بررسی برهم‌کنش امواج مایکروویو با سطح زمین

مهندس داود مجیدی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

دانشکده آمایش و پدافندغیرعامل

چکیده

امروزه سنجش از دور مایکروویو در بررسی و پایش سطح زمین و عوارض آن از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. اساس سنجش از دور مایکروویو مبتنی بر شناخت دقیق برهم‌کنش این امواج با سطوح مختلف زمین نظیر خاک، آب، پوشش گیاهی و... است. بدون چنین شناختی اتخاذ شیوه‌های کارآمد و مؤثر پدافند غیرعامل برای حفظ مراکز حیاتی، حساس و مهم امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این مقاله به بررسی چگونگی برهم‌کنش امواج مایکروویو با اجزای اصلی سطح زمین می‌پردازیم.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، مایکروویو، پدافند غیرعامل، تابش الکترومغناطیس.

مقدمه

گسیل مایکروویو از اشیاء به طور عمده به دمای فیزیکی اشیاء و خواص دی الکتریکی آنها بستگی دارد (یعنی، بسامدشان به خواص تابشی یا جذبی بستگی دارد.) خواص دی‌الکتریک به ساختار فیزیکی اجسام مربوط می‌شود، یعنی: مواد تشکیل دهنده آنها[۱]. برای بیشتر کاربردهای عملی تصویربردارهای مایکروویو (جهت مشاهدات خشکی و انجماد دریا)، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر شدت‌های اندازه‌گیری شده عبارتند از: حرارت، شوری و میزان آب مایع. هم‌چنین ناهمواری‌های سطح که جهت‌مندی گسیل را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

هنگامی که در مقایسه با طول موج، سطحی دارای ناهمواری تناوبی باشد آنگاه پراکندگی همدوس (تشدیدی) رخ می‌دهد که به عنوان پراکندگی براگ[۱] شناخته می‌شود[۲]. برای سادگی در سنجش از دور ریز موج حالت سطح را افقی در نظر می‌گیریم؛ آنگاه می‌توانیم مقیاس ناهمواری یک سطح ناهموار کاتوره‌ای را با استفاده از انحراف استاندارد (یا متوسط مجذور ریشه) ارتفاع h از ارتفاع متوسط $\bar{h}$ سطح ($\bar{h},h$) بسیار بزرگ‌تر از طول موج تعریف می‌شوند). سؤال مهمی که پیش می‌آید، این است که مقدار بزرگی h پیش از در نظر گرفتن ناهمواری سطح چه می‌تواند داشته باشد؟

یک رهیافت این است که بپرسیم دو پرتو اگر از دو تراز[۲] مختلف یک سطح با انحراف استاندارد بالای h بازتابیده شوند، ممکن است چه اختلاف فازی، $\Delta\varphi$، داشته باشند. هنگامی که چنین تفکیکی اندازه‌ی کافی بزرگ، به اندازه‌ی مقیاس یک طول موج آغاز می‌گردد، امواج بازتابیده شده به روش غیرقابل پیش‌بینی (ناهمدوس) از روی سطح شروع به تداخل می‌کنند و اثر بازتاب همدوس سطوح صاف از اهمیت کم‌تری برخوردار می‌شود.

این معیار توسط ریلی برای پاسخ به این سؤال بیان شد که برای یک سطح صاف توصیف شده اختلاف فاز ناشی از h باید کم‌تر از یک چهارم طول باشد، یعنی باید شرط $\Delta\varphi<\pi/2$ برآورده شود. تغییر فاز میانگین بزرگ‌تر از این بدین معناست که به طور میانگین امواج پراکنده شده همدوس نبوده، و به طور فزاینده‌ای نفوذی‌تر[۳] خواهند شد. واژه‌ی «نفوذ» در این جا برای توصیف پراکندگی از سطحی که متضاد با بازتاب کننده‌ی آینه‌ای بوده و به طور مساوی انرژی را در تمامی جهت‌ها بازهدایت می‌کند، استفاده می‌گردد. برحسب h، معیار ریلی به صورت زیر است:

$$h_{smooth} < \frac{\lambda}{8\cos\theta_i} \qquad (۱)$$

که θ_i زاویه برخورد و λ طول موج پرتو برخورد است. توجه خواهید نمود که در این جا یک فعال اضافی ۲ وجود دارد (که به جای $\frac{1}{4}$ مقدار $\frac{1}{8}$ می‌دهد) بدین دلیل که باید این دو راه مسیر موج ورودی و موجی که پراکنده شده است (مسیر برخوردی و مسیر پراکنده شده) را محاسبه کنیم. این حالت شامل تأثیر زاویه برخورد نیز می‌شود از این رو اختلاف مسیر مرتبط با h با زاویه موج ورودی متفاوت خواهد بود.

هنگامی که سطح ناهموار باشد، معیار ریلی تقریب مرتبه‌ی اول است. با وجود این، برای مدل‌سازی رفتار پراکندگی مایکروویو از سطوح طبیعی، که اغلب طول موج، مرتبه‌ای از h است، معیار دقیق‌تری مناسب‌تر است. این حالت پیش از این که گفته شود یک سطح صاف است، نیازمند اختلاف فازی است که بتواند $\Delta\varphi<\pi/8$ را برآورد نماید، یعنی:

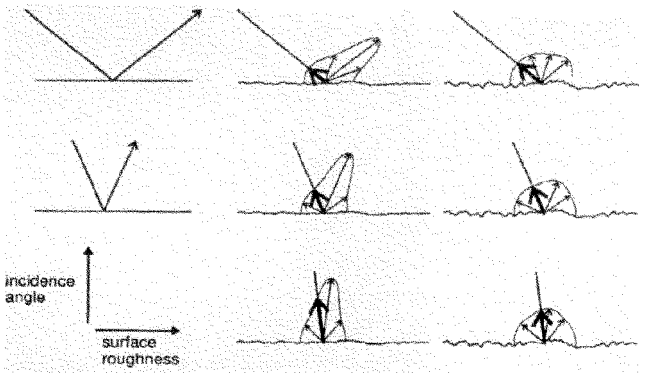
$$h_{smooth} < \frac{\lambda}{32\cos\theta_i}$$

این حد به عنوان معیار فرانهوفر در نظر گرفته می‌شود.

۱- سطوح تناوبی

یک مورد خاص از سطح ناهموار وجود دارد که ناهمواری نشان دهنده یک الگوی منظم و تناوبی است و در آن تغییر ارتفاع rms در یک ناحیه‌ی کوچک کم‌تر از $\lambda/8$ است (یعنی با توجه به معیار ریلی صاف است) این حالت معمولاً برای

توصیف سطوح دریا برای سامانه‌های رادار به‌کار برده می‌شود که در این حالت وزش باد آهسته سبب ایجاد موجک یا امواج گرانشی کوتاه می‌گردد به طوری که طول موج‌ها در ناحیه‌ی میلی‌متر تا سانتی‌متر بوده و همانند یک سطح براگ[۴] عمل می‌کنند.



نگاره ۱: ناهمواری سطح و زاویه‌ی فرود، میدان پراکنده شده را تعیین می‌کنند. برای سطوح صاف فقط بازتابش آینه‌ای رخ می‌دهد، در حالی که برای سطوح ناهموار پراکندگی نفوذی نیز رخ می‌دهد. برای وضعیت بیشترین ناهمواری، پراکندگی تقریباً به طور کامل نفوذی است، و نسبت به زاویه تغییر چندانی نمی‌کند.

ویژگی مهم پراکندگی براگ مکانیسم پراکندگی همدوس است اما امواج را در جهت‌های متفاوت و نه فقط جهت آینه‌ای، پراکنده می‌کند. ماهیت منظم سطح منجر به امواج پراکنده‌ای می‌شود که در برخی از جهت‌ها به طور سازنده و در جهت‌های دیگر به طور مخرب ترکیب می‌شوند. می‌توانیم از مدل رویه[۵] برای توصیف سطح براگ استفاده کنیم. برخلاف سطح ناهموار کاتوره‌ای، رویه‌های سطح براگ دارای یک الگوی منظم هستند، به طوری که هر رویه به طور منظم دارای یک زاویه خاص و فاصله‌ی یکسان از هم می‌باشند. هر موجی که این رویه‌ها را ترک کند در همان برخی جهت‌ها به طور سازنده و در جهت‌های دیگر به طور مخرب ترکیب می‌شود، از آن جایی که فاصله‌ی تفکیک (رویه‌ها) می‌تواند نسبت به طول موج بزرگ‌تر باشد.

از منظر اندازه‌گیری یک سامانه راداری، جنبه‌ی مهم این است که سطوح براگ حساسیت بالایی نسبت به زاویه‌ی فرودی/ مشاهده از خود نشان خواهند داد. از این اصل برای اندازه‌گیری اندازه‌ی موجک‌های ناشی از وزش باد بر روی اقیانوس‌ها با استفاده از ادوات پراکنده سنج باد[۶] استفاده می‌شود. هم چنین با این فرض که سطح ناهموار را می‌توان با استفاده از یک مجموعه‌ی نامحدود منظم سینوسی شکل موج توصیف کرد؛ از اصل پراکندگی براگ می‌توان برای مدل سطوح پیچیده‌تر استفاده کرد. ریاضیات مورد نیاز موسوم به تحلیل فوریه است، اما در این جا کافی است بدانیم که اگر یک سطح، مانند سطح اقیانوس را بتوان با جمع تعدادی از سطح شبه موج منظم با دامنه و طول موج مختلف توصیف نمود، آنگاه می‌توانیم یک مدل ریاضی از پراکندگی سطح بر پایه‌ی جمع تمامی پراکندگی‌های خوش تعریف هر یک از مؤلفه‌های امواج ایجاد کنیم. به بیان دیگر سطح پیچیده‌ی اقیانوس را می‌توان با مجموع‌گیری[۷] از جملات پراکندگی مربوط به هر مؤلفه‌ی موج مدل سازی کرد. توصیف پراکندگی موج منظم نسبتاً آسان است در حالی که انجام همین کار برای یک سطح مرکب[۸] بسیار مشکل است.

۲- پراکندگی و گسیل از سطوح طبیعی

۲-۱- اقیانوس‌ها و دریاچه‌ها

در شرایط سکون، بازتابندگی اقیانوس تابعی خوش تعریف از دما و شوری آب است. آب دریا در حدود ۳/۲٪ نمک دارد اما این مقدار در نواحی نزدیک به مناطق ساحلی کم‌تر است زیرا با آب شیرین مناطق زهکشی شده ترکیب می‌شود. بازتابندگی اقیانوس با بالارفتن دما و کاهش بسامد افزایش می‌یابد.

بازتابندگی هم‌چنین با بالا رفتن شوری افزایش می‌یابد گرچه مقدار برای بسامدهای کم‌تر از ۶GHz مشهود است [۳].

با وجود این، دریا به ندرت آرام است تا موجب سهولت کارها شود. تغییرات در ناهمواری سطح عامل کلیدی در خواص مایکروویو توده‌ی آب است و تمام سطوح آب تحت تأثیرباد قرار دارند.اصطحکاک بین هوا و آب موجب تشکیل‌امواج گرانی-مویین[۹] در مقیاس میلی‌متر تا سانتی‌متر می‌شود- اگر سطح آب را در یک روز بادی مشاهده نمایید، شاهد سطوح ناهمواری ناشی از وزش تندبادها در سطح مقطع آب خواهید بود. این امواج با مقیاس فضایی کوچک در بازه‌ی زمانی بسیار کوتاهی عمل می‌کنند و بنابراین وابستگی بسیاری به جریان لحظه‌ای هوا بر روی سطح دارند. هم چنین توده‌های بزرگ‌تر آب نیز دارای امواج گرانی بزرگ‌تر (تقریباً متر)می‌باشند. هم چنین در اقیانوس‌ها با تغییرات سطح ناشی از موج مرده[۱۰] و جریان‌های بزرگ مقیاس مواجه‌ایم. این پدیده‌ها از چندین متر تا چند کیلومتر کارکرد داشته و بنابراین در مقیاس‌های زمانی بزرگ‌تری عمل می‌نمایند.

بنابراین اغلب اقیانوس به صورت ترکیبی از شکل موج‌های متوالی با طول موج و دامنه‌ی مختلف مدل‌سازی (یعنی مدل براگ) می‌شوند. این بازه از شکل موج‌ها طیف[۱۱] نامیده می‌شوند.

رابطه‌ی بین باد و طیف موج ساده نیست، اما به طور کلی باد با سرعت بیشتر سطح ناهموارتری را در تمامی مقیاس‌ها ایجاد خواهد نمود. هم بازتابندگی و هم پس پراکندگی با افزایش ناهمواری سطح تغییر خواهند کرد و در نتیجه موجب تغییر قطبش در زوایای دید غیر عمود[۱۲] خواهد شد. سطح ناهموارتر موجب کنتراست کم‌تری بین قطبش H و V می‌شود. بدین معنا که اندازه‌گیری‌های مایکروویو فعال و غیرفعال پتانسیل لازم برای ارائه اطلاعاتی در مورد ناهمواری سطح و در نتیجه سرعت باد را دارا می‌باشند. در نزدیکی زاویه‌ی عمود امواج با شدت کم بیشترین تأثیر را بر روی کنتراست H-V دارند، از این رو دارای یک جهت‌گیری ترجیحی (یعنی، کنتراست قطبش سنجی وابسته به جهت امواج است) هستند. در

زوایای دید بالا، تمایلی برای کنتراست بزرگ‌تر H-V ناشی از بستگی زاویه‌ی فرودی به ضرایب بازتابندگی وجود دارد.

با وجود این توصیف سطح دریا به طور واقعی در اثر حضور حباب بر روی سطح پیچیده‌تر می‌شود چراکه بازتابندگی موضعی سطح را کاهش می‌دهند و یا لکه‌های نفت که امواج سطح را در اثر کاهش کشش سطح میرا می‌نمایند لکه‌های نفتی یا به طور طبیعی و یا از کشتی‌های تجاری به وجود می‌آیند.

کف دریا عبارتی است که دو جنبه‌ی سطح را تحت پوشش قرار می‌دهد: پوشش‌های سفید متلاطم با عمر کوتاه در قله‌ی امواج و رگه‌ها و قطعات کف[۱۳]، اگر چه باریک‌تر می‌باشند اما نسبت به پوشش‌های سفید مدت طولانی‌تری باقی می‌ماند. در ظاهر آب سفید ممکن است عیناً به صورت کف به نظر بیاید اما توجه داشته باشید که آبی که توسط هوا کف آلوده شده است در زیر سطحی قرار دارد که ممکن است در طیف مرئی سفید به نظر بیاید اما همان اثر سطح کفی را بر روی گسیلمندی مایکروویو ندارد. برای رسیدن به این سطح و از بین بردن این حباب‌ها ممکن است ناهمواری این سطح تغییر کرده و در نتیجه گسیلمندی نیز تغییر نماید.

جنبه‌ی مهم‌تر دیگر پراکندگی اقیانوس که باید در این جا بدان اشاره کرد جهت طیف موج نسبت به وزش باد (بنابراین الگوی موج تقریباً به صورت خطی است که بر جهت باد غالب است) می‌باشد. این جهت خود را در دو جنبه از مایکروویو نشان می‌دهد. نخست قطبش سنجی است، همان گونه که در بالا به آن اشاره شد، سیگنال اندازه گیری شده (هم چنین گسیلی یا پس پراکندگی)تمایل دارد تا خواص قطبش‌سنجی هم راستا با جهت امواج باشد. نکته دیگر این است که گسیل و پس پراکندگی دارای پاسخ نامتقارنی در جهت سمت هستند- یعنی اگر اندازه گیری‌ها در همان زاویه‌ی فرودی اما با جهت‌های دید متفاوت انجام گیرد.

این امواج بسیار کوچک (تقریباً چند سانتی‌متری) هستند اما به سبب این که در سرتاسر یک ناحیه بزرگ بسیار منظم هستند همانند پراکنده‌سازهای براگ تشدیدی عمل می‌کنند و رابطه‌ی مشخصی بین جهت نسبی میدان باد و توان پراکنده شده‌ی نسبی ایجاد می‌کنند. بزرگی توان پراکنده شده وابسته به سرعت باد است. هنگامی که باد در سراسر سطح اقیانوس می‌وزد این تکنیک مناسب‌ترین روش برای اندازه گیری امواج مویین ایجاد شده است.

از آن جایی که این شرایط به معنی آن است که دامنه‌های موج پراکنده شده از هر قله موجک[۱۴] مجزا به طور همدوس اضافه خواهند شد، و احتمال داشتن یک NRCS بسیار زیاد (چندdB)، حتی اگر سهم‌های مجزای [هر قله موجک]بسیار کوچک باشد؛ امکان‌پذیر است. برای مثال، تصویر یک پیکسل سار ۲۵ متری را در نظر بگیرید که حاوی ۱۰۰ موجک (با طول موج ۲/۵ سانتی‌متر) است. هر موجک به تنهایی ممکن است در این پیکسل با NRCS، ۴۵ dB- سهیم باشد که برای صدمین پیکسل محتوی شن خشک قابل قبول نیست. اگر ۱۰۰موجک به صورت ناهمدوس با هم جمع شوند، NRCS ممکن است حدود ۲۵ dB =۴۵ dB - ۲۰ dB=۴۵dB-۱۰۰x شود.

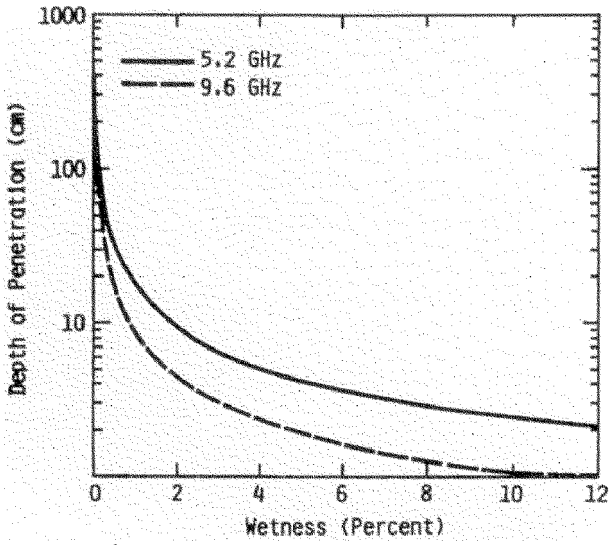
در حالت ناهمدوس می‌توانیم به سادگی NRCS را به طور مستقیم متناسب با توان اضافه کنیم. با وجود این، در حالت همدوس، دامنه‌ها را جمع می‌کنیم. بنابراین باید برای دامنه یک موجک صد برابر در نظر گرفته و در نهایت آن را مربع نموده و توانی ۱۰۰۰۰ بار بزرگ‌تر بدست آید. این حالت متناظر باید ۴۰dB است وقتی پراکندگی تشدید شده در ناحیه ۵dB- رخ می‌دهد، یک NRCS همدوس بدست می‌آید[۴].

۲-۲- یخ و برف

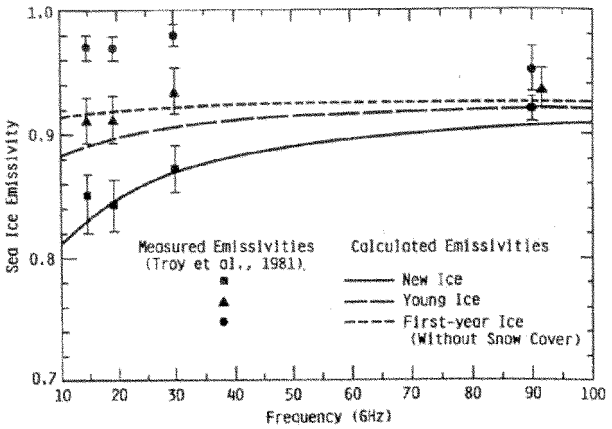
برای بررسی خواص دی‌الکتریک و ساختار برف خشک در ناحیه مایکروویو، استفاده از ماهواره‌های تصویربرداری با طول موج کوتاه (به طور مثال باند Ku) بسیار مناسب است. آب در حالت مایع دارای یک ثابت دی‌الکتریکی بسیار بالاست که در واقع اجازه هیچ نفوذی را نمی‌دهد اما هنگامی که به صورت یخ بلوری می‌شود، ثابت دی‌الکتریک آن تا حدّ زیادی افت می‌کند که موجب می‌شود تقریباً نسبت به امواج مایکروویو شفاف گردد[۵]. معمولاً یخ و برف به راحتی به صورت لایه‌های نسبتاً ساده‌ای روی سطحی با ثابت دی‌الکتریک بالا از قبیل خاک یا سنگ یا آب شکل می‌گیرند. اگر لایه‌های متفاوتی از برف، یخ و آب و خاک وجود داشته باشد ممکن است این پراکندگی زیاد باشد برای مثال می‌توان به پراکندگی در سطح دریاچه یخ‌زده‌ی پوشیده از برف اشاره نمود. بنابراین هندسه‌ی وضعیت بسیار مهم است زیرا ممکن است پراکندگی از مرز بالایی لایه، از خود لایه و از مرز بین لایه‌ها وجود داشته باشد. پراکندگی در مرزها بستگی به ناهمواری مرز و خواص دی‌الکتریکی نسبی مواد دارد. در این حالت، عامل غالب برای تعیین ثابت‌های دی‌الکتریک برف و یخ مقدار آب مایع (یا آزاد) است. رای مثال، برف آب دار دارای یک ثابت دی‌الکتریک بالاتری نسبت به برف بسیار «خشک» است.لایه‌های برف و یخ رفتاری مشابه یک پراکنده ساز توده‌ای و نه لایه‌ای از پوشش گیاهی دارند، و بنابراین در تمامی جهت‌ها امواج را به طور مساوی پراکنده می‌نمایند.

مقدار آب مایع برف، عامل تعیین کننده‌ی خشکی یا تَری برف است. برف به طور کامل خشک دارای یخ‌های سوزنی است که محیط میزبان آن در واقع هواست. بنابراین یخ‌های سوزنی به حدکافی به هم نزدیکند تا یکدیگر را نگه[۱۵] دارند و به طور معمول ۲۰-۱۰٪ از ترکیب حجم برف تازه را تشکیل می‌دهند،اما بعد از گذشت زمان و دگردیسی[۱۶](به دلیل آب شدن و انجماد مجدد می‌شود) این مقدار به ۴۰ درصد می‌رسد. اگرچه یخ‌های سوزنی غیرکروی بوده و به طور کاتوره‌ای جهت‌گیری شده‌اند به طوری که در مجموع به صورت کره‌هایی رفتار می‌کنند. در نگاره (۲) عمق نفوذ امواج مایکروویو در برف در باندهای C و X به صورت تابعی از تَری برف نشان داده شده‌است[۶].

در نگاره(۳) طیف گسیلمندی‌های نادیر انواع یخ به صورت نظری و تجربی نشان داده شده است. همان گونه که از این نگاره پیداست یخ‌های با طول عمر بیشتر در فرکانس‌های ۱۰۰-۱۰ GHz دارای گسیلمندی بیشتری می‌باشند[۷].



نگاره ۲: عمق نفوذ در برف در باندCوX به صورت تابعی از تَری برف

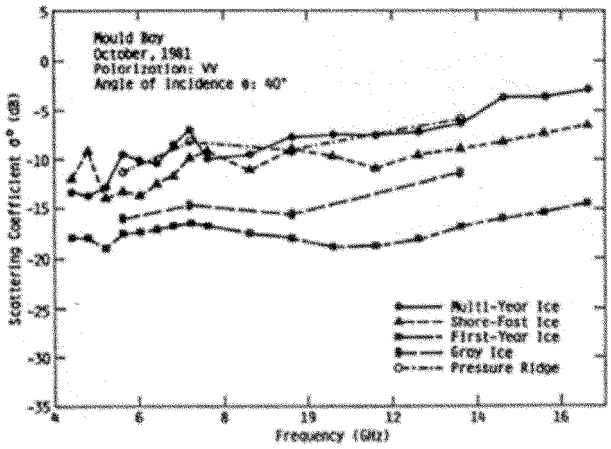


نگاره ۳: طیف محاسبه شده گسیلمندی‌های نادیر یخ جدید، یخ جوان و یخ یکساله (بدون پوشش برفی). برای مقایسه گسیلمندی‌های اندازه‌گیری شده نیز نشان داده شده است.

همانند توده‌ای از ماده، برف خشک تازه تشکیل شده ثابت دی‌الکتریک پایینی دارد، بنابراین امواج مایکروویو با یخ‌های سوزنی برهم کنش عمده‌ای ندارند اما اغلب به داخل زیرین نفوذ می‌کنند. بر هم‌کنشی که رخ می‌دهد همانند پراکندگی حجم در بسامد بالای مایکروویو عمل می‌کند.

برف زمانی مرطوب در نظر گرفته می‌شود که قطرات آب مایع بین ذرات یخ وجود داشته باشند. میانگین اندازه قطره‌ی آب خیلی کوچک‌تر از اندازه ذره‌ی یخ است و در نتیجه سهم چشمگیری در کل پراکندگی ندارد، اما سهم به سزایی در جذب دارد. حضور آب مایع در یک محیط برفی مقدار جذب را افزایش می‌دهد و در نتیجه میزان پراکندگی کاهش می‌یابد. در واقع برف مرطوب نسبت به امواج مایکروویو کوتاه رفتاری مشابه جسم سیاه از خود نشان می‌دهد[۸و۵]. بنابراین آب موجود در لایه‌ی برف آب‌دار را می‌توان به عنوان بخشی از یک محیط میزبان در نظر گرفت. برای بیشتر طول موج‌های مورد استفاده در سنجش از دور، برف همانند حجمی از پراکنده‌سازهای می[۱۷](ذرات یخ) که به طور کامل توسط مرزهای نامنظم محدود و محصور شده‌اند- عمل می‌کنند. نفوذپذیری الکتریکی هر لایه از برف بستگی به بسامد اندازه‌گیری، رطوبت برف و کسر حجمی[۱۸] دارد. هم چنین تغییرات خواص دی‌الکتریکی بالک در سراسر یک لایه یخ را می‌توان با تغییرات اندازه‌ی ذره[۱۹](یخ) و عمق برف به دست آید. بنابراین گسیلمندی و پراکندگی با ضخامت برف تغییر می‌کنند و از این رو فاکتور ضخامت،سهم کل برف را تعیین می‌کند. در برف خشک، میزان نفوذ بالاست به طوری که تغییرات گسیلمندی و پراکندگی برف خشک روی زمین وابسته به ضخامت است. از این تغییر می‌توان به عنوان مبنای اندازه‌گیری ضخامت برف استفاده نمود. در نگاره (۳) تغییر ضریب پراکندگی نسبت به بسامد برای چندین نوع یخ نشان داده شده است[۹].

از آن جایی که گسیلمندی و پراکندگی بستگی به طول موج مشاهده برای مشخص سازی اندازه‌ی المان‌های حجمی (ذرات یخ) دارد، بنابراین اندازه‌ی ذره فاکتور مهمی است. اهمیت این موضوع بدین معنا است که با مشاهدات مایکروویوی می‌توان برآوردی از بازده‌ی انباشتگی برف داشت، از این رو نسبت‌های پایین انباشتگی منجر به تشکیل ذرات یخ بزرگتر در نزدیکی سطحی می‌شود که دارای پراکندگی خوب و گسیلمندی‌های پایین می‌باشد. برای مثال، در GHz ۱۰ هنگامی که انباشتگی کم است می‌توانید گسیلی در حدود ۰/۶۵ را انتظار داشته باشید، در حالی که برای نواحی با انباشتگی بالا ممکن است این مقدار به ۰/۹ برسد(نگاره ۴)[۱۰].



نگاره ۴: مثال‌هایی از تغییر پراکندگی نسبت به بسامد برای چندین نوع یخ. قطبش عمودی بوده، اما برای قطبش افقی نیز نتایج مشابه‌ای بدست می‌آید. یخ یک ساله در بسامد ۱۰ گیگاهرتز رفتار غیر معمولی نشان می‌دهد.

با وجود این، تأثیر ترکیب پوشش برف، نسبت انباشتگی، عمق، بازذوب[۲۰] و تغییرات فیزیکی دیگر ممکن است تلاش‌ها در استنتاج هر یک از این پارامترها را بی‌ثمر سازد.

۲-۳- خاک‌ها

پاسخ خاک‌ها نسبت به صخره‌ها به طور کامل متفاوت است زیرا خاک‌ها از ترکیب ذرات خاک، هوا و آب تشکیل شده‌اند. در کل وقتی خاک مرطوب می‌شود پراکندگی افزایش و گسیل کاهش می‌یابد. در سنجش از دور خاک‌ها، این خواص کلی توده است که نسبت به ریزساختارها نسبی است از آن جایی که به طور معمول ساختار ریزمقیاس خیلی کوچک‌تر از طول موج است در سنجش از دور خاک‌ها، به جای ریزساختارها این خواص کلی توده است که (حداقل به طور مستقیم) مهم است. تعیین خواص دی‌الکتریک توده خاک آسان نیست همان طور که تعیین میانگین وزنی خاک و آب نیز به سادگی نیست. آب موجود در خاک می‌تواند هم به صورت آزاد و هم به صورت پیوندی باشد. مولکول‌های آزاد آب قادرند تا به اندازه حالت انرژی چرخشی‌شان یعنی $e' \sim ۸۰$ برانگیخته شوند. در حالی که مولکول‌های پیوندی آب توسط سطح ذرات خاک جذب می‌شوند، بنابراین مولکول‌ها برای چرخش آزادی ندارند. نسبت آب آزاد به آب پیوندی به خواص خاک هم چون ناحیه سطح وابسته به مقدار، شکل و اندازه ذرات خاک است. در هر حال، برخی از الگوریتم‌ها که برای تعیین خواص دی‌الکتریک توده خاک در دسترس‌اند مشخصه‌های فیزیکی و میزان رطوبت خاک را به ما می‌دهند. همان طور که آب به خاک افزوده می‌شود بخش حقیقی ثابت دی‌الکتریک به آرامی افزایش می‌یابد تا این که بیشتر مولکول‌های آب در میان خاک محصور شوند. در ناحیه مایکروویو برای هوا $e' = ۱$، برای خاک، ۴، و برای آب مقدار تقریباً ۸۰ را انتظار داریم. به طوری که میزان آب مایع بیشترین تأثیر را بر روی خواص دی‌الکتریک خاک دارد. مقدار ε' برای خاک اشباع شده، به سمت مقدار آب مایع (در $\varepsilon' = ۸۰$ و $\geq ۱GHz$ است) میل می‌کند. به طور مشابه، بخش موهومی با افزایش رطوبت افزایش می‌یابد، اگرچه در مقیاس پایین‌تری باشد. اثرخالص (در طول موج داده شده) این است که همان گونه که رطوبت خاک افزایش می‌یابد عمق نفوذ کاهش می‌یابد. کاهش در میزان نفوذ سیگنال به همراه میزان آب آزاد بیشتر، به این معناست که اندازه‌گیری‌های مایکروویو خاک از آن چیزی که در ابتدا انتظارش را داشتیم، پیچیده‌تر است. در نگاره (۵) ضریب پراکندگی به صورت تابعی از میزان رطوبت خاک برای سه سطح با ناهمواری مختلف نشان داده شده است [۱۱-۱۲].

خاک‌های بسیار خشک همانند توده‌ای عمل می‌کنند که توسط امواج مایکروویو پراکنده شده و در سراسر عمق خاک گسیل و یا پراکنده شده است که این حالت همانند مورد مربوط به شن است، در حالی که خاک‌های بسیار مرطوب به طور حتم همانند یک سطح ناهموار عمل می‌کنند. بنابراین خواص گسیل و پراکندگی به ناهمواری سطح و توزیع عمودی میزان رطوبت خاک بستگی دارد (نگاره ۶)[۱۳].

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در استفاده از داده‌های مایکروویو برای تعیین میزان رطوبت خاک وجود دارد. هیچ راه ساده‌ای برای تشخیص اثرات ناهمواری سطح و اثرات میزان آب وجود ندارد. در حال حاضر این یکی از موضوعات مهم در بررسی‌های در حال پیشرفت است. به همین دلیل پژوهش بسیاری در برآورد رطوبت خاک با استفاده از گسیل یا پراکندگی مایکروویو حاصل شده است.

نگاره ۵: ضریب پراکندگی به صورت تابعی از میزان رطوبت خاک برای سه سطح با ناهمواری مختلف.منحنی توپر نشانگر بازتابندگی خاک بر مبنای اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک می‌باشد.

خواص دی‌الکتریک حجمی خاک توسط چگالی توده و ساختار خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد. خوشبختانه چگالی حجمی خاک تمایل ندارد تا در طول یک ناحیه خاص بسیار تغییر کند، بنابراین تفکیک در هر مجموعه از داده‌های منطقه‌ای احتمالاً تحت تأثیر چگالی توده قرار نمی‌گیرد. ساختار خاک براساس تغییرات بافت ناشی از تغییر تناسب‌های شن و گل به علاوه‌ی تراکم‌ها (یعنی،«کلامپینگ»[۲۱]) می‌باشد.

نگاره ۶: ثابت دی‌الکتریک خاک به صورت تابعی از مقدار محتوای آب آن و بافت خاک.

ممکن است توده براساس شرایط بارندگی تغییر کند و به دو دلیل برآورد میزان رطوبت خاک بسیار مهم است. نخست این که تغییر رطوبت خاک و منحنی رطوبت ممکن است اندازه گیری‌ها را تحت تأثیر قرار دهد به طوری که حسگرهای طول موج کوتاه ممکن است نسبت به متغیرهای سطحی در بالای خاک حساس‌تر شوند، در حالی که طول موج‌های بلندتر(باندL) باید برای آزمودن شرایط رطوبت دراز مدت مناسب‌تر باشند. دوم اگر عمق حساسیت وابسته به طول موج باشد آنگاه یک فعال بالقوه‌ای برای حسگرهای چند بسامدی به منظور تعیین اطلاعات در منحنی رطوبت خاک وجود دارد.

ناهمواری خاک نیز مهم است. در زوایای بالای برخورد تفکیک بین قطبش H و V هم برای گسیل و هم برای پراکندگی کاهش می‌یابد. بنابراین اطلاعات جهت یابی در اثر افزایش ناهمواری کاهش می‌یابد. در بسامدهای بالای به کار رفته در اکثر سنجش‌های غیرعامل ($>80\,Hz$) ریزساختارها از اهمیّت بیشتری برخوردارند و خاک تا ابد ناهموار به نظر می‌رسد. تفکیک H-V کاهش می‌یابد و گسیل به ناهمواری حساس نیست.

تابش گسیل شده از خاک ترکیبی از تابش فزاینده از تمامی عمق‌هاست اگر چه میزان آن با عمق کاهش می‌یابد سهم زیادی از آن از لایه‌هایی که چند دهم یک طول موج‌اند حاصل می‌شود، عمق واقعی وابسته به خواص دی‌الکتریک ویژه خاک برای طول موج خاصی‌اند که در نظر گرفته شده است. پاسخ خاک می‌تواند در اثر مواد ناهمگن موجود در خاک (ذرات هوا و سنگ‌های بزرگ) و پوشش‌های گیاهی بسیار پیچیده باشد، که در این صورت خاک به طور کل از نگاه ناظر تاریک و مبهم به نظر رسد.

مشخصه مهم دیگری که بحث در مورد آن در این جا مناسب به نظر می‌رسد مربوط به مولکول‌های آب منجمد شده است که برای چرخش آزادی ندارند، به طوری که خاک‌های منجمد در مقایسه با زمان آب شدن‌شان دارای ثابت‌های دی‌الکتریک بسیار کمی هستند- ε' می‌تواند از ۱۰ یا بیشتر متغیر باشد. این تغییری بسیار شگفت‌انگیز است، به طوری که مرزهای فضایی یا موقتی بین خاک منجمد و آب شده دارای یک تفکیک بسیار زیادی است.

همان گونه که در بالا بیان شد، ثابت دی‌الکتریک بسیار پایین شن‌های بیابان نیز نتیجه‌ی فقدان آب مایع در آنهاست. در واقع مقدار آب مایع است که تعیین کننده خواص دی‌الکتریک خاص و به خصوص عمق نفوذ است. بنابراین اندازه گیری خاک‌های مرطوب مشخصه‌های لایه فوقانی خاک را بیان می‌کند و به ناهمواری سطح بسیار حساس است. بنابراین منحنی عمودی رطوبت خاک یک پارامتر مهمی است که باید به جای میانگین مناسب رطوبت خاک در نظر گرفته شود[۱۴].

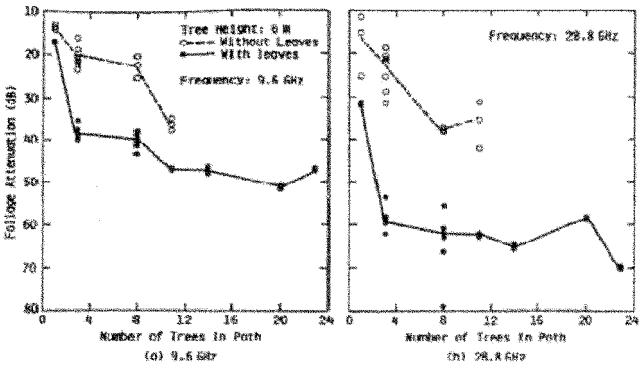
۲-۴- پوشش گیاهی

برهم کنش امواج مایکروویو با پوشش‌های گیاهی فرایند نسبتاً پیچیده‌ای است. بنابراین در کل پوشش‌ها یک توده ناهمگن با مؤلفه‌های ساختاری که در اندازه و مقدار چگالی متفاوتند را تشکیل می‌دهند. مؤلفه‌های پراکندگی شامل برگ‌ها (بیضی شکل یا سوزنی شکل مسطح) و شاخه‌ها (استوانه‌های باریک و بلند) است و در یک جنگل انبوه از نظر اندازه با مؤلفه‌هایی با حدود قطری از چند میلی‌متر (ترکه‌ها) تا چند متر (کنده‌ها) مواجه‌اید. به طور کلی می‌توان گفت که عناصر ساختاری بزرگ‌تر تمایل دارند تا به زمین نزدیکتر باشند در حالی که عناصر کوچک‌تر به مقدار بیشتر در پوشش‌های گیاهی وجود دارند.

بنابراین طول موج‌های مایکروویو همانند این عناصر ساختاری جنگل هم مرتبه‌اند با این حال فیزیک پراکندگی می‌تواند کاملاً پیچیده باشد و تشدید پراکندگی حتی می‌تواند این نظریه را پیچیده سازد (که وابسته به بسامد مایکروویو خاصی است که در نظر گرفته شده است.) در نگاره (۲) انواع پراکندگی در یک جنگل از پراکندگی ریلی تا اپتیکی نشان داده شده است.بیشترین قطر یا ضخامت متوسط عناصر، بیشترین پس پراکندگی و بیشترین میزان خاموش سازی[۲۲] توسط سایبان‌ها یا پوشش‌ها ایجاد می‌شود. گستره سایبان تعیین کننده میزان خاموش سازی کل در پوشش گیاهی است. بنابراین کوچک‌ترین طول موج مایکروویو مانند باند-X و باند-C تمایلی به نفوذ به یک سایبان یا پوشش انبوه و متراکم را ندارند بنابراین عناصر پوشش از لحاظ مقایسه‌ای برای این طول موج‌های کوچک‌تر نوار به نظر می‌رسند.

برای بسامدهای پایین مؤلفه‌های پوشش در مقایسه با طول موج کوچک‌تر ظاهر می‌شوند به طوری که مایکروویوها در نوار-L و نوار -P می‌توانند بیشتر به داخل پوشش نفوذ کنند. برای مثال، باند -P دارای پس پراکندگی در سراسر جنگل است که عمدتاً توسط اندازه کنده‌ها و شاخه‌های بزرگ تعیین می‌شود. در VHF با طول موج‌های $1m<<$ در واقع سیگنال تمام لایه زیرین زمین و بزرگ‌ترین کنده‌های درخت را دربرمی‌گیرد.

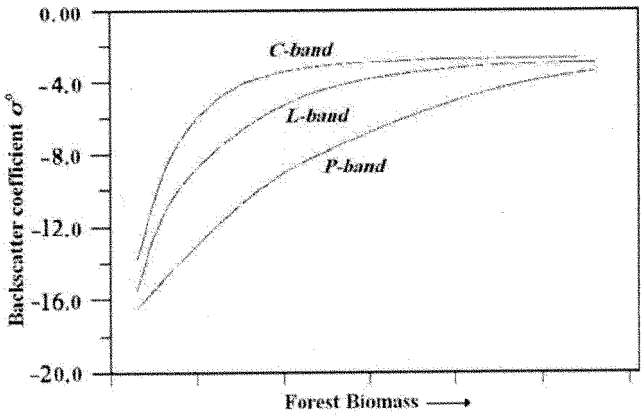
کانوپی‌های جنگل بسیار پیچیده بوده و اغلب برای مدلی که دارای حجم کاتوره‌ای[۲۳] است، مناسب می‌باشند. این فرض براین اساس استوار است که شکل‌ها و اندازه‌های بسیاری در جهت‌های مختلف وجود دارد که اثر انباشتی[۲۴] آنها برای پراکندگی و گسیل کانوپی به صورت حجمی متشکل از اجسام یکسان ایده‌آل پدیدار[۲۵] می‌شود. درنگاره (۷) تضعیف شاخ و برگ درختان به صورت تابعی از تعداد درختان در مسیر بین گیرنده و فرستنده‌ی امواج مایکروویو نشان داده شده است. همان گونه که از نگاره (۷) پیداست: ضریب تضعیف برای درختان دارای برگ عموماً دو برابر بیشتر از درختان بدون برگ است و با افزایش تعداد درختان دارای برگ از ۱ تا ۳ تضعیف و با فاکتور ۲ افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش درختان (بیش از ۳ تا) در مسیر انتشار مایکروویو افزایش کمی را در تضعیف شاهد هستیم[۱۵]. در سطح یک عنصر استوانه‌ای منفرد مانند ساختار درخت، انتظار داریم پس پراکندگی هنگامی که در ناحیه‌ی ریلی است یا سطح مقطع فیزیکی آن در ناحیه‌ی اپتیکی است متناسب با مربع حجم ساختار افزایش یابد. این حساسیت به اندازه‌ی المان‌ها دلیلی است براین که چرا پس پراکندگی راداری در طول موج‌های بلند به چگالی بیوجرم[۲۶] گیاهان مرتفع حساسیت نشان می‌دهد.



نگاره۷: تضعیف شاخ و برگ درختان به صورت تابعی از تعداد درختان در مسیر بین گیرنده و فرستنده امواج مایکروویو

در دهه‌ی گذشته افزایش تعداد مطالعات در روابط تجربی بین پس پراکندگی و خواص بیوفیزیکی جنگل مانند بیوجرم بالای زمین، حجم ساقه یا سطح پایه‌ای[۲۷] دیده می‌شود. با وجود این، به سبب افزایش تضعیف کانوپی جنگل با افزایش فرکانس (کاهش طول موج) بازیابی عملی چنین پارامترهایی مستلزم حسگرهای با طول موج بلند(باند L و P یا بیشتر) است.

برای حالت رادار، به طور معمول مشاهده یک همبستگی مثبت بین چگالی بیوجرم و پس پراکندگی تا سطح «اشباع» نشان می‌دهد که به موجب آن حساسیت به بیوجرم از دست می‌رود (و اتفاقاًاندکی همبستگی منفی ظاهر می‌گردد)، همان گونه که در نگاره(۸) نشان داده شده است.



نگاره ۸: نمایش شماتیک گرایش کلی مورد انتظار پس پراکندگی نسبت به چگالی بیوجرم بالای زمین.

توضیح معمول برای این الگوی مشاهده شده این است که بیوجرم بالای جنگل به تدریج واقعاً مات می‌شود به طوری که سیگنال پس پراکنده پس از اشباع تنها از لایه‌های بالاتر کانوپی جنگل باز می‌گردد.

اثر واقطبیدگی گیاهان هم در پس پراکندگی و هم در دمای روشنایی دیده می‌شود؛ که به موجب آن کنتراست H-V با افزایش پوشش گیاهی (برخلاف زمین بایر که کنتراست H-V بالایی دارد) کاهش می‌یابد. میزان خواص پراکندگی نسبت به طول موج به گونه‌ای است که پاسخ باند X به یک درخت بُنسایی مینیاتوری باید شبیه به پاسخ باند P در مورد جسمی با اندازه‌ی معادل باشد. با وجود این، ساختار گیاهان کوتاه نظم بیشتری نسبت به جنگل انبوه با کانوپی کاتوره‌ای مؤثر دارد؛ و عمق سطحی آنها بدین معناست که سهم زمین به طور قابل ملاحظه‌ای برای موج‌های بلند افزایش خواهد یافت.

محصولات کشاورزی نظیر گندم اجزایی دارند که به طور عمده عمودی هستند، در حالی که برای مثال، سیب‌زمینی‌ها دارای برگ‌های تخت افقی می‌باشند. تفاوت بین این دو ساختار خود را در قطبش سنجی نشان می‌دهد که به موجب آن ساقه‌های عمودی گندم گرایش به افزایش گسیل عمودی یا پراکندگی داشته در حالی که برگ‌های بزرگ تخت، کنتراست کم‌تری بین H و V دارند.

جنبه‌ی مهم دیگر در مورد محصولات کشاورزی این است که مقیاس‌های زمانی بسیار کوتاه (ماهانه) دارند؛ برعکس جنگل‌ها که دارای تغییر تدریجی می‌باشند. هم‌چنین مشاهده‌ی هم زمانِ رطوبت خاک و ویژگی‌های گیاهان برای کشاورز مهم‌تر است زیرا هدف او پیش‌بینی رشد محصول (و سپس میزان محصول) است. مشاهدات کشاورزی با در نظر گرفتن این واقعیت که به طور معمول محصولات (کشاورزی) به صورت ردیفی کاشته شده و رشد می‌کنند، پیچیده‌تر است. و نیز سطح خاک زیرین آنها مشخصه‌ی تناوبی دارد. چنین الگوهایی می‌تواند اثرهای همدوسیی مانند پراکندگی براگ را ایجاد کنند.

۳- نتیجه

در این مقاله به بررسی برهم‌کنش امواج مایکروویو و مواد طبیعی مانند آب، برف، خاک و پوشش گیاهی پرداخته شد. شناخت این برهم‌کنش در اتخاذ تدابیر پدافند غیرعامل از اهمیت اساسی برخوردار است. به طور کلی نتایجی که از این بررسی می‌توان گرفت به شرح ذیل می‌باشد:

الف- بازتابندگی امواج مایکروویو توسط آب اقیانوس‌ها در شرایط سکون تابعی از دما و شوری آب است. هم چنین بازتابندگی امواج مایکروویو از سطح اقیانوس با بالا رفتن دما و کاهش بسامد افزایش می‌یابد.

ب- برهم‌کنش امواج مایکروویو با برف نیز تابعی از محتوای آب و ثابت دی‌الکتریک آن است. برف آب‌دار دارای ثابت دی الکتریک بالاتری نسبت به برف بسیار «خشک» است.

لایه‌های برف و یخ رفتاری مشابه یک پراکنده ساز توده‌ای و نه همانند لایه‌ای از پوشش گیاهی دارند، و بنابراین در همه‌ی جهت‌ها و به طور مساوی امواج مایکروویو را می‌پراکنند.

ج- خاک‌های بسیار خشک نیز در برابر امواج مایکروویو همانند یک حجم توده‌ای عمل می‌کنند که این امواج در سراسر عمق خاک گسیل و یا پراکنده می‌شوند، در حالی که خاک‌های بسیار مرطوب به طور حتم همانند

یک سطح ناهموار عمل می‌کنند. بنابراین خواص گسیل و پراکندگی به ناهمواری سطح و توزیع عمودی میزان رطوبت خاک بستگی دارد.

د- رفتار کانوپی‌های جنگل در برابر امواج مایکروویو بسیار پیچیده بوده و اغلب برای مدلی که دارای حجم کاتوره‌ای[۲۸] است، مناسب می‌باشند. ضریب تضعیف برای درختان دارای برگ عموماً دو برابر بیشتر از درختان بدون برگ است و با افزایش تعداد درختان دارای برگ از ۱ تا ۳ تضعیف با فاکتور ۲ افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش درختان (بیش از ۳ تا) در مسیر انتشار امواج مایکروویو افزایش کمی را در تضعیف شاهد هستیم.

منابع

1- Navar Khel V.V.,A.A.Shaika and R.S.Ramshetti.,Dielectric properties of black soil with organic and inorganic matters at microwave frequency,Indian Journal of Radio and Space Physics, v.38, Apr.2009,p112.

2-Woodhouse I.H.,Introduction to Microwave Remote Sensing, Taylor and Francis group,p.128,2006.

3- Ulaby F.,R.K.Moore and A.Fang,Microwave Remote Sensing: Active and passive,vol,III:Fromtheory to applications, Norwood. MA: Artech House,Inc.p.220,1986

4-Ibid[2]p.131.

5- Royer A.,K.Goita,J.Kohn and D.DeSeve,Monitoring Dry,Wet,and No-Snow Conditions from microwave Satellite observations,IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,v.7,No.4,p.670,Oct.2010.

6- Gogineni S.P.,Radar Backscatter from Summer and Riidged Sea Ice and the Design of Short Range Radars,Ph.D.Dissertation,the university of Kansas,Lawrence,KS.1984.

7- Troy B.E.,J.P.Hollinger,R.M.Lerner and M.M. Wisler, Measurement of the Microwave Properties of Sea Ice at 90 GHz and Lower Frequencies,J.Geophys.Res.V.86,p.4283,1981.

8- Koskkinen J.,Snow Monitoring Using Microwave Radars,Helsinki university of technology Laboratory of Space technology ESPOO,Jan.2001.

9- Kim Y.S.,Theoretical and Experimental Study of Radar Backscatter from Sea Ice,Ph.D.Dissertation,the university of Kansas, Lawrence,KS.1984.

10- Ibid [3] p.231.

11- Boisserie M.,et al., Evaluation of soil Moisture in the Fsuclm using two reanalyses(R2and Era 40) and in-situ observations, J.Geophysics Res.Jun.2005.

12- Le Toan T.,Active Microwave Signatures of Soil and Corps: Significant Results Of Three Years Of Experiments, IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp.(IGARSS 82) Digest, vol.I, Munich, FRG, 1-4 June 1982.

13- Low A.,R.Ludwig and W.Mauser,Use of Microwave remote Sensing data to monitor spatio temporal Characteristics of surface soil moisture at local and regional Scales, Advances in Geosciences, v.5,p. 49, 2005.

14- Ibid[2]p.133.

15-Violette,E.J.,R.H.Espeland,and F.Schwering,Vegetation Loss Measurements at 9.6,28.8 and 57.6 GHz through a pecan Orchard in Texas, CECOM-83-2,U.S.Army Communications-Electronics Command, Fort Monmouth,NJ,March 1983.

پی نوشت

1- Bragg Scattering

2- Level

3- More diffuse

4- Bragg Surface

5- Facet Model

6- Wind-Scatterometer instruments

7- Summation

8- Composite Surface

9- Gravity-Capillary Waves

10- Swell

11- Spectrum

12- off nadir

13- Foam treaks and Patches

14- Ripple crest

15- Support

16- Metamorphism

17- Mie Scatterers

18- Volume fraction

19- Grain Size

20- Remelting

21- Clumping

22- Extinction

23- Random Volum

24- Cumulative effect

25- Appear

26- Biomass

27- Stem Volume or basal area

28- Random Volum