



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال هشتم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۵
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.8, No. 3, Autumn 2016

۲۵-۲۸

بهبود تخمین ارتفاع جنگل با روش بهینه‌سازی کوهرنس هوش جمعی ذرات به کمک

داده‌های تداخل سنجی پلاریمتریک

سیده سمیرا حسینی^۱، حمید عبادی^۲، یاسر مقصودی^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۷/۱۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱/۲۸



چکیده

از آنجاکه درختان نقش اساسی در تغییرات دی‌اکسید کربن و شرایط آب‌وهوایی دارند، تخمین زیست‌توده موجود در درختان بسیار اهمیت دارد. روش‌های راداری که پارامترهای ساختاری را در تخمین زیست‌توده در نظر نمی‌گیرند منجر به نتایجی با سطح اشباع پایین می‌شوند. ارتفاع از پارامترهای ساختاری است و یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در بهبود تخمین ارتفاع استفاده از کوهرنس بهینه است. در این مقاله، از داده‌های شبیه‌سازی شده در باندهای P و L برای تخمین ارتفاع به روش‌های تفاضلی، اندازه همدوسی، ترکیبی و Polarization Coherence Tomography (PCT) استفاده شده است. روش تفاضلی باعث تخمین ارتفاع کمتر از مقدار واقعی به اندازه ۱۴ متر در باند P و ۱۱ متر در باند L شده است؛ در حالی که روش اندازه همدوسی، به نسبت روش تفاضلی، نتایج بهتری به دست می‌آورد و اختلاف مقادیر میانگین ارتفاعات در این روش با مقادیر واقعی در باند P، ۸ متر و در باند L، ۲ متر است. روش‌های ترکیبی و PCT نتایجی نزدیک به هم دارند و اختلاف میانگین مقادیر ارتفاعات به دست آمده با مقدار واقعی کمتر از ۲ متر است اما نتایج حاصل از روش PCT به دلیل استفاده از کوهرنس بهینه، از روش ترکیبی بهتر است. روش بهینه‌سازی کوهرنس به روش PSO که در این مقاله پیشنهاد شده است نتایجی بهتر از روش‌های دیگر حاصل کرده است و اختلاف میانگین مقادیر ارتفاعات به دست آمده با مقدار واقعی به کمتر از ۰/۵ متر می‌رسد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی کوهرنس، PSO، تداخل‌سنجی پلاریمتری، PCT، تخمین ارتفاع.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، روبه‌روی ساختمان اسکان، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تلفن: ۴-۸۸۷۷۹۴۷۳

۱- مقدمه

جنگل‌ها بزرگ‌ترین مخزن کربن گیاهی روی زمین به حساب می‌آیند و ۷۵٪ از ۴۰٪ پوشش زمینی را دربر می‌گیرند، بنابراین تغییرات در پوشش جنگلی در مقدار دی‌اکسید کربن اتمسفر اثر مستقیم می‌گذارد و عاملی مؤثر در تغییر آب‌وهوا به‌شمار می‌آید. روش‌های زمینی در تخمین زیست‌توده روش‌هایی طاقت‌فرسا، زمانبر و پرهزینه‌اند و در مناطق دورازدسترس نمی‌توان اطلاعاتی با این روش به‌دست آورد؛ ضمن اینکه برای بررسی تغییرات زیست‌توده به پایش مستمر مناطق جنگلی نیاز است که با این روش عملی نیست. روش‌های سنجش از دور امکان پایش مستمر و دسترسی به مناطق غیرقابل عبور را فراهم می‌کنند و از لحاظ هزینه و زمان مقرون به‌صرفه‌اند (Lu, 2005; Nelson et al., 1998; Foody, 2003). اما تصاویر اپتیکی که با استخراج شاخص‌های گیاهی و واکنش‌های طیفی، زیست‌توده را به‌دست می‌آورند سطح اشباع پایینی دارند و نتایج خوبی از آنها حاصل نمی‌شود. با وجود سنجنده‌های راداری، سطح اشباع افزایش پیدا کرد اما روش‌های اولیه بر مبنای رابطه بین مقدار پراکنشگرها در پلاریزاسیون‌های متفاوت با زیست‌توده به‌دست می‌آید و چون پارامترهای ساختاری را در نظر نمی‌گیرند، نتایج مناسبی حاصل نمی‌شود (Balzter, 2001). در سال‌های اخیر، تکنیک‌هایی که از آنالیزهای تداخل‌سنجی بر پایه مدل‌های گوناگون استفاده می‌کند کاربرد بسیاری داشته است (Chehade et al., 2015; Ballester-Berman et al., 2015; Cloude & Papathanassiou, 2003; Mette et al., 2006; Schlund et al., 2015; Xie et al., 2014; Soja & Ulander, 2014) و پارامتر اساسی مؤثر در تخمین زیست‌توده در این تکنیک‌ها ارتفاع است. یکی از عوامل مهم مؤثر در بهبود تخمین ارتفاع استفاده از کوهرنس بهینه است. به‌کمک تکنیک‌های اینترفرومتری پلاریمتریک و استفاده از بهینه‌سازی کوهرنس می‌توان مراکز پراکنشگرهای مؤثر را از هم جدا کرد؛ در نتیجه، تخمین دقیق‌تری از ارتفاع به‌دست آورد. با تغییر دادن حالت‌های گوناگون پلاریزاسیون می‌توان مکانیسم‌های پراکنش بهینه با بالاترین مقدار کوهرنس را استخراج

کرد. با بهینه‌سازی کوهرنس، از نااطمینانی در تخمین فاز اینترفرومتری کاسته می‌شود. همچنین نسبت سیگنال به نویز بهبود می‌یابد و عواملی که باعث نبود وابستگی می‌شوند نیز کاهش می‌یابند. در این مقاله به‌منظور بررسی اثر بهینه‌سازی کوهرنس در تخمین ارتفاع، روش‌های گوناگون تخمین ارتفاع بر مبنای تکنیک تداخل‌سنجی با کمک داده‌های شبیه‌سازی شده بررسی می‌شود. این روش‌ها عبارت‌اند از: ۱. تفاضلی مدل ارتفاعی رقومی زمین؛ ۲. اندازه هم‌دوسی؛ ۳. روش ترکیبی؛ ۴. روش PCT. روش شعاع عددی که روشی تک‌مکانیسم است در روش تخمین ارتفاع به‌کمک PCT برای بهینه‌سازی کوهرنس به‌کار می‌رود. دلیل استفاده از روش تک‌مکانیسم برای بهینه‌سازی کوهرنس این است که داده‌های به‌کاررفته داده‌های شبیه‌سازی شده است، آثار نبود وابستگی زمانی در آنها اتفاق نیفتاده است، می‌توان مکانیسم‌های پراکنش در دو سر خط باز را یکسان در نظر گرفت و چون روش شعاع عددی، از بین روش‌های تک‌مکانیسم، بالاترین مقدار کوهرنسی را به‌دست می‌آورد روش مینا در این تحقیق انتخاب می‌شود. با آنکه روش شعاعی یکی از بهترین روش‌های مطرح‌شده در بین روش‌های تک‌مکانیسم تا کنون است، با مشکلاتی در استخراج کوهرنس‌های بهینه مواجه است که می‌توان به استخراج نشدن مقادیر بهینه کوهرنس به روش تحلیلی اشاره کرد. در این روش، برای به‌دست آوردن کوهرنس‌های بهینه باید از یک روش تکراری استفاده شود و نمی‌توان پاسخ‌ها را با روش تحلیلی به‌دست آورد. این مسئله باعث بهینه‌سازی محلی می‌شود. همچنین بردارهای تصویر در فرایند بهینه‌سازی شرط عمودبودن را ندارند. در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های هوش جمعی در زمینه فرایندهای بهینه‌سازی مطرح شده و منجر به نتایج خوبی در کاربردهای گوناگون شده است (Tenne & Goh, 2010). PSO^۱، در مطالعات قبلی روشی مناسب برای بهینه‌سازی در

1. Particle Swarm Optimization

همه حالت‌های پلاریزاسیون بیضوی با به‌کاربردن تغییر پایه پلاریزاسیون برای انتقال بردار پراکنش k_1 به بردار پراکنش دیگر k' ممکن است ایجاد شود. این روش به این دلیل روش زیربهمینه نامیده می‌شود که در به‌دست‌آوردن ماکزیمم کوهرنس، همه اطلاعات پلاریزاسیون استفاده نمی‌شود و فقط المان‌های پلاریزاسیون‌های همسان^۳ و پلاریزاسیون‌های ناهمسان^۴ در نظر گرفته می‌شود و انتقال پایه پلاریزاسیون در هر دو تصویر یکسان در نظر گرفته می‌شود. یکی از محدودیت‌های این روش این است که اگر عدم وابستگی زمانی یا تفاوت بین زوایای دید ناشی از خط باز مکانی بالا باشد، رفتار پراکنش مشاهده‌شده بین دو اخذ تغییر می‌کند و بنابراین ماکزیمم کوهرنس در این حالت موقعی ایجاد می‌شود که زیرفضاهای پلاریزاسیون گوناگون در هر دو تصویر وجود داشته باشد. در این حالت، نیاز است انتقال پایه پلاریزاسیون‌های متفاوت در هر دو تصویر به‌کار برده شود؛ نه پلاریزاسیون‌های مشابه. این باعث می‌شود فرایند بهمینه‌سازی روند محاسباتی سنگینی داشته باشد (Pipia et al., 2009). روش دیگری که بر مبنای تک مکانیسم پیشنهاد شد روش تطبیق حالت پلاریزاسیون PSC^۵ است (Qong, 2005). در این روش، دو امضای پلاریزاسیون برای پیکسل‌ها در هر دو تصویر محاسبه می‌شود. پس از هم‌مرجع‌سازی دو تصویر با هم، امضاهای پلاریزاسیون پیکسل‌های متناظر از لحاظ شکل کلی باید به هم شبیه باشند تا بتوان به وابستگی بالایی رسید. اما در برخی حالت‌ها، وابستگی بالا بین امضاهای پلاریزاسیون به دلیل عدم وابستگی زمانی یا مکانی به‌دست نمی‌آید. روش دیگر روش بهمینه‌سازی عددی است (Colin et al., 2006). این روش نیز بر اساس تک‌مکانیسم عمل می‌کند. نقطه ضعف اصلی روش

کاربردهای گوناگون معرفی شده است (Clerc, 2010). با توجه به مشکلات مطرح‌شده در روش شعاعی و دو مزیت اصلی روش بهمینه‌سازی بر مبنای هوش جمعی ذرات، یعنی عمودبودن بردارهای تصویر و نیز استخراج جواب‌های بهمینه به‌صورت کلی، به‌منظور بهبود مقدار کوهرنس برای تخمین بهتر پارامتر ارتفاع روش بهمینه‌سازی کوهرنس بر مبنای هوش جمعی ذرات به‌منزله نوآوری این تحقیق پیشنهاد می‌شود. در ادامه، ابتدا پیشینه تحقیق در زمینه بهمینه‌سازی کوهرنس و تخمین زیست‌توده بیان شده است. در بخش سوم، روش‌های تخمین ارتفاع بیان شده و به الگوریتم پیشنهادی و داده‌های مورد استفاده در بخش‌های بعدی اشاره شده است. در انتها نتایج اجرایی الگوریتم پیشنهادی و نتیجه‌گیری مطرح شده است.

۲- پیشینه تحقیق

در دو بخش پیشینه تحقیق در زمینه بهمینه‌سازی کوهرنس و پیشینه تحقیق در زمینه تخمین زیست‌توده به آن اشاره شده است.

۲-۱- پیشینه تحقیق در زمینه بهمینه‌سازی کوهرنس

تکنیک بهمینه‌سازی کوهرنس را نخستین بار کلاود و پاپاتاناسیو^۱ (۱۹۹۸) مطرح کردند. در این روش، دو مکانیسم متفاوت برای دو انتهای خط باز در نظر گرفته می‌شود. این روش زمانی که آثار عدم وابستگی زمانی وجود دارد و مکانیسم‌های پراکنش در دو انتهای خط باز تغییر می‌کنند بسیار مؤثر است. در حالت تک‌مکانیسم، به‌جای w_1 و w_2 ، یک بردار پراکنش w داریم؛ یعنی w_1 و w_2 با هم برابر و مشابه‌اند. از جمله روش‌های تک‌مکانیسم می‌توان به روش شبه‌فضای پلاریزاسیون PSM^۲ اشاره کرد (Sagues et al., 2000). در این روش، انتقال پایه پلاریزاسیون برای تصاویر صورت می‌گیرد. اینترفروگرام ممکن است نه فقط از طریق حالت پلاریزاسیون خطی بلکه به‌صورت ترکیبات دیگر بین حالت‌های پلاریزاسیون بیضوی ایجاد شود.

1. Particle Swarm Optimization
2. Cloude & Papathanassiou
3. Polarization Subspace Method
4. co-polar
5. cross-polar
6. polarization state conformation

دارند (Dobson et al., 1992; Ranson & Sun, 1994; Santoro et al., 2002; Santoro et al., 2003; Thiel et al., 2006; Balzter et al., 2007). این سنجنده‌ها در فرکانس‌های متفاوت و با قدرت‌های تفکیک گوناگون طراحی شده‌اند و تحقیقات نشان می‌دهد که در فرکانس‌های زیر باند L، حساسیت خوبی به تخمین زیست توده از خود نشان می‌دهند. روش‌هایی که در ابتدا، از طریق سنجنده‌های راداری برای تخمین زیست توده به کار می‌رفت، براساس مقادیر بازپراکنش‌ها در پلاریزاسیون‌های گوناگون با آنالیزهای رگرسیون صورت می‌گرفت. تحقیقات نشان داد که طول موج‌های بلندتر و پلاریزاسیون HV بیشترین حساسیت را به تخمین زیست توده دارند. یکی از مشکلات اصلی این روش‌ها سطح اشباع پایین آنها بود که برای برطرف کردن آن به ترکیب اطلاعات باندهای گوناگون و پلاریزاسیون‌های متفاوت روی آوردند. با این روش‌ها مشکل را اندکی بهبود دادند اما هنوز این روش‌ها مشکل اصلی به حساب می‌آمدند (Ustin, 2004). این روش‌ها روش‌های ساده‌ای بودند که آثار پارامترهای ساختاری گونه‌های متفاوت را در نظر نمی‌گرفتند. به‌منظور به‌کاربردن پارامترهای ساختاری برای تخمین زیست توده، تحقیقات به سمت استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی گرایش پیدا کرد. استفاده از این تکنیک‌ها با افزایش سطح اشباع، منجر به نتایج بهتری در تخمین زیست توده شد. با به‌کارگیری این تکنیک‌ها، ارتفاع درختان را که یکی از پارامترهای مهم در تخمین زیست توده است، می‌توان به‌دست آورد و سپس به‌کمک معادلات آلومتری، مقدار زیست توده را تخمین زد (Nelson et al., 1999; Overman et al., 1994; Honzák et al., 1996).

۳- روش‌های تخمین ارتفاع

کمیت مهمی که در تکنیک‌های تداخل‌سنجی پلاریمتری اندازه‌گیری می‌شود همدوسی تداخل‌سنجی است. این پارامتر یک ضریب همبستگی مختلط است

شعاع عددی زمان محاسباتی بالای آن است چون روندی تکراری لازم است و در مناطق بزرگ، بسیار زمان‌بر می‌شود (Fomena & Cloude, 2005). از نظر ریاضی، روش دومکانیسم بیشترین مقدار کوهرنس را به‌دست می‌دهد؛ پس از آن روش شعاع عددی و بعد روش ضریب لاگرانژ، با قید مکانیسم پراکنش‌های مساوی، به‌ترتیب بیشترین مقدار کوهرنسی را عرضه می‌کنند.

۲-۲- پیشینه تحقیق در زمینه تخمین زیست توده

روش‌های گوناگون در تخمین زیست توده را به سه دسته اصلی می‌توان تقسیم کرد: ۱. تخمین زیست توده به‌کمک روش‌های زمینی؛ ۲. تخمین زیست توده با روش‌های سیستم اطلاعات مکانی؛ ۳. تخمین زیست توده به‌کمک روش‌های سنجش از دور. روش‌های زمینی خود به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند: ۱. روش‌هایی برمبنای نمونه‌برداری تخریبی؛ ۲. روش‌هایی برمبنای معادلات آلومتریک؛ ۳. روش‌هایی برمبنای تبدیل حجم به زیست توده. این روش‌ها زمان‌بر، طاقت‌فرسا، پرهزینه، اخذنشدنی در مناطق دورازدسترس و صعب‌العبور و نیز نادقیق‌اند.

باکمک داده‌های سنجش از دور می‌توان مناطق وسیعی را به‌طور پیوسته پایش کرد و بر بسیاری از مشکلات روش‌های سنتی فائق آمد (Santos et al. 2003; Steinger, 2000; Zheng et al., 2004; Sader et al., 1989). روش‌هایی که سنجنده‌های اپتیکی به‌کار می‌برند براساس ارتباط بین شاخص‌های گیاهی و واکنش‌های طیفی با زیست توده بودند و یکی از مشکلات اصلی آنها همبستگی اندک بین شاخص‌های گیاهی یا واکنش‌های طیفی با زیست توده بود؛ به‌طوری‌که در جنگل‌های متراکم، در سطح پایین‌تر از مقدار واقعی آن به سطح اشباع می‌رسیدند و نیز در مناطق با پوشش ابر پاسخگو نبودند (Schlerf, 2006). سنجنده‌های راداری با گشودگی مصنوعی، به دلیل امکان نفوذ بالا و وابسته‌نبودن به شرایط آب‌وهوایی و شب و روز، قابلیت بسیاری برای تخمین زیست توده

۳-۱- روش تفاضلی مدل ارتفاعی رقومی

در روشی که کلاود و پاپاتاناسیو مطرح کردند، ارتفاع از طریق تفاضل فاز بین تداخل‌نماها محاسبه می‌شود که با رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$h_v = \frac{\arg(\gamma_{wv}) - \hat{\phi}}{k_z}, k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin \theta} \quad (2)$$

در این رابطه، k_z عدد موج عمودی، $\Delta\theta$ زاویه‌ای است که دو انتهای خط باز با هم می‌سازند. θ زاویه فرود و λ طول موج است. ϕ فاز زمینی و γ_{wv} همبستگی حجمی است. همبستگی حجمی به کمک رابطه (۱) و با در نظر گرفتن HV به منزله پلاریزاسیون انتخابی محاسبه می‌شود. به این روش همچنین روش تفاضل‌گیری مدل ارتفاعی رقومی^۲ می‌گویند (Yamada et al., 2001).

۳-۲- روش اندازه همدوسی

در این روش، فرض بر این است که یکی از پلاریزاسیون‌ها فقط سهم پراکنش حجمی را شامل می‌شود و هیچ سهمی از زمین را در خود ندارد. معمولاً پلاریزاسیون HV را برای این حالت در نظر می‌گیرند. همچنین در این روش فرض بر این است که میرایی موج^۳ معلوم و صفر است (Cloude, 2006). از این طریق به تابع SINC می‌رسند و با رابطه (۳)، ارتفاع تخمین زده می‌شود.

$$h_v = \frac{2 \sin^{-1}(|\tilde{\gamma}_{wv}|)}{k_z}, k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin \theta} \quad (3)$$

این روش به دلیل پارامتر میرایی، به تراکم درختان در منطقه مورد بررسی بستگی دارد.

۳-۳- روش ترکیبی

کلاود (۲۰۰۶) الگوریتم جدیدی را پیشنهاد داد که با عنوان روش ترکیبی^۴ شناخته می‌شود و از دو قسمت تشکیل شده است؛ قسمت اول فقط اختلاف فاز بین

که بین دو تصویر دریافت‌شده از یک منطقه با هندسه‌های تقریباً مشابه، در زمان‌های متفاوت به دست می‌آید. مقدار همدوسی ممکن است به سه المان اصلی تقسیم شود. یکی عدم همبستگی ناشی از نویز است که در مشاهدات جنگل اهمیت اندکی دارد. دو المان دیگر عدم همبستگی زمانی و ناهمبستگی حجمی^۱ است. ناهمبستگی حجمی به توزیع عمودی پراکنشگرها یا، به عبارتی، تابع ساختار عمودی بازمی‌گردد؛ بنابراین، کمیتی مهم برای تخمین کمی پارامترهای جنگل محسوب می‌شود (Cloude & Papathanassiou, 1998; Cloude & Papathanassiou, 2001; Treuhaft & Siqueira, 2000; Askne et al., 1997) و بازیابی ارتفاع با تکنیک تداخل‌سنجی پلاریمتری براساس این پارامتر صورت می‌گیرد. همدوسی تداخل‌سنجی از رابطه (۱) به دست می‌آید:

رابطه (۱)

$$\gamma = \frac{s_1 s_2^*}{\sqrt{(s_1 s_1^*)(s_2 s_2^*)}} = e^{i\phi_0} \frac{\int_0^{h_v} f(z) e^{ik_z z} dz}{\int_0^{h_v} f(z) dz}$$

$$0 \leq |\tilde{\gamma}| \leq 1$$

$$k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin \theta} \begin{cases} \phi_0 = k_z z_0 \\ k_v = \frac{k_z h_v}{2} \end{cases}$$

در این رابطه، k_z عدد موج عمودی است که به زاویه‌ای که دو انتهای خط باز $\Delta\theta$ با هم می‌سازند وابسته است. $f(z)$ تابع ساختار عمودی، h_v موقعیت ارتفاعی نوک لایه پراکنشگر و Z_0 موقعیت ارتفاعی کف لایه پراکنشگر است. ϕ_0 فاز توپوگرافی یا فاز زمینی است و θ زاویه فرود و λ طول موج است. برای تخمین ارتفاع به کمک بهینه‌سازی کوه‌رنس با روش هوش جمعی ذرات، برای بهبود تخمین ارتفاع به شیوه PCT از پنج روش استفاده می‌شود: ۱. تفاضلی مدل ارتفاعی رقومی؛ ۲. اندازه همدوسی؛ ۳. روش ترکیبی؛ ۴. PCT؛ ۵. PCT بهبودیافته. در ادامه، این روش‌ها را بیان می‌کنیم.

1. volume decorrelation
2. DEM differencing
3. wave extinction
4. combined approach

رابطه (۶)

$$\max_{\phi} |\lambda_{\max}(\Phi) - \lambda_{\min}(\Phi)|$$

$$\rightarrow \begin{cases} \lambda_{\max} \rightarrow \omega_{\max} \rightarrow \gamma_{\max} \\ \lambda_{\min} \rightarrow \omega_{\min} \rightarrow \gamma_{\min} \end{cases}$$

در این رابطه، T میانگین ماتریس همبستگی تصویر پایه و پیرو و Ω_{12} ماتریس همبستگی بین تصاویر پایه و پیرو است. λ مقدار ویژه، ω بردار ویژه و γ کوه‌رنس است. به‌ازای تغییر دادن زاویه فاز بین 0 تا π ، مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماکزیمم و مینیمم استخراج می‌شوند و در نتیجه، کوه‌رنس‌های بهینه به‌کمک مقادیر ویژه و بردارهای ویژه به‌دست می‌آیند.

پس از محاسبه کوه‌رنس‌های بهینه، محل صحیح فاز زمینی روی دایره مختلط به‌دست می‌آید و در نهایت با روش ترکیبی، ارتفاع درختان تخمین زده می‌شود.

۴- الگوریتم پیشنهادی

در سال‌های اخیر، استفاده از هوش جمعی برای حل مسائل بهینه‌سازی مطرح شده است. با توجه به مطالب گفته‌شده در این مقاله برای بهبود مقدار کوه‌رنس که منجر به تخمین بهتر پارامتر ارتفاع می‌شود، روش بهینه‌سازی کوه‌رنس بر مبنای هوش جمعی ذرات پیشنهاد شده است. دو مزیت اصلی این روش عمود بودن بردارهای تصویر و استخراج پاسخ‌های بهینه به‌صورت کلی است. در ادامه، مباحث تئوری روش هوش جمعی ذرات آورده شده است.

۴-۱- روش بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات^۱ الهام‌گرفته از رفتار اجتماعی پرندگان و ماهیان است که قادرند هم‌زمان در یک گروه به سمت هدف حرکت کنند و در مواقعی، به‌صورت ناگهانی و هم‌زمان، تغییر مسیر دهند. در الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات هر ذره^۲ یک راه‌حل

1. fully polarimetric
2. particle swarm optimization
3. particle

کانال حجمی و فاز زمینی و همان روش تفاضلی مدل رقومی است. قسمت دوم این رابطه از معکوس‌پذیری اندازه همدوسی، در حالتی که تابع ساختار یکنواخت است، به‌دست می‌آید. این فرمول در رابطه (۴) نشان داده شده است.

رابطه (۴)

$$h_v = \frac{\arg(\gamma_{w_v}) - \hat{\phi}}{k_z} + \varepsilon \frac{2 \sin c^{-1}(|\tilde{\gamma}_{w_v}|)}{k_z}$$

$$\hat{\phi} = \arg(\tilde{\gamma}_{w_v} - \tilde{\gamma}_{w_s}(1 - L_{w_s}))$$

$$AL_{w_s}^2 + BL_{w_s} + C = 0 \Rightarrow L_{w_s} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$A = |\gamma_{w_s}|^2 - 1, B = 2 \operatorname{Re}((\tilde{\gamma}_{w_v} - \tilde{\gamma}_{w_s})\tilde{\gamma}_{w_s}^*)$$

$$C = |\tilde{\gamma}_{w_v} - \tilde{\gamma}_{w_s}|^2$$

در این رابطه، γ_{ω_s} همبستگی جمعی و γ_{ω_v} همبستگی سطحی است. همبستگی سطحی به‌کمک رابطه (۱) و با در نظر گرفتن HH-VV به‌منزله پلاریزاسیون انتخابی محاسبه می‌شود.

۳-۴- تخمین ارتفاع به روش PCT

در تخمین ارتفاع به روش PCT، نخستین مرحله انتخاب کوه‌رنس بهینه است. جفت بردارهای پلاریزاسیون بهینه و ω_1 و ω_2 باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که در صفحه مختلط، بیشترین فاصله را از هم داشته باشند. برای این منظور، از بهینه‌سازی فاز استفاده می‌کنند. در این روش، از داده‌های تمام پلاریمتریک^۱ استفاده می‌کنند و به‌کمک مسئله مقدار ویژه، بردار ویژه با تغییر پارامتر فاز کوه‌رنس‌های بهینه را استخراج می‌کنند که در روابط (۵) و (۶) نشان داده شده است.

رابطه (۵)

$$[T]^{-1} [\Omega_H(\phi)] \omega$$

$$= \lambda(\phi) \omega, \begin{cases} [\Omega_H] = \frac{1}{2} \\ (\Omega_{12} e^{i\phi} + \Omega_{12}^* e^{-i\phi}) \\ [T] = \frac{1}{2} (T_{11} + T_{22}) \end{cases}$$

پارامتر ممکن است در طول الگوریتم ثابت باشد و یا به صورت خطی کاهش پیدا کند. جمله دوم رابطه (۷) اطلاعات بهترین تجربه شخصی ذره است. در نخستین تکرار الگوریتم موقعیت اولیه ذرات، بهترین موقعیت آنها در نظر گرفته می شود و در تکرارهای بعد، با رابطه (۹) محاسبه می شود. رابطه (۹)

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y_i(t) & f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t+1) & f(x_i(t+1)) < f(y_i(t)) \end{cases}$$

در این رابطه $f(.)$ تابع هدف است. به عبارت دیگر، ترم اطلاعات شخصی تمایل ذره به رفتن به سمت بهترین موقعیتی را نشان می دهد که تا کنون تجربه کرده است. در نهایت، جمله پایانی رابطه (۷) اطلاعات اجتماعی مرتبط با اعضای گروه است که در آن عملکرد ذره در رابطه با کل گروه یا همسایگان در نظر گرفته می شود و این جمله تأثیر تمایل ذره به رفتن به سمت بهترین موقعیت به دست آمده توسط اعضای گروه را در انتقال به موقعیت بعدی نشان می دهد.

۵- داده های مورد استفاده

در این تحقیق، از داده های شبیه سازی شده تمامی پلاریمتری جنگلی از نوع کاج با ارتفاع ۲۰ متری، در باندهای L و P استفاده شد. فرکانس باندها L به میزان ۱/۳ گیگاهرتز و فرکانس باندها P به میزان ۰/۴۳۳ است. جدول ۱ مشخصات کامل این داده ها را نشان می دهد. محتوای رطوبت زمین با کمیته اسکالر، بین ۰ تا ۱۰ نشان داده شده است که ۰ خشک ترین سطح و ۱۰ مرطوب ترین سطح است. همچنین مقدار ویژگی سطح، با عددی اسکالر بین ۰ و ۱۰ نشان داده شده که ۰ بیانگر سطحی صاف و ۱۰ بیانگر سطحی زبر است. خروجی شبیه ساز تصاویر SLC ریجستر شده یک فایل عدد موج عمودی K_z و یک فایل فاز زمین مسطح^۲ است. تصویر داده شبیه سازی شده در شکل ۱ آمده است.

1. Kennedy & Eberhat
2. flat earth

برگزیده است که با استفاده از اطلاعات شخصی و همچنین اطلاعات اعضای دیگر گروه، در فضای جستجو حرکت می کند. تعامل موجود بین ذرات و حرکت گروهی این دسته از موجودات منجر به یافتن نواحی مطلوب می شود. گام نخست در به کارگیری این الگوریتم در حل مسائل بهینه سازی، مدلسازی این رفتار است. مدل پایه PSO را کندی و ابرهات^۱ (۱۹۹۵) مطرح کردند (Eberhat & Kennedy, 1995). الگوریتم بهینه سازی توده ذرات، به منظور کشف جواب بهینه در فضای جستجو، با گروهی از ذرات تصادفی آغاز می شود که هر ذره در آن نمایش دهنده یک راه حل منتخب است. در صورتی که مسئله D متغیر داشته باشد، هر ذره با بردار موقعیت $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ و بردار سرعت $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$ مشخص می شود. در هر مرحله از حرکت، موقعیت و سرعت با توجه به این دو مقدار به هنگام می شود؛ بهترین موقعیتی که ذره تا کنون تجربه کرده است، y_i ، و بهترین موقعیت بین همسایگان ذره، best. این مطلب در روابط (۷) و (۸) نشان داده شده است.

رابطه (۷)

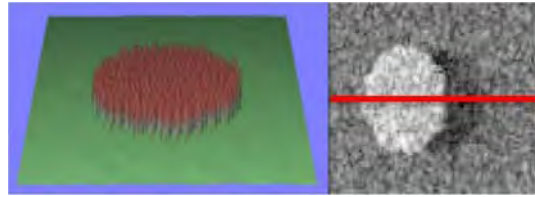
$$V_i(t+1) = w.V_i(t) + c_1 r_1.(y_i(t) - X_i(t)) + c_2 r_2.(best(t) - X_i(t))$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad \text{رابطه (۸)}$$

در رابطه (۷)، w وزن اینرشیا، c_1 و c_2 ضرایب شتاب و r_1 و r_2 اعداد تصادفی بین صفر و یک اند. وزن اینرشیا و ضرایب شتاب پارامترهای کنترلی الگوریتم محسوب می شوند که کاربر باید آنها را تنظیم کند. مقادیر آنها در عملکرد الگوریتم تأثیر بسیار دارد. در واقع، این ضرایب اهمیت هریک از جملات معادله سرعت را مشخص می کنند.

جمله اول رابطه (۷) با مؤلفه اینرسی شناخته می شود و اطلاعات مربوط به حافظه ذره در رابطه با جهت حرکت قبلی را بیان می کند. استفاده از این جمله باعث جلوگیری از تغییرات ناگهانی در سرعت ذره می شود. ضریب w در این جمله، وزن سرعت فعلی را در محاسبه سرعت مرحله بعد نشان می دهد. این

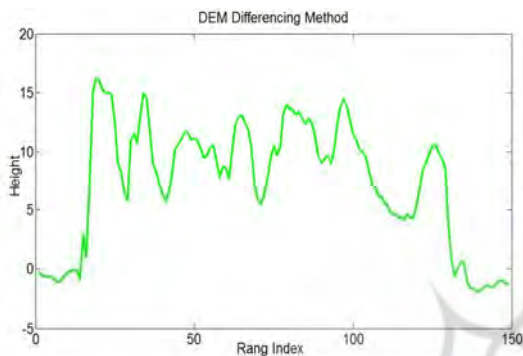
صورت گرفته در شکل ۱ نشان داده شده است. منطقه مورد بررسی برای هر دو باند P و L یکسان است اما چون مقدار عددی قدرت تفکیک باند P بزرگ‌تر از باند L است، تعداد پیکسل‌های قرار گرفته در راستای خط دید (رنج) در باند P (۱۰۰ پیکسل) کمتر از باند L (۱۵۰ پیکسل) است.



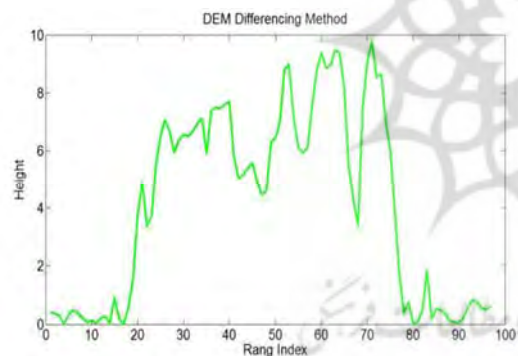
شکل ۱. تصویر شبیه‌سازی شده از یک منطقه جنگلی که میانگین ارتفاع درختان در آن ۲۰ متر است

جدول ۱. ویژگی داده‌های مورد استفاده

۳۰۰۰	ارتفاع سکو (برحسب متر)
۱۰	بیس لاین افقی (برحسب متر)
۱	بیس لاین عمودی (برحسب متر)
۴۵	زاویه فرود (برحسب درجه)
۱/۳۰ و ۰/۴۳۳	فرکانس (برحسب گیگاهرتز)
۱/۵ و ۲/۰۵	رزولوشن در راستای آزیموت (برحسب متر)
۱/۰۶ و ۱/۱۵	رزولوشن در راستای خط دید (رنج ^{۱۵}) (برحسب متر)
۰	ویژگی سطح
۴	محتوای رطوبت زمین
۲	شیب زمین در راستای آزیموت
۱	شیب زمین در راستای خط دید (رنج)
کاج	گونه درختان
۳۰۰	چگالی جنگل (برحسب تعداد درختان در هر هکتار)
۲۰	میانگین ارتفاع درختان (برحسب متر)



شکل ۲. تخمین ارتفاع در باند L با روش تفاضلی مدل رقمی

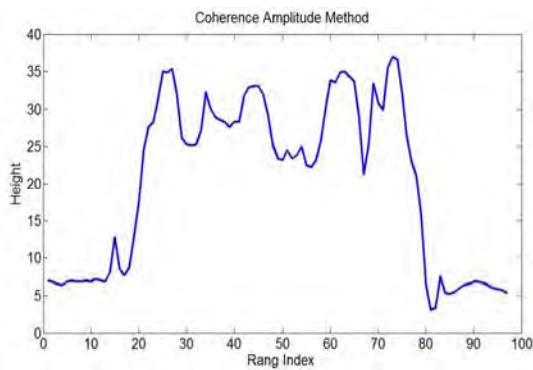


شکل ۳. تخمین ارتفاع در باند P با روش تفاضلی مدل رقمی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین مقادیر ارتفاعی حاصل از باند P کمتر از باند L به دست آمده است زیرا در باند P، به دلیل طول موج بلند آن که میزان نفوذش از طول موج L بیشتر است، محل مرکز فاز حجمی آن پایین‌تر از محل مرکز فاز حجمی در باند L قرار گرفته است. بنابراین، طبق رابطه (۲) ارتفاع درختان به روش تفاضلی، با استفاده از باند P کمتر از باند L تخمین زده شده است.

۶- نتایج اجرایی الگوریتم پیشنهادی

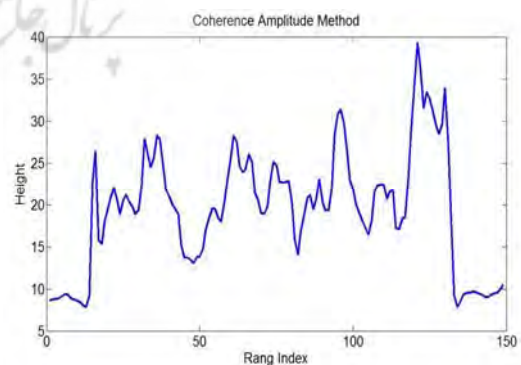
در این مقاله، به منظور تخمین ارتفاع درختان از روش‌های گوناگونی استفاده شده است. پیش‌تر اشاره کردیم که در نخستین روش، بر مبنای تفاضل مرکز فاز حاصل از پراکنش زمینی و حجمی، ارتفاع درختان استخراج شد. محل مرکز فاز حجمی به ندرت در نوک درختان واقع می‌شود؛ به‌ویژه هنگامی که طول موج‌های بلند برای استخراج ارتفاع درختان به کار می‌رود. بنابراین با استفاده از طول موج X، به دلیل میرایی بالای آن محل مرکز فاز در نوک درختان قرار می‌گیرد، نتایج تخمین ارتفاع کمتر از مقدار واقعی‌شان به دست آمد. نتایج برای باندهای L و P در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. پروفیلی که در امتداد آن این برآورد



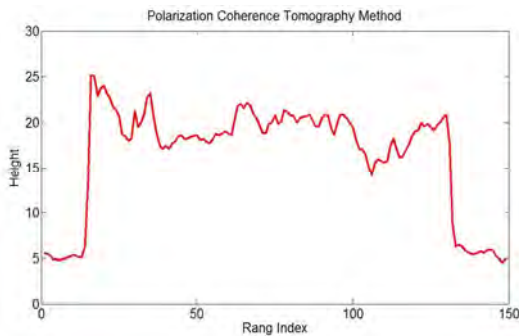
شکل ۵. تخمین ارتفاع در باند P با روش اندازه همدوسی

نتایج حاصل از میانگین ارتفاعی درختان در روش ترکیبی به دلیل آنکه از هر دو اطلاعات فاز و دامنه استفاده می‌کند، به نسبت دو روش تفاضلی و اندازه همدوسی، به میانگین ارتفاعی درختان نزدیک تر است. تخمین ارتفاع در روش ترکیبی با استفاده از طول موج P کمتر از L شد که دلیل آن سهم اندازه همدوسی کمتر در نظر گرفته شده در باند P توسط پارامتر ϵ ، به نسبت سهم فازی آن است. در تخمین ارتفاع با استفاده از طول موج P، سهم تفاضلی آن از طول موج L کمتر و سهم اندازه همدوسی آن بیشتر است. مقدار ϵ در این رابطه $0/4$ در نظر گرفته شده زیرا در حالتی که میرایی صفر است، مقدار $0/5$ بهترین مقدار برای ϵ است و چون محل مرکز فاز ارتفاع حجمی مربوط به ترم اول از وسط تا نوک درخت می‌تواند تغییر کند، در حالتی که میرایی صفر است محل مرکز فاز برای تخمین ارتفاع حجمی در نصف ارتفاع درخت قرار می‌گیرد؛ پس ضریب $0/5$ بهترین مقدار برای این حالت است. در نقطه مقابل، وقتی میرایی بی‌نهایت است محل مرکز فاز به گونه ای است که کل ارتفاع درخت را تخمین می‌زند؛ پس ضریب ϵ برابر صفر بهترین مقدار برای این حالت است. با توجه به این مسئله، برای جنگل‌های با ساختارها و چگالی‌های متفاوت، مقدار متوسط $0/4$ پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از روش ترکیبی برای طول موج‌های P و L در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

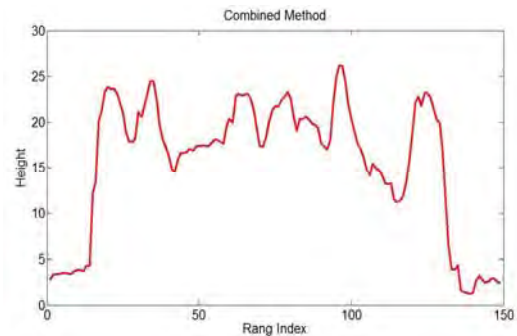
در روش اندازه همدوسی، در باند P میانگین ارتفاع درختان $28/57$ متر و خطای جذر میانگین مربعات $3/74$ و در باند L میانگین ارتفاع درختان $21/74$ متر و خطای جذر میانگین مربعات $5/65$ به دست آمد. در روش تفاضلی، در باند P میانگین ارتفاع درختان $6/36$ متر و خطای جذر میانگین مربعات $2/64$ و در باند L میانگین ارتفاع درختان $9/26$ متر و خطای جذر میانگین مربعات $3/78$ به دست آمد. بین مقادیر میانگین ارتفاعات استخراج شده با میانگین ارتفاعات درختان در روش اندازه همدوسی به نسبت روش تفاضلی اختلاف کمتری حاصل شد. در این روش برای تخمین ارتفاع، دو پارامتر عدد موج عمودی و کوهرنس حجمی تأثیرگذارند زیرا طول موج P نفوذی بیشتر از طول موج L دارد، کوهرنس حجمی آن کمتر از کوهرنس حجمی L است و طبق رابطه (۳) با توجه به آنکه مقادیر ورودی کمتر در تابع Sinc مقادیر خروجی بیشتری دارند و با توجه به آنکه طول موج P دارای کوهرنس حجمی کمتری است، خروجی حاصل از تابع Sinc آن بیشتر است. همچنین به دلیل آنکه طول موج P بلندتر از طول موج L است، K_z آن طبق رابطه (۳) کوچک‌تر است؛ در نتیجه، با توجه به دو عامل اشاره شده تخمین ارتفاع به روش اندازه همدوسی در باند P بیشتر از L به دست آمد. نتایج برای طول موج‌های P و L در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



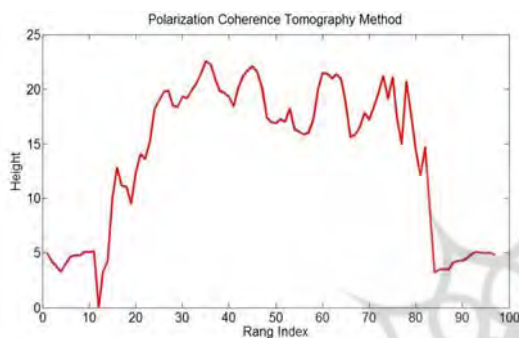
شکل ۴. تخمین ارتفاع در باند L با روش اندازه همدوسی



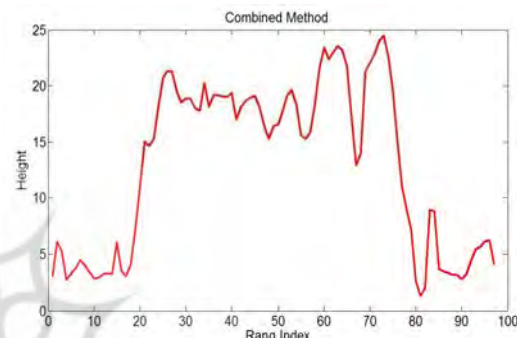
شکل ۸. تخمین ارتفاع در باند L با روش PCT



شکل ۶. تخمین ارتفاع در باند L با روش ترکیبی



شکل ۹. تخمین ارتفاع در باند P با روش PCT



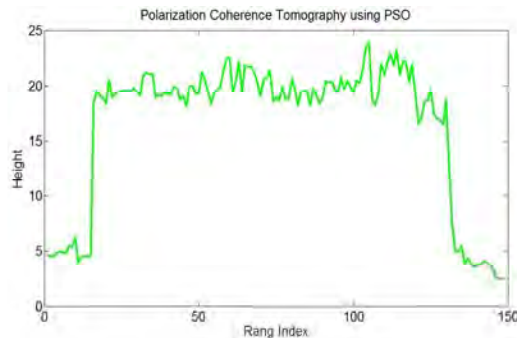
شکل ۷. تخمین ارتفاع در باند P با روش ترکیبی

با بهینه‌سازی کوهرنس به روش PSO و سپس ورودی کوهرنس‌های بهینه به تخمین ارتفاع به روش PCT، مقادیر تخمین ارتفاع در مقایسه با روش‌های قبلی بهبود یافت؛ در باند P میانگین ارتفاعی ۱۹/۱۴ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۲/۳۴ و در باند L میانگین ارتفاعی ۱۹/۶۰ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۱/۸۶ به دست آمد. خروجی نتایج در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای باندهای P و L نشان داده شده است. همچنین جدول ۲ مقایسه مقادیر عددی این روش‌ها در باندهای L و P را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مقایسه با نتایج روش قبلی (روش بهینه‌سازی کوهرنس، روش شعاع عددی) نتایج بهبود داشته است. دلیل آن این است که در روش شعاعی، پاسخ‌ها با روش تحلیلی حاصل نمی‌شوند و باید از روشی تکراری استفاده کرد که این خود باعث بهین محلی می‌شود. همچنین بردارهای تصویر در فرایند بهینه‌سازی شرط عمودبودن را ندارند. به همین دلیل،

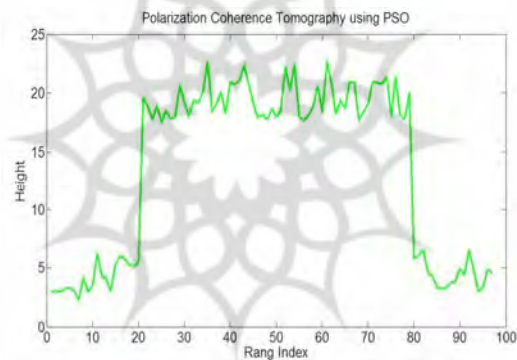
نتایج حاصل از تخمین ارتفاع با دو روش ترکیبی و PCT به هم نزدیک است و در این روش‌ها، در مقایسه با دو روش قبلی، اختلاف بین مقادیر میانگین ارتفاعات استخراج شده با میانگین ارتفاعات درختان کمتر است. در روش ترکیبی، در باند P میانگین ارتفاع درختان ۱۸/۳۵ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۴/۸۰ و نیز در باند L میانگین ارتفاع درختان ۱۸/۴۷ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۴/۵۷ به دست آمد. در روش PCT، در باند P مقدار میانگین ارتفاع درختان ۱۸/۷۳ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۳/۷۰ و در باند L مقدار میانگین ارتفاع درختان ۱۸/۸۶ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۳/۵۵ حاصل شد. در روش PCT، به دلیل استفاده از بهینه‌سازی کوهرنس، نتایج بهتر از روش ترکیبی حاصل شد؛ به طوری که میانگین ارتفاع درختان استخراج شده به میانگین ارتفاع درختان نزدیک تر بود و میزان خطای جذر میانگین مربعات کاهش یافت. نتایج حاصل از این روش برای طول موج‌های P و L در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

برای بهینه‌سازی کوه‌رنس استفاده می‌کند به دلیل عمود در نظر گرفتن بردارهای تصویر و نیز استخراج پاسخ‌های بهینه، نتایج بهبود کلی داشته است.

سه بردار تصویر در روش شعاعی مطابق با مدل پراکنش سه مؤلفه‌ای شامل پراکنش سطحی^۱، پراکنش تنه^۲ درخت-زمین^۳ و پراکنش حجمی^۳ نیستند. درحالی‌که در روش پیشنهادی که از روش هوش جمعی ذرات



شکل ۱۰. تخمین ارتفاع در باند L با روش PCT، با استفاده از PSO



شکل ۱۱. تخمین ارتفاع در باند P با روش PCT، با استفاده از PS

جدول ۲. مقایسه عددی روش‌های گوناگون تخمین ارتفاع

خطای جذر میانگین مربعات	میانگین ارتفاع درختان برحسب متر	روش تخمین ارتفاع در باند L	خطای جذر میانگین مربعات	میانگین ارتفاع درختان برحسب متر	روش تخمین ارتفاع در باند P
۳/۷۸	۹/۲۶	روش تفاضلی باند L	۲/۶۴	۶/۳۶	روش تفاضلی باند P
۵/۶۵	۲۱/۷۴	روش اندازه همدوسی باند L	۳/۷۴	۲۸/۵۷	روش اندازه همدوسی باند P
۴/۵۷	۱۸/۴۷	روش ترکیبی باند L	۴/۸۰	۱۸/۳۵	روش ترکیبی باند P
۳/۵۵	۱۸/۸۶	روش PCT باند L	۳/۷۰	۱۸/۷۳	روش PCT باند P
۱/۸۶	۱۹/۶۰	روش PCT با بهینه‌سازی به روش PSO باند L	۲/۳۴	۱۹/۱۴	روش PCT با بهینه‌سازی به روش PSO باند P

1. surface scattering
2. dihedral ground-trunk interaction
3. volume scattering

۷- نتیجه‌گیری

درختان ۱۸/۸۶ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۳/۵۵ شد. در روش PCT، به‌دلیل استفاده از بهینه‌سازی کوهرنس برای استخراج کوهرنس‌های بهینه، نتایج بهتر از روش ترکیبی حاصل شد؛ به طوری که میانگین استخراج‌شده ارتفاع درختان به میانگین ارتفاع درختان نزدیک‌تر شد و میزان خطای جذر میانگین مربعات کاهش یافت. با بهینه‌سازی کوهرنس به روش PSO و سپس ورودی کوهرنس‌های بهینه به تخمین ارتفاع به روش PCT، مقادیر تخمین ارتفاع در مقایسه با روش‌های قبلی بهبود یافت و در باند P مقدار میانگین ارتفاعی ۱۹/۱۴ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۲/۳۴ و در باند L مقدار میانگین ارتفاعی ۱۹/۶۰ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۱/۸۶ به‌دست آمد.

۸- منابع

- Askne, J.I., Dammert, P.B., Ulander, L.M. & Smith, G., 1997, **C-band Repeat-pass Interferometric SAR Observations of the Forest**, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 35(1), PP. 25-35
- Ballester-Berman, J.D., Vicente-Guijalba, F. & Lopez-Sanchez, J.M., 2015, **A Simple RVoG Test for PolInSAR Data**, Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, 8(3), PP. 1028-1040
- Balzter, H., 2001, **Forest Mapping and Monitoring with Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)**, Progress in Physical Geography, 25(2), PP. 159-177.
- Balzter, H., Rowland, C.S. & Saich, P., 2007, **Forest Canopy Height and Carbon Estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, Using Dual-wavelength SAR Interferometry**, Remote Sensing of Environment, 108(3), PP. 224-239.
- Chegade, B.E.H., Ferro-Famil, L., Minh, D.H.T., Le Toan, T. & Tebaldini, S., 2015, **Tropical Forest Biomass Retrieval Using P-Band PolTomSAR Data**, Paper presented at the POLinSAR 2015 Workshop.

در این مقاله برای بهبود تخمین ارتفاع از بهینه‌سازی کوهرنس به روش PSO استفاده شده است و کوهرنس‌های بهینه حاصل ورودی تخمین ارتفاع به روش PCT قرار گرفته‌اند. داده‌های استفاده شده، داده‌های شبیه‌سازی شده در باندهای P و L می‌باشند و نتایج حاصل با روش‌های تفاضلی، اندازه همدوسی، ترکیبی و PCT مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل نشان داد که روش تفاضلی باعث تخمین ارتفاع کمتر از مقدار واقعی می‌شود و روش اندازه همدوسی ارتفاع را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند. در روش اندازه همدوسی، در باند P میانگین ارتفاع درختان ۲۸/۵۷ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۳/۷۴ و در باند L میانگین ارتفاع درختان ۲۱/۷۴ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۵/۶۵ به‌دست آمد. در روش تفاضلی، در باند P میانگین ارتفاع درختان ۶/۳۶ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۲/۶۴ و در باند L مقدار میانگین ارتفاع درختان ۹/۲۶ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۳/۷۸ حاصل شد. بین مقادیر ارتفاعات استخراج‌شده با میانگین ارتفاعات درختان در روش اندازه همدوسی در مقایسه با روش تفاضلی، اختلاف کمتری وجود دارد. همچنین در روش ترکیبی به‌دلیل استفاده از هر دو اطلاعات فاز و دامنه، نتایج حاصل از میانگین ارتفاعی درختان در مقایسه با دو روش تفاضلی و اندازه همدوسی به میانگین ارتفاع درختان نزدیک‌تر بود. نتایج حاصل از تخمین ارتفاع با دو روش ترکیبی و PCT به هم نزدیک بود. در این روش‌ها، اختلاف بین مقادیر میانگین ارتفاعات استخراج‌شده با میانگین ارتفاعات درختان به نسبت دو روش قبلی کمتر بود. در روش ترکیبی، در باند P میانگین ارتفاع درختان ۱۸/۳۵ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۴/۸۰ و در باند L میانگین ارتفاع درختان ۱۸/۴۷ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۴/۵۷ به‌دست آمد. در روش PCT، در باند P میانگین ارتفاع درختان ۱۸/۷۳ متر و خطای جذر میانگین مربعات ۳/۷۰ و در باند L میانگین ارتفاع

- Clerc, M., 2010, **Particle Swarm Optimization**, Vol. 93, John Wiley & Sons.
- Cloude, S. & Papathanassiou, K., 2003, **Three-stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry**, IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 150(3), PP. 125-134.
- Cloude, S.R., 2006, **Polarization Coherence Tomography (PCT): A Tutorial Introduction**, Radio Science, Vol. 41.
- Cloude, S.R. & Papathanassiou, K.P., 1998, **Polarimetric SAR Interferometry**, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 36(5), PP. 1551-1565.
- Colin, E., Titin-Schnaider, C. & Tabbara, W., 2006, **An Interferometric Coherence Optimization Method in Radar Polarimetry for High-resolution Imagery**, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 44(1), PP. 167-175.
- Dobson, M.C., Ulaby, F.T., LeToan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E.S. & Christensen, N., 1992, **Dependence of Radar Backscatter on Coniferous Forest Biomass**, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 30(2), PP. 412-415.
- Eberhart, R., & Kennedy, J., 1995, **A new optimizer using particle swarm theory**, paper presented at the micro machine and human science, AHS, 95, Proceedings of the sixth International symposium.
- Fomena, R.T. & Cloude, S.R., 2005, **On the Role of Coherence Optimization in Polarimetric SAR Interferometry**, In Practice, 22(11), P. 9.
- Foody, G., 2003, **Remote Sensing of Tropical Forest Environments: Towards the Monitoring of Environmental Resources for Sustainable Development**, International Journal of Remote Sensing, 24(20), PP. 4035-4046.
- Honzák, M., Lucas, R., Do Amaral, I., Curran, P., Foody, G.M. & Amaral, S., 1996, **Estimation of the Leaf Area Index and Total Biomass of Tropical Regenerating Forests: Comparison of Methodologies**, Amazonian Deforestation and Climate, 1.
- Lu, D., 2005, **Aboveground Biomass Estimation Using Landsat TM Data in the Brazilian Amazon**, International Journal of Remote Sensing, 26(12), PP. 2509-2525.
- Mette, T., Kugler, F., Papathanassiou, K. & Hajnsek, I., 2006, **Forest and the Random Volume over Ground-nature and Effect of 3 Possible Error Types**, EUSAR 2006.
- Nelson, B.W., Mesquita, R., Pereira, J.L., De Souza, S.G.A., Batista, G.T. & Couto, L.B., 1999, **Allometric Regressions for Improved Estimate of Secondary Forest Biomass in the Central Amazon**, Forest Ecology and Management, 117(1), 149-167.
- Nelson, R., Krabill, W. & Tonelli, J., 1988, **Estimating Forest Biomass and Volume Using Airborne Laser Data**, Remote Sensing of Environment, 24(2), PP. 247-267.
- Overman, J.P.M., Witte, H.J.L. & Saldarriaga, J.G., 1994, **Evaluation of Regression Models for Above-ground Biomass Determination in Amazon Rainforest**, Journal of Tropical Ecology, 10(02), PP. 207-218.
- Papathanassiou, K.P. & Cloude, S.R., 2001, **Single-baseline Polarimetric SAR Interferometry**, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 39(11), PP. 2352-2363.
- Pipia, L., Fabregas, X., Aguasca, A., Lopez-Martinez, C. & Mallorquí, J.J., 2009, **Polarimetric Coherence Optimization for Interferometric Differential Applications**, Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, IGARSS 2009.
- Qong, M., 2005, **Coherence Optimization Using the Polarization State Conformation in PolInSAR**, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2(3), PP. 301-305.
- Ranson, K.J. & Sun, G., 1994, **Mapping Biomass of a Northern Forest Using Multifrequency SAR Data**, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 32(2), PP. 388-396.

- Sader, S.A., Waide, R.B., Lawrence, W.T. & Joyce, A.T., 1989, **Tropical Forest Biomass and Successional Age Class Relationships to a Vegetation Index Derived from Landsat TM Data**, Remote Sensing of Environment, 28, PP. 143-198.
- Sagues, L., Lopez-Sanchez, J.M., Fortuny, J., Fabregas, X., Broquetas, A. & Sieber, A.J., 2000, **Indoor Experiments on Polarimetric SAR Interferometry**, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 38(2), PP. 671-684.
- Santoro, M., Askne, J., Smith, G. & Fransson, J.E., 2002, **Stem Volume Retrieval in Boreal Forests from ERS-1/2 Interferometry**, Remote Sensing of Environment, 81(1), PP. 19-3.
- Santoro, M., Schmullius, C.C., Eriksson, L. & Hese, S., 2003. **The SIBERIA and SIBERIA-II Projects: An Overview**, Paper presented at the International Symposium on Remote Sensing.
- Santos, J.R., Freitas, C.C., Araujo, L.S., Dutra, L.V., Mura, J.C., Gama, F.F., . . . Sant'Anna, S.J., 2003, **Airborne P-band SAR Applied to the Aboveground biomass Studies in the Brazilian Tropical Rainforest**, Remote Sensing of Environment, 87(4), PP. 482-493.
- Schlerf, M., 2006, **Determination of Structural and Chemical Forest Attributes Using Hyperspectral Remote Sensing Data—Case Studies in Norway Spruce Forests**, Geography/Geosciences. sl: University of Trier.
- Schlund, M., von Poncet, F., Kuntz, S., Schmullius, C. & Hoekman, D.H., 2015, **TanDEM-X Data for Aboveground Biomass Retrieval in a Tropical Peat Swamp Forest**, Remote Sensing of Environment, 158, PP. 255-266.
- Soja, M.J. & Ulander, L.M., 2014, **Polarimetric-interferometric Boreal Forest Scattering Model for BIOMASS End-to-end Simulator**, Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International.
- Steininger, M., 2000, **Satellite Estimation of Tropical Secondary Forest Above-ground Biomass: Data from Brazil and Bolivia**, International Journal of Remote Sensing, 21(6-7), PP. 1139-1157.
- Tenne, Y. & Goh, C.K., 2010, **Computational Intelligence in Expensive Optimization Problems** (Vol. 2), Springer Science & Business Media.
- Thiel, C., Drezet, P., Weise, C., Quegan, S. & Schmullius, C., 2006, **Radar Remote Sensing for the Delineation of Forest Cover Maps and the Detection of Deforestation**, Forestry, 79(5), PP. 589-597.
- Treuhaft, R.N. & Siqueira, P.R., 2000, **Vertical Structure of Vegetated Land Surfaces from Interferometric and Polarimetric Radar**, Radio Science, 35(1), PP. 141-177.
- Ustin, S., 2004, **Manual of Remote Sensing: Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring**, Wiley Hoboken, NJ, USA.
- Xie, Q., Zhu, J., Wang, C. & Fu, H., 2014, **Boreal Forest Height Inversion Using E-SAR PolInSAR Data Based Coherence Optimization Methods and Three-stage Algorithm**, Paper presented at the Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA), 2014 3rd International Workshop on.
- Yamada, H., Yamaguchi, Y., Rodriguez, E., Kim, Y. & Boerner, W., 2001, **Polarimetric SAR Interferometry for Forest Canopy Analysis by Using the Super-resolution Method**, Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'01. IEEE 2001 International.
- Zheng, D., Rademacher, J., Chen, J., Crow, T., Bresee, M., Le Moine, J. & Ryu, S.R., 2004, **Estimating Aboveground Biomass Using Landsat 7 ETM+ Data across a Managed Landscape in Northern Wisconsin, USA**, Remote Sensing of Environment, 93(3), PP. 402-411.