

Szüllő Ádám¹

SAR AUTOFÓKUSZ ALGORITMUSOK VIZSGÁLATA ÉS GYAKORLATI ALKALMAZÁSA²

A szintetikus apertúrájú radar (SAR) elven alapuló mikrohullámú képalkotási módszer matematikailag egy holografikus jelfeldolgozási módszert takar, mely légi járművön / műholdon elhelyezett, oldalvást néző radar berendezés segítségével alkot reflexiós térképet a vizsgált földfelszínről. A haladási irányú felbontás az antenna apertúra méretének növelésével javítható, azonban a hordozó járművek korlátozott mérete (különösképpen UAV-k esetén) nem teszi lehetővé tetszőlegesen nagy antenna alkalmazását. A felbontás növelése érdekében jelfeldolgozási technikákat alkalmazva, a légi jármű mozgását felhasználva egy virtuálisan nagyobb apertúrájú antenna hozható létre, mely jelentősen képes finomítani a képalkotás felbontását. A SAR feldolgozási elv feltételezi az ismert pályán történő haladást, ez azonban a környezeti hatások (pl. turbulencia) miatt nem érhető el teljesen. Ezen zavarok a képalkotás által kapott eredmény minőségét jelentősen ronthatják. Az úgynevezett autofókusz algoritmusok segítségével a már elkészült SAR képek utólagos minőségjavítása végezhető el.

STUDY OF SAR AUTOFOCUSING ALGORITHMS AND PRACTICAL APPLICATIONS

The microwave imaging method based on the synthetic aperture radar (SAR) principle is mathematically a holographic signal processing method that forms a reflection map about the examined ground surface using radar equipment installed on aircraft or a satellite. The axial resolution can be improved by increasing the size of the antenna aperture, however the limited size of the carrier vehicle (especially in the case of UAVs) does not allow applying arbitrarily large antenna. In the interest of increasing the resolution a virtually larger aperture can be synthesized by using signal processing techniques, utilizing the movement of the aircraft, which is able to significantly refine the imaging resolution. Processing principle SAR presupposes the known track progress, however, this is not fully achieved due to the environmental effects (primarily gust). These disorders can significantly worsen the quality of the result of the signal processing. Improving the quality of the completed SAR images can be performed posteriorly by the so called autofocusing algorithms.

SZINTETIKUS APERTÚRÁJÚ RADAR ELV

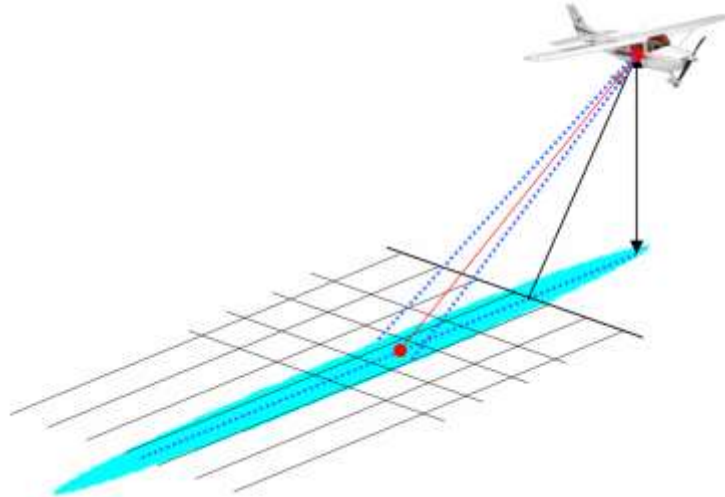
A SAR elv létrejötte a SLAR³ technika továbbgondolásának köszönhető. Az 1. ábrán látható SLAR mérési elv esetén a mozgó légi jármű egy lapszkennerekhez hasonlóan a haladási irányra merőlegesen sorról sorra alkot egy-egy képszeletet a földfelszínről.

A SLAR elven készült radarképek egyes pixeleinek intenzitás értéke a megfigyelt földterület átlagos reflexiós tényezőjével arányos. Ezzel magyarázható például, hogy a 2. ábrán látható vízfelületek (Tisza, és holtágai) szinte teljesen fekete árnyalatúak, mivel - annak ellenére, hogy a vízfelszín jól reflektálja az alkalmazott rádióhullámokat – a radarberendezés irányába szinte egyáltalán nem verődik vissza rádiójel (eltükrözi a síkhullámokat).

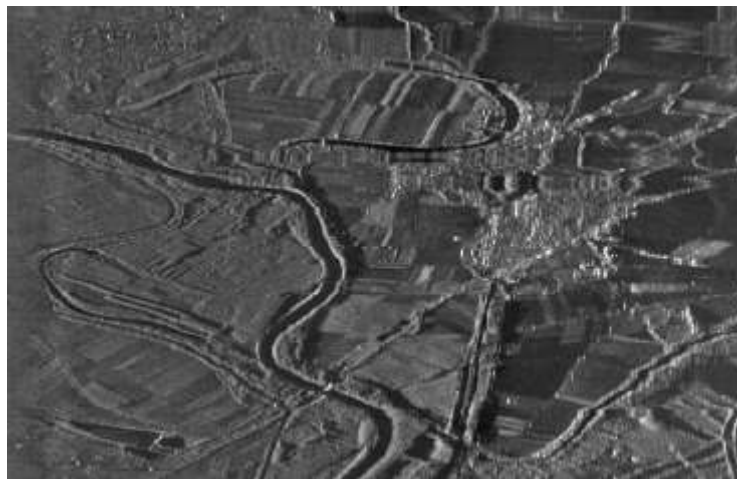
¹ BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék Mikrohullámú Távérzékelés Laboratóriuma; szullo@hvt.bme.hu

² Lektorálta: Dr. Ludányi Lajos NKE Katonai Repülő Tanszék, ludanyi.lajos@gmail.com

³ Sideway Looking Airborne Radar - Valós apertúrájú oldalra néző lokátor



1. ábra SLAR mérési elv [1]



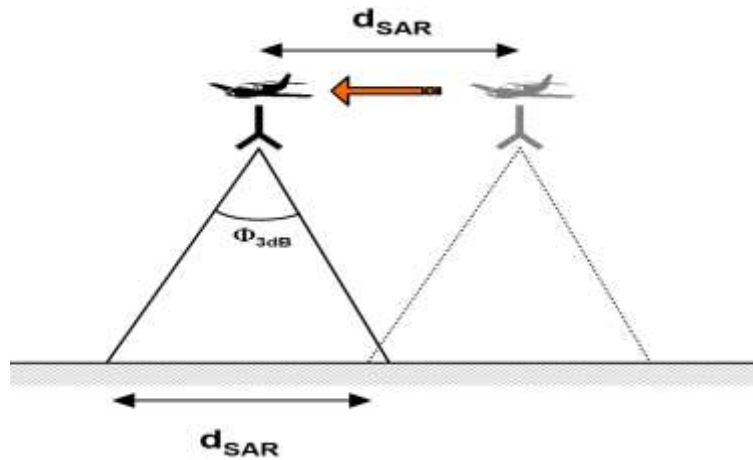
2. ábra SLAR kép Szajol térségéről

A haladási irányra merőleges radiális felbontás az alkalmazott jel sávszélességének növelésével javítható, ez impulzusüzemű radar esetén az impulzus hosszának csökkentésével, vagy félvezetős radar esetén spektrum-kiterjesztéses moduláció és impulzuskompressziós vevő alkalmazásával érhető el. Ilyen módon a radiális felbontás szinte tetszőleges mértékben növelhető. A haladási irányjal megegyező axiális felbontást azonban az alkalmazott antenna irányélességi szöge korlátozza, mely az antenna haladási irányjal megegyező méretével fordítottan arányos. Az irányélességi szögtől való függés egyértelmű következménye, hogy az antennától távolabb egyre kisebb lesz a felbontás. A fordított arányosságból következik, hogy az antenna méretének növelése szükséges az axiális felbontás növelése érdekében. Ez azonban a hordozó jármű méretéből adódóan nem választható meg tetszőlegesen nagy méretűre.

Apertúraszintézis

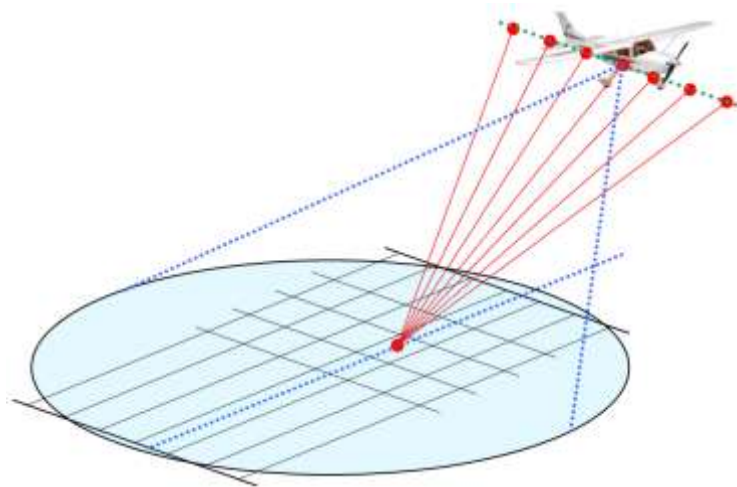
Az apertúraszintézis elvét felhasználva egy SLAR radar által készített, fázisinformációt is tartalmazó reflexiós felvétel axiális felbontása jelentősen megnövelhető. Ezen jelfeldolgozási módszer további pozitív hozadéka, hogy az axiális felbontás immár nem függ az antennától

való távolságtól, ez teszi lehetővé műholdas SAR rendszerek gyakorlati alkalmazását. A 3. ábrán látható módon a szintetikus apertúra mérete (d_{SAR}) addig a pontig növelhető, ameddig a radar különböző pozícióiból megvilágított területeknek van közös pontja.



3. ábra Szintetikus apertúra mérete

A fókuszált SAR feldolgozás esetén a pálya egyes pontjain felvett mérési eredmények kerülnek fázishelyes összegzésre, ezt nevezzük az adott pontra történő fókuszálásnak. A SAR kép pixeljeinek előállításához ismerni kell a pálya egyes pontjainak távolságát az adott pixelektől, így elvégezhető a hullámszám (alkalmazott frekvencia) ismeretében a szükséges fáziskorrektúra (4. ábra).



4. ábra SAR mérési elv [1]

PÁLYAHIBÁK OKOZTA KÉPMINŐSÉGROMLÁS

A hordozó jármű által megtett tényleges pálya nem ismert mértékben eltér a feltételezett pályától. Ennek mértéke ugyan csökkenthető inerciális és navigációs szenzorok alkalmazásával, azonban teljesen nem küszöbölhető ki. Különösen kis méretű és tömegű légi járművek (elsősorban UAV-k) esetén a különféle turbulens és a haladás során változó nagyságú légáramlások jelentősen meg tudják zavarni az ideális pályáívet. Az 5. ábrán látható oldalirányú szellőkés okozta pályahiba hatása az elkészült SAR képre, amelyen a megfelelő radiális irányú sávban lecsökkent a kép élessége.



5. ábra Pályahiba okozta képminőségromlás [1]

A feltételezett pálya függvényében elkészített SAR felvételek minőségjavítása az úgynevezett autofókusz algoritmusok segítségével valósítható meg.

AUTOFÓKUSZ ALGORITMUSOK VIZSGÁLATA

Az autofókusz algoritmusok közös jellemzője, hogy a már elkészült SAR képeken próbálnak minőségjavítást végrehajtani. Általában a SAR feldolgozás eredményeként csupán az egyes pixelek magnitúdóját szokás megadni, azonban ezen lépés előtt a feldolgozott kép pixelei még komplex számokkal írhatóak le, vagyis a magnitúdón kívül fázis információval is rendelkeznek. Az autofókusz algoritmusok lényegében a fázishibákat próbálják minimalizálni, úgy, hogy egy választott paramétert / paramétereket minimalizálnak. A fáziskorrekciókat minden esetben a frekvenciatartományba transzformált képen végzik el, azonban a paraméter minimalizálásra már a normál, időtartománybeli tartományon kerül sor. A fáziskorrekciós paraméterek és a minőséget jellemző paraméter(ek) közötti csatolás miatt nem adható meg analitikus megoldás, ezért minden esetben iterációs közelítést használnak; emiatt az autofókusz algoritmusok meglehetősen számításigényesek az iterációnkénti oda-vissza transzformációk következtében.

PGA algoritmus[2]

Fázis gradiens autofókusz (PGA⁴) esetén az algoritmus első lépésben megkeresi a legerősebb szórópontokat, majd a kép sorait cirkulárisan úgy forgatja, hogy a kiválasztott pontok a kép közepére essenek. A fáziskorrekciók elvégzése a frekvenciatartományba transzformált képen történnek meg. A fáziskorrekciós információk mátrix sajátérték-sajátvektor felbontáson alapuló módszerrel kaphatóak meg.

Az algoritmus első lépéséből egyértelműen látható annak korlátja, ugyanis túlságosan elmosódott SAR kép esetén a PGA módszer nem képes értékelhető minőségjavítást elérni.

⁴ PGA – Phase Gradient Autofocus

Minimum entrópia autofókusz[3]

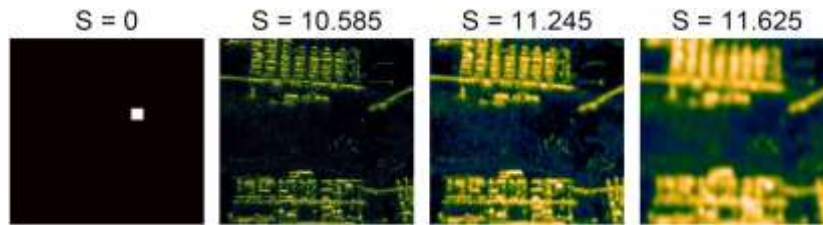
Minimum entrópia autofókusz a teljes képre vonatkozó egyetlen egy paraméter minimalizálásával képes javítani a képminőségen. Az (1) egyenlet által leírt entrópia értékét választották a minimalizálandó paraméternek, ahol $p_{r,a}$ a (2) egyenlet szerint normalizált $[r,a]$ indexű komplex pixelt jelenti a feldolgozott SAR képben.

$$S = -\sum_{r,a} |p_{r,a}|^2 \log(|p_{r,a}|^2) \quad \forall p_{r,a} \in \mathbb{C} \quad (1)$$

$$\sum_{r,a} |p_{r,a}|^2 = 1 \quad (2)$$

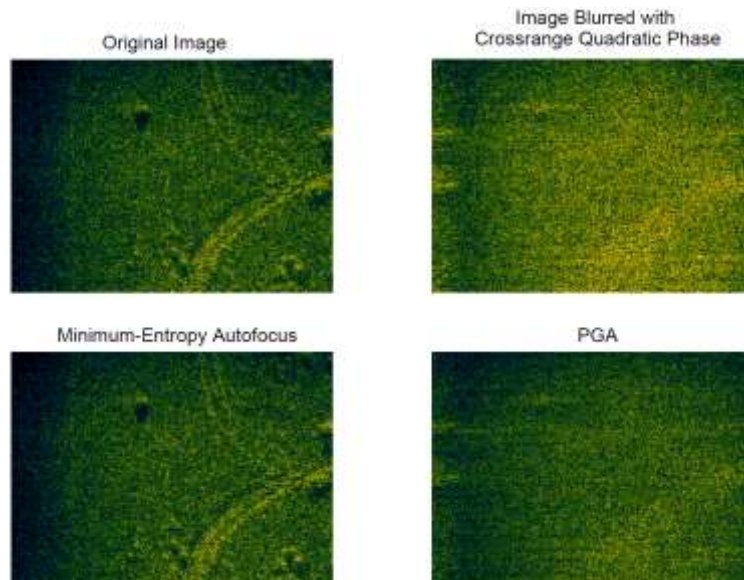
A [3]-ben megadottak szerint az algoritmus célja a (3) képlet által leírt Φ fáziskorrektív vektortól függő entrópia minimalizálási probléma elvégzése.

$$\arg \min_{\Phi} (S(\Phi)) \quad (3)$$



6. ábra Példaképek különböző entrópia értékekre [3]

A 6. ábrán látható utolsó 3 kép esetén azonos területről készült, de egyre nagyobb utólag hozzáadott fázishibával SAR feldolgozott kép látható. Egyértelműen megállapítható, hogy nagyobb entrópia paraméterhez rosszabb képminőség tartozik.



7. ábra Mesterségesen elrontott SAR kép autofókuszálása minimum entrópia és PGA algoritmusokkal [3]

A 7. ábrán egy valós SAR képhez adott fázishiba kompenzálása látható minimum entrópia és PGA módszer segítségével. Ahogy már korábban említésre került, a PGA algoritmus túlságosan

elmosódott képek esetén nem képes értékelhető minőségjavulást okozni, emiatt vizsgálódásomat a továbbiakban kizárólag a minimum entrópia módszerre korlátozom.

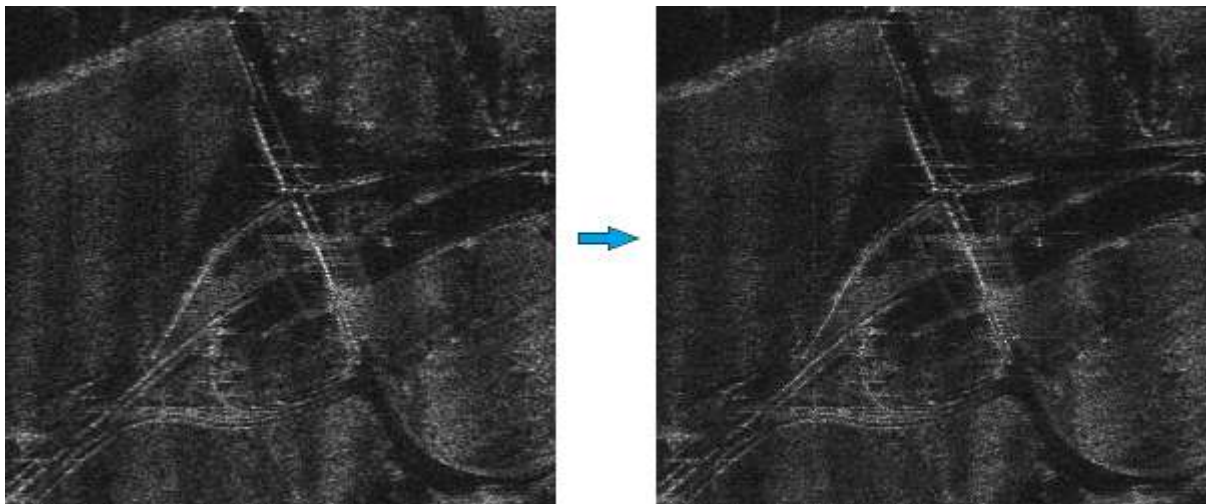
EREDMÉNYEK

A kisrepülőgépes radarfelvételeket a 8. ábrán látható, a tanszékünk (BME-HVT) és a BHE által kifejlesztett kisméretű SAR eszközzel készültek, mely egy Cessna gyártmányú kisrepülőgéppel repült a mérések során.



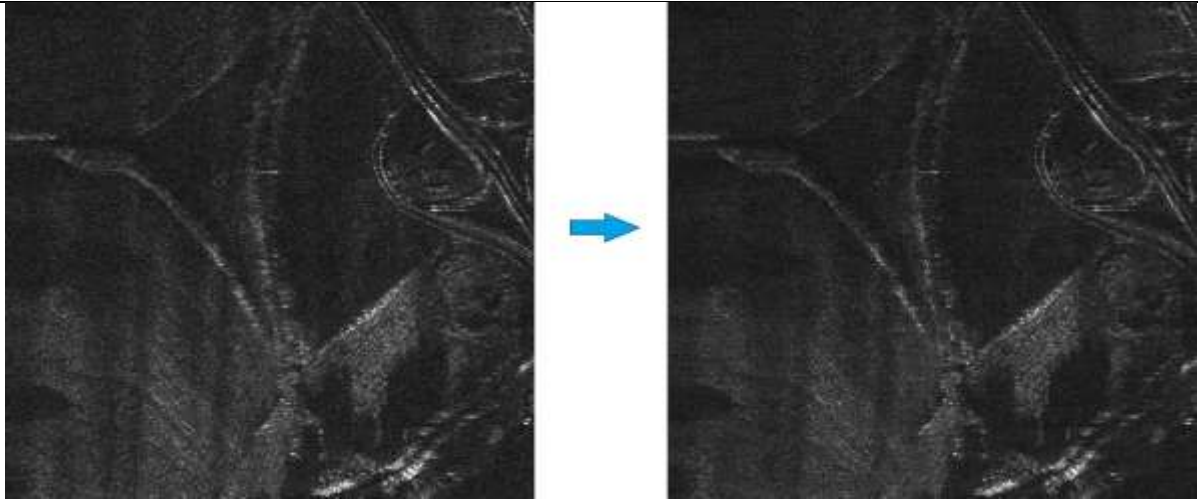
8. ábra Kisméretű SAR berendezés

A 9. ábrán látható SAR képeken egy autópálya csomópont látható. A jobb oldali részábrán az autofókuszálás utáni eredmény látható; megállapítható, hogy - különösen a világos görbék esetén - a kép élessége láthatóan javult.



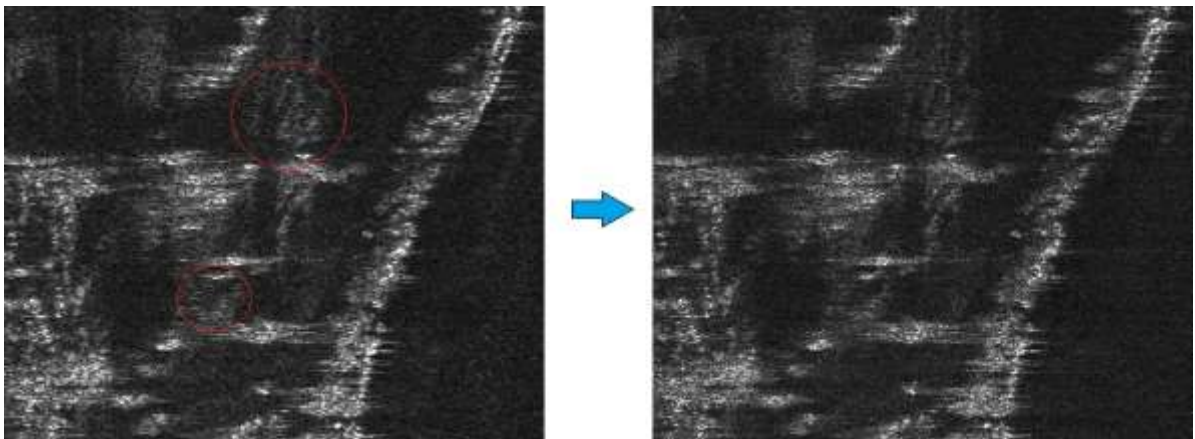
9. ábra Autópálya csomópont autofókuszálással

A 10. ábrán szintén egy autópálya csomópont látható. Itt is elsősorban a nagyobb szórópontok esetén figyelhető meg a képminőség javulása.

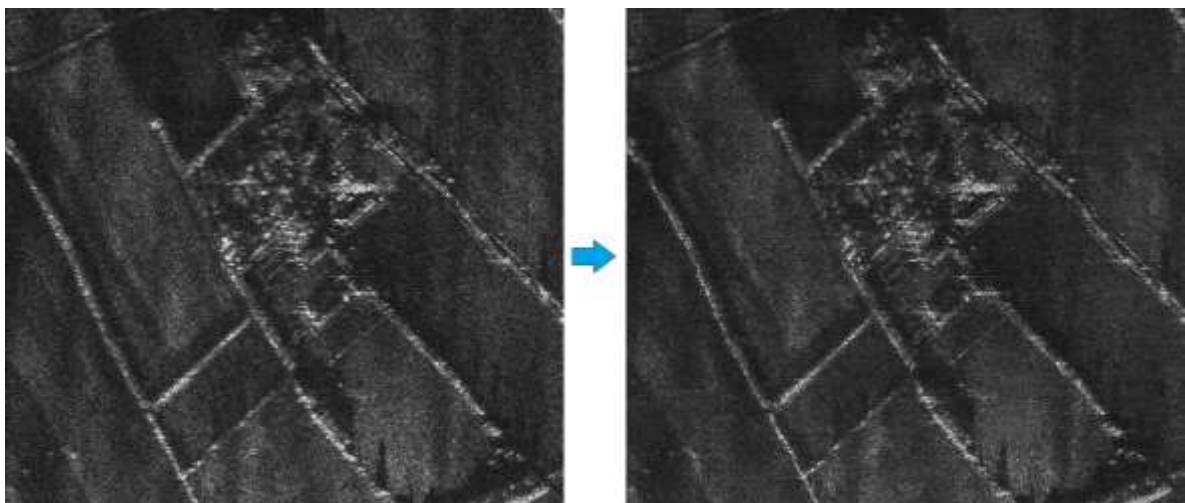


10. ábra Autópálya csomópont és mezők

A 11. ábrán folyópart és ártéri erdők láthatóak. Az eddig jellemző nagyobb reflexiójú pontokon kívül a piros körökkel jelölt területeken is megfigyelhető, hogy élesebb lett a kép, a részletek jobban kivehetők.



11. ábra Folyópart és ártéri erdők



12. ábra Mezőgazdasági üzem

A 12. ábrán egy (feltételezhetően) mezőgazdasági üzem és a körülötte lévő mezőgazdasági területek láthatóak.

ALGORITMUS TOVÁBBFEJLESZTÉSE

A minimum entrópiás autofókusz algoritmus legnagyobb hátrányának a nagy számítási igény tekinthető. Ez a nagymennyiségű diszkrét Fourier transzformáció alkalmazásának következménye. Természetesen a Diszkrét Fourier transzformáció nagysebességű változata, az FFT⁵ került alkalmazásra. Tipikusan az autofókuszált SAR kép nagyságrendileg 2048 pixel szélességű. Az FFT számítási igénye jól közelíthető a (4)-ben megadott mértékkel.

$$O(N \log_2(N)) \quad (4)$$

Az FFT műveletet a kép minden egyes sorára el kell végezni, tehát tipikusan 2048 elemű FFT-ket kell elvégezni.

Tapasztalom alapján az elkészült kép minőségén a kép független oszlopokra bontása egy bizonyos mértékig nem ront, ez a határ nagyjából a 32 és 64 pixel szélességű oszlopok között található. Ha 64 elemű FFT-ket kell elvégezni, akkor az (5)-ben megadott műveletvégzési nyereség érhető el.

$$\frac{2048 \log_2(2048)}{\left(\frac{2048}{64}\right) 64 \log_2(64)} = \frac{\log_2(2048)}{\log_2(64)} \approx 1,8333 \quad (4)$$

Tehát majdnem kétszeres a sebességbeli javulás (pontosan kétszeres javulást 45 elemű FFT alkalmazása esetén lehetne elérni).

A sebességbeli javulás mellett további előnyt jelenthet a kisebb pontszámú FFT művelet alkalmazása, ha az autofókuszálást egy célhardverrel akarjuk elvégeztetni. Egy 64 elemű komplex FFT FPGA-ban történő realizálása könnyen kivitelezhető, míg egy nagy, akár több ezer pontos FFT megvalósítása kérdéses.

ÖSSZEFOGLALÁS

Megállapíthatjuk, hogy a SAR autofókusz algoritmusok (különösképpen az általam adaptált és továbbfejlesztett minimum entrópia módszeren alapuló) láthatóan képesek javítani a már elkészült SAR képek minőségén. A továbbfejlesztésem után jelentős, akár kétszeres sebességbeli javulás is elérhető.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző köszönetét nyilvánítja A Magyar Közlekedési Mérnökképzésért Alapítványnak a SAR autofókusz projekt támogatásáért.

⁵ FFT – Fast Fourier Transform, gyors Fourier transzformáció



FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] R. SELLER, K. KAZI, V. RÖSNER, L. DUDÁS, J. FÖLDES Small Sized Synthetic Aperture Radar Development, 19th Telecommunications forum TELFOR 2011, Serbia, Belgrade, November 22-24, 2011.
- [2] D. E. WAHL, P. H. EICHEL, D. C. GHIGLIA, C. V. JAKOWATZ Phase gradient autofocus – a robust tool for high resolution SAR phase correction, IEEE Transactionson Aerospace and Electronic Systems, vol. 30, no. 3, pp. 827–835, July 1994.
- [3] T. J. KRAGH Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus, Adaptive Sensor Array Processing (ASAP) Workshop, Lexington, Massachusetts, June 2006.