

تحلیل آنتن سیمی دلخواه در مجاورت سطح زمین غیر کامل با استفاده از نگره تصویر مختلط گسسته

محمد حكاك

دانشيار

دانشكده مهندسي، بخش مهندسي برق، دانشگاه تربيت مدرس

بيژن عباسي آرنند

استاديار

دانشكده مهندسي، بخش مهندسي برق، دانشگاه تربيت مدرس

جليل راشد محصل

دانشيار

دانشكده مهندسي، انستيتو الكترونيك، دانشگاه تهران

كيوان فرورقي

استاديار

دانشكده مهندسي، بخش مهندسي برق، دانشگاه تربيت مدرس

چكیده

يك روش ساده اما تقريباً دقيق تصوير براي تحليل آنتنهای سيمي نازك در راستای دلخواه در مجاورت زمین غير کامل ارائه می شود. این روش بر اساس جایگزینی نیم صفحه زمین با تعدادی تصویر مختلط معادل بنا شده است. دامنه و محل واقع شدن تصاویر معادل با استفاده از تکنیک GPOF و رابطه انتگرالی سامرفلد محاسبه می شوند. برای هر دو قطبی جریان، تعدادی تصویر مناسب ارائه شده و لذا برای یک سیم جریان، تعدادی سیم تصویر معادل بدست می آیند. نتایج بدست آمده برای الگوی تابشی (پترن تشعشی) این ساختار معادل، با نتایج حل کامل (که با استفاده از روش سامرفلد بدست می آید) مطابقت خیلی خوبی دارد. این روش برعکس سایر روش های موجود، هم ساده تر و هم نسبت به حل کامل مدت زمان بسیار کمتری مصرف می کند.

کلمات کلیدی

نگره تصویر مختلط، انتگرال سامرفلد، زمین غير کامل، زمین تلف دار

Analysis of Arbitrary Wire Antenna Above Imperfect Ground Using Discrete Complex Image Theory

B. Abbasi Arand
Assistant Professor
Tarbiat Modarres University

M. Hakkak
Associate Professor
Tarbiat Modarres University

K. Forooraghi
Assistant Professor
Tarbiat Modarres University

J. Rashed Mohassel
Associate Professor
University of Tehran, Faculty of
Engineering, Electronic Institute

Abstract

A new simple and almost exact image method is proposed for the analysis of horizontal thin-wire antennas above lossy half-space. In this method the half-space is replaced by a few complex images.

The Generalized Pencil Of Function (GPOF) technique and Sommerfeld integral representation are used to find the location and intensity of the current images. Similar to dipole sources, a few proper image line sources are obtained for an original line source. The results obtained for the radiation pattern of this equivalent structure are found to practically coincide with the exact results (i.e. those obtained from the Sommerfeld theory). Compared to the other methods of solution, this method is conceptually much simpler and requires less computing time.

Keywords

Complex Image Theory, Sommerfeld Integral, Imperfect Ground, Lossy Earth

مقدمه

تشعشع عناصر دوقطبی الکتریکی و مغناطیسی در مجاورت سطح زمین غیر کامل (زمین با رسانایی ویژه محدود) از زمان انتشار کارهای سامرفلد تا کنون، همواره مورد توجه محققان بوده است. کاربردهای متعدد و فراوان این مبحث در زمینه‌های مختلف، پژوهشگران را بر آن داشت تا سعی در گسترش و بسط تحلیلی و عددی مسئله سامرفلد داشته باشند. روش ارائه شده بوسیله سامرفلد [1] بیشتر سعی در تجزیه میدان اصلی و بسط آن بر حسب تعداد نامحدودی از امواج تخت داشته و نهایتاً با اعمال قانون شکست و انعکاس موج و شرایط مرزی در مرز تخت بین دو محیط، جوابهای مسئله را پیدا کند. این مفهوم در واقع مشابه تحلیل پاسخ تحریک پالسی با استفاده از انتگرال فوریه می‌باشد. این روش از نظر محاسباتی پیچیده و نیاز به کامپیوترهای دیجیتال عصر جدید داشت. علیرغم وجود این گونه کامپیوترها، بدلیل ماهیت نوسانی عبارت‌های زیر انتگرال، از نقطه نظر تحلیلی و عددی محاسبات مربوطه ساده نبوده و وقت زیادی صرف محاسبات می‌شود [1]. از اینرو دیگر محققان روش سامرفلد را به عنوان پایه در نظر گرفته و روش‌های دیگری از جمله بهینه‌سازی مسیر انتگرال‌گیری و یا استفاده از جداول انتگرال‌های سامرفلد درونیایی برای تسریع در محاسبات بکار گرفته‌اند [2]، [3]. روش تقریبی ضریب انعکاس (RCM) که در آن صرفاً از جمله اول سری‌نمایی ضریب انعکاس استفاده می‌شود نیز بعنوان روش دیگری برای ساده کردن محاسبات استفاده شده. در واقع این اولین نوع نگره تصویر در حالت زمین تلف‌دار می‌باشد. این روش ساده و در حالت میدان دور دقیق می‌باشد اما در نواحی میدان نزدیک کاملاً غیر دقیق است. با افزایش تعداد جملات انتخاب شده از سری‌نمایی معادل ضریب انعکاس، صورتهای مختلفی از نگره تصویر تقریبی مختلط پیدا شده‌اند که نسبت به حالت قبل در نواحی میدان نزدیک جوابهای دقیقتری خواهد داد [3]، [4].

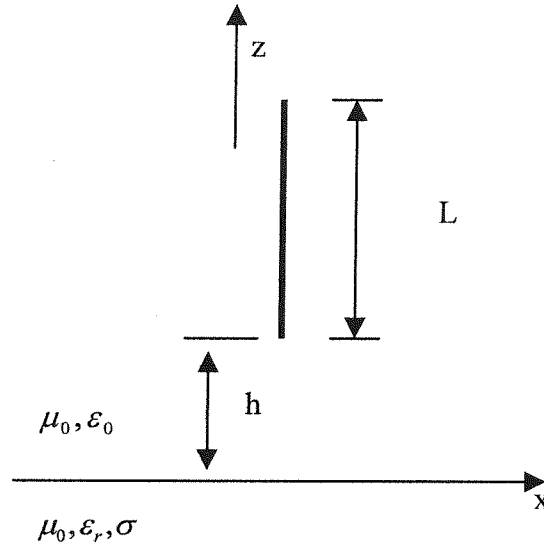
تصاویر گسترده‌ای نیز بر حسب توزیع پیوسته‌ای از منابع معادل برای منابع دوقطبی در مجاورت سطح زمین ارائه شده‌اند. لیندل و همکاران با استفاده از این نوع تصاویر، نگره تصویر کامل [5] را ارائه کرده‌اند. در واقع با قراردادن توزیع جریان پیوسته در زیر سطح زمین در عمق مناسبی میدان دقیق در بالای سطح زمین بدست می‌آید. روش دیگری که تحت عنوان نگره تصویر مختلط گسسته (DCIM) معروف شده است، در اواخر دهه ۸۰ ارائه شده و در آن توابع گرین با فرم انتگرال‌های سامرفلد به توابع با فرم بسته تبدیل می‌شوند [6]، [7]. با بسط ضریب انعکاس به صورت جمعی از توابع نمایی خاص و استفاده از حادثه سامرفلد، حل تحلیلی حوزه مکان انتگرال‌های سامرفلد بدست می‌آید. توابع نمایی ایجاد شده، نمایانگر تصاویر گسسته خواهند بود [8]، [9].

این مقاله بر اساس نگره تصویر مختلط گسسته یک روش جدید برای تحلیل آنتنهای سیمی با جهت دلخواه در مجاورت نیم‌فضای تلف‌دار ارائه می‌کند که به نظریه سامرفلد چندان وابسته نبوده و از روش‌های شناخته شده تصویر نیز متمایز می‌باشد [10]. در واقع چند تصویر گسسته مختلط معادل طوری انتخاب می‌شوند که پترن تشعشعی میدان دور و میدان نزدیک در نیم‌فضای آنتن همان پترن حالت واقعی باشد [11]. این روش به سادگی اما با دقت خوب، الگوی تابشی آنتن سیمی را محاسبه می‌کند. هرچند که پیچیدگی کمتر محاسبه راحتتر و همینطور مدت زمان خیلی کمتری نسبت به حل کامل سامرفلد مصرف می‌گردد باز دقت خیلی خوبی در مقایسه با نتایج حل کامل سامرفلد برای محدوده وسیعی از ضریب هدایت و ضریب دی‌الکتریک زمین بدست می‌آید [14]. پایه تئوری روش را در ابتدا توضیح داده و سپس در ادامه نتایج عددی ارائه خواهد شد. آنتن سیمی را به صورت کلی و در جهت دلخواه در نظر می‌گیریم. با تصویر کردن این آنتن در راستاهای افقی و عمودی مسئله

را به دو حالت آنتن سیمی عمودی و افقی تبدیل می‌کنیم. از اینرو مسئله آنتن سیمی دلخواه به دو مسئله آنتن عمودی و افقی تبدیل می‌شود. در ادامه دو حالت ذکر شده را به ترتیب مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱- آنتن سیمی عمودی

ساختار هندسی آنتن سیمی عمودی به طول L و شعاع ناچیز که در فاصله h از نیم‌فضای هادی غیرکامل قرار گرفته است در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



شکل (۱) آنتن سیمی عمودی در مجاورت نیم‌فضای هادی غیر کامل.

بر اساس تقریب سیم نازک و تئوری سامرفلد، مؤلفه z میدان تشعشی آنتن فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت [15]:

$$E_z = \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_0} \int_{-L}^L \left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 \right] \left[g_0(z, z') + \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} g_1(z, z') + \frac{2n^2}{n^2 + 1} U \right] \times I(z') dz' \quad (1)$$

که $I(z')$ توزیع جریان در محور آنتن، $g_0(z, z')$ بیانگر تابع گرین فضای آزاد به صورت زیر می‌باشد:

$$g_0(z, z') = \frac{e^{-jk_0 R_1}}{R_1} \quad (2)$$

و $g_1(z, z')$ نیز با استفاده از نگره تصویر استاتیک به صورت زیر بدست می‌آید:

$$g_1(z, z') = \frac{e^{-jk_0 R_2}}{R_2} \quad (3)$$

که k_1, k_0 ، بترتیب ثابت‌های انتشار فضای آزاد و زمین تلف‌دار بوده و R_2, R_1 فاصله آنتن و تصویر آن تا نقطه مشاهده می‌باشد. n نیز از رابطه $n^2 = k_1^2 / k_0^2 = \epsilon_r - j\sigma / \omega\epsilon_0$ بدست می‌آید.

دو جمله اول در معادله (۱) بیانگر تابش دو قطبی در مجاورت نیم‌فضای رسانای کامل می‌باشد. اثر محیط رسانای غیر کامل بواسطه جمله‌های اصلاحی در شکل انتگرال سامرفلد لحاظ شده است. این انتگرال با استفاده از مسئله مقدار مرزی

سامرفلد برای منبع جریان کوچک تشعشی در مجاورت نیم‌فضای تلف‌دار بدست می‌آیند [14]. انتگرال سامرفلد U بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$U = k_0 \int_0^\infty \frac{1}{u_0} \frac{u_0 - u_1}{n^2 u_0 + u_1} e^{-k_0 u_0 (Z+h)} J_0(k_0 \lambda \rho) \lambda d\lambda \quad (4)$$

که $u_1 = \sqrt{\lambda^2 - n^2}$ ، $u_0 = \sqrt{\lambda^2 - 1}$ و $\rho = [(x-x')^2 + (y-y')^2]^{1/2}$ می‌باشد. $J_0(k_0 \lambda \rho)$ تابع بسل مرتبه صفر بوده و h فاصله از مرز تا آنتن می‌باشد.

۲- فرمولبندی نگره تصویر مختلط گسسته (DCIM)

محاسبه تحلیلی انتگرال U امکان‌پذیر نبوده و به دلیل ماهیت نوسانی عبارت زیر انتگرال، محاسبه عددی آن نیز بسیار مشکل و زمانبر می‌باشد [9]. لذا محاسبه میدان تشعشی رابطه (1) نیز به راحتی قابل انجام نمی‌باشد. برای یک دوقطبی کوچک در مجاورت سطح زمین، جمله U بیانگر اثر زمین غیر کامل در میدان تابشی می‌باشد. با استفاده از تکنیک DCIM، تصاویر معادل این دو قطبی در محیط تلف‌دار را پیدا می‌کنیم. جمله $(u_0 - u_1)/(n^2 u_0 + u_1)$ در انتگرال U به شکل زیر تقریب زده می‌شود [6]:

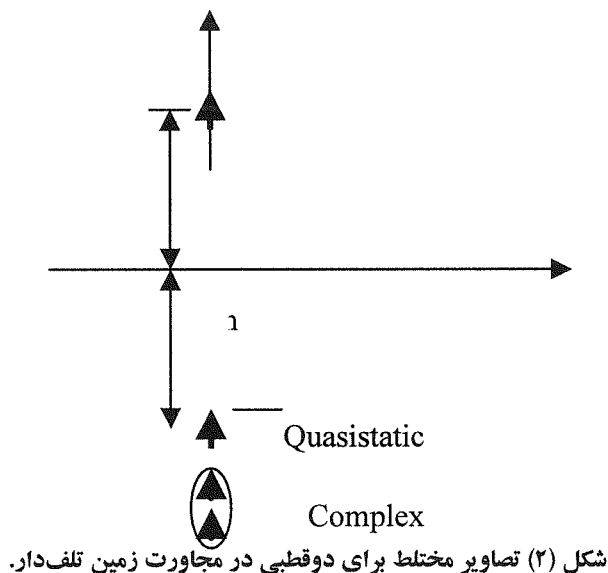
$$\frac{u_0 - u_1}{n^2 u_0 + u_1} = \sum_{i=1}^N a_i e^{b_i u_0} \quad (5)$$

با جایگذاری رابطه (5) در (4) و استفاده از معادله سامرفلد، U به صورت زیر بدست می‌آید:

$$U = \sum_{i=1}^N a_i \frac{e^{-jk_0 r_i}}{r_i} \quad (6)$$

در رابطه فوق $r_i = \sqrt{\rho^2 + (z + h - b_i/k_0)^2}$ که در آن $z \geq 0$.

تعبیر فیزیکی رابطه (6) واضح است. این رابطه بیانگر N تصویر است که در مکانهای مختلط $(x', y', -h + b_i/k_0)$ واقع شده‌اند. این تصاویر همان تصاویر مختلط گسسته می‌باشند. شکل (۲) بیانگر این تصاویر می‌باشد.



شکل (۲) تصاویر مختلط برای دو قطبی در مجاورت زمین تلف‌دار.

۱-۲- پیداکردن ضرایب

مقادیر پارامترهای b_i, a_i با استفاده از یکی از روشهای تقریب تابع مختلط به توابع نمایی بدست می‌آید. تکنیکهای متعددی برای این‌گونه روش‌ها مطرح گردیده است. از جمله آنها روش پرونی، پرونی اصلاح‌شده و روش GPOF می‌باشد [16]. روش پرونی بدلیل حساسیت بالا نسبت به نویز، دقت کمتری داشته و لذا کاربرد کمتری دارد. در این مقاله با استفاده از روش GPOF [17]، ضرایب مربوطه بدست آمده‌اند. قبل از آنکه بتوان از این روش‌ها استفاده نمود لازم است آرگومان تابع مختلط حقیقی شود. لذا تغییر متغیر زیر انجام شده است [6].

$$u_0 = t + j\left(1 - \frac{t}{T_0}\right) \quad t \in [0, T_0] \quad (7)$$

یعنی تقریب فوق در بازه $[0, T_0]$ معتبر خواهد بود. اگر تابع $f(t)$ به صورت زیر تعریف شده باشد.

$$f(t) = \sum_{i=1}^N A_i e^{s_i t} \quad t \in [0, T_0] \quad (8)$$

آنگاه پارامترهای b_i, a_i با استفاده از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$a_i = A_i \exp\left(-\frac{js_i}{1 - j/T_0}\right) \quad (9)$$

$$b_i = \frac{s_i}{1 - j/T_0}$$

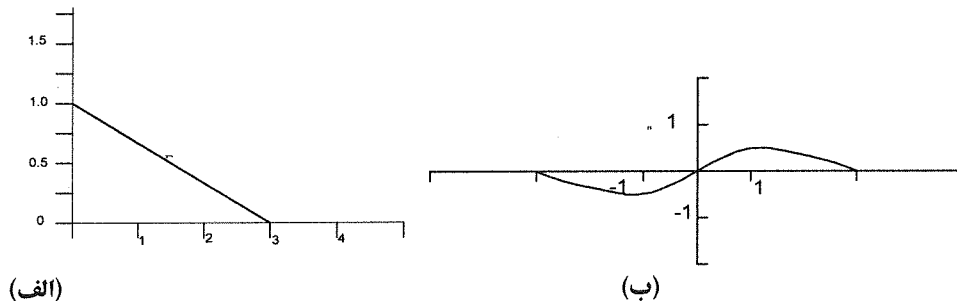
A_i, S_i نیز خود با استفاده از تکنیک GPOF بدست می‌آیند.

۲-۲- انتخاب مقادیر N, T_0

T_0 نقطه قطع فرآیند تعیین تصاویر تقریبی است. مقادیر متفاوت T_0 متناسب با مسیرهای تقریبی مختلف است. شکل (۳-الف) این مسیرها را در صفحه مختلط u_0 نشان می‌دهد. مسیرهای متناظر آنها در صفحه λ نیز در شکل (۳-ب) مشاهده می‌شود.

مقدار خطای ناشی از مسیرهای مختلف، با هم تفاوت دارد. این مقدار اختلاف در حوزه طیفی، ممکن است برای میدان‌های ناحیه دور در حوزه مکان اختلاف زیادی را باعث شود. از این رو انتخاب مقدار T_0 برای نواحی میدان دور با دقت خاصی انتخاب می‌شود. می‌توان با تکرار فراوان و بررسی نتایج بدست آمده مقدار T_0 مناسب را پیدا کرد. در این مقاله مقدار T_0 برابر ۳ انتخاب شده است [14].

N بیانگر تعداد جملات نمایی یا تصاویر مختلط می‌باشد. برای افزایش دقت لازم، مقدار N باید بیشتر انتخاب شود. لذا مقدار خطای نهایی نیز بر حسب مقدار N متفاوت خواهد بود. نتایج محاسبات برای N های مختلف در ادامه خواهد آمد.



شکل (۳) مسیرهای انتگرال‌گیری در صفحات u_0, λ .

۳- تصاویر معادل خط جریان

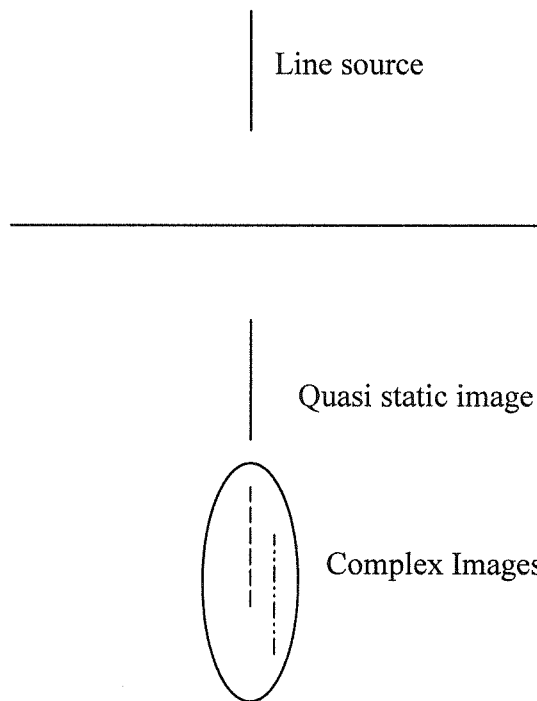
با توجه به نگره تصویر مختلط گسسته، تصویر معادل هر دو قطبی کوچک بدست می‌آید. بر اساس اصل جمع آثار می‌توان تصاویر مختلط خط جریان عمودی را به صورت خطوط جریان تصویر نوشت. با فرض آنکه منبع جریان اولیه دارای توزیع $I_0(z')$ باشد، توزیع جریان تصاویر معادل را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$I_1(z') = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} I_0(z') \quad -(h+l) \leq z' \leq -h \quad (10)$$

$$I_i(z') = \frac{2n^2}{n^2 + 1} a_i I_0(z') \quad -(h+l) + \frac{b_i}{k_0} \leq z' \leq -h + \frac{b_i}{k_0} \quad (11)$$

$i = 2, 3, \dots, N$

ساختار تصاویر معادل در شکل (۴) مشاهده می‌شود:



شکل (۴) ساختار تصاویر مختلط خط جریان.

از این رو می‌توان گفت که با جایگزینی تصاویر معادل می‌توان با حذف صفحه زمین، میدان‌های تشعشی را در فضای همگن بدست آورد.

۳-۱- محاسبه میدان‌های تشعشی

با جایگزینی N تصویر، نهایتاً آرایه‌ای $N+1$ عنصری خواهیم داشت که هم امتداد می‌باشند. می‌توان مؤلفه میدان الکتریکی ناحیه دور را به صورت زیر نوشت:

$$E(\theta) = j\omega\mu_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \sum_{n=0}^N E_n(\theta) \quad (12)$$

$$E_n(\theta) = \sin \theta \int_{-\infty}^{+\infty} i_n(z') e^{jk_0 z' \cos \theta} dz' \quad (13)$$

با توجه به آنکه عناصر آرایه همسان هستند، یعنی جریان هر کدام در جهت یکسان، طول یکسان و توزیع یکسان دارند، می‌توان روابط را به صورت زیر ساده کرد:

$$E_n(\theta) = \sin \theta \left[\int_{-l/2}^{l/2} i(z') e^{jk_0 z' \cos \theta} dz' \right] I_n e^{jk_0 z_n \cos \theta} \quad (14)$$

در رابطه فوق فرض گردیده است، $i_n(z') = I_n i(z' - z_n)$ که z_n نقطه مرکزی عنصر (وسط عنصر) می‌باشد. رابطه میدان تابشی کل به صورت زیر خواهد بود:

$$E_\theta = j\omega\mu \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \{E.F\} \cdot \{A.F\} \quad (15)$$

$$E.F = \sin \theta \int_{-l/2}^{l/2} i(z') e^{jk_0 z' \cos \theta} dz' \quad (16)$$

$$A.F = \sum_{n=0}^{N+1} I_n e^{jk_0 z_n \cos \theta} \quad (17)$$

که در آن E.F مربوط به یک عنصر بوده و A.F فاکتور آرایه می‌باشد.

۲-۳- نتایج عددی

با استفاده از رابطه (15)، میدان تشعشی ناحیه دور برای حالت‌های خاص زیر محاسبه می‌شود.

حالت خاص (۱): توزیع جریان یکنواخت (Uniform Line Source)

$$I_0(z') = I_0 e^{-jk_0 \cos \theta_0 z'} \quad h \leq z' \leq h+l \quad (18)$$

$$E_\theta = j\omega\mu \frac{I_0 e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \sin \theta \frac{\sin u}{u} . A.F \quad (19)$$

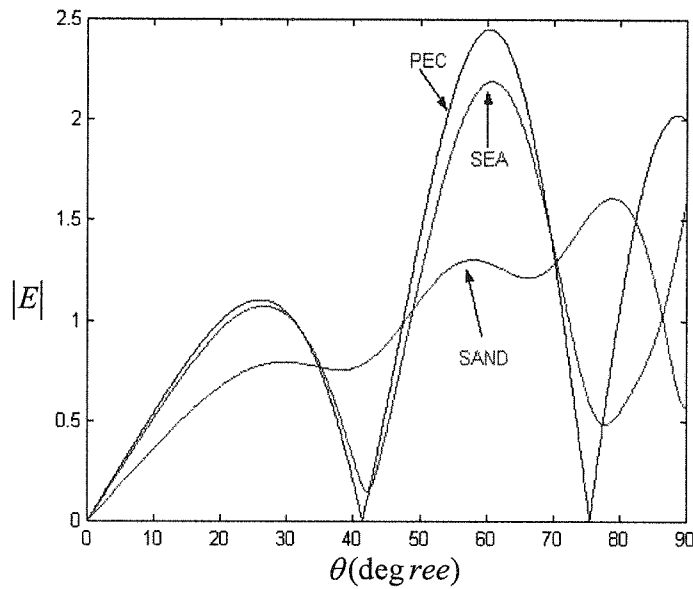
$$A.F = I_0 \left[e^{jk_0 \cos \theta (h + \frac{l}{2})} + \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} e^{jk_0 (-h - \frac{l}{2}) \cos \theta} + \sum_{i=1}^3 \frac{2n^2}{n^2 + 1} a_i e^{jk_0 \cos \theta_0 (-h - \frac{l}{2} + \frac{b_i}{k_0})} \right] \quad (20)$$

حالت خاص (۲): توزیع جریان سینوسی

$$I_0(z') = I_0 \sin \left[k_0 \left(\frac{l}{2} - |z' + l/2 - h| \right) \right] \quad h \leq z' \leq h+l \quad (21)$$

$$E_\theta = j\omega\mu_0 \sin \theta \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \frac{2I_0}{k_0} \frac{\cos(k_0 \frac{l}{2} \cos \theta) - \cos(k_0 \frac{l}{2})}{\sin^2 \theta} (A.F) \quad (22)$$

روابط (19) و (21) را می‌توان به راحتی رسم کرد. در شکل زیر رابطه (19) برای دو حالت σ , ϵ_r مختلف (زمین دریا و ماسه) رسم شده است ($h = \frac{3}{4}\lambda$ و $l = \lambda/2$ فرض گردیده است).



شکل (۵) شدت میدان تشعشی سیم عمودی با توزیع جریان یکنواخت در کنار زمین‌های ماسه و دریا.

با توجه به آنکه توزیع جریان سینوسی به حالت واقعی نزدیکتر است، رابطه (21) را برای زمین‌های مختلف با σ , ϵ_r ها متفاوت رسم می‌کنیم. برای زمین‌های مختلف مقادیر σ , ϵ_r های زیر را داریم:

جدول (۱) چهار نوع آب دریا و زمین تلف دار.

Type\Parameters	ϵ_r	$\sigma, s/m$
Sea Water	80	1
Fresh Water	80	10^{-3}
Wet Earth	20	10^{-2}
Dry Earth (sand)	4	10^{-3}

با توجه به مقادیر فوق برای فرکانس $f = 100\text{MHz}$ ، مقادیر n^2 به صورت جدول (۲) بدست می‌آیند.

جدول (۲) پارامتر n آب دریا و زمین‌های تلف دار.

Earth Type	n^2
Sea Water	$80-j179.8$
Fresh Water	$80-j0.18$
Wet Earth	$20-j17.98$
Dry Earth (sand)	$4-j0.18$

با استفاده از مقادیر فوق، تصاویر گسسته مختلط برای هر کدام از زمین‌های فوق محاسبه شده و بدست می‌آیند. به عنوان نمونه تصاویر معادل آب دریا به صورت زیر خواهند بود:

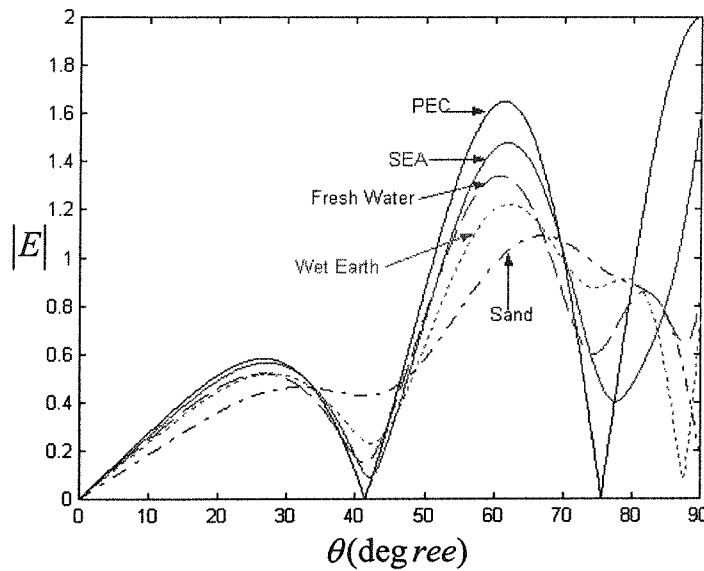
$$\begin{aligned} a(1) &= -0.2392 - j0.1315 \\ a(2) &= 0.0027 - j0.0349 \\ a(3) &= -0.1118 - j0.1526 \\ a(4) &= -0.0063 - j0.0808 \\ a(5) &= -0.0408 - j0.1275 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(1) &= -5.6907 + j5.9462 \\ b(2) &= -0.2096 + j0.1458 \\ b(3) &= -3.7593 + j3.1622 \\ b(4) &= -0.9197 + j0.5657 \\ b(5) &= -2.1366 + j1.4756 \end{aligned}$$

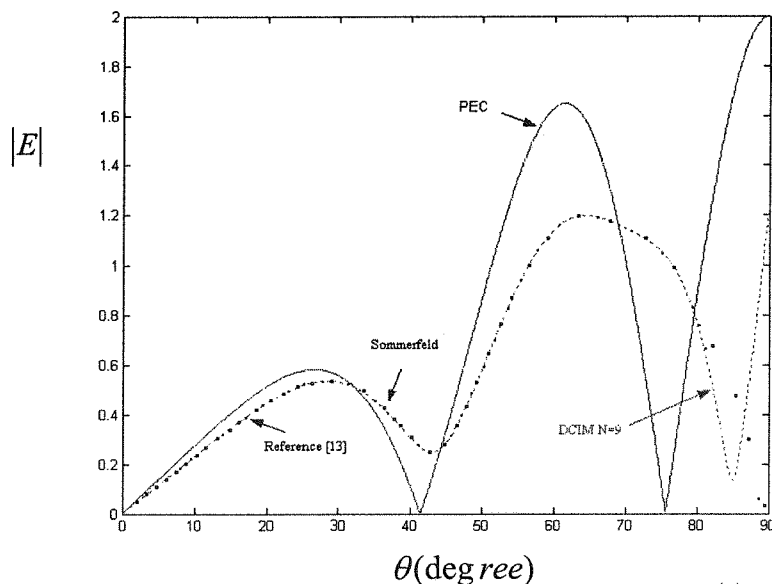
با استفاده از رابطه (21) لگوی تابشی سیم عمودی الکتریکی در مجاورت سطوح فوق به صورت شکل (۶) خواهند بود

$$l = \lambda/2 \text{ و } h = \frac{3}{4}\lambda \text{ (فرض گردیده است).}$$

برای آنکه نتایج بدست آمده را با نتایج مقالات دیگر مقایسه نماییم، برای نمونه برای زمین با مشخصات $(\epsilon_r = 10, \sigma = 10 \text{ mS/m})$ در فرکانس $f = 100 \text{ MHz}$ ، لگوی تابشی آنتن فوق بدست آمده و به همراه حل مرجع [13] و نتیجه حل عددی انتگرال سامرفلد در شکل (۷) رسم گردیده‌اند.



شکل (۶) شدت میدان تابشی نرمالیزه سیم عمودی با توزیع جریان سینوسی در کنار زمین‌های مختلف.



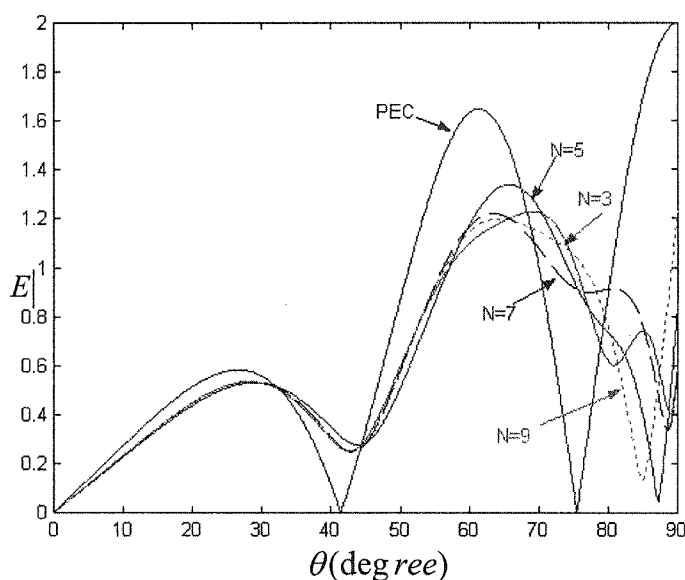
شکل (۷) شدت میدان تابشی نرمالیزه سیم عمودی با توزیع جریان سینوسی.

در شکل فوق دقت روش ارائه شده برای زوایای زیر ۸۳ درجه در مقایسه با حل عددی سامرفلد کاملاً مشهود است. در این زوایا مقدار خطا اصلاً قابل توجه نیست و در زوایای بالاتر می‌توان با افزایش تعداد تصاویر مختلط دقت لازم را بدست آورد. با توجه به آنکه در محاسبه تصاویر تعداد آنها محدود می‌باشد، برای محاسبه مقدار خطا بر حسب تعداد تصاویر، برای نمونه برای زمین با مشخصات $(\epsilon_r = 10, \sigma = 10 \text{ mS} / \text{m})$ در فرکانس $f = 100 \text{ MHz}$ ، الگوی تابشی آنتن فوق را برای تعداد تصاویر مختلف رسم کرده‌ایم. مقدار خطای ناشی از محدود بودن تعداد تصاویر از روی شکل (۸) کاملاً مشخص است. همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود با تغییر پارامترهای زمین غیر کامل شدت میدان تابشی آنتن مجاور آن تغییر می‌کند. آب دریا مثل هادی کامل عمل می‌کند با این تفاوت که در بعضی نقاط قله دامنه کمتر است. هرچه از هادی کامل فاصله می‌گیریم شدت میدان تفاوت بیشتری پیدا می‌کند. سطح اولین گلبرگ کناری نسبت به قله بالا می‌رود و صفرها صاف می‌شوند.

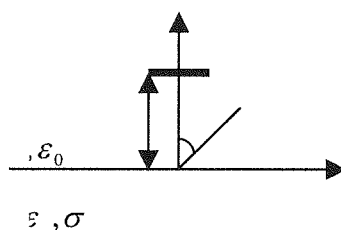
۴- آنتن سیمی افقی

مشابه آنتن سیمی عمودی، با استفاده از تئوری تصویر مختلط گسسته برای عناصر دوقطبی و استخراج تصاویر معادل و نهایتاً تعمیم تصاویر به سیم جریان تصاویر مختلط معادل سیم واقع شده در کنار زمین تلف‌دار بدست می‌آیند. در شکل (۹) آنتن سیمی افقی با توزیع جریان $I_0(x)$ مشاهده می‌گردد. تصاویر مختلط گسسته معادل آنتن سیمی افقی با روابط زیر بیان خواهند شد [18]:

$$I_i(x') = a_i I_0(x') \quad z' = -h + \frac{b_i}{k_0}, \quad -l/2 \leq x' \leq l/2 \quad i=1,2,\dots,N \quad (23)$$



شکل (۸) شدت میدان تابشی نرمالیزه سیم عمودی با توزیع جریان سینوسی در کنار زمین غیر کامل بر حسب تعداد تصاویر.

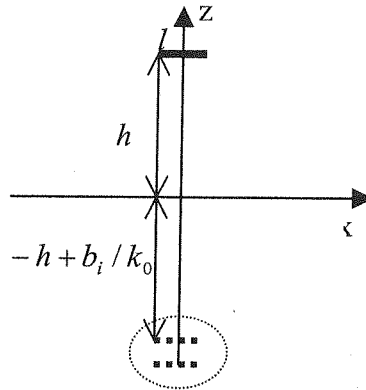


شکل (۹) آنتن سیمی افقی در کنار زمین تلف‌دار.

که a_i و b_i از رابطه زیر بدست می‌آید:

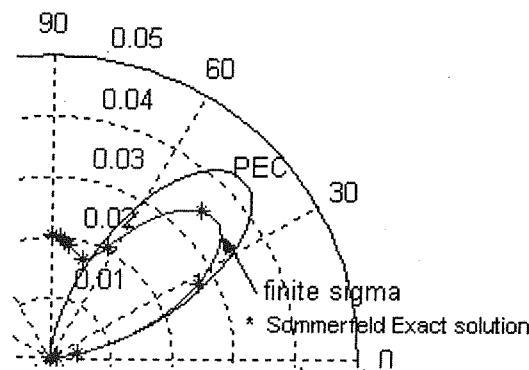
$$\frac{u_0 - u_1}{u_0 + u_1} = \sum_{i=1}^N a_i e^{b_i u_0} \quad (24)$$

شکل (۱۰) چگونگی قرارگیری این تصاویر را نسبت به منبع اصلی نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) وضعیت قرارگیری تصاویر.

در شکل (۱۱) نتایج عددی مؤلفه θ پترن تشعشی آنتن افقی برای یک زمین خاص نشان داده شده است.



شکل (۱۱) مؤلفه θ میدان الکتریکی آنتن نصف طول موج در ارتفاع نصف طول موج از سطح زمین با $\epsilon_r = 10$ و $\sigma = 50 \text{ mS/m}$.

۵- نتیجه گیری

روش تصویر مختلط پیشنهادی برای تحلیل و آنالیز آنتن سیمی باریک دارای دقتی مشابه روش حل عددی سامرفلد می‌باشد. ولی این روش دارای مفهوم ساده‌تر و از نظر زمانی فوق‌العاده سریعتر می‌باشد. زیرا نتایج تصاویر مختلط برخلاف زمان محاسبه انتگرال‌های سامرفلد در مدت زمان بسیار کوتاهی محاسبه می‌شوند و برای دقت بیشتر می‌توان تعداد تصاویر زیادتری انتخاب کرد. همینطور از مزایای این روش و تصاویر مختلط می‌توان به این نکته اشاره کرد که دامنه و مکان تصاویر مختلط صرفاً به پارامترهای ضریب دی الکتریک و رسانایی ویژه زمین از طریق $n^2 = \epsilon_r - j\sigma/\omega\epsilon_0$ بستگی داشته و کاملاً از موقعیت منبع و میدان مستقل می‌باشد. لذا برخلاف سایر روش‌های تصویر با یکبار محاسبه تصاویر می‌توان برای هر نوع ترکیب

کنار زمین مسئله را براحتی حل کرد. در واقع با این روش با کمی محاسبات اضافه‌تر از حالت فضای آزاد، آنتن‌ها و پراکنده‌کننده‌های مجاور و درون زمین معمولی و حتی زمین‌های چند لایه را می‌توان مدل نمود. تنها تفاوت این است که ضریب انعکاس زمین مربوطه را باید تغییر داد.

۶- تشکر و قدردانی

از مرکز تحقیقات مخابرات ایران بخاطر حمایت بی‌دریغ از انجام این تحقیقات نهایت تشکر و قدردانی میشود.

مراجع

- [1] Popovic, B.D., and V.V. Petrovic, "Vertical wire Antenna above ground: Simple near exact image Solution", IEE Proceedings-H, Vol.140, No.6, Dec. 1993
- [2] Richmond, J.H., and Newman, E.H., "Mutual impedance between vertical dipoles over a flat earth", Radio Science, Vol.14, No.6, pp. 957-959, 1979.
- [3] Parhami, P., Rahmat-Samii, Y., and Mittra, R. "An efficient approach for evaluating Sommerfeld integrals encountered in the Problem of a current element radiating over lossy ground", IEEE, Trans. Antennas Propagat., Vol.26, No.1, pp.100-104, 1980.
- [4] Bannister, P. R., "Application of Complex Image theory", Radio Sci., Vol.21, No.4, pp.605-616, 1986.
- [5] Lindell, I.V., and Alanen, E., "Exact Image theory for the Sommerfeld half-space problem, Part II: Vertical Magnetic Dipole", IEEE Trans. Antennas Propagat. Vol.32, No.10, pp.1027-1032,
- [6] Yang, J. J.; Chow, Y. I., and Fang, D.G., "Discrete complex images of a three-dimensional dipole above and within a lossy ground," IEE Proceeding- H, Vol.138, No.4, Aug. 1991.
- [7] Fang, D.G., Yang, J.J., and Delisle, G.Y., "Discrete image theory for horizontal electric dipoles in multilayered medium", IEE Proc.-H, Vol.135, No.5, pp.297-303, 1988.
- [8] Yang, J. J., ET al, "Complex images of an electric dipoles in homogeneous and layered dielectrics between two ground planes", IEEE, Trans. Microwave Theory Technique., Vol.40, No.3, pp.595-600, 1992.
- [9] Chow, Y. L., et all, "A closed form spatial Green's function for the thick microstrip substrate", IEEE, Trans. Microwave Theory Technique., Vol.39, No.3, pp.588-592, 1991.
- [10] Abbasi, B., Hakkak, M., "Analysis of electromagnetic radiation with an electric dipole above lossy ground using complex image theory", ICT2002 conference, Beijing, Proc. Vol.3, June 2002.
- [11] Abbasi, B., Hakkak, M., "Analysis of vertical electric dipole above lossy half-space using discrete complex image method", IEEE APS/URSI Symposium, AT&M Texas University, June 2002.
- [12] Petrovic, V. V., and Popovic, B. D., "Horizontal wire antenna above lossy half-space: Simple accurate image solution", Int. Journal of Numerical Modelling, Vol.9, pp.191-196, 1996.
- [13] _____, "Arbitrary wire antenna above lossy half-space: Rapid accurate image solution", Int. Journal of Numerical Modelling, Vol.10, pp.268-284, 1997.
- [14] Hakkak, M., Abbasi, B., "Analysis of vertical wire antenna above imperfect ground using discrete complex image method", MMET 02 conference, Ukraine, Sept. 2002.
- [15] A. Banos, Dipole Radiation in the Presence of a Conducting Half-Space, Pergamon, New York, 1966.
- [16] Sarkar, T. K. and Pereira, O. "Using the Matrix Pencil Method to Estimate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials," IEEE AP Magazine Vol.37, No.1, pp.48-55, Feb.1995.
- [17] Hue, Y., and Sarkar, T. K., "Generalized Pencil-Of-Function Method for Extracting Poles of an EM System from Its Transient Response," IEEE Trans. AP, Vol.37, pp.229-234, Feb.1989.
- [18] Abbasi, B., Hakkak, M., "Horizontal wire antenna above lossy- half-space" IEEE APS/URSI Symposium, AT&M Texas University, 2003.