

طراحی آنتن موج نشتی متناوب دندانهای تمام فلزی با عمق ثابت و پهنای دندان

متغیر در باند فرکانسی X

یعقوب قانع قره‌باغ^۱، مجید اخوت^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۸/۰۸/۱۲، پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۱)

چکیده

در این مقاله به نحوه ایجاد امپدانس سطحی مصنوعی در آنتن موج نشتی می‌پردازیم. موضوع اصلی مقاله نحوه محاسبه و ایجاد امپدانس سطحی در آنتن موج نشتی متناوب دندانهای تمام فلزی با عمق ثابت و پهنای دندان متغیر است. نتیجه حاصل از طراحی آنتن موج نشتی متناوب دندانهای عمق ثابت و پهنای دندان متغیر پیشنهادی، معرفی آنتنی است که به روش مدولاسیون امپدانس سطحی قادر به انتشار موج در راستای مورد نظر (در این مقاله 30° درجه) است. همچنین با توجه به نوع ساختار آنتن موج نشتی که امکان تشعشع به‌طور هم‌زمان در چند مد و در نتیجه در چند جهت را دارد روش انتشار به‌صورت تک‌مد و تک‌جهت نیز ارائه گردیده است. همچنین با توجه به قابلیت چرخش پرتو با تغییر فرکانس کار آنتن، چرخش پرتو آنتن موج نشتی پیشنهادی با تغییر فرکانس نیز بررسی شده است. با تغییر فرکانس از ۸ الی ۱۰ گیگاهرتز، پرتو آنتن از 5° تا 30° خواهد چرخید.

کلیدواژه‌ها: امپدانس سطحی، چرخش پرتو، آنتن موج نشتی، ساختار دندانهای، جاروب فرکانس

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر ایده چرخش پرتو بدون استفاده از شیفت دهنده‌های فاز و با آنتن‌های سبک، ساده، مسطح و قابل نصب بر روی سطوح متفاوت مورد توجه قرار گرفته‌اند. به این منظور آنتن‌های موج نشتی که توانایی انتشار موج از سطح آنها در زاویه مورد نظر را دارند مطرح شده‌اند. ایده انتشار موج الکترومغناطیسی از سطح دارای امپدانس با مدولاسیون سینوسی را آقای اولینر در سال ۱۹۵۹ مطرح نمودند [۱].

آقای لی در فصل ۱۷ کتاب خود به معرفی این نوع آنتن پرداخته [۲] و پس از سال ۲۰۰۰ علاقه‌مندی به این نوع آنتن افزایش یافته و کتاب‌ها [۳-۴] و مقالات متعددی مانند مراجع [۵-۱۱] در حوزه آنتن‌های موج نشتی منتشر شده‌اند. در [۵ و ۹] امپدانس آنتن توسط کنترل ظرفیت خازن متغیر، در [۱۰ و ۶] آنتن با ساختار میکرواستریپی، در [۸] آنتن دندانهای با عمق متغیر و پهنای دندان ثابت و در [۱۱] آنتن شکافدار معرفی و بررسی شده‌اند. با توجه به ساختار آنتن‌های موج نشتی، چرخش پرتو آنتن علاوه بر تغییر فرکانس توسط کنترل

امپدانس سطحی نیز امکان‌پذیر خواهد بود.

کنترل مدولاسیون امپدانس سطحی در آنتن‌های موج نشتی، یکی از روش‌های مورد استفاده به‌منظور ایجاد قابلیت انتشار موج از سطح آنتن به فضای آزاد در زاویه انتشار دلخواه است. در این مقاله نحوه محاسبه و ایجاد امپدانس سطحی آنتن موج نشتی متناوب دندانهای با عمق ثابت و پهنای دندان متغیر به‌منظور تشعشع پرتو در زاویه مورد نظر و همچنین چرخش پرتو آنتن به‌وسیله تغییر فرکانس را بررسی خواهیم کرد.

در [۱۲] آنتن دندانهای با قابلیت ایجاد پرتو در راستای عمود بر آنتن معرفی شده و در [۱۳] مدهای انتشاری امپدانس سطحی معرفی شده است. کنترل امپدانس سطحی دارای کاربردهای متنوع دیگری است که به‌عنوان مثال در [۱۴] از ساختارهای متناوب یک‌بعدی مبتنی بر گرافین استفاده شده است.

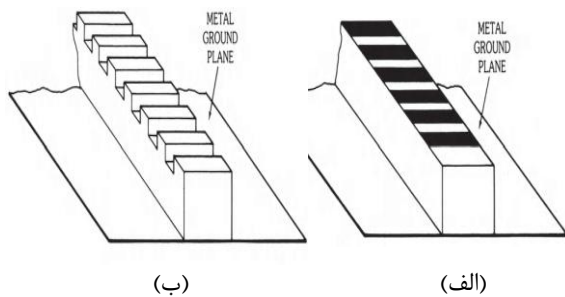
۲. آنتن موج نشتی

آنتن‌های موج نشتی، آنتن‌هایی هستند که تشعشع آنها ناشی از نشت میدان‌ها از سطح، شیار یا روزنه روی آنتن بوده و در حالت کلی آنتن‌های موج نشتی را می‌توان به دو دسته یکنواخت یا موج سریع و متناوب یا موج آهسته دسته‌بندی نمود. در آنتن‌های موج

شود. یکی از مهم‌ترین مزایای آنتن‌های موج نشستی متناوب، قابلیت تشعشع در هر سه ناحیه ربع جلو، پشت^۲ و عمود بر محور^۳ می‌باشد.

در آنتن‌های موج نشستی متناوب، سرعت فاز نسبت به سرعت نور در هارمونیک اصلی کمتر می‌باشد. برای اینکه آنتن موج نشستی تشعشع کند بایستی سرعت فاز آن از سرعت نور بیشتر شود. به بیان ساده‌تر بایستی $\beta < k_0$ باشد. اما در ساختارهایی که موج سطحی^۴ در آنها انتشار می‌یابند، موج به‌صورت آهسته یا به عبارتی $\beta > k_0$ است. بنابراین، ساختار نمی‌تواند تشعشع کند. پس برای اینکه چنین ساختارهایی قابلیت تشعشع داشته باشند بایستی مدهایی دیگر به نحوی در ساختار تحریک شوند تا شرایط تشعشع فراهم گردد. ایجاد مدهای مناسب تحریک می‌تواند توسط ناپیوستگی‌های متناوب در ساختار ایجاد می‌شود. به این مدها، هارمونیک‌های فضایی فلوکه گفته می‌شود.

در شکل (۳) دو ساختار متناوب موج نشستی نشان داده شده است. در یکی از ساختارها، ناپیوستگی‌ها به‌وسیله وصله^۵ در آنتن‌های میکرواستریپی و در دیگری به‌وسیله ایجاد شیار به وجود آمده‌اند تا شرایط مورد نظر جهت انتشار موج حاصل شود [۲].



شکل (۳): دو نمونه آنتن موج نشستی متناوب [۲].
الف) میکرواستریپ ب) دندانه‌ای

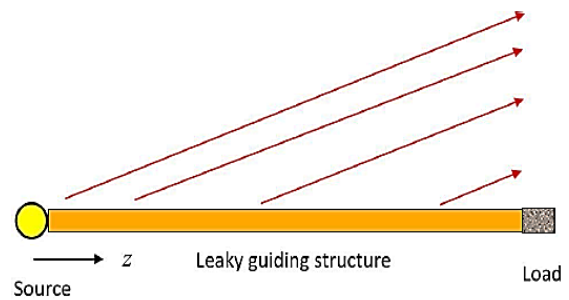
در صورتی که ساختار را طوری طراحی کنیم که دارای امپدانس سطحی با دوره تناوب a باشد، هارمونیک‌های ثابت انتشار به‌صورت

$$\beta_n = \beta_0 + \frac{2n\pi}{a} \quad (1)$$

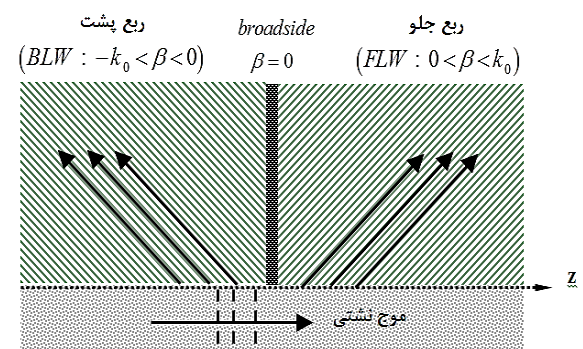
خواهد شد که β_0 هارمونیک فضایی پایه می‌باشد [۱]. حال شرط تشعشع برای این ساختار $|\beta_n| < k_0$ خواهد بود که با در نظر

سریع سرعت فاز موج از سرعت نور بیشتر است، بنابراین، ساختار می‌تواند همانند آنتن‌های موج متحرک تشعشع کند. عدد موج در راستای انتشار $(k_z = \beta - j\alpha)$ این ساختارها مختلط است. در آنتن‌های موج نشستی متناوب، موج هدایت‌شده از نوع موج آهسته است، بدین مفهوم که سرعت فاز در موج هدایت‌شده از سرعت نور در فضای آزاد کمتر است. امواج آهسته ذاتاً غیر انتشاری هستند و انتشار فقط در ناپیوستگی‌های موجود در ساختار در برگیرنده آنها (معمولاً در محل تغذیه آنتن و در انتهای آنتن در محل ختم شدگی) رخ می‌دهد. عدد موج انتشار در این امواج با صرف نظر از تلف هادی و دیگر تلف‌ها یک عدد حقیقی است [۳].

در شکل (۱) نحوه تغذیه و تشعشع آنتن موج نشستی یکنواخت یا متناوب و در شکل (۲) نواحی مختلف قابل انتشار در آنتن‌های موج نشستی نشان داده شده است. در این مقاله ما به طراحی گونه‌ای از آنتن‌های موج نشستی متناوب یا موج آهسته خواهیم پرداخت.



شکل (۱): نحوه تغذیه و تشعشع آنتن موج نشستی یکنواخت یا متناوب [۳].



شکل (۲): نواحی مختلف قابل انتشار در آنتن موج نشستی [۳].

آنتن‌های موج نشستی که بر پایه موج سریع طراحی می‌شوند، تشعشع آنها فقط در ربع جلو^۱ خواهد بود. ولی در صورتی که آنتن موج نشستی بر پایه موج آهسته طراحی شود، آنگاه بایستی از ساختارهای متناوب در طول مسیر انتشار استفاده شود تا مد انتشاری دیگری که شرط تشعشع را ارضاء کند در آنتن تحریک

^۲ Backward Leaky-Wave

^۳ Broadside

^۴ Surface Wave

^۵ Patch

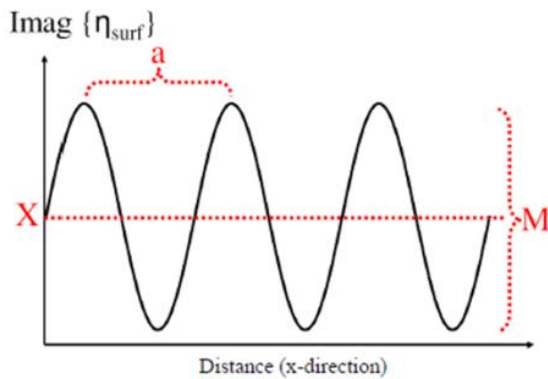
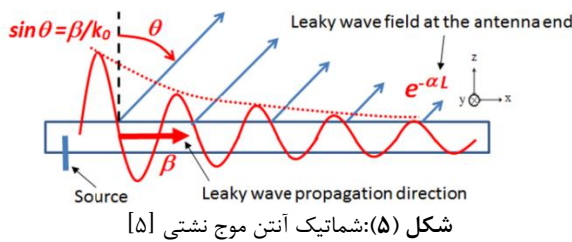
^۱ Forward Leaky-Wave

موج سیگنال انتشاری از آنتن است. این مقادیر در شکل (۶) نشان داده شده‌اند [۶].

$$\eta_{surf}(x) = j\eta_0 X' \left[1 + M \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \right] \quad (4)$$

$$X = \eta_0 X'$$

با توجه به این که امپدانس آنتن موج نشستی دندانه‌ای به صورت سلفی است بنابراین، دارای مد TM است [۱۳].



با فرض اینکه ساختار در راستای y انتشار ندارد، $k_y = 0$ می‌باشد. بنابراین، رابطه ثابت‌های انتشار $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k_0^2$ تبدیل به $k_x^2 + k_z^2 = k_0^2$ می‌شود. با توجه به متناوب بودن ساختار آنتن $k_{zn} = k + 2n\pi/a$ بوده و خواهیم داشت:

$$k_{zn}^2 + k_x^2 = k_0^2 \Rightarrow k_{zn} = \sqrt{k_0^2 - \left(k + \frac{2n\pi}{a}\right)^2} \quad (5)$$

با در نظر گرفتن شرط انتشار و اجرای شرط مرزی روی سطح امپدانس، رابطه غیرخطی ۶ حاصل می‌شود که پارامترهای به کاررفته در جملات همان پارامترهای معادلات ۱، ۴ و ۵ است [۱]. این رابطه یک سری نامتناهی از حل رابطه $I_{n+1} + D_n I_n + I_{n-1} = 0$ است. همان طور که ملاحظه می‌گردد این رابطه بر حسب k بوده و لذا به کمک آن می‌توان مقدار k را به دست آورد. در صورتی که k تعیین شود، ثابت انتشار همه مدهای ساختار با $k_{zn} = k + 2n\pi/a$ به دست آمده و در نتیجه $\alpha = \text{Image}(k)$ و $\beta = \text{Real}(k) + 2n\pi/a$ خواهند بود و با

گرفتن $n < 0$ می‌توان شرط تشعشع را در این ساختارها تحقق داد. به ازای مقادیر مختلف n ، مدهای مختلف تشعشعی ایجاد می‌گردد که مد اصلی آن به ازای $n = -1$ است. معمولاً در طراحی آنتن‌های موج نشستی متناوب، طراحی ساختار طوری صورت می‌پذیرد که به ازای $n = -1$ شرط تشعشع به صورت زیر ارضاء می‌شود.

$$|\beta_{-1}| = \left| \beta_0 - \frac{2\pi}{a} \right| < k_0 \quad (2)$$

با توجه به شکل (۴)، در این شرایط زاویه تشعشعی پرتو آنتن با رابطه ۳ محاسبه خواهد شد.

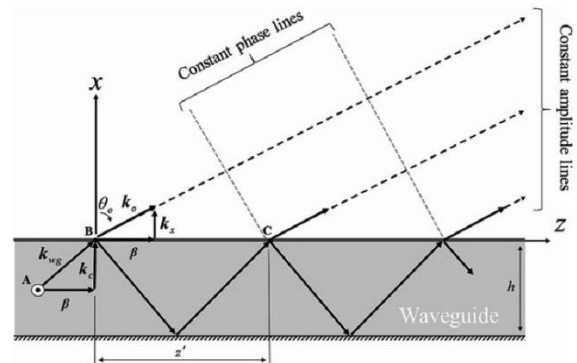
$$\sin(\theta_0) = \frac{\beta}{k_0} \approx \frac{\beta_{-1}}{k_0} = \frac{\beta_0}{k_0} - \frac{2\pi}{k_0 a} \quad (3)$$

برای آنتن‌های موج نشستی چهار حالت رخ می‌دهد (شکل ۲): الف) $-k_0 < \beta_{-1} < 0$ که منجر به تشعشع در ربع پشت می‌شود.

ب) $\beta_{-1} \approx 0$ که منجر به تشعشع در راستای عمود بر محور آنتن می‌شود. در این حالت انتشار در سطح آنتن به صورت موج ایستا خواهد شد.

ج) $0 < \beta_{-1} < k_0$ که منجر به تشعشع در ربع جلو می‌شود.

د) $|\beta_{-1}| > k_0$ که آنتن تشعشعی نخواهد داشت.



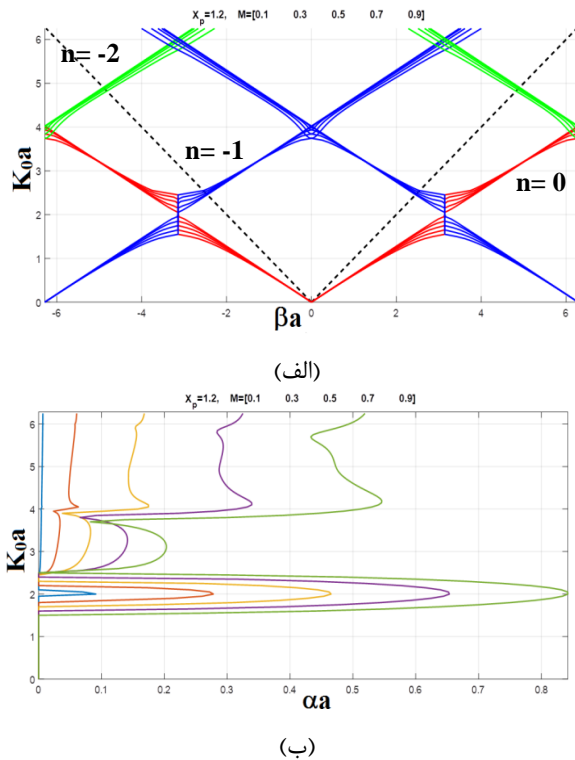
شکل (۴): زاویه تشعشعی پرتو آنتن موج نشستی [۴].

۳. امپدانس سطحی آنتن موج نشستی

با توجه به شکل (۵) فرض بر این است که موج سطحی در راستای محور y انتشار ندارد و به دلیل نوع انتشار موج که به صورت سینوسی است، می‌توان امپدانس سطح در راستای محور x را به صورت سینوسی و دارای دوره تناوب a فرض کرد [۵]. بنابراین، ثابت انتشار به صورت $k_x = \beta - j\alpha$ خواهد بود.

رابطه غیر همگن امپدانس سطحی به صورت رابطه (۴) بوده که در آن X' مقدار ثابت راکتانس سطح، M ضریب مدولاسیون دامنه و a دوره تناوب سطح امپدانس است که تقریباً برابر طول

همان‌طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود هر چقدر M بزرگ‌تر باشد مقدار α بزرگ‌تر و در نتیجه موج در طول آنتن سریع‌تر تشعشع می‌کند و لذا در عمل طول مؤثر آنتن کوچک‌تر شده، بنابراین، پهنای پرتو بیشتر و بهره آنتن کمتر خواهد بود. در نتیجه M یک درجه آزادی جهت کنترل پهنای پرتو و بهره آنتن خواهد بود.



شکل (۸): نتیجه حل عددی رابطه (۶) به ازاء تغییر M الف) k_0a بر حسب βa ب) k_0a بر حسب αa

با فرض $X' = 1.2$ و $M = 0.2$ ابتدا به کمک رابطه (۶) مقدار $ka = \beta a - j\alpha a$ را بر حسب k_0a محاسبه نموده و نتیجه را در شکل (۹-الف و ب) نشان داده‌ایم. سپس به کمک مقادیر βa و k_0a و با استفاده از رابطه (۳) برای مدهای ۱، ۲ و ۳ تغییرات θ بر حسب k_0a را به دست آورده و آن را در شکل (۹-ج) نشان داده‌ایم. با توجه به قسمت ج شکل (۹) متوجه می‌شویم که با انتخاب k_0a از ۲/۵ تا ۴/۹ فقط یک پرتو واحد با قابلیت چرخش از زاویه $90^\circ -$ تا $17^\circ +$ را خواهیم داشت در حالی که با انتخاب k_0a از ۴/۹ تا ۷/۲ مد ۲ و ۱ به‌طور هم‌زمان تحریک شده و پرتو دیگری هم‌زمان با پرتو مد اول ظاهر می‌شود. با انتخاب k_0a از ۷/۲ به بالا مدهای دیگری علاوه بر مدهای ۱ و ۲ به‌طور هم‌زمان تحریک خواهند شد.

توجه به رابطه (۵) می‌توان k_{zn} را نیز تعیین نمود. رابطه (۶) را می‌بایست به کمک روش‌های عددی حل نمود.

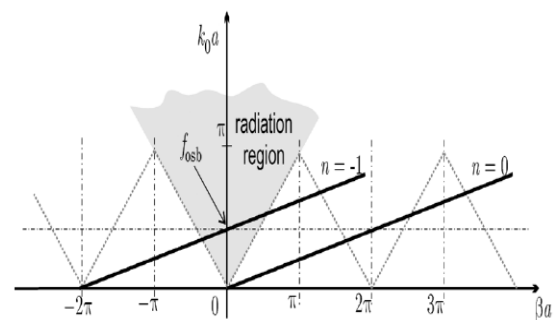
در شکل (۷) نمودار کلی دیاگرام بریلوئین (منحنی k_0a بر حسب βa) یک ساختار متناوب نشان داده شده است. در ناحیه خاکستری رنگ امواج سطحی به امواج نشتی تبدیل می‌شوند و تشعشع در ساختار رخ می‌دهد و در خارج از این ناحیه تشعشع صورت نمی‌پذیرد [۷]. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌کنید مد $n = -1$ قابلیت انتشار را در ناحیه خاکستری دارا است ولی به ازای $n = 0$ تشعشع نخواهیم داشت.

$$1 - \frac{j}{X'} \sqrt{1 - \left[\frac{\kappa}{k_0} + \frac{2\pi n}{k_0 a} \right]^2} = \frac{M^2 / 4}{\left| 1 - \frac{j}{X'} \sqrt{1 - \left[\frac{\kappa}{k_0} + \frac{2\pi(n-1)}{k_0 a} \right]^2} \right|^2} - \dots$$

$$\frac{M^2 / 4}{\left| 1 - \frac{j}{X'} \sqrt{1 - \left[\frac{\kappa}{k_0} + \frac{2\pi(n-2)}{k_0 a} \right]^2} \right|^2} - \dots$$

$$+ \frac{M^2 / 4}{\left| 1 - \frac{j}{X'} \sqrt{1 - \left[\frac{\kappa}{k_0} + \frac{2\pi(n+1)}{k_0 a} \right]^2} \right|^2} - \dots$$

$$\frac{M^2 / 4}{\left| 1 - \frac{j}{X'} \sqrt{1 - \left[\frac{\kappa}{k_0} + \frac{2\pi(n+2)}{k_0 a} \right]^2} \right|^2} - \dots$$



شکل (۷): منحنی بریلوئین برای ساختار متناوب [۷].

حداکثر امپدانس سطح آنتن طبق رابطه (۴) برابر $j\eta_0 X'(1+M)$ و حداقل امپدانس سطحی آنتن هم برابر $j\eta_0 X'(1-M)$ خواهد بود. بنابراین، برای داشتن مدولاسیون سینوسی در امپدانس سطحی $0 < M \leq 1$ و $X' > 0$ هم باید طوری انتخاب شود که امپدانس توسط ساختارهای معرفی شده قابل دست‌یابی باشد. در شکل (۸) نتیجه حل عددی رابطه (۶) با فرض $X' = 1.2$ و تغییر مقدار M از ۰/۱ تا ۰/۹ برای قسمت‌های حقیقی و موهومی k نشان داده شده است.

پرتوهای قابل توجه در زوایای دیگر ناشی از مدهای تشعشی آنتن موج نشستی خواهیم داشت که متناسب با نیاز طراح می‌تواند مطلوب یا نامطلوب باشد.

البته وجود پرتوهایی غیر از پرتو اصلی، علاوه بر این که ناحیه تحت پوشش آنتن را تغییر می‌دهند، باعث افت بهره پرتو اصلی آنتن نیز خواهند شد. وجود پرتو دیگری غیر از پرتو اصلی در کاربردهای راداری مطلوب نیست لیکن در لینک‌های رادیو-تلویزیونی ماهواره‌ای و زمینی ممکن است دارای کاربرد باشد.

بنابراین، با انتخاب X' و M و حل رابطه (۶)، نمودار زاویه تشعشع آنتن به دست آمده و با انتخاب زاویه تشعشع مطلوب در فرکانس مورد نظر، مقدار a معلوم و تعداد مدهای تحریک شده به همراه زاویه تشعشع مد مربوطه نیز مشخص خواهد شد.

در این مرحله برای ایجاد امپدانس سطحی با مدولاسیون سینوسی باید دوره تناوب a را با توجه به محدودیت‌های فناوری ساخت به N قسمت کوچک‌تر و مساوی یا همان سلول واحد^۱ ($p = a/N$) تقسیم کنیم. هرچه N بزرگ‌تری را انتخاب کنیم تعداد نمونه‌ها برای ایجاد شکل سینوسی بیشتر و تغییرات امپدانس سطحی مورد نظر به سینوسی نزدیک‌تر خواهد شد. البته مشروط به این که قابل ساخت هم باشد.

۴. امپدانس سلول واحد و دوره تناوب

نمودار امپدانس سطحی آنتن با استفاده از رابطه (۴) و با فرض $X' = 1.2$ و $M = 0.2$ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. اگر تغییرات امپدانس آنتن در یک پریود را بخواهیم با N واحد امپدانس مجزا ایجاد نماییم از این منحنی مقادیر امپدانس سطحی N نمونه را تعیین و سپس به طراحی آنها برای داشتن امپدانس‌های مورد نظر می‌پردازیم.

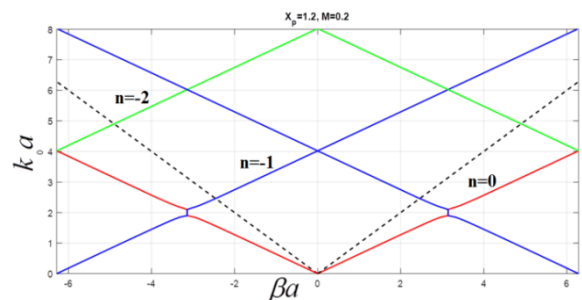
در ادامه با قرار دادن این قسمت‌ها کنار یکدیگر یک پریود امپدانس سطحی آنتن را ایجاد می‌نماییم. واضح است که هر چه تعداد N را بزرگ‌تر انتخاب کنیم دقت کار بیشتر ولی طراحی و ساخت سنبه‌رتر می‌گردد. در شکل (۱۰) مقدار $N = 10$ انتخاب شده، نمودار امپدانس سطحی آنتن در راستای X به ۱۰ قسمت مساوی تقسیم و امپدانس هر سلول واحد معلوم می‌شود.

نحوه ایجاد امپدانس هر سلول واحد، بر اساس محاسبه میزان اختلاف فاز ایجاد شده مورد نیاز سلول واحد در فرکانس مورد نظر و با استفاده از رابطه (۸) خواهد بود [۵].

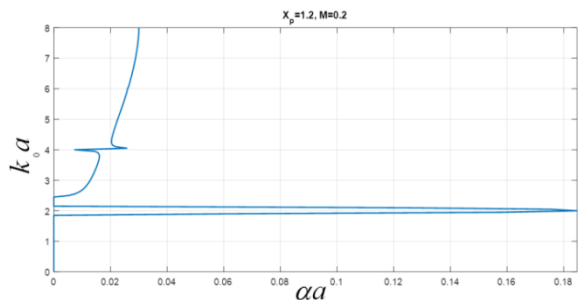
در مرجع [۶] با فرض $X' = 1.2$ و $M = 0.2$ و به منظور داشتن پرتو در زاویه $+30^\circ$ در فرکانس 10 GHz مقدار $k_0 a = 5.917$ و در نتیجه $a = 28.25 \text{ mm}$ به دست می‌آید. این اعداد با توجه به قسمت ج شکل (۹) باعث ایجاد دو پرتو هم‌زمان (مد ۱ در زاویه $+30^\circ$ و مد ۲ در -34°) می‌گردد.

زاویه تابش پرتو آنتن موج نشستی در مدهای متفاوت، از رابطه (۷) قابل محاسبه است [۶].

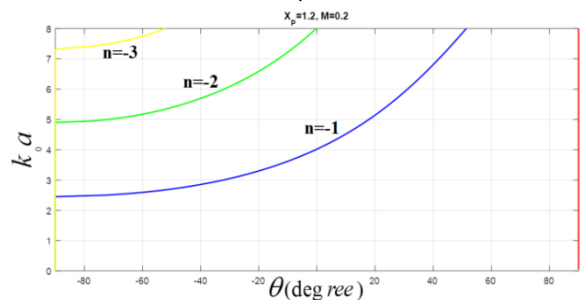
$$\theta_n = \arcsin\left(\frac{\beta a + 2\pi n}{k_0 a}\right) \quad n = -1, -2, \dots \quad (7)$$



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۹): نتیجه حل عددی رابطه ۶ به ازاء $X' = 1.2$ و $M = 0.2$ (الف) $k_0 a$ بر حسب βa (ب) $k_0 a$ بر حسب αa (ج) $k_0 a$ بر حسب θ همچنان که در رابطه (۲) و شکل‌های (۶) و (۸) نشان داده شده، مد غالب به شرط $n = -1$ به وجود می‌آید و مدهای دیگر ($n = -2, -3, \dots$) به عنوان مدهای ناخواسته تشعشع خواهند نمود، باید این موضوع در حل عددی رابطه (۶) بسیار مورد توجه قرار گیرد. اگر در انتخاب $k_0 a$ به این موضوع دقت نشود، پرتو یا

^۱ Unit Cell

با توجه به این که در این ساختار ۲ پارامتر متغیر فاصله هوایی (G) و عمق (h) را در اختیار داریم، می‌توانیم یکی را ثابت فرض نموده و با تغییر پارامتر بعدی اختلاف فاز مورد نظر را به دست آوریم. به منظور داشتن پرتو در زاویه 30° در فرکانس 10GHz مقدار $k_0 a = 5.917$ و در نتیجه $a = 28.25\text{mm}$ به دست آمد و با فرض $N=10$ مقدار ابعاد هر سلول واحد $p=2.825\text{mm}$ خواهد بود.

۵-۱. ساختار دندانهای با عمق متغیر و پهنای دندانها

ثابت

سلولهای واحد مطابق شکل (۱۱) ایجاد شده و با توجه به امپدانس معلوم هر سلول که از شکل (۱۰) به دست آمده و با استفاده از رابطه (۸) اختلاف فاز مورد نیاز ($\Delta\phi$) محاسبه می‌شود.

با ثابت فرض نمودن فاصله هوایی $G=2\text{mm}$ ، عمق شیارهای عناصر واحد را طوری تعیین می‌کنیم تا اختلاف فاز مورد نیاز به دست آید. به این منظور از تحلیل مد ویژه در نرم‌افزار HFSS استفاده می‌کنیم. البته برای محاسبه عمق سلول واحد از رابطه (۹) نیز می‌توان استفاده کرد [۸].

$$h = \frac{1}{k_0} \arctan\left(\frac{\eta_{surf} \cdot p}{\eta_0 \cdot G}\right) \quad (9)$$

$$p = W + G$$

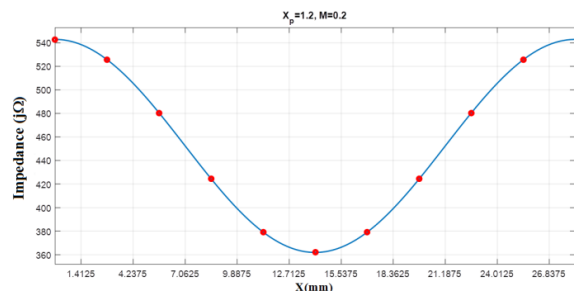
مقادیر محاسبه شده در جدول (۱) آورده شده است. با توجه به اعداد به دست آمده در جدول (۱)، یک دوره تناوب ساختار دندانهای در شکل (۱۲) از دو نما و به صورت ۱۰ سلول واحد و همچنین یک دوره تناوب یکپارچه ارائه گردیده است. همچنین که از شکل دیده می‌شود امپدانس سطح با مدولاسیون سینوسی در ظاهر فیزیکی آنتن نیز قابل مشاهده است.

جدول (۱): نتیجه محاسبات ساختار دندانهای با عمق متغیر

$$W = 0.825\text{mm}, G = 2\text{mm}$$

Unit Cell No.	Impedance (jΩ)	$\Delta\phi^\circ$	h(mm)
۱	۵۴۲/۸۷	۵۹/۴۳	۵/۳۲
۲	۵۲۵/۵۹	۵۸/۱۶	۵/۲۶
۳	۴۸۰/۳۵	۵۴/۹۱	۵/۰۸
۴	۴۲۴/۴۳	۵۱/۰۵	۴/۸۲
۵	۳۷۹/۱۹	۴۸/۰۸	۴/۵۷
۶	۳۶۱/۹۱	۴۶/۹۹	۴/۴۷
۷	۳۷۹/۱۹	۴۸/۰۸	۴/۵۷
۸	۴۲۴/۴۳	۵۱/۰۵	۴/۸۲
۹	۴۸۰/۳۵	۵۴/۹۱	۵/۰۸
۱۰	۵۲۵/۵۹	۵۸/۱۶	۵/۲۶

$$\Delta\phi = k_0 p \sqrt{\left(\frac{\eta_{surf}}{\eta_0}\right)^2 + 1} \quad (8)$$



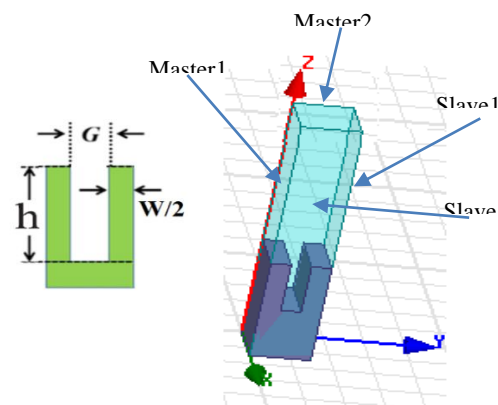
شکل (۱۰): نمودار امپدانس سطحی مورد نیاز در هر سلول واحد

در رابطه (۸)، p طول سلول واحد است. در حالت تحلیل مد ویژه^۱ در نرم‌افزار HFSS ساختار سلول واحد تحریک شده و اختلاف فاز مورد نیاز با تغییر ابعاد فیزیکی ساختار انتخاب شده به دست می‌آید. با استفاده از ابعاد فیزیکی به دست آمده هر یک از سلولهای واحد و کنار هم قرار دادن آنها در ساختار انتخاب شده آنتن موج نشتی، یک دوره تناوب آنتن معلوم خواهد شد.

ابتدا یک نمونه از آنتن موج نشتی دندانهای با عمق متغیر و پهنای دندانها ثابت طراحی و شبیه‌سازی شده و سپس آنتن موج نشتی دندانهای با عمق ثابت و پهنای دندانها متغیر پیشنهادی خود را با همان روش ذکر شده در قبل طراحی و نتیجه عملکرد این دو را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم.

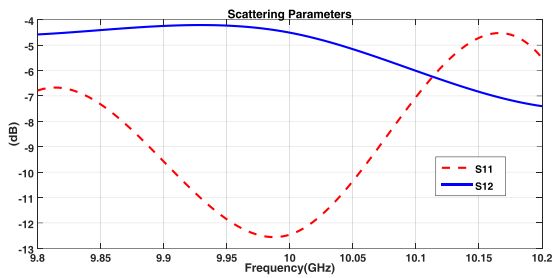
۵. ساختار دندانهای

ساختار دندانهای از کنار هم قرار دادن تعدادی واحد فلزی که در آنها شیار به عمق h و فاصله هوایی G ایجاد شده تشکیل یافته است (مطابق شکل ۱۱). البته این واحدها در تحلیل و شبیه‌سازی مستقل از یکدیگر هستند ولی در مرحله ساخت آنتن به صورت یکپارچه ساخته می‌شوند.

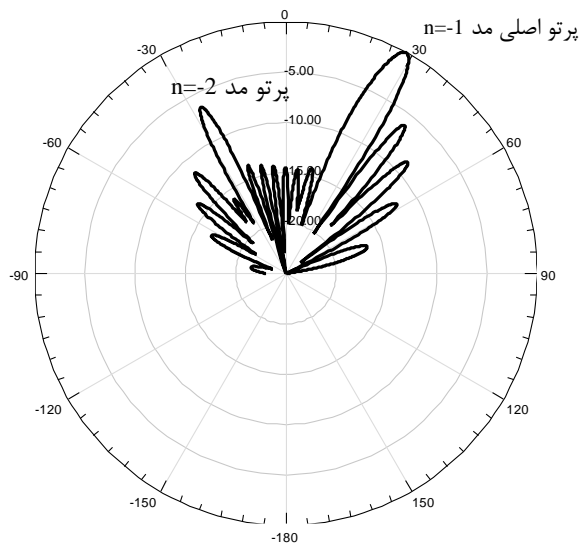


شکل (۱۱): سلول واحد ساختار دندانهای

^۱ Eigen Mode



شکل (۱۵): نمودار S11 و S21 ساختار دندانه‌ای عمق متغیر



شکل (۱۶): نمودار الگوی تشعشعی ساختار دندانه‌ای عمق متغیر

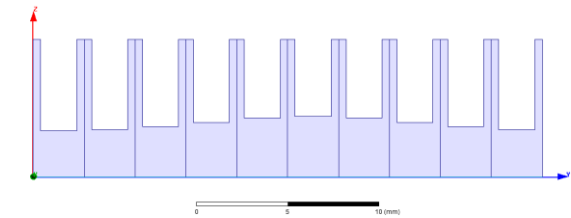
۵-۲. ساختار دندانه‌ای با عمق ثابت و پهناهای دندانه

متغیر پیشنهادی

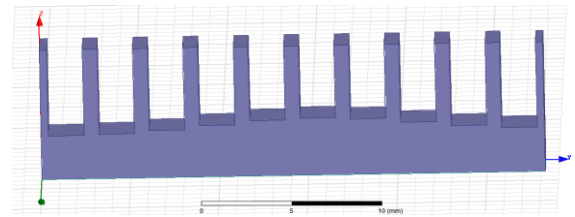
ساختار پیشنهادی این مقاله بر اساس روش جدید مبتنی بر ساختار دندانه‌ای با عمق ثابت و پهناهای دندانه متغیر ارائه گردیده که در این حالت امپدانس مورد نظر به جای تغییرات عمق شکاف با تغییر عرض شکاف به دست آمده است. همانند روال توضیح داده شده در مرحله قبل، به محاسبه ابعاد آنتن پیشنهادی می‌پردازیم.

نتیجه محاسبه این نوع ساختار با عمق ثابت ۵ mm در جدول (۲) و شکل (۱۷) نشان داده شده است. برای محاسبه عرض شکاف سلول واحد از رابطه (۱۰) نیز می‌توان استفاده کرد [۸]. همچنان که از رابطه (۱۰) ملاحظه می‌شود، عرض شکاف بیشتر متناسب با امپدانس سطحی بیشتر و عرض شکاف کمتر دارای امپدانس سطحی کمتر است. این موضوع در ساختار قبلی، با عمق سلول واحد مرتبط بود به این صورت که امپدانس سطحی

با کنار هم قراردادن ۱۰ دوره تناوب، ساختار آنتن نهایی ایجاد می‌شود که در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن شرایط مرزی و تحریک ساختار آنتن موج نشستی نهایی توسط موج‌بری که فاقد دیواره‌های جانبی است و به دلیل مد انتشاری TEM می‌تواند آنتن را تحریک نماید [۸]، نمودار توزیع میدان الکتریکی در شکل (۱۴)، نمودار S11 و S21 در شکل ۱۵ و الگوی تشعشعی آنتن موج نشستی با ساختار دندانه‌ای با عمق متغیر در شکل (۱۶) نشان داده شده است. در این حالت $S_{11} = -12.5dB$ و $S_{21} = -4.5dB$ است. دلیل رسیدن توان زیاد به پورت دوم کم بودن مقدار α است که باید آنتن را طولانی‌تر کنیم. دلیل انتخاب طول کمتر آنتن، امکان شبیه‌سازی است.



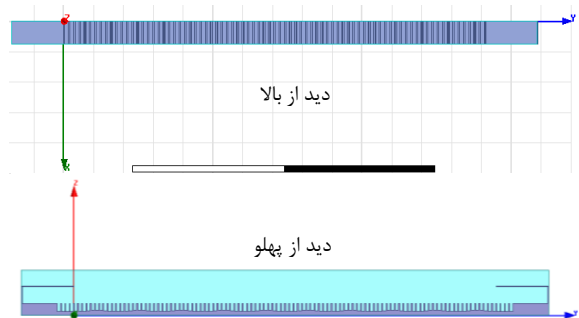
(الف)



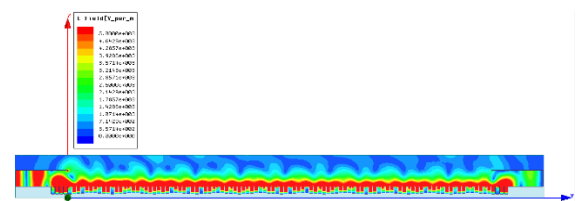
(ب)

شکل (۱۲): یک دوره تناوب ساختار دندانه‌ای با عمق متغیر

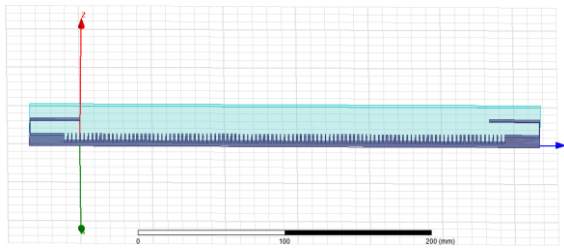
(الف) با ۱۰ سلول واحد (ب) یکپارچه



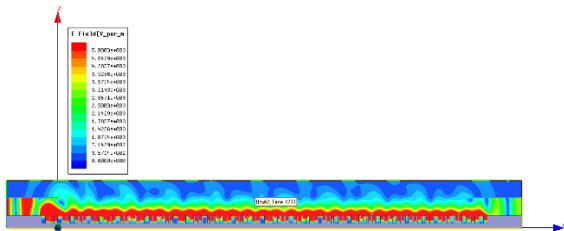
شکل (۱۳): ساختار نهایی آنتن موج نشستی دندانه‌ای با عمق متغیر



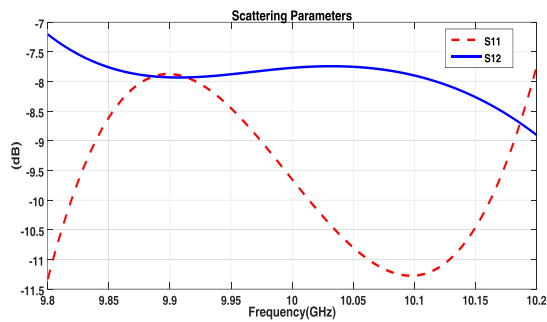
شکل (۱۴): نمودار توزیع میدان الکتریکی ساختار دندانه‌ای عمق متغیر



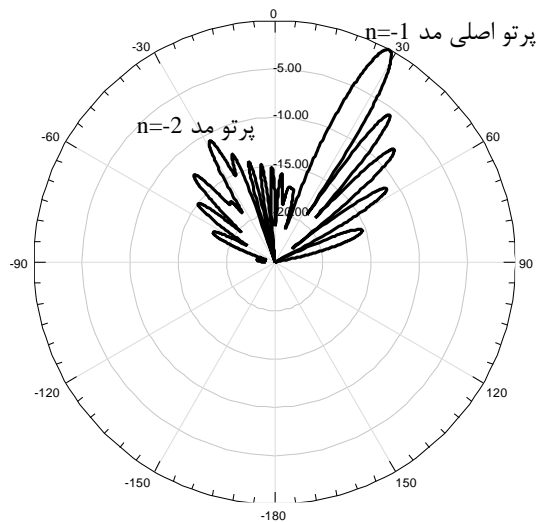
شکل (۱۸): ساختار نهایی آنتن موج نشستی دندانه‌ای با عمق ثابت



شکل (۱۹): نمودار توزیع میدان الکتریکی ساختار دندانه‌ای با عمق ثابت پیشنهادی



شکل (۲۰): نمودار S21 و S11 ساختار دندانه‌ای با عمق ثابت



شکل (۲۱): نمودار الگوی تشعشی ساختار دندانه‌ای عمق ثابت پیشنهادی

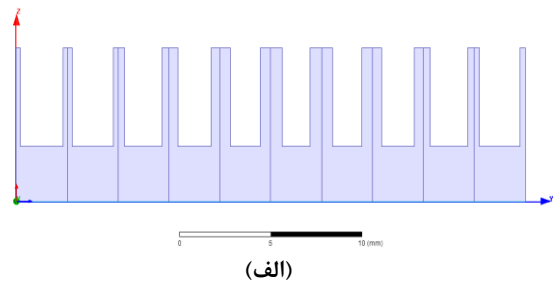
از مقایسه شکل‌های توزیع میدان الکتریکی، نمودار S21 و الگوی تشعشی آنتن‌ها نتایج زیر به دست می‌آیند.

بزرگ‌تر با عمق بیشتر و امپدانس سطحی کمتر با عمق کمتر متناسب بود.

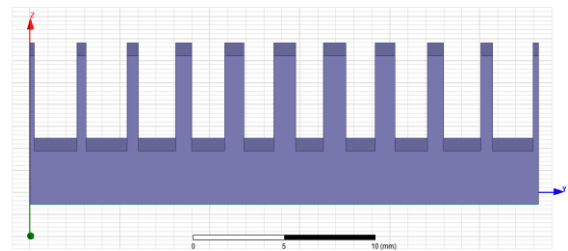
$$G = \frac{\eta_{surf} P}{\eta_0 \tan(k_0 h)} \quad (10)$$

جدول (۲): نتیجه محاسبات ساختار دندانه‌ای با عمق ثابت $h = 5\text{mm}$

Unit Cell No.	Impedance (jΩ)	$\Delta\phi^\circ$	G(mm)
۱	۵۴۲/۸۷	۵۹/۴۳	۲/۳۵
۲	۵۲۵/۵۹	۵۸/۱۶	۲/۲۷
۳	۴۸۰/۳۵	۵۴/۹۱	۲/۰۸
۴	۴۲۴/۴۳	۵۱/۰۵	۱/۸۴
۵	۳۷۹/۱۹	۴۸/۰۸	۱/۶۴
۶	۳۶۱/۹۱	۴۶/۹۹	۱/۵۷
۷	۳۷۹/۱۹	۴۸/۰۸	۱/۶۴
۸	۴۲۴/۴۳	۵۱/۰۵	۱/۸۴
۹	۴۸۰/۳۵	۵۴/۹۱	۲/۰۸
۱۰	۵۲۵/۵۹	۵۸/۱۶	۲/۲۷



(الف)



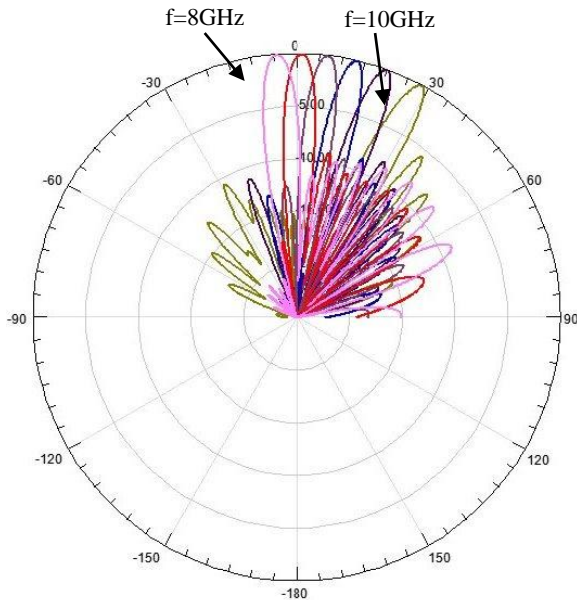
(ب)

شکل (۱۷): یک دوره تناوب ساختار دندانه‌ای با عمق ثابت (الف) با ۱۰ سلول واحد (ب) یکپارچه

ساختار نهایی آنتن پیشنهادی نیز مشابه آنتن‌های قبلی با کنار هم قراردادن ۱۰ دوره تناوب از آنتن ایجاد شده و در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

با تحریک ساختار آنتن موج نشستی نهایی، نمودار توزیع میدان الکتریکی در شکل (۱۹)، نمودار S11 و S21 در شکل (۲۰) و الگوی تشعشی آنتن موج نشستی با ساختار دندانه‌ای و عمق ثابت در شکل (۲۱) نشان داده شده است. در این حالت $S11 \approx -9.65\text{dB}$ و $S21 \approx -7.77\text{dB}$ است.

نمود. این موضوع در الگوی تشعشی شکل (۲۳) به وضوح دیده می‌شود.



شکل (۲۲): نمودار الگوی تشعشی ساختار دندانه‌ای عمق ثابت پیشنهادی با تغییر فرکانس

در جدول (۳) مقدار بهره و پهنای پرتو ۳ dB (صفحات E و H) در فرکانس‌های ذکر شده نشان داده شده است.

جدول (۳): مقدار بهره و پهنای ۳dB پرتو

Frequency (GHz)	Realized Gain (dB)	HPBW (Degree)	
		H_Plane	E_Plane
۸	۵/۰۵	۷/۱۵	۱۱۱/۸
۸/۴	۶/۷۰	۶/۳۶	۱۱۶/۴۵
۸/۸	۹/۱۳	۶/۲۱	۹۴/۴
۹/۲	۱۰/۰۴	۶/۲۰	۸۸/۱
۹/۶	۹/۷۸	۶/۶۹	۷۲/۴
۱۰	۸/۱۰	۸/۳۹	۴۰/۴

در شکل (۲۳) یکی از این پرتوها که مربوط به فرکانس ۹/۲ GHz است را به تنهایی نشان داده‌ایم. پرتو نشان داده شده در ناحیه پشتی الگوی تشعشی مربوط به مد دوم نبوده و ناشی از بازگشت موج به دلیل انعکاس از پورت دوم و عدم جذب کامل موج رسیده به پورت دوم است. این نتیجه‌گیری ناشی از انتشار پرتو ناحیه پشتی دقیقاً در زاویه آینه‌ای مد اصلی است.

برای این که این پرتو انعکاسی ظاهر نشود، می‌بایست طول آنتن و یا مقدار M را طوری طراحی کنیم تا حداکثر ۱۰ درصد از توان انتشاری پورت ۱ در پورت ۲ دیده شود و این به معنی بازده ۹۰ درصد آنتن خواهد بود.

- ۱- بازده ساختار دندانه‌ای پیشنهادی عمق ثابت بیشتر از بازده آنتن دندانه‌ای عمق متغیر است. این موضوع از مقایسه نمودارهای S21 که بیانگر توان رسیده به پورت مقابل پورت تحریک است، به دست می‌آید.
- ۲- به دلیل بازده مناسب آنتن‌های دندانه‌ای، امکان ساخت آنتن موج نشستی با ساختار دندانه‌ای که دارای پهنای پرتو کم و بهره زیاد باشند، وجود دارد.
- ۳- مد دوم تحریک شده در الگوهای تشعشی نشان داده شده منتج از ساختار دندانه‌ای عمق ثابت کمتر از ساختار دندانه‌ای عمق متغیر است.
- ۴- زوایای انتشار مدهای ۱ و ۲ در هر دو ساختار که مورد بررسی قرار گرفته، مطابق طراحی است.
- ۵- با توجه به نوع انتشار موج در ساختار آنتن موج نشستی، هر چه زاویه انتشار افزایش یابد، میزان دامنه سطح لوب جانبی افزایش می‌یابد. این موضوع در رابطه با آنتن‌های میکرواستریبی موج نشستی هم صادق است.

آنتن‌های موج نشستی با ساختارهای میکرواستریبی هم قابلیت پیاده‌سازی دارند. آنتن میکرواستریبی یا همان سطوح امپدانسی پرینت شده بر روی دی‌الکتریک علاوه بر این که دارای تحمل توان پایین هستند و نمی‌توانند توان بالا را تحمل کنند، دارای افت دی‌الکتریک نیز هستند که بازده آنتن را کاهش داده و نمی‌توان آنتن‌های با بهره بالا و پهنای پرتو باریک را توسط آن ایجاد نمود.

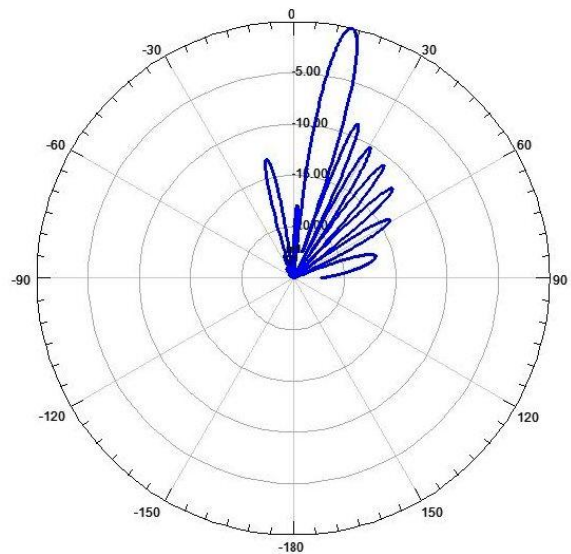
۶. چرخش پرتو با تغییر فرکانس

با استفاده از آنتن دارای ساختار دندانه‌ای با عمق ثابت پیشنهادی و ثابت فرض نمودن مقدار a و تغییر فرکانس مقدار k_0a تغییر یافته و با توجه به قسمت ج شکل (۸)، انتظار چرخش پرتو را داریم. همچنین به منظور داشتن یک پرتو برای مد $n=-1$ و حذف پرتو $n=-2$ ، باید مقدار k_0a را کاهش دهیم و این به معنی کاهش فرکانس خواهد بود. نتیجه آنالیز ساختار دندانه‌ای با عمق ثابت و عرض شکاف متغیر برای فرکانس ۸GHz تا ۱۰GHz و پله‌های ۴۰۰MHz در شکل (۲۲) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۲۲)، با تغییر فرکانس از ۸-۱۰GHz، پرتو آنتن از زاویه -5° تا $+30^\circ$ چرخش داشته و همچنین پرتو مد $n=-2$ نیز در فرکانس‌های پایین که امکان انتشار آن وجود ندارد از بین رفته و از فرکانس معینی مطابق نتایج شکل (۹-ج) شروع به پدیدار شدن می‌کند. یعنی با انتخاب k_0a در محدوده انتشار تک مد، می‌توان تشعشع مد اصلی یا $n=-1$ را به تنهایی ایجاد

۸. مراجع

- [1] A. Oliner and A. Hessel, "Guided waves on sinusoidally-modulated reactance surface", IRE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 7, no. 5, pp. 201-208, December 1959.
- [2] Y. T. Lo, S. W. Lee, *Antenna Handbook*, Vol. 3, pp. 1189-1204, Chapman & Hall, 1993.
- [3] C. A. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, pp. 325-368, John Wiley & Sons, 2008.
- [4] Z. N. Chen, D. Liu, X. Qing, *Handbook of Antenna Technologies*, pp. 1697-1736, Springer, 2016.
- [5] Y. J. Guo, J. L. Gomez, R. Guzman, A. R. Weily, "Reconfigurable Leaky Wave Antennas", FERMAT, 2014
- [6] A. M. Patel, and A. Grbic, "A Printed Leaky-Wave Antenna Based on a Sinusoidally-Modulated Reactance Surface", IEEE Transactions on Antennas and Propagation. vol. 59, no. 6, pp. 2078-2095, June 2011.
- [7] P. Burghignoli, G. Lovat, and D. R. Jackson, "Analysis and optimization of leaky-wave radiation at broadside from a class of 1-D periodic structures", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 54, no. 9, pp. 2593-2604, September 2006.
- [8] A. H. Panaretos and D. H. Werner, "Spoof plasmon radiation using sinusoidally modulated corrugated reactance surfaces", optics express, vol. 24, no. 3, pp. 2593-2604, 8 Feb. 2016.
- [9] A. H. Panaretos and D. H. Werner, "Leaky wave antennas based on capacitively tuned modulated reactance surfaces", IEEE Antennas and Wireless propagation Letters, Vol. 15, pp. 678-681, August 2015.
- [10] G. Sh. Kong, H. F. Ma, B. G. Cai, T. J. cui, "Continuous leaky-wave scanning using periodically modulated spoof plasmonic waveguide", Scientific Reports, pp. 1-8, July 2016.
- [11] M. Ettore, A. Neto, G. Gerini, S. Maci, "Leaky-Wave Slot Array Antenna Fed by a Dual Reflector System", IEEE Transactions on Antennas and Propagation. vol. 56, no. 10, pp. 3143-3149, october 2008.
- [12] Cai, B. G. et al, "Leaky-Wave Radiations by Modulating Surface Impedance on Sub Wavelength Corrugated Metal Structures", Scientific Reports, pp. 1-7, April 2016.
- [13] Dan Sievenpiper et al, "High-Impedance Electromagnetic Surface s with a Forbidden Frequency Band", IEEE Transactions on Microwave Theory and Teqniques. vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, November 1999
- [14] Parisa karimi khoozani, Amin khavasi "Analytical Calculation of Dispersion Diagram of 1D Graphene-Based Periodic Structures", Journal of Applied Electromagnetics, Vol. 3, No. 4, 2016, pp. 39-46 (In Persian).



شکل (۲۳). نمودار الگوی تشعشعی ساختار دندانه‌ای عمق پیشنهادی در فرکانس ۹/۲ GHz

۷. نتیجه‌گیری

با استفاده از آنتن‌های موج نشستی، امکان ساخت آنتنی با ساختار مسطح، سبک، کم حجم و ارزان قیمت وجود خواهد داشت که توانایی ارسال پرتو در هر زاویه دلخواه را بدون استفاده از شیفت‌دهنده‌های فاز را ممکن خواهد ساخت.

با توجه به این‌که آنتن‌های موج نشستی با ساختار دندانه‌ای دارای بازده زیاد هستند، برای آنتن‌های پرتو باریک، بهره و توان بالا مناسب خواهند بود. این موضوع در مقایسه با ساختار آنتن پرینت شده بر روی دی‌الکتریک مرجع [۶] به وضوح دیده می‌شود.

نوآوری مشخص این مقاله پیشنهاد آنتن دندانه‌ای با عمق ثابت و پهنای دندانه متغیر است که دارای بازده بهتر و تحریک مد دوم کمتر نسبت به نمونه با عمق متغیر است.

چرخش پرتو با جاروب فرکانسی در آنتن پیشنهادی امکان‌پذیر است.

Design of a Corrugated Metallic Periodic Leaky Wave Antenna with Constant Depth and Variable Width in the X_u band Frequency

Y. Qaneh Qarehbagh¹, M. Okhovvat^{2*}

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 03/11/2019; Accepted: 11/01/2020)

Abstract

In this paper, we discuss how to create an artificial surface impedance in the leaky wave antenna. The main topic of this article is how to calculate and create surface impedance in all-metal corrugated periodic leaky wave antennas with constant depth and variable width. The result of the design of corrugated periodic leaky wave antennas with constant depth and variable width is the presentation of an antenna that can rotate the main beam in the desired bearing angle with surface impedance modulation (in this paper equal to +30°). Considering the leaky wave antenna structure with the ability to radiate multi beams at different angles simultaneously, single mode radiation and one-way propagation methods are also presented. As the proposed leaky wave antenna has the beam rotation capability by changing its operation frequency, main beam rotation with frequency sweep is also investigated. With 8-10 GHz frequency sweep the main beam angle can rotate from -5° to +30°.

Keywords: Surface Impedance, Beam Steering, Leaky wave Antenna, corrugated Structure, frequency sweep

* Corresponding author E-mail: mokhovvat@ihu.ac.ir