a komponensek iránya azonos, így ezen térerősségek összegződnek, azonban a földelésen létrejövő azonos nagyságú áram kioltja azt, mert ellentétes irányú. Ez magyarázatot ad arra is, hogy a microstriptápvonalak miért nem sugároznak. Fontos kihangsúlyozni, hogy az MPA-antennák feszültségsugárzók, tehát az $\vec{E}$ komponens által jön létre kommunikáció, míg részsugárzók esetén a $\vec{H}$ komponens segítségével (áramsugárzó).¹²

A microstripantennák gyártási megoldásai

Fotolitográfia

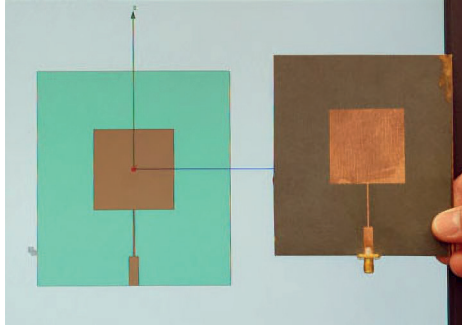
A fotolitográfia vagy optikai litográfia a jelenlegi félvezető-technológia alapja, a mikro- és nanoméretű integrált áramkörök, valamint mikro-elektromechanikus

¹¹ Indrasen Singh – V. S. Tripathi: *Microstrip Patch Antenna and Its Applications: a Survey*. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2011. szeptember. 1595–1599.

¹² Lin (2012): i. m. 19.

érzékelőkben lévő kis méretű struktúrák elkészítéséhez alkalmazott technológia. Lényege, hogy a megmunkálendő félvezető felületet egy fényre érzékeny anyaggal vonják be (fotoreziszt), amelyre a számunkra kívánt formát (maszk) ráfényképezik. Ezt követően ezt a képet kémiai anyagokkal előhívják.¹³

Ezt a módszert alkalmazzák leggyakrabban microstripantennák készítésére, itt ugyanis milliméteres pontosság kell ahhoz, hogy az antenna a gyakorlatban is megközelítse a szimuláció során kapott paramétereket.



11. ábra: Fotolitográfiai módszerrel elkészített antenna

Forrás: Microstrip Patch Antenna. From Simulation to Realization. EM Talk, (é. n.).

Rézmaratás

A rézmaratás lényege, hogy a megtisztított rézlemez felületét bevonjuk egy UV-fényre érzékeny festékréteggel. Ha a felület megszáradt, a mintázattal (ahol a fémot meg szeretnénk tartani) letakarjuk azt, majd megvilágítjuk a teljes felületet UV-fénnyel. Ezt követően nátrium-hidroxidba áztatva azokról a területekről, amelyek nem voltak letakarva a megvilágítás során, a festék lemosható. A folyamat utolsó mozzanata maga a maratás, amelyet hidrogén-peroxid és sósav elegyével, vagy vas-klorid vizes oldatával végezhetünk.¹⁴

¹³ A radartechnika alapjai. 3. rész – A radar hatótávolsága. (Christian Wolff Radartutorial című weboldala anyagainak felhasználásával összeállította: Tóth Ferenc.) *Magyar Elektronika*, 2016. április 11.

¹⁴ Laci56: NYÁK-készítés lézernyomatóval. *Hobbielektronika*, 2010. március 3.

A microstripantennák katonai alkalmazása

A legtöbb földi mobil-, harcászati kommunikációs, lokátor- vagy elektronikai hadviselési rendszer esetén követelmény az antennák robusztussága. A merev, illetve forgószárnyas légi járművek esetén sincs lehetőség nagy méretű antennák alkalmazására. A napjainkban egyre nagyobb teret nyerő pilóta nélküli légi járművek (*unmanned aerial vehicle*, UAV) ugyancsak kis méretű antennákat igényelnek a helyhiány, illetve a korlátozott felszállótömeg miatt. A városi környezetben végrehajtott katonai műveletek során szintén kritikus kérdés lehet az antennák mérete.

Fontos kihangsúlyozni, hogy egy kis méretű antenna soha nem fog úgy teljesíteni, mint egy nagyobb méretű. Azonban vannak különböző eljárások, technikák, amelyekkel megnövelhetjük nyereségüket, irányítottságukat, így bizonyos feladatok végrehajtása során mégis hatékonyan lehet őket alkalmazni.

Általánosságban elmondható a kis méretű antennákról, hogy kis nyereséggel rendelkeznek. Emellett a következő állítások jellemzőek rájuk:

- kis sávzélesség;
- a tápvonalhoz való nehéz illesztés;
- gyenge sugárzási teljesítmény.

Az antennák méretét alapvetően a hullámhosszuk határozza meg. Egy antenna akkor rezonáns, ha legalább az egyik paramétere fél hullámhossz hosszú. A hullámhosszt befolyásolják különböző elektromos és mágneses tulajdonságok is.¹⁵

A következő alfejezetekben bemutatom, hogy különböző katonai feladatokról milyen módon lehet alkalmazni a microstripantennákat.

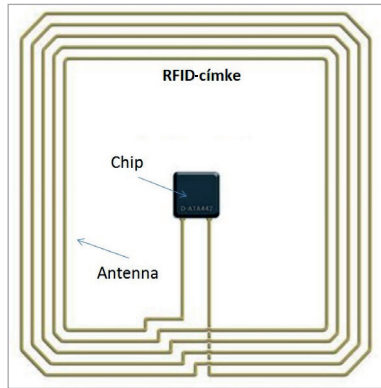
Az RFID-antennák katonai alkalmazása

Az RFID rádiófrekvenciás azonosítást jelent (*radio frequency identification*). Egy RFID-rendszer 3 fő komponensből áll:

- tag/címke/bélyeg;
- lekérdezőegység (olvasó);
- háttéradatbázis (számítástechnikai rendszer).

¹⁵ Lin (2012): i. m. 12., 517.

Az RFID-tag tulajdonképpen egy transzponder, ugyanis egyrészt adó-vevő (*transmitter*), másrészt pedig válaszadó (*responder*). Alkalmazása a 21. században már nagyon széles körű. Az RFID-tag egy speciális microstripantennából áll, illetve egy mikrochipből, amelyet műanyag fóliával fednek le.



12. ábra: RFID-címke

Forrás: Aimee Kalnoskas: [How Do RFID Tags and Reader Antennas Work? Analog IC Tips](#), 2017. május 2.

Katonai alkalmazása szintén egyre nagyobb teret nyer, ezt igazolja a hazánkban is zajló Zrínyi 2026 Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program keretében megépülő MH Logisztikai Raktárbázis, amelyben a kapuk RFID-rendszerrel lesznek felszerelve, biztonságos és hatékony követést téve lehetővé az anyagmozgások vonatkozásában.¹⁶

Azonban érdemes megfigyelni más ország hadseregének RFID-alkalmazását is. Az Ausztrál Védelmi Erő összes nagyobb bázisának logisztikai raktárai RFID-rendszerrel rendelkeznek, illetve missziós területen (Irak) is sikeresen alkalmazták már azt.¹⁷

Az USA haditengerészete is használt RFID-technológiát Irakban. A sérült katonákra helyezték a címkét, majd a kórházban egy leolvasókészülék segítségével tájékozódtek a szakemberek, hogy kit kell ellátni, és milyen kezelésre

¹⁶ Bertalan Melinda: [A honvédelem egyik legfontosabb központja épül meg Veszprém mellett. Vehir](#), 2019. október 8. Online:

¹⁷ [RFID in the War Zone](#). *Army Technology*, 2008. február 13.

van szüksége. Emellett fejlesztési fázisban van, hogy minden dögcédulát RFID-címkével lássanak el, és így a katonák mozgását monitorozni lehessen.¹⁸



13. ábra: RFID-dögcédula¹⁹

Forrás: Pacific Northwest National Laboratory: *Sensors & Electronics. Electronics & Systems. Smart Military Medical „Dog Tags”* (296) (2019. augusztus).

A viselhető microstripantennák katonai alkalmazása²⁰

Egyre több tudományos cikk, publikáció jelenik meg a viselhető antennák kérdéskörében. Relevanciája leginkább a modern hadviselésben van; polgári területeken az antennák méretének minimalizálása, súlyának csökkentése, esetleg elrejtése nem elsődleges szempont, katonai alkalmazások tekintetében viszont

¹⁸ Junko Yoshida: *U.S. Navy Uses RFID Technology to Track Wounded in Iraq*. *EETimes*, 2003. május 23.

¹⁹ Pacific Northwest National Laboratory: *Sensors and Electronics. Electronics and Systems. Smart Military Medical „Dog Tags”* (296) (2019. augusztus).

²⁰ Steven D. Keller: *Anti-Jam GPS Antennas for Wearable Dismounted Soldier Navigation Systems*. Adelphi (Md.), US Army Research Laboratory, 2016.

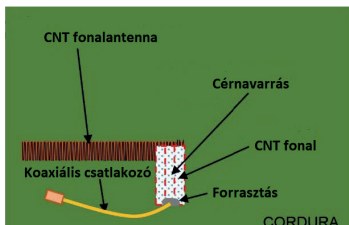
fontos feladat. A „digitális katona”-koncepció már évtizedek óta a modern hadseregek fejlesztésének fókuszában áll, és fontos eleme a katonák korszerű, kis méretű elektronikai és kommunikációs eszközökkel való felszerelése, illetve ezek antennáinak a felszerelésbe történő integrálása. Mivel egyre inkább a magasabb frekvenciatarományokat – ultrarövidhullám (*very high frequency*, VHF), deciméteres hullám (*ultra high frequency*, UHF), centiméteres hullám (*super high frequency*, SHF) – alkalmazzák navigációs, illetve kommunikációs célokra egyaránt, valamint kritérium a kis méret és a jó integrálhatóság, a legpraktikusabb megoldást a microstripantennák jelenthetik. Ezeknek változatos megjelenési formáiról születtek már publikációk az elmúlt években. A textilbe integrált antennák különböző vezetőképes anyagokból készíthetők, úgymint fémhuzalok vagy vezető nanorészecskékkal bevont textilszálak. Noha ezek az anyagok magas vezetőképesességgel rendelkeznek, és viszonylag egyszerűen gyárthatók, illetve illeszthetők be a textilbe, korrózióállóság és tartósság szempontjából még nem ezek jelentik a legjobb megoldást. Figyelembe kell venni, hogy – a károsodások megelőzése érdekében – a ruhának olyan területére, ahol gyakori a betörés/hajlítás, nem szabad antennát helyezni.



14. ábra: Microstrip-textilantenna vezetőképes fonalból

Forrás: Steve Bush: [Antenna Embroidered in the Midlands](#). *Electronics Weekly*, 2013. november 14.

Jelenleg a legjobb megoldást a szén nanocsövek (CNT) alkalmazása jelenti. Ezek vezetőképesége 104-106 S/m, szakítószilárdságuk pedig nagyobb, mint 1 Gpa, emellett strapabírók és nehezen kopnak. A 15. ábrán látható, hogy egy Cordura anyagba hogyan lehet belevarni a CNT-fonalat. A fonal koaxiális csatlakozóhoz történő forrasztásának megkönnyítése érdekében manuálisan kell elvégezni a táplálási ponthoz való befűzést, majd ezt követi a forrasztás a kábelhez, illetve az SMA-csatlakozóhoz.

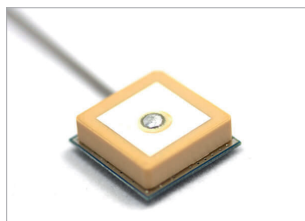


15. ábra: Textilantenna elhelyezése Cordura anyagra

Forrás: Bush (2014): i. m.

3.3. A microstripantennák alkalmazása az elektronikai hadviselésben

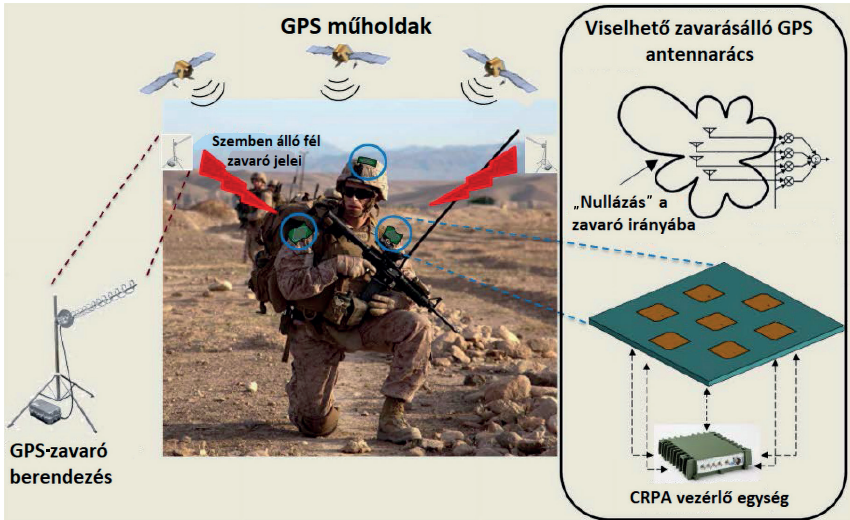
Az amerikai szakterminológiában létezik egy harcászati eljárás, amelyet „On the Move”-nak (OTM) neveznek; ezt elsőként az első öbölháborúban (1990) alkalmazták, ahol a katonai egységek folyamatosan vonultak be Kuwaitba, és haladtak keresztül az országon. A földi EHV-egységek nem tudtak folyamatosan üzemelni: minden alkalommal meg kellett állni a gépjárművekkel, és felszerelni, üzembe helyezni az antennákat. Ezt a problémát küszöböli ki a kis méretű antennák alkalmazása. Elektronikai hadviselési feladatokra olyan antennák szükségesek, amelyek nagy frekvenciatartományt tudnak lefedni és monitorozni, elektronikai zavaráshoz pedig többnyire nagy teljesítmény leadására van szükség. Ezeket a feladatokat nem tudják ellátni microstripantennák, viszont vannak olyan részterületek, ahol mégis eredményesen alkalmazhatók. Sikeresen alkalmazták már például őket a nem kommunikációs célú eszközök területén: a műholdas helymeghatározó rendszerek vevőiben, illetve az azok elleni tevékenységek során alkalmazott berendezésekben.



16. ábra: GPS-vevő microstripantenna

Forrás: Products. MIA-GPS-15-C. Embedded GPS Active Antenna – 15mm. Maxtena, (é. n.).

A navigációs rendszernek alapvető eleme a vevőantenna, amelyet úgy kell kialakítani, hogy állandó kapcsolatot tartson fenn az éppen látható GPS-műholdakkal. Emellett minimalizálni kell a vevőantenna méretét, súlyát, előállítási költségét, ezért is alkalmaznak ezekben leginkább microstripantennát.



17. ábra: Anti-GPS microstrip-antennarács

Forrás: Keller (2016): i. m.

Azt mindenképpen fontos hangsúlyozni, hogy a navigációs vevőberendezések zavarásához viszonylag kis teljesítményre van szükség. Katonai célokra kettő frekvenciát alkalmaznak, az L1-et (1575,42 MHz) és az L2-t (1227,6 MHz). Az orbitális pályán lévő műholdak ~25 W adóteljesítményűek. Figyelembe véve, hogy az adó- és a vevőantenna között milyen távolság van, a jel csillapításának hatására például egy 20 W adóteljesítményű zavaróval 150 km-es területet lehet hatásosan lefogni, de mindössze 2-3 W teljesítménnyel is zavarható egy 50 km-es zóna. Az adó által küldött jelek C/A-kóddal vannak ellátva, a katonai felhasználóknál pedig P(Y)-kódot is alkalmaznak. Viszont egy úgynevezett *spoofing*-vagy *meaconing*eljárással még így is támadható a rendszer. Ugyanígy a zavarás megakadályozására is van lehetőség, egy szabályozott sugárzású antenna (*controlled reception pattern antennas*, CRPA) segítségével, amely aktív „nullázásos” technikát alkalmaz (17. ábra). Az antennaelemek száma meghatározza, hogy hány

zavaró jelet tud kiszűrni a rendszer. Egy N elemes antennarács N-1 nullhelyet tud létrehozni. Általánosságban a katonai járművekre szerelt CRPA-rendszerek 7 antennaelemet tartalmaznak. Minden antennaelem két frekvencián üzemel (L1-L2 GPS-sávok), 24 MHz sáv szélességben, cirkuláris polarizációval. Emellett szükség van még egy vezérlőpanelre is. Azonban a modern technológia lehetővé teszi, hogy ne csak járműre szereljenek ilyen antennarácsokat, hanem az egyes katona is védve legyen a navigációs rendszerek zavarásától. Ezt microstriptechnológiával oldják meg, úgy, hogy az antennarácsok az egyes katona egyenruhájába vannak integrálva. Ezek az antennák ugyancsak szondával táplált patchantennák.²¹

Microstripantennák alkalmazása rádiólokációban

Microstripantennákat, -antennarácsokat gyakran alkalmaznak rádiólokációs feladatokra is. Ezt a technológiát sikeresen tesztelték, és alkalmazzák ma is X, L és S sávú radaroknál egyaránt. Az elsődleges szempont az antennák tervezése során a széles sáv elérése. A Defence Research and Development Organisation (DRDO) által tervezett és készített kistávolságú harctéri felderítő radar (*battle-field surveillance radar – short range, BFSR-SR*) tökéletesen szemlélteti a microstripantennák alkalmazásának előnyeit a katonai X sávban (8–12 GHz). A radar antennarendszere egyoldalas microstrip-antennarácssal rendelkezik, amely egy 60×40 cm-es négyszögletes apertúrán helyezkedik el (18. ábra). Összesen 512 patchelemmel rendelkezik, a szubsztrát pedig egy RT Duroid 5880-as, amelynek relatív permittivitása 2,2, vastagsága 31 mm. Az antennaelemek szalagtápvonallal vannak összekapcsolva, és táplálásuk a 4. fejezetben bemutatott módon, beágyazottan történik. A teljes konstelláció mindössze 1,2 kg, és képes 50 W teljesítmény leadására. Általánosságban elmondható, hogy a BFSR-SR-rendszerek mind hasonló elven működnek és néznek ki.²²

²¹ Products. MIA-GPS-15-C. *Embedded GPS Active Antenna – 15mm. Maxtena*, (é. n.).

²² K. S. Beenamol: Microstrip Antenna Designs for Radar Applications. *DRDO Science Spectrum*, 2009. 84–86.



18. ábra: BFSR-SR microstrip-antennarácsal

Forrás: VatsRohit [@KesariDhwaj]: Battle Field Surveillance Radars – BFSR [Tweet]. *Twitter*, 2020. december 23.

A microstripantennákat – a hagyományos rádiólokátorok mellett – alkalmaz-
zák szintetikus apertúrájú rádiólokátorokban is. Ennek a speciális eljárásnak
a lényege, hogy egy mozgásban lévő hordozóeszköztől működtetjük a radart,
és különböző felbontású képeket állítunk elő reflektált jelek alapján (mikrohul-
lámú képalkotás), majd utólagos feldolgozás során létrejön a kép az adott terü-
letről. Ilyen antennarendszerek különböző platformra tervezve több formában
megjelenhetnek (19. ábra). Mivel különböző felbontású képekre van szükség,
az antennaelemek fázisvezéreltek, s így változtatható az antenna iránykarak-
terisztikája.



19. ábra: SAR-microstripantennarács UAV-eszközökre

Forrás: William Matthews: *Synthetic Aperture RADAR*. Barnard Microsystems, 2008. március 18.

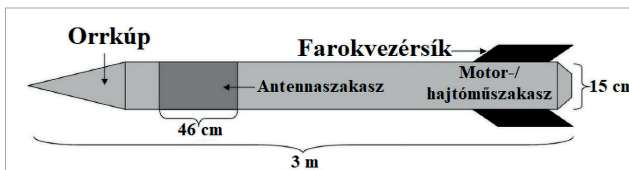
Microstripantennák alkalmazása rakétákon

A rakétairányítási rendszerek lehetnek:

- távirányításúak – parancsirányítási, sugárirányítási rendszer;
- önirányításúak – aktív, passzív, félaktív;
- autonómok vagy programirányításúak – előre programozott irányítási rendszer, inerciális navigációs rendszer, GPS-alapú inerciális rendszer, földfelszíni irányítási rendszer;
- kombinált rendszerek.

Látható, hogy többféle megoldás létezik a rakéták irányítására. Jelen alfejezetben a GPS-alapú irányítási rendszert emelném ki, ugyanis itt ideális a microstripantennák alkalmazása.

A rakéták optimális vezérléséhez és repülési teljesítményéhez elengedhetetlen a koordinátaadatok folyamatos frissítése. Ehhez globális helymeghatározó rendszert alkalmaznak. Azonban a rakéta mozgása közben bekövetkező rotáció miatt a hagyományos GPS-antennák alkalmazása nem ideális.



20. ábra: Microstripantenna elhelyezése rakéta testén

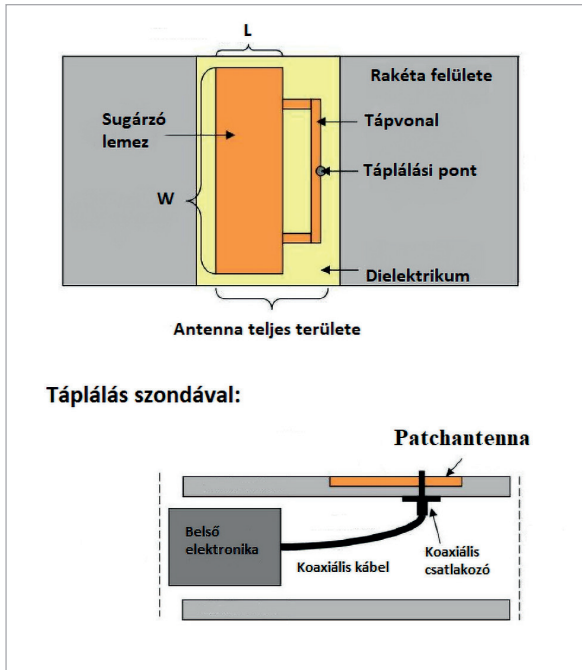
Forrás: Andrew Cassidy Fischer: *Conformal Microstrip GPS Antenna for Missile Application*. Szakdolgozat. San Luis Obispo, California Polytechnic State University, 2011.

A microstripantenna alkalmazása ideális az alábbi körülmények esetén:²³

- deciméteres (UHF-) sávon kell üzemelnie;
- minimum 15 MHz-es sávszélességre van szükség;
- horizontális polarizációra van szükség;
- az antenna a rakétatest felületére illeszkedik;
- a rakétatestet be tudják süllyeszteni annyira, hogy pont elférjen az antenna, ezáltal nincs kiálló elem, amely lelassítaná a rakétát;
- a rakéta rotációja közben is folyamatos az adás-vétel;

²³ Fischer (2011): i. m. 40.

- el tudja viselni a repülés során létrejövő felületi hőmérsékletet (akár 200 Celsius-fok), bár a gyakorlatban mindig alkalmaznak radomot, hogy csökkentsék a nyomtatott huzalozású lemez (*printed circuit board, PCB*) felületén kialakuló hőmérsékletet;
- kimondottan magas relatív permittivitású szubsztrátra van szükség ($\epsilon_r \approx 10$), hogy – a helyhiány miatt – minél kisebb legyen az antenna mérete.



21. ábra: Szondával való táplálás alkalmazása rakétán

Forrás: Fischer (2011): i. m. 40. alapján saját szerkesztés

Összegzés

Dolgozatom elsődleges célja egy olyan átfogó tanulmány összeállítása volt, amely felméri a korszerű microstripantennák katonai alkalmazási területeit, műszaki megoldásait, használatuk jelenlegi helyzetét, hatásterületeit, illetve általános

fejlesztési irányait, valamint megfogalmaztam azokat a kiemelt területeket, amelyekre a jövőbeli katonai alkalmazás lehetősége valószínűsíthető.

Az első fejezetet rövid áttekintéssel kezdtem az antennaelmélet témakörében, ismertettem az antennák működését, a főbb antennajellemzőket és -tulajdonságokat, valamint fizikai megjelenési formájukat egészen a legmodernebb microstripantenna-konstrukciókig. Ezt követően részleteztem a microstripantennák működési elvét, pozitív, negatív tulajdonságaikat, majd főbb geometriai paramétereiket. A második fejezetben a microstripantennák katonai alkalmazásának kérdéskörét taglaltam, részletezve megjelenési formájukat a különböző katonai területeken.

Összességében megállapítható, hogy a microstripantennák olyan forradalmi változást eredményeztek az élet minden területén, amelyet talán még ma sem tudunk minden dimenziójában elképzelni. A lehetőségek és a jövőbeni alkalmazások tárháza hihetetlen sebességgel fog bővülni a következő évtizedben, ami a katonai fejlesztések és tevékenységek irányát is nagyban befolyásolja majd akár a harcjelzések, technikai eszközrendszerek, logisztikai feladatok, vagy akár az elektronikai hadviselés területén is. Ugyanakkor azt mindenképpen szem előtt kell tartanunk, hogy jelenleg még számos megoldandó problémával kell a fejlesztőknek szembenézniük. Azonban kétség sem fér hozzá, hogy a jövőre nézve ezzel a területtel a Magyar Honvédség vonatkozásában is foglalkozni kell annak érdekében, hogy időben tudjunk reagálni a gyorsan bekövetkező változásokra.

Irodalomjegyzék

- A radartechnika alapjai. 3. rész – A radar hatótávolsága. (Christian Wolff *Radartutorial* című weboldala anyagainak felhasználásával összeállította: Tóth Ferenc.) *Magyar Elektronika*, 2016. április 11. Online: www.magyar-elektronika.hu/34-tartalom/tartalom/1545-a-radartechnika-alapjai-3-resz-a-radar-hatotavolsaga
- Basics of Microstrip Patch Antenna. *Patchantenna.blogspot.com*, 2014. augusztus 7. Online: <http://patchantenna.blogspot.com/2014/08/basics-of-microstrip-patch-antenna.html>
- Beenamole, K. S.: Microstrip Antenna Designs for Radar Applications. *DRDO Science Spectrum*, 2009. 84–86.
- Bertalan Melinda: A honvédelem egyik legfontosabb központja épül meg Veszprém mellett. *Véhir*, 2019. október 8. Online: <https://vehir.hu/cikk/53155-a-honvedelem-egyik-legfontosabb-kozpontja-epul-meg-veszprem-mellett>

- Bush, Steve: Antenna Embroidered in the Midlands. *Electronics Weekly*, 2013. november 14. Online: www.electronicsworld.com/news/design/communications/antenna-embroidered-in-the-midlands-2013-11/
- Collin, Robert E.: *Antennas and Radio Wave Propagation*. Singapore, McGraw-Hill, 1985.
- Fernández, José Raúl Machado: Estimation of Frequencies for National Shortwave Network with Automatic Link Establishment Equipment. *Revista Ingeniería*, 26. (2016), 2. 79–91. Online: www.researchgate.net/publication/312641963_Estimation_of_Frequencies_for_National_Shortwave_Network_with_Automatic_Link_Establishment_Equipment
- Fischer, Andrew Cassidy: *Conformal Microstrip GPS Antenna for Missile Application*. Szakdolgozat. San Luis Obispo, California Polytechnic State University, 2011. Online: <https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1539&context=theses>
- Haig Zsolt – Kovács László – Ványa László – Vass Sándor: *Elektronikai hadviselés*. Budapest, Nemzeti Közszerológiai Egyetem – Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, 2014. Online: <https://tudasportai.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/20.500.12944/100390/564.pdf?sequence=1>
- Indrasen, Singh – V. S. Tripathi: Microstrip Patch Antenna and Its Applications: a Survey. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2011. szeptember. 1595–1599. Online: www.researchgate.net/publication/232318276_Micro_strip_Patch_Antenna_and_its_Applications_a_Survey
- Kalnoskas, Aimee: *How Do RFID Tags and Reader Antennas Work?* *Analog IC Tips*, 2017. május 2.
- Keller, Steven D.: *Anti-Jam GPS Antennas for Wearable Dismounted Soldier Navigation Systems*. Adelphi (Md.), US Army Research Laboratory, 2016. Online: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1011921.pdf>
- Lin, Shu-Kun: *Antenna Systems and Electronic Warfare Applications*. Szerk. Richard A. Poisel. Basel, MDPI, 2012. Online: www.researchgate.net/publication/235367045_Antenna_Systems_and_Electronic_Warfare_ApplicationsEdited_by_Richard_A_Poisel_Artech_House_2012_1036_pages_Price_12900_ISBN_978-1-60807-484-6
- Llaci56: NYÁK készítés lézernyomatával. *Hobbielektronika*, 2010. március 3. Online: www.hobbielektronika.hu/cikkek/nyk_keszites_lezernyomataval.html
- Matthews, William: *Synthetic Aperture RADAR*. *Barnard Microsystems*, 2008. március 18. Online: https://barnardmicrosystems.com/UAV/features/synthetic_aperture_radar.html

- Microstrip Patch Antenna. From Simulation to Realization. *EM Talk*, (é. n.). Online: www.emtalk.com/mwt_mpa.htm
- Microstrip (Patch) Antennas. *Antenna-theory.com*, (2016). Online: www.antenna-theory.com/antennas/patches/antenna.php
- Pacific Northwest National Laboratory: *Sensors and Electronics. Electronics and Systems. Smart Military Medical „Dog Tags” (296)* (2019. augusztus). Online: <https://technet.pnnl.gov/sensors/electronics/projects/ES4rfT-DogTag.stm>
- Parabolic Antenna Types. *Wikimedia Commons*, 2006. április 14. Online: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Parabolic_antenna_types.png
- Products. MIA-GPS-15-C. Embedded GPS Active Antenna – 15mm. *Maxtena*, (é. n.). Online: <https://maxtena.com/products/microstrip/mia-gps-15-c-antenna/>
- Raithatha, Udit – S. Sreenath Kashyap: Microstrip Patch Antenna Parameters, Feeding Techniques and Shapes of the Patch – A Survey. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6. (2015), 4. Online: www.ijser.org/paper/Microstrip-Patch-Antenna-Parameters-Feeding-Techniques-and-Shape-of-the-Patch-A-Survey.html
- RFID in the War Zone. *Army Technology*, 2008. február 13. Online: www.army-technology.com/features/feature1616/
- Unger Tamás István: *Patch antennák*. TDK-dolgozat. Győr, Széchenyi István Egyetem – Távközlési Tanszék, 2014. Online: http://maxwell.sze.hu/~ungert/tdk_2014_tavasz_patchantenna.pdf
- VatsRohit [@KesariDhwaj]: Battle Field Surveillance Radars – BFSR [Tweet]. *Twitter*, 2020. december 23.
- Wong, Kin-Lu: *Compact and Broadband Microstrip Antennas*. New York, Wiley, 2002.
- X-band Microstrip Antenna Array 10.5 GHz – Half Power Beam Angle 20°, 17 dBi Gain. *Newbecca*, (é. n.). Online: www.newbecca.com/product/537936887722
- Yoshida, Junko: U.S. Navy Uses RFID Technology to Track Wounded in Iraq. *EETimes*, 2003. május 23. Online: www.eetimes.com/u-s-navy-uses-rfid-technology-to-track-wounded-in-iraq/

Matematikai összefüggések jegyzéke

- 1.1 Karmakar, Nemaï Chandra (ed): *Handbook of Smart Antennas for RFID Systems*. (2010) Wiley, 189.
- 1.2 Poisel, Richard A. (ed.): *Antenna Systems and Electronic Warfare Applications*. (2012) Artech House, 572.

- 1.3 Erdős, László – Dominik Schröder: Fluctuations of Rectangular Young Diagram of Interlacing Wigner Eigenvalues. *International Mathematics Research Notices*, (2018), 10. Online: <https://arxiv.org/pdf/1608.05163.pdf>
- 1.4 Poisel, Richard A.(ed): *Antenna Systems and Electronic Warfare Applications*. (2012) Artech House, 140.
- 1.5 Poisel, Richard A. (ed): *Antenna Systems and Electronic Warfare Applications*. (2012) Artech House, 140.
- 1.6 Varshney, Hemant Kumar – Kumar, Mukesh: A Survey on Different Feeding Techniques of Rectangular Microstrip Patch Antenna. *International Journal of Current Engineering and Technology*, (2014), 1418–1423.