

# تصویربرداری رادارهای پلاریمتری از پایه تا کاربرد

تألیف:

جونگ سن لی - اریک پوتیر

ترجمه:

موسی محمدنیا

شهریار رضائیان

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

مؤسسه چاپ و انتشارات

|                     |                                                                                                                      |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه             | لی، جونگ سن (Lee, Jong-Sen)                                                                                          |
| عنوان و پدیدآور     | تصویربرداری رادارهای پلاریمتری از پایه تا کاربرد/ تالیف: جونگ سن لی، اریک پوتیر؛ ترجمه: موسی محمدنیا، شهریار رضائیان |
| مشخصات نشر          | تهران: دانشگاه جامع امام حسین(ع) - مؤسسه چاپ و انتشارات، ۱۳۹۸                                                        |
| مشخصات ظاهری        | شانه: ۵۴۸ ص.                                                                                                         |
| فروست               | دانشگاه جامع امام حسین(ع)، مؤسسه چاپ و انتشارات، ۷۳۸، سری هوافضا - ۱۲                                                |
| شابک                | ۹۷۸-۹۶۴-۴۵۲-۷۹۶-۸                                                                                                    |
| وضعیت فهرست نویسی   | فیبا                                                                                                                 |
| یادداشت             | Polarimetric radar imaging: from basics to applications, 2009                                                        |
| موضوع               | عنوان اصلی:                                                                                                          |
| موضوع               | رادار (Radar)                                                                                                        |
| موضوع               | قطبش سنجی (Polarimetry)                                                                                              |
| موضوع               | امواج رادیویی -- قطبش (Radio waves -- Polarization)                                                                  |
| موضوع               | سنجش از دور (Remote sensing)                                                                                         |
| شناسه افزوده        | پاتیر، اریک (Pottier, Eric)                                                                                          |
| شناسه افزوده        | محمدنیا، موسی، ۱۳۵۰ - مترجم                                                                                          |
| شناسه افزوده        | رضائیان، شهریار، ۱۳۶۵ - مترجم                                                                                        |
| شناسه افزوده        | دانشگاه جامع امام حسین(ع) - مؤسسه چاپ و انتشارات                                                                     |
| رده بندی کنگره      | TK۵۰۰ - ۱۳۹۸                                                                                                         |
| رده بندی دیویی      | ۶۲۱ / ۳۸۴۸                                                                                                           |
| شماره کتابشناسی ملی | ۵۷۱۸۸۸۲                                                                                                              |

کلیه حقوق اعم از چاپ و تکثیر، نسخه برداری، ترجمه و اقتباس برای دانشگاه جامع امام حسین(ع) محفوظ است.

• عنوان: تصویربرداری رادارهای پلاریمتری از پایه تا کاربرد

• تألیف: جونگ سن لی - اریک پوتیر

• ترجمه: موسی محمدنیا - شهریار رضائیان

• صفحه آرای: ناهید آقامیرزایی

• ناظر فنی چاپ: سید محمدباقر موسوی

• نوبت چاپ: اول (مرداد ماه ۱۳۹۸)

• لیتوگرافی، چاپ و صحافی: مرکز چاپ سپاه

• شمارگان: ۲۰۰ نسخه

• قیمت: ۸۰۰/۰۰۰ ریال

• نشانی: تهران، بزرگراه شهید بابایی، بعد از پل لشکرک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، معاونت پژوهش و فناوری،

مؤسسه چاپ و انتشارات، تلفن: ۷۴۱۸۸۲۶۰ دورنگار: ۷۴۱۸۸۲۷۴

• مرکز پخش: تهران، میدان فردوسی، فروشگاه و نمایشگاه مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه جامع امام حسین(ع)،

ترنجستان امام حسین(ع)، تلفن: ۸۸۸۳۹۲۹۷

## سخن ناشر

بسم الله الرحمن الرحيم

«يرفع الله الذين امنوا منكم والذين اوتوا العلم درجات»

خداوند مقام اهل ایمان و دانشمندان عالم را (در دو جهان) رفیع می‌گرداند.

(سوره مبارکه مجادله - آیه ۱۱)

ارزش و جایگاه علم و دانش اندوزی در اسلام تا آن پایه است که خداوند کریم در قرآن مجید، ابلاغ رسالت رسول خود را برای هدایت بشریت، به اقرار آغاز نمود.

هدایت بشر، تکامل، مبادت و تقوی به ذات اقدس الهی در گرو کسب معرفت و تحصیل علم و دانش است، علمی که به تعبیر استاد شهید مطهری، زیبایی عقل است و انسان خداجوی، معبود خود را در آن می‌یابد.

یکی از مسئولیت‌های مهم هر دانشگاه در کنار تعلیم و تربیت، نشر کتب و آثار علمی است. معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه جامع امام حسین(ع) نیز به منظور مشارکت فعال در بالندگی و رشد فرهنگی و علمی جامعه، دستیابی به مرجعیت علمی در حوزه‌های مأموریتی و ایفای رسالت خطیر خود در تولید دانش و انتشار یافته‌های علمی، افتخار و تلاش دارد تا زمینه و بستر لازم را جهت تشویق پژوهشگران و اساتید محترم در عرضه تولید علم، فراهم و تسهیل نماید.

امید است در سایه الطاف بیکران الهی و با گسترش فعالیت‌های انتشاراتی مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه جامع امام حسین(ع)، این رسالت خطیر تحقق یابد.

در پایان بر روح تابناک امام راحل(ره) و شهدای گرانقدر انقلاب اسلامی و دفاع مقدس درود می‌فرستیم و با آرزوی توفیقات هرچه بیشتر مقام معظم رهبری و خدمتگزاران اسلام و کشور، از اساتید، فرهیختگان و اهل نقد و نظر تقاضا داریم با ارائه نظرات و پیشنهادات خود ما را یاری فرمایند.

و من الله التوفیق و علیه التکلان

معاونت پژوهش و فناوری

دانشگاه جامع امام حسین(ع)

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

پیشگفتار..... (پانزده)

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| فصل ۱: مروری بر تصویربرداری رادار پلاریمتری.....        | ۱  |
| ۱-۱- تاریخچه مختصری از تصویربرداری رادار پلاریمتری..... | ۳  |
| ۱-۱-۱- مقدمه.....                                       | ۳  |
| ۱-۱-۲- توسعه رادار تصویربرداری.....                     | ۵  |
| ۱-۱-۳- توسعه سیستم تصویربرداری رادار پلاریمتری.....     | ۶  |
| ۱-۱-۴- آموزش تصویربرداری رادار پلاریمتری.....           | ۹  |
| ۲-۱- تشکیل تصویر SAR: به صورت خلاصه.....                | ۱۰ |
| ۲-۱-۱- مقدمه.....                                       | ۱۰ |
| ۲-۱-۲- ساختار هندسی SAR.....                            | ۱۲ |
| ۲-۱-۳- قدرت تفکیک مکانی SAR.....                        | ۱۵ |
| ۲-۱-۴- پردازش تصاویر SAR.....                           | ۱۷ |
| ۲-۱-۵- تصویر مختلط SAR.....                             | ۱۹ |
| ۳-۱- سیستم‌های SAR پلاریمتری هواپرد و فضاپرد.....       | ۲۳ |
| ۳-۱-۱- مقدمه.....                                       | ۲۳ |
| ۳-۱-۲- سیستم‌های SAR هواپرد.....                        | ۲۵ |
| ۳-۱-۳- سیستم‌های SAR پلاریمتری فضاپرد.....              | ۳۳ |
| ۴-۱- تعریف فصل‌ها.....                                  | ۳۹ |
| مراجع.....                                              | ۵۰ |

فصل ۲: موج‌برداری الکترومغناطیس و توصیف‌گرهای پلاریواسیون..... ۵۴

۲-۱- موج تخت الکترومغناطیس تک‌فام..... ۵۶

۲-۱-۱- معادله انتشار..... ۵۶

|     |                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------|
| ۵۷  | ۲-۱-۲- جواب موج صفحه‌ای تکفام                         |
| ۶۱  | ۲-۲- بیضی پلاریزاسیون                                 |
| ۶۵  | ۳-۲- بردار جوتر                                       |
| ۶۵  | ۲-۳-۱- تعریف                                          |
| ۶۵  | ۲-۳-۲- گروه یک‌ه ویزه (2) SL                          |
| ۶۷  | ۳-۳-۲- حالات پلاریزاسیون متعامد و میناهای پلاریزاسیون |
| ۶۹  | ۴-۳-۲- تغییر مبنای پلاریمتری                          |
| ۷۲  | ۴-۲- بردار استوکس                                     |
| ۷۲  | ۲-۴-۱- نمایش واقعی یک بردار موج صفحه‌ای               |
| ۷۶  | ۲-۴-۲- گروه یک‌ه ویزه (3) O                           |
| ۷۷  | ۵-۲- ماتریس کواریانس موج                              |
| ۷۸  | ۲-۵-۱- درجه پلاریزاسیون موج                           |
| ۸۰  | ۲-۵-۲- اهمیت‌انگیزی بی‌نظمی موج                       |
| ۸۳  | ۲-۵-۳- تئوری دوگانگی موج جزئی پلاریزه                 |
| ۸۶  | مراجع                                                 |
| ۸۹  | فصل ۳: عملگرهای پراکنش بردار الکترومغناطیس            |
| ۸۹  | ۱-۲- ماتریس Sinclair (S) بازپراکنش پلاریمتری          |
| ۸۹  | ۳-۱-۱- معادله رادار                                   |
| ۹۳  | ۳-۱-۲- ماتریس پراکنش                                  |
| ۱۰۱ | ۳-۱-۳- چارچوب مختصات پراکنش                           |
| ۱۰۳ | ۳-۲- بردارهای تارگت پراکنش $k$ و $\Omega$             |
| ۱۰۳ | ۳-۱-۲- مقدمه                                          |
| ۱۰۴ | ۳-۲-۲- حالت پراکنش دوسکویه                            |
| ۱۰۵ | ۳-۲-۳- حالت پراکنش تک‌سکویه                           |
| ۱۰۷ | ۳-۲- ماتریس‌های همدوسی T و کواریانس C پلاریمتری       |
| ۱۰۷ | ۳-۱-۳- مقدمه                                          |
| ۱۰۷ | ۳-۲-۳- حالت پراکنش دوسکویه                            |
| ۱۰۹ | ۳-۲-۳- حالت بازپراکنش تک‌سکویه                        |

|     |                                               |
|-----|-----------------------------------------------|
| ۱۱۱ | ۴-۳-۳- خصوصیت‌های تقارن پراکنشی               |
| ۱۱۶ | ۵-۳-۳- تجزیه بردار ویژه / مقدار ویژه          |
| ۱۱۷ | ۴-۳- ماتریس‌های پلاریمتری مولر $M$ و کناف $K$ |
| ۱۱۷ | ۱-۴-۳- مقدمه                                  |
| ۱۱۸ | ۲-۴-۳- حالت پراکنش تک سکویه                   |
| ۱۲۳ | ۳-۴-۳- حالت پراکنش دوسکویه                    |
| ۱۲۶ | ۵-۳- تغییر میناهای پلاریمتری                  |
| ۱۲۶ | ۱-۵-۳- ماتریس بازپراکنش تک سکویه $S$          |
| ۱۳۰ | ۳-۵-۳- ماتریس همدوسی پلاریمتری $T$            |
| ۱۳۱ | ۳-۵-۳- ماتریس کواریانس پلاریمتری $C$          |
| ۱۳۲ | ۴-۵-۳- ماتریس کناف پلاریمتری $K$              |
| ۱۳۳ | ۶-۳- توصیف پلاریمتری تارگت                    |
| ۱۳۳ | ۱-۶-۳- مقدمه                                  |
| ۱۳۵ | ۲-۶-۳- حالت‌های پلاریمتری و ویژگی تارگت       |
| ۱۳۸ | ۳-۶-۳- قطری‌سازی ماتریس $K$                   |
| ۱۴۲ | ۴-۶-۳- مکانیسم‌های پراکنش متداول              |
| ۱۵۰ | مراجع                                         |

#### فصل ۴: آمار اسپکل SAR پلاریمتری

|     |                                                      |
|-----|------------------------------------------------------|
| ۱۵۵ | ۱-۴- ویژگی بنیادی اسپکل در تصاویر SAR                |
| ۱۵۸ | ۱-۱-۴- تشکیل اسپکل                                   |
| ۱۵۷ | ۲-۱-۴- مدل اسپکل ریلی                                |
| ۱۶۱ | ۲-۴- آمار اسپکل برای تصاویر SAR پردازش شده چند منظری |
| ۱۶۶ | ۳-۴- مدل بافت و توزیع $K$                            |
| ۱۶۷ | ۱-۳-۴- توزیع $K$ شدت $N$ -منظری نرمال شده            |
| ۱۶۶ | ۲-۳-۴- توزیع $K$ دامنه $N$ -منظری نرمال شده          |
| ۱۶۸ | ۴-۴- تأثیر همبستگی مکانی اسپکل                       |
| ۱۶۹ | ۱-۴-۴- تعداد معادل منظرها                            |
| ۱۷۰ | ۵-۴- آمار اسپکل SAR پلاریمتری و اینترفرومتری         |
| ۱۷۳ | ۱-۵-۴- توزیع گوسی مختلط و توزیع ویشارت مختلط         |

|     |                                                                   |
|-----|-------------------------------------------------------------------|
| ۱۷۶ | ۲-۵-۴- شیه‌سازی مونت کارلوی داده SAR پلاریمتری                    |
| ۱۷۷ | ۳-۵-۴- راستی آزمایی فروش آیند شیه‌سازی                            |
| ۱۷۷ | ۴-۵-۴- ضریب همبستگی مختلط                                         |
| ۱۷۷ | ۶-۴- توزیع‌های اختلاف فاز داده SAR پلاریمتری تک منظری و چند منظری |
| ۱۸۱ | ۴-۶-۱- شکل جایگزین توزیع اختلاف فاز                               |
| ۱۸۴ | ۴-۷- توزیع ضریبی چند منظری                                        |
| ۱۸۶ | ۴-۸- توزیع مشترک $ S_1 ^2$ و $ S_2 ^2$ چند منظری                  |
| ۱۸۷ | ۴-۹- توزیع‌های نسبت دامنه و شدت چند منظری                         |
| ۱۸۸ | ۴-۱۰- ارزیابی PDFهای چند منظری                                    |
| ۱۹۸ | ۴-۱۱- توزیع K برای داده‌های پلاریمتری چند منظری                   |
| ۲۰۰ | ۴-۱۲- خلاصه                                                       |
| ۲۰۸ | مراجع                                                             |

|     |                                                                         |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|
| ۲۱۱ | فصل ۵: فیلترینگ اسپیکل SAR پلاریمتری                                    |
| ۲۱۳ | ۵-۱- مقدمه‌ای بر فیلترینگ اسپیکل تصویربرداری SAR                        |
| ۲۱۷ | ۵-۱-۱- مدل نویز اسپیکل                                                  |
| ۲۱۹ | ۵-۲- فیلترینگ داده SAR تک پلاریزاسیون                                   |
| ۲۲۵ | ۵-۲-۱- فیلتر مربع میانگین متینم                                         |
| ۲۲۷ | ۵-۲-۲- فیلترینگ اسپیکل با یک پنجره در امتداد لبه: فیلتر بهبود یافته Lee |
| ۲۲۹ | ۵-۳- مروری بر الگوریتم‌های فیلترینگ اسپیکل چند پلاریزاسیون              |
| ۲۳۳ | ۵-۳-۱- فیلتر وزن دار پلاریمتری                                          |
| ۲۳۶ | ۵-۳-۲- توسعه PWF به یک داده پلاریمتری چند منظری                         |
| ۲۳۷ | ۵-۳-۳- فیلتر وزن دهی بهینه                                              |
| ۲۳۹ | ۵-۴-۱- فیلترینگ اسپیکل برداری                                           |
| ۲۳۹ | ۵-۴-۲- فیلترینگ اسپیکل SAR پلاریمتری                                    |
| ۲۴۲ | ۵-۴-۱- اصول فیلترینگ اسپیکل SAR                                         |
| ۲۴۳ | ۵-۴-۲- فیلتر اسپیکل POLSAR بهبود یافته Lee                              |
| ۲۴۷ | ۵-۴-۳- اعمال تکنیک رشد ناحیه برای فیلترینگ اسپیکل POLSAR                |
| ۲۴۹ | ۵-۵- فیلتر اسپیکل POLSAR مدل- مبنای پراکنش                              |

|     |                                  |
|-----|----------------------------------|
| ۲۵۷ | ۵-۵-۱- اثبات و ارزیابی           |
| ۲۵۸ | ۵-۵-۲- کاهش اسپکل                |
| ۲۵۹ | ۵-۵-۳- حفظ مکانیسم پراکنش غالب   |
| ۲۵۹ | ۵-۵-۴- حفظ امضاهای تارگت نقطه‌ای |
| ۲۶۵ | مراجع                            |

## فصل ۶: مقدمه‌ای بر مفهوم تجزیه تارگت پلاریمتری

|     |                                         |
|-----|-----------------------------------------|
| ۲۶۷ | ۶-۱- مقدمه                              |
| ۲۷۳ | ۶-۲- دوگانگی ماتریس کناف $K$            |
| ۲۷۳ | ۶-۲-۱- پدیده شناسی تجزیه Huynen         |
| ۲۷۹ | ۶-۲-۲- تجزیه Barnes-Holm                |
| ۲۸۳ | ۶-۲-۳- تجزیه Yang                       |
| ۲۸۵ | ۶-۲-۴- تفسیر تجزیه دوگانگی تارگت        |
| ۲۸۷ | ۶-۳- تجزیه‌های بر مبنای بودار و بده     |
| ۲۸۷ | ۶-۳-۱- تجزیه Cloude                     |
| ۲۹۳ | ۶-۳-۲- تجزیه‌های Holm                   |
| ۲۹۵ | ۶-۳-۳- تجزیه Van Zyl                    |
| ۲۹۷ | ۶-۴- تجزیه‌های مدل - مبنا               |
| ۲۹۷ | ۶-۴-۱- تجزیه سه مؤلفه‌ای Freeman-Durden |
| ۳۰۴ | ۶-۴-۲- تجزیه چهار مؤلفه‌ای Yamaguchi    |
| ۳۰۷ | ۶-۴-۳- تجزیه دو مؤلفه‌ای Freeman        |
| ۳۱۴ | ۶-۵- تجزیه‌های همدوس                    |
| ۳۱۴ | ۶-۵-۱- مقدمه                            |
| ۳۱۵ | ۶-۵-۲- تجزیه Pauli                      |
| ۳۱۷ | ۶-۵-۳- تجزیه Krogager                   |
| ۳۱۹ | ۶-۵-۴- تجزیه Cameron                    |
| ۳۲۷ | ۶-۵-۵- تجزیه یلار                       |
| ۳۲۹ | مراجع                                   |

## پیشگفتار

آفرینش همه تنبیه خداوند دل است      دل ندارد که ندارد به خداوند اقرار  
این همه نقش عجب بر درودیوار وجود      هر که فکر نکند نقش بود بر دیوار

با توجه به پیشرفت‌های روزافزون علم سنجش‌ازدور، نیاز شاخه‌های مختلف علوم به این تکنولوژی به سرعت در حال افزایش است. توسعه این علم و هم‌زمان نیاز به این تکنولوژی باعث شده تا سنجنده‌های مختلف و بیش‌تری در سکوهاى هوایی و فضایی مورد استفاده قرار گیرند و محققان علاقمند بسیاری در این زمینه فعالیت کنند. سنجنده‌های سنجش‌ازدور را می‌توان بر اساس طول موج مورد استفاده به دو بخش کلی اپتیکی و راداری طبقه‌بندی کرد که در این بین سنجش از دور راداری با توجه به توانایی‌های ویژه آن مانند توانایی تصویربرداری در هر شرایط آب‌وهوایی و در هر ساعت از شبانه روز، دارای کاربردهای فراوان در کسب اطلاعات سنجش‌ازدوری می‌باشد.

در طی شصت سال گذشته با فعالیت کارشناسان و محققانی از سراسر دنیا، سنجش از دور رادار پلاریمتری در یک مسیر ناهموار از تشخیص تارگت به سمت استخراج اطلاعات دقیق‌تر و جزئی‌تر با استفاده از روش‌های فیزیکی و ریاضی و تصویربرداری الکترومغناطیس برداری حرکت کرده است به‌طوری که اصول مورد استفاده در این زمینه برای اولین بار با استفاده از نتایج تصاویر پلاریمتری NASA-JPL AIRSAR مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آن زمان نوشته‌ها، تألیفات و مقالات علمی نامتمرکز زیادی به همت محققان تالیف و گردآوری شد. لذا جهت گردآوری و متمرکز کردن اصول این فناوری، کتاب "تصویربرداری رادار پلاریمتری" به زبان انگلیسی توسط محققان برجسته این علم یعنی آقایان لی<sup>۱</sup> و پاتیر<sup>۲</sup> تالیف گردید. کتاب حاضر کلیه مباحث مربوط به سنجش از دور راداری را پوشش داده و در کنار این مباحث، کاربردهای سنجش از دور پلاریمتری راداری را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. به‌طوری که بعد از بررسی، ساختار و هندسه سنجنده‌های طراحی شده و مورد استفاده در این زمینه معرفی

1. Jong Sen Lee

2. Eric Pottier

می‌شود و سپس مبانی ریاضی و امواج الکترومغناطیسی تعریف می‌گردند. نحوه تشکیل تصاویر راداری پلاریمتری و خطاهای ذاتی موجود در این فرآیند و روش‌های حذف این خطاها بررسی شده و اصول، الگوریتم‌ها و روش‌های تجزیه هدف و استخراج اطلاعات نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند. مفاهیم گسترده‌تر و پیشرفته‌تری از سنجش از دور راداری یعنی سنجش از دور راداری پلاریمتری - اینترفرومتری که در سال‌های اخیر توسعه داده شده‌اند نیز معرفی شده و کاربردهای ویژه آن‌ها نیز بررسی گردیده و در نهایت کاربردهای خاص پلاریمتری راداری و عوامل مؤثر بر این موارد نیز به طور مفصل بررسی می‌شود.

هم‌زمان با پیشرفت علم و تکنولوژی سنجش از دور راداری، محققان کشورمان نیز در این حوزه احساس نیاز کرده و تحقیقات فراوان و ارزشمندی در سطوح دانشگاهی و صنعتی انجام داده‌اند. با این حال خلاء کتاب‌های مرجع و جامع سنجش از دور راداری به زبان فارسی همواره یکی از مشکلات اساسی محققان و دانشجویان بوده است. به رغم اینکه کتاب‌های اندک تألیف شده به زبان فارسی که کتب ارزشمندی نیز هستند و سعی داشته‌اند تا کیفیت مطالب را حفظ کنند، متأسفانه جامعیت لازم را ندارند. لذا تصمیم بر آن شد که یکی از معتبرترین و پرمخاطب‌ترین کتاب‌های سنجش از دور راداری ترجمه شده و در اختیار محققان قرار گیرد.

وظیفه خود می‌دانیم که از تمامی بزرگوارانی که در زمینه ترجمه این کتاب ما را یاری فرمودند از جمله جناب آقای محسن اسمعیل‌نژاد که بی‌اندون زحمات ایشان ترجمه کتاب مذکور ممکن نبود و همچنین جناب آقای سید اویس پیغمبرزاده که ما را در امر ویراستاری کتاب بسیار یاری نمودند تشکر و قدردانی به عمل آوریم. در ترجمه و تألیف این کتاب سعی بر آن شد که مباحث و مطالب به‌طور دقیق و علمی ارائه شود و هیچ جای ابهامی در این اثر باقی نماند اما بی شک ترجمه این اثر خالی از لغزش و خطا نخواهد بود که امیدواریم خوانندگان و محققان فرهیخته این اشکالات را به دیده اغماض بنگرند. با این حال از تمامی نظرات کارشناسانه و سازنده خوانندگان عزیز استقبال نموده و کمال تشکر و قدردانی از این عزیزان را داریم.

با تشکر و سپاس

موسی محمدنیا - شهریار رضائیان