

Primerjava med Dubois in Shi empiričnim modelom ocenjevanja vlažnosti iz TerraSAR-X podatkov

Matej Kseneman, Dušan Gleich

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, Slovenija

Ključne besede: TerraSAR-X, ocenjevanje vlažnosti, empirični model, samoorganizirajoče se nevronske mreže, MBD, GMRF, CUDA

Izveček: Zelo pomembno za Zemljino okolje je napovedovanje naravnih nesreč, kot so požari, poplave, potresi itd. Naš cilj je oceniti kvaliteto empiričnih modelov, ki se uporabljajo pri pridobivanju ocenjenih parametrov vlažnosti. V tem članku smo primerjali delovanje Dubois in Shi empiričnega modela nad reko Dravo v bližini mesta Maribor, natančneje na področju umetnega kanala Zlatoličje. Ti modeli so testirani na TerraSAR-X satelitskih posnetkih, kateri so last nemškega vesoljskega satelita, ki deluje v X-pasu radarskih frekvenc. Da smo lahko primerjali in napravili validacijo rezultatov, smo napravili terenske meritve s senzorjem Pico64 v času zajema satelitske slike. Prišli smo do zaključka, da Shi empirični model deluje boljše, tako v natančnosti ocenjenih vrednosti vlažnosti terena, kot tudi v stabilnosti delovanja algoritma.

Comparison Between Dubois and Shi Empirical Models Used for Soil Moisture Estimation for TerraSAR-X Data

Key words: TerraSAR-X, soil moisture estimation, empirical models, self-organizing maps, MBD, GMRF, CUDA

Abstract: It is essential for Earth's environment to predict natural disasters like fires, floods, earthquakes, etc. Our goal is to assess quality of empirical models used in soil moisture parameter retrieval. In this paper we assessed Dubois and Shi empirical model over the river Drava next to the city of Maribor, Slovenia. These models were applied to TerraSAR-X satellite, which is a German national space satellite operating at X-band radar frequency. In order to compare and validate results, field measurements were done with a Pico64 sensor at the time of image capture. As we have concluded, Shi model is preferred when it comes to accuracy of estimated volumetric soil moisture.

1 Uvod

Človeštvo teži k napovedovanju naravnih katastrof, kot so požari, potresi, poplave, itd. Tako predstavlja ocenjevanje vlažnosti ključni parameter na različnih področjih študije okolja, kar vključuje hidrologijo, meteorologijo in agrikulturno. Ne glede na njegovo pomembnost, se ocenjevanje vlažnosti ni razširilo med modeliranje hidroloških in biokemijskih procesov ter pripadajoče dinamike ekosistema, saj je vlažnost zemlje težko meriti na širšem področju, cenovno ugodno in v krajših časovnih intervalih. Vendar predstavljajo zadnji napredki v mikrovalovnem daljinskem zaznavanju potencial kvantitativnega merjenja vlažnosti zemlje na neporaščenih ali predelih z majhno poraščenostjo z vegetacijo /1/. To prinese možnost razvoja algoritmov pridobivanja teh pomembnih parametrov s pomočjo mikrovalovnih daljinskih meritev.

Naš zadani cilj je oceniti vlažnost terena s pomočjo radarskih SAR podob. Na voljo imamo radarske podobe področja umetnega kanala elektrarne Zlatoličje, zajete s TerraSAR-X /2/ satelitom, ki je bil izstreljen 15. junija 2007 in za svoje delovanje uporablja radar s sintetično odprtino (ang. SAR). Satelit deluje neodvisno od vremenskih razmer in naravnih osvetlitev ter je sposoben zajeti slike z resolucijo enega metra. Satelit ima tri načine delovanja, in sicer SpotLight, StripMap in ScanSAR. Pri SpotLight načinu se radarski žarek tekom letenja platforme vedno usmeri na enako področje in s tem pridobi maksimalno možno resolucijo. Pri StripMap načinu gre za kompromis med resolucijo in velikostjo zajetega področja. Način ScanSAR pa je na-

menjen zajemanju slik ogromnega področja (100 000 km²), vendar je resolucija le 16 m.

2 Problem ocenjevanja vlažnosti terena

Mnoge študije so dognale, da so aktivni mikrovalovni podatki odvisni od mnogih parametrov naravnega površja, ko sta to dielektrična konstanta /3/ in razgibanost površja. Dielektrična konstanta je močno odvisna od vlažnosti zemlje. Zaradi velike razlike med dielektrično konstanto suhe zemlje (tipična vrednost relativne dielektrične konstante znaša nekje med 2 in 3) in vodo (tipična vrednost dielektrične konstante je približno 80) /4/, se pokaže možnost ocenjevanja vlažnosti z daljinskim zaznavanjem, vendar je ocenjevanje odvisno od veliko dejavnikov, kot so: orientacija molekul, tip in agregatno stanje zemlje. Ocenjevanje vlažnosti zemlje iz aktivnih mikrovalovnih podatkov je zadnje čase postalo sila popularno. Zaradi karakteristične visoke resolucije v kombinaciji z globalno pokritostjo, lahko vesoljske SAR platforme doprinesejo unikaten pogled na prostorske in časovne spremembe vlažnosti zemlje pri relativno visoki resoluciji. Veliko število SAR sistemov (AIRSAR, E-SAR, ERS-1, JERS-1, SIR-C in TerraSAR-X) s svojimi dobrimi kalibracijskimi izvedbami, je napravilo podatke SAR, dostopne za kvantitativno pridobivanje informacij o vlažnosti zemlje.

Pri ocenjevanju vlažnosti zemlje bomo uporabljali le empirična modela Dubois /5/ in Shi /6/, ki temeljita na teor-

etičnih modelih, in sicer na enačbah integralnega modela (IEM) /7/. Ta empirična modela sta razširjena in modificirana glede na fizikalna dognanja in zapisana s pomočjo regresijske analize zajetih podatkov LCX POLARSCAT in RASAM /13/ sistemov ter simuliranih podatkov, ki so rezultat zemeljskih meritev z odbojniki, nameščenimi na tovornjak. Primerjava s teoretičnimi modeli govori v korist empiričnih modelov, predvsem v širšem področju uporabe in predvsem manj kompleksnejšimi algoritmi.

Dielektrična konstanta je tudi močno odvisna od frekvence, pri kateri opazujemo medij. Frekvenčna odvisnost dielektrične konstante vode je podana z Debyejevo enačbo

$$\epsilon_w = \epsilon_{w\infty} + \frac{\epsilon_{w0} - \epsilon_{w\infty}}{1 + j2\pi f\tau_w} \quad (1)$$

kjer je ϵ_{w0} statična dielektrična konstanta vode in $\epsilon_{w\infty}$ predstavlja visokofrekvenčno (ali optično) mejo ϵ_{ω} (oba parametra sta brez enote). τ_w je čas prehodnega pojava vode, merjen v sekundah /s/ in f je frekvenca elektromagnetnega (EM) valovanja v /Hz/ /8/.

2.1 Odbojni modeli razgibanega terena

Zemljino površje je večinoma razgibano, ravno razgibanost pa je ključnega pomena pri odbojih in sipanju elektromagnetnega valovanja. Vpliv razgibanosti terena se primarno kaže pri sipanju EM valovanja, medtem ko pri odbojih igra ključno vlogo vpadni kot, kar si lahko predstavljamo, kot metanje senc ob sončnem zahodu.

Teoretični modeli, kot so: model majhnih motenj, fizikalni optični model in geometrični optični model, napovedujejo trend radarskega povratnega sipanja kot odziv na spremembe v razgibanosti ali vlažnosti zemlje. Vendar so ti modeli le redko uporabljeni pri inverznih problemih, torej pri pridobivanju inverznih podatkov iz naravnega površja, v veliki večini zaradi omejitev, ki jih uporabijo pri izpeljevanju modela, saj ga s tem tudi poenostavijo. Nedavno so predstavili tudi enačbo integralnega modela /7/, ki je resda veliko kompleksnejši od predhodno omenjenih, ampak je uporaben na širšem področju površja. Zaradi tega se večina literature o aplikacijah nanaša na empirične modele, ki so poenostavljeni analitični modeli, uporabni le za določeno valovno dolžino in področje.

2.1.1 Dubois model in njegova inverzija

Je empirični model /5/, ki je bil predstavljen leta 1995 in je poenostavitev Oh modela /5, 9/, saj vsebuje le ko-polarizirane komponente (horizontalnih in vertikalnih polarizacij).

Empirični model, izpeljan z uporabo podatkovnih naborov POLARSCAT in RASAM /13/, opisuje le koeficiente ko-polariziranega povratnega sipanja neporaščene površja kot funkcijo razgibanosti površja, dielektrične konstante, vpadnega kota in frekvence. Dielektrična konstanta je parameter, občutljiv na prostorninsko vlažnost zemlje. hh - in vv -polarizirani koeficienti povratnega sipanja σ_{hh}^0 in σ_{vv}^0 so bili empirično določeni in sledijo naslednji zakonitosti:

$$\sigma_{hh}^0 = 10^{-2.75} \frac{\cos^{1.5} \theta}{\sin^5 \theta} 10^{0.028\epsilon \tan \theta} (ks \cdot \sin \theta)^{1.4} \lambda^{0.7} \quad (2)$$

$$\sigma_{vv}^0 = 10^{-2.35} \frac{\cos^3 \theta}{\sin^3 \theta} 10^{0.046\epsilon \tan \theta} (ks \cdot \sin \theta)^{1.1} \lambda^{0.7} \quad (3)$$

kjer je θ vpadni kot, ϵ je realni del dielektrične konstante, h je RMS višina površja, k je valovno število in λ je valovna dolžina v cm. Ti dve relaciji sta veljavni za frekvence znotraj intervala 1,5 in 11 GHz (TerraSAR-X ima tipično frekvenco 9,65 GHz), za razgibanost terena na intervalu 0,3-3 cm RMS višine (kar je bil razmik učne množice podatkov) in vpadni kot med 30 in 65°.

Obnašanje splošnega povratnega sipanja s podano razgibanostjo, zapisano z enačbo (2, 3), je zelo podobno, kot napovedujeta modela majhnih motenj in fizikalni optični model; povratni odziv se zmanjšuje s povečevanjem lokalnega kota in z zmanjševanjem razgibanosti površja. Tako v empiričnem modelu, kot tudi pri MMP, se RMS višina površja vpelje kot faktor $kh \cdot \sin(\theta)$, ki je brez dimenzionalna projekcija razgibanosti na ravnino vpadnega valovanja. Potenca tega parametra v empiričnem modelu (1,4 in 1,1 za σ_{hh}^0 in σ_{vv}^0) je še vedno dovolj blizu vrednosti 1.

Omenimo še razlog, zakaj ta model zajema le dva polarizirana kanala (vertikalni in horizontalni). Razlog je čisto fizikalen, in sicer sta dva kanala manj občutljiva na sistemski šum in presluh in tudi njuna kalibracija je enostavnejša ter teži k večji natančnosti. Novejši algoritmi na tem področju prinašajo večjo robustnost in učinkovitost tudi ob prisotnosti vegetacije. Izjemna prednost tega so aplikacije, pri katerih imamo možnost zajema le dveh polariziranih kanalov, kar pa ni mogoče pri Oh modelu /9/.

Empirično podani formuli večkrat navajajo kot razmerje $\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0$, ki je odvisno od razgibanosti terena in se zvišuje predvsem z večanjem razgibanosti terena, in sicer po zakonitosti $\log(ks \sin \theta)$.

Invertiranje empiričnega algoritma, ki zajema Duboisov model /5/ je poenostavljena procedura invertiranja Oh modela /9/. Oba neznana parametra lahko direktno izračunamo iz dveh koeficientov ko-polariziranega odboja in lokalnega vpadnega kota z uporabo sledečih enačb.

Prvi korak je izračun dielektrične konstante po enačbi:

$$A_{hh} = 1.5 \log(\cos \theta) - 5 \log(\sin \theta) + 0.7 \log(\lambda) - 2.75 \quad (4)$$

$$A_{vv} = 3 \log(\cos \theta) - 3 \log(\sin \theta) + 0.7 \log(\lambda) - 2.35 \quad (5)$$

$$B_{hh} = 0.028 \dots B_{vv} = 0.046 \dots C_{hh} = 1.4 \dots C_{vv} = 1.1 \quad (6)$$

$$\Sigma_{hh} = \log(\sigma_{hh}^0) \dots \Sigma_{vv} = \log(\sigma_{vv}^0) \quad (7)$$

$$\epsilon = \frac{C_{vv}(\Sigma_{hh} - A_{hh}) - C_{hh}(\Sigma_{vv} - A_{vv})}{\tan \theta (B_{hh} C_{vv} - B_{vv} C_{hh})} \quad (8)$$

V naslednjem koraku pa s pomočjo pravkar ocenjene vrednosti dielektrične konstante zapišemo enačbo za ocenitev razgibanosti terena

$$ks = \sigma_{HH}^0 \frac{1}{1.14} 10^{2.75/1.4} \frac{\sin^{2.57} \theta}{\cos^{1.07} \theta} 10^{-0.02\epsilon \tan \theta} \lambda^{-0.5} \quad (9)$$

Kasnejši eksperimenti z modelom algoritma so pokazali, da le-ta izkazuje dobro robustnost nad področji, posejanimi z vegetacijo, vsaj na področju nizkih frekvenc. Za določitev področja vegetacije si pomagamo tudi z razmerjem $\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0$. Razmerje vrednosti $\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0 > -11$ dB izkazuje močno prisotnost vegetacije, česar pa se skušamo izogniti s tem algoritmom. Tako lahko zaključimo, da se inverzni algoritem uporablja le pri izpolnjenem pogoju $\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0 < 1$ in $\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0 < -11$ dB.

2.1.2 Shi model in inverzni algoritem

Temelj Shi modela predstavlja enojni odbojni IEM model, ki vključuje efekt spektralnega frekvenčnega odziva površja. Ker je število neodvisnih SAR meritev omejeno, so pri razvoju modela uporabili numerične simulacije IEM modela za širše področje razgibanosti površja in pogoje m_v . Algoritem so tudi testirali za natančnost pridobljenih parametrov ocenjevanja m_v in razgibanosti površja na AIRSAR in SIR-C meritvah /6/ L-pasu, na neporaščenih ali malo poraščenih površjih z vegetacijo. Ta pristop se razlikuje od klasičnih empiričnih pristopov, saj ne uporablja predhodno merjenih podatkov pri razvoju algoritma.

IEM model oceni vrednosti σ_{hh}^0 in σ_{vv}^0 za neporaščena površja, ki se dobro skladajo z AIRSAR in SIR-C meritvami. Model in njegova odvisnost od parametrov m_v in ostalih ostaja kljub temu zelo kompleksna. Za potrebe ocenjevanja parametrov površja, je ta model težko aplicirati na realne podatke SAR, zato je potrebna nadaljnja poenostavitev enojnega odbojnega modela IEM. S tem dosežemo izvedljivi inverzni algoritem, ki je sposoben obdelovanja velike količine SAR podatkov.

Dokazano je bilo /7/, da se v primerih, ko je s majhen, da integralni model ločeno povezati s funkcijo α_{pp} (polarizacijska amplituda), ki je odvisna le od ϵ_s in Θ , in funkcijo, ki je odvisna od ks . Funkciji sta podani kot:

$$\alpha_{hh} = \frac{(\epsilon_s - 1)}{(\cos\theta + \sqrt{\epsilon_s - \sin^2\theta})^2} \quad (10)$$

$$\alpha_{vv} = \frac{(\epsilon_s - 1)(\sin^2\theta - \epsilon_s(1 + \sin^2\theta))}{(\cos\theta + \sqrt{\epsilon_s - \sin^2\theta})^2} \quad (11)$$

σ_{pp}^0 je lahko predstavljen kot produkt funkcije dielektričnih lastnosti in funkcije povezane z lastnostmi razgibanosti površja. Pri modelu uporabljamo dvo-kanalno polarizacijo, zaradi tega se enačba poenostavi le na vpadni kot in dielektričnost zemlje. Splošno enačbo inverznega algoritma dielektrične konstante ϵ_s lahko zapišemo kot:

$$10\log_{10} \left[\frac{|\alpha_{pp}|^2}{\sigma_{pp}^0} \right] = a_{pq}(\theta) + b_{pq}(\theta) 10\log_{10} \left[\frac{|\alpha_{qq}|^2}{\sigma_{qq}^0} \right] \quad (12)$$

Izkazalo se je, da je v smislu največje občutljivosti na spremembe vlažnosti najboljše izbrati par dveh polariziranih kanalov, saj se s tem odpravi občutljivost na natančnost

kalibracije in efekta vegetacije, kajti težimo k uporabi algoritma na predelih z nizko poraščenostjo z vegetacijo. S temi zahtevami je bilo v literaturi predstavljeno, da je najboljša izbira para ko-polariziranih meritev $\sqrt{(\sigma_{vv}^0 \sigma_{hh}^0)}$ in $\sigma_{vv}^0 + \sigma_{hh}^0$, ki se najbolj prilagajajo podatkom pri ocenjevanju ϵ_s . Zamenjava σ_{pp}^0 in σ_{qq}^0 z $\sigma_{vv}^0 + \sigma_{hh}^0$ in $\sqrt{(\sigma_{vv}^0 \sigma_{hh}^0)}$, in $|\alpha_{pp}|^2$ in $|\alpha_{qq}|^2$ z $|\alpha_{vv}|^2 + |\alpha_{hh}|^2$ in $|\alpha_{vv}|^2 |\alpha_{hh}|^2$ spremeni enačbo (12) na

$$10\log_{10} \left[\frac{|\alpha_{vv}|^2 + |\alpha_{hh}|^2}{\sigma_{vv}^0 + \sigma_{hh}^0} \right] = a_{vh}(\theta) + b_{vh}(\theta) 10\log_{10} \left[\frac{|\alpha_{vv}| |\alpha_{hh}|}{\sqrt{\sigma_{vv}^0 \sigma_{hh}^0}} \right] \quad (13)$$

Ker je enačba (13) neodvisna od parametra razgibanosti površja in je odvisna le od α_{vv} in α_{hh} , ki sta funkciji dielektrične konsistentne in vpadnega kota, lahko z uporabo dveh polariziranih meritev napravimo oceno vlažnosti zemlje. Z uporabo ϵ_s iz enačbe (13) je kasneje mogoče priti do parametra razgibanosti površja.

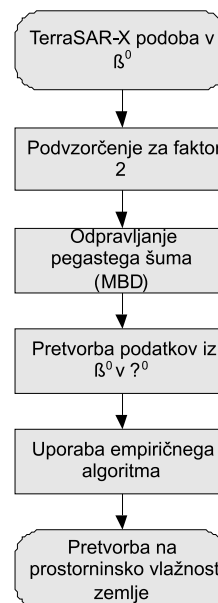
Vsi koeficienti, uporabljeni v enačbah (12) in (13) so odvisni le od vpadnega kota, zapisani pa so bili s pomočjo regresijske analize. Formule koeficientov modela, ki je povezan s $\sigma_{vv}^0 + \sigma_{hh}^0$ in $\sqrt{(\sigma_{vv}^0 \sigma_{hh}^0)}$, ter α_{hh} in α_{vv} so podane kot

$$a_{vh}(\theta) = e^{-12.37 + 37.206\sin(\theta) - 41.187\sin^2(\theta) + 18.898\sin^3(\theta)} \quad (14)$$

$$b_{vh}(\theta) = 0.649 + 0.659 \cos(\theta) - 0.306 \cos^2(\theta) \quad (15)$$

3 Algoritem primerjave modelov

Omenjeni algoritem je sestavljen iz več delnih algoritmov, in sicer iz dela za pretvorbo iz β^0 na σ^0 , pod-vzorčenja za faktor 2 po vrsticah in stolpcih, dela za odpravljanje pegaste šuma po metodi MBD /10/ in šele nato sledi uporaba empiričnega algoritma s pripadajočo enačbo pretvorbe na prostorninsko vlažnost zemlje. Omenjen algoritem grafično prikazuje slika 1.



Slika 1. Diagram poteka predlaganega algoritma.

Pri TerraSAR-X SSC produktih, ki jih imamo na voljo pri tej študiji, se vrednosti digitalnih podatkov izračuna iz kompleksnih podatkov podanih v DLR COSAR formatu (.cos datoteka) kot /2/:

$$DN = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (16)$$

V enačbi (16) predstavljata I in Q realno in imaginarno komponento kompleksnega signala povratnega signala. Povratno sipanje na objektih je odvisno od relativne orientacije osvetljene resolucijske celice in sensorja, kakor tudi razdalje med njima. Izpeljava σ^0 zahteva detajlno poznavanje lokalnega vpadnega kota, kot je to zapisano z enačbo (17):

$$\sigma^0 = \left(k_s |DN|^2 - NEBN \right) \sin \theta_{loc} \quad (17)$$

kjer je k_s kalibracijski in procesorski faktor skaliranja, DN vrednost intenzitete slikovnega elementa, $NEBN$ je šumni ekvivalent β^0 predstavitvi (ang. *Noise Equivalent Beta Naught*), ki predstavlja vpliv različnih prispevkov šuma k signalu /2/ in θ_{loc} je lokalni vpadni kot. Pridobimo ga iz geokodirane maske vpadnega kota Zemljinega terena, in sicer iz podatkov SRTM /14/ topografske misije (ang. *Shuttle Radar Topography Mission*).

$NEBN$ se podaja kot polinom, ki je skaliran s koeficientom k_s . Ti polinomi opisujejo nivo šuma kot funkcijo razdalje, upoštevajoč glavne faktorje doprinosa šuma (npr. vzorec dvigovanja antene, oddana moč in sprejeti šum) in so funkcija časa, potrebna za premostitev dolžine.

$$NEBN = k_s \sum_{i=0}^{deg} k_i (\tau - \tau_{ref})^i, \tau \in [\tau_{min}, \tau_{max}] \quad (18)$$

kjer so: deg je stopnja polinoma, k_i je eksponent koeficienta, τ_{ref} je referenčna točka, τ_{min} in τ_{max} sta dva parametra TerraSAR-X produkta, ki sta vsebovana v vsakem produktu.

3.1.1 Odpravljanje pegastega šuma

Radarsko valovanje lahko interferira konstruktivno ali destruktivno in s tem se ustvarijo svetli ali temni slikovni elementi, imenovani pegasti šum. Pegasti šum se najpogosteje pojavlja pri sistemih radarskega zaznavanja (mikrovalovno ali milimetrsko valovanje), čeprav se lahko pojavi pri poljubnem tipu podobe daljinskega zaznavanja, ki izkoriščajo koherentno valovanje. Podobno, kot se dogaja pri laserski svetlobi, potuje oddano valovanje aktivnih sensorjev v fazi in minimalno medsebojno vpliva na poti do področja objekta. Po interakciji valovanja s področjem objekta to valovanje ni več v fazi (sofazno), saj posamezni valovi zaradi razgibanih površin opravijo različne razdalje do objektov ali pa se pojavi efekt enojnega ali dvojnega odboja. Ko so radarski valovi izven faze, radarsko valovanje medsebojno interferira in pojavijo se svetlejši in temnejši slikovni elementi ali pegasti šum.

Bayesov pristop k odstranjevanju šuma iz radarskih podob s sintetično odprtino (SAR) se uporablja pri izboljšanju kvalitete slik in pri tehnikah pridobivanja informacij iz radarskih

podob. Za ocenjevanje maksimalnega a posteriorja (MAP) se uporablja prvi red Bayesovega sklepanja. Prior ali vnaprejšnja informacija v Bayesovi formuli se modelira z uporabo Gauss-Markovih naključnih polj. Da najdemo najboljše modelne parametre, ki predstavljajo informacijo o teksturi SAR podob, uporabimo Bayesov sklep drugega reda. Omenjena metoda dobro deluje pri odstranjevanju pegastega šuma in opisovanju teksture, vendar je računsko zelo zahtevna. Iz tega razloga se je pojavila ideja, da bi se celotni algoritem morebiti dal zapisati v obliki paralelnega modela tako za cenilko MAP, kot tudi za maksimiranje verjetja s pomočjo procesorja na grafični kartici (GPU). Osnovni princip je razkosati celotno sliko na manjše bloke, v katerih nato grafična kartica z vsako nitjo posebej preračunava vrednosti za vsak slikovni element posebej.

Bayesov sklep je podan z enačbo

$$p(x|y, \theta) = \frac{p(y|x, \theta) p(x|\theta)}{p(y|\theta)} \quad (19)$$

kjer je y podoba z vsebovanim pegastim šumom, x je njegov ekvivalent brez pegastega šuma, θ pa predstavlja parametre modela. $p(y|x, \theta)$ predstavlja pogojno porazdelitev gostote verjetnosti y za podani x , in ga imenujemo tudi verjetje, $p(x|\theta)$ je prior in $p(y|\theta)$ pa predstavlja verjetnost podatkov. V enačbi (19) gostota porazdelitve verjetja $p(y|\theta)$ ne igra vloge pri maksimiranju glede na x , zato je cenilka maksimalne aposteriorne (MAP) verjetnosti podana z

$$\hat{x}(y) = \arg \max_x p(y|x, \theta) p(x|\theta) \quad (20)$$

kjer morata obstajati prior in verjetje. V izvorni podobi SAR je pegasti šum modeliran kot multiplikativen šum $y = xn$, kjer n predstavlja pegasti šum. Gostota porazdelitve verjetja modelira porazdelitev pegastega šuma z gama porazdelitvijo:

$$p(y_s|x_s) = 2 \left(\frac{y_s}{x_s} \right)^{2L-1} \frac{L^L}{x_s \Gamma(L)} \cdot \exp \left(-L \left(\frac{y_s}{x_s} \right)^2 \right) \quad (21)$$

kjer L predstavlja ekvivalentno število pogledov in s je opazovani slikovni element, Γ je gama funkcija.

Gauss-Markova naključna polja (GMRF) spadajo v družino Gibbsovih modelov, in dobro opisujejo lastnosti SAR podob. GMRF je podan z enačbo /10/

$$p(y|\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left(-\frac{x - \sum_{r \in N_s} \theta_r (x_{s+r} + x_{s-r})}{2\sigma^2} \right) \quad (22)$$

kjer N_s opisuje okolico, r definira sosednje slikovne elemente centralnega slikovnega elementa s in θ_r predstavlja parameter teksture GMRF.

Cenilka MAP je podana z enačbo 21. Rešitev prvega odvoda za GMRF je podana z naslednjo enačbo

$$x_s^4 - x_s^3 \sum_{r \in N_s} \theta_r (x_{s+r} + x_{s-r}) + 2L\sigma^2 x_s^2 - 2L\sigma^2 y_s^2 = 0 \quad (23)$$

Parametri teksture modela GMRF θ_r definirajo njegove parametre modela. Ti parametri so ocenjeni z uporabo pro-

cedure imenovane maksimiranje verjetja. Verjetja podanega z enačbo

$$p(y) = \int p(y|x)p(x|\theta)dx \quad (24)$$

ne moremo izračunati analitično, zato raje uporabimo aproksimiranje preko Hessianove matrike. Za krajši zapis enačbe raje uporabimo logaritemsko obliko zapisa

$$\log p(y|\theta) \approx \sum_{i=1}^{N \times N} \frac{1}{2} (\log 2\pi - \log h_{ii}) + \log p(y_i|\hat{x}_i) + \log p(\hat{x}_i|\theta) \quad (25)$$

kjer koeficient h_{ii} modela GMRF podaja naslednja enačba

$$h_{ii} = \frac{6Ly_s^2}{x_{sMAP}} - \frac{2L}{x_{sMAP}^2} + \frac{1}{\sigma^2} \left(1 + \sum_{j \in N_s} \sigma_j^2 \right) \quad (26)$$

4 Eksperimentalni rezultati

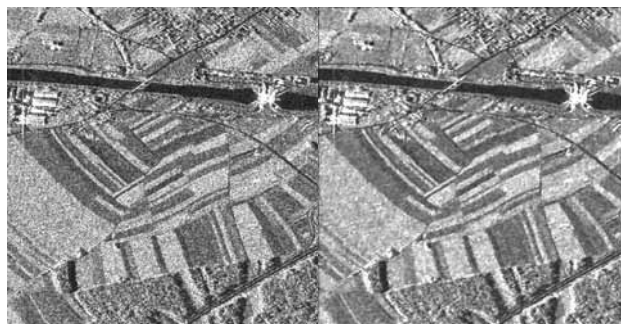
V namene eksperimentalnih rezultatov smo uporabili TerraSAR-X podoba predela Zlatoličja. Podoba je bila zajeta 6. 6. 2009, pri vpadnem kotu okoli 49°. Podoba je zajeta v visoko-resolucijskem dualno polariziranem načinu, torej v horizontalni in vertikalni polarizaciji. V smeri Zemlje znaša resolucija 1,56 m, medtem ko resolucija v smeri leta znaša 2,2 m. Dualna polarizacija je posledica oddajanja elektromagnetnega valovanja, kjer satelit pošlje elektromagnetno valovanje v valovni dolžini 9.65 GHz, odbiti signal pa se selektivno sprejema preko horizontalnih in vertikalnih filtrov.

Pred obdelavo podob s predlaganima algoritmoma je potrebno podobe najprej podvzorčiti in odpraviti pegasti šum. Podvzorčili smo za faktor 2, tako da ima izhodna slika enkrat manj vrstic in stolpcev. Zaradi velike prisotnosti pegastega šuma (slika 2), ki nam pokvari pravilno ocenjevanje prostorninske vlažnosti zemlje, najprej izvedemo odpravo šuma slike po modelno zasnovanem algoritmu MBD /10/ (ang. *Model-Based Despeckling*), ki odpravi večino pegastega šuma na homogenih področjih. Zaradi kompleksnosti algoritma, smo le-tega spremenili v večnitni model in sprogramirali na grafičnem procesorju s tehnologijo CUDA /11/.

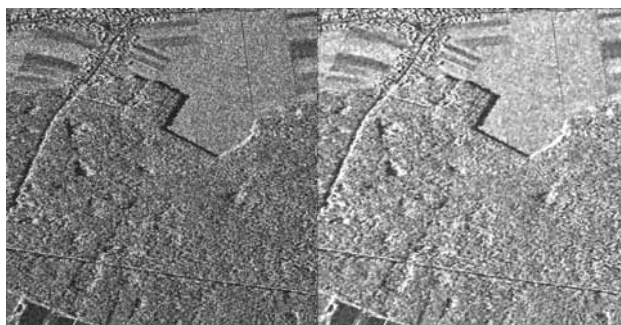


Slika 2. Hitri predogled področja zajetega 6. junija 2009 (TerraSAR-X® / DLR).

Parametri MBD algoritma odstranjevanja pegastega šuma so znašali: velikost večjega okna 13x13, znotraj katerega se premika manjše okno velikosti enega samega slikovnega elementa, kjer je red modela enak 2. Algoritem je bil ločeno pognan na horizontalni in na vertikalni polarizaciji. Rezultat odpravljanja pegastega šuma prikazujeta sliki 3 in 4 za oba izseka slike 2.



Slika 3. Primerjava med izsekom 1. področja slike s prisotnim pegastim šumom in izhodom algoritma MBD.

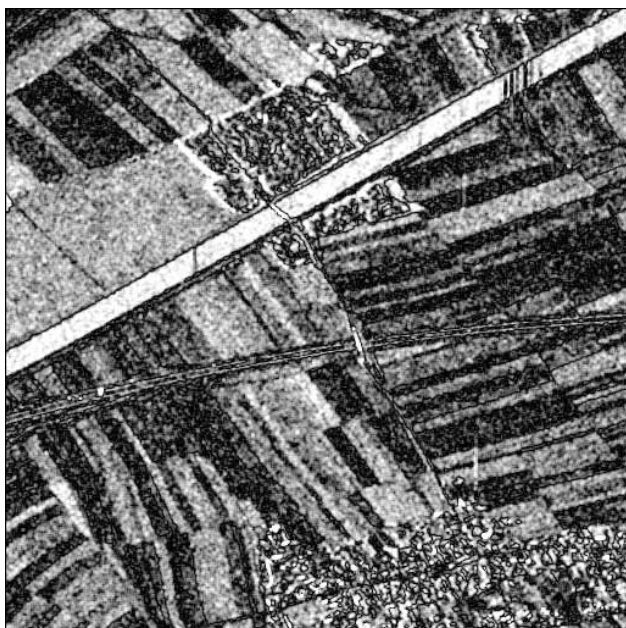


Slika 4. Primerjava med izsekom 2. področja slike s prisotnim pegastim šumom in izhodom algoritma MBD.

Naslednji korak predstavlja ocenjevanje vlažnosti, ki ga ločeno poženemo prvič za Dubois, drugič za Shi model. Pri tem upoštevamo zgoraj zapisane enačbe Dubois modela (4-8) in Shi modela (13-15), kjer je potrebno poudariti temeljno razliko med modeloma. Enačbe Dubois modela so izpeljane analitično, medtem ko pri Shi modelu uporabimo numerično reševanje po diskriminanti. To je iz staljšča računskega časa tudi zahtevnejši algoritem. Izhoda algoritma sta ločeno prikazana na slikah 5 in 6.

Da si bralec lažje predstavlja omenjeni sliki prostorninske vlažnosti zemlje, jih glede na vrednosti izhoda umetno pobarvamo z barvno paletto mavričnih barv in jih primerjamo na sliki 7. Tukaj je potrebno poudariti, da algoritma delujeta inverzno, in sicer se omenjeni efekt vidi ravno na področju reke, kjer se pri Dubois algoritmu obarva belo, pri Shi modelu pa črno. Pri obeh slikah pa pomeni, da so najmanjše vrednosti obarvane rdeče, najvišje pa vijolično.

Pretvorbo v prostorninsko vlažnost zemlje smo ločeno izvedli za Dubois in Shi model. Tako enačba (27) opisuje



Slika 5. Prostorninska vlažnost kot izhod Dubois algoritma omenjenega izseka.

pretvorbo dielektrične konstante Dubois modela v m_v , medtem ko enačba (28) pretvori dielektrično konstantno Shi modela v m_v .

$$m_v = 0.000237\epsilon^3 - 0.03421\epsilon^2 + 2.435\epsilon - 2.86 \quad (27)$$

$$m_v = 0.00043\epsilon^3 - 0.055\epsilon^2 + 2.52\epsilon - 5.3 \quad (28)$$



Slika 6. Prostorninska vlažnost kot izhod Shi algoritma omenjenega izseka.

Primerjavo med ocenjenimi vrednostmi teh dveh algoritmov izvedemo s pomočjo nekaj meritev na samem terenu, ob enakem času zajema podobe. V ta namen smo uporabili senzor TRIME-PICO64 /12/, pri katerem smo izhodno



Slika 7. K-means klasifikacija vrednosti prostorninske ocene vlažnosti; levo - Dubois model, desno - Shi model.

napetost neposredno zajemali na prenosnem računalniku preko modula osciloskopa. Posnetek senzora in uporabe le-tega je prikazan na sliki 8. Zbrane meritve z izhodi teh dveh algoritmov, so zbrani v Tabeli 1, kjer sta Δx_D in Δx_S odstopanje v %.

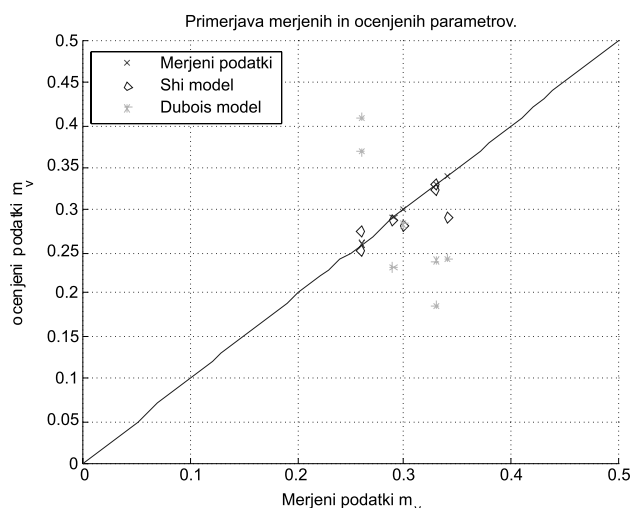
Tabela 1. Primerjava med ocenjenimi in merjenimi prostorninskimi vlažnostmi

Meritev	Teren	Dubois	Shi	Δx_D	Δx_S
1.	0,26	0,1904	0,2511	26,7	3,4
2.	0,34	0,2422	0,2901	28,7	14,6
3.	0,33	0,1864	0,3220	43,5	2,4
4.	0,33	0,2396	0,3285	27,3	0,4
5.	0,29	0,2311	0,2875	20,3	0,8
6.	0,30	0,2823	0,2804	5,9	6,5
7.	0,26	0,3687	0,2749	41,8	5,7



Slika 8. Senzor za zajemanje merilnih podatkov na terenu in njegova uporaba.

Tabelo 1 prikažemo tudi grafično, kar prikazuje Slika 9. Iz tabele je razvidno, da je Shi model mnogo boljše ocenil prostorninsko vlažnost, se pa čas računanja zelo podaljša. Omenjeno trditev je moč videti tudi na Sliki 9, kjer opazimo, da je deviacija vrednosti Shi modela mnogo manjša kot Dubois modela.



Slika 9. Razpršenost vrednosti obeh modelov.

Seveda se pojavijo tudi napačni rezultati, ki so bolj izraziti pri Dubois modelu. Pri meritvah je potrebno omeniti, da so bile izvedene na področju majhne vegetacije (prve štiri meritve) in na območju brez vegetacije (zadnje tri meritve). Sliki 3 in 4 prikazujeta oba omenjena izseka. Rezultati so podobni merjenim podatkom in podatkom, ki jih najdemo v literaturi /5/, vendar lahko opazimo, da algoritem nekatere stvari označi kot zelo vlažne, kar v resnici ne more biti res. Razlog gre iskat v odbojih radarskega valovanja, kjer poznamo tri različne odboje, k temu pa se doda še prisotnost pegastega šuma, kar se dobro vidi na sliki 7, kjer se pojavi popolni radarski odboj in oba algoritma omenjeni efekt napačno interpretirata. Podobno se dogaja tudi na področjih s prisotno močno vegetacijo, na kateri žal omenjena valovna dolžina ne more dobro delovati, lahko pa z uporabo alternativnega L- ali C-pasu odpravimo omenjeno pomanjkljivost.

K vsem skupaj pa je potrebno dodati tudi časovno kompleksnost predlaganega algoritma. Pri tem ne dajemo direktne primerjave med računanjem MBD algoritma na CPU in GPU, ki je znašala okoli faktorja 25x. Močno odstopanje v času procesiranja (Tabela 2) je posledica različnega časa konvergence MBD algoritma. Za nadaljnjo obdelavo slike znaša čas računanja Dubois modela za sliko 512 x 512 okoli 0,3 s, medtem ko za Shi model znaša okoli 14 s. Uporabljen računalnik je bil Intel Core2 Quad Q9450 procesor, 4 GB sistemskega pomnilnika in nVidia GF 9600 GT s 512 MB pomnilnika ter MS Vista SP2 x64 operacijski sistem.

Tabela 2. Računski časi MBD algoritma različnih polarizacij in izsekov

5 Zaključek

Namen študije je prostorninsko ocenjevanje vlažnosti površja zemlje na področju umetnega kanala elektrarne Zlatoličje. Na izhodnih slikah opazimo, da se meritve dobro skladajo z realnim stanjem, saj je prostorninska vsebnost

vode nekje med 10 in 40 %. Dobljeni rezultati so pokazali, da daje v primeru TerraSAR-X podatkov pri omenjenem vpadnem kotu uporaba Shi modela mnogo boljše rezultate. Ta model se zelo dobro prilega podatkom na področjih brez poraščenosti, kakor tudi na področjih z majhno poraščenostjo. To se dobro vidi tudi iz razpršenosti vrednosti na sliki 9, kjer ima Shi model vrednosti dokaj blizu realnim. Tudi s primerjave modelov s slike 7 opazimo, da so vrednosti mnogo bolj enakomerne pri Shi modelu, kot pri Dubois modelu, kar pomeni, da je Shi model mnogo manj občutljiv na razgibanost površja. Tudi tabela 1 govori o mnogo boljšem Shi modelu, saj odstopanje ni veliko, medtem ko pri Dubois modelu doseže tudi 40 %.

Podamo lahko tudi dejstvo, da se dielektrična konstanta spreminja časovno, torej glede na letni čas, saj se po letnem času spreminja tudi vlažnost terena. Ker so SAR podobe zajete pri zelo visoki frekvenci valovanja, in sicer v X-področju (9,65 GHz), se pojavi problem prodiranja v zemljo, saj se to lahko naredi le do valovne dolžine elektromagnetnega valovanja, ki v našem primeru znaša le okoli 3 cm. Tukaj slonimo na dejstvu, da se spremembe v vlažnosti tal dobro odražajo na površju terena, ki ga opazujemo z radarsko svetlobo.

Algoritem nameravamo nadgraditi s samo-organizirajočimi nevronskimi mrežami, saj želimo odstraniti motnje v algoritmu, ki se pojavljajo zaradi različnih oblik cest, naselij, gozdov in nepravilnega odboja, nad katerim izvedemo omenjeni algoritem. Vhodni vektor, namenjen učenju samo-organizirajoče se nevronske mreže, bo sestavljen iz naslednjih vzorcev: sivinska vrednost dotičnega slikovnega elementa, srednja vrednost 5x5 okolice slikovnega elementa, kakor tudi standardna deviacija enake okolice, vrednost robov po Sobel algoritmu in na koncu še maske (v vseh štirih osnovnih smereh), s katerimi ugotovimo ali gre za področje rečnega nabrežja ali ne. Te maske so sestavljene iz 5x5 matrike, ki ima po vseh štirih glavnih oseh vrednosti nič, nad to diagonalo so vrednosti 1, pod njo pa vrednosti -1.

Literatura

- /1/ E. T. Engman, and N. Chauhan, "Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing," Remote Sens. Environ., vol. 51, no. 1, 189-198, 1995
- /2/ TerraSAR-X brošura, http://www.serv2.go.t-systems-sfr.com/tsx/documentation/TerraSAR-X_Brochure_final.pdf
- /3/ E. T. Engman, "Applications of microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agriculture," Remote Sens. Environ., vol. 35, pp. 213-226, 1991
- /4/ F. Ulaby, R. Moore, & A. Fung: Microwave Remote Sensing: Active and Passive I - III, Addison-Wesley Publication, str. 2162, 1981-1986
- /5/ P. C. Dubois, J. J. van Zyl & T. Engman: Measuring Soil Moisture with Imaging Radars, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, no. 4, str. 915-926, 1995
- /6/ J. Shi, J. Wang, A. Y. Hsu, P. E. O'Neil and E. T. Engman: Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameter Using L-band SAR Image Data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no. 5, str. 1254-1266, 1997

- /7/ A. K. Fung, Z. Li, and K. S. Chen, "Backscattering from a randomly rough dielectric surface," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 30, pp. 356-369, 1992
- /8/ A. von Hippel: Dielectrics and Waves, vol. I and II, str. 284, 1995
- /9/ Y. Oh, Y. C. Kay: Condition for precise measurement of soil surface roughness, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 2, str. 691-695, 1998
- /10/ M. Walesa and M. Datcu: Model-based despeckling and information extraction from sar images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, str. 2258-2269, 2000
- /11/ CUDA, programski modul,
http://www.nvidia.com/object/cuda_programming_tools.html
- /12/ TRIME-PICO64, http://www.imko.de/ENG/index.php?option=com_content&task=view&id=107&Itemid=110
- /13/ M. A. Tassoudji, K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, "Design consideration and implementation of the LCX polarimetric scatterometer (POLARSCAT)," Rep. 022486-T-2, Radiation Lab., Univ. Michigan, Ann Arbor, June 1989.
- /14/ NASA, SRTM, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

*Matej Kseneman, Dušan Gleich
 Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor
 E-pošta: matej.kseneman@gmail.com*

Prispelo (Arrived): 02.12.2009 Sprejeto (Accepted): 09.09.2010