Archive of SID

تحلیل انتشار امواج رادیویی تروپوسفری بر روی زمین شیبدار توسط روش معادلات سهموی

همایون عریضی شهرام حسین زاده
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران - ایران

چکیده: شیب و یا میزان ناهمواری زیاد می تواند باعث پهن تر شدن پهنای پرتو میدان پراکنده از سطح شود. استفاده از فرمولبندی های معمول روش معادلات سهموی برای تحلیل انتشار این امواج پراکنده امکان پذیر نیست. پیشنهاد می شود که روش معادلات سهموی به گونه ای فرمولبندی شود که قادر به در نظر گرفتن این پهن شدن پهنای پرتو شود، روش معادلات سهموی قادر به تحلیل انتشار بر روی زمین با ناهمواری زیاد باشد.
در این مقاله فرمولبندی جدیدی برای تحلیل انتشار امواج رادیویی بر روی زمین شیبدار هموار برای روش معادلات سهموی ارائه می شود. بر خلاف بقیه روش های تحلیل انتشار امواج رادیویی بر روی سطح ناهموار، در این فرمولبندی انتشار موج پراکنده از سطح زمین به صورت جدا از میدان تابشی در نظر گرفته خواهد شد. ملاحظه خواهد شد که در مقایسه با روش‌های معمول، این روش قادر به تحلیل انتشار امواج رادیویی بر روی زمین با شیب بزرگتر است.

واژه‌های کلیدی: انتشار امواج رادیویی، زمین ناهموار، تروپوسفر، زمین شیبدار روش معادلات سهموی، روش رهگیری پرتو.

Analysis of the Tropospheric Radio Wave Propagation over Inclined Ground Planes by the Parabolic Equation Method

H. Oraizi **S. Hosseinzadeh**

Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology

Abstract: Inclination of the ground plane and large terrain irregularities may cause beam broadening of the scattered field patterns. The conventional formulation of the parabolic equation method (PEM) is not feasible and straightforward for the analysis of scattered fields. It is proposed to formulate the parabolic equation method in such a way as to be capable of considering the beam broadening of field patterns, so that PEM may be able to treat the analysis of radio wave propagation over the ground with large irregularities. In this paper, we introduce a new formulation for the analysis of radio wave propagation over smooth inclined ground planes by PEM. Contrary to the available formulations for the analysis of radio wave propagation over irregular terrains, in the proposed PEM method, the propagation of scattered waves from the ground plane is considered and accounted for in a separate manner from the incident waves. It will be observed that the PEM procedure is capable of analyzing the radio wave propagation over irregular ground planes with large slopes.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

پیشرفتهای اخیر در زمینه نقشه برداری هوایی توسط ماهواره و هواپیما منجر به ایجاد بانک های اطلاعاتی با دقت بالا برای عوارض جغرافیایی بر روی زمین شده است. در اکثر بانک های اطلاعاتی عوارض به صورت شبکه ای[1] ذخیره می شوند که در آن از سطح زمین نمونه برداری شده و ارتفاع نمونه ها در بانک اطلاعاتی ذخیره می شود. نیمرخ مسیر بین فرستنده و گیرنده مستخرج از این بانک های اطلاعاتی یک تابع پیوسته تکه وار خطی است. بنابراین، ارائه روش‌های مناسب برای تحلیل انتشار امواج رادیویی بر روی زمین با استفاده از نیمرخ مسیر تکه وار خطی بین فرستنده و گیرنده از اهمیت زیادی در طراحی شبکه های مخابراتی ثابت و سیار رادیویی برخوردار است.

برای تحلیل انتشار امواج رادیویی بر روی زمین دو بعدی ناهموار ناهمگن باید معادله هلمهولتز به شکل زیر را حل کنیم

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2}+k^2n^2\Phi=0 \qquad (۱)$$

که در آن عدد موج فضای آزاد، ضریب انکسار محیط تابع z و Φ بسته به پلاریزاسیون موج میدان الکتریکی و مغناطیسی عرضی است[۱]. مطابق شکل(۱)، موج در امتداد زمین در جهت x منتشر می شود و z عمود بر زمین است. حل عددی این معادله با روش های معمول نیاز مند حافظه و CPU زیاد است که با کامپیوتر های در دسترس به سادگی امکان پذیر نیست.

روش معادلات سهموی یکی از قویترین روش‌های تحلیل انتشار امواج رادیویی در محیط های مختلف است. در این روش از اثر موج پسرو در معادله موج صرفنظر می شود، زیرا در انتشار امواج پیشرو تاثیرنسبتا کمی دارند. بنابراین، الگوریتم سریعی برای تحلیل انتشار امواج رادیویی استخراج می شود[۱]. با در نظر گرفتن تابعیت زمانی برای میدان به صورت e^{-jt}، برای معادله موج جوابی به شکل زیر در نظر گرفته می شود:

$$\Phi(x,z)=u(x,z)e^{jkx} \qquad (۲)$$

با جایگذاری در معادله موج(۱)، معادله با مشتقات جزئی به صورت زیر حاصل می شود

$$\frac{\partial^2u}{\partial x^2}+2jk\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial^2u}{\partial z^2}+k^2\left(n^2-1\right)u=0 \qquad (۳)$$

که پرتو میدان در امتداد افق متمرکز شده باشد. در این حالت تغییرات $u(x,z)$ نسبت به x کم است. پس در معادله (۳) از مشتق مرتبه دوم نسبت به x در مقایسه با مشتق مرتبه اول می توان صرفنظر کرد. با این تقریب معادله سهموی برای $u(x,z)$ به شکل زیر به دست می آید.

$$\frac{\partial^2u}{\partial z^2}+2jk\frac{\partial u}{\partial x}+k^2\left(n^2-1\right)u=0 \qquad (۴)$$

دو روش تفاضل محدود[2] و انشعاب پله ای[3] برای حل معادله سهموی ارائه شده است[۱]. در روش تفاضل محدود ابتدا مشتق ها در معادله سهموی با معالات تفاضلی متناظرشان تقریب زده می شوند و در ادامه با انجام عملیات ریاضی مناسب، معادله با مشتقات جزئی تبدیل به یک معادله ماتریسی می شود. این روش انعطاف پذیری است که قادر به حل معادلات با مشتقات جزئی روی زمین ناهموار است.

در روش انشعاب پله ای ابتدا اثر انکسار تروپوسفری[n(z)] از انتشار امواج رادیویی تفکیک می شود. میدان در فضای آزاد به سادگی از معادله (۴) با فرض $n=1$ محاسبه می شود. در ادامه اثر انکسار n(z) توسط یک ضریب عامل فاز مناسب اعمال می شود. در کل عبارت بسته زیر برای $u(x+\Delta x,z)$ در معادله (۴) بدست می آید[۱].

$$u(x+\Delta x,z)=e^{-jk\frac{n^2-1}{2}\Delta x}F^{-1}\left\{e^{-j\frac{2\pi^2p^2\Delta x}{k}}F[u(x,z)]\right\} \qquad (۵)$$

که در آن F و F^{-1} زوج تبدیل فوریه هستند که به صورت زیر تعریف می شوند:

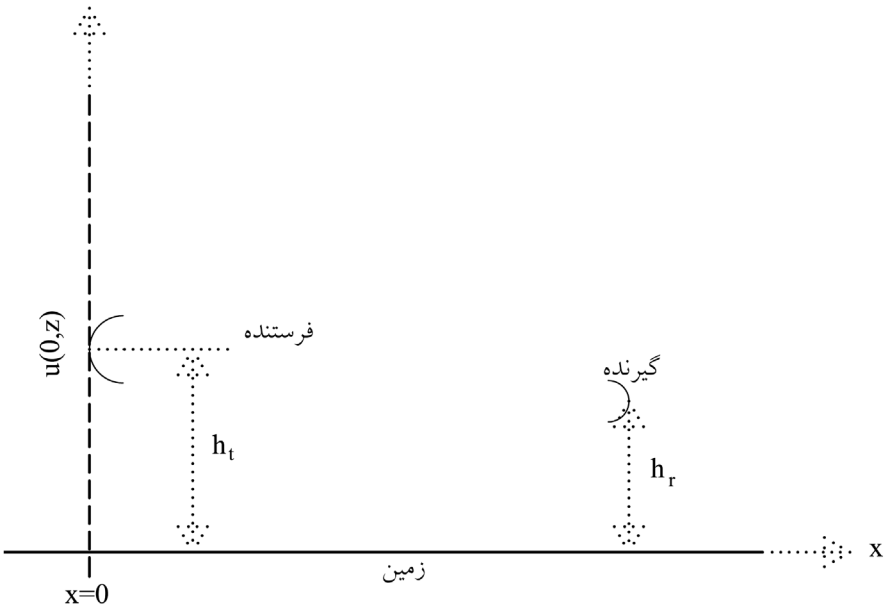
$$U(x,p)=F[u(x,z)]=\int_{-\infty}^{\infty}u(x,z)e^{-j2\pi pz}dz \qquad (۶)$$

$$u(x,z)=F^{-1}[U(x,p)]=\int_{-\infty}^{\infty}U(x,p)e^{j2\pi pz}dp \qquad (۷)$$

1- Raster Format
2- Finite Difference
3- Split Step

www.SID.ir

Archive of SID



شکل(۱) هندسه مسئله انتشار امواج رادیویی

از معادله (۵) ملاحظه می شود که برای محاسبه میدان تنها نیاز به یک میدان اولیه وابسته به پرتو آنتن داریم. در فرمول (۵) عبارت $F^{-1}\left\{e^{-j\frac{2\pi^2 p^2 \Delta x}{k}} F[u(x,z)]\right\}$ بیانگر میدان در فضای آزاد است که با ضرب جمله فاز $e^{-jk\frac{n^2-1}{2}\Delta x}$ در آن اثر انکسار اعمال شده است. ملاحظه می شود که الگوریتم را می توان با استفاده از روش‌های سریع FFT پیاده سازی کرد. همچنین تجربه مولفان این مقاله نشان می دهد که اندازه شبکه[۴] برای حل یک مسئله یکسان توسط روش انشعاب پله ای بزرگتر از روش تفاضل محدود است. با این وجود روش انشعاب پله ای به تنهایی قادر به تحلیل انتشار امواج رادیویی در روی زمین ناهموار نیست.

با توجه به سرعت زیاد روش انشعاب پله ای، مولفان متعددی سعی بر افزایش کارایی اش برای تحلیل انتشار امواج رادیویی بر روی زمین ناهموار کرده اند. اکثر این روش‌ها بر مبنای نگاشت همدیس[۵] محیط انتشار با مرز زیرین ناهموار به یک محیط با سطح زیرین مسطح به منظور استفاده از روش انشعاب پله ای برای حل معادله سهموی مربوط است [۶-۲]. بدیهی است که در نگاشت همدیس باید شکل معادله سهموی بدون تغییر بماند. تنها تغییر قابل قبول تغییر در ضریب انکسار محیط جدید است. مرجع[۷] روش‌های موجود در زمینه حل معادلات سهموی روی زمین ناهموار را مرور کرده است.

در این مقاله فرمولبندی جدیدی برای تحلیل انتشار امواج رادیویی بر روی زمین شیبدار توسط روش معادلات سهموی ارائه خواهد شد. در بخش دوم فرمولبندی فوق الذکر معرفی خواهد شد. در ادامه چند مثال با استفاده از فرمولبندی روش معادلات سهموی ارائه خواهد شد و نتایج حاصل از فرمول بندی با نتایج حاصل از روش‌های دیگر مقایسه خواهد شد.

۲- فرمول‌بندی مسئله

سطحی با شیب α را مطابق شکل ۲ در نظر می گیریم. ضریب دی الکتریک و ضریب هدایت سطح به ترتیب برابر ε و σ است. روی سطح را نیز تروپوسفر با ضریب انکسار $n(z,x)$ دارای اندازه خیلی نزدیک به واحد پوشانده است.به این سطح یک موج با پهنای پرتو باریک در امتداد افق می تابد. هدف در این مقاله محاسبه میدان پراکندگی ناشی از سطح شیبدار است.

4- Mesh Size
5- Conformal Mapping

www.SID.ir

Archive of SID

از تئوری نور هندسی می دانیم که اگر یک پرتو افقی به یک سطح با شیب دلخواه α بتابد، سطح باعث ایجاد پرتو بازتابشی می شود که تحت زاویه 2α نسبت به پرتو تابشی منتشر می شود. بنابراین، انتظار داریم که پرتو پراکنده یک پرتو با پهنای پرتو باریک در اطراف خط با زاویه 2α نسبت به مسیر پرتو موج تابشی باشد. تحلیل مسئله در حوزه طیفی این واقعیت را نشان میدهد.(ضمیمه مقاله را ملاحظه کنید).

در تحلیل انتشار امواج با استفاده از روش معادلات سهموی، زاویه پرتو های تابشی و پراکنده باید محدود به یک مقدار ماکزیمم معینی باشد. در فرمولبندی های معمول برای تحلیل انتشار بر روی زمین ناهموار با استفاده از روش معادلات سهموی، گسترش تشعشعی موج تابشی و پراکنده را یکسان در نظر می گیرند. بنابراین، با تغییر جهت میدان پراکنده ناشی از وجود شیب، پرتو میدان کلی(برایند پرتو تابش و منعکسه) می تواند پهن تر شود. بنابراین، برای انتشار امواج در حضور شیب عوارض زمین، لازم است که محدودیت بیشتر بر پهنای پرتو میدان تابشی اعمال شود.

برای رفع چنین محدودیتی در این مقاله گسترش پرتو تشعشعی موج تابش را از درون زاویه فضایی موج باز تابش جدا می کنیم. به عبارت دیگر، تشعشعات ناشی از موج بازتابش را مستقل از تشعشعات موج تابشی در نظر می گیریم. در اینجا محور مختصات z', x' را به صورت دوران محور مختصات z, x به اندازه زاویه 2α در نظر می گیریم. تابع موج تابش Φ^i و تابع موج پراکنده Φ^s را جداگانه منظور می کنیم. طبق روش معادلات سهموی تابع نمایی مربوط به انتشار موج در امتداد محور های x و x' را در هردو حالت از تابع موج جدا می کنیم.

$$\Phi(x,z)=\Phi^i(x,z)+\Phi^s(x,z)$$
$$\Phi(x,z)=u^i(x,z)e^{jkx}+u^s(x',z')e^{jkx'} \qquad (۹)$$

بالا نویس های i و s به ترتیب نشانگر میدانهای تابشی و پراکنده هستند. x' جهت انتشار پرتو پراکنده و z' خط عمود بر آن در جهت راستگرد است و بر حسب مختصات x و z از روابط زیر به دست می آیند.

$$x' = x\cos(2\alpha)+z\sin(2\alpha)$$
$$z' = -x\sin(2\alpha)+z\cos(2\alpha) \qquad (۱۰)$$

با جایگذاری (۹) در (۱) و صرفنظر کردن از امواج پسرو Φ^i و Φ^s همچنین در نظر گرفتن این نکته که i و sمعادله موج را اقناع می کنند، معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی را می توان جداگانه برای u^i و u^s همانند معادله (۳)به صورت زیر به دست آورد.

$$\frac{\partial^2 u^i}{\partial z^2}+2jk\frac{\partial u^i}{\partial x}+k^2\left(n^2-1\right)u^i=0 \qquad (۱۱)$$

$$\frac{\partial^2 u^s}{\partial z'^2}+2jk\frac{\partial u^s}{\partial x'}+k^2\left(n^2-1\right)u^s=0 \qquad (۱۲)$$

u^i و u^s ضرایب توابع نمایی متناظر با موج تابشی و پراکنده در معادلات (۹) هستند.

با استفاده از الگوریتم انشعاب پله ای برای میدانهای پراکنده و تابشی عبارات زیر را می توان همانند (۵) استخراج نمود.[۱]

$$u^i(x+\Delta x,z)=e^{-jk\frac{n^2-1}{2}\Delta x}F^{-1}\left(e^{-j\frac{2\pi^2p^2\Delta x}{k}}F\left(u^i(x,z)\right)\right) \qquad (۱۳)$$

$$u^s(x'+\Delta x',z')=e^{-jk\frac{n^2-1}{2}\Delta x'}F^{-1}\left(e^{-j\frac{2\pi^2p^2\Delta x'}{k}}F\left(u^s(x',z')\right)\right) \qquad (۱۴)$$

بنابراین، با محاسبه میدان اولیه برای پرتو پراکنده مسئله انتشار در حضور شیب را می توان حل کرد. این میدان اولیه باید به گونه ای استخراج شود که شرط مرزی را در مجاورت شیب اقناع کند.

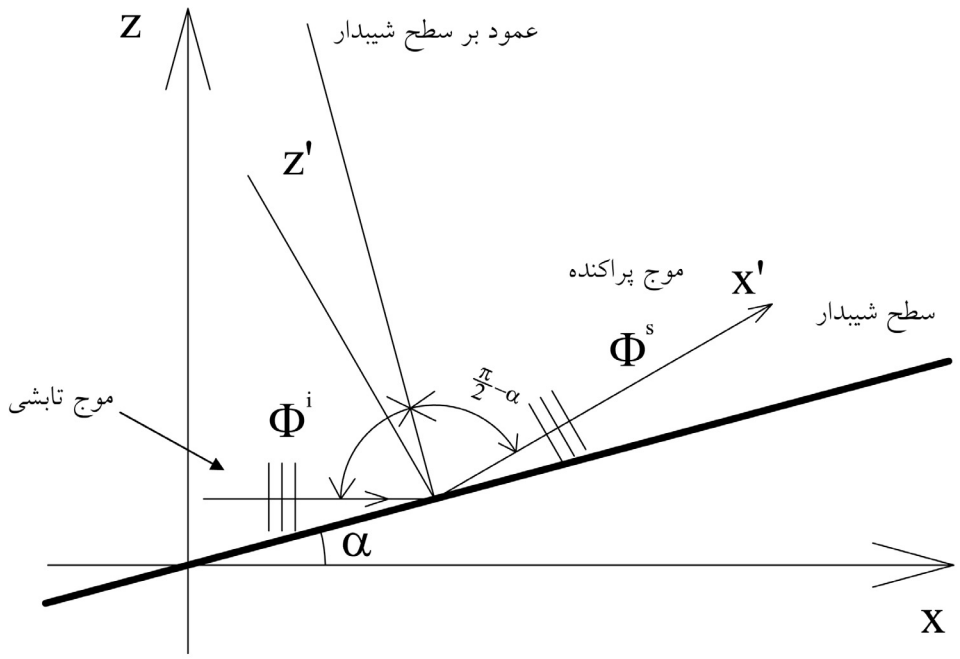
برای استخراج میدان اولیه برای محاسبه میدان پراکنده ،میدان اولیه تابشی را با استفاده از تبدیل فوریه به صورت مجموعه ای از امواج تخت $f(p)e^{j2\pi pz}$ درنظر می گیریم.

$$u^i(0,z)=\int_{-\infty}^{+\infty}f(p)e^{j2\pi pz}dp=F^{-1}[f(p)]$$

به سادگی می توان نشان داد که هر کدام از جملات $f(p)e^{j2\pi pz}$ ها با زاویه $\sin^{-1}\left(\frac{2\pi p}{k}\right)$ نسبت به افق منتشر می شوند. در حالت کلی میدان منتشر شونده تحت زاویه θ نسبت به محور x را می توان به شکل $Ae^{jk(x\cos\theta+z\sin\theta)}$ نوشت، که در آن A یک عدد ثابت و k ثابت انتشار است. میدان اولیه در $x=0$ به صورت $Ae^{jkz\sin\theta}$ ساده می شود. با برابر قرار دادن این جمله با $f(p)e^{j2\pi pz}$ ، زاویه انتشار به

www.SID.ir

Archive of SID



شکل(۲): هندسه مسئله انتشار در مجاورت سطح شیبدار

صورت زیر به دست می آید.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{2\pi p}{k}\right)$$

. بنابراین زاویه تابش این پرتوها نسبت به سطح شیب دار برابر است. این پرتو ها بعد از برخورد به سطح شیبدار در یک ضریب انعکاس ضرب می شود و از سطح شیبدار منعکس می شوند. پرتو های منعکس شده، پرتو اولیه برای موج پراکنده است. با توجه به مطالب فوق و همچنین برابری $z' = -z$ بر روی سطح شیبدار، این میدان اولیه به صورت زیر به دست می آید.

$$u^s(0,z') = F\left[\Gamma_{V,H}(p) f(p)\right]_{z=-z'}$$

این عبارت را بر حسب میدان اولیه تابشی به صورت بسته زیر می توان نوشت.

$$u^s(0,z') = F\left\{\Gamma_{V,H}(p) F^{-1}\left[u^i(0,z)\right]\right\}_{z=-z'} \qquad (۱۵)$$

در اینجا ضرایب انعکاس از شیب عبارتند از

$$\Gamma_V(p) = \frac{\sin\psi - \sqrt{\varepsilon_{rc} - \cos^2\psi}}{\sin\psi + \sqrt{\varepsilon_{rc} - \cos^2\psi}} \qquad (۱۶)$$

$$\Gamma_H(p) = \frac{\varepsilon_{rc}\sin\psi - \sqrt{\varepsilon_{rc} - \cos^2\psi}}{\varepsilon_{rc}\sin\psi + \sqrt{\varepsilon_{rc} - \cos^2\psi}}$$

که در آن ψ زاویه تابش است و ε_{rc} ضریب دی الکتریک مختلط سطح شیبدار بوده که از روابط زیر به دست می آیند:

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_r - j60\lambda\sigma \qquad (۱۷)$$

برای هادی کامل نیز ضریب انعکاس برای پلاریزاسیون عمودی برابر ۱+ و برای پلاریزاسیون افقی برابر ۱- است. اثر انتشار در روی زمین لایه بندی شده را می توان با استفاده از ضریب انعکاس($\Gamma_{V,H}(p)$) مناسب، در فرمولبندی اعمال کرد.

با جایگذاری میدان اولیه برای میدان تابشی و میدان اولیه محاسبه شده از معادله (۱۵) برای میدان پراکنده در معادلات (۱۳) و (۱۴)، u^i و η در محل گیرنده محاسبه می شود. با قرار دادن این

www.SID.ir

Archive of SID

مقادیر در معادله (۹) میدان را می توان بدست آورد.

۴- مثالهای عددی

برای بررسی کارایی فرمولبندی ارائه شده بر مبنای حل معادله سهموی برای تحلیل انتشار امواج رادیویی بر روی زمین شیبدار، مسئله انتشار امواج بر روی زمین با شیب کم و انتشار بر روی زمین با شیب زیاد و انتشار در روی زمین دارای ناپیوستگی شیب را حل می کنیم و با نتایج حاصل از روش‌های دیگر مقایسه می کنیم. در شکل(۳) میدان محاسبه شده توسط الگوریتم پیشنهادی را برای انتشار امواج رادیویی در روی زمین با شیب ثابت ۵ درجه را با نتایج حاصل از نگاشت تکه وار خطی[۶] ارائه شده در کتاب لوی[۱] مقایسه می کند. در روش نگاشت تکه وار خطی ابتدا با تبدیل محور مختصات مناسب، جهت انتشار اولیه در راستای محور x به جهت انتشار در راستای سطح شیبدار(مطابق شکل (۲)) تبدیل می شود. سپس روش انشعاب پله ای برای حل معادله سهموی به کار می رود و در نهایت با تبدیل معکوس محور مختصات، انتشار موج به جهت x باز می گردد. برای سهولت مقایسه نتایج حاصل از دو روش نتایج، محاسبه شده توسط روش عوارض شبه خطی به اندازه ۲۰dB جابجا شده اند. ملاحظه می شود که نتایج حاصل از دو روش، برای شیب های بالا رونده و پایین رونده بر هم انطباق دارند. شکل(۴) نیز نتایج الگوریتم برای انتشار امواج رادیویی در روی زمین شیب دار تلفاتی را با نتایج حاصل از عوارض شبه خطی ارائه شده توسط جانسوامی[۶] مقایسه می کند. ملاحظه می شود که نتایج حاصل از دو روش برای شیب های بالا رونده بر هم انطباق دارند. در شکل(۵) افت انتشار در روی زمین با شیب زیاد (سی درجه) برای یک گیرنده در ارتفاع ثابت رسم شده است. با توجه به ثابت بودن شیب این افت انتشار باید برابر افت انتشار در روی زمین با شیب صفر درجه باشد. در شکل(۵) نیز این تطابق ملاحظه می شود. در حالی که روش معمول معادلات سهموی از حل این مسئله عاجز است. به عنوان مثال تحلیل این مسئله با روش عوارض شبه خطی ، افت انتشاری از مرتبه ۵۰۰dB را نشان می دهد که تفاوت قابل ملاحظه ای با مقادیر واقعی دارد. در شکل(۶) نیز افت انتشار در روی سطح دو شیبی با استفاده روش ارائه شده با نتایج حاصل از روش عوارض شبه خطی مقایسه شده اند. مشاهده می شود که نتایج با هم تطابق مناسبی دارند. این تطابق را برای اختلاف شیبهای بزرگتر نیز می توان ملاحظه کرد (به عنوان مثال در شکل (۷) برای اختلاف شیب ۱۰ درجه).

۵-خلاصه و نتایج

در این مقاله یک فرمولبندی جدید بر مبنای روش معادلات سهموی برای تحلیل انتشار امواج رادیویی در روی زمین ناهموار با نیمرخ شبه خطی ارائه شد. در این فرمولبندی حوزه طیفی موج پراکنده را از حوزه طیفی موج تابشی جدا شد و انتشار میدان پراکنده به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت.

برخلاف فرمولبندی های پیشین برای مسئله فوق فرمولبندی ارائه شده دراین مقاله هیچ محدودیتی در مورد شیب نیمرخ ندارد و قادر به تحلیل انتشار امواج رادیویی با پهنای پرتو کم در روی زمین با شیب دلخواه است. همچنین خواص الکتریکی زمین و اثر تروپوسفر را می توان در این فرمولبندی به اعمال کرد.

نتایج حاصل از روش با نتایج حاصل از روش های دیگر مورد مقایسه قرار گرفت و ملاحظه شد که در شیب کم نتایج حاصل از این روش با نتایج حاصل از روش های دیگر برای تحلیل انتشار با استفاده از روش معادلات سهموی در روی سطح شیبدار همخوانی دارند.

این فرمولبندی شباهت زیادی به روش ره گیری پرتو دارد. بنابراین در بر نامه های حرفه ای برای تحلیل انتشار امواج رادیویی با استفاده از این روش می توان از تکنیک های ارائه شده برای تسریع روش رهگیری پرتو استفاده نمود[۸]. همچنین این روش را می توان برای گسترش رنج اعتبار روش های دیگری که از فرض پهنای پرتو باریک امواج تابشی استفاده می کنند(به عنوان مثال روش نور هندسی[۹]) استفاده نمود.

در مقایسه با دیگر روش ها برای یک تفکیک پذیری ارتفاع ثابت، میزان محاسبات مورد نیاز چهار برابر می شود. با این وجود بر خلاف روش های دیگر شیب سطح بر رنج اعتبار روش تاثیری ندارد و تنها تقریب سهموی حداکثر رنج اعتبار روش را تعیین می کند.

6- Piecewise Linear Mapping

www.SID.ir

Archive of SID

مراجع

1- M.F.Levy, Parabolic Equation Method for Electromagnetic Wave Propagation, IEE Press, 2000,P.97

2-D.J.Donhue and J.R. Kuttler," Modeling Radar Propagation over Terrain" John Hoppkines APL technical Digest,Vol. 18,No.2,1997,PP 279-287

3-A.E.Barrios,"A Terrain Parabolic Equation Model for Propagation in the Troposphere", IEEE Trans. Antennas and Propagat.,Vol. 42, Jan 1994, pp 90-98

4-D.J.Donohue and R.J.Kuttler," Propagation Modeling over Terrain Using the Parabolic Equation" IEEE Trans. on Antennas. Propagat.,Vol. 48,No.2,PP. 260-277

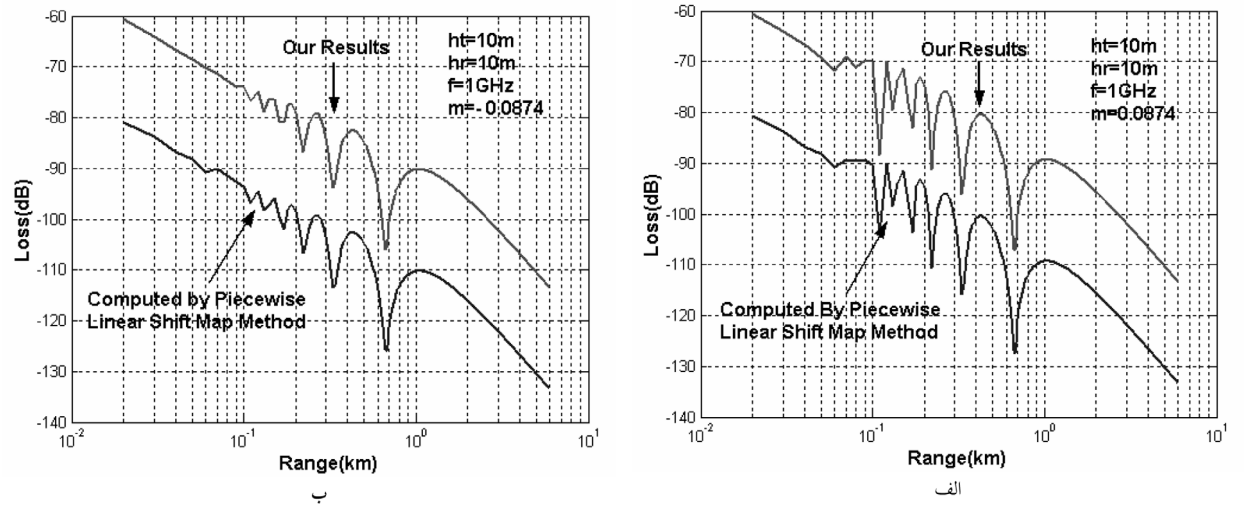
5- T.F. Eibert," Irregular Terrain Wave Propagation by a Fourier Split-Step Wide Angle Parabolic Wave Equation Technique for Linearly Bridged Knife-Edges" Radio Sci., Vol. 37,No.1,PP.5/1-5/12, 2002

6- R. Janaswamy, " A Curvilinear Coordinate -Based Split Step Parabolic Equation Method for Propagation Prediction over Terrain", IEEE Trans. Antennas Propagate. , Vol.46,PP.1089-1097,1998

۷- همایون عریضی و شهرام حسین زاده،"افزایش برد اعتبار روش معادلات سهموی برای تحلیل انتشار امواج رادیویی بر روی زمین شیبدار" مجموعه مقالات دوازدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، مشهد، ایران، صص۵۸۷-۵۸۲، اردیبهشت ۱۳۸۳

8-M.F. Catedra and J.P.Arriaga, Cell Planning for Wireless Comunications, Artech House, 1999

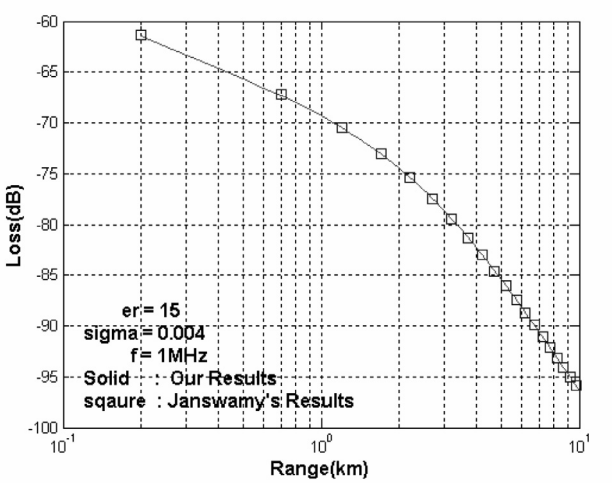
9- J.H. Whitteker," Fresnel-Kirchhoff Theory Applied to Terrain Diffraction Problem", Radio Sci., Vol. 25,No.5,PP. 837-851,Sep.-Oct. 1990



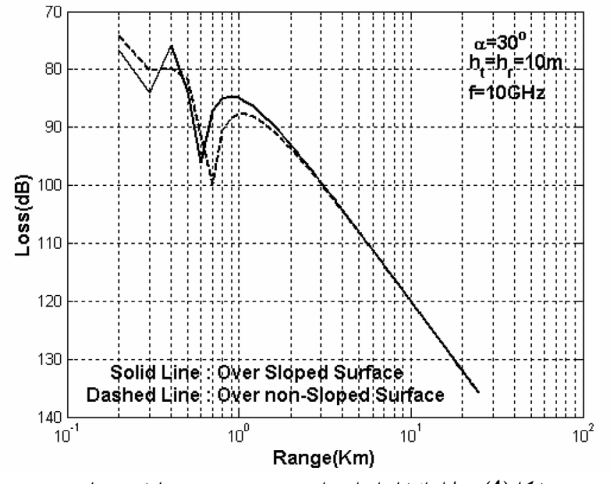
شکل(۲):تحلیل انتشار امواج رادیویی در روی زمین با شیب بالا رونده و پایین رونده ۵ درجه برای سهولت مقایسه نتایج حاصل از روش معادلات سهموی به اندازه dB۲۰ جابجا شده اند.

www.SID.ir

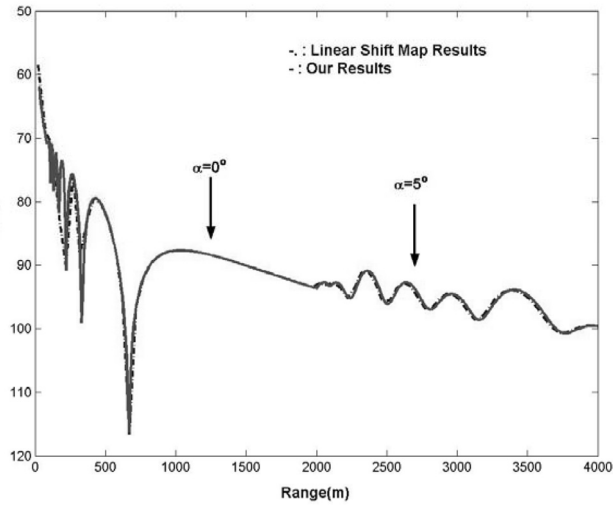
Archive of SID

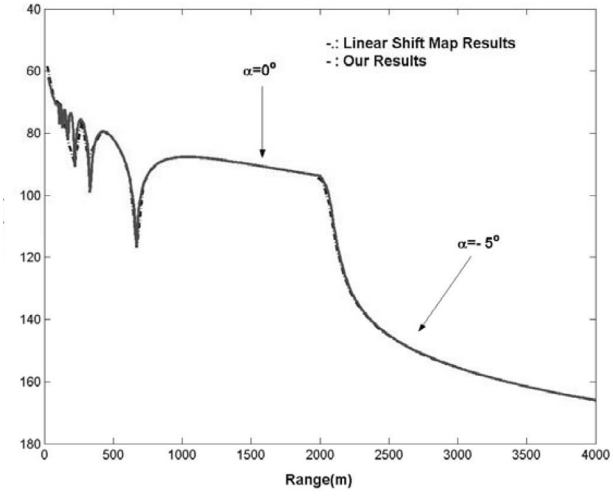


شکل(۳) مقایسه نتایج حاصل از تحلیل انتشار امواج رادیویی در روی زمین تلفاتی با شیب کم با فرمولبندی ارائه شده در این مقاله و نتایج جانسوامی



شکل(۴) تحلیل انتشار امواج رادیویی در روی زمین با شیب زیاد

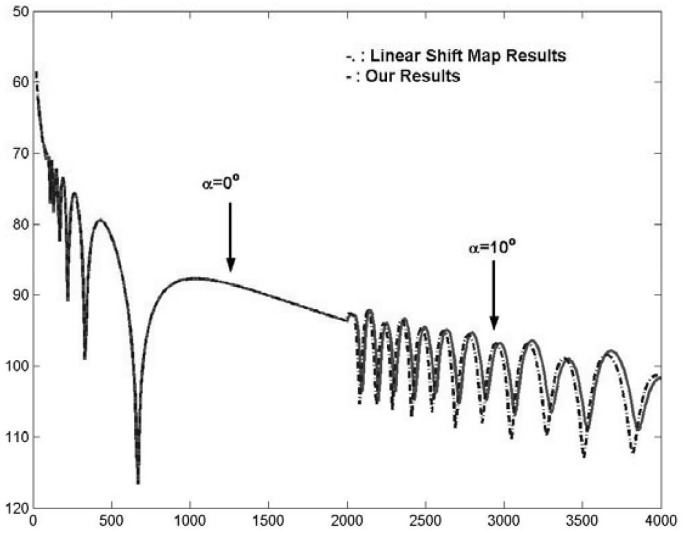




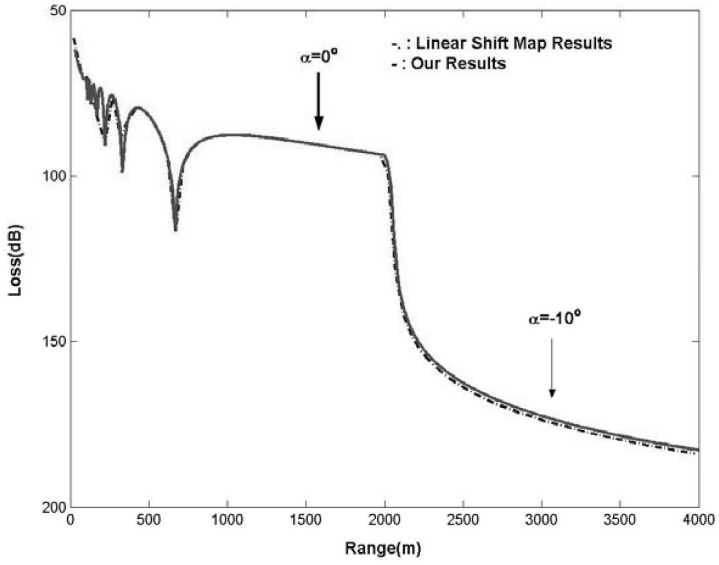
شکل(۵) مقایسه نتایج حاصل از تحلیل انتشار امواج رادیویی برای زمین دو شیبی با اختلاف شیب پنج درجه با روش Linear Shift Map

www.SID.ir

Archive of SID



الف



ب

شکل(۶) مقایسه نتایج حاصل از تحلیل انتشار امواج رادیویی برای زمین دو شیبی با اختلاف شیب ده درجه با روش Linear Shift Map

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.2 - No.1 - Spring and Summer 2005

www.SID.ir

Archive of SID

ضمیمه (۱)

استخراج الگوریتم با استفاده از روش حوزه طیفی برای تحلیل در حوزه طیفی توجه داریم که میدان تابشی دلخواه را میتوان به صورت

$$\varphi^s(x,z)=\int_{-\infty}^{+\infty} g(k_z)\,e^{jk\left(x\cos\theta^s+z\sin\theta^s\right)}dk_z$$

نوشت که در آن متغییر طیفی است. برای اقناع معادله موج باید رابطه

$$k_x=\sqrt{k^2-k_z^2}$$

برقرار باشد. با اعمال تغییر متغییر های

$$k_z=k\sin\theta^i$$
$$k_x=k\cos\theta^i$$

انتگرال را می توان به صورت

$$\varphi^i(x,z)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(k_z)\,e^{jk\left(x\cos\theta^i+z\sin\theta^i\right)}dk_z$$

نوشت. میدان پراکنده را باید به گونه ای استخراج نمود که شرط مرزی در روی سطح شیبدار $z=x\tan\alpha$ اقناع کند. اگر برای میدان پراکنده عبارتی به شکل

$$\varphi^i(x,z)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(k_z)\,e^{jk_z+jk_xx}dk_z$$

در نظر بگیریم، برای اقناع شرایط مرزی، و به صورت

$$\theta^s=2\alpha-\theta^i$$

$$g(k_z)=-f(-k_z)$$

به دست می آیند.با جایگذاری عبارت های فوق در میدان پراکندگی و انجام چند عملیات ریاضی، میدان پراکندگی به صورت

$$\varphi^s(x,z)=-\int_{-\infty}^{+\infty} f(-k_z)\,e^{jk_xx'+jk_zz'}dk_z$$

به دست می آید که در آن

$$x'=x\cos(2\alpha)+z\sin(2\alpha)$$
$$z'=-x\sin(2\alpha)+z\cos(2\alpha)$$

است.

بنابراین اگر میدان تابشی در راستای محور x باشد، راستای میدان پراکنده با محور x زاویه می سازد.

www.SID.ir