

محاسبه توان پراکنده شده از یک سطح ناهموار با ارایه مدل جدید برای این مسأله، بر پایه مدل نور اشعه‌ای

عمادترابیⁱ؛ ایاز قربانیⁱⁱ؛ حمیدرضا امین داورⁱⁱⁱ

چکیده

در این مقاله یک مدل جدید بر پایه مفهوم گسیل نور اشعه‌ای (Ray - Optical) و تئوری کیرشرف با استفاده از تقریب صفحه مماس برای محاسبه توان میدان پراکنده شده از یک سطح ناهموار ارائه گشته و با بکارگیری روش‌های کرنل، پارامترهای سطح ناهموار با درجات مختلف ناهمواری، محاسبه شده است. با اعمال این مدل، میدان دریافتی و در نهایت توان پراکنده شده از سطوح ناهموار نسبت به زوایای ارتفاع و افق تخمین زده شد؛ سپس با طراحی و ساخت چندین سطح با درجات ناهمواری‌های مختلف، میدان پراکنده شده از روی آنها اندازه‌گیری شد. از مقایسه نتایج به دست آمده از این اندازه‌گیری‌ها با نتایج مدل کیرشرف و همچنین مدل پراکنده‌گی تصادفی مشخص شد که مدل ارائه شده در این مقاله از دقت بهتری برای محاسبه توان پراکنده شده از سطوح ناهموار برخوردار است. بنابراین بکارگیری مدل ارائه شده این امکان را برای طراحان لینک‌های موبایل و یا ساختارهای استیلنت (رادار گریز) فراهم می‌کند که بتوانند نقاط ماکزیمم و مینیمم توان پراکنده شده از سطوح مختلف را محاسبه کنند. مدل ارائه شده در این مقاله برخلاف مدل کیرشرف؛ که فقط برای سطوح با ناهمواری کم و بسیار زیاد معتبر است، توانایی محاسبه میدان‌های همدوس و ناهمدوس پراکنده شده از سطوح ناهموار با درجات ناهمواری متفاوت و تابع توزیع متنوع را توانمند دارد.

کلمات کلیدی

تقریب کیرشرف، نور اشعه ای، رد یابی پرتو، روش کرنل، پرتوهای همدوس و غیر همدوس، پراکنده‌گی از سطوح ناهموار.

Power Scattering Calculation from Rough Surface Using a New Optical Ray Model

E. Torabi; A. Ghorbani; H. R. Amindavar

ABSTRACT

In this paper, a new method based on ray optics and Kirchhoff's method, using tangential plane approximation for calculating the scattered power from rough surface is proposed. Meanwhile applying the Kernel's approach together with the proposed model, the irregular plane parameters for different irregularities are calculated, and then the scattered power with respect to different elevation and azimuthal angles is estimated and compared with measured data, Kirchhoff's and stochastic scattering models. It is observed that there is good agreement between results obtained from the proposed model and measurements. Therefore, it can be concluded that using the proposed model to calculate the path loss in mobile communication leads to a better design and field estimation than Kirchhoff's or stochastic

ⁱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیر کبیر: e_torabi@aut.ac.ir

ⁱⁱ استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

ⁱⁱⁱ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر



scattering models. Also in radar cross section estimation, the proposed model can assist us in calculating and estimating the maximum and minimum scattered power from rough surface with different degrees of roughness, which is important in radar cross section design and analysis. In addition, the proposed model in contrast to Kirchhoff's method can be applied to any surface with any distribution function and different degrees of roughness. Therefore, using the proposed model for calculating scattering power can lead to better results than Kirchhoff's or stochastic scattering models.

KEYWORDS

Kirchhoff's approximation, Ray optics, Ray tracing, Kernel's method, Coherent and noncoherent components, Rough surface scattering.

۱- مقدمه

میانگین، تعریف می‌شوند. بدیهی است که مؤلفه‌های فوق به ناهمواری سطح مرتبط هستند؛ بدین معنی که با افزایش ناهمواری، مقدار مؤلفه همدوس کاهش و مقدار مؤلفه غیر همدوس افزایش پیدا می‌کند. در حالت کلی، میدان پراکنده شده از یک سطح ناهموار، یک فرآیند اتفاقی است که در محاسبات و تحقیقاتی که تاکنون در این زمینه انجام پذیرفته، مقدار میانگین این فرآیند در محاسبات منظور شده است [۲] بدون اینکه تابع توزیع احتمال فرآیند هیچ گونه نقشی در محاسبات عهده دار باشد. از طرفی، چنان که از تئوری آمار و احتمال می‌دانیم، برای محاسبه توان یک فرآیند، دانستن تابع توزیع احتمال آن ضروری است.

در تحقیقات گذشته برای کاستن از پیچیدگی مسأله و سادگی محاسبات، در پیش بینی و تخمین توان پراکندگی و سطح مقطع راداری از دو تقریب کلی به نام‌های:

۱- صفحه مماس (تقریب کیرشف)

۲- تقریب ثبات فاز (Stationary phase)

و یا دیگر روش‌های تقریب انتگرال‌های پیچیده استفاده می‌شد [۲].

در این مقاله برای محاسبه توان پراکنده شده، از تقریب صفحه مماسی استفاده شده اما برای بهبود محاسبات، از تقریب ثبات فاز اجتناب شده است؛ اگر چه این موضوع باعث پیچیدگی محاسبات می‌شود؛ ولی نتایج به دست آمده نشان دهنده بهبود نسبی عملکرد این روش نسبت به دیگر روش‌هاست.

بنیان و اساس مدل ارائه شده بر پایه مفهوم گسیل پرتوهای اشعه است و سعی می‌شود که از روش کرنل برای تخمین تابع توزیع توان پراکنده شده استفاده شود و در نهایت توان پراکنده شده همدوس و غیر همدوس به صورت توأمان، محاسبه شوند [۳]. این مدل برخلاف مدل کیرشف؛ که فقط برای سطوح با ناهمواری کم و بسیار ناهموار معتبر است، می‌تواند به صفحات ناهموار با هر درجه ناهمواری اعمال گردد و مؤلفه همدوس و غیرهمدوس را همزمان تخمین بزند.

در بخش دوم این مقاله، روش‌های قبلی مرور و در بخش

امروزه با پیشرفت ارتباطات، از جمله شبکه‌های سیار، نیاز به ارتباط آسان و فراگیر برای هر مشترک، امری اجتناب ناپذیر است. در چند سال اخیر تحقیقات زیادی برای طراحی و شبیه سازی سطوح با انعکاس مینیم برای سیستم‌های استیلنت (رادار گریز) انجام پذیرفته است. بدین منظور، محاسبه میدان‌های دریافتی از فرستنده در نواحی مختلف زیر پوشش، ضروری است. از طرفی برای محاسبه میدان‌های دریافت شده در نواحی مختلف، به اطلاعات کافی در زمینه موانع موجود در مسیر انتشار و همچنین اثر این موانع بر روی میدان‌های ارسالی نیاز است. امروزه برای تخمین چگونگی توزیع میدان در اطراف گیرنده، روش‌های متنوعی ابداع شده است. از جمله این روش‌ها؛ که از فیزیک نور اقتباس شده و در گذشته نیز استفاده شده است، مدل انتشار امواج الکترومغناطیس بر پایه پرتوهای نوری است. اعتبار این روش منوط به کوچک بودن طول موج امواج الکترومغناطیس نسبت به ابعاد جسم مورد اندرکنش (انتقال، انعکاس، پراش و ترکیب آنها) است. در زمره روش‌هایی که از فیزیک نور اقتباس شده است می‌توان به روش نور هندسی GO، توسعه یافته آن GTD و UTD^۲ اشاره کرد که با تقریب‌های خوبی می‌توانند مسایل انتشار در محیط‌های مختلف (انعکاس، شکست و پراش) را توجیه و محاسبه کنند [۱].

بر طبق نظریه‌های فوق، هنگامی که یک پرتو به یک نیم فضای نامحدود برخورد می‌کند، در جهت خاصی منعکس می‌شود که توان پرتوی منعکسه می‌تواند از قانون اسنل و ضرایب انعکاس فرنل؛ که برگرفته از قانون فرماست، محاسبه شود. در صورتی که سطح هموار نباشد، مقداری از انرژی نیز به خاطر ناهمواری سطح در جهت‌های مختلف پراکنده می‌گردد و این توان پراکنده شده را در یک تقسیم بندی کلی می‌توان به دو مؤلفه به نام‌های مؤلفه همدوس و مؤلفه غیر همدوس تقسیم کرد. مؤلفه همدوس به صورت مقدار میانگین میدان پراکنده شده و مؤلفه غیر همدوس به صورت انحراف از این مقدار

سوم، مدل پیشنهادی بررسی می‌شود و در بخش آخر، با مدل‌های کیرشف مقایسه خواهد شد.

۲- مروری بر روش‌های موجود برای محاسبه

پراکندگی از سطوح ناهموار

به طور کلی برای محاسبه پراکندگی از سطوح ناهموار ابتدا باید یک توصیف از سطح ناهموار ارائه شود. برای توصیف یک سطح ناهموار با فرض داشتن توزیع آماری دلخواهی از ارتفاع ناهمواری، یک معیار مناسب، توسط انحراف استاندارد ارتفاع ناهمواری و طول وابستگی بیان می‌شود. پارامتر اول (انحراف استاندارد ارتفاع ناهمواری) بیان کننده تغییرات ارتفاع از متوسط آن بوده و پارامتر دوم (طول وابستگی) بیان کننده وابستگی ارتفاع دو نقطه از ناهمواری است. در واقع، عبارت دوم، میزان نرم بودن سطح ناهمواری را بیان می‌دارد. بدترین شرایط وقتی رخ می‌دهد که مقدار انحراف استاندارد بزرگ و میزان طول وابستگی، کم باشد. در نتیجه، سطح علاوه بر ناهمواری زیاد، تغییرات شدید نیز دارد. بدیهی است مقادیر این پارامترها نسبت به طول موج، دارای اهمیت است. یکی از معیارهایی که امروزه به طور وسیعی پذیرفته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد معیار فرانوفر است که بیان می‌دارد، یک سطح می‌تواند هموار در نظر گرفته شود اگر [۲]:

$$\sigma_h < \frac{\lambda_0}{32 \cos \theta_i} \quad (1)$$

در این فرمول که به قاعده ریلی معروف است، θ_i زاویه تابش نسبت به خط عمود بر سطح، σ_h انحراف استاندارد ارتفاع ناهمواری و λ_0 طول موج است. معادله (۱) در واقع بیان می‌دارد که جذر متوسط مربعات اختلاف فاز میان دو پرتو منعکس شده از دو ارتفاع مختلف روی سطح ناهموار نباید از $\pi/8$ بیشتر گردد تا میدان‌های راه دور به صورت هم‌دوس همانند حالت انعکاس از یک سطح هموار با یکدیگر ترکیب شوند و صفحات هم‌فاز بتواند تشکیل گردد. در صورتی که سطح ناهمواری کم داشته باشد ($\sigma_h \ll \lambda_0$) در آن صورت می‌توان از میدان‌های پراکنده شده صرف‌نظر کرد و مؤلفه هم‌دوس را با ضریب انعکاس محاسبه کرد، هر چند که چگالی توان در جهت مشخص به دلیل تغییرات آماری فاز و خنثی سازی احتمالی بعضی از پرتوها به وسیله بعضی دیگر، نسبت به حالت عدم وجود ناهمواری، کمتر است. در این شرایط، محققان [۴] با وارد کردن یک ضریب اضافی به ضریب انعکاس سعی کرده‌اند با اصلاح کردن ضریب انعکاس اثر این پدیده را به صورت زیر در نظر بگیرند:

$$R_{\text{mod}} = R \exp \left[-8\pi^2 \left(\frac{\sigma_h}{\lambda_0} \right)^2 \cos^2 \theta_i \right] \quad (2)$$

در این معادله، R ضریب انعکاس فرنل برای قطبش عمودی یا افقی است. از معادله فوق براحتی می‌توان مشاهده کرد که نسبت ضریب انعکاس تصحیح شده به ضریب انعکاس فرنل در مرز فرانوفر برابر 0.67 - دسی بل است. به صورت تقریب می‌توان اعتبار معادله شماره (۲) را برای سطوح ناهموار با ناهمواری حدود ۴ برابر ناهمواری بیان شده در (۱)، دانست. در مرز قانون ریلی، نسبت ضریب انعکاس تصحیح شده به ضریب انعکاس فرنل برابر 10.7 - دسی بل است.

اگر ناهمواری سطح σ_h کمتر از میلی‌متر باشد (مانند سطوح راه‌های قیر اندود و برای سطوح سیمانی نرم) ضریب انعکاس اصلاح شده بخوبی برای محدوده فرکانسی بکار گرفته شده در موبایل قابل اعمال خواهد بود. برای امواج میلی‌متری و یا اگر ناهمواری از محدوده میلی‌متر تجاوز کند امواج پراکنده شده دیگر قابل اغماض نیست و به حل جامع تری نیاز است [۵]. مدل‌های پراکندگی نیز که از پارامترهای آماری دخیل در محاسبات استفاده می‌کنند یک میانگین آماری از مؤلفه‌های هم‌دوس و میزان انحراف از مؤلفه هم‌دوس (مؤلفه غیر هم‌دوس) را بیان می‌کنند. روش‌های ترکیبی؛ که از ترکیب دو روش ذکر شده به وجود آمده‌اند، قادرند تا حدی توان مؤلفه‌های هم‌دوس و غیر هم‌دوس را محاسبه کنند [۵].

به صورت کلی، مدل‌های موجود برای محاسبه میدان‌های پراکنده شده بر اساس تئوری پراکندگی موج قرار داشته و با تقریب‌های مختلف سعی می‌کنند میدان‌های پراکندگی در حالت‌های حدی را محاسبه کنند [۶].

۳- توصیف روش ارائه شده در این مقاله

برای مدل نمودن ناهمواری به صورت آماری، می‌دانیم که تابع ارتفاع بسیاری از سطوح ناهموار ساخت انسان با تقریب خوبی از توزیع نرمال پیروی می‌کند (اگر ناهمواری را ارتفاع ساختمان‌ها در یک شهر شلوغ مثل تهران در نظر بگیریم این توزیع، یک توزیع چندجمله‌ای خواهد بود). اگر ارتفاع ناهمواری h را دارای توزیع نرمال با متوسط صفر و واریانس σ_h در نظر بگیریم، تابع توزیع ناهمواری‌ها به صورت زیر خواهد بود:

$$p_h(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_h^2}} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{h}{\sigma_h} \right)^2 \right) \quad (3)$$

همچنین با فرض اینکه تابع خودوابستگی سطح نیز گوسی باشد، داریم:

$$R_{hh}(l) = \exp \left(-\frac{l^2}{L^2} \right) \quad (4)$$



$$\langle \tan^2(\theta_n) \rangle^{\frac{1}{2}} = \left\langle \left(\frac{\sqrt{2}\zeta_x}{L} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}\zeta_y}{L} \right)^2 \right\rangle^{\frac{1}{2}} \\ = \frac{\sqrt{2}}{L} \langle \zeta_x^2 + \zeta_y^2 \rangle^{\frac{1}{2}} = \frac{2\sigma_h}{L} \quad (12)$$

که ζ_x و ζ_y ماکزیمم ارتفاع نسبی و L ماکزیمم فاصله نسبی در نقطه P_0 روی صفحه محلی، در جهت x و y است و از نظر آماری از هم مستقلند و دارای تابع توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ_h^2 است. توضیح این نکته لازم است که اندازه گرایان $\tan(\theta_n)$ دارای تابع توزیع ریلی با میانگین $(\sqrt{\pi}/L)\sigma_h$ است. بنابراین، تغییرات محلی ارتفاع نقطه انعکاس به صورت طبیعی تحت قانون گوسی با میانگین صفر و واریانس σ_h^2 عمل می‌کند. در این روش، برای محاسبه پراکندگی تصادفی می‌توان به دو روش عمل کرد:

۱- شبیه سازی را از نقطه صفر شروع و به صورت کامل پروسه ها را شبیه سازی کنیم؛

۲- از روابط بالا استفاده و به تولید یکسری اعداد سه تایی با توزیع نرمال برای هر برخورد پرتو، بسنده کنیم و شبیه سازی را از این مرحله به بعد ادامه دهیم.

در هر دو حالت، این روش (پراکندگی تصادفی) می‌تواند مؤلفه‌های همدوس و غیرهمدوس را به صورت همزمان محاسبه کند. همان طور که گفته شد یکی دیگر از محدودیت‌های این روش استفاده از تقریب صفحه مماس است که شرایط اعتباری به صورت زیر دارد:

$$\frac{L^2}{2.76\sigma_h} > \lambda_0, \quad L > \frac{6}{2\pi}\lambda_0 \quad (13)$$

این شرایط بیانگر این نکته هستند که نه تنها شعاع انحنای سطح تصادفی؛ بلکه طول وابستگی نیز در مقایسه با طول موج می‌بایست بزرگ باشد [۸].

در مراحل مختلف شبیه‌سازی در هر کجا که به محاسبه تابع توزیع متغیرهای تصادفی نیاز داشتیم از روش کرنل، این کار انجام شده است. در مرحله آخر، از همین روش، تابع توزیع توان را محاسبه کردیم و از روی آن، توان دریافت شده را تخمین زدیم و در نهایت، وابستگی توان دریافت شده به پارامترهای زاویه تابش و گردش، تخمین زده شد. این موضوع از این نظر حائز اهمیت است که اولاً نشان می‌دهد در یک محیط ناهموار، پراکندگی امواج بیشتر در چه جهت‌هایی وجود دارد؛ ثانیاً تقریب ثبات فاز تا چه حد دقت دارد.

مدل جدید نیز بر مفروضات کیرشرف یا تقریب صفحه مماس برای سطح ناهموار پایه گذاری شده است. در حقیقت، بدون این مفروضات استفاده از نور فیزیکی در محاسبات پراکندگی غیر ممکن خواهد بود [۹]. در شبیه سازی مدل ارائه

در این فرمول، L پارامتر طول وابستگی است که نشان دهنده این است که یک نقطه با دیگر ای دیگر با فاصله L دارای وابستگی $1/e$ است [۷]. معادله بالا به نوعی نشان دهنده وابستگی دو نقطه از سطح ناهمواری به یکدیگر است؛ به عبارت دیگر، نشان می‌دهد که ناهمواری سطح تا چه مقدار فیلتر شده و چه میزان از تغییرات آن حذف شده است. برای توصیف سطح ناهموار، دانستن هر دو پارامتر بالا لازم است؛ زیرا همان‌طور که می‌دانیم مسأله نرمال و سفید بودن، در متغیرهای تصادفی، دو پارامتر مستقل از همدیگر هستند. همچنین شیب‌های محلی در نقاط عمود بر صفحات محلی، برای یک سطح $h(x)$ در حالت یک بعدی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tan(\theta) = h' = \frac{dh}{dx} \quad (5)$$

که تابع شیب فوق، همچون خود ارتفاع ناهمواری دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس زیر است:

$$\sigma_{h'}^2 = -\sigma_h^2 R''_{hh}(0) = \frac{2\sigma_h^2}{L^2} \quad (6)$$

همچنین از تابع توزیع پارامتر شیب، می‌توان تابع توزیع زوایای شیب را هم به صورت زیر محاسبه کرد:

$$p_\theta(\theta) = \frac{L}{2\sigma_h\sqrt{\pi}\cos^2(\theta)} \exp\left(-\left(\frac{L\tan(\theta)}{2\sigma_h}\right)^2\right) \quad (7)$$

از طرفی، برای هر متغیر تصادفی X ، ممان مرکزی مرتبه دوم یا واریانس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\langle (X - \langle X \rangle)^2 \rangle = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 \quad (8)$$

از آنجا که متوسط شیب ارتفاع برابر صفر است، بنابراین جذر متوسط مربع آن برابر انحراف معیار خواهد بود و یا:

$$\sqrt{\langle h'^2 \rangle} = \sigma_{h'} = \frac{\sqrt{2}\sigma_h}{L} \quad (9)$$

اگر یک رویه دوبعدی با ناهمواری یکنواخت را بتوان با تابع $h=h(x,y)$ نمایش داد، در این صورت برای این رویه یک معیار برای اندازه شیب سطح، که همان نامنظم بودن یا مقدار تیزی ناهمواری سطح است، به صورت زیر قابل بیان است [۹]:

$$s = \langle h_x'^2 + h_y'^2 \rangle^{\frac{1}{2}} = \frac{2\sigma_h}{L} \quad (10)$$

در این صورت، صفحه محلی به وسیله نقطه P_0 و بردار عمود بر آن؛ که به صورت زیر است، مشخص می‌شود:

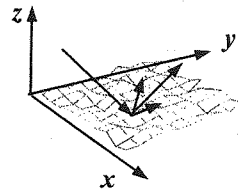
$$\vec{n} = \left(-\frac{\sqrt{2}\zeta_x}{L}, \frac{\sqrt{2}\zeta_y}{L}, 1 \right)^T = (-h'_x, -h'_y, 1)^T \quad (11)$$

h'_x, h'_y نمایش منفی گرایان صفحه، به ترتیب در جهت‌های x و y می‌باشند. همچنین جذر متوسط مربع گرایان صفحه به صورت زیر داده می‌شود:

شده سعی شده است که از مفروضات و روابط قبلی کمتر استفاده شود.

برای شروع کار، شکل (۱) را در نظر می‌گیریم که یک سطح ناهموار در جهت x و y با ناهمواری نرمال و انحراف استاندارد برابر نصف طول موج را نمایش می‌دهد.

حال فرض می‌کنیم فرستنده در نقطه ای با مختصات (x_0, y_0, z_0) قرار دارد. سطح ناهموار را نیز به صورت یک رویه با تابع $z = f(x, y)$ نمایش می‌دهیم که بردارهای نرمال بر سطح این رویه در نقاط مختلف، می‌تواند به وسیله گرادیان تابع



شکل (۱): ناهمواری با توزیع نرمال و $\sigma_h = \lambda_0 / 2$

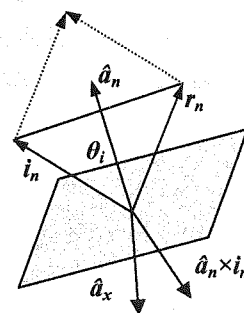
به صورت زیر محاسبه شود: $F(x, y, z) = -f(x, y) + z = 0$

$$\vec{a} = -\frac{\partial f}{\partial x} \vec{a}_x - \frac{\partial f}{\partial y} \vec{a}_y + \vec{a}_z \quad (۱۴)$$

از طرف دیگر، بردارهایی که از فرستنده به نقاط مختلف سطح متصل می‌شوند براحتی با استفاده از رابطه کلی زیر قابل محاسبه است:

$$\vec{i} = (x - x_0) \vec{a}_x + (y - y_0) \vec{a}_y + (z - z_0) \vec{a}_z \quad (۱۵)$$

سپس بردارهای \vec{a}_n و \vec{i}_n را که به ترتیب بردارهای نرمالیزه متناظر با \vec{a} و \vec{i} هستند، محاسبه می‌کنیم. زوایای تابش و بازتابش براحتی با ضرب داخلی بردارهای \vec{a}_n و \vec{i}_n به دست می‌آیند. همچنین برای محاسبه بردار بازتابش، اگر یک سطح محلی را به صورت شکل زیر در نظر بگیریم:



شکل (۲): یک سطح محلی و بردارهای تابش و عمود بر آن

با توجه به شکل (۲) برای یک صفحه محلی، براحتی می‌توان بردار بازتابش را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\vec{r}_n = 2 \cos \theta_i \vec{a}_n - \vec{i}_n \quad (۱۶)$$

که θ_i زاویه بین پرتوهای تابش و بازتابش در روی سطح محلی، و بردارهای i_n و a_n به ترتیب بردارهای نرمال عمود و

تابش بر سطح محلی هستند. با مشخص شدن بردارهای بازتابش (r_n) می‌توان معادلات خطوطی را که از هر یک از نقاط روی سطوح محلی و در امتداد بردار بازتابش فرض می‌شوند، محاسبه کرد. سپس با محاسبه معادلات این خطوط، می‌توان محل برخورد هر یک از این خطوط را با کره دریافت کرد. کره‌ای است با شعاع R و به مرکز مبدأ مختصات، محاسبه کرد. این نقاط برخورد، می‌تواند معیاری از میزان پراکندگی امواج پراکنده شده باشد.

بعد از پیدا کردن محل برخورد میدان پراکنده شده با کره دریافت، بردارهای الکتریکی در محل هر یک از این نقاط باید تعیین شوند. برای پیش بینی میدان راه دور بردار میدان الکتریکی دریافت شده در هر یک از نقاط مزبور از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲]:

$$E^s(r) = \frac{-jke^{-jkr}}{4\pi r} \hat{r} \times \int [(\hat{n} \times E^s) - \hat{r} \times (\hat{n} \times H^s) \eta] e^{jk\hat{r} \cdot r'} ds \quad (۱۷)$$

این رابطه، در واقع بیان می‌دارد که میدان‌های پراکنده شده در هر نقطه از فضای آزاد می‌تواند برحسب مؤلفه‌های مماسی میدان روی سطح پراکنده کننده محاسبه شود [۱۰]. همچنین بیان می‌دارد که میدان الکتریکی موج پراکنده شده هم به مؤلفه مماسی میدان الکتریکی و هم به مؤلفه مماسی میدان مغناطیسی بستگی دارد.

بنابراین، میدان پراکنده شده، مجموع برداری المان‌های مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی روی صفحه‌های محلی سطح ناهموار است. فرض می‌کنیم موج فرستاده شده دارای قطبش عمودی (در امتداد محور x ها) باشد؛ با توجه به شکل (۲) ملاحظه می‌شود که چون هر یک از سطوح محلی دارای موقعیت تصادفی نسبت به محورهای مختصات هستند بنابراین قطبش موج برخورد کننده به رویه این سطوح محلی نه به صورت قطبش عمودی و نه موازی بلکه ترکیبی از هر دو نوع قطبش خواهد بود؛ بنابراین برای محاسبه میدان منعکس شده از این سطوح، می‌بایست تصویر بردار یکه در جهت x را روی بردار $\vec{a}_n \times \vec{i}_n$ و عمود بر آن محاسبه کرد. برای هر یک از این دو بردار در سطوح محلی می‌توان ضرایب انعکاس مرتبه اول را بسته به اینکه قطبش، عمود و یا موازی با سطح تابش است، در نظر گرفت. با توجه به آنچه گفته شد، قطبش میدان الکتریکی تابشی و متعاقباً قطبش میدان الکتریکی انعکاس یافته (به طور مشابه می‌توان برای میدان مغناطیسی و همچنین قطبش افقی رابطه مشابه ارائه کرد) در هر یک از نقاط روی کره دریافت، به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\vec{E}_i = E_i \vec{a}_x \quad (۱۸)$$

با توجه به شکل (۴) می‌توان گفت: که اگرچه سطح پراکنده‌گر، ناهمواری تصادفی دارد؛ ولی توزیع توان بازتابش، از یک روند معین و نرم پیروی می‌کند، با این که در نگاه اول به نظر می‌رسد که توان بازتابش از یک سطح ناهموار (سطح تصادفی) تصادفی باشد.

در این پروژه برای اندازه‌گیری میدان‌های پراکنده شده، از یک فرستنده و گیرنده در باند فرکانسی x استفاده شده است. آنتن فرستنده و گیرنده از نوع بوقی انتخاب شد؛ زیرا آنتن‌های بوقی گین مناسب دارند. از طرفی این گونه آنتن‌ها به دلیل کوچک بودن پهنای باند، اشعه را فقط به سطح ناهموار تعبیه شده در جلوی آنتن متمرکز می‌کنند. همچنین گیرنده استفاده شده محدود دینامیکی وسیع و نویز کم دارد؛ زیرا از تقویت کننده لگاریتمی با نویز کم استفاده می‌کند و خروجی گیرنده برای قرائت و پردازش داده‌ها به کامپیوتر متصل شده است. برای اندازه‌گیری ضریب انعکاس، سطح ناهموار در ناحیه دور آنتن فرستنده و گیرنده قرار گرفت و سعی شد به ازای زوایای مختلف فرستنده، میدان‌های پراکنده شده در صفحات مختلف افق و قائم اندازه‌گیری شوند. بلوک دیاگرام مجموعه آزمایشگاهی و چگونگی اندازه‌گیری ضریب انعکاس در اشکال شماره‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند. همان طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، سطح ناهموار بر روی یک پایه؛ که برحسب زاویه مدرج شده است و آنتن فرستنده و گیرنده در سمت راست و چپ این صفحه قرار گرفته‌اند، به طوری که آنتن گیرنده به همراه مجموعه گیرنده در نقطه‌ای ثابت است و آنتن فرستنده امکان چرخش در زوایای مختلف نسبت به صفحه ناهموار را دارد. بنابراین، با قرار دادن آنتن فرستنده در زوایای مختلف نسبت به صفحه ناهموار میدان دریافتی در زوایای متناظر به وسیله گیرنده دریافت و با کامپیوتر ضبط می‌شود تا در مراحل بعدی پردازش شوند. نتایج پردازش شده حاصل از اندازه‌گیری با استفاده از این مجموعه در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده‌اند.

$$\vec{E}_r = R_v E_i \cos \theta_s \vec{a}_n \times \vec{i}_n + R_h E_i \sin \theta_s (\vec{a}_x - \vec{a}_n \times \vec{i}_n) \quad (19)$$

که در فرمول (۵) زاویه میان دو بردار \vec{a}_n و \vec{i}_n ، R_v و R_h به ترتیب ضرایب انعکاس برای قطبش عمودی و افقی است. در نهایت، میدان روی هر نقطه از کره در یافت به صورت میانگین میدان‌های محاسبه شده در شعاع حداکثر برابر طول موج خواهد بود.

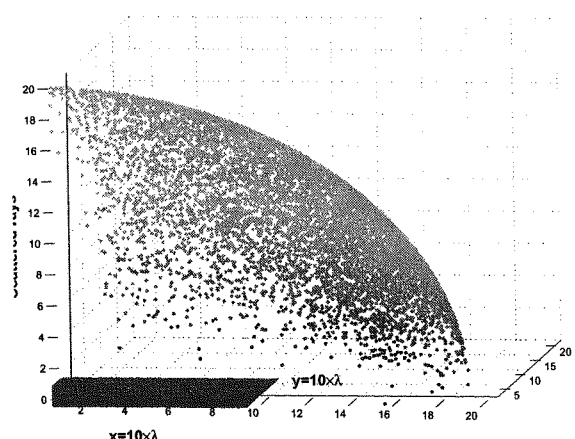
۴- محاسبه میدان پراکنده شده و مقایسه با داده های اندازه گیری

برای شبیه سازی و سپس مقایسه با نتایج اندازه گیری، ۲ نوع سطح مختلف به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- سطح فلز با درجه ناهمواری کم
- ۲- سطح پوشیده شده از سنگ‌های ریز و درشت با توزیع ناهمواری نرمال

اندازه هر دو سطوح را برابر $L_x=L_y=20\lambda_0$ در نظر گرفته و فرض می‌کنیم که فرستنده در نقطه $\theta_i=0^\circ$ و $\theta_i=0^\circ$ و $r_i=30\lambda_0$ از صفحه قرار دارد و پرتوها با فاصله $\lambda_0/5$ در جهت‌های x و y روی سطح برخورد می‌کنند. در نتیجه، تعداد پرتوها برابر ۹۹ در ۹۹؛ یعنی مسابری با ۹۸۰۱ خواهد بود. سپس میدان منتجه و در نتیجه توان پراکنده شده در روی سطح یک کره و در فاصله برابر $r_s=5\lambda_0$ از مرکز صفحه، با ۱۰۰۰ بار متوسط گیری آماری، محاسبه شده است.

به طوری که نمونه‌ای از این محاسبات برای حالت شماره ۲ به صورت ۳ بعدی در شکل (۴) آورده شده است.



شکل (۴) توزیع ضریب انعکاس محلی روی کره دریافت

که در این فرمول، \hat{P}_r تخمینی از توان واقعی پراکنده شده و ضرایب A و B و C مقادیر ثابت هستند. پس هدف ما به دست آوردن مقادیر ضرایب A ، B و C است، به طوری که \hat{P}_r تخمین خوبی از توان واقعی پراکنده شده باشد. برای بدست آوردن ضرایب A ، B و C تابع توان خطا را تشکیل می‌دهیم و سعی می‌کنیم آن را کمینه کنیم. رابطه توان خطا به صورت زیر آمده است:

$$I = E\{(P_r - \hat{P}_r)^2\} \quad (21)$$

$$I = E\{[P_r - (A\theta + B\varphi + C)]^2\} \quad (22)$$

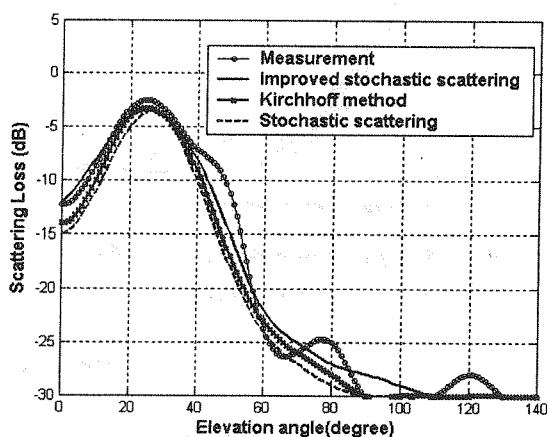
برای کمینه کردن تابع I مشتقات آن را نسبت به A و B و C برابر صفر قرار می‌دهیم:

$$\frac{\partial I}{\partial A} = \frac{\partial I}{\partial B} = \frac{\partial I}{\partial C} = 0 \quad (23)$$

با انجام عملیات ریاضی فوق، به دستگاه معادلات زیر می‌رسیم:

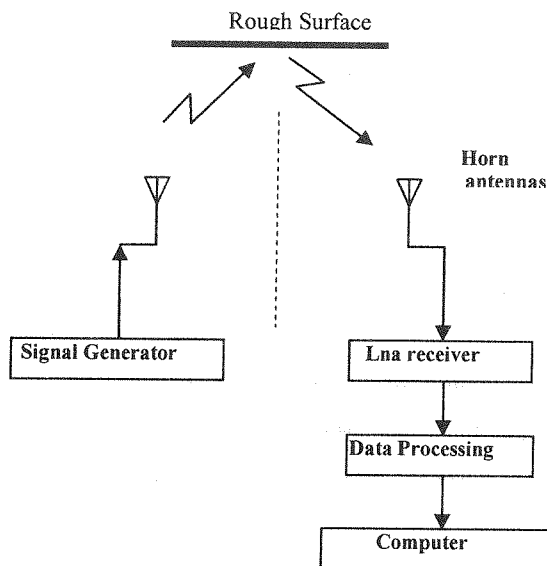
$$\begin{bmatrix} E(\theta^2) & E(\theta\varphi) & E(\theta) \\ E(\theta\varphi) & E(\varphi^2) & E(\varphi) \\ E(\theta) & E(\varphi) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(P_r\theta) \\ E(P_r\varphi) \\ E(P_r) \end{bmatrix} \quad (24)$$

همان طور که ملاحظه می‌شود ۳ معادله به دست آمده است. با توجه به اینکه برای زوایای گردش و ارتفاع و توان دریافت شده (θ و φ و P_r)، داده‌های آماری داریم، پس مقادیر امید ریاضی موجود در معادلات بالا را می‌توانیم براحتی با محاسبه تابع توزیع هر یک از آنها را از روش کرنل به دست آوریم. بنابراین، در معادله بالا فقط A ، B و C مجهول‌اند که براحتی با معکوس کردن ماتریس، ضرایب آنها محاسبه می‌شوند.



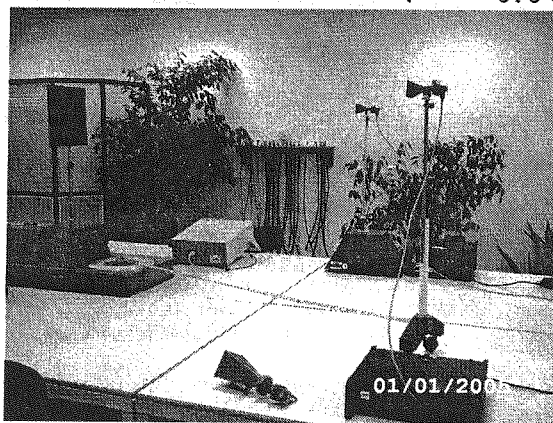
شکل (۷) توان پراکنده شده از روی یک سطح ناهموار $\sigma_h = \lambda_0 / 2$ و $\varepsilon_r = 5$ و $\varphi = 45^\circ$

پس از محاسبه ضرایب مجهول برای ۲ حالت یاد شده، زوایای تخمین برای حالتی که میدان دریافت شده ماکزیمم است عبارتند از $\varphi = 45^\circ$ ، $\theta = 25^\circ$. به طوری که مشاهده می‌شود اعداد



شکل (۵): بلوک دیاگرام مجموعه آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری ضریب انعکاس از روی سطوح ناهموار

به طوری که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده از تئوری با اندازه‌گیری انجام شده مطابقت خوبی دارند که این موضوع صحت تئوری یاد شده را تأیید می‌کند. اگرچه بهتر بود برای حذف انعکاس محیط‌های اطراف، اندازه‌گیری‌های فوق در اتاق آنتن انجام می‌پذیرفت؛ ولی به دلیل نبودن اتاق آنتن سعی شد تا جای ممکن در نزدیکی مجموعه اندازه‌گیری موانع کمتری وجود داشته باشد.



شکل (۶): فرستنده، گیرنده و سطح ناهموار در آزمایشگاه

پس از اندازه‌گیری و محاسبه توان پراکنده شده، سعی شد جهت‌هایی که میدان الکتریکی بیشترین پراکندگی را دارد، محاسبه شود. برای این کار لازم است توان پراکنده شده را به صورت یک تخمین خطی از زوایای θ ، φ (زوایای ارتفاع و گردش) بیان کنیم (ساده‌ترین تابع تخمین، تابع تخمین خطی است که برای حالتی که تابع مورد نظر تغییرات بسیار زیاد نداشته باشد، اعتبار دارد). برای رسیدن به چنین منظوری توان پراکنده شده را به صورت زوایای زیر در نظر می‌گیریم:

$$\hat{P}_r = A\theta + B\varphi + C \quad (20)$$

بکارگیری بودند (مدل کیرشرف) و یا از مؤلفه‌های مماسی میدان‌های مغناطیسی صرف نظر می‌کردند. در صورتی که مدل ارائه شده علاوه بر منظور کردن مؤلفه مماسی میدان مغناطیسی، توانایی محاسبه میدان‌های پراکنده شده از سطوح ناهموار، بدون محدودیت در درجه ناهمواری را دارد. نتایج به دست آمده از این روش با نتایج اندازه‌گیری مطابقت دارد که این موضوع صحت تئوری فوق را تأیید می‌کند (در حالی که روش‌های قبلی از چنین دقتی برخوردار نیستند).

از آنجا که امروزه در ارتباطات سیار عموماً با سطوح تصادفی در ارتباط هستیم؛ این روش می‌تواند یک پایه بسیار مناسب برای این گونه ارتباطات باشد. همچنین امروزه در طراحی اغلب هواپیماهای رادار گریز (استیلث) ایجاد سطوح با درجه ناهمواری تصادفی مختلف برای کمینه کردن توان انعکاسی در یک جهت خاص از اهداف اصلی قرار دارد. بنابراین این روش نه تنها می‌تواند به عنوان یک ابزار بسیار قوی و کارآمد برای تخمین میدان پراکنده شده از سطوح تصادفی استفاده شود؛ بلکه در طراحی هواپیماهای رادار گریز نیز می‌توان از آن بهره برد.

۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله برخود لازم می‌دانند که از مسئولین مرکز تحقیقات مخابرات به خاطر پشتیبانی مالی از این تحقیق تشکر و قدردانی کنند.

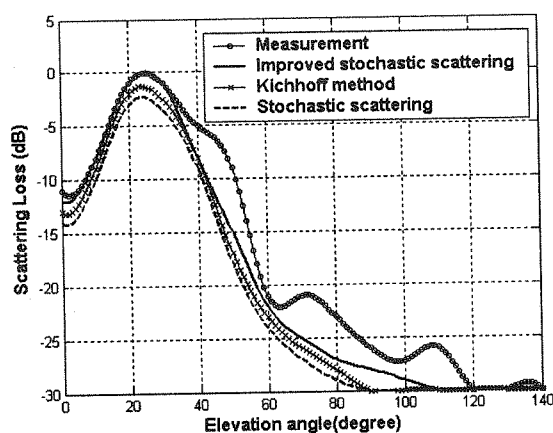
۷- مراجع

- [۱] D. A. McNamara, C. W. L. Pistorius, and J. A. G. Malherbe; *Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction*, London, U.K.: Artech House, 1990.
- [۲] F.T Ulaby, R.K. Moore, and A.K. Fung; *Microwave Remote sensing: Active and Passive*, London, U.K.: Addison-Wesley, 1981-1986, vol. I-III.
- [۳] S. Towers; *Kernel Probability Density Estimation Methods*, State University of New York at Stony Brook.
- [۴] O. Landron, M. J. Feuerstein, and T.S. Rappaport; "A comparison of theoretical and empirical reflection coefficient for typical exterior wall surfaces in a mobile radio environment", *IEEE Trans. Antennas propagation*, vol. 44 p.p. 341-351, Mar. 1996.
- [۵] A. K. Fung, H. J. Eom; "Multiple Scattering and Depolarization by a Randomly Rough Kirchhoff Surface", *IEEE Trans. Antennas propagation*, vol. AP-29, NO.3, p.p. 463-471, May 1981.
- [۶] R. Axeline and A. K. Fung; "Numerical computation of scattering from a perfectly conducting random surface", *IEEE Trans. Antennas propagation*, vol. 26 p.p. 482-488, Mar. 1978.

به دست آمده از تخمین با نتایج اندازه‌گیری مطابقت دارد که نشان دهنده صحت روش ارائه شده در این مقاله است. چون تخمین بکار برده شده یک تخمین خطی است بنابراین در محدوده‌هایی که توان به صورت یکنوا زیاد می‌شود دارای اعتبار است. تخمین توان برای سطح شماره ۲ دارای ضرایب زیر است: $A=0.0016, B=0.0002, C=0.5$

بنابراین، بکارگیری الگوریتم بالا می‌تواند در سیستم‌های موبایل، سیستم‌های رادار و در حالت کلی‌تر هر شبکه‌ای که به تخمین جهت‌های بیشینه و همچنین کمینه‌سازی توان دریافتی (هواپیمای رادار گریز) نیاز دارند، استفاده شود.

همان طور که از این شکل‌ها می‌توان دریافت، هر چه مقدار ارتفاع ناهمواری بیشتر می‌شود، میزان پخش شدگی در میدان پراکنده شده بیشتر می‌گردد. در مقایسه با تقریب کیرشرف، مدل پراکنده‌گی تصادفی، محدودیت کمتری دارد و برای مشخص کردن مؤلفه همدوس از یک پراکنده‌گی در یک سطح با ناهمواری متوسط، مناسب‌تر است. در ترکیب با تکنیک گسیل پرتو، به مجزا کردن مرزهای پراکنده‌گی به لبه‌ها؛ که باعث ورود به بحث پراش از لبه‌ها می‌شود، نیازی نیست. بزرگ‌ترین مزیت پراکنده‌گی تصادفی؛ همان‌طوری که ذکر شد، توانایی محاسبه پراکنده‌گی است که به طور همزمان هم مؤلفه همدوس و هم مؤلفه غیر همدوس را به دست می‌دهد.



شکل (۸): توان پراکنده شده از روی یک سطح فلزی ناهموار $\sigma_h = 0.1\lambda_0$ و $\phi = 45^\circ$

۵- نتیجه

در این مقاله، یک روش جدید بر مبنای فرمول بندی کیرشرف (تقریب صفحات مماس) برای تعیین رفتار پراکنده‌گی تصادفی بر پایه پرتوی نوری ارائه شد. روش فوق برخلاف مدل‌های کیرشرف قادر است مسأله پراکنده‌گی از سطوح با هر درجه ناهمواری را شبیه‌سازی و توان پراکنده شده را محاسبه کند. این در حالی است که مدل‌های قبلی یا در حالت حدی قابل



- D. Didascalou, M. Döttling, N. Geng; "An Approach to Include Stochastic Rough Surface Scattering Into Deterministic Ray-Optical Wave Propagation Modeling", IEEE Trans. Antennas propagation, vol. 51, NO. 7, p.p. 1508-1515 July 2003. [7]
- E. S. Li and K. Sarabandi; "Low grazing incidence millimeter-wave scattering models and measurements for various road surfaces", IEEE Trans. Antennas propagation, vol. 47 p.p. 851-861, May 1999. [8]
- S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson; "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape", IEEE Trans. Antennas propagation, vol. 30 p.p. 409-418, May 1982. [9]
- Ishimaru, Akira, *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation & Scattering*, Prentice Hall, 1991. [10]

۸- زیر نویس ها

-
- ۱ Geometrical optics
 - ۲ Geometrical theory of diffraction
 - ۳ Uniform Geometrical theory of diffraction