

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش مخابرات

پراکندگی چندگانه برای کاربرد در رادارهای سنجش از دور

استاد راهنما:

دکتر عطااله ابراهیم زاده

استاد مشاور:

دکتر بیژن ذاکری

دانشجو:

نفیسه رادکانی

بهمن ۱۳۹۲

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

,

برادران نازنینم (جلال و آرمان)

تشکر و قدردانی

سپاس می گویم خدایی را که در تمامی محطات زندگی ام بزرگترین یاور من بوده است.

قدردانی می کنم از محبت بی پایان خانواده ام که دلسوزانه مرا حمایت کرده و با حضور سبزشان همواره باعث

دلگرمی من بوده اند.

تقدیر می نمایم از اساتید بزرگوارم، آقایان دکتر ابراهیم زاده و دکتر ذاکری که با راهنمایی ها و حمایت های بی

دریغشان مرا به ادامه راه امیدوار نموده اند.

همچنین تشکر می کنم از دوستان عزیزم که همواره مرا مورد لطف و حمایت خود قرار داده اند.

چکیده

حضور پوشش‌های گیاهی در مسیرهای انتشار امواج الکترومغناطیسی منجر به جذب، پراکندگی و در نهایت، تضعیف امواج می‌شود. میزان پراکندگی موج توسط گیاهان، به منظور تفسیر داده‌های رادار سنجش از دور مورد توجه قرار می‌گیرد. با استفاده از مدل پراکندگی، پارامترهای ساختاری و دی الکتریک گیاهان و خاک از روی داده‌ها تخمین زده می‌شود. میزان تضعیف موج توسط گیاهان، به منظور طراحی بهینه شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم در محیط‌های گیاهی مورد توجه قرار می‌گیرد، زیرا این تضعیف، باعث کاهش برد تجهیزات مخابراتی بی‌سیم می‌شود. یکی از روش‌های معمول به منظور یافتن مدل پراکندگی و تضعیف گیاهان، روش انتقال انرژی (RT) می‌باشد. این روش، پراکندگی چندگانه میان اجزای محیط را در نظر می‌گیرد ولی اثرات همدوس را لحاظ نمی‌کند. روش‌های معمول دیگر، روش‌های تئوری بر اساس حل تقریبی معادلات ماکسول می‌باشند. این روش‌ها برخلاف روش RT، اثرات همدوس (اثر فاز امواج) را لحاظ می‌کنند ولی از پراکندگی چندگانه صرف نظر می‌کنند. با توجه به این ساده‌سازی‌ها، این روش‌ها مدل‌های دقیقی ارائه نمی‌دهند و محدودیت کاربرد دارند. در مقایسه با روش‌های اشاره شده، روش‌های عددی دارای دقت بیشتری می‌باشند. در این پژوهش، راهکار موثری به منظور یافتن مدل پراکندگی و تضعیف درختان، با استفاده از روش عددی FDTD سه بعدی ارائه شده است. در محاسبه پراکندگی درخت، به منظور در نظر گرفتن اثر زمین، روابطی برای روش TWFDTD در فضای سه بعدی ارائه شده است. مزایای روش FDTD، در نظر گرفتن پراکندگی چندگانه میان اجزا و اثرات همدوس و در نتیجه ارائه مدل پراکندگی دقیق‌تر و بهبود مدل‌سازی کانال می‌باشد. نتایج حاصل از محاسبه پراکندگی موج و پارامترهای کانال، دقت روش را تایید می‌کنند.

واژگان کلیدی: پوشش‌های گیاهی، پراکندگی، تضعیف، درختان، سنجش از دور، روش FDTD سه بعدی، روش TWFDTD، مدل‌سازی کانال.

فهرست مطالب

د	فهرست جداول	.....
ه	فهرست شکل‌ها	.....
ح	فهرست اختصارات	.....
۱	فصل اول: مقدمه	.....
۱-۱	مقدمه	.....
۲-۱	سنجش از دور	.....
۳-۱	مفهوم پراکندگی	.....
۱-۳-۱	سازوکارهای پراکندگی	.....
۲-۳-۱	پراکندگی الکترومغناطیسی	.....
۴-۱	کانالهای مخابراتی بی‌سیم	.....
۱-۴-۱	تلفات مسیر	.....
۲-۴-۱	اثر سایه	.....
۳-۴-۱	اثر چندمسیره	.....
۴-۴-۱	مدل تضعیف موج	.....
۵-۴-۱	پاسخ فرکانسی کانال	.....
۵-۱	مدل هندسی و فیزیکی گیاه	.....
۶-۱	رفتار دی‌الکتریک گیاه	.....
۱-۶-۱	ثابت دی‌الکتریک مختلط گیاه (ϵ_p)	.....
۲-۶-۱	ثابت دی‌الکتریک مختلط خاک	.....
۷-۱	مروری بر مطالعات انجام شده	.....
۸-۱	بیان چالش و پیشنهاد ارائه شده	.....
۳۳	فصل دوم: محاسبه پراکندگی و تضعیف موج توسط درخت با روش FDTD	.....
۳۳	۱-۲ مقدمه	.....

۳۳	.....FDTD روش عددی
۳۴	..... Yee الگوریتم
۳۵	..... ۲-۲-۲ شرایط مرزی جاذب- لایه کاملاً تطبیق یافته
۳۷	..... ۳-۲-۲ منابع ایجاد امواج الکترومغناطیسی
۳۸	..... ۴-۲-۲ تبدیل میدانهای راه نزدیک به میدانهای راه دور (NTFF)
۳۹	..... ۵-۲-۲ قطبش در فضای شبیه سازی
۴۰	..... ۶-۲-۲ روابط موج مسطح تابشی
۴۲	..... ۳-۲ محاسبه پراکندگی درخت با روش FDTD
۴۳	..... ۴-۲ محاسبه تضعیف درخت و پارامترهای کانال مخابراتی با روش FDTD
۴۴	..... ۵-۲ روش TWFDTD
۴۵	..... فصل سوم: تحلیل روش TWFDTD
۴۵	..... ۱-۳ مقدمه
۴۵	..... ۲-۳ روش TWFDTD در فضای دو بعدی
۵۲	..... ۳-۳ روش TWFDTD در فضای سه بعدی
۵۵	..... ۱-۳-۳ تبدیل NTFF در روش TWFDTD در فضای سه بعدی
۵۷	..... ۴-۳ محاسبه پراکندگی درخت روی سطح زمین با روش TWFDTD
۵۹	..... فصل چهارم: نتایج شبیه سازی
۵۹	..... ۱-۴ مقدمه
۵۹	..... ۲-۴ شبیه سازی FDTD استاندارد
۶۰	..... ۱-۲-۴ محاسبه پراکندگی استوانه هادی
۶۱	..... ۲-۲-۴ محاسبه پراکندگی درخت در نبود زمین با روش FDTD استاندارد
۶۵	..... ۳-۴ شبیه سازی TWFDTD در فضای دو بعدی
۶۶	..... ۱-۳-۴ شبیه سازی زمین بدون تلف در فضای دو بعدی
۶۹	..... ۲-۳-۴ شبیه سازی زمین تلفاتی در فضای دو بعدی
۷۰	..... ۴-۴ شبیه سازی TWFDTD در فضای سه بعدی

۷۱	.....شبیه سازی زمین بدون تلف در فضای سه بعدی
۷۳	.....شبیه سازی زمین تلفاتی در فضای سه بعدی
۷۳	.....پراکندگی استوانه هادی در حضور زمین در حالت سه بعدی
۷۵	.....محاسبه پراکندگی درخت در حضور زمین با روش TWFDTD
۷۶	.....مقایسه پراکندگی درخت تنها و درخت روی سطح زمین
۷۷	.....اثر رطوبت خاک در پراکندگی درخت
۷۸	.....شبیه سازی کانال مخابراتی با روش FDTD
۸۲	.....اثر برگ در تضعیف موج و توان دریافتی
۸۳	.....محاسبه پارامترهای کانال
۸۷	.....فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۸۷	.....۱-۵ نتیجه گیری
۸۸	.....۲-۵ پیشنهادها
۹۰	.....مراجع
۱	.....پیوست: برخی روابط روش FDTD در فضای سه بعدی

فهرست جداول

- جدول ۱-۴ مشخصات درخت ۶۳
- جدول ۲-۴ پراکندگی باز گشتی درخت بدون حضور زمین و با حضور زمین ۷۷
- جدول ۳-۴ مشخصات دی الکتریک درختان و زمین ۷۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ وضعیت موج در برخورد به جسم..... ۴
- شکل ۲-۱ پراکندگی یکتا..... ۵
- شکل ۳-۱ پراکندگی دوگانه..... ۵
- شکل ۴-۱ پراکندگی چندگانه..... ۵
- شکل ۵-۱ میدان‌های تابشی و پراکنده شده و جهت انتشار آنها..... ۷
- شکل ۶-۱ راه دور..... ۱۰
- شکل ۷-۱ اثر سایه..... ۱۴
- شکل ۸-۱ اثر چند مسیره..... ۱۵
- شکل ۱-۲ شبکه فضایی Yee..... ۳۴
- شکل ۲-۲ نمای دو بعدی از محیط دارای PML..... ۳۶
- شکل ۳-۲ سطح تبدیل NTFF..... ۳۸
- شکل ۴-۲ نمای دو بعدی از فضای شبیه سازی؛ PML، مرز TFSF و سطح تبدیل NTFF مشخص شده است..... ۳۹
- شکل ۵-۲ الف موج تابشی با قطبش V..... ۴۰
- شکل ۵-۲ ب موج تابشی با قطبش H..... ۴۰
- شکل ۶-۲ الف موج پراکنده شده بازگشتی با قطبش V..... ۴۰
- شکل ۶-۲ ب موج پراکنده شده بازگشتی با قطبش H..... ۴۰
- شکل ۷-۲ نمای دو بعدی از TFSF و مختصات آن..... ۴۲
- شکل ۱-۳ استفاده از مدل سه موج در تکنیک TFSF در حضور زمین..... ۴۶
- شکل ۲-۳ مرز TFSF و زوایای سه موج و محل مبدا مختصات..... ۴۷
- شکل ۳-۳ الف مرز TFSF، زوایای تابش سه موج (قطبش افقی) و محل مبدا مختصات..... ۵۲
- شکل ۳-۳ ب مرز TFSF، زوایای تابش سه موج (قطبش عمودی) و محل مبدا مختصات..... ۵۲
- شکل ۴-۳ الف محل همزمان سازی امواج در فضای سه بعدی..... ۵۵
- شکل ۴-۳ ب همزمانی امواج تابشی، بازتابشی و عبوری در خط مشخص شده در حضور زمین..... ۵۵
- شکل ۱-۴ ایجاد موج مسطح با زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور عمودی با روش TFSF. (الف) نمای سه بعدی؛ (ب) صفحه $x_{max}/2$ ؛ (ج) صفحه $y_{max}/2$ ؛ (د) صفحه $z_{max}/2$ ۶۰

- شکل ۴-۲ الف اندازه دامنه پراکندگی استوانه هادی؛ قطبشهای HH و VV..... ۶۱
- شکل ۴-۲ ب اندازه دامنه پراکندگی استوانه هادی؛ قطبشهای VH و HV..... ۶۱
- شکل ۴-۳ محل سطح تبدیل NTFF..... ۶۲
- شکل ۴-۴ الف اندازه دامنه پراکندگی (قطبش HH و VV و زاویه تابش ۳۰ درجه)..... ۶۴
- شکل ۴-۴ ب اندازه دامنه پراکندگی (قطبش HH و VV و زاویه تابش ۳۰ درجه)؛ زوایای پراکندگی کمتر از ۹۰ درجه..... ۶۴
- شکل ۴-۵ الف اندازه دامنه پراکندگی (قطبش VH و HV، زاویه تابش ۳۰ درجه)..... ۶۴
- شکل ۴-۵ ب اندازه دامنه پراکندگی (قطبش VH و HV، زاویه تابش ۳۰ درجه)؛ زوایای پراکندگی کمتر از ۹۰ درجه..... ۶۴
- شکل ۴-۶ سطح مقطع راداری بای استاتیک (بر حسب dB) بر حسب زاویه پراکندگی (زاویه تابش ۳۰ درجه)..... ۶۵
- شکل ۴-۷ انتشار موج در فضای آزاد در شبکه دو بعدی (مشابه روش استاندارد)..... ۶۶
- شکل ۴-۸ انتشار موج در حضور زمین در فضای دو بعدی..... ۶۷
- شکل ۴-۹ الف مدل استوانه در بالای زمین به منظور شبیه سازی..... ۶۸
- شکل ۴-۹ ب وضعیت انتشار موج در حضور زمین و استوانه..... ۶۸
- شکل ۴-۱۰ الف اندازه دامنه پراکندگی؛ نتایج شبیه سازی مقاله..... ۶۸
- شکل ۴-۱۰ ب اندازه دامنه پراکندگی؛ نتایج کد نوشته شده..... ۶۸
- شکل ۴-۱۱ الف فاز دامنه پراکندگی؛ نتایج شبیه سازی مقاله..... ۶۸
- شکل ۴-۱۱ ب فاز دامنه پراکندگی؛ نتایج کد نوشته شده..... ۶۸
- شکل ۴-۱۲ مقایسه تاثیر رسانایی زمین در بازتاب و عبور موج؛ رسانایی حالت (b) بسیار بیشتر از حالت (a) است..... ۶۹
- شکل ۴-۱۳ مقایسه دامنه پراکندگی استوانه روی زمین بی تلفات و با تلفات..... ۷۰
- شکل ۴-۱۴ انتشار موج در فضای آزاد در فضای سه بعدی..... ۷۱
- شکل ۴-۱۵ نمای دو بعدی از انتشار موج در حضور زمین بدون تلفات در فضای سه بعدی در زمانهای مختلف..... ۷۲
- شکل ۴-۱۶ نمای سه بعدی از انتشار موج در حضور زمین بدون تلفات در فضای سه بعدی..... ۷۲
- شکل ۴-۱۷ نمای دو بعدی از انتشار موج در زمین تلفاتی در فضای سه بعدی..... ۷۳
- شکل ۴-۱۸ الف اندازه دامنه پراکندگی در قطبش HH و زاویه تابش صفر درجه..... ۷۴

- شکل ۴-۱۸ ب اندازه دامنه پراکندگی در قطبش VH و زاویه تابش صفر درجه..... ۷۴
- شکل ۴-۱۹ الف اندازه دامنه پراکندگی در قطبش VV و زاویه تابش صفر درجه..... ۷۴
- شکل ۴-۱۹ ب اندازه دامنه پراکندگی در قطبش HV و زاویه تابش صفر درجه..... ۷۴
- شکل ۴-۲۰ الف اندازه دامنه پراکندگی درخت در حضور زمین؛ قطبشهای HH و VV..... ۷۶
- شکل ۴-۲۰ ب اندازه دامنه پراکندگی درخت در حضور زمین؛ قطبشهای VH و HV..... ۷۶
- شکل ۴-۲۱ سطح مقطع راداری درخت در حضور زمین در حالت بای استاتیک (برحسب dB)..... ۷۶
- شکل ۴-۲۲ الف سطح مقطع راداری درخت در نبود و حضور زمین در حالت بای استاتیک؛ قطبشهای HH و VH..... ۷۷
- شکل ۴-۲۲ ب سطح مقطع راداری درخت در نبود و حضور زمین در حالت بای استاتیک؛ قطبشهای VV و HV..... ۷۷
- شکل ۴-۲۳ اثر رطوبت خاک روی پراکندگی بازگشتی..... ۷۸
- شکل ۴-۲۴ وضعیت قرار گیری چهار درخت روی سطح زمین؛ (a) نمای کنار، (b) نمای بالا..... ۷۹
- شکل ۴-۲۵ انتشار موج در حضور درختان در گام های زمانی مختلف..... ۸۰
- شکل ۴-۲۶ توان دریافتی (بر حسب dB) برای سه مسیر در فرکانس ۴۰۰MHz..... ۸۱
- شکل ۴-۲۷ توان دریافتی (بر حسب dB) در دو مسیر در فرکانسهای ۴۰۰MHz و ۹۰۰MHz..... ۸۲
- شکل ۴-۲۸ الف توان دریافتی (بر حسب dB) در دو مسیر با درختان دارای برگ و درختان بی برگ در فرکانس ۴۰۰MHz..... ۸۲
- شکل ۴-۲۸ ب توان دریافتی (بر حسب dB) در دو مسیر با درختان دارای برگ و درختان بدون برگ در فرکانس ۹۰۰MHz..... ۸۲
- شکل ۴-۲۹ وضعیت قرار گیری چهار درخت روی سطح زمین؛ (a) نما از کنار، (b) نما از بالا..... ۸۳
- شکل ۴-۳۰ مقایسه توان دریافتی در سه حالت فضای آزاد، مسیر LOS و مسیر NLOS..... ۸۴
- شکل ۴-۳۱ میزان تلفات برای نقاط LOS و NLOS..... ۸۵
- شکل ۴-۳۲ سیگنال ارسالی در حوزه زمان..... ۸۵
- شکل ۴-۳۳ الف سیگنال دریافتی در حوزه زمان برای مسیر NLOS..... ۸۶
- شکل ۴-۳۳ ب سیگنال دریافتی در حوزه زمان برای مسیر LOS..... ۸۶
- شکل ۴-۳۴ پاسخ فرکانسی (بر حسب dB) برای دو گیرنده Rx1 و Rx2..... ۸۶
- شکل ۱ مرز TFSF..... ۹۷

فهرست اختصارات

ABCs	Absorbing Boundary Conditions
CPML	Convolutional Perfectly Matched Layer
DBA	Distorted Born Approximation
EFIE	Electric Field Integral Equation
FDTD	Finite-Difference Time-Domain
GO	Geometric-Optics
HF	High Frequency
HH	Horizontal to Horizontal (polarisation)
HV	Horizontal to Vertical (polarisation)
LOS	Line of Sight
MIMICS	Michigan Microwave Canopy Scattering Models
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MoM	Method of Moments
MWFDTD	Moving Window Finite-Difference Time-Domain
NLOS	Non Line of Sight
NFFF	Near- to Far-Field
PEC	Perfect Electric Conductor
PML	Perfectly Matched Layer
PO	Physical-Optics
RBCs	Radiation Boundary conditions
RCS	Radar Cross Section
RT	Radiative Transfer
Rx	Receiver
SAR	Synthetic Aperture Radar
SIMO	Single-Input Multiple-Output
SISO	Single-Input Single -Output
TFSF	Total Field\Scattered Field
TWFDTD	Three-Wave Finite-Difference Time-Domain
Tx	Transmitter
UHF	Ultra High Frequency
VH	Vertical to Horizontal
VHF	Very High Frequency
VV	Vertical to Vertical (polarisation)

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

در ارتباطات راداری، ماهواره‌ای و مخابرات بی‌سیم^۱، امواج الکترومغناطیسی در محیط منتشر می‌شوند و با اجسام مختلفی برهم‌کنش دارند تا در نهایت به گیرنده برسند. با توجه به حضور وسیع گیاهان در محیط‌های انتشار امواج، بررسی وضعیت برهم‌کنش امواج با گیاهان، از اهمیت زیادی برخوردار است. گیاهان با جذب و پراکنده ساختن امواج، باعث تضعیف موج می‌شوند. هدف این پژوهش، ارائه راهکاری به منظور بررسی انتشار موج در حضور درختان و محاسبه پراکندگی^۲ و تضعیف موج توسط آنها می‌باشد. نتایج حاصل، در مطالعات سنجش از دور^۳ نواحی گیاهی و تفسیر داده‌های سنجش از دور و طراحی مناسب سیستم‌های مخابراتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این فصل ابتدا به معرفی سنجش از دور و اهمیت آن می‌پردازیم. در ادامه، به معرفی مفهوم پراکندگی می‌پردازیم که در بحث سنجش از دور مورد نیاز می‌باشد. سپس اهمیت تعیین مدل تضعیف موج را در طراحی شبکه‌های مخابراتی و پارامترهای لازم برای مدل‌سازی کانال^۴ را بیان می‌کنیم. در بررسی میزان پراکندگی و تضعیف موج توسط گیاهان، هم باید مدلی مناسب برای گیاه در نظر گرفت و هم باید روش مناسبی برای محاسبه پراکندگی و تضعیف موج انتخاب نمود. در ادامه‌ی فصل، مدل فیزیکی و دی‌الکتریک مناسب برای گیاهان و زمین معرفی شده است. در انتهای فصل مروری بر مطالعات انجام گرفته در دو

¹ Wireless communication

² Scattering

³ Remote sensing

⁴ Channel modeling

حوزه سنجش از دور و مدلسازی کانال خواهیم داشت و روش‌های بکار رفته در آنها را بیان خواهیم نمود.

۱-۲ سنجش از دور

سنجش از دور در کاربردهای مدرن، استفاده از فناوری سنسور هوایی برای شناسایی و دسته بندی اهداف روی زمین به وسیله انتشار امواج الکترومغناطیسی (تشعشع شده از هواپیما، ماهواره یا راديو مترهای زمینی) می باشد.

به طور کلی دو نوع سنجش از دور وجود دارد: سنجش از دور فعال^۱ و سنجش از دور غیرفعال^۲. در سنجش از دور غیرفعال، بازتابش حرارتی ناشی از تابش خورشید بر زمین، توسط سنسورهای غیرفعال دریافت می شوند و با پردازش آنها اطلاعات مورد نیاز استخراج می شود. در سنجش از دور فعال، موج الکترومغناطیسی به منظور کاوش اهداف و نواحی مورد نظر تشعشع می شود و امواج بازگشتی از سوی هدف به سمت گیرنده، شناسایی و اندازه گیری می شود. این روش، به علت عدم نیاز به نور خورشید، در شب و روز قابلیت دارد. رادار مهم ترین سنسور سنجش از دور فعال است.

سنجش از دور در زمینه های مختلفی از جمله مطالعه پوشش های گیاهی (کشاورزی، جنگل، اکولوژی)، زمین شناسی، اقیانوس شناسی، مطالعات شهری، مطالعات آب، مطالعات جو و هواشناسی، مطالعات خاک، مطالعات بلایای طبیعی و نقشه برداری کاربرد دارد.

امواج الکترومغناطیسی در فرکانسهای میکروویو^۳ قادر به نفوذ در گیاهان و خاک زیرین و حساس به پارامترهای گیاهان هستند. بنابراین از بزرگترین کاربردهای سنجش از دور با امواج مایکروویو بررسی پارامترهای مربوط به گیاهان و خاک موجود در زیر آنها و شناسایی اهداف پنهان شده در زیر پوشش های گیاهی می باشد.

^۱ Active remote sensing

^۲ Passive remote sensing

^۳ Microwave

سنجش از دور جنگلها، به علت نقشی که جنگلها در فرآیندهای مربوط به آب و فرآیندهای زیستی-شیمیایی، بویژه در فرآیندهای مبادله گاز و آب بین خاک و اتمسفر از طریق گیاهان دارند، مورد توجه قرار گرفته است. بررسی تغییرات طبیعی و زیستی در جنگلها می‌تواند به درک بهتر از نقش پوششهای جنگلی در کاهش یا افزایش میزان گاز کربن دی اکسید (CO_2) که موضوعی مهم برای مطالعات تغییرات جهانی می‌باشد، کمک کند.

رطوبت خاک یک متغیر کلیدی در زمین با اهمیت اساسی در فرآیندهای مربوط به آب و فرآیندهای زیستی است. درک وضعیت چرخه‌های آب جهانی، انرژی و کربن بسیار اساسی است. به طور مشخص، رطوبت خاک می‌تواند آب و چرخه کربن را از طریق پوشش گیاهی و ریشه‌های آن به هم مرتبط سازد. دانستن میزان رطوبت برای آژانسهای مربوط به پیش بینی وضع هوا و پیش بینی روند تغییرات آب و هوا، پتانسیل جریان آب و کنترل سیل با اهمیت است.

به منظور تفسیر داده‌های رادار سنجش از دور نواحی جنگلی و دارای گیاه، الگوریتمهای بازیابی مورد نیاز می‌باشند. این الگوریتمها تخمین مناسبی از زیست توده، رطوبت گیاه و دیگر پارامترهای فیزیکی پوشش درخت از روی داده‌های رادار در چندین قطبش^۱ و چندین فرکانس بدست می‌دهند. الگوریتمهای بازیابی اغلب مسئله معکوس^۲ نامیده می‌شوند زیرا ورودی و خروجی آنها عکس مسئله مستقیم است. در مسئله حاضر، این الگوریتم، مدل پراکندگی راداری می‌باشد و پاسخ رادار را به ساختار گیاه و پارامترهای مربوط به آن مرتبط می‌سازد.

۱-۳ مفهوم پراکندگی

وقتی امواج طی حرکت خود در محیط به جسمی می‌رسند، با توجه به خصوصیات جسم یا ماده، سه وضعیت برای موج بوجود می‌آید (شکل ۱-۱):

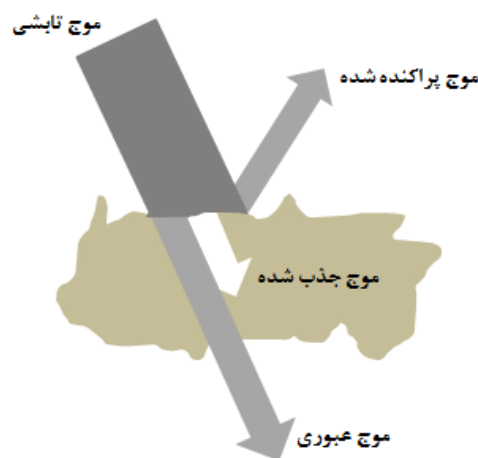
¹ Polarization

² Inverse problem

الف) بخشی از موج توسط جسم جذب می‌شود که این امر به صورت افزایش حرارت جسم ظاهر می‌شود. این موج جذب شده در نهایت بازتابش می‌شود.

ب) بخشی از موج از جسم عبور می‌کند و از آن خارج می‌شود.

ج) بخشی از موج با برخورد به سطح جسم در جهت‌های مختلف بازتابیده می‌شود که به این پدیده پراکندگی گفته می‌شود.



شکل ۱-۱ وضعیت موج در برخورد به جسم

تعریف: جسمی که موج تابشی را پراکنده می‌سازد، پراکنده‌گر^۱ نامیده می‌شود.

۱-۳-۱ سازوکارهای پراکندگی

پدیده پراکندگی با توجه به تعداد بازتابش موج به سه سازوکار کلی تقسیم می‌شود:

الف) پراکندگی یکتا^۲: حالتی است که موج یک بار بازتابیده می‌شود (شکل ۱-۲).

ب) پراکندگی دوگانه^۳: در این حالت موج در دو مرحله بازتابیده می‌شود (شکل ۱-۳).

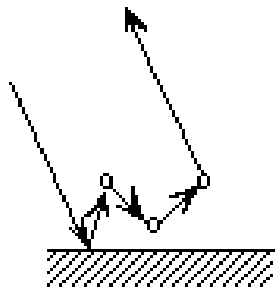
ج) پراکندگی چندگانه^۴: در این حالت موج با برخورد به پراکنده‌گرهای مختلف چندین بار بازتابیده می‌شود (شکل ۱-۴). گیاهان به علت وجود شاخ و برگها، پراکندگی چندگانه ایجاد می‌کنند.

^۱ Scatterer

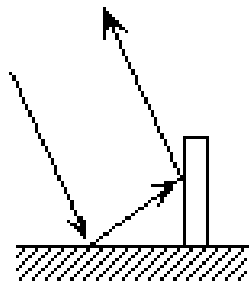
^۲ Single scattering

^۳ Double bounce scattering

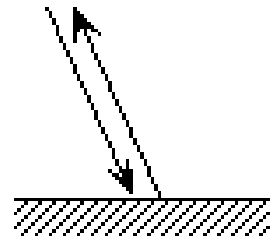
^۴ Multiple scattering



شکل ۱-۴ پراکندگی چندگانه



شکل ۱-۳ پراکندگی دوگانه



شکل ۱-۲ پراکندگی یکتا

۱-۳-۲ پراکندگی الکترومغناطیسی

پراکندگی ناشی از تابش موج الکترومغناطیسی به هدف، پراکندگی الکترومغناطیسی نامیده می‌شود. امواج الکترومغناطیسی از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل می‌شوند. این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به وسیله معادلات ماکسول^۱ به هم مرتبط می‌شوند. این معادلات در تحلیل پراکندگی الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۲-۳-۱ معادلات ماکسول

میدان‌ها، بارها و جریان‌های الکتریکی و مغناطیسی توسط قوانین فیزیکی به هم مربوط می‌شوند. این قوانین، معادلات ماکسول نام دارند. فرم دیفرانسیلی معادلات ماکسول به صورت زیر است:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - M \quad (۱-۱الف)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (۱-۱ب)$$

$$\nabla \cdot D = \rho_e \quad (۱-۱ج)$$

$$\nabla \cdot B = \rho_m \quad (۱-۱د)$$

در این روابط، E شدت میدان الکتریکی (ولت بر متر)، H شدت میدان مغناطیسی (آمپر بر متر)، D چگالی شار الکتریکی (کولن بر مترمربع)، B چگالی شار مغناطیسی (وبر بر مترمربع)، J جریان الکتریکی (آمپر بر مترمربع)، M جریان مغناطیسی (ولت بر متر مربع)، ρ_e بار الکتریکی (کولن بر

^۱ Maxwell's equations

مترمکعب) و ρ_m بار مغناطیسی (وبر بر مترمکعب) می‌باشد. اگرچه در عمل منبع تولید امواج الکترومغناطیسی توزیع بارها و جریان‌های الکتریکی می‌باشد و بارها و جریان‌های مغناطیسی وجود خارجی ندارند، اما برای حفظ تشابه در معادلات ریاضی بارها و جریان‌های مغناطیسی نیز لحاظ می‌شوند.

در محیط‌های خطی^۱ (محیط با خصوصیات الکتریکی و مغناطیسی مستقل از میدان)، همسانگرد^۲ (محیط با خصوصیات الکتریکی و مغناطیسی مستقل از جهت)، غیرپاشنده^۳ (محیط با خصوصیات الکتریکی و مغناطیسی مستقل از فرکانس)، روابط میان D با E و B با H به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D = \varepsilon E = \varepsilon_r \varepsilon_0 E \quad (1-2 \text{ الف})$$

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad (1-2 \text{ ب})$$

ε : ضریب گذردهی الکتریکی^۴

ε_0 : ضریب گذردهی الکتریکی فضای آزاد ($10^{-12} \times 8.854$ فاراد بر متر)

ε_r : ضریب گذردهی الکتریکی نسبی^۵ یا ثابت دی الکتریک^۶

μ : ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی^۷

μ_0 : ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی فضای آزاد ($4\pi \times 10^{-7}$ هانری بر متر)

μ_r : ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی^۸

باید توجه داشت که جریانهای J و M ناشی از دو عامل، یکی منبع جریان مستقل از میدان و دیگری هدایت الکتریکی و مغناطیسی محیط می‌باشند:

$$J = J_{source} + \sigma E ; \quad M = M_{source} + \sigma^* H \quad (3-1)$$

σ : هدایت الکتریکی (زیمنس بر متر)

σ^* : تلفات مغناطیسی معادل

¹ Linear

² Isotropic

³ Nondispersive

⁴ Electrical permittivity

⁵ Relative permittivity

⁶ Dielectric constant

⁷ Magnetic permeability

⁸ Relative permeability

در نهایت معادلات ماکسول به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} - M_{source} + \sigma^* H \quad (1-4\text{الف})$$

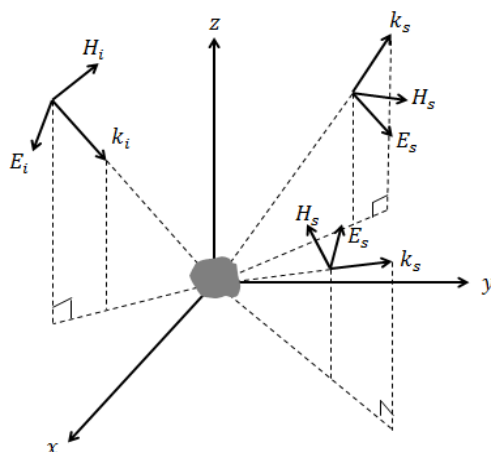
$$\nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + J_{source} + \sigma E \quad (1-4\text{ب})$$

۳-۲-۲-۱ پراکندگی الکترومغناطیسی

میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی یک موج الکترومغناطیسی تابیده شده به یک محیط، به صورت E^i و H^i نامگذاری می‌شوند. اگر جسمی در محیط قرار گیرد، امواج تابشی از مسیر خود منحرف می‌شوند و این انحراف با میدان‌های پراکنده شده E^s و H^s شناخته می‌شود. در نتیجه معادلات زیر در کل فضا حاکم می‌شود.

$$E^t = E^i + E^s \quad ; \quad H^t = H^i + H^s \quad (5-1)$$

که E^t و H^t میدان‌های برآیند در حضور جسم می‌باشند. جسم پراکنده‌گر با ضریب گذردی الکتریکی نسبی (ثابت دی الکتریک) و ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی در محیط تعریف می‌شود. در توضیح پدیده پراکندگی باید گفت که با برخورد امواج تابشی به جسم، جریان‌های الکتریکی روی سطح جسم القا می‌شود که این جریان‌ها منبع تولید امواج الکترومغناطیسی پراکنده شده می‌باشد. شکل (۵-۱) مولفه میدان الکتریکی و مغناطیسی امواج تابشی و پراکنده شده را نشان می‌دهد (k جهت انتشار می‌باشد):



شکل ۵-۱ میدان‌های تابشی و پراکنده شده و جهت انتشار آنها