نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال نهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۰
Vol.9, No.3, Autemn 2021
۲۵ -۳۸
مقاله پژوهشی
DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2

تعیین ارتفاع ساختمان‌های شهری براساس تخمین غیرپارامتریک طیف سیگنالی در توموگرافی داده‌های *SAR*

مهرنوش امتی[1*]، محمودرضا صاحبی[2]، حسین آقابابایی[3]

۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳- استادیار دانشکده *ITC*، دانشگاه توئنته هلند

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۸

چکیده

امروزه تکنیک توموسار با بسط اصول روزنه مجازی در راستای ارتفاعی، توانسته‌است محدودیت تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری در تفکیک پراکنش‌گرهای متعدد در پیکسل را برطرف نموده و توجه زیادی را در آنالیز مناطق پرچالش شهری به خود معطوف نماید. با وجود انتظار مشارکت و برهم‌نهی مولفه‌های مختلف پراکنشی از ساختمان‌هایی با ارتفاعات مختلف، سطح دیوار و سقف ساختمان‌ها، سطح زمین و یا تنه درختان، تکنیک توموسار با به‌کارگیری مجموعه‌ای از تصاویر اخذشده در زوایای مختلف و آنالیز طیف سیگنالی هر یک از پیکسل‌های تصاویر در جهت دوبعدی رنج و آزیموت، امکان بازیابی تابع بازپراکنش را در راستای ارتفاعی فراهم آورده‌است. در این پژوهش، قابلیت روش نوین غیرپارامتریک تخمین طیف سیگنالی در آنالیز بعد سوم ساختمان در مناطق شهری مورد بررسی قرار می‌گیرد. تخمین‌گر کارآمد پیشنهادی ماکزیمم آنتروپی، با جستجوی ضرایبی از مدل رگرسیون خودکار در راستای ماکزیمم‌سازی آنتروپی سیگنال و هم‌چنین تفکیک سطوح مختلف نویز در تصاویر توانسته‌است عملکرد مناسبی در بازسازی اطلاعات سه‌بعدی از منطقه فراهم نماید. پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از ۱۹ تصویر ماهواره تراسار - ایکس در بررسی برج هزاره سوم شهر تهران با بلندای ۱۲۰ متر و مقایسه نتایج حاصل از آن در مقایسه با روش‌های تخمین طیفی کاپون و بیم‌فرمینگ، نشان از عملکرد بهتر روش پیشنهادی در بازسازی ارتفاعی ساختمان، پیوستگی پروفیل بازپراکنش و حذف اثرات سایدلوب‌ها داشته است.

کلید واژه‌ها : تکنیک توموگرافی، آنالیز تخمین طیفی، تصاویر تراسار - ایکس، منطقه شهری.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران ـ خیابان ولیعصر ـ بالاتر از میدان ونک ـ تقاطع میرداماد ـ دانشکده مهندسی نقشه‌برداری.
تلفن: ۰۹۱۲۷۲۷۳۱۲۱

Email: momati@mail.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]

۱- مقدمه

سامانه‌های رادار با روزنه مجازی[۱](*SAR*) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سنجنده‌های سنجش از دوری، از قابلیت اخذ داده در تمامی شبانه‌روز و تحت هر شرایط آب‌وهوایی برخوردار می‌باشند*[۱]*. در سامانه فعال *SAR*، سیگنال-های بازگشتی از مشاهدات سطح زمین در صفحه دوبعدی رنج[۲] و آزیموت تصویر می‌گردند*[۱]*. در این سامانه، با افزایش پهنای باند طیف فرکانسی سیگنال رادار (بدون کاهش عرض پالس) می‌توان قدرت تفکیک مکانی در جهت رنج را در حد متر و حتی کم‌تر از آن بهبود بخشید*[۲]*. این درحالی است که بهبود قدرت تفکیک مکانی در راستای آزیموت با افزایش مجازی طول آنتن و ترکیب همدوس اکوهای دریافتی از پدیده-ها امکان‌پذیر خواهدبود*[۲]*. در سامانه *SAR*، سیگنال-های بازگشتی از سطح عوارض به‌صورت داده‌های مختلط (مقادیر دامنه و فاز) در تصاویر دوبعدی ثبت می‌گردند. مقادیر دامنه به‌عنوان معیاری از سیگنال‌های بازپراکنش‌یافته از عوارض سطح زمین، وابسته به خصوصیات سنجنده، هندسه تارگت و شرایط فیزیکی آن بوده و این درحالی است که اطلاعات فاز در سامانه همدوس *SAR*، مرتبط با فاصله تارگت تا سنجنده (مسیر ارسال و دریافت موج) می‌باشد*[۳]*.

در سال‌های اخیر با وجود کاربرد وسیع تصاویر *SAR* در زمینه‌های گوناگونی همانند تهیه نقشه پوشش‌های گیاهی و جنگل، پایش کاربری اراضی، بررسی رطوبت خاک، اکتشافات معدنی و تهیه نقشه‌های شهری*[۴* و *۵]*، تکنیک تداخل‌سنجی یا اینترفرومتری[۳]، توجه سنجش از دور راداری را به طیف گسترده‌ای از زمینه-های مطالعاتی معطوف نموده که کاربرد آن را می‌توان در سطح وسیعی از کشور مشاهده نمود*[۶]*. از نمونه کاربردهای این تکنیک می‌توان به تهیه مدل رقومی ارتفاعی(*DEM*)[۴] از منطقه، تخمین جابه‌جایی‌های سطح زمین ناشی از زلزله و فعالیت آتشفشانی، فرونشست ناشی از استخراج آب/ نفت و رانش‌های آهسته و کند سطح زمین اشاره نمود*[۵]*.

تکنیک‌های تداخل‌سنجی *SAR* با استفاده از اختلاف فاز حداقل دو تصویر اخذشده از منطقه در زوایای دید مختلف می‌توانند اطلاعات دقیقی را از توپوگرافی سطح زمین تهیه نمایند*[۶]*. فرض اساسی انواع تکنیک‌های مطرح در این زمینه، وجود تنها یک پراکنش‌گر غالب در هر پیکسل خواهدبود*[۶]*. این درحالی‌است که پروفیل ارتفاعی پیچیده و تراکم بالای پراکنش‌گرهای قوی در مناطق شهری (وجود ساختمان، دیوارها و دیگر عوارض ساخت دست بشر)، ممکن است موجب برهم-نهی[۵] پاسخ چندین پراکنش‌گر مختلف در یک پیکسل گردد*[۶]*. لازم به ذکر است این شرایط ممکن است مشکلاتی را در تفسیر نتایج تصویر و حتی دشواری‌هایی را در استخراج دقیق موقعیت و بازسازی ارتفاع عوارض ایجاد نماید*[۳]*. اخیرا با بهبود قدرت تفکیک مکانی سنجنده آلمانی تراسار- ایکس[۶]، پدیده برهم‌نهی اثر خود را در پیکسل‌های بیش‌تری نشان داده و توانسته احتمال مشارکت پراکنش‌گرهای متفاوت در یک پیکسل را بالا برد*[۶]*. در تصاویر سنجنده‌های راداری با قدرت تفکیک مکانی بالا، نسبت سیگنال به پس-زمینه و در نتیجه تعداد پراکنش‌گرهای قابل تشخیص در تصاویر نیز افزایش می‌یابد*[۶]*. این پراکنش‌گرها می-توانند بر روی پشت‌بام (سقف)، زمین اطراف ساختمان و یا نمای خارجی آن باشند*[۶]*.

تکنیک *SAR* توموگرافی[۷] اخذ داده‌های یک سنجنده در گذرهای مختلف بر منطقه و استفاده توامان از اطلاعات دامنه و فاز سیگنال‌های دریافتی، توانسته پراکنش-

---

[۱] *Synthetic Aperture Radar*

[۲] *Range*

[۳] *Interferometry*

[۴] *Digital Elevation Model*

[۵] *Superposition*

[۶] *TerraSAR-X*

[۷] *TomoSAR*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]

گرهای چندگانه با ارتفاع‌های متفاوت را در هر پیکسل تفکیک نماید[۷ و ۸]. اهمیت و کاربرد وسیع این تکنیک را می‌توان در مناطقی با ساختار پیچیده همانند مناطق شهری و جنگلی بیان نمود[۹]. این تکنیک در اصل با تمرکز چندین تصویر اخذشده با زوایای مختلف از یک منطقه، امکان بازسازی تابع پراکنش در ارتفاع-های مختلف و هم‌چنین تفکیک و جداسازی پراکنش-گرها را در هر پیکسل امکان‌پذیر می‌سازد[۹].

کاربرد توموگرافی در *SAR* ابتدا در سال ۱۹۹۴ به‌منظور رفع محدودیت‌های تصویربرداری در تصاویر دوبعدی *SAR* مطرح گردید[۱۲]. نخستین مطالعات در این زمینه تحت شرایط ایده‌آل آزمایشگاهی و با استفاده از سامانه‌های هوابرد صورت گرفت[۱۳ و ۱۴]. در دیگر پژوهش انجام شده، این تکنیک در تصاویر فضابرد اخذشده و به‌منظور بازیابی پروفیل‌های پراکنشی در جهت ارتفاع مورد ارزیابی قرارگرفت[۳]. به‌طورکلی در تکنیک *TomoSAR*، متمرکزسازی[۱] در راستای ارتفاعی متفاوت از راستای آزیموت خواهدبود. توزیع مکانی پراکنده و غیریکنواخت از داده‌های اخذشده و هم‌چنین محدودیت در تعداد اکوهای دریافتی، منجر به سطح قابل‌توجهی از ابهام در شبکه ارتفاعی می‌گردد[۳].

در پژوهشی انجام‌شده در سال ۲۰۰۹، روش کلاسیک فوریه‌مبنا با هدف تمرکز داده‌ها در راستای ارتفاعی ارائه گردید[۳]. نتایج حاصل از این پژوهش در تصاویر فضابرد مورد استفاده، نشان از دست‌یابی به قدرت تفکیک ضعیفی در راستای ارتفاعی داشته‌است[۳]. از این‌رو با هدف بهبود تمرکز داده‌ها در راستای ارتفاعی و بازسازی دقیق ارتفاع منطقه، تکنیک *TomoSAR* در دیگر پژوهش‌ها به‌عنوان یک مسئله تخمین طیفی مورد توجه قرار گرفته و توانسته زمینه ارائه انواع روش‌های آنالیز طیفی را فراهم آورد[۱۰]. انواع تخمین‌گرهای مطرح طیفی با دست‌یابی به پروفیل بازپراکنش[۲] در هر پیکسل، قادر به تعیین تعداد پراکنش‌گرها و هم‌چنین تعیین شدت انرژی بازگشتی در ارتفاع‌های مختلف خواهندبود[۱۱].

براساس دیدگاهی مطرح در این زمینه، می‌توان انواع تکنیک‌های *TomoSAR* را در دو دسته روش‌های تک-منظری[۳] و چندمنظری[۴] تقسیم‌بندی نمود[۱۷]. در روش‌های تک‌منظری، پس از ایجاد مجموعه‌ای از تصاویر اخذ شده در زوایای دید مختلف، هر یک از پیکسل‌ها در این مجموعه تصاویر به‌صورت مجزا در-نظرگرفته‌شده و همبستگی میان پیکسل‌های مجاور موردبررسی قرار نخواهدگرفت[۱۷]. این در حالی‌است که مبنای روش‌های چندمنظری براساس تخمینی از ماتریس کواریانس داده‌ها بنا گردیده و با محاسبه این ماتریس، در واقع یک میانگین‌گیری کلی از پیکسل‌های مجاور انجام می‌گیرد[۱۷]. از متداول‌ترین تکنیک‌های حوزه تک‌منظری می‌توان به تخمین طیفی بیم‌فرمینگ (*BF*)[۵] و از روش‌های مطرح در رویکرد چندمنظری به تخمین‌گر طیفی کاپون[۶] اشاره نمود.

از دیدگاهی دیگر انواع روش‌های تخمین طیفی را می-توان در سه رویکرد سنجش فشرده(*CS*)[۷] [۱۶ و ۲۲]، پارامتریک [۲۳] و غیرپارامتریک [۲۴ و ۲۵] تقسیم-بندی نمود. بررسی‌ها نشان داده‌است عملکرد هر یک از روش‌های آنالیز طیفی، وابسته به ماهیت پاسخ پراکنشی عوارض در منطقه خواهدبود[۱۵]. عملکرد تکنیک‌هایی با رویکرد سنجش فشرده، کاملا تحت تاثیر پارامترهای انتخابی توسط کاربر می‌باشند. در کاربردهای عملی، انتخاب مناسب‌ترین این پارامترها در یک روند تکراری و زمان‌بر صورت می‌پذیرد[۱۶]. هم-چنین نیاز اساسی مطرح در دسته روش‌های پارامتریک،

[۱] *Focusing*
[۲] *Backscattering*
[۳] *Single-look*
[۴] *Multi-look*
[۵] *Beamforming*
[۶] *Capon*
[۷] *Compressive Sensing*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]

دانش اولیه در تعیین تعداد پراکنش‌گرها و تخمین پارامترهای مدل آماری پیش‌فرض می‌باشد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند تنها در صورت پیروی کامل داده‌ها از مدل‌های آماری پیش‌فرض، می‌توان دست‌یابی به نتایج مناسب آنالیز طیفی در دسته روش‌های پارامتریک را انتظار داشت. امروزه تخمین‌گرهای پارامتریک با زمان بالای محاسباتی در پردازش‌های عملیاتی پیشنهاد نمی‌گردند. این در حالی‌است که در ایده اصلی روش‌های غیرپارامتریک، هیچ‌گونه فرضی برای ویژگی‌های آماری سیگنال‌های دریافتی درنظرگرفته‌نشده و تعداد پراکنش‌گرها و موقعیت آن‌ها مستقیما از طریق داده‌ها تخمین زده می‌شود[۱۸]. از این‌رو در دهه‌های اخیر استفاده از انواع الگوریتم‌های تخمین طیفی غیرپارامتریک در بسیاری از موضوعات کاربردی مورد توجه قرارگرفته‌است[۱۸، ۲۴، ۲۵ و ۲۶].با وجود انواع محدودیت‌های ذکرشده، هدف از این پژوهش، ارائه یک روش نوین و کارای تخمین طیفی غیرپارامتریک در توموگرافی داده‌های *SAR* با استفاده از تصاویر تراسار- ایکس در مد استیریپ‌مپ[۱] خواهدبود. با وجود قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر مد استیریپ‌مپ در مقایسه با مد اسپات‌لایت[۲] و به‌کارگیری این تصاویر در تفسیر مناطق پیچیده شهری، تخمین‌گر غیرپارامتریک پیشنهادی از ویژگی‌هایی همانند عدم وابستگی به فرض‌های آماری و دانش اولیه، ماکزیمم‌سازی آنتروپی سیگنال و مینیمم‌نمودن خطای موردانتظار برخوردار می‌باشد. این ویژگی‌ها منجر به توانایی قابل‌توجه روش پیشنهادی در تفکیک سطوح مختلف نویز تصاویر، حفظ پیوستگی پروفیل بازپراکنش و بهبود تخمین ارتفاع ساختمان‌های شهری می‌گردد.

۲- مواد و روش

در این بخش، تصاویر مورد استفاده و هم‌چنین روش پیشنهادی توموگرافی داده‌های *SAR* به‌منظور تخمین ارتفاع ساختمان‌ها به تفضیل شرح داده می‌شوند.

۲-۱- داده‌های مورد استفاده

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، تصاویر سنجنده راداری تراسار- ایکس، اخذشده از منطقه‌ای در شهر تهران، به‌عنوان منطقه مطالعاتی درنظر گرفته شده‌است. در این پژوهش، ۱۹ تصویر تراسار- ایکس در بازه زمانی سال ۲۰۱۲-۲۰۱۳ با طول موج معادل ۳٫۱ سانتی‌متر، پلاریزاسیون افقی – افقی(*HH*)[۳] و محدوده زاویه فرود بین ۲۴-۲۸ درجه در راستای ارائه یک روش تخمین طیفی *TomoSAR* مورد استفاده قرارگرفته‌اند. تاریخ اخذ تصاویر تراسار- ایکس و مولفه خط مبنای عمودی هر یک از آن‌ها در جدول (۱) مشخص شده‌است. امروزه به‌منظور بررسی تکنیک توموگرافی در مناطق شهری، به تصاویر ماهواره‌ای تراسار- ایکس، به‌عنوان یکی از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا، توجه بسیاری می‌گردد. قدرت تفکیک مکانی این سنجنده در جهت رنج و آزیموت به‌ترتیب برابر ۱٫۲ و ۳٫۳ متر و اخذ داده‌ها در مد استیریپ‌مپ صورت گرفته‌است. شکل(۱) میانگینی از دامنه‌های ۱۹ تصویر تراسار- ایکس و هم‌چنین تصویری از ساختمان موردنظر در بینگ‌مپ[۴] را نشان می‌دهد. ساختمان انتخابی، متعلق به برج هزاره سوم یا برج میلینیوم واقع در خیابان شیخ بهایی و نزدیک به برج بین‌المللی تهران بوده که بلندای آن به ۱۲۰ متر می‌رسد. ارتفاع ساختمان موردنظر توسط انجمن ساختمان‌های بلند و زیست‌گاه‌های شهری (*CTBUH*)[۵] و براساس استانداردهای بین‌المللی اندازه‌گیری و تعریف ساختمان‌های بلند تعیین گردیده‌است. این برج به‌عنوان بزرگ‌ترین برج مسکونی ـ تجاری در ایران شناخته می‌شود.

[۱] *Stripmap*
[۲] *Spotlight*
[۳] *Horizontal-Horizontal*
[۴] *Bing Map*
[۵] *The Council on Tall Buildings and Urban Habitat*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]



الف ب

شکل ۱: (الف) میانگین ۱۹ تصویر تراسار- ایکس، (ب) تصویری از بینگ‌مپ شامل ساختمان موردنظر

جدول۱: تاریخ اخذ تصاویر و مولفه‌های خط‌مبنای عمودی

مولفه عمودی خط‌مبنا (متر)	تاریخ اخذ تصاویر	مولفه عمودی خط‌مبنا (متر)	تاریخ اخذ تصاویر
۰	۲۰۱۳۰۲۲۶	-۱۱۶	۲۰۱۲۱۰۰۶
۷۲	۲۰۱۳۰۳۰۹	۶۷	۲۰۱۲۱۰۱۷
۲۲۲	۲۰۱۳۰۳۳۱	-۱۵	۲۰۱۲۱۰۲۸
۲۹۸	۲۰۱۳۰۴۲۲	-۴۵	۲۰۱۲۱۱۰۸
۲۴۰	۲۰۱۳۰۵۰۳	۹	۲۰۱۲۱۱۳۰
۱۳۱	۲۰۱۳۰۷۰۸	-۶	۲۰۱۲۱۲۱۱
۲	۲۰۱۳۰۷۱۹	۲۷۵	۲۰۱۲۱۲۲۲
۱۶۹	۲۰۱۳۰۷۳۰	-۳۹	۲۰۱۳۰۱۱۳
۷۹	۲۰۱۳۰۸۱۰	-۱۸	۲۰۱۳۰۱۲۴
۶	۲۰۱۳۰۸۲۱		

۲-۲- روش پیشنهادی

به‌علت تنوع توزیع ارتفاعی ساختمان‌ها در مناطق شهری و تاثیر مستقیم آن در همدوسی بین تصاویر، آنالیز داده‌های *SAR* از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار می‌باشد[۱۹]. از دیدگاه هندسی، پدیده وارونگی[۱] در این مناطق، موجبات برهم‌نهی مولفه‌های مختلف پراکنشی را فراهم ساخته‌است[۲۰]. حال با استفاده از باند ایکس در مناطق شهری و بهبود قدرت تفکیک مکانی انواع سنجنده‌های *SAR*، دسته‌بندی ساختارهای بازپراکنش از سطوح را می‌توان در موارد زیر بیان نمود[۸]:

۱) پراکنش ضعیف پراکنده[۲] از سطوح صاف افقی و

[۱] *Layover*

[۲] *Diffuse*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]

یا عمودی (جاده‌ها و دیوار ساختمان‌ها). پراکنش‌های صورت‌گرفته در این موارد از قدرت تفکیک ارتفاعی بسیار کوچک‌تر بوده و از این‌رو این سطوح همانند پراکنش‌گرهای مجزا در جهت ارتفاع عمل می‌نمایند.

۲) بازگشت‌های دوسطحی[۱]، سه‌وجهی[۲] و یا بازگشت‌های قوی از ساختارهای متالیک. این‌ها همان نقاط مورداستفاده در تکنیک تداخل‌سنجی پراکنش‌گر دائمی (*PSI*)[۳] بوده و مشارکت سیگنالی غالبی دارند. در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالای *SAR*، تراکم این نقاط بسیار بالا می‌باشد.

۳) بازگشت‌هایی از پراکنش‌گرهای حجمی همانند پوشش‌های گیاهی. در این حالت با مجموعه‌ای از پراکنش‌گرها مواجه بوده که با وجود فاصله زمانی و عدم همبستگی، پاسخ آن‌ها همانند نویز عمل می‌کند.

با وجود ارائه بسیاری از تکنیک‌های تداخل‌سنجی، تقریبا تمامی روش‌ها تنها از اطلاعات فاز سیگنال‌های بازگشتی استفاده نموده و فرض آن‌ها مبنی بر وجود یک پراکنش غالب در هر پیکسل می‌باشد*[۷]*. حال آن‌که با درنظرگرفتن این فرض، تنها یکی از بازپراکنش‌کننده‌ها[۴] در پیکسل بازسازی و تعیین موقعیت شده و اطلاعات مرتبط با مشارکت‌های غیرغالب از دست خواهندرفت*[۴]*. این در صورتی است که در مناطق شهری با تراکم بالای پراکنش‌گرها (متشکل از ساختمان، دیوار و دیگر ساختارهای ساخت دست بشر)، این فرض از تشخیص برخی پراکنش‌گرها جلوگیری به‌عمل آورده و دقت بازسازی را تحت تاثیر قرار می‌دهد*[۶]*.

امروزه تکنیک *TomoSAR* با بسط اصول روزنه مجازی در بعد سوم (جهت عمود بر رنج و آزیموت) و تمرکز چندین تصویر اخذشده با زوایای مختلف از یک منطقه، امکان بازسازی تابع پراکنش در جهت ارتفاعی، تفکیک پراکنش‌گرها در هر پیکسل و تصویرسازی سه‌بعدی در مناطق شهری را فراهم آورده‌است. شکل (۲) هندسه اخذ داده در تکنیک *TomoSAR* را نشان می‌دهد. در این شکل بردار $\vec{s}$ بیانگر راستای ارتفاعی، r نمایان‌گر فاصله سنجنده تا هدف و دو پارامتر $(b_{\perp n}, b_{\perp n})$ نیز موقعیت نسبی سنسور nام نسبت به سنسور پایه می‌باشد*[۸]*.

برای پراکنش‌گر P در موقعیت (x, r, s)، با فاصله $R_n(r,s)$ تا سنجنده n و شدت بازتابی $\gamma(x,r,s)$، انرژی دریافتی در سنجنده n از پراکنش‌گر P برابر با رابطه (۱) خواهدبود:

$$\gamma(x,r,s).\exp[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_n(r,s)]^{**}f(x,r) \qquad \text{رابطه(۱)}$$

در رابطه(۱)، **بیانگر عملگر کانولوشن، λ طول موج و تابع $f(x,r)$ نیز به‌منظور متمرکزسازی تابع پخش نقطه‌ای (*PSF*)[۵] دوبعدی مورد استفاده قرارگرفته که می‌توان آن را با رابطه (۲) بیان نمود:

$$f(x,r) = \sin c(\frac{r}{\Delta r})\sin c(\frac{x}{\Delta x}) \qquad \text{رابطه(۲)}$$

Δx و Δr در رابطه (۲) به‌ترتیب مفهوم قدرت تفکیک مکانی در جهت آزیموت و رنج را خواهندداشت. با توجه به شکل (۲) و به‌کارگیری تقریب فرنل[۶]، فاصله مطرح شده در رابطه (۱) برابر است با رابطه (۳):

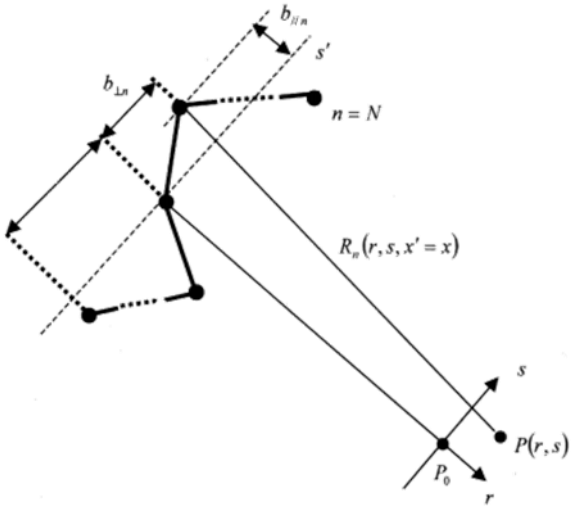
رابطه(۳)

$$R_n(r,s) = \sqrt{(r-b_{\perp n})^2 + (s-b_{\perp n})^2} \approx r - b_{\perp n} + \frac{(s-b_{\perp n})^2}{2(r-b_{\perp n})}$$

حال با بسط روابط به چندین پراکنش‌گر و انتگرال‌گیری از روابط، انرژی دریافتی از تمامی پراکنش‌گرها در سنجنده n طبق رابطه(۴) بدست می‌آید.

[۱] *Dihedral*
[۲] *Trihedral*
[۳] *Persistent Scatterer Interferometry*
[۴] *Scatterers*
[۵] *Point Spread Function*
[۶] *Fresnel Approximation*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]



شکل ۲: هندسه اخذ داده در تکنیک *TomoSAR*

$$y_n(x',r') = \iint dx\ dr\ f(x'-x,r'-r)\int ds\ \gamma(x,r,s).\ \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_n(r,s)] \quad n=1,...,N$$ رابطه(۴)

در رابطه(۴)، $f(x'-x,r'-r)$ به‌منظور متمرکزسازی تابع *PSF* مورد استفاده قرارمی‌گیرد. در یک پراکنش‌گر با موقعیت (x,r,s)، پارامترهای $\gamma(x,r,s)$ و $R_n(r,s)$ به‌ترتیب بیانگر شدت بازتابی و فاصله تا سنجنده *n*ام می‌باشند. رابطه (۴) ارتباط اساسی میان سیگنال‌های دریافتی از چندین سنجنده و مقادیر مختلط پروفیل بازتاب را بیان می‌نماید. در ادامه به‌منظور سادگی در روابط، تابع دوبعدی پخش نقطه‌ای با تابع دیراک[۱] دوبعدی تقریب زده شده و مسئله تخمین سه‌بعدی تبدیل به مسئله یک بعدی در راستای ارتفاعی (s) می‌گردد. از این‌رو پس از ساده‌سازی در روابط (۵) و (۶) خواهیم داشت:

$$f(x'-x,r'-r) = \delta(x'-x)\delta(r'-r)$$ رابطه(۵)

رابطه(۶)

$$y_n(x,r) = \int_{-s_{max}}^{s_{max}} \gamma(x,r,s)\ \exp[j\frac{4\pi}{\lambda r}R_n(s)]ds$$

با جایگذاری رابطه (۳) در (۶) می‌توان به وجود یک ترم درجه دو در قسمت فاز رابطه (۶) پی‌برد. این اعوجاج را می‌توان با ضرب سیگنال دریافتی در فاکتور فاز متناظر با اکو بازگشتی از هدف در راستای مرکز ارتفاعی (P_0) جبران نمود. پس از حذف این اثر از y_n، سیگنال دریافتی g_n را می‌توان با رابطه (۷) تعریف نمود:

[۱] *Dirac Function*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]

رابطه(۷)
$$g_n = y_n \exp[+j\frac{4\pi}{\lambda}R_n(0)] = \int_{-s_{max}}^{s_{max}} \gamma(s) \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_n(s) - R_n(0)]ds$$

که

رابطه(۸)
$$R_n(s) - R_n(0) = \left|r_0 - b_{\perp n}\right| + \frac{(s - b_{\perp n})^2}{2\left|r_0 - b_{\perp n}\right|} - (\left|r_0 - b_{\perp n}\right| + \frac{(b_{\perp n})^2}{2\left|r_0 - b_{\perp n}\right|})$$
$$= -\frac{b_{\perp n}}{\left|r_0 - b_{\perp n}\right|}s + \frac{s^2}{2\left|r_0 - b_{\perp n}\right|}$$

با جایگذاری روابط بالا، در رابطه (۹) خواهیم داشت:

رابطه(۹)
$$g_n = \int_{-s_{max}}^{s_{max}} \gamma(s) \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda}\frac{s^2}{2(r - b_{\perp n})}].\exp[j\frac{4\pi}{\lambda}\frac{b_{\perp n}s}{r - b_{\perp n}}]ds$$

با وجود اهمیت ویژگی فاز سیگنال، لازم است اثر ترم درجه دو موجود در رابطه (۹) را با عملیات پس‌پردازش حذف نمود. حال در مجموعه‌ای از تصاویر دوبعدی *SAR*، مقدار مختلط هر پیکسل در N تصویر *SAR* بیانگر تجمیعی از سیگنال‌های بازپراکنش‌یافته در راستای ارتفاعی درنظرگرفته‌شده که می‌توان آن را با روابط (۱۰) و (۱۱) بیان نمود*[۸]*:

رابطه(۱۰)
$$g_n = \int_{-s_{max}}^{s_{max}} \gamma(s)\ [j2\pi\frac{2}{\lambda}\frac{b_{\perp n}}{r - b_{\perp n}}]ds = g(\zeta)\big|_{\zeta_n} \quad n=1,...,N$$

که

رابطه(۱۱)
$$\zeta_n = \frac{2b_{\perp n}}{\lambda(r - b_{\perp n})} \approx \frac{2b_{\perp n}}{\lambda r}$$

در رابطه (۱۰)، s بازه ارتفاعی در $[-s_{max}, s_{max}]$ بازسازی، ζ_n فرکانس مکانی در راستای ارتفاع و $\gamma(s)$ نیز شدت بازتاب در راستای بازه ارتفاعی موردنظر می‌باشد. در صورت نمونه‌برداری بازه $[-s_{max}, s_{max}]$ به L نمونه در راستای ارتفاعی، رابطه ذکرشده در بالا را می‌توان به شکل رابطه (۱۲) بیان نمود:

رابطه(۱۲)
$$\begin{pmatrix} g_1 \\ . \\ . \\ . \\ g_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} \dots G_{1L} \\ . \\ . \\ . \\ G_{N1} \dots G_{NL} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \gamma(s_1) \\ . \\ . \\ . \\ \gamma(s_L) \end{pmatrix} + \varepsilon$$

در رابطه(۱۲)، $s_l(l = 1,...,L)$ موقعیت ارتفاعی نمونه‌برداری‌شده، $\gamma(s_l)$ بازتاب در موقعیت ارتفاعی s_l و ε بیانگر ترم نویز بوده که در صورت پیش‌پردازش صحیح، می‌توان از این ترم صرف‌نظر نمود. لازم به ذکر است هر یک از المان‌های G با ابعاد $N \times L$ را می‌توان با رابطه(۱۳) تعیین نمود:

رابطه(۱۳)
$$G_{nl} = \exp(-j2\pi\zeta_n s_l)$$

بدین‌ترتیب می‌توان رابطه (۱۲) را به فرم رابطه (۱۴) ساده‌سازی نمود:

رابطه(۱۴)
$$g = G \,.\, \gamma + \varepsilon$$

به‌طورکلی هدف از حل مسئله *TomoSAR*، تخمین پارامترهای پراکنش هر پیکسل همانند تعداد پراکنش‌گرها، ارتفاع آن‌ها و بازیابی پروفیل بازپراکنش خواهدبود. حال آن‌که تکنیک توموگرافی داده‌های *SAR* را می‌توان به‌عنوان یک مسئله تخمین طیفی درنظرگرفته و با آنالیز طیفی مجموعه‌ای از N تصویر اخذشده از منطقه، پارامترهای موردنظر در هر پیکسل را تعیین نمود. با وجود مزیت‌های ذکرشده از روش‌های غیرپارامتریک، ارائه یک روش نوین و کارای پردازش سیگنال در این پژوهش توانسته‌است در صورت وجود انواع نویزها در مشاهدات نیز نتایج قابل اعتمادی را بازیابی نماید. شکل (۳) روند کلی الگوریتم پیشنهادی در توموگرافی داده‌های *SAR* را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]



شکل ۳: روند کلی الگوریتم پیشنهادی در تکنیک *TomoSAR*

اساس تکنیک پیشنهادی ماکزیمم آنتروپی به‌عنوان بهبودیافته‌ای از روش تخمین طیفی بیم‌فرمینگ و بر مبنای برون‌یابی ماتریس کواریانس حاصل از تصاویر *SAR* ارائه گردیده‌است. برون‌یابی در این روش از طریق ماکزیمم‌سازی آنتروپی سیگنال و با جستجو در میان ضرایب مدل رگرسیون خودکار (*AR*)[۱] به‌دست می‌یابد[۲۱]. این ماکزیمم‌سازی منجر به کاهش خطای مورد انتظار گردیده که می‌توان آن را به فرم روابط (۱۵) و (۱۶) بیان نمود:

رابطه(۱۵) $$a = \arg\min\left\{a^H \hat{R}_{gg}\right\}$$

رابطه(۱۶) $$\hat{R}_{gg} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} g g^H$$

لازم به ذکر است عملگر $(.)^H$ در رابطه بالا مفهوم ترانهاده مزدوج[۲] را داشته‌است. مشروط به برقراری شرط $G^H e_1 = 1$ برای اولین ضریب مدل رگرسیون خودکار و به‌کارگیری روش بهینه‌سازی ضرایب لاگرانژ[۳]، در رابطه (۱۷) خواهیم داشت:

رابطه(۱۷) $$a = \frac{\hat{R}_{gg}^{-1} e_1}{e_1^T \hat{R}_{gg} e_1}$$

در رابطه(۱۷)، $a = [a_1, a_2, ..., a_N]$ و e_1 به‌ترتیب بیانگر ضرایب مدل رگرسیون خودکار و اولین ستون ماتریس همانی I با ابعاد $N \times N$ خواهندبود. در ادامه نیز طیف بازتابی به‌دست آمده را می‌توان به فرم رابطه(۱۸) تعیین نمود:

رابطه(۱۸) $$\gamma(s_l) = \frac{1}{\left|G^H(s) C_j\right|^2}$$

لازم به ذکر است C_j معرف ستون jام از معکوس ماتریس کواریانس $\hat{R}_{gg}^{-1}$ می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

مطابق با فلوچارت رسم شده در شکل (۳)، پس از اخذ N تصویر دوبعدی *SAR*، لازم است پیش‌پردازش‌های لازم بر این تصاویر اعمال گردند. در مرحله پیش‌پردازش از این پژوهش، ابتدا ۱۹ تصویر اخذشده به یک تصویر مبنا ثبت هندسی[۴] شده و پس از حذف فاز زمین مسطح[۵] و اتمسفری، پردازش توموگرافی با استفاده از تخمین‌گر طیفی پیشنهادی بر داده‌های پیش‌پردازش شده انجام می‌گیرد. تمامی پیاده‌سازی‌ها در این مقاله در محیط برنامه‌نویسی متلب صورت گرفته‌است.

هندسه پهلونگر اخذ داده در سنجنده‌های راداری و ارتفاع بلند برج هزاره سوم در منطقه مطالعاتی، موجب گردیده پدیده وارونگی خود را با شدت بیش‌تری در پیکسل‌های متعلق به این ساختمان در شکل (۱-الف) نشان دهد. فاصله یکسان سنجنده از نقاط ارتفاعی متفاوت در نمای ساختمان موردنظر و هم‌چنین زمین

[۱] *Auto – Regressive*
[۲] *Conjugate Transpose*
[۳] *Lagrange Multiplier*
[۴] *Coregistration*
[۵] *Flat Earth*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]

مسطح در اطراف ساختمان، موجب هم‌پوشانی سیگنال-های دریافتی از نقاط مختلف منطقه و شکل‌گیری چندین پراکنش‌گر در هر پیکسل گردیده‌است. از این‌رو نیاز به ارائه یک روش تخمین طیفی قوی و کارآمد در تفکیک پراکنش‌گرهای ممکن در پیکسل‌های تصویر *SAR* بیش از پیش افزایش یافته‌است.

در این پژوهش، عملکرد الگوریتم پیشنهادی ماکزیمم آنتروپی با دو روش متداول تخمین طیفی کاپون و بیم-فرمینگ مقایسه و مورد ارزیابی قرارگرفته‌است. در شکل (۴-ب، ۴-ج و ۴-د) می‌توان نتایج توموگرام آزیموت – ارتفاع حاصل از روش‌های فوق را در راستای خط قرمز ترسیم شده در شکل (۴-الف) مشاهده نمود. براساس رابطه ابهام ارتفاعی در این پیاده‌سازی، بازه ارتفاعی موردنظر به‌منظور بازیابی ارتفاع، بازه $[0-120]$ متر درنظرگرفته‌شده‌است.

نتایج توموگرام شکل (۴-ب) حاکی از آن است روش تخمین طیفی کاپون نتوانسته نتیجه مناسبی در تفکیک پراکنش‌گرها در هر پیکسل و بازیابی ارتفاع برج مطالعاتی نشان دهد. همان‌گونه که در ابتدای توموگرام شکل (۴-ب) می‌توان مشاهده نمود ارتفاع برج هزاره سوم توسط روش کاپون برابر با ۱۱۲ متر تخمین زده شده و این در حالی است که واقعیت زمینی این برج برابر با ۱۲۰ متر برآورد گردیده‌است. در این شکل با افزایش شماره پیکسل‌ها در جهت آزیموت و نزدیک شدن به پایین برج، شاهد از بین رفتن روند کاهشی ارتفاع از پیکسل شماره ۱۱۸ به بعد خواهیم‌بود. هم-چنین با وجود شدت وارونگی در منطقه مطالعاتی، اثرات نویز و ناپیوستگی‌ها در توموگرام رسم شده از روش کاپون را هم‌چنان می‌توان در شکل (۴-ب) مشاهده نمود.

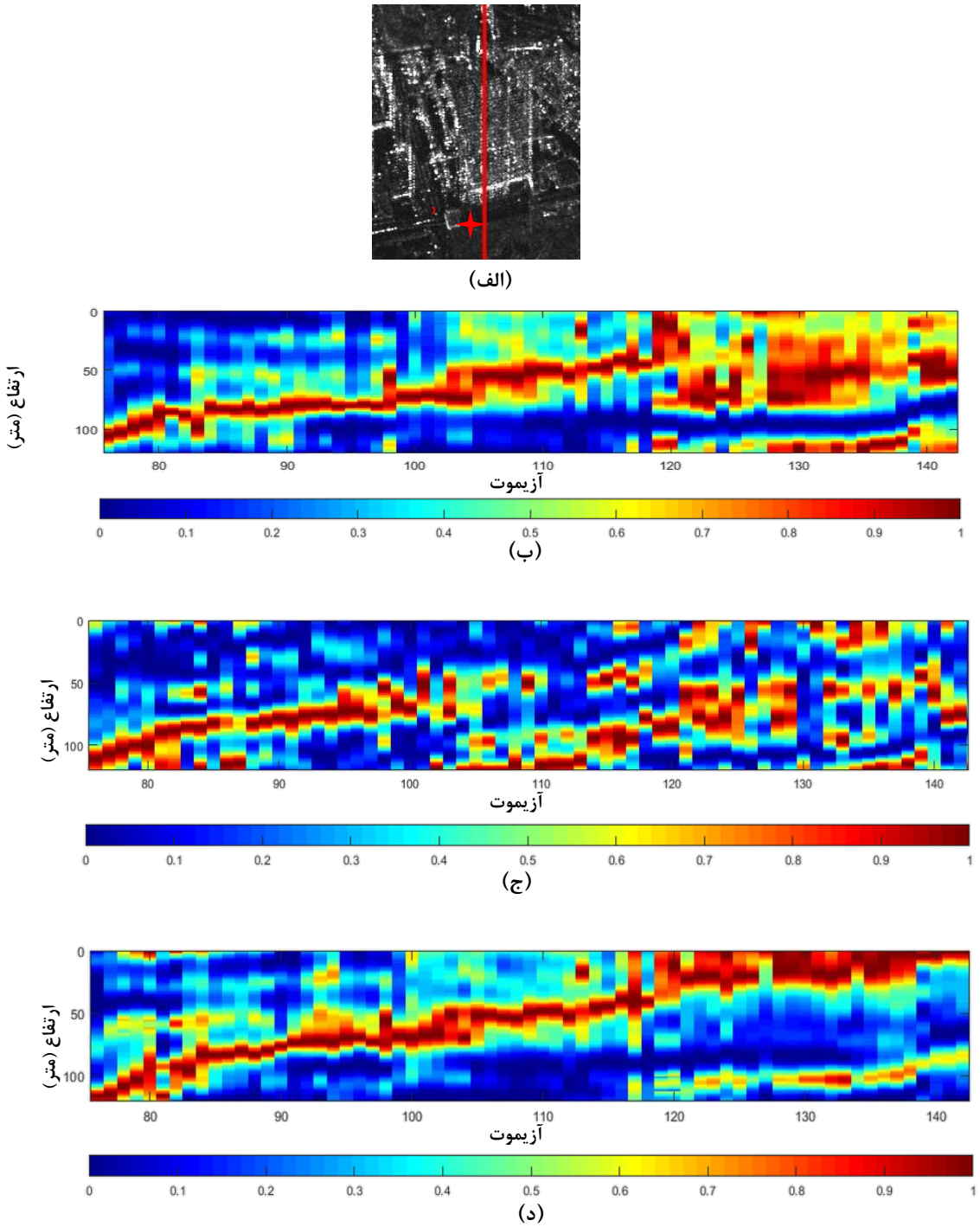
در دیگر روش پیاده‌سازی شده بیم‌فرمینگ، ارتفاع تخمینی ۱۱۶ متر از برج میلینیوم در ابتدای توموگرام شکل (۴-ج) نشان داده‌شده‌است. با وجود نزدیکی ارتفاع تخمینی حاصل از این روش با واقعیت زمینی آن، به‌علت قرارگیری این روش در دسته تکنیک‌های تک‌منظری *TomoSAR*، شاهد تاثیرگذاری عوامل ایجاد نویز بر نتایج به‌دست‌آمده از توموگرام خواهیم بود. با توجه به این شکل می‌توان از بین‌رفتن روند کاهشی ارتفاع ساختمان را از پیکسل شماره ۹۸ به بعد به‌وضوح مشاهده‌نمود.

این درحالی است که روش ماکزیمم آنتروپی با مینیمم-نمودن خطای موردانتظار از تعیین ضرایب مدل رگرسیون خودکار، ماکزیمم‌سازی آنتروپی سیگنال و قابلیت تفکیک نویز در سطوح مختلف، توانسته نتایج تخمین ارتفاع برج را به‌میزان قابل‌توجهی بهبود بخشیده و پیوستگی را در راستای توموگرام شکل (۴-د) نشان دهد. تخمین ارتفاع صورت‌گرفته توسط روش پیشنهادی ماکزیمم آنتروپی در شکل (۴-د) نشان می-دهد که با افزایش شماره پیکسل‌ها در راستای آزیموت و نزدیکی به پایین برج، به‌تدریج در یک روند نزولی از ارتفاع ساختمان کاسته شده‌است. این روش پیشنهادی، ارتفاع برج میلینیوم را برابر با ۱۱۸ متر تخمین زده و نتایج حاکی از آن است که ارتفاع حاصل از این تکنیک در مقایسه با دیگر روش‌های پیاده‌سازی شده، به بلندای برج در واقعیت زمینی نزدیک‌تر می‌باشد.

به‌منظور نمایش توانایی در تفکیک و جداسازی پراکنش‌گرها در هر پیکسل، عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی ماکزیمم آنتروپی با دو روش غیرپارامتریک کاپون و بیم‌فرمینگ مورد مقایسه قرارگرفته که نتایج حاصل را می‌توان در پروفیل‌های شکل (۵) مشاهده نمود. پروفیل‌های ارتفاعی ترسیمی در شکل (۵) متعلق به نقطه انتخابی P_1 در شکل (۴-الف) می‌باشند. در واقعیت زمینی، با قرارگیری نقطه P_1 در خارج از محدوده ساختمان انتخابی، انتظار وجود تنها یک پراکنش‌گر غالب در نزدیکی زمین را خواهیم داشت. حال در این پژوهش نیز با پیاده‌سازی تخمین‌گر پیشنهادی ماکزیمم آنتروپی در شکل (۵-ج)، بیش‌ترین میزان بازپراکنش را می‌توان در ارتفاعی نزدیک به صفر مشاهده نمود. با توجه به پروفیل‌های رسم‌شده از نقطه انتخابی P_1 با دو تکنیک کاپون و بیم‌فرمینگ در شکل

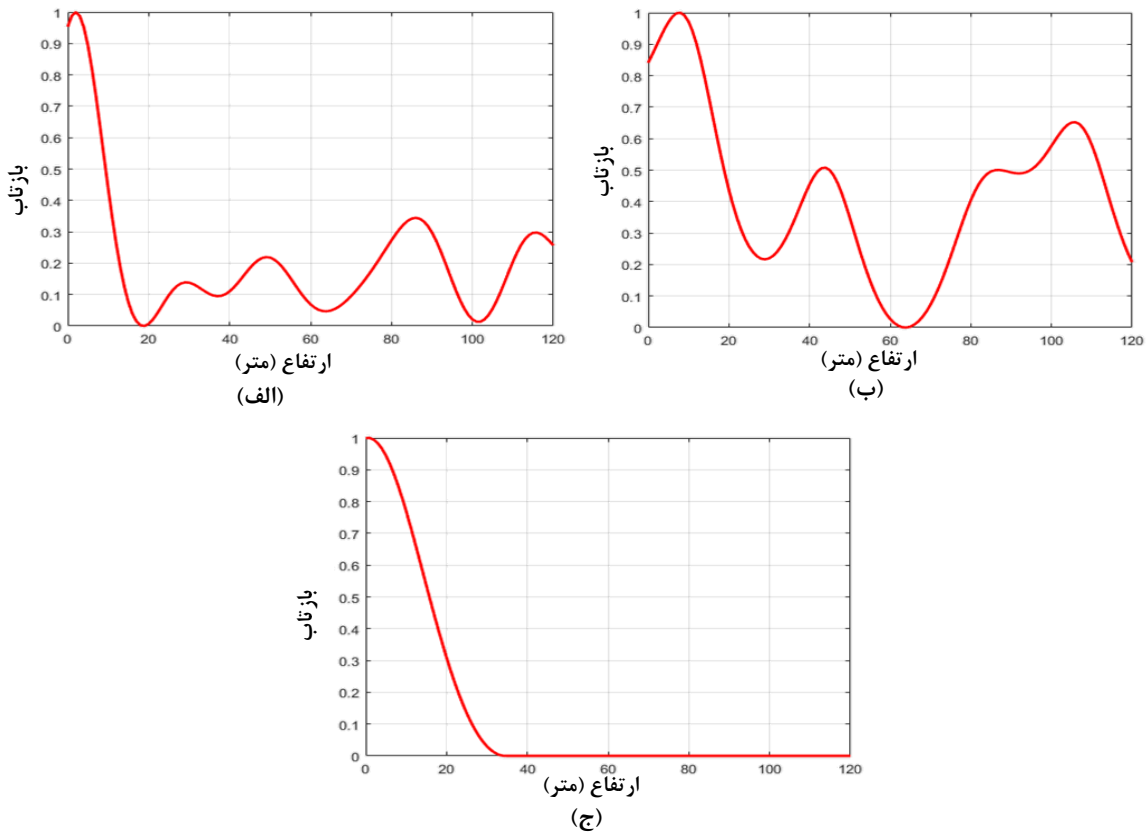
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]

(۵-الف و ۵-ب)، به‌وضوح می‌توان اثرات سایدلوب‌ها را در نتایج مشاهده نمود و این در حالی است که تخمینگر پیشنهادی توانسته در حذف سایدلوب‌ها عملکرد خوبی را به نمایش بگذارد.



شکل ۴: (الف) موقعیت خط ترسیم توموگرام در برج هزاره سوم، (ب) توموگرام حاصل از روش کاپون، (ج) توموگرام حاصل از روش بیم فرمینگ، (د) توموگرام حاصل از روش پیشنهادی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]



شکل ۵: (الف) پروفیل ارتفاعی حاصل از روش کاپون، (ب) پروفیل ارتفاعی حاصل از روش بیم فرمینگ (ج) پروفیل ارتفاعی حاصل از روش پیشنهادی

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

هدف از این پژوهش، ارائه یک تخمین‌گر نوین طیفی در تعیین ارتفاع ساختمان‌های شهری با استفاده از تکنیک *TomoSAR* می‌باشد. روش پیشنهادی با استفاده از تصاویر ماهواره فضابرد تراسار- ایکس در مد استیریپ‌مپ توانسته‌است مشکل برهم‌نهی پاسخ چندین پراکنش‌گر مختلف در یک پیکسل را به‌عنوان اساسی‌ترین محدودیت مطرح در مناطق شهری برطرف نماید. در مقایسه با دیگر روش‌های تخمین طیفی، روش غیرپارامتریک ماکزیمم آنتروپی با استفاده از برون‌یابی ماتریس کواریانس مجموعه تصاویر اخذ شده، جستجو در ضرایب مدل رگرسیون خودکار و تفکیک سطوح مختلف نویز در تصاویر، توانسته نتایج به‌دست آمده از تخمین ارتفاع را به‌میزان قابل‌توجهی بهبود بخشیده و اثرات سایدلوب‌ها را نیز حذف نماید. گرچه در این روش، انتخاب ستون jام از ماتریس C_j تاثیر قابل‌توجهی در نتایج به‌دست آمده در روش ارائه‌شده خواهد داشت. از این‌رو به‌عنوان پیشنهاد در مطالعات آتی، ارائه یک روش اتوماتیک در انتخاب ستون بهینه از معکوس ماتریس کواریانس می‌تواند مورد بررسی و ارزیابی قرارگیرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور و هم‌چنین آژانس فضایی اروپا (*ESA*) به‌منظور دراختیارقراردادن تصاویر تراسار - ایکس کمال تشکر و قدردانی را نمایند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]

مراجع

[1] D. Reale and G. Fornaro, "SAR tomography for 3D reconstruction and monitoring," in Encyclopedia of Earthquake Engineering, pp. 1-16, 2014, doi: 10.1007/978-3-642-36197-5.

[2] G. Fornaro, F. Serafino, and F. Soldovieri, "Three-dimensional focusing with multipass SAR data," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 3, pp. 507-517, 2003, doi: 10.1109/TGRS.2003.809934.

[3] F. Baselice, A. Budillon, G. Ferraioli, and V. Pascazio, "Layover solution in SAR imaging: A statistical approach," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 6, no. 3, pp. 577-581, 2009, doi: 10.1109/LGRS.2009.2021489.

[4] F. Lombardini and M. Pardini, "3-D SAR tomography: the multibaseline sector interpolation approach," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 5, no. 4, pp. 630-634, 2008, doi: 10.1109/LGRS.2008.2001283.

[5] D. Reale, G. Fornaro, A. Pauciullo, X. Zhu, N. Adam, and R. Bamler, "Advanced techniques and new high resolution SAR sensors for monitoring urban areas," in IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 1800-1803, 2010, doi: 10.1109/IGARSS.2010.5652309.

[6] G. Fornaro and F. Serafino, "Imaging of single and double scatterers in urban areas via SAR tomography," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 44, no. 12, pp. 3497-3505, 2006, doi: 10.1109/TGRS.2006.881748.

[7] G. Fornaro, F. Serafino, and D. Reale, "4-D SAR imaging: The case study of Rome," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 7, no. 2, pp. 236-240, 2010, doi: 10.1109/LGRS.2009.2032133.

[8] X. X. Zhu and R. Bamler, "Very high resolution spaceborne SAR tomography in urban environment," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 12, pp. 4296-4308, 2010, doi: 10.1109/TGRS.2010.2050487.

[9] S. Guillaso and A. Reigber, "Scatterer characterisation using polarimetric SAR tomography," in Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), , vol. 4, 2005, pp. 2685-2688, doi: 10.1109/IGARSS.2005.1525619.

[10] L. Ferro-Famil, Y. Huang, and E. Pottier, "Principles and applications of polarimetric SAR tomography for the characterization of complex environments," in VIII Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy, pp. 243-255, 2016, doi: https://doi.org/10.1007/1345-2015-12.

[11] L. Wei, T. Balz, K. Liu, and M. Liao, "Three dimension SAR tomography in SHANGHAI using high resolution spaceborne SAR data," in Fringe 2011, vol. 697, pp. 1-5, 2012.

[12] P. Piau, "Performances of the 3D-SAR imagery," in Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), vol. 4, pp. 2267-2271, 1994, doi: 10.1109/IGARSS.1994.399710.

[13] P. Pasquali et al., "A 3-D SAR experiment with EMSL data," in International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), vol. 1, pp. 784-786, 1995, doi: 10.1109/IGARSS.1995.520585.

[14] A. Reigber and A. Moreira, "First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 5, pp. 2142-2152, 2000, doi: 10.1109/36.868873.

[15] Y. Huang, L. Ferro-Famil, and A. Reigber, "Polarimetric SAR tomography of natural environments using hybrid spectral estimators," in IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 146-149, 2010, doi: 10.1109/IGARSS.2010.5653918.

[16] E. Aguilera, M. Nannini, A. Reigber, "Wavelet-based compressed sensing for SAR tomography of forested areas," 9th European Conference on Synthetic

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]

Aperture Radar, pp. 5283–5295, 2012, doi: 10.1109/TGRS.2012.2231081.

[17] X. Zhu, "Very high resolution tomographic SAR inversion for urban infrastructure monitoring—a sparse and nonlinear tour," Technische Universität München, 2011.

[18] L. Wei, T. Balz, M. Liao, and L. Zhang, "TerraSAR-X StripMap data interpretation of complex urban scenarios with 3D SAR tomography," Journal of Sensors, vol. 2014, 2014.

[19] A. Luckman and W. Grey, "Urban building height variance from multibaseline ERS coherence," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 9, pp. 2022-2025, 2003, doi: 10.1109/TGRS.2003.815236.

[20] S. Sauer, L. Ferro-Famil, A. Reigber, and E. Pottier, "Three-dimensional imaging and scattering mechanism estimation over urban scenes using dual-baseline polarimetric InSAR observations at L-band," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, no. 11, pp. 4616-4629, 2011, doi: 10.1109/TGRS.2011.2147321.

[21] L. C. Godara, "Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations," Proceedings of the IEEE, vol. 85, no. 8, pp. 1195-1245, 1997, doi: 10.1109/5.622504.

[22] V. Cazcarra-Bes, M. Tello-Alonso, R. Fischer, M. Heym, K. Papathanassiou, "Monitoring of forest structure dynamics by means of L-band SAR tomography," Remote Sensing, vol. 9(12), pp. 1-22, 2017, doi: 10.3390/rs9121229.

[23] Y. Huang, L. Ferro-Famil, A. Reigber, "Under-foliage object imaging using SAR tomography and polarimetric spectral estimators," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 50, pp. 2213–2225, 2012, doi: 10.1109/TGRS.2011.2171494.

[24] Xing Peng, Xinwu Li, Changcheng Wang, Haiqiang Fu, and Yanan Du, "A maximum likelihood based nonparametric iterative adaptive method of synthetic aperture radar tomography and its application for estimating underlying topography and forest height,", Sensors, vol. 18(8), 2018, doi: 10.3390/s18082459.

[25] Xing Peng, Changcheng Wang, Xinwu Li, Yanan Du, Haiqiang Fu, Zefa Yang, and Qinghua Xie, "Three-dimensional structure inversion of buildings with nonparametric iterative adaptive approach using SAR tomography", Remote Sensing, vol. 10(7), pp. 1-17, 2018, doi: 10.3390/rs10071004.

[26] Huiming Chai and Xiaolei Lv, "SAR tomography for point-like and volumetric scatterers using a regularised iterative adaptive approach", Remote Sensing Letters, vol. 9, pp. 1060-109, 2018, doi:10.1080/2150704X.2018.1508911.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.9 No.3, Autumn 2021

Research Paper

Determination of the height of urban buildings based on non-parametric estimation of signal spectrum in SAR data tomography

Mehrnoosh Omati[1]*, Mahmood Reza Sahebi[2], Hossein Aghababaei [3]

1- Ph.D. Student of Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology
2- Associate Professor of Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology
3- Assistant Professor of Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Department of Earth Observation Science (EOS), University of Twente.

Abstract

Nowadays, the TomoSAR technique has been able to overcome the limitations of radar interferometry techniques in separating multiple scatterers of pixels by extending the principles of virtual aperture in the elevation direction and it has received a lot of attention in the analysis of the challenging urban areas. Despite the expectation of the cooperation of the different scattering components of buildings with different heights, wall and ceiling levels, ground, or tree trunks, the TomoSAR technique enables the retrieval of reflectivity function along elevation direction by applying a stack of images taken from different angles and analyzing the signal spectrum of all the image pixels in the two dimensional direction of Range and Azimoth. In this research, the capability of a new non-parametric method of signal spectrum estimation in the analysis of the third dimension of buildings in urban areas is investigated. By searching for coefficients of the automatic regression model in order to maximize the signal entropy and also separating the different noise levels, the proposed efficient estimator of the maximum entropy has been able to provide good performance in reconstructing three-dimensional information from the urban area. The implementation of the proposed algorithm by using 19 TerraSAR-X satellite images in the study of the third-millennium tower in Tehran with a height of 120 meters and comparing its results with Capon and Beamforming spectral estimation methods, indicates better performance of the proposed method in height reconstruction, the continuity of the reflectivity profile and the elimination of the effects of the side lobes.

Key words: *Tomography Technique, Spectral Estimation Analysis, TerraSAR-X Images, Urban Area.*

Correspondence Address: *No. 1346, ValiAsr Street, Mirdamad cross, Geomatics Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
Tel : *09127273121*
Email : *momati@mail.kntu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.3.1.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.3.25]