

مبانی سنجش از دور راداری

دکتر یاسر مقصودی

عضو هیأت علمی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

یاسر مکاری

مهندس سازه‌ها و مهندسی

دانشگاه مموریال کانادا

سرشناسه	: مقصودی، یاسر، ۱۳۵۹ -
عنوان و نام پدیدآور	: مبانی 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. ۳۷۴ - ۲۸۷.
موضوع	: رادار
موضوع	: سنجش از دور
شناسه اف-۵	: مهدوی، ساحل، ۱۳۶۹ -
شناسه انجوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۴ م۷/م۶۵۷/TK6۵۷۵
رده بندی دیویی	: ۶۲۱/۳۸۴۸
شماره کتابشناسی	: ۴۰۳۳۳۳۰

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

نام کتاب: مبانی 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

ISBN: 978- 600-7867- 13-6

شابک: ۹۷۸- ۶۰۰-۷۸۶۷-۱۳-۶

چاپ و لیتوگرافی: چاپ اول

صحافی: گرنامی

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

میرداماد، روبروی ساختمان اسکان (۸۸۷۷۲۲۷۷-۰۲۱)

(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
۱-۲- سنجش از دور راداری.....	۵
۱-۳- باختر کتاب.....	۶
۲- فصل دوم: مبانی و اصول سیستم‌های راداری.....	۹
۲-۱- مقدمه.....	۹
۲-۲- ویژگی‌های یک سیستم راداری.....	۹
۲-۲-۱- موج-کتور عدلیس.....	۹
۲-۲-۲- طیف انرژی و توان.....	۱۰
۲-۲-۳- امواج ماکروو.....	۱۱
۲-۲-۴- پلاریزاسیون.....	۱۲
۲-۲-۵- فاز موج.....	۱۳
۲-۲-۶- عدد موج.....	۱۴
۲-۳- هندسه‌ی تصویربرداری راداری.....	۱۴
۲-۴- انواع خطا در سیستم‌های راداری.....	۱۷
۲-۴-۱- خطای مقیاس در جهت رنج.....	۱۸
۲-۴-۲- خطاهای جابجایی ارتفاعی.....	۱۹
۲-۴-۳- خطای اسپکل.....	۲۲
۲-۵- معادله رادار.....	۲۴
۲-۵-۱- معادله رادار برای اهداف نقطه‌ای.....	۲۵
۲-۵-۲- معادله رادار اهداف توزیع یافته.....	۲۹
۲-۶- سوالات.....	۳۱
۳- فصل سوم: تصویربرداری سیستم‌های راداری.....	۳۳
۳-۱- مقدمه.....	۳۳
۳-۲- قدرت تفکیک مکانی در جهت رنج و آزیموت.....	۳۳
۳-۲-۱- قدرت تفکیک مکانی در جهت رنج.....	۳۵
۳-۲-۳- فشرده‌سازی پالس.....	۳۷

- ۴۳ ۲-۲-۳ قدرت تفکیک مکانی در جهت آزیموت
- ۴۴ ۲-۲-۱-۲ رادار با روزهی مجازی (SAR)
- ۴۶ ۲-۲-۲-۲ اساس ریاضی سیستم‌های SAR
- ۵۰ ۲-۳-۳ فرکانس تکرار پالس (PRF)
- ۵۱ ۴-۳-۲ حالت‌های تصویربرداری در سنجنده‌های راداری
- ۵۲ ۳-۴-۱ حالت تصویربرداری نواری
- ۵۲ ۳-۴-۲ حالت تصویربرداری پویشی
- ۵۳ ۳-۴-۳ حالت تصویربرداری متمرکز
- ۵۳ ۵-۲ سوالات
- ۵۵ ۴- فصل چهارم: اسپکل
- ۵۵ ۴-۱-۱ دامنه
- ۵۵ ۴-۲-۲ تعریف اسپکل و علت به وجود آمدن آن
- ۵۹ ۴-۳-۲ 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 ۴-۴-۲ روش‌های کاهش اسپکل
- ۶۸ ۴-۴-۱ چندمنظرسازی
- ۷۲ ۴-۴-۲ استفاده از فیلترهای مکانی
- ۷۴ ۴-۴-۱-۲ فیلتر لی
- ۷۶ ۴-۴-۲-۲ فیلتر تصحیح‌شده‌ی لی
- ۷۸ ۴-۴-۲-۳ فیلتر کوان
- ۷۸ ۴-۴-۲-۴ فیلتر فراست
- ۷۸ ۴-۴-۲-۵ بهبود فیلترهای اسپکل توسط لویز و همکارانش
- ۸۰ ۴-۴-۲-۶ 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	۵-۲-۱-۵- پارامترهای سیستم
۱۰۵	۵-۲-۱-۶- طول موج
۱۰۹	۵-۲-۲- زاویه فرود
۱۱۰	۵-۲-۲-۱- پلا راسیون
۱۱۳	۵-۲-۲-۲- 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	۵-۴-۱-۲- 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

بخش دوم مباحث پیشرفته.....	۱۲۹
۶- فصل ششم: مبانی پلاریمتری راداری.....	۱۳۱
۶-۱- مقدمه.....	۱۳۱
۶-۲- مفاهیم پایه.....	۱۳۲
۶-۲-۱- امواج الکترومغناطیس.....	۱۳۲
۶-۲-۲- بیضی پلاریزاسیون.....	۱۳۵
۶-۲-۳- بردار جونز.....	۱۳۹
۶-۲-۴- بردار استوکس.....	۱۴۰
۶-۲-۵- پارامترهای استوکس و میزان پلاریزاسیون موج.....	۱۴۲
۶-۲-۶- کره ی پونکر.....	۱۴۳
۶-۳- توصیف بره های پلاریمتریک.....	۱۴۴
۶-۳-۱- ماتریس انعکستگی.....	۱۴۴
۶-۳-۲- بردار ی انعکستگی.....	۱۴۶
۶-۳-۳-۱- بردار تارگت پائولی.....	۱۴۶
۶-۳-۳-۲- بردار تارگت کسبی و گرافیک.....	۱۴۷
۶-۳-۳-۳- ماتریس همدوسی راداری نووا.....	۱۴۷
۶-۳-۳-۴- ماتریس کوواریانس.....	۱۴۸
۶-۳-۳-۵- ماتریس همدوسی.....	۱۴۹
۶-۴- تغییر پایه پلاریزاسیون.....	۱۵۰
۶-۴-۱- امضای پلاریمتری.....	۱۵۱
۶-۴-۲- امضای پلاریمتری مکانیزم های استاندارد پراکنش.....	۱۵۲
۶-۴-۲-۱- سه وجهی، صفحه تخت، کره.....	۱۵۲
۶-۴-۲-۲- دو قطبی.....	۱۵۳
۶-۴-۲-۳- دوسطحی.....	۱۵۵
۶-۴-۲-۴- ماریچ.....	۱۵۶
۶-۵- الگوریتم های تجزیه هدف.....	۱۵۷
۶-۵-۱- تجزیه تارگت PAULI.....	۱۵۹
۶-۵-۲- تجزیه تارگت KROGAGER.....	۱۶۱
۶-۵-۳- تجزیه $H/\alpha/A$	۱۶۴
۶-۶- سوالات.....	۱۶۷

۱۷۰	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- اندازه گیری 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	۷- تداخل نما
۱۸۲	۱-۴-۷- انتخاب تداخل نما
۱۸۵	۲-۴-۷- صلاحیت تداخل نما و حذف عوامل مزاحم
۱۸۶	۳-۴-۷- تصحیح 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 سفر
۱۹۲	۵-۲-۴-۷- فاز ناشی از اثرات مداس
۱۹۲	۳-۴-۷- باز بحرانی
۱۹۴	۴-۴-۷- باز یابی فاز
۱۹۸	۵-۷- مروری بر تکنیک های 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 پراکنشگرهای 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
- ۸-۱- مقدمه ۲۱۳
- ۸-۲- سنجش از دور راداری و جنگل ۲۱۴
- ۸-۲-۱- انواع برهم‌کنش در مناطق جنگلی (LECKIE AND RANSON, 1998A) ۲۱۴
- ۸-۲-۲- متداول‌ترین کاربردهای تصاویر راداری در زمینه‌ی جنگل ۲۱۵
- ۸-۲-۲-۱- تفکیک گونه‌های مختلف جنگلی ۲۱۵
- ۸-۲-۲-۲- تخمین زیست‌توده ۲۱۸
- ۸-۲-۲-۳- برآورد خسارت ۲۲۰
- ۸-۲-۲-۴- تخمین ارتفاع درختان ۲۲۱
- ۸-۲-۳- سایر کاربردهای سنجش از دور راداری در جنگل ۲۲۲
- ۸-۳- سنجش از دور راداری و کشاورزی ۲۲۳
- ۸-۳-۱- انواع سامانه‌های پراکنش در زمین‌های کشاورزی ۲۲۳
- ۸-۳-۲- عوامل مؤثر در بازپراکنش از محصولات کشاورزی ۲۲۴
- ۸-۳-۳- متداول‌ترین کاربردهای تصاویر راداری در زمینه‌ی کشاورزی ۲۲۷
- ۸-۳-۳-۱- تفکیک محصولات ۲۲۷
- ۸-۳-۳-۲- پایش محصولات ۲۲۹
- ۸-۳-۳-۳- برآورد میزان محصول ۲۳۰
- ۸-۳-۳-۴- تشخیص باقیمانده‌ی محصول ۲۳۱
- ۸-۳-۳-۵- برآورد پارامترهای بیوفیزیکی ۲۳۲
- ۸-۴- سایر کاربردهای سنجش از دور راداری در کشاورزی ۲۳۴
- ۸-۴-۱- سنجش از دور راداری و برآورد رطوبت خاک ۲۳۴
- ۸-۴-۱-۱- نقش ثابت دی‌الکتریک در بازپراکنش از خاک ۲۳۵
- ۸-۴-۱-۲- نقش زبری سطح در بازپراکنش از خاک ۲۳۶
- ۸-۴-۱-۳- نقش گیاه در بازپراکنش از خاک ۲۳۸
- ۸-۴-۱-۴- مسئله‌ی برآورد رطوبت خاک ۲۳۸
- ۸-۴-۱-۵- مدل‌های پراکنش سطحی ۲۳۸
- ۸-۴-۲- فرایند معکوس‌سازی ۲۴۱
- ۸-۴-۵- مروری بر تحقیقات انجام‌شده ۲۴۲
- ۸-۵- سایر کاربردهای راداری ۲۴۳
- ۸-۶- سوالات ۲۴۳
- ۹- فصل نهم: آشنایی با سنجنده‌های SAR ۲۴۵

۲۴۵.....	۱-۹- مقدمه
۲۴۶.....	۲-۹- سنجنده‌های فضاپرد
۲۴۹.....	۱-۲-۹- سری سنجنده‌های RADARSAT
۲۵۱.....	۲-۲-۹- سری سنجنده‌های ALOS-PALSAR
۲۵۳.....	۳-۲-۹- سری سنجنده‌های TERRASAR-X
۲۵۶.....	۴-۲-۹- سری ماهواره‌های COSMO-SKYMED
۲۵۷.....	۵-۲-۹- سری سنجنده‌های RISAT
۲۵۹.....	۶-۲-۹- سنجنده SENTINEL-1
۲۶۰.....	۳-۹- سنجنده‌های هواپرد SAR
۲۶۱.....	۳- سنجنده CONVAIR-580
۲۶۱.....	۲-۳-۹- سنجنده AIRSAT
۲۶۲.....	۳-۳-۹- سنجنده E-SAR
۲۶۳.....	۴-۳-۹- سنجنده MIPAR
۲۶۴.....	۵-۳-۹- سنجنده P-SAR
۲۶۴.....	۶-۳-۹- سنجنده RAMSES
۲۶۵.....	۷-۳-۹- 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) LAYOVER (ب) CORE SHORTENING و (ج) سایه ۲۲
- شکل ۱۵-۲) پراکنشگرهای موجود واقع در یک سطح 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 روزنه‌ی 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 ۶۳
- شکل ۴-۸) فاز دارای تابع توزیع یکساخت است ۶۵
- شکل ۴-۹) شدت دارای تابع نمایی منفی یا توزیع گاما با یک درجه آزادی می‌باشد ۶۶
- شکل ۴-۱۰) تأثیر پهنای باند بر روی توزیع گاما ۶۶
- شکل ۴-۱۱) چندمنظرسای در تصاویر SAR ۶۹
- شکل ۴-۱۲) نحوه‌ی تغییر تابع توزیع شدت با افزایش تعداد منظرها ۷۱
- شکل ۴-۱۳) چگونگی اعمال فیلتر روی تصاویر ۷۲
- شکل ۴-۱۴) هشت پنجره‌ی در امتداد لبه ۷۶
- شکل ۴-۱۵) الف) نه پنجره‌ی 3×3 دارای همپوشانی در پنجره ۷۷
- شکل ۴-۱۶) فیلتر اسپکل لویز از سه شاخص برای رزیابی 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 ۵-۹) زاویه‌ی فرود محلی (A) در مقایسه با زاویه‌ی فرود (B) ۱۰۴
- شکل ۵-۱۰) رابطه‌ی زاویه‌ی فرود محلی با میزان بازپراکنش ۱۰۵
- شکل ۵-۱۱) دو تصویر که از یک منطقه و به طور همزمان در باند C و L اخذ شده‌اند ۱۰۶
- شکل ۵-۱۲) عمق نفوذ در باندهای مختلف راداری ۱۰۷
- شکل ۵-۱۳) امواج در هر طول موجی به اجزایی از عوارض متناسب ۱۰۸
- شکل ۵-۱۴) تأثیر زاویه‌ی فرود برای انواع پراکنش ۱۰۹
- شکل ۵-۱۵) تصاویر رادارست که از منطقه‌ی یکسان و در زوایای فرود مختلف ۱۱۰
- شکل ۵-۱۶) بزرگی انرژی بازگشتی از اجسام مختلف در طول موج‌های متفاوت ۱۱۱
- شکل ۵-۱۷) تصویر راداری که در باند C و در سه پلاریزاسیون مختلف ۱۱۲
- شکل ۵-۱۸) عبیب بازپراکنش در اثر تغییر جهت دید در زمین‌های کشاورزی ۱۱۴
- شکل ۵-۱۹) رنجی از متداول‌ترین مکانیزم‌های بازپراکنش ۱۱۵
- شکل ۵-۲۰) انواع پراکنش سطحی ۱۱۵
- شکل ۵-۲۱) پراکنش حجمی ۱۱۶
- شکل ۵-۲۲) برخی از انواع رادارست ۱۱۷
- شکل ۵-۲۳) کشتی‌های داخل آب گاه، اوقات بازپراکنشی قوی ایجاد می‌کنند ۱۱۷
- شکل ۵-۲۴) بازپراکنش راداری سنجنده‌ی RS به عنوان تابعی از رطوبت خاک ۱۱۸
- شکل ۵-۲۵) تصویری از سنجنده‌ی AT-۳۴۸ در هنگام بارندگی ۱۲۰
- شکل ۵-۲۶) تأثیر دما روی گذردهی تنه‌ی درخت ۱۲۲
- شکل ۵-۲۷) ثابت دی‌الکتریک اجزای درخت برای باند L و باند X ۱۲۵
- شکل ۵-۲۸) آ) دریای مواج ب) برف خشک پ) شیروانی ۱۲۶
- شکل ۶-۱) بردار میدان الکتریکی و بیضی پلاریزاسیون ۱۳۵
- شکل ۶-۲) بیضی پلاریزاسیون و پارامترهای تشکیل دهنده آن ۱۳۶
- شکل ۶-۳) پلاریزاسیون چپ‌گرد و راست‌گرد ۱۳۷
- شکل ۶-۴) اثر فاز نسبی بر شکل بیضی هنگامی که شدت مؤلفه‌ها یکسان هستند ۱۳۸
- شکل ۶-۵) بردارهای جونز و پارامترهای بیضی پلاریزاسیون نظیر ۱۴۰
- شکل ۶-۶) کره پونکر ۱۴۴
- شکل ۶-۷) تصویر RADARSAT-2 از یک منطقه جنگلی در شهر پتاواوا ۱۵۰
- شکل ۶-۸) الف) یک هدف سه وجهی در منطقه‌ی شهری و ب) صفحه‌ی تخت ۱۵۳
- شکل ۶-۹) امضای پلاریمتری هدف سه وجهی، صفحه تخت، کروی ۱۵۳
- شکل ۶-۱۰) الف) یک دو قطبی افقی ب) یک دو قطبی توجیه شده ۱۵۴
- شکل ۶-۱۱) امضای پلاریمتری الف) کوپلاریزه ب) کراس پلاریزه هدف دو قطبی افقی ۱۵۴
- شکل ۶-۱۲) امضای پلاریمتری الف) کوپلاریزه ب) کراسپلاریزه 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) کوپلاریزه ب) کراس پولاریزه هدف دوسطحی ۱۵۶
- شکل ۶-۱۵) الف) هدف مارپیچ دست چپ و ب) مارپیچ دست راستی ۱۵۷
- شکل ۶-۱۶) امضای پلاریمتری الف) کوپلاریزه 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) پایشه دقت و هزینه روش‌های مختلف تولید اطلاعات ارتفاعی ۱۷۱
- شکل ۷-۲) بازبرآکنش هندسه تصویربرداری تک آنتن و تداخل‌سنجی ۱۷۲
- شکل ۷-۳) اخذ تصاویر تداخل‌سنجی با تکنیک تک‌گذر ۱۷۳
- شکل ۷-۴) اخذ تصاویر تداخل‌سنجی با تکنیک دو‌گذر ۱۷۳
- شکل ۷-۵) خط‌مبنای مکارا راست‌ال دید‌سنجنده ۱۷۴
- شکل ۷-۶) هندسه تصویربرداری تداخل‌سنجی توسط دو آنتن راداری ۱۷۶
- شکل ۷-۷) تغییر ارتفاعی متناظر با تدریس زاویه‌ی میل ۱۸۰
- شکل ۷-۸) نمایش تداخل‌نما (طول موج ۸۶۶ سانتی‌متر) ۱۸۱
- شکل ۷-۹) نقشه همدوسی با طول خط‌مبنای مدانی و زمان‌های مختلف ۱۸۵
- شکل ۷-۱۰) تداخل‌نما، حاصل از دو تصویر راداری مربوط به پیش از وقوع زلزله ۱۸۶
- شکل ۷-۱۱) اثر اختلاف زاویه‌ی فرودی در تفاوت رنج و هدف تداخل‌نما 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 بازبینی 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 زیست توده 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 پولاترزیسیون مختلف ۲۲۶
- شکل ۸-۶) تغییر بی‌نظمی و ضریب بازپراکنش در کانال HV با تغییر فنولوژی ۲۳۰
- شکل ۸-۷) سطح مینا و طول همبستگی ۲۳۶
- شکل ۹-۱) نمایی از دو سنجنده‌ی SAR فضابرد (الف) SIR-C و (ب) ENVISAT ۲۴۷
- شکل ۹-۲) نمایی از ۳ ماهواره ۲۵۱
- شکل ۹-۳) سری ماهواره‌های ALOS (آپن، الف) و ALOS-2 (ب) ۲۵۳
- شکل ۹-۴) DEM، حاصل از تصاویر چندزمانه ۲۵۵
- شکل ۹-۵) سری ماهواره‌های TERRASAR آلمان ۲۵۵
- شکل ۹-۶) نحوه‌ی سری ماهواره‌ی COSMO-SKYMED ۲۵۷
- شکل ۹-۷) سری ماهواره‌های RISAT (الف) و RISAT-2 (ب) ۲۵۹
- شکل ۹-۸) سری ماهواره‌های SENSEI (الف) و SETH ۲۶۰
- شکل ۹-۹) سنجنده‌های هواپرد SAR (الف) CONVAIR-50 و (ب) AIRSAR ۲۶۲
- شکل ۹-۱۰) سنجنده‌های هواپرد SAR (الف) E-AR و (ب) EMISAR ۲۶۳
- شکل ۹-۱۱) سنجنده‌های هواپرد SAR (الف) PI-AR و (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 زیر، 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)	دیتاجندهای فضابرد SAR	۲۴۷
جدول ۲-۹)	مشخصات ماهواره‌های RADARSAT	۲۵۰
جدول ۲-۹)	مشخصات سنجنده‌های ALOS-PALSAR	۲۵۲
جدول ۴-۹)	مشخصات ماهواره‌های TERRASAR	۲۵۴
جدول ۵-۹)	مشخصات ماهواره‌های COSMO-SKYMED	۲۵۷
جدول ۶-۹)	مشخصات ماهواره‌های RISAT	۲۵۹
جدول ۷-۹)	مشخصات ماهواره SEN Tinel	۲۶۰

پیشگفتار

در طول سده 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 زیادی را در بین جامعه سنجش از دور کشور داشته است. تحقیقات بسیاری در این حوزه در دانشگاه‌ها و مراکز 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. این دلیل، این کتاب در پاسخ به نبود یک منبع آموزشی که اصول و مبانی سنجش از دور راداری را در برگزیده باشد تهیه و تنظیم شده است و اصول و مبانی سنجش از دور راداری از نحوه تصویربرداری و تبدیل 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 رادارمتریک، معادله راداری، قدرت تفکیک مکانی در جهت رنج و آزیموت، فشرده 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 توصیف گرهای پلاریمتریک از جمله ماتریس پراکنش، همدوسی و کوواریانس و بردارهای مختلف پراکندگی به طور تحلیلی مورد بحث قرار گرفته‌اند. قسمت انتهایی این فصل به الگوریتم‌های 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 پراکنش گرهای دائمی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

در نهایت بخش سوم این کتاب به برخی کاربردهای سنجش از دور راداری و همچنین سنجنده‌های راداری می‌پردازد. 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 فصل پایانی کتاب، با سنجنده‌های مختلف راداری آشنا خواهید شد. این سنجنده‌ها که در دو بخش سنجنده‌های هواپرد 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 سال‌ها 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 دانش‌پژنان دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی به ویژه استاد آقای دکتر ولدان زوج، جناب آقای دکتر صاحبی، سرکار خانم مهندس طحیبه مناقبی، سرکار خانم مهندس سحر دهنوی، آقای مهندس محسن جعفری و آقای مهندس علی مسجدی تقدیم می‌کنم. بدون این حمایت‌ها، امکان تحریر این کتاب میسر نمی‌شد.

در تالیف این کتاب تلاش گردید تا مطالب بصورت روشن و دقیق بیان شود. اما 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 خواهیم 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