

تحلیل آنتن های شیاری SIW لایه ای در محیط چند لایه عایقی با استفاده از روش

تمام موج ترکیبی MoM-PO

رضا بایدرخانی^۱، کیوان فرورقی^۱، بیژن عباسی آرند^۱ و سعید کمال زاده^۱

^۱دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

r.bayderkhani@modares.ac.ir , keyvan_f@modares.ac.ir, abbasi@modares.ac.ir, s.kamalzadeh@modares.ac.ir

چکیده - در این مقاله روشی ترکیبی، تمام موج، سریع و در عین حال دقیق، مبتنی بر ممان و نور فیزیکی به منظور تحلیل آنتن های شیاری SIW لایه ای که در محیط چند لایه عایقی تشعشع می کنند ارائه شده است. ساختار آنتن بصورت موجبرهای صفحه موازی که بطور متوالی روی هم قرار گرفته و شامل تعداد دلخواهی وایا و شیارهای تشعشعی و/یا تزویجی هستند مدل شده است. به منظور در نظر گرفتن اثر محیط چند لایه (رادوم) بر روی آنتن، از روش نور فیزیکی و ردیابی اشعه سه بعدی استفاده شده است. میدان داخل ساختار SIW بصورت حاصل جمع مدهای برون سو استوانه ای در نظر گرفته شده است. با اعمال شرایط مرزی روی سطوح وایا، ضرایب پراکندگی ناشی از آنها محاسبه می شوند. شیارها با استفاده از اصل هم ارزی توسط جریان های مغناطیسی مجهول مدل می شوند. در نهایت این ضرایب با حل معادله انتگرالی ناشی از اعمال شرایط مرزی مناسب روی سطح شیارها بدست می آیند. به منظور صحت سنجی، آنتن شیاری دو لایه با محفظه پشتی SIW که توسط رادومی عایقی پوشیده شده است، با استفاده از این روش تحلیل و نتایج آن با نتایج بدست آمده از تحلیل HFSS مقایسه شده است. نتایج بیانگر دقت و صحت بسیار بالای روش مذکور می باشد.

کلید واژه- آنتن های شیاری؛ تابع گرین دایادیک؛ رادوم، روش های عددی، نور فیزیکی/اممان، SIW

در مقابل روش های تمام موج دارای صحت مناسبی هستند اما نیازمند محاسبات سنگین می باشند که در مواردی که ابعاد فیزیکی ساختار در مقایسه با طول موج بزرگ باشد منجر به افزایش زمان تحلیل می شوند.

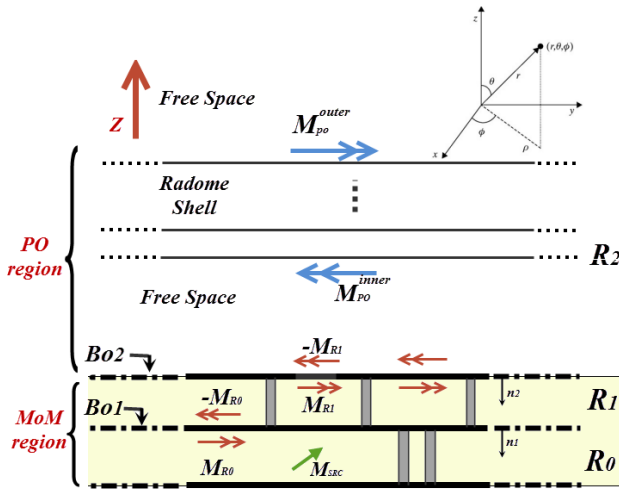
بنابراین دستیابی به روشی عمومی، سریع و در عین حال دقیق به منظور طراحی و بهینه سازی انواع ساختارهای SIW ضروری به نظر می رسد. روشی سریع و در عین حال دقیق، مبتنی بر استفاده از تابع گرین دایادیک موجبر دو صفحه موازی، برای تحلیل قطعات غیر تشعشعی SIW برای اولین بار در [۹] و [۱۰] ارائه شد. همچنین در [۱۱] این روش به منظور تحلیل آرایه شیاری SIW گسترش یافت و نتایج ارائه شده نشان دهنده صحت بالای این روش در مقایسه با سایر روش های عددی می باشد. در تمامی موارد فوق مساله تشعشع در فضای آزاد در نظر گرفته شده است و مساله تشعشع در محیط چند لایه بیان نشده است.

این در حالیست که در عمل، به منظور محافظت از آنتن از شرایط محیطی، آن ها را داخل پوشش های خاص عایقی قرار می دهند. به این پوشش های عایقی اصطلاحاً رادوم اطلاق می شود. وجود رادوم می تواند روی بسیاری از خصوصیات تشعشعی آنتن از جمله بهره، پهنای پرتو، تراز گلبرگ کناری، جهت بیشینه پرتو و نیز تطبیق و امپدانس ورودی آنتن تاثیر گذار باشد. این اثرات خصوصاً در فرکانس های بالاتر بسیار بحرانی تر می باشند. بنابراین بررسی و در نظر گرفتن تمامی این اثرات در

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر، فن آوری موجبر جانمایی شده در زیر لایه به دلیل سادگی ساخت، امکان یکپارچه سازی با سایر اجزای سیستم و امکان پیاده سازی توسط فن آوری برد مدار چاپی با هزینه پایین در بسیاری از کاربردهای فرکانس بالا خصوصاً امواج میلیمتری مورد توجه قرار گرفته است. تا کنون ساختارهای مختلفی با استفاده از فن آوری SIW (substrate integrated waveguide) طراحی و ساخته شده اند که از آن جمله می توان به انواع تزویجگرها [۱]؛ میکسرها [۲]، نوسانگرها [۳]، و انواع آنتن ها اشاره نمود [۴-۵].

آنتن های شیاری، یکی از رایجترین انواع آنتن های بر پایه فن آوری SIW می باشند. به منظور تحلیل آنتن های شیاری SIW روش های مختلفی پیشنهاد شده است. دسته ای از این روش ها مبتنی بر روش های تقریبی می باشند که از جمله آن ها می توان به مدل کردن موجبرهای SIW با موجبرهای فلزی معادل [۶]، تئوری خطوط انتقال [۷] و روش های دوبعدی چند ترمیناله [۸] اشاره کرد. دسته ای دیگر از این روش ها مبتنی بر تحلیل های عددی تمام موج هستند که از جمله آن ها می توان به روش المان محدود (حوزه فرکانس) و تفاضل محدود (حوزه زمان) اشاره کرد. روش های تقریبی عموماً از لحاظ حجم عملیات ریاضی بسیار بهینه می باشند اما صحت مناسبی ندارند.



شکل ۱: شمایی از مساله مورد بررسی.

بر پایه PO، جریان مغناطیسی القایی ناشی از میدان های تابشی و انعکاسی در هر مرز از سطوح عایق برای q امین مد از زمین شیار تشعشعی با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$M_{inner,q,j}^{PO} = (\hat{E}_{q,j}^i + \hat{E}_{q,j}^r) \times \hat{n}_1 \quad (1)$$

$$M_{outer,q,j}^{PO} = (\hat{E}_{q,j}^t) \times \hat{n}_2 \quad (2)$$

در فرمول فوق \hat{n} بردار نرمال عمود بر سطح تابش (به سمت داخل محیط) است. \hat{E}^i ، \hat{E}^r و \hat{E}^t به ترتیب عبارتند از میدان های تابشی، انعکاسی و عبوری. شایان ذکر است عبوری از لایه اول به عنوان میدان تابشی برای لایه دوم عمل می کند و همچنین به منظور در نظر گرفتن انعکاس های چند گانه می توان با استفاده از روش ردیابی اشعه سه بعدی این انعکاسات را تا درجات بالا دنبال کرد. این میدان ها توسط فرمول زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{aligned} \hat{E}_r &= (\hat{E}_i \cdot \hat{v}_\perp^i) R_\perp \hat{v}_\perp^r + (\hat{E}_i \cdot \hat{v}_\parallel^i) R_\parallel \hat{v}_\parallel^r \\ \hat{E}_t &= (\hat{E}_i \cdot \hat{v}_\perp^i) T_\perp \hat{v}_\perp^t + (\hat{E}_i \cdot \hat{v}_\parallel^i) T_\parallel \hat{v}_\parallel^t \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن

$$\hat{v}_\perp = \frac{-\hat{k}_i \times \hat{n}_1}{|\hat{k}_i \times \hat{n}_1|} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \hat{v}_\parallel^i &= \hat{v}_\perp \times \hat{k}_i \\ \hat{v}_\parallel^r &= \hat{v}_\perp \times \hat{k}_r \\ \hat{v}_\parallel^t &= \hat{v}_\perp \times \hat{k}_t \end{aligned} \quad (5)$$

مرحله طراحی آنتن می تواند بسیار مطلوب باشد. بر همین اساس در این مقاله روشی سریع، بهینه و تمام موج به منظور تحلیل ساختار یک آنتن شیاری دولایه SIW که توسط رادوم پوشش داده شده است ارائه شده است. بدین منظور روش ارائه شده در [۱۱] به منظور تحلیل ساختار چندلایه با تعداد دلخواه شیار تشعشعی و تزویجی و نیز تعداد دلخواه وایا گسترش داده شده است و فرمول بندی کلی ارائه شده است. همچنین به منظور در نظر گرفتن اثرات تشعشع در محیط چند لایه (رادوم) از روش نور فیزیکی به همراه ردیابی اشعه سه بعدی استفاده شده است. در نهایت معادلات بدست آمده روی سطح شیار را به منظور بدست آوردن ضرایب مجهول حل کرده و جریان مغناطیسی معادل را روی شیار، با در نظر گرفتن اثرات محیط چندلایه عایقی (رادوم)، بدست آمده است. به منظور صحت سنجی روش مذکور، آنتن شیاری با محفظه پشتی SIW که به تازگی در [۵] ارائه شده است را در حالیکه در داخل رادوم صفحه ای با فاصله هوایی قرار گرفته است را توسط روش ارائه شده در این مقاله تحلیل و نتایج آن را با HFSS مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که روش فوق بسیار دقیق و سریع بوده و برای آنالیز آرایه های بزرگ آنتن های شیاری SIW پوشیده شده توسط رادوم بسیار مناسب می باشد.

۲- فرمول بندی مساله

با اعمال اصل هم ارزی سطحی می توان مساله اصلی را به دو مساله بصورت زیر تبدیل نمود: ۱- ناحیه ممان: در این ناحیه شیار ها را اتصال کوتاه فرض کرده و جریان مغناطیسی معادل $M_{outer} = M$ و $M_{inner} = -M$ را در محل شیار قرار می دهیم. ۲- ناحیه نور فیزیکی: در این ناحیه جریان مغناطیسی معادل را روی سطح رادوم مطابق شکل ۱ قرار می دهیم. در قسمت بعد نحوه مدل سازی و فرمول بندی در هر ناحیه توضیح داده خواهد شد.

۱-۲ مدل سازی در ناحیه PO

روش نور فیزیکی یکی از روش های فرکانس بالا می باشد که برای تحلیل ساختار هایی با سطوح نسبتا هموار مناسب است. هر چند در حالت کلی چنانچه شرط محلی مسطح بودن برقرار باشد محدودیتی در استفاده از روش PO وجود ندارد. بنابراین در این مقاله از این روش به منظور محاسبه جریان های القایی روی سطح رادوم مسطح استفاده شده است. اما در فرمول بندی کلی مساله تفاوتی وجود ندارد.

$$\begin{aligned} & \hat{n} \times \left(H_{inc}^{inner}(r) + \sum_j^{N_s} H_{M_slot,j}^{inner}(r) \right) \\ & = \hat{n} \times \left(H_{inc}^{outer}(r) + \sum_j^{N_s} H_{M_slot,j}^{outer}(r) + \sum_q^{N_q} \sum_j^{N_s} H_{j,q}^{PO}(r) \right) r \in S_i \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن:

$$H_{inc}(r) = -j\omega\epsilon_0\epsilon_r \cdot \iint_{V_{SRC}} \bar{G}_{PPW}(r, r') \cdot M_{SRC}(r') dr' + H_S^{M_{SRC}}(r) \quad (10)$$

$$H_{M_slot,j}(r) = -j\omega\epsilon_0\epsilon_r \cdot \iint_{S_j} \bar{G}_{PPW}(r, r') \cdot M_j(r') dr' + H_S^{M_j}(r) \quad (11)$$

در فرمول فوق r و r' به ترتیب بردار مکان نقطه مشاهده و منبع هستند؛ M_j جریان مغناطیسی معادل می باشد که روی سطح شیار زام تعریف شده است؛ $\bar{G}_{PPW}(r, r')$ بیانگر تابع گرین دایادیک موجبر دو صفحه موازی می باشد زمانیکه تمامی شیارها اتصال کوتاه هستند؛ H_S^M بیانگر میدان پراکنده شده توسط وایا در اثر تحریک جریان مغناطیسی M می باشد؛ $M_{SRC}(r')$ جریان تحریک می باشد که در حجم V_{SRC} تعریف شده است و H^{PO} میدان مغناطیسی بدست آمده توسط روش نور فیزیکی است که بیانگر اثر چندلایه عایق (رادوم) بیرونی بوده و تنها برای ناحیه بیرونی مقدار دارد. (شایان ذکر است عبارت تابع گرین دایادیک $\bar{G}_{PPW}(r, r')$ در ضمیمه الف ارائه شده است).

۲-۲-۲-۲ فرمول بندی ترکیبی MOM-PO

جریان های مغناطیسی معادل که برای مدل کردن شیارها استفاده شده اند را می توان بصورت مجموع توابع پایه تمام دامنه سینوسی بیان نمود. جریان مغناطیسی برای شیار j عبارتست از:

$$M_j^{MM}(r') = \hat{v}_j \sum_q f_{q,j}(r') \cdot V_{q,j} \quad 1 \leq j \leq N_s \quad (12)$$

$$f_{q,j}(r') = \sin(k_q \left(\frac{L_j}{2} + v_j \right)), \quad |v_j| \leq L_j \quad (13)$$

$$k_q = \frac{q\pi}{L_j} \quad \text{and} \quad r' = r_{jq} + u\hat{u}_j + v\hat{v}_j \quad (14)$$

در فرمول های فوق \hat{k}_i جهت انتشار موج تابشی می باشد و داریم:

$$\begin{aligned} \hat{k}_r &= -\cos(2\theta_i)\hat{k}_i + \cos(\theta_i)\hat{n}_1 \\ \hat{k}_t &= \cos(\theta_i - \theta_r)\hat{k}_i - \cos(\theta_i)\hat{n}_1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\cos(\theta_i) = \hat{n}_1 \cdot \hat{k}_i$$

در فرمول فوق θ_i زاویه شکست می باشد و به سادگی از قانون اسنل محاسبه می شود. همچنین R_{\perp} ، R_{\parallel} ، T_{\perp} و T_{\parallel} به ترتیب عبارتند از ضرایب انعکاس و انتقال برای قطبیت های عمودی و موازی در هر سطح می باشند و توسط فرمول زیر بیان می شوند [۱۲]:

$$\begin{aligned} R_{\perp} &= \frac{Z_0 \cos \theta_i - Z_d \cos \theta_t}{Z_0 \cos \theta_i + Z_d \cos \theta_t} & R_{\parallel} &= \frac{Z_d \cos \theta_i - Z_0 \cos \theta_t}{Z_d \cos \theta_i + Z_0 \cos \theta_t} \\ T_{\perp} &= \frac{2Z_0 \cos \theta_i}{Z_0 \cos \theta_i + Z_d \cos \theta_t} & T_{\parallel} &= \frac{2Z_d \cos \theta_i}{Z_d \cos \theta_i + Z_0 \cos \theta_t} \end{aligned} \quad (7)$$

۲-۲-۲-۲ مدل سازی و فرمول بندی ناحیه ممان

از روش ممان به منظور مدل کردن آنتن شیاری چندلایه SIW استفاده شده است. در این مقاله فرمول ها برای ساختار دولایه ارائه شده اند اما به راحتی این فرمول بندی قابل گسترش به محیط چندلایه می باشد. همچنین در فرمول بندی ارائه شده در این قسمت فرض شده است که آنتن توسط یک کابل هم محور در پایین ترین لایه تغذیه شده است. چنانچه تعداد تغذیه ها بیشتر از یکی باشد می توان با استفاده از قضیه جمع آثار اثر هر یک را محاسبه و در نهایت جواب کلی را محاسبه نمود.

۲-۲-۲-۱-۱ معادله انتگرالی

با استفاده از اصل هم ارزی می توان شیارها را توسط هادی کامل پوشاند و جریان معادل مغناطیسی M را در سطح درونی و $-M$ را روی سطح بیرونی آن مطابق شکل ۱ فرض نمود. با توجه به اینکه شیار به اندازه کافی نازک ($L \gg W$) فرض شده است لذا می توان بیان کرد که تنها مولفه عرضی میدان الکتریکی روی سطح آن مقدار دارد. بنابراین جریان مغناطیسی معادل بصورت جریانی با یک مولفه در جهت طولی شیار فرض شده و از مولفه عرضی آن صرف نظر شده است. اعمال شرایط مرزی در سطح شیار موجب می شود تا مولفه مماسی میدان های الکتریکی و مغناطیسی پیوسته باشند. از پیوستگی میدان مغناطیسی در سطح شیار S می توان به معادلات انتگرالی کلی زیر برای هر شیاری رسید:

$$\hat{n} \times H_{tot}^{inner}(r) = \hat{n} \times H_{tot}^{outer}(r) \quad (8)$$

با یک جریان مغناطیسی گردشی (حلقه جریان مغناطیسی) بفرم زیر مدل کرد [۱۳]:

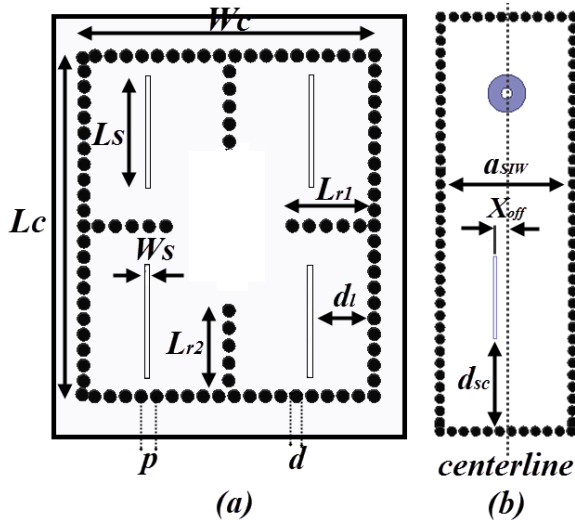
$$M_{SRC}(r') = -\hat{\phi} \frac{V}{|\rho' - \rho_s| \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \delta(z') \quad (20)$$

که در فرمول بالا V ولتاژ میان هادی داخلی و خارجی است، ρ_s بیانگر مرکز هادی داخلی است و ρ' نقطه ای میان هادی داخلی و خارجی است که جریان مغناطیسی معادل قرار دارد. با قرار دادن (۲۰) در (۱۰) داریم:

$$H_{inc}(r) = -\frac{2\pi V}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \frac{\omega \epsilon}{2h} \sum_m \left(1 - \frac{\delta_{m0}}{2}\right) \frac{1}{k_{\rho m}^2} (\nabla \times \hat{z}) \cos(k_{zm} z) \left\{ \begin{aligned} &H_0^{(2)}(k_{\rho m} \rho) [J_0(k_{\rho m} \rho) - J_0(k_{\rho m} a)] \\ &+ J_0(k_{\rho m} \rho) [H_0^{(2)}(k_{\rho m} b) - H_0^{(2)}(k_{\rho m} \rho)] \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$+ \sum_{l=1}^{N_c} \sum_{n,m} (\nabla \times \hat{z}) H_n^{(2)}(k_{\rho m} |\rho - \rho_l|) \cdot \cos(k_{zn} z) e^{-jn\phi_l} A_{m,n,l}^M(M_{SRC})$$

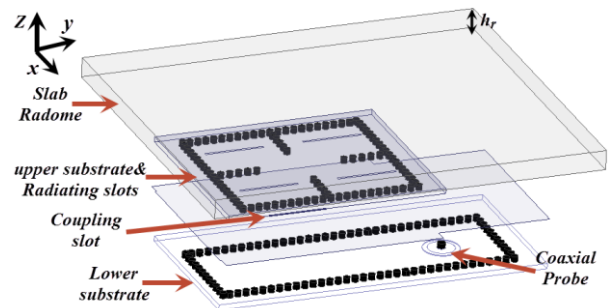
$$\phi_l = \angle(\rho - \rho_l)$$



شکل ۳: شمایی از آنتن شیاری SIW به همراه متغیرهای اصلی (a) زیر لایه فوقانی شامل محفظه تشدید و شیارهای تشعشعی (b) زیر لایه تحتانی شامل پروب تغذیه و شیار تزویج.

که در آن r_{jq} مرکز q امین تابع پایه روی زامین شیاری می باشد. همچنین $V_{q,j}$ بیانگر ضرایب مجهول، N_s تعداد شیاری ها، L_j طول زامین شیاری N_q تعداد مدها در هر شیاری می باشند. با قرار دادن فرمول های (۱۰)-(۱۴) در (۹) و اعمال روش گالرکین معادلات انتگرالی را می توان بصورت یک دستگاه $N_s \times N_q$ از معادلات خطی با $N_s \times N_q$ مجهول بصورت زیر تبدیل کرد:

$$h_{p,i} = \sum_{q,j} Y_{q,j}^{p,i} \cdot V_{q,j} \quad \forall (p,i) \quad (15)$$



شکل ۲: شمایی از آنتن شیاری با محفظه پشتی SIW که یک صفحه ای عایقی با فاصله هوایی در مقابل آن قرار داده شده است.

هر یک از عناصر (۱۵) عبارتند از:

$$h_{p,i} = \begin{cases} \iint_{S_i} f_{p,i} \hat{v}_i \cdot H_{inc}(r) dr & \text{for interior region} \\ 0 & \text{other regions} \end{cases} \quad (16)$$

$$Y_{q,j}^{p,i} = Y_{q,j}^{p,i}(int1) + Y_{q,j}^{p,i}(int2) + Y_{q,j}^{p,i}(ext) \quad (17)$$

$$Y_{q,j}^{p,i}(ext) = \begin{cases} j\omega \epsilon_0 \epsilon_d \iint_{S_i} dr' \iint_{S_j} dr f_{p,i} \hat{v}_i \cdot \bar{G}_{ext}(r,r') \hat{v}_j f_{q,j} \\ + \iint_{S_i} dr f_{p,i} \hat{v}_i \cdot H^{PO}(r) & \text{for radiating slots} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

$$Y_{q,j}^{p,i}(int) = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r \cdot$$

$$\iint_{S_i} dr' \iint_{S_j} dr f_{p,i} \hat{v}_i \cdot \bar{G}_{PPW}(r,r') \hat{v}_j f_{q,j} + \iint_{S_i} dr f_{p,i} \hat{v}_i \cdot H_S^{f_{q,j}}(r) \quad (19)$$

در فرمول های فوق $Y_{q,j}^{p,i}(int1)$ و $Y_{q,j}^{p,i}(int2)$ بیانگر عناصر ادمیتانس در نواحی R0 و R1 (شکل ۱) بوده و از لحاظ ریاضی دارای فرم یکسان (۱۹) می باشند.

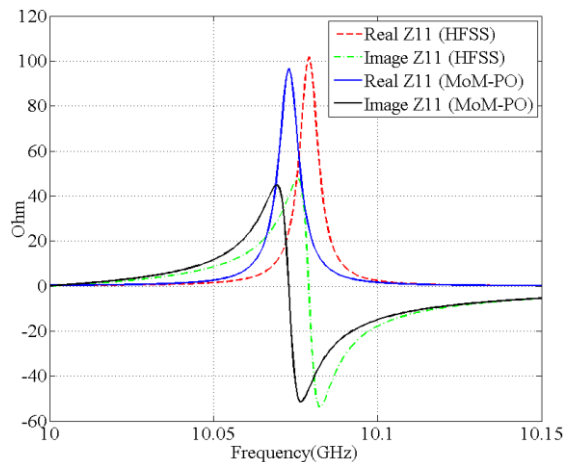
همانطور که قبلا نیز بیان شده بود در این مقاله تنها یک منبع تحریک بشکل کابل هم محور در پایین ترین لایه در نظر گرفته است. بر همین اساس می توان میدان تحریکی کابل هم محور را

جدول ۱: لیست پارامترهای آنتن به همراه مقادیر هر یک از آنها

Parameter	Value (mm)	Parameter	Value (mm)
Lc	27.28	p	1.3
Wc	23.3	d	1
Ls	9	Lr1	6.06
Ws	0.23	Lr2	6.86
dl	4.89	dsc	10.12
asrw	14.41	Xoff	1.27

۳-۱- امیدانس ورودی و الگوی تشعشی

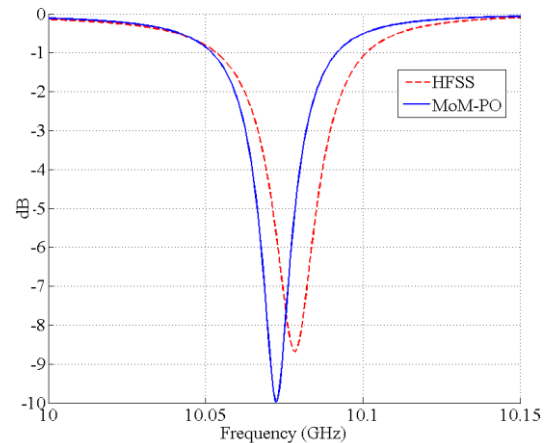
به منظور صحت سنجی روش فوق آنتن شیاری با محفظه پشتی SIW که در [۵] ارائه شده است را در نظر میگیریم. فرض شده است که این آنتن توسط رادومی از جنس تفلون با ضخامت ۵ میلیمتر و با فاصله هوایی ۲۰ میلیمتری از سطح آنتن پوشیده شده است. شکل ۲ شمایی از آنتن به همراه رادوم را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود آنتن شیاری در دولایه که توسط یک شیاری تزویجی به یکدیگر مرتبط شده اند، پیاده سازی شده است. زیر لایه بکار رفته RO4003 با ضخامت ۳۲ میل اینچ و تانژانت تلفات ۰.۰۰۲۷ می باشد. آنتن فوق توسط کابل هم محور در لایه پایینی تغذیه شده است. به منظور تحریک شیاریهای تشعشی که در لایه بالایی آنتن قرار گرفته اند از یک شیاری تزویجی استفاده شده است. شیاریهای تشعشی روی سطح بالایی محفظه تشدید، در لایه بالایی قرار گرفته اند (شکل ۳). تمامی پارامترهای این آنتن در جدول ۱ لیست شده اند. آنتن فوق درون قابی که توسط یک لایه تفلونی پوشانده شده است قرار گرفته است. فاصله میان لایه تفلونی (رادوم) تا سطح آنتن ۲۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است (شکل ۲). بنابراین می توان لایه بیرونی را یک محیط سه لایه عایقی (هوا- تفلون- هوا) فرض نمود و از روش ارائه شده در این مقاله برای تحلیل این ساختار استفاده نمود.



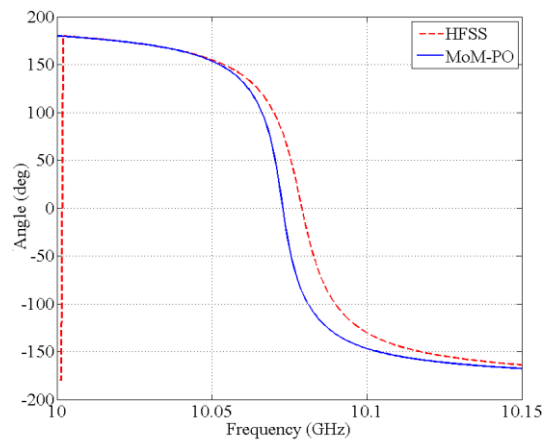
شکل ۵: امیدانس ورودی آنتن شبیه سازی شده با HFSS و روش MoM-PO ارائه شده.

۳-۲- پیاده سازی و صحت سنجی نتایج

به منظور صحت سنجی روش فوق، روش ترکیبی ارائه شده در این مقاله روی آنتن شیاری دولایه با محفظه پشتی SIW که توسط رادومی پوشته ای از جنس تفلون که با یک فاصله هوایی در مقابل آنتن قرار گرفته است، با استفاده از MATLAB پیاده سازی و اجرا شد. نتایج بدست آمده در ادامه ارائه شده است. لازم به ذکر است این نتایج سپس با نتایج حاصل از تحلیل همان ساختار با استفاده از نرم افزار تجاری و تمام موج HFSS مقایسه و صحت سنجی شده است.

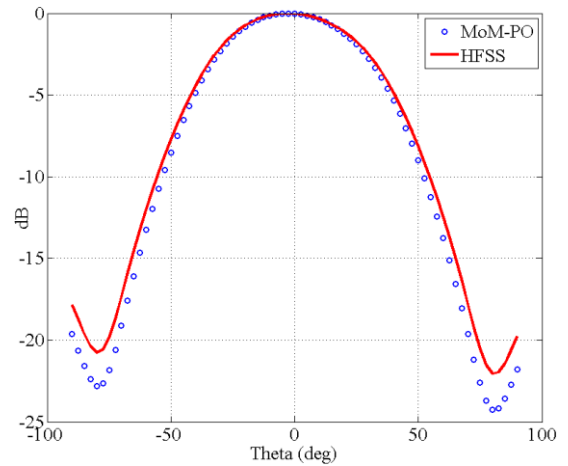


(الف)



(ب)

شکل ۴: تلفات بازگشتی آنتن تحلیل شده با HFSS و روش ارائه شده این مقاله بر حسب فرکانس (الف) اندازه S11 (ب) فاز S11



شکل ۶: الگوی تشعشعی آنتن در صفحه Z-X

جدول ۲ میزان زمان تحلیل مورد نیاز برای تحلیل آنتن شیاری با محفظه پشتی SIW همراه با رادوم نشان می دهد. با مقایسه زمان ها نتیجه می شود که روش ارائه شده در این مقاله نسبت به نرم افزار تجاری HFSS بسیار سریعتر می باشد. این موضوع چنانچه ابعاد سیستم مورد تحلیل در مقایسه با طول موج کاری بزرگ باشد بسیار حادتر می باشد. همچنین جدول ۳ میزان حافظه مورد نیاز را در مقایسه با HFSS نشان داده است. با مقایسه کمیت های جدول ۳ بخوبی می توان ملاحظه کرد که روش ارائه شده در این مقاله از حافظه بسیار کمتری نسبت به HFSS استفاده کرده است. هرچند مقدار حافظه استفاده شده در روش فوق به ابعاد ماتریس وابسته می باشد. ابعاد ماتریس ها نیز علاوه بر تعداد ویاها و شیارها به تعداد مدهای در نظر گرفته شده وابسته اند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد با توجه به اینکه ضخامت زیر لایه معمولا در مقایسه با طول موج اندک است لذا با در نظر گرفتن تعداد کمی مد در جهت Z (معمولا ۳ مد کفایت می کند) می توان به جواب با دقت بالا دست یافت.

شایان ذکر است شبیه سازی های فوق روی رایانه Core i7 با سرعت CPU 3.6GHz و حافظه رم ۱۶ گیگابایت انجام شده است.

جدول ۲: زمان تحلیل آنتن شیاری همراه با رادوم با استفاده از HFSS و روش ارائه شده در این مقاله

Structure type	HFSS CPU time		This paper
	Mesh setup	Freq. point	Freq. point
Antenna without radome	74s	66s	3s
Antenna with radome	89s	80s	5.2s

جدول ۳: مقایسه حافظه استفاده شده برای تحلیل ساختار

Structure type	HFSS	This paper
Antenna without radome	3.01 GB	0.12GB
Antenna with radome	6.29 GB	0.24GB

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روشی تمام موج، تحلیلی و در عین حال سریع به منظور تحلیل ساختارهای SIW چند لایه که در محیطی عایقی و چند لایه تشعشع می کنند ارائه شده است. این روش ترکیبی بر پایه MoM-PO بوده و بر اساس تفکیک حوزه تحلیل به دو بخش فرکانس پایین (ساختار آنتن شیاری SIW) و فرکانس بالا (ساختار رادوم) ارائه شده است. ساختار آنتن بصورت موجبرهای صفحه موازی که بطور متوالی روی هم قرار گرفته و شامل تعداد

میزان برگشتی آنتن بر حسب دسیبل که با روش ارائه شده در این مقاله و HFSS محاسبه شده است. در شکل ۴ (الف) نشان داده شده است. فاز S11 نیز در شکل ۴ (ب) رسم شده است. همانطور که ملاحظه می شود هر دو روش تطبیق بسیار مناسبی داشته و نتایج بسیار به هم نزدیک می باشند. همچنین امپدانس ورودی آنتن نیز با روش ارائه شده در این مقاله و نیز HFSS محاسبه شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. الگوی تشعشعی آنتن در صفحه Z-X در شکل ۶ رسم شده است. (الگوی تشعشعی آنتن در صفحه دیگر هملند صفحه رسم شده می باشد بنابراین از رسم آن صرف نظر شد) با مقایسه این نمودار ها می توان نتیجه گیری کرد که روش تمام موج و تحلیلی ارائه شده در این مقاله دقت بسیار بالایی در مقایسه با سایر روش های عددی تجاری و متداول مانند روش المان محدود بکار رفته در HFSS دارد.

۴- زمان تحلیل و میزان حافظه استفاده شده

در قسمت قبل صحت روش تحلیل و تمام موج ارائه شده در این مقاله با تحلیل یک آنتن شیاری با محفظه پشتی SIW که توسط رادومی پوشته ای پوشش داده شده بود بررسی شد. بدین منظور نتایج حاصل از تحلیل با نتایج بدست آمده از تحلیل همان ساختار با یک نرم افزار تجاری (HFSS) که صحت عملکرد آن ثابت شده است صورت پذیرفت. حال در این بخش به منظور مشخص نمودن هرچه بیشتر مزیت روش فوق نسبت به نرم افزار های تجاری متداول به بررسی زمان تحلیل و میزان حافظه مورد نیاز برای تحلیل آنتن فوق می پردازیم. پر واضح است روش ارائه شده در این مقاله کلی بوده و قابل اعمال به آرایه های بزرگ با تعداد ویاها و شیارهای متعدد و رادام های بزرگ می شود.

که در عبارات فوق k عبارتست از عدد موج در محیط ، k_{zm} عبارتست از عدد موج در جهت z و k_{pm} عبارتست از عدد موج شعاعی.

مراجع

- [1] H.Jin and G. Wen, "A novel four-way Ka-band spatial power combiner based on HMSIW", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 18, No. 8, pp. 515-517, 2008.
- [2] J.-X. Chen, Z.-C. Hao, H. Li and K. Wu, "Development of a low cost microwave mixer using a broadband substrate integrated waveguide (SIW) coupler", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 16, No. 2, pp. 84-86, 2006.
- [3] Y. Cassivi and K. Wu, "Low cost microwave oscillator using substrate integrated waveguide cavity", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 13, No.2, pp. 48-50, 2003.
- [4] L. Yan, W. Hong, G. Hua, J. Chen, K.Wu and T.J. Cui, "Simulation and experiment on SIW slot array antennas", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 14, No. 9, pp. 446-448, 2004.
- [5] R. Bayderkhani, K.Forooraghi and B.Abbasi-arand, "Gain Intensified Slot Antennas Backed by SIW Cavity Using High Order Cavity Resonance ", *International Journal Microwave wireless technologies*, Aug. 2014, to be published.
- [6] M. Kishihara, K. Yamane and I. Ohta, "Analysis of post-wall waveguide by H-plane planar circuit approach", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Honolulu (HA), 2007.
- [7] D. Deslandes, L. Perregini, P. Arcioni, M. Bressan, K. Wu, and G. Conciauro, "Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 12, pp.333-335, Sept. 2002.
- [8] E. Abaei, E. Mehrshahi, G. Amendola, E. Arneri and A. Shamsafar, "Two dimensional multi-port method for analysis of propagation characteristics of substrate integrated waveguide", *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 29, pp. 261-273, 2012.
- [9] E. Arneri and G. Amendola, "Analysis of substrate integrated waveguide structures based on the parallel-plate waveguide Green's function", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 56, pp. 1615-1623, 2008.
- [10] G.Amendola, E. Arneri, and E. Boccla, "Analysis of lossy SIW structures based on the parallel plates waveguide Green's function", *Prog. In Electromagnetics Research C*, Vol. 33, pp. 157-169, 2012.
- [11] E.Arneri and G. Amendola, "Method of moments analysis of slotted substrate integrated waveguide arrays", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, Vol. 59, No.4, pp. 1148-1154, 2011.
- [12] A.Ishimaru, *Electromagnetic wave propagation, radiation, and scattering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.
- [13] R.F. Harrington, *time-harmonic electromagnetic fields*, Wiley-IEEE Press, September 2001.

دلخواهی وایا و شیارهای تشعشی و/یا تزویجی هستند مدل شده است. میدان داخل ساختار SIW بصورت حاصل جمع مدهای برون سو استوانه ای در نظر گرفته شده است. با اعمال شرایط مرزی روی سطوح ویاها، ضرایب پراکندگی ناشی از آنها محاسبه می شوند. این ضرایب با استفاده از تابع گرین دایادیک موجبر دو صفحه موازی محاسبه می شوند. شیارها با استفاده از اصل هم ارزی توسط جریان های مغناطیسی مجهول مدل می شوند. در نهایت این ضرایب با حل معادله انتگرالی ناشی از اعمال شرایط مرزی مناسب روی سطح شیارها بدست می آیند. به منظور صحت سنجی ، آنتن شیاری دو لایه با محفظه پشتی SIW که توسط رادومی عایقی پوشیده شده است، با استفاده از این روش تحلیل و نتایج آن با نتایج بدست آمده از تحلیل HFSS مقایسه شده است. نتایج بیانگر دقت و صحت بسیار بالای روش مذکور می باشد.

ضمیمه الف

فرمول مربوط به تابع گرین دایادیک موجبر دو صفحه موازی عبارتست از:

$$\begin{aligned} \bar{G}_{ppw}(r, r') &= -\frac{1}{k^2} \hat{z} \hat{z} \delta(r - r') - j \sum_m \left(1 - \frac{\delta_{m0}}{2}\right) \frac{1}{2k_{pm}^2 h} \\ &[(\nabla \times \hat{z})(\nabla \times \hat{z}) H_0^{(2)}(k_{pm}|\rho - \rho')| f_c(k_{zm}, z, z')] \quad (A.1) \\ &+ \frac{1}{k^2} (\nabla \times \nabla \times \hat{z})(\nabla \times \nabla \times \hat{z}) H_0^{(2)} \\ &.(k_{pm}|\rho - \rho')| f_s(k_{zm}, z, z')] \end{aligned}$$

که در فرمول فوق داریم:

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon_0 \epsilon}$$

$$k_{zm} = m\pi/h$$

$$k_{pm} = \sqrt{k^2 - k_{zm}^2}$$

$$\delta_{m0} = \begin{cases} 1 & \text{for } m = 0 \\ 0 & \text{for } m \neq 0 \end{cases}$$

$$f_{c,s} = \begin{cases} \cos(k_{zm}z) \cos(k_{zm}z') \\ \sin(k_{zm}z) \sin(k_{zm}z') \end{cases}$$