

سورة الاحقاف

مبانی سنجش از دور راداری

دکتر یاسر مقصودی

عضو هیات علمی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

با همکاری

مهندس ساحل مهدوی

دانشگاه مموریال کانادا

سرشناسه	: مقصودی، یاسر، ۱۳۵۹ -
عنوان و نام پدیدآور	: مبنای سنجش از دور راداری/ یاسر مقصودی؛ با همکاری ساحل مهدوی.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، انتشارات، ۱۳۹۴
مشخصات ظاهری	: ع، ۲۸۷ ص.: مصور (بخشی رنگی)، جدول، نمودار.
شابک	: 978-600-7867-13-6
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: واژه نامه.
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۲۷۴ - ۲۸۷.
موضوع	: رادار
موضوع	: سنجش از دور
شناسه افزوده	: مهدوی، ساحل، ۱۳۶۹ -
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۴ م۷م/TK6۵۷۵
رده بندی دیویی	: ۶۲۱/۳۸۴۸
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۰۳۳۳۴۳

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  <http://publication.kntu.ac.ir>

نام کتاب: مبنای سنجش از دور راداری

تألیف: دکتر یاسر مقصودی، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه

صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ساحل مهدوی

نوبت چاپ: اول

تاریخ چاپ: آذرماه ۱۳۹۴

تیراژ: ۵۰۰ جلد

قیمت: ۲۲۰۰۰ تومان

کد کتاب: ۳۹۹

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۸۶۷-۱۳-۶ ISBN: 978-600-7867-13-6

صحافی: گرنامی چاپ و لیتوگرافی: چاپ اول

آدرس و تلفن مرکز پخش و فروش: خیابان ولیعصر(عج)، بالاتر از میدان ونک، تقاطع

میرداماد، روبروی ساختمان اسکان (۰۲۱-۸۸۷۷۲۲۷۷)

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	ظ
بخش اول اصول و مبانی پایه.....	۱
۱- فصل اول: مقدمه.....	۳
۱-۱- مقدمه.....	۳
۲-۱- سنجش از دور راداری.....	۵
۳-۱- ساختار کتاب.....	۶
۲- فصل دوم: مبانی و اصول سیستم‌های راداری.....	۹
۱-۲- مقدمه.....	۹
۲-۲- ویژگی‌های یک سیگنال راداری.....	۹
۱-۲-۲- موج الکترومغناطیس.....	۹
۲-۲-۲- طیف الکترومغناطیسی.....	۱۰
۳-۲-۲- امواج ماکروویو.....	۱۱
۴-۲-۲- پلاریزاسیون.....	۱۲
۵-۲-۲- فاز موج.....	۱۳
۶-۲-۲- عدد موج.....	۱۴
۳-۲- هندسه‌ی تصویربرداری راداری.....	۱۴
۴-۲- انواع خطا در سیستم‌های راداری.....	۱۷
۱-۴-۲- خطای مقیاس در جهت رنج.....	۱۸
۲-۴-۲- خطاهای جابجایی ارتفاعی.....	۱۹
۳-۴-۲- خطای اسپکل.....	۲۲
۵-۲- معادله رادار.....	۲۴
۱-۵-۲- معادله رادار برای اهداف نقطه‌ای.....	۲۵
۲-۵-۲- معادله رادار اهداف توزیع یافته.....	۲۹
۶-۲- سوالات.....	۳۱
۳- فصل سوم: تصویربرداری سیستم‌های راداری.....	۳۳
۱-۳- مقدمه.....	۳۳
۲-۳- قدرت تفکیک مکانی در جهت رنج و آزیموت.....	۳۳
۱-۲-۳- قدرت تفکیک مکانی در جهت رنج.....	۳۵
۱-۱-۲-۳- فشردگی‌سازی پالس.....	۳۷

- ۴۳-۲-۲-۳- قدرت تفکیک مکانی در جهت آزیموت.....
- ۴۴-۲-۲-۳-۱- رادار با روزهی مجازی (SAR).....
- ۴۶-۲-۲-۳-۲- اساس ریاضی سیستم‌های SAR.....
- ۵۰-۳-۳- فرکانس تکرار پالس (PRF).....
- ۵۱-۴-۳- حالت‌های تصویربرداری در سنجنده‌های راداری.....
- ۵۲-۳-۴-۱- حالت تصویربرداری نواری.....
- ۵۲-۳-۴-۲- حالت تصویربرداری پوششی.....
- ۵۳-۳-۴-۳- حالت تصویربرداری متمرکز.....
- ۵۳-۳-۵- سوالات.....
- ۵۵-۴- فصل چهارم: اسپکل.....
- ۵۵-۴-۱- مقدمه.....
- ۵۵-۴-۲- تعریف اسپکل و علت به وجود آمدن آن.....
- ۵۹-۴-۳- مدل داده‌های راداری.....
- ۶۰-۴-۳-۱- توزیع بخش حقیقی (جزء همفاز) و موهومی تصویر (جزء متعامد).....
- ۶۲-۴-۳-۲- توزیع دامنه.....
- ۶۴-۴-۳-۳- توزیع فاز.....
- ۶۵-۴-۳-۴- توزیع شدت.....
- ۶۷-۴-۳-۵- توزیع اسپکل.....
- ۶۷-۴-۴- روش‌های کاهش اسپکل.....
- ۶۸-۴-۴-۱- چندمنظرسازی.....
- ۷۲-۴-۴-۲- استفاده از فیلترهای مکانی.....
- ۷۴-۴-۴-۱- فیلتر لی.....
- ۷۶-۴-۴-۲- فیلتر تصحیح‌شده‌ی لی.....
- ۷۸-۴-۴-۳- فیلتر کوان.....
- ۷۸-۴-۴-۴- فیلتر فراست.....
- ۷۸-۴-۴-۵- بهبود فیلترهای اسپکل توسط لویز و همکارانش.....
- ۸۰-۴-۴-۶- فیلتر گاما.....
- ۸۷-۴-۴-۳- مقایسه روش چندمنظرسازی و فیلترهای مکانی.....
- ۸۸-۴-۴-۴- ارزیابی کیفیت رادیومتریک تصویر راداری.....
- ۹۰-۴-۵- سوالات.....

۹۳	۵- فصل پنجم: تفسیر تصاویر راداری.....
۹۳	۵-۱- مقدمه.....
۹۴	۵-۲- عوامل تأثیرگذار در بازپراکنش راداری.....
۹۴	۵-۲-۱- پارامترهای هدف.....
۹۴	۵-۲-۱-۱- زبری سطح.....
۹۹	۵-۲-۱-۲- ضریب دیالکتریک.....
۱۰۳	۵-۲-۱-۳- شکل ، اندازه و توجیه.....
۱۰۴	۵-۲-۱-۴- زاویه فرود محلی.....
۱۰۵	۵-۲-۲- پارامترهای سیستم.....
۱۰۵	۵-۲-۲-۱- طول موج.....
۱۰۹	۵-۲-۲-۲- زاویه فرود.....
۱۱۰	۵-۲-۲-۳- پلاریزاسیون.....
۱۱۳	۵-۲-۲-۴- جهت دید.....
۱۱۴	۵-۳- انواع مکانیزم‌های بازپراکنش.....
۱۱۵	۵-۳-۱- پراکنش سطحی.....
۱۱۶	۵-۳-۲- پراکنش حجمی.....
۱۱۶	۵-۳-۳- پراکنش از اهداف سخت.....
۱۱۸	۵-۴- تأثیر عوامل محیطی روی بازپراکنش راداری.....
۱۱۸	۵-۴-۱- رطوبت خاک.....
۱۱۹	۵-۴-۲- رطوبت سطح.....
۱۱۹	۵-۴-۲-۱- باران.....
۱۲۰	۵-۴-۲-۲- شبنم.....
۱۲۱	۵-۴-۲-۳- مه.....
۱۲۱	۵-۴-۳- دما.....
۱۲۲	۵-۴-۴- برف.....
۱۲۳	۵-۴-۵- سیلاب.....
۱۲۳	۵-۴-۶- باد و طوفان.....
۱۲۴	۵-۴-۷- برفک و یخ.....
۱۲۴	۵-۴-۸- تغییرات روزانه و فصلی ضریب دی‌الکتریک.....
۱۲۵	۵-۵- بازپراکنش از برخی عوارض طبیعی و مصنوعی.....
۱۲۷	۵-۶- سوالات.....

۱۲۹	بخش دوم مباحث پیشرفته.....
۱۳۱	۶- فصل ششم: مبانی پلاریمتری راداری
۱۳۱	۶-۱- مقدمه
۱۳۲	۶-۲- مفاهیم پایه
۱۳۲	۶-۲-۱- امواج الکترومغناطیس
۱۳۵	۶-۲-۲- بیضی پلاریزاسیون
۱۳۹	۶-۲-۳- بردار جونز
۱۴۰	۶-۲-۴- بردار استوکس
۱۴۲	۶-۲-۵- پارامترهای استوکس و میزان پلاریزاسیون موج
۱۴۳	۶-۲-۶- کره‌ی پونکر
۱۴۴	۶-۳- توصیفگرهای پلاریمتریک
۱۴۴	۶-۳-۱- ماتریس پراکندگی
۱۴۶	۶-۳-۲- بردارهای پراکندگی
۱۴۷	۶-۳-۱-۲- بردار تارگت پائولی
۱۴۷	۶-۳-۲-۲- بردار تارگت لکسیکوگرافیک
۱۴۷	۶-۳-۳- ماتریس همدوسی و ماتریس کوواریانس
۱۴۸	۶-۳-۳-۱- ماتریس کوواریانس
۱۴۹	۶-۳-۳-۲- ماتریس همدوسی
۱۵۰	۶-۴- تغییر پایه پلاریزاسیون
۱۵۱	۶-۴-۱- امضای پلاریمتری
۱۵۲	۶-۴-۲- امضای پلاریمتری مکانیزم‌های استاندارد پراکنش
۱۵۲	۶-۴-۲-۱- سه‌وجهی، صفحه تخت، کره
۱۵۳	۶-۴-۲-۲- دو قطبی
۱۵۵	۶-۴-۲-۳- دوسطحی
۱۵۶	۶-۴-۲-۴- مارپیچ
۱۵۷	۶-۵- الگوریتم‌های تجزیه هدف
۱۵۹	۶-۵-۱- تجزیه تارگت PAULI
۱۶۱	۶-۵-۲- تجزیه تارگت KROGAGER
۱۶۴	۶-۵-۳- تجزیه $H/\alpha/A$
۱۶۷	۶-۶- سوالات

۱۷۰	۷- فصل هفتم: تداخل سنجی راداری
۱۷۰	۱-۷- مقدمه
۱۷۱	۲-۷- هندسه تصویربرداری سه بعدی در تداخل سنجی
۱۷۲	۱-۲-۷- خط مبنای مکانی
۱۷۴	۲-۲-۷- خط مبنای زمانی
۱۷۵	۳-۲-۷- خط مبنای ترکیبی
۱۷۵	۳-۷- اندازه‌گیری ارتفاع زمین در هندسه تداخل سنجی راداری
۱۷۶	۱-۳-۷- دقت ارتفاعی حاصل از محاسبه ارتفاع با استفاده از مقادیر فاصله
۱۷۷	۲-۳-۷- دقت ارتفاعی حاصل از محاسبه ارتفاع با استفاده از مقادیر فاز
۱۸۱	۴-۷- تداخل نما
۱۸۲	۱-۴-۷- انتخاب تداخل نما
۱۸۵	۲-۴-۷- اصلاح فاز تداخل نما و حذف عوامل مزاحم
۱۸۶	۱-۲-۴-۷- تصحیح فاز ناشی از توپوگرافی زمین
۱۸۷	۲-۲-۴-۷- تصحیح فاز ناشی از زمین مسطح
۱۹۱	۳-۲-۴-۷- فاز ناشی از نویز
۱۹۱	۴-۲-۴-۷- فاز ناشی از اثرات اتمسفر
۱۹۲	۵-۲-۴-۷- فاز ناشی از اثرات مداری
۱۹۲	۳-۴-۷- باز بحرانی
۱۹۴	۴-۴-۷- باز یابی فاز
۱۹۸	۵-۷- مروری بر تکنیک‌های متداول تداخل سنجی راداری
۱۹۹	۱-۵-۷- تکنیک تداخل سنجی تفاضلی به روش سنتی
۱۹۹	۱-۱-۵-۷- تولید تداخل نماها
۲۰۰	۲-۱-۵-۷- انتخاب تداخل نماها
۲۰۱	۳-۱-۵-۷- تصحیح فاز تداخل نما
۲۰۱	۴-۱-۵-۷- سرشکنی و محاسبه فاز تصاویر
۲۰۲	۵-۱-۵-۷- حل دستگاه معادلات با شرط اضافی
۲۰۲	۲-۵-۷- تکنیک پراکنش گرهای دائمی
۲۰۴	۱-۲-۵-۷- انتخاب تصویر پایه
۲۰۵	۲-۲-۵-۷- انتخاب نقاط پراکنشگر دائمی کاندیدا
۲۰۶	۳-۲-۵-۷- مبانی ریاضی تکنیک پراکنشگرهای دائمی
۲۰۸	۶-۷- سوالات

- بخش سوم کاربردها و سنجنده‌های راداری..... ۲۱۱
- ۸- فصل هشتم: کاربردهای سنجش از دور راداری..... ۲۱۳
- ۱-۸- مقدمه..... ۲۱۳
- ۲-۸- سنجش از دور راداری و جنگل..... ۲۱۴
- ۱-۲-۸- انواع برهم‌کنش در مناطق جنگلی (LECKIE AND RANSON, 1998A)..... ۲۱۴
- ۲-۲-۸- متداول‌ترین کاربردهای تصاویر راداری در زمینه‌ی جنگل..... ۲۱۵
- ۱-۲-۲-۸- تفکیک گونه‌های مختلف جنگلی..... ۲۱۵
- ۲-۲-۲-۸- تخمین زیست‌توده..... ۲۱۸
- ۳-۲-۲-۸- برآورد خسارت..... ۲۲۰
- ۴-۲-۲-۸- تخمین ارتفاع درختان..... ۲۲۱
- ۳-۲-۸- سایر کاربردهای سنجش از دور راداری در جنگل..... ۲۲۲
- ۳-۸- سنجش از دور راداری و کشاورزی..... ۲۲۳
- ۱-۳-۸- انواع مکانیزم‌های پراکنش در زمین‌های کشاورزی..... ۲۲۳
- ۲-۳-۸- عوامل مؤثر در بازپراکنش از محصولات کشاورزی..... ۲۲۴
- ۳-۳-۸- متداول‌ترین کاربردهای تصاویر راداری در زمینه‌ی کشاورزی..... ۲۲۷
- ۱-۳-۳-۸- تفکیک محصولات..... ۲۲۷
- ۲-۳-۳-۸- پایش محصولات..... ۲۲۹
- ۳-۳-۳-۸- برآورد میزان محصول..... ۲۳۰
- ۴-۳-۳-۸- تشخیص باقیمانده‌ی محصول..... ۲۳۱
- ۵-۳-۳-۸- برآورد پارامترهای بیوفیزیکی..... ۲۳۲
- ۴-۳-۸- سایر کاربردهای سنجش از دور راداری در کشاورزی..... ۲۳۴
- ۴-۸- سنجش از دور راداری و برآورد رطوبت خاک..... ۲۳۴
- ۱-۴-۸- نقش ثابت دی‌الکتریک در بازپراکنش از خاک..... ۲۳۵
- ۲-۴-۸- نقش زبری سطح در بازپراکنش از خاک..... ۲۳۶
- ۳-۴-۸- نقش گیاه در بازپراکنش از خاک..... ۲۳۸
- ۴-۴-۸- مسئله‌ی برآورد رطوبت خاک..... ۲۳۸
- ۱-۴-۴-۸- مدل‌های پراکنش سطحی..... ۲۳۸
- ۲-۴-۴-۸- فرآیند معکوس‌سازی..... ۲۴۱
- ۵-۴-۸- مروری بر تحقیقات انجام شده..... ۲۴۲
- ۵-۸- سایر کاربردهای راداری..... ۲۴۳
- ۶-۸- سوالات..... ۲۴۳

۲۴۵	۹- فصل نهم: آشنایی با سنجنده‌های SAR
۲۴۵	۹-۱- مقدمه
۲۴۶	۹-۲- سنجنده‌های فضاپرد
۲۴۹	۹-۲-۱- سری سنجنده‌های RADARSAT
۲۵۱	۹-۲-۲- سری سنجنده‌های ALOS-PALSAR
۲۵۳	۹-۲-۳- سری سنجنده‌های TERRASAR-X
۲۵۶	۹-۲-۴- سری ماهواره‌های COSMO-SKYMED
۲۵۷	۹-۲-۵- سری سنجنده‌های RISAT
۲۵۹	۹-۲-۶- سنجنده SENTINEL-1
۲۶۰	۹-۳- سنجنده‌های هواپرد SAR
۲۶۱	۹-۳-۱- سنجنده CONVAIR-580
۲۶۱	۹-۳-۲- سنجنده AIRSAR
۲۶۲	۹-۳-۳- سنجنده E-SAR
۲۶۳	۹-۳-۴- سنجنده EMISAR
۲۶۴	۹-۳-۵- سنجنده PI-SAR
۲۶۴	۹-۳-۶- سنجنده RAMSES
۲۶۵	۹-۳-۷- سنجنده SETHI
۲۶۶	واژه‌نامه
۲۷۴	مراجع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) عملکرد یک سیستم راداری..... ۵
- شکل (۱-۲) موج الکترومغناطیس ۱۰
- شکل (۲-۲) طیف الکترومغناطیس..... ۱۰
- شکل (۳-۲) پلاریزاسیون افقی (الف) و عمودی (ب) ۱۳
- شکل (۴-۲) تداخل سازنده (شکل چپ) و تداخل مخرب (شکل راست) ۱۴
- شکل (۵-۲) هندسه‌ی تصویربرداری راداری ۱۴
- شکل (۶-۲) نحوه ثبت یک خط تصویر راداری ۱۵
- شکل (۷-۲) هندسه تصویربرداری راداری ۱۷
- شکل (۸-۲) خطای مقیاس در جهت رنج..... ۱۸
- شکل (۹-۲) خمیده شدن اهداف خطی در اثر خطای مقیاس..... ۱۸
- شکل (۱۰-۲) خمیده شدن اهداف خطی در اثر خطای مقیاس ۱۹
- شکل (۱۱-۲) خطای کوتاه‌شدگی..... ۲۰
- شکل (۱۲-۲) خطای خوابیدگی..... ۲۰
- شکل (۱۳-۲) سایه..... ۲۱
- شکل (۱۴-۲) خطای الف (FORESHORTENING ب) LAYOVER و ج) سایه ۲۲
- شکل (۱۵-۲) پراکنشگرهای موجود واقع در یک پیکسل زمینی ۲۳
- شکل (۱۶-۲) اثر پدیده اسپکل در یک منطقه هموزن کشاورزی ۲۳
- شکل (۱۷-۲) الگوی تشعشعی آنتن ۲۶
- شکل (۱۸-۲) رابطه توان ارسالی با فاصله..... ۲۶
- شکل (۱۹-۲) پارامتر بهره آنتن..... ۲۷
- شکل (۲۰-۲) یک پیکسل زمینی شامل ۴ پراکنش‌گر مختلف..... ۲۹
- شکل (۲۱-۲) جمع برداری انرژی‌های دریافتی از پراکنشگرهای مختلف ۳۰
- شکل (۱-۳) هندسه‌ی تصویربرداری رادار ۳۴
- شکل (۲-۳) پالس ساده‌ی مورد استفاده در سیستم‌های راداری ۳۵
- شکل (۳-۳) قدرت تفکیک مکانی در جهت رنج ۳۶
- شکل (۴-۳) پالس چیرپ مورد استفاده در سیستم‌های راداری..... ۳۸
- شکل (۵-۳) الف) نمودار فاز ب) دامنه و ج) فرکانس سیگنال برای یک سیگنال چیرپ ۳۹
- شکل (۶-۳) نمودار پالس فشرده شده‌ی دقیق و ایده‌آل ۴۰
- شکل (۷-۳) استفاده از فرآیند کورلیشن برای فشرده‌سازی چیرپ دریافتی ۴۱
- شکل (۸-۳) تابع SINC ۴۲

- شکل ۳-۹) مفهوم استفاده از حرکت سنجنده برای ایجاد یک آنتن بلند به طور مجازی ۴۴
- شکل ۳-۱۰) اصول بنیادی روزهی مجازی ۴۵
- شکل ۳-۱۱) عبور سنجنده از یک هدف نقطه‌ای ۴۶
- شکل ۳-۱۲) حالت‌های تصویربرداری پویشی، نواری و متمرکز (DLR) ۵۲
- شکل ۴-۱) اسپکل در تصاویر راداری ۵۶
- شکل ۴-۲) الف) هدف توزیع یافته و ب) هدف با پراکنشگر غالب ۵۷
- شکل ۴-۳) الف) برهم‌کنش سازنده و ب) برهم‌کنش مخرب ۵۸
- شکل ۴-۴) گشت تصادفی پراکنشگرهای یک پیکسل زمینی در سیستم مختصات مختلط ۵۹
- شکل ۴-۵) توزیع بخش‌های حقیقی و مجازی تصویر ۶۱
- شکل ۴-۶) تابع توزیع دامنه «ریلی» نامیده می‌شود ۶۳
- شکل ۴-۷) تغییر توزیع ریلی با تغییر پارامتر Σ ۶۳
- شکل ۴-۸) فاز دارای تابع توزیع یکنواخت است ۶۵
- شکل ۴-۹) شدت، دارای توزیع نمایی منفی یا توزیع گاما با یک درجه آزادی می‌باشد ۶۶
- شکل ۴-۱۰) تأثیر پارامتر 2Σ بر روی توزیع گاما ۶۶
- شکل ۴-۱۱) چندمنظرسازی در تصاویر SAR ۶۹
- شکل ۴-۱۲) نحوه‌ی تغییر تابع توزیع شدت با افزایش تعداد منظرها ۷۱
- شکل ۴-۱۳) چگونگی اعمال فیلتر روی تصویر ۷۲
- شکل ۴-۱۴) هشت پنجره‌ی در امتداد لبه ۷۶
- شکل ۴-۱۵) الف) نُه پنجره‌ی 3×3 دارای همپوشانی در پنجره‌ی ۷۷
- شکل ۴-۱۶) فیلتر اسپکل لوپز از سه شاخص برای ارزیابی حضور لبه‌ها ۸۱
- شکل ۴-۱۷) فلوچارت فیلتر گاما ۸۳
- شکل ۴-۱۸) تصویر اصلی و تصویر پس از اعمال فیلتر ۸۵
- شکل ۴-۱۹) بخشی از تصویر اصلی و تصویر پس از اعمال فیلتر ۸۶
- شکل ۴-۲۰) اعمال فیلتر لی با پنجره‌های مختلف ۸۹
- شکل ۵-۱) نوع برهم‌کنش موج راداری پس از برخورد به سطح ۹۴
- شکل ۵-۲) تغییر جهت بازپراکنش با تغییر زبری سطح ۹۵
- شکل ۵-۳) سطوح صاف و زبر نسبت به طول موج فرود ۹۷
- شکل ۵-۴) تغییر زبری سطح در اثر تغییر زاویه‌ی فرود ۹۸
- شکل ۵-۵) تفاوت ایجاد شده در بازپراکنش سنگ آهک و رسوب ۹۸
- شکل ۵-۶) تغییر بخش حقیقی و موهومی ضریب دی‌الکتریک با تغییر میزان رطوبت ۱۰۰
- شکل ۵-۷) نوع پراکنش از سطح آب راکد ۱۰۱
- شکل ۵-۸) تصویری راداری که پس از بارش باران اخذ شده است ۱۰۲

- شکل ۹-۵ (A) در مقایسه با زاویه‌ی فرود (B) ۱۰۴
- شکل ۱۰-۵ (۱۰-۵) رابطه‌ی زاویه‌ی فرود محلی با میزان بازپراکنش ۱۰۵
- شکل ۱۱-۵ (۱۱-۵) دو تصویر که از یک منطقه و به طور همزمان در باند C و L اخذ شده‌اند ۱۰۶
- شکل ۱۲-۵ (۱۲-۵) عمق نفوذ در باندهای مختلف راداری ۱۰۷
- شکل ۱۳-۵ (۱۳-۵) امواج در هر طول موجی به اجزایی از عوارض متناسب ۱۰۸
- شکل ۱۴-۵ (۱۴-۵) تأثیر زاویه‌ی فرود برای انواع پراکنش ۱۰۹
- شکل ۱۵-۵ (۱۵-۵) تصاویر رادارست که از منطقه‌ی یکسان و در زوایای فرود مختلف ۱۱۰
- شکل ۱۶-۵ (۱۶-۵) بزرگی انرژی بازگشتی از اجسام مختلف در طول موج‌های متفاوت ۱۱۱
- شکل ۱۷-۵ (۱۷-۵) تصویر راداری که در باند C و در سه پلاریزاسیون مختلف ۱۱۲
- شکل ۱۸-۵ (۱۸-۵) تغییر بازپراکنش در اثر تغییر جهت دید در زمین‌های کشاورزی ۱۱۴
- شکل ۱۹-۵ (۱۹-۵) برخی از متداول‌ترین مکانیزم‌های بازپراکنش ۱۱۵
- شکل ۲۰-۵ (۲۰-۵) انواع پراکنش سطحی ۱۱۵
- شکل ۲۱-۵ (۲۱-۵) پراکنش حجمی ۱۱۶
- شکل ۲۲-۵ (۲۲-۵) برخی از انواع اهداف سخت ۱۱۷
- شکل ۲۳-۵ (۲۳-۵) کشتی‌های داخل آب گاهی اوقات بازپراکنشی قوی ایجاد می‌کنند ۱۱۷
- شکل ۲۴-۵ (۲۴-۵) بازپراکنش راداری سنجنده‌ی ERS به عنوان تابعی از رطوبت خاک ۱۱۸
- شکل ۲۵-۵ (۲۵-۵) تصویری از سنجنده‌ی SEASAT در هنگام بارندگی ۱۲۰
- شکل ۲۶-۵ (۲۶-۵) تأثیر دما روی گذردهی تنه‌ی درخت ۱۲۲
- شکل ۲۷-۵ (۲۷-۵) ثابت دی‌الکتریک اجزای درخت برای باند L و باند X ۱۲۵
- شکل ۲۸-۵ (۲۸-۵) (A) دریای موج (B) برف خشک (پ) شیروانی خانه ۱۲۶
- شکل ۱-۶ (۱-۶) بردار میدان الکتریکی و بیضی پلاریزاسیون ۱۳۵
- شکل ۲-۶ (۲-۶) بیضی پلاریزاسیون و پارامترهای تشکیل دهنده آن ۱۳۶
- شکل ۳-۶ (۳-۶) پلاریزاسیون چپ‌گرد و راست‌گرد ۱۳۷
- شکل ۴-۶ (۴-۶) اثر فاز نسبی بر شکل بیضی هنگامی که شدت مؤلفه‌ها یکسان هستند ۱۳۸
- شکل ۵-۶ (۵-۶) بردارهای جونز و پارامترهای بیضی پلاریزاسیون نظیر ۱۴۰
- شکل ۶-۶ (۶-۶) کره پونکر ۱۴۴
- شکل ۷-۶ (۷-۶) تصویر RADARSAT-2 از یک منطقه جنگلی در شهر پتاواوا ۱۵۰
- شکل ۸-۶ (۸-۶) الف) یک هدف سه وجهی در منطقه‌ی شهری و ب) صفحه‌ی تخت ۱۵۳
- شکل ۹-۶ (۹-۶) امضای پلاریمتری هدف سه وجهی، صفحه تخت، کروی ۱۵۳
- شکل ۱۰-۶ (۱۰-۶) الف) یک دو قطبی افقی ب) یک دو قطبی توجیه شده ۱۵۴
- شکل ۱۱-۶ (۱۱-۶) امضای پلاریمتری الف) کوپولاریزه ب) کراس پلاریزه هدف دو قطبی افقی ۱۵۴
- شکل ۱۲-۶ (۱۲-۶) امضای پلاریمتری الف) کوپولاریزه ب) کراسپولاریزه هدف دو قطبی زاویه دار ۱۵۵

- شکل ۶-۱۳) الف) دو سطحی ب) دو سطحی با زاویه توجیه Φ ۱۵۵
- شکل ۶-۱۴) امضای پلاریمتری الف) کوپولاریزه ب) کراس پولاریزه ی هدف دوسطحی ۱۵۶
- شکل ۶-۱۵) الف) هدف مارپیچ دست چپی و ب) مارپیچ دست راستی ۱۵۷
- شکل ۶-۱۶) امضای پلاریمتری الف) کوپولاریزه و ب) کراس پولاریزه ۱۵۷
- شکل ۶-۱۷) دسته‌بندی الگوریتم‌های مختلف تجزیه هدف ۱۵۹
- شکل ۶-۱۸) تصویر اخذ شده از یک منطقه‌ی جنگلی ۱۶۰
- شکل ۶-۱۹) ترکیب رنگی پارامترهای تجزیه‌ی KROGAGER ۱۶۳
- شکل ۶-۲۰) تشخیص مکانیزم بر اساس مقادیر زاویه‌ی آلفا ۱۶۶
- شکل ۶-۲۱) پارامترهای تجزیه‌ی CLOUDE و POTTIER در تصویر ۱۶۶
- شکل ۶-۲۲) ترکیب رنگی پارامترهای تجزیه‌ی CLOUDE و POTTIER در تصویر ۱۶۷
- شکل ۷-۱) مقایسه دقت و هزینه روش‌های مختلف تولید اطلاعات ارتفاعی ۱۷۱
- شکل ۷-۲) باز پراکنش در هندسه تصویربرداری تک آنتن و تداخل‌سنجی ۱۷۲
- شکل ۷-۳) اخذ تصاویر تداخل‌سنجی با تکنیک تک گذر ۱۷۳
- شکل ۷-۴) اخذ تصاویر تداخل‌سنجی با تکنیک دو گذر ۱۷۳
- شکل ۷-۵) خط مبنای مکانی در راستای دید سنجنده ۱۷۴
- شکل ۷-۶) هندسه تصویربرداری تداخل‌سنجی توسط دو آنتن راداری ۱۷۶
- شکل ۷-۷) تغییر ارتفاعی متناظر با تغییر زاویه میل ۱۸۰
- شکل ۷-۸) نمایش تداخل‌نما (طول موج ۵/۶۶ سانتیمتر) ۱۸۱
- شکل ۷-۹) نقشه همدوسی با طول خط مبنای مکانی و زمانی مختلف ۱۸۵
- شکل ۷-۱۰) تداخل‌نما، حاصل از دو تصویر راداری مربوط به پیش از وقوع زلزله ۱۸۶
- شکل ۷-۱۱) اثر اختلاف زاویه فرودی در تفاوت رنج دو هدف هم ارتفاع ۱۸۷
- شکل ۷-۱۲) اختلاف رنج ناشی از زمین مسطح ۱۸۷
- شکل ۷-۱۳) اختلاف رنج ایجاد شده در تصاویر تداخل‌سنجی ۱۸۸
- شکل ۷-۱۴) تداخل‌نمای متناظر با اثر زمین مسطح ۱۸۹
- شکل ۷-۱۵) اصلاح تداخل‌نما با حذف اثر زمین مسطح ۱۸۹
- شکل ۷-۱۶) تداخل‌نما، حاصل از تصاویر قبل و بعد از زلزله ۱۹۰
- شکل ۷-۱۷) تداخل‌نما، حاوی فاز جابجایی مربوط به شهر بم ۱۹۰
- شکل ۷-۱۸) نمایش فاز گسسته و پیوسته متناظر با ارتفاع ۱۹۵
- شکل ۷-۱۹) مدل رقومی ارتفاعی منطقه ۱۹۵
- شکل ۷-۲۰) تبدیل فضای گسسته تداخل‌نما به فضای پیوسته با اعمال بازیابی فاز ۱۹۶
- شکل ۷-۲۱) هندسه اخذ تصاویر ۲۰۰
- شکل ۷-۲۲) رفتار فاز در پیکسل‌های تصویر راداری ۲۰۳

- شکل ۸-۱) طبقه‌بندی با استفاده از داده‌های چندزمانه و چند فرکانسه‌ی راداری ۲۱۷
- شکل ۸-۲) طبقه‌بندی جنگل استوایی ۲۱۸
- شکل ۸-۳) رابطه‌ی میان بازپراکنش و زیستتوده در باند L و باند X ۲۲۰
- شکل ۸-۴) تصویر از زمین‌های کشاورزی در باند C و L ۲۲۵
- شکل ۸-۵) تصویر یک منطقه‌ی کشاورزی در سه پولاریزاسیون مختلف ۲۲۶
- شکل ۸-۶) تغییر بی‌نظمی و ضریب بازپراکنش در کانال HV با تغییر فنولوژی ۲۳۰
- شکل ۸-۷) سطح مبنا و طول همبستگی ۲۳۶
- شکل ۹-۱) نمایی از دو سنجنده‌ی SAR (فضا برد الف) SIR-C و (ب) ENVISAT ۲۴۷
- شکل ۹-۲) نمایی از ۳ ماهواره ۲۵۱
- شکل ۹-۳) سری ماهواره‌های ALOS (آپن، الف) ALOS و (ب) ALOS-2 ۲۵۳
- شکل ۹-۴) DEM حاصل از تصاویر چندزمانه ۲۵۵
- شکل ۹-۵) سری ماهواره‌های TERRASAR آلمان ۲۵۵
- شکل ۹-۶) نحوه‌ی قرارگیری چهار ماهواره از نسل اول COSMO-SKYMED ۲۵۷
- شکل ۹-۷) سری ماهواره‌های RISAT (هند؛ الف) RISAT-2 و (ب) RISAT-1 ۲۵۹
- شکل ۹-۸) سری ماهواره‌های SENTINEL-1 اروپا ۲۶۰
- شکل ۹-۹) سنجنده‌های هوا برد SAR، الف) CONVAIR-580، ب) AIRSAR ۲۶۲
- شکل ۹-۱۰) سنجنده‌های هوا برد SAR، الف) E-SAR، ب) EMISAR ۲۶۳
- شکل ۹-۱۱) سنجنده‌های هوا برد SAR، الف) PI-SAR، ب) RAMSES و ج) SETH ۲۶۵

فهرست جداول

جدول ۱-۲)	باندهای ماکروویو و کاربردهای آنها	۱۱
جدول ۱-۴)	تأثیر اعمال فیلتر روی مقدار ENL	۹۰
جدول ۱-۵)	سطوح زبر، صاف و متوسط مطابق معیار اصلاح شده‌ی ریلی	۹۶
جدول ۲-۵)	ثابت نسبی دی‌الکتریک برای برخی مواد	۱۰۱
جدول ۱-۶)	پارامترهای به کار رفته در روابط ماکسول	۱۳۳
جدول ۱-۷)	معرفی پارامترهای دستگاه معادلات در روش پراکنشگر دائمی	۲۰۶
جدول ۱-۹)	سنجنده‌های فضابرد SAR	۲۴۸
جدول ۲-۹)	مشخصات ماهواره‌های RADARSAT	۲۵۰
جدول ۳-۹)	مشخصات سنجنده‌های ALOS-PALSAR	۲۵۲
جدول ۴-۹)	مشخصات ماهواره‌های TERRASAR	۲۵۴
جدول ۵-۹)	مشخصات ماموریت‌های COSMO-SKYMED	۲۵۷
جدول ۶-۹)	مشخصات سنجنده‌های RISAT	۲۵۹
جدول ۷-۹)	مشخصات ماهواره SENTINEL-1	۲۶۰

پیشگفتار

در طول دو دهه اخیر، سنجش از دور راداری به صورت ابزاری مهم برای کاربران مختلف علوم زمین در آمده است. ویژگی‌های منحصر به فرد سیستم‌های سنجش از دور راداری خصوصیات متفاوتی برای تصاویر راداری نسبت به تصاویر نوری به همراه داشت. در کشور ما نیز در سال‌های اخیر، سنجش از دور راداری رشد فزاینده‌ای را در بین جامعه سنجش از دور کشور داشته است. تحقیقات بسیاری در این حوزه در دانشگاه‌ها و موسسات تحقیقاتی مختلف در استفاده از تصاویر راداری در کاربردهای مختلف سنجش از دور شکل گرفته است. علیرغم مطالعاتی که در سال‌های اخیر در استفاده از تصاویر راداری شده است، متأسفانه یک منبع علمی جامع، منسجم و به روز به زبان فارسی در این زمینه در کشورمان وجود ندارد. به همین دلیل، این کتاب در پاسخ به نبود یک منبع آموزشی که اصول و مبانی سنجش از دور راداری را در بر گرفته باشد تهیه و تنظیم شده است و اصول و مبانی سنجش از دور راداری از نحوه تصویربرداری و تشکیل تصویر تا پردازش‌ها و تحلیل‌های پیشرفته راداری را در بر گرفته است.

هدف از تدوین کتاب حاضر تبیین مبانی و تشریح سنجش از دور راداری برای کاربران و متخصصان علوم زمین می‌باشد. این کتاب در سه بخش شامل ۹ فصل تدوین شده است. در بخش اول این کتاب که شامل فصول اول تا پنجم می‌باشد، به مباحث پایه و اساسی در این حوزه شامل اصول سیستم‌های تصویربرداری راداری، هندسه تصویربرداری، خطاهای هندسی و رادیومتریک، معادله راداری، قدرت تفکیک مکانی در جهت رنج و آزیموت، فشردگی سازی پالس، فرکانس تکرار پالس، حالت‌های مختلف تصویربرداری در سنجنده‌های راداری، اسپکل و روش‌های کاهش آن و مدل‌های آماری داده‌های راداری مختلف پرداخته شده است. همچنین بررسی عوامل مختلف بازپراکنش راداری شامل پارامترهای هدف و سنجنده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

پس از آشنایی با اصول و مقدمات، بخش دوم کتاب به مباحث پیشرفته‌تر در سنجش از دور راداری شامل پلاریمتری راداری و تداخل‌سنجی راداری می‌پردازد. در فصل ششم کتاب مفاهیم پایه پلاریمتری شامل بیضی پلاریزاسیون، بردارهای استوکس و جونز، کره پونکر و امضاهای پلاریمتری و

همچنین توصیف‌گرهای پلاریمتریک از جمله ماتریس پراکنش، همدوسی و کوواریانس و بردارهای مختلف پراکندگی به طور تحلیلی مورد بحث قرار گرفته‌اند. قسمت انتهایی این فصل به الگوریتم-های تجزیه هدف شامل همدوس و غیرهمدوس می‌پردازد. در فصل هفتم کتاب اصول تداخل‌سنجی راداری شامل هندسه تصویربرداری سه بعدی در تداخل‌سنجی، اندازه‌گیری ارتفاع زمین در هندسه تداخل‌سنجی راداری و تداخل نما و نحوه تشکیل آن آمده است. همچنین در این فصل تکنیک‌های متداول تداخل‌سنجی راداری شامل روش‌های سنتی و روش‌های مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

در نهایت بخش سوم این کتاب به برخی کاربردهای سنجش از دور راداری و همچنین سنجنده‌های راداری مرسوم در این حوزه می‌پردازد. در فصل هشتم کتاب، به برخی کاربردهای سنجش از دور راداری در حوزه‌های جنگل، کشاورزی، تخمین رطوبت خاک و برخی از کاربردهای دیگر پرداخته شده است. در نهایت در فصل پایانی کتاب، با سنجنده‌های مختلف راداری آشنا خواهید شد. این سنجنده‌ها که در دو بخش سنجنده‌های هوابرد و فضابرد معرفی شده‌اند، طیف وسیعی از سنجنده‌ها که در طول دهه‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند و سنجنده‌هایی که بر برنامه‌های فضایی کشورهای مختلف برای ارسال در سال‌های آینده قرار دارند را شامل می‌شود.

وظیفه خود می‌دانم از تمام عزیزانی که من را در آماده شدن این کتاب یاری نمودند، تشکر نمایم. به‌ویژه نهایت سپاس خود را از تمامی اساتید و دانشجویان دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی به‌ویژه جناب آقای دکتر ولدان زوج، جناب آقای دکتر صاحبی، سرکار خانم مهندس طیبه مناقبی، سرکار خانم مهندس سحر دهنوی، آقای مهندس محسن جعفری و آقای مهندس علی مسجدی تقدیم می‌کنم. بدون شک بدون این حمایت‌ها، امکان تحریر این کتاب میسر نمی‌شد.

در تالیف این کتاب تلاش گردید تا مطالب بصورت روشن و دقیق بیان شود، طبعاً در تدوین چنین اثر علمی، لغزشها و خطاهایی غیر قابل انکار و گاهی اجتناب‌ناپذیر وجود خواهد داشت که امیدوارم خوانندگان فرهیخته، کاستی‌ها را به دیده اغماض بنگرند. با این حال سپاسگزار از تمامی نظرات تکمیلی و کارشناسانه اساتید و صاحب‌نظران خواهم بود. امید است که خوانندگان ارجمند، بنده را از راهنمایی‌های گرانقدر خود جهت اصلاح، ویرایش و تکمیل کتاب در چاپ‌های آتی بهره‌مند سازند.

با احترام

یاسر مقصودی