

ПОТЕНЦИАЛ НА РАДАРНИТЕ ПОЛЯРИМЕТРИЯ И ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ В ИЗСЛЕДВАНЕ НА ГОРСКИ ТЕРИТОРИИ

Златомир Димитров

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: zlatomir.dimitrov@space.bas.bg*

Ключови думи: Радарни методи, SAR, Поляриметрия, POL-SAR, Интерферометрия, InSAR, POLinSAR, гори, екосистеми, модели на разсейване, RVoG, обща биомаса, AGB, запас дървесина, GSW

Резюме: В доклада е представен обзор на радарните методи за изследване на горски екосистеми и определяне на височината на дървостоя, запаса дървесина и общата биомаса. Радарните методи (SAR) обхващат два аспекта на активната радиометрия: радарна поляриметрия (POL-SAR) и радарна поляриметрия и интерферометрия (POLinSAR). Радарната поляриметрия е чувствителна към геометричните характеристики на обектите. Определяне видовете механизми на разсейване от горски територии е възможно единствено чрез обработка на POL-SAR данни (поляриметрични снимки) при които са известни всички състояния на поляризация. Интерферометричната POLinSAR кохерентност е чувствителна от една страна към вертикалното разпределение на разсейващите центрове във височина, а от друга и към видовете механизми на разсейване в дадения горски обем. С помощта на въведения основен кохерентен модел на разсейване от произволен горски обем – RVoG, е възможно моделиране поведението на интерферометричната кохерентност в обема, както и определяне на физическите параметри на дървесните култури. В определянето на запаса дървесина – GSW и общата биомаса – AGB на горските екосистеми се прилагат няколко подхода. Радарната томография е най-новия метод за получаване на вертикални профили на растителността, чрез прилагане на мулти-базов POLinSAR подход. Чрез използване на радарните поляриметрия и интерферометрия в изследване на горски екосистеми е възможно успешно проследяване на различни видове нарушения.

POTENTIAL OF POLinSAR IN SURVEY OF FOREST ECOSYSTEMS

Zlatomir Dimitrov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

Keywords: SAR, POL-SAR, POLinSAR, forest, disturbances, scattering mechanisms, linear model, random volume over ground, RVoG, above ground biomass, AGB, growing stock volume, GSW, TomoSAR

Abstract: This paper presents an overview over SAR based methods dedicated to forestry, by means of POLinSAR and derivation of forest parameters, such as volume height, growing stock volume and above ground biomass. Radar polarimetry (POL-SAR) is sensitive to geometrical properties of the objects. POLinSAR coherence is a sensitive parameter for both, the vertical structure of the resolution cell and the types of scattering mechanisms inside the cell [Neuman et al, 2007]. Tree stage inversion of the two layer coherent scattering model – RVoG is needed to derive four output parameters, which are volume height (h_v), mean vertical extinction (σ), ground-to-volume ratio ($m(w)$) and referent ground phase (φ_0). Estimates of growing stock volume (GSW) in m^3/ha , and above ground biomass (AGB) in t/ha are made by various methods and satellite missions, where P-band was proved to gain more accurate results on biomass estimation, when applied in boreal and tropical forests. SAR tomography is capable to derive 3D information on vegetation and canopy.

Въведение

Комбинирането на различни оптични системи и още повече радарни методи за изследване на горските екосистеми е обещаващ подход към по-голямата точност в определянето на горските параметри. [Yolanda et al., 2009]. Използването на данни от

Радиолокационни апаратури със страничен обзор, или радарни със синтезирана апертура (SAR) са в основата на радарните методи при наблюдение на Земята. Радарните поляриметрия и интерферометрия (POLinSAR) е техника доказана в множество научни трудове. Водещи автори са работили по приложимостта на POLinSAR при определяне параметрите на горските екосистеми, като оценка на общата биомаса и височината на дървостоя - K.Papathanassiou, S. Cloude, L.Ulander, M.Soja, вертикалната структура – M.Pardini, K.Papathanassiou, S. Tebaldini, M. Neuman, влияние на различни фактори и изследване на нарушения – D.Hoeckman, L.Ferro-Famil, H.Chen, S.Cloude и други.

Целта на доклада е да се представи приложимостта на радарните методи в изследване на горски екосистеми, като основен акцент е върху радарните поляриметрия и интерферометрия (POLinSAR). Да се разкрият възможностите за определяне на височината на дървостоя, посредством POLinSAR модели на разсейване, определяне запаса дървесна маса (GSW) и методите за определяне на общата биомаса (AGB).

Радарни методи в изследване на горите

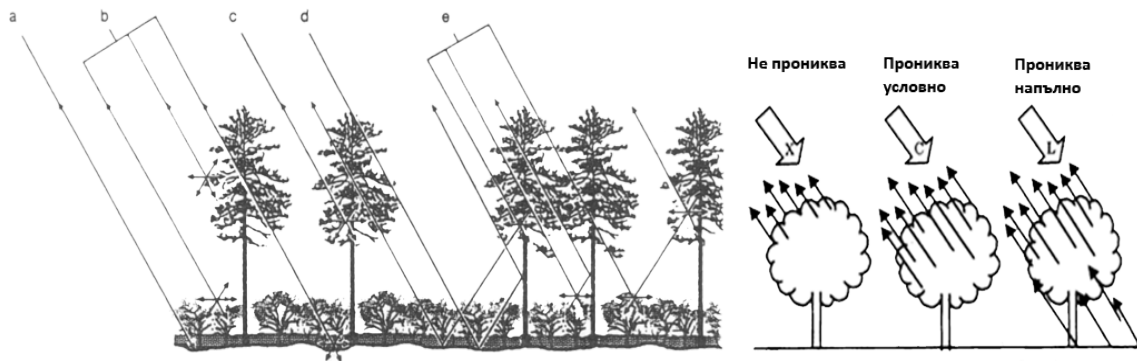
Дистанционните методи от Космоса в микровълновия диапазон обхващат двата аспекта на радиометрията - активната и пасивна [Мардиросян, Г., 2015]. От гледна точка на активната радиометрия, SAR – предлага следните предимства, пред оптичните методи, в изследване на горски екосистеми:

- Проникване безпрепятствено през всички слоеве на атмосферата и нейните елементи;
- Получаване на радиолокационен образ на земната повърхност по всяко време от денонощието;
- Чувствителност към геометричните характеристики на изследваните обекти, в случая гори.

Кохерентната природа на сигнала е предпоставка за наличие на характеристичен шум в радарните изображения т.нар. *слекъл ефект (speckle)*, като резултат при формиране на SAR-изображението. Характеристичният шум е по-силно изразен при обекти от земната повърхност със статистически нееднородна геометрия, каквито са именно горските екосистеми. От друга страна, състоянието на поляризация на обратно-разсеяния сигнал се определя от степента и вида на разсейване от активните фазови центрове на разсейващите обекти от земната повърхност [M. Helman, Sh.Cloude, 2011]. При разглеждане на горски екосистеми, с цел определяне всички състояния на поляризация, се налага използване на SAR-системи с пълна поляриметрия (Full-Pol), представящи т.нар. поляриметрична снимка [Мардиросян, Г., 2015]. на изследвания район. Използването на методи разчитащи на данни от радиолокационни апаратури опериращи само с една фиксирана поляризация, не са способни да представят изцяло процесите на разсейване в горския обем и да се определят физическите и геометрични параметри [Cloude et Papathanassiou, 1998].

Геометричната представа за разсейването на микровълновите импулси от горския обем дефинират *механизмите на разсейване*. Те представляват характеристика на различни свойства на обектите от горския обем, като морфологични особености и техните диелектричните свойства, отнесени към фенологичното състояние на растителността [Reigber A,2000].

В радиолокационната снимка, горските екосистеми се отличават, като „грапави текстури“. Грапавите текстури определят от една страна преобладаващо повърхностно разсейване – SB, характерно за горните слоеве на короните на дърветата и приземната растителност, а от друга обемното разсейване – Vol. В горските екосистеми преобладава обемно разсейване, при което се наблюдава де-поляризация на сигнала и/или промяна на поляризацията от H във V, от което следва доминиране на интензивността в поляриметричен канал – HV. В зависимост от гъстотата на дървесната растителност, преобладава механизъм на двойно отскачане – DB, предимно между стволовете на дърветата и земната повърхност. От съществено значение при изследване на горски екосистеми е степента на проникване на микровълновото лъчение през обема горска растителност, по-специално преодолявайки активното разсейване от листата на растителността. В зависимост от микровълновия канал, активните разсейващи центрове се отнасят към различни части на дървото – листа, клонки, големи клони, стемло. Схематично, това е показано на фиг. 1.



Фиг. 1. Ляво: суперпозиция от видове механизми на разсейване в горски обем: (а) повърхностно разсейване от приземна растителност - surface scattering, Single Bounce (SB); (b) обемно разсейване от листа и клонове – Volume scattering (Vol); (c) директно разсейване от корона на дървото – SB; (d) отражения от растителност и стъбло – Double Bounce (DB); (e) сложно разсейване основавайки се на DB и Vol, включвайки различни странични отражения от съседните дървета, и земна повърхност; повторно разсейване – Dihedral scattering. Дясно - различна степен на проникване на е.м. вълни в дървесна растителност, в зависимост от дължината на вълната.

Основните микровълнови канали използвани за изследване на горски екосистеми са : L (23 cm, 1.2 GHz) и P (72 cm, 430 MHz) ; в по-специфични случаи се използват : X (3 cm, 10 GHz) и C (5 cm, 5 GHz). В таблица 1, са представени радиолокационни системи със страничен обзор.

Таблица 1. Използвани радиолокационни системи със страничен обзор – SAR, в изследване на горски екосистеми, апаратури монтирани на спътникови платформи; *източник-интернет*

НАИМЕНОВАНИЕ / Принадлежност	Спектрален КАНАЛ	Поляриметрия (POL-SAR)	Час на прелитане над България	Период на заснемане	В работен режим от	Инклинация на орбитата	ПРС	Посока на заснемане	Ъгъл на обзор	Вид на системата
TerraSAR-X / TanDEM-X, DLR	X	full / dual-pol (HH+VV+H V+VH)	Asc.pass - 18ч GMT; Des.pass – 04:30 GMT	11 дни	15.06 2007 / 21.06 2010	97.4 4 deg	1 m / Spotlight; 3 m / Stripmap	Right / Left	20-45 deg SE	mono-static / bi-static
ALOS PALSAR, JAXA	L	full-pol (HH+VV+H V+VH)	Asc. - ок. 20:30 ч GMT Des. - ок. 08.30 GMT	46 дни	24.01 2006	98.1 6 deg	24 m	Right	polari metric mode - 21.5 deg	mono-static
ALOS-2 PALSAR-2, JAXA	L	full-pol (HH+VV+H V+VH)	Asc - ок. 10:50 ч GMT Desc. - ок. 19:50 GMT	14 дни	24.05 2014		3m, 6m / 12.5m Quad-pol	Right / Left	~37 deg	mono-static
Sentinel-1 A/B, ESA	C	dual-pol (VV+VH)	Asc.pass - 16ч GMT; Desc.pass - 04ч GMT	12 дни	03.04 2014 / 22.04 2016	98.1 8 deg	10 m / IWS	Right	IWS: 31 - 46 deg	mono-static

При подход на комбиниране на радарната поляриметрия (POL-SAR) с интерферометрия (InSAR) се показва, че интерферометричната (POLinSAR) кохерентност от две поляриметрични снимки - $\tilde{\gamma}_{int}(\vec{\omega})$ е параметър чувствителен, както към вертикалната структура в разглеждания горски обем, така и към видовете механизми на разсейване в същия обем [Neuman et al, 2007]. При изследване на природни цели, в случая горски територии, точността при определяне на интерферометричната фаза се влияе пряко от загубата на кохерентност, или от източниците на *интерферометрична декорелация*. Ето защо интерферометричната кохерентност се моделира, като сума от няколко отделни компоненти:

$$(1) \quad |\gamma(\mathbf{w})| = \gamma_{System} \cdot \gamma_{Baseline} \cdot \gamma_{Temporal}$$

където: \vec{w} – вектор, описващ състоянието на поляризация.

В изследване на горски територии от голямо значение е обемната декорелация ($\gamma_{\text{volume}} = \gamma_{\text{baseline}}$, при $\gamma_{\text{range}} \approx 0$), която е тясно свързана с вертикалното разпределение на разсейващите центрове в разглеждания обем (resolution cell) [Lopez-Martinez, et al., 2011]. В даден горски обем, вертикалният профил на фазовите разлики между ефективните разсейващи центрове и земната повърхност (получени чрез интерферометрична кохерентна декомпозиция с доминиращите механизми на разсейване), отговаря на профила на височината на въпросните центрове от земната повърхност [Cloude et Parathanassiou, 1998].

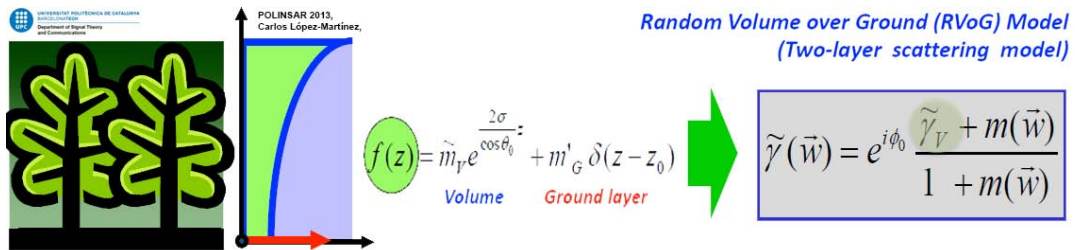
Основен кохерентен модел на разсейване – RVoG

Въвежда се опростен електронмагнитен модел за обратно разсейване на микровълновия сигнал от горската растителност и подложната повърхност – Random Volume over Ground model (RVoG) [Cloude et Parathanassiou, 1998].

След интегриране на структурната функция – $f(z)$ описваща поведението на разсейващите центрове в произволния обем с височина - h_v , се получава следния израз за интерферометричната кохерентност, в зависимост от състоянието на поляризация на сигнала:

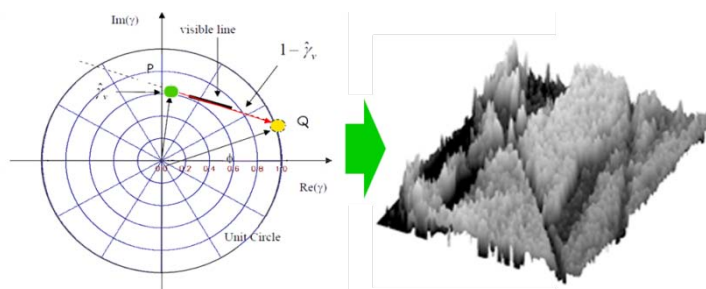
$$(2) \quad \tilde{\gamma}(\vec{w}) = e^{i\phi_0} \frac{\tilde{\gamma}_V + m(\vec{w})}{1 + m(\vec{w})}$$

където: $\tilde{\gamma}_V$ – обемната кохерентност (обемната декорелация в обема при отсъствие на земна повърхност), която пряко зависи от вертикалното вълново число - k_z и отношението – ground-to-volume amplitude ratio - $m(\vec{w})$ и средната екстинкция в обема – σ , както е показано на фиг. 2.



Фиг. 2. Основен кохерентен двуслоен (линеен) POLinSAR модел – RVoG

Моделът е дефиниран при: 1-условие за *поляриметрична стационарност-PS*, спрямо кохерентната матрица (T), където: $T_{11}=T_{22}$; 2-условие за *поляриметрично-интерферометрична стационарност-IPS*, спрямо POLinSAR матрицата (Ω), където: $\hat{\Omega}_{12}^H \hat{\Omega}_{12} = \hat{\Omega}_{12} \hat{\Omega}_{12}^H$; 3-условие за кохерентна линейност-CL, при което графиката - $\tilde{\gamma}(\vec{w})$ в комплексната равнина (CUC) представлява права линия [Carlos Lopez-Martinez, 2013]. Тези три условия, формират *хипотеза на модела RVoG*, като представят дефинирането на модела при идеализирани условия с липса на атмосферни влияния, за моно-статични системи. Разсейването в обема е анизотропно с три възможни механизма на разсейване. В близост до земята преобладава предимно отражение – DB между ствола и земята, както и приземната растителност. Решението на задачата и получаване стойностите на изходните параметри от модела се извършва чрез „*тристепена инверсия на модел*“ [Cloude et Parathanassiou, 2003], посредством: 1-линейна регресия в зависимост от $\tilde{\gamma}_V$; 2-определяне на земната фаза – ϕ_0 ; 3-определяне височината – h_v , показан на фиг. 3.



Фиг. 3. Ляво: единичния кръг в комплексната равнина (CUC) представящ решенията на - $\tilde{\gamma}(\vec{w})$ в зависимост от състоянието на поляризация, нужен при тристепенната инверсия на модел; дясно: 3D-представяне на горския обем, след изчисляване височината на дървостоя – h_v

След дефинирането на основния кохерентен модел на разсейване от произволен горски обем, други автори са работили в посока подобрене на този модел. Разработени са модели при които се отчитат атмосферните влияния при наличие на влага и вятър: Random motion over ground model (RMoG) - Lavelle, et al., 2012, 2015, Debnia et Simrad, 20016, temporal decorrelation RVoG (TD-RVoG) - L.Zhen, et al., 2014, Askne et.al, 2005, Thiel et Schmullius, 2013; отчитане влиянието на релефа: Sloped RVoG (S-RVoG) - X. Qinghua, et al. 2015 ; геометричен модел: специално за микровълнов канал – P, Cylinder over ground model (CYoG) - Blomberg, et al., 2014, във връзка с бъдещата мисия на ESA – BIOMASS; модифициран модел, на основата на основния-RVoG, но при формулировка на ориентиран обем, каквито са земеделските култури – Oriented volume over ground model (OVoG) - Pottier, et al., 2007.

Условие за решимост

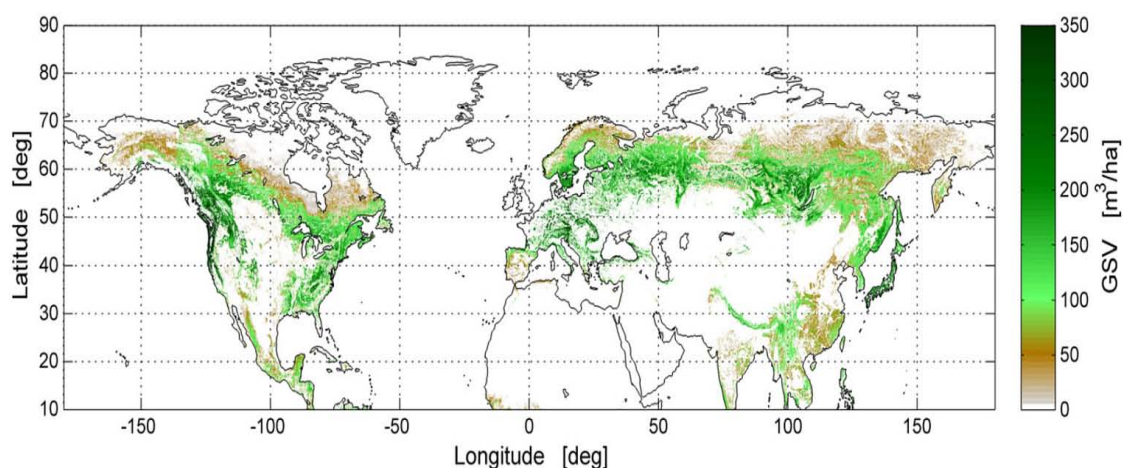
Изследването валидността на RVoG – хипотезата, показва висока приложимост в гъсти тропически (лонгозни) гори при използване на малки стойности на интерферометричната база - B_{\perp} [Carlos López-Martínez, 2013]. В този случай за предпочитане е микровълнов канал – P пред – L, поради по-високата степен на проникване в произволен обем с висока плътност и съответно удовлетворяване постановката на двуслойния кохерентен модел. Методи базирани на мулти-честотни подходи, примерно съвместявайки данни от микровълнови канали – X и P, позволяват по-голяма точност и приложимост в зависимост от гъстотата на горската растителност. Не на последно място, важно условие е използване на поляриметрични системи с отчитане на всички състояния на поляризация (ful-pol).

Изчисляване запаса дървесна маса (growing stock volume)

Определянето на запаса на дървесната маса – GSW се дефинира, като интегралния обем от дървесни стволове на хектар – m^3/ha [FAO, 2004] и може да се превърне във величина на общата биомаса, посредством емпиричен коефициент за определения тип горски екосистеми, с размерност на – t/ha . Доказано е, че височината на дървостоя добре *корелира* с GSV без това да зависи съществено от видовото разнообразие, като за гори от северен тип това се дава от следната формулировка в у-ние 3:

$$(3) \quad GSV^{boreal} = 20.9 e^{0.11/h_v}$$

Средната грешка на изчислената GSV с този метод е в зависимост от гъстотата и наблюдаваното „насищане“ в райони с голяма плътност на дървесната растителност. В следствие на инструменталните грешки и времевата декорелация от 35 дни, е от порядъка на 30% [Maurizio Santoro et al., 2015]. Карта на GSV е представена на фиг.4.



Фиг. 4. Карта на запаса дървесина – GSV представителна за 2010 година, получена чрез алгоритъм – BIOSAR, посредством комбиниране изчисленията за GSV от *хипер-времева* редица от ENVISAT – ASAR, C-band, на основата на коефициента на обратно разсейване; максималната стойност на GSV по тази методика е 1019 m³/ha, като районите без горски екосистеми са маскирани.

Изчисляване общата биомаса (above ground biomass)

Съществуват няколко подхода за определяне общата биомаса – AGB. За изчисляването ѝ се прилагат *алометрични* уравнения с емпирични коефициенти, дефинирани за видовете горски екосистеми, където за европейските гори от умерен тип (temperate forests) е изведена следната зависимост, основаваща се на видово разнообразие от – смърч, дъб, бор и бук [Mette, 2007], у-ние 4:

$$(4) \quad B = 0.801 \cdot H_{100}^{1.748}$$

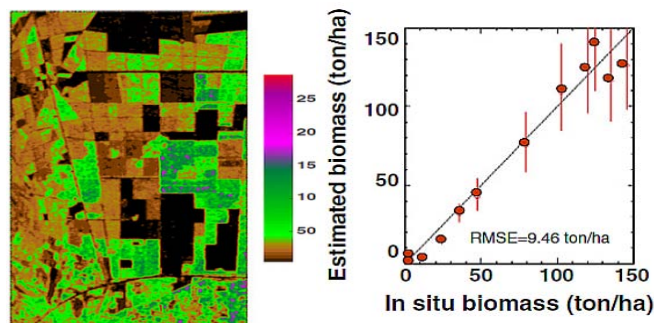
където, B – общата биомаса с размерност – t/ha ; H_{100} – определя средната височина на дървостоя за 100-дървета с най-голям диаметър от съвкупността, на площ от един хектар.

Използването на **методика чрез директно обратно разсейване** за определяне на общата биомаса е по-скоро корелационен без да се изчислява височината на дървостоя, както следва от у-ние 5:

$$(5) \quad \gamma_{HV}^0 = \sigma_{HV}^0 / \cos \theta$$

където, γ_{HV}^0 (gamma pought) е коефициента на обратно разсейване нормиран на локалния ъгъл на падане - θ в поляриметричен канал – HV.

Този метод е приложим за горски територии с обща биомасата под 150 t/ha. Грешката в изчисленията е повече от 20%, или за горски екосистеми с по-ниска обща биомаса, може да бъде минимална до към 10 t/ha [Hajsek et al., 2009], [Sandberg et al., 2011], като се има в предвид, че при този метод няма разграничаване на видовете механизми на обратно разсейване. Резултат от изчисление с този метод е представен на фиг.5.



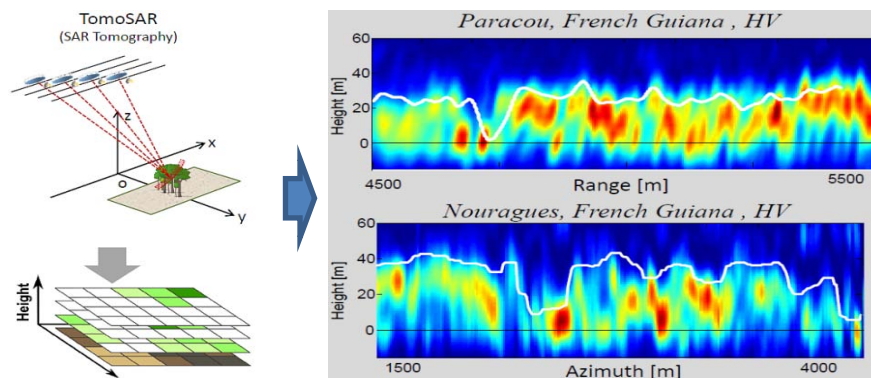
Фиг. 5. Определяне общата биомаса по метод на директно разсейване и добра корелация при горски територии със стойности на AGB, под 150 t/ha.

С увеличаване на общата биомаса чувствителността на коефициента на обратно разсейване - γ_{HV}^0 намалява при горски екосистеми с обща биомаса между 200 и 450 t/ha [Malhi et al., 2006]. Следователно, за горски екосистеми от тропически тип (лонгозни гори) и северен-бореален тип с висока гъстота е по-подходящо **използване методика базирана на POLinSAR**, с инверсия на модел, при който се отчита и приноса на обратното разсейване при земята [Dubois-Fernandez et al., 2008], [Hajsek et al., 2009].

Радарната томография – ТомoSAR, е най-точния метод за определяне състоянието и параметрите на горските екосистеми. Той представлява мулти-базов POLinSAR подход посредством редица от данни с малък период на заснемане, следователно малка времева декорелация. Всички измервания представляват векторна сума от всяко интерферометрично заснемане, получавайки информацията за вертикалното разпределение на разсейващите центрове, което се дава от у-ние 6:

$$(6) \quad W = \sum_{k=1}^N \lambda_k C_k \otimes R_k \approx C_g \otimes R_g + C_v \otimes R_v$$

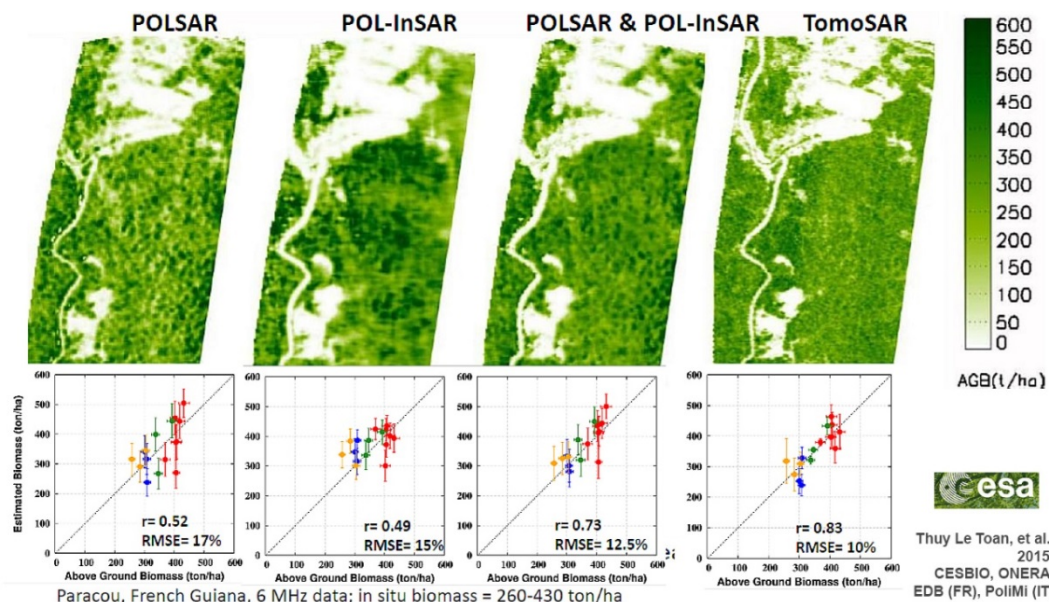
Точността в измерването пряко зависи от използвания микровълнов канал, като се получават вертикални разрези на растителността – томограми. В последствие се получава реален 3D-образ на горската растителност [S. Tebaldini, et al., 2015], показан на фиг. 6.



Фиг. 6. Ляво: Принцип на радарната томография – TomoSAR; дясно: Томограми, представящи вертикален разрез на горския обем, в поляриметричен канал – HV, в посока Range & Azimuth. Бялата линия е референтната височина, получена посредством – LIDAR.

Съществуват предизвикателства пред този подход, като изискване за редица от данни с малка интерферометрична декорелация, изискване за радиолокационни заснемания в по-големи дължини на вълните, примерно спектрален канал – P.

Обединяване на методики основани на радарни поляриметрия и интерферометрия е успешен подход в изследване на горските екосистеми [Thuy Le Toan et al, 2015]. Сравнение на методи базирани на POL-SAR, POLinSAR, е представено на фиг. 8.



Фиг. 8. Определяне общата биомаса (AGB) и постигната точност, посредством методики основани на – POL-SAR, POLinSAR и TomoSAR, в микровълнов канал - P; по време на сух сезон (без наличие на влага) в горски екосистеми от тропически тип с обща биомаса между – 260 и 430 t/ha. Най-добра точност е постигната, посредством радарна томография - TomoSAR.

Въпреки това, в определяне на общата биомаса, най-голяма точност се постига при използване на радарната томография. В предстоящата мисия подготвяна от ESA – BIOMASS, с цел картиране на общата биомаса, с работна честота в микровълнов канал – P, ще бъде възможно с ПРС от 50 m да бъде предоставяна регулярна информация за AGB в световен мащаб [T. Le Toan, et al., 2011].

Заклучение

Радарните поляриметрия и интерферометрия (POLinSAR) са успешно приложими в изследване на горски екосистеми и проследяване тяхното състояние. Комбинирането на няколко подхода при POLinSAR, като мулти-базов и мулти-честотен е необходимо при изследване на горски екосистеми от умерен, или тропически тип (лонгозни гори) при които видовия състав, гъстотата и възрастта на дървесните култури е различна. Дълговълновия

микровълнов диапазон, като канали – Р и L удовлетворява хипотезата за приложимост на линейния POLinSAR модел – RVoG при изследване на горски екосистеми. От друга страна, използване на сп. канал – Х (или С) поради по-високата им екстинция в короната на дървесните видове дават по-добри резултати при изследване на горски територии с много ниска гъстота и височина на дървостоя. Съответно, при определяне на общата биомаса, чувствителността на метода с директно обратно разсейване е добра основно в горски екосистеми със стойности на AGB под 150 t/ha. Определянето на запаса дървесина изисква голяма редица от данни в микровълнов канал - С, което е възможно да се постигне с данните от Sentinel-1. В определянето на GSV, използване на методика базирана на POLinSAR – кохерентността, дава възможност да се преодолее проблемът с „насищането“ наблюдаван в горски територии с голяма плътност.

В изследването на горските екосистеми най-голяма точност в определянето на общата биомаса е методика базирана на радарната томография – ТомоSAR. При поставената задача, съвместяването на POL-SAR и POLinSAR е успешен подход в определяне параметрите и състоянието на горските територии.

Литература:

1. Мардиросян, Г. “Основи на Основи на дистанционните аерокосмически технологии”, НБУ, София, 2015, 240 с. ISBN 978-954-535-882-1
2. Fernandez-Ordóñez, Y., J. Soria-Ruiz, B. Leblon. “Forest inventory using optical and radar remote sensing”, Intech, ISBN 978-953-761-982-4
3. Neumann, M., D. Sandrine, L. Ferro-Famil, S. Allain, A. Righber, E. Pottier. “Ground - Agriculture separation by means of polinsar”, European Space Agency, (Special Publication), SP-644, 2007, ISSN 03796566
4. Hellmann, M., S. R. Cloude. “Polarimetric Interferometry and Differential Interferometry”, RTO SET Lecture Series on “Radar Polarimetry and Interferometry”, NATO, RTO-EN-SET-081, 2005, p.21-22
5. Papathanassiou, K., S. R. Cloude. “Polarimetric SAR Interferometry”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.36/5, 1998, p.1551-1565
6. Reigber, A., A. Moreira, ““First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multi-Baseline L-Band Data”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.38/5, 2000, p.2142-2152
7. López-Martínez, C., F. Xavier, L. Pipia. “Forest parameter estimation in the Pol-InSAR context employing the multiplicative-additive speckle noise model”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.66/5, 2011, p.597-607
8. Cloude, S., K. Papathanassiou, “Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry”, IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, vol.150/3, 2003, p.125–134
9. Lavalley, M., M. Simard, S. Hensley. “A temporal decorrelation model for polarimetric radar interferometers”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.7, 2012, p.2880-2888
10. Denbina, M., M. Simard, “The effects of temporal decorrelation and topographic slope on forest height retrieval using airborne repeat-pass L-band polarimetric SAR interferometry”, Jet Propulsion Laboratory , California Institute of Technology , 2016, ISBN: 978-150-903-332-4, p.1745-1748
11. Li, Z., M. Guo, Z. Wang, Z.Z. Zhao, L. Fang. “Forest-height inversion using repeat-pass spaceborne polInSAR data”, Science China Earth Sciences, vol.57/6, p.1314-1324
12. Askne, J., M. Santoro., “Multitemporal repeat pass SAR interferometry of boreal forests”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.43, 2005, 1219–1228.
13. Thiel, C., C. Schmullius, “Investigating the impact of freezing on the ALOS PALSAR InSAR phase over Siberian forests”, Remote Sensing Letters, vol.4/9, 2013, p.900-909
14. Xie, Q., C. Wang, J. Zhu, H. Fu, C. Wang. “Improvement of forest height retrieval by integration of dualbaseline PolInSAR data and external DEM data”, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, vol. 40/7W4, p.185-189
15. Blomberg, E., M. Soja, L. Ulander, “P-band Polarimetric Model of Vertical Tree Stems on Sloping Ground”, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014
16. Krankina, O. N., M. Harmon., W. Cohen, D. Oetter, O. Zyrina, M. Duane, V. “Carbon stores, sinks, and sources in forest of northwestern Russia, can we reconcile forest inventories with remote sensing results”, FAO, Climatic Change, vol.67, 2004, p.257–272
17. Santoro, M., A. Beaudoin, C. Beer, O. Cactus, J. E.S. Fransson, R.J. Hall, C. Pathe, C. Schmullius, D. Schepaschenko, A. Shvidenko, M. Thurner, U. Wegmüller. “Forest growing stock volume of the northern hemisphere: Spatially explicit estimates for 2010 derived from Envisat ASAR”, Remote Sensing of Environment, vol.168, 2015, p.316-334
18. Mette, T. “Forest biomass estimation from polarimetric SAR interferometry”, PhD thesis, Technischen Universität München; 2007
19. Le Toan, T., S. Quegan, M.W.J. Davidson, H. Balzter, P. Paillou, K. Papathanassiou, S. Plummer, F. Rocca, S. Saatchi, H. Shugart , L. Ulander. “The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle”, Remote Sensing of Environment, vol.115/11, 2011, p. 2850-2860
20. Hajnsek, I., Kugler, F., Lee, S. -K., & Papathanassiou, K. P. (2009, February). Tropical forest parameter estimation by means of Pol-InSAR: The INDREX-II Campaign. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(2)

21. Sandberg, G., L. Ulander, J. Fransson, J. Holmgren, T. Le Toan. "L-band versus P-band SAR for biomass retrieval in semi-boreal forest", *Remote Sensing of Environment*, 2011
22. Dubois-Fernandez, P., I. Champion, D. Guyon, H. Cantalloube, F. Garestier, X. Dupuis. "Forest biomass estimation from P-band high incidence angle data", *ESA PolInSAR workshop*, 2015
23. Tebaldini, S., F. Rocca, "Multibaseline Polarimetric SAR Tomography of a Boreal Forest at P- and L- Bands", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol 50/1, 2012, p. 2352-2363
24. Caicoya, A.T., F. Kugler, M. Pardini, I. Hajnsek, K. Papathanassiou. "Forest Biomass Estimation from SAR Vertical Reflectivity Profiles", *DLR, ESA PolInSAR workshop*, 2015
25. Cloude, S. R., "Polarization coherence tomography", *Radio Science*, vol.41/4,2006
26. Minh, D. T. H, S. Tebaldini, F. Rocca, T. Le Toan, L. Villard, P. Dubois-Fernandez, "Capabilities of BIOMASS Tomography for Investigating Tropical Forests," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* , vol.53/2, 2015, p.965-975