

Measurement of the electromagnetic wave phase velocity and interaction impedance in helical slow-wave structures

S. M. Razavi, E. Hamidi^{*}, S. M. J. Razavi

* Assistant Professor, Electrical and Computer Academic Complex, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 01/02/2022, Accepted: 04/04/2022)

Abstract

Phase velocity and interaction impedance measurements in slow wave structures are especially important in the microwave tubes industry. Among the methods available for measuring the phase velocity and interaction impedance, the non-resonant perturbation method is simple yet accurate and applicable. In this paper, the correctness of this method for the helical slow wave structure is investigated through simulations and analytical methods and thereon, a device is built that has the precision needed to move the perturbation maker inside a slow wave structure. The results and measurement capabilities of this device are demonstrated using simulations in CST software and analytical relationships.

Keywords: slow wave structure, phase velocity, interaction impedance, Non-Resonant Perturbation (NRP)

اندازه‌گیری سرعت فاز موج الکترومغناطیسی و امیدانس برهم‌کنش در ساختارهای کندموج

ماریچ

سید محسن رضوی^۱، عماد حمیدی^{۲*}، سید محمد جواد رضوی^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵)

چکیده

اندازه‌گیری سرعت فاز و امیدانس برهم‌کنش ساختارهای کندموج در صنعت لامپ‌های ریزموج حائز اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. در میان روش‌هایی که برای اندازه‌گیری امیدانس برهم‌کنش و سرعت فاز وجود دارد، روش اختلال غیرتشدیدی ساده و درعین‌حال دقیق و قابل‌اجرا می‌باشد. در این مقاله درستی این روش برای ساختار کندموج ماریچ بررسی شده و بر اساس آن دستگاهی ساخته شده که دقت لازم برای جابجایی اختلال گر را در درون ساختار کند موج داشته باشد. نتایج و قابلیت‌های اندازه‌گیری با این دستگاه با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار CST و روابط تحلیلی اثبات شده است.

کلیدواژه‌ها: ساختار ماریچ، سرعت فاز، امیدانس برهم‌کنش، اختلال غیرتشدیدی

۱- مقدمه

سال ۱۹۶۶ با استفاده از سیگنال برگشتی توسعه یافت [۵] و نتایج اندازه‌گیری بر پایه آن در [۶ و ۷] گزارش شد. این اندازه‌گیری‌ها دارای خطای تکرارپذیری ۰.۰۵ درصد برای سرعت فاز و ۵ درصد برای امیدانس برهم‌کنش می‌باشند. در مراجع [۳ و ۸ و ۹] اثرات هارمونیک فضایی در محاسبات و اندازه‌گیری‌ها لحاظ شد و با در نظر گرفتن اثر تغییرات میدان در جهت شعاعی خطای تکرارپذیری برای امیدانس برهم‌کنش به ۲ درصد کاهش یافت.

با به وجود آمدن نرم‌افزارهای سه‌بعدی مانند MAFIA (نمونه اولیه نرم‌افزار CST) [۱۰] ساختارهای کندموج شبیه‌سازی شد که نتایج شبیه‌سازی مستقیم امیدانس برهم‌کنش ۲۶.۶ درصد کمتر از نتایج اندازه‌گیری بود. در مراجع [۱۱ و ۱۲] با استفاده مستقیم و غیرمستقیم از بسته‌های نرم‌افزاری مانند CST و HFSS پارامترهای تست سرد ساختارهای کندموج محاسبه شده‌اند. طراحی و ساخت همه ساختارهای کندموج نظیر پرتوان [۱۳ و ۱۴] و در باند فرکانسی موج میلی‌متری [۱۵] نیز مستلزم انجام این اندازه‌گیری‌ها می‌باشد.

در این مقاله، به علت بررسی سرعت فاز ساختار لامپ موج رونده ماریچ و برای اینکه شرایط به کار ساختار ماریچ در عمل نزدیک باشد از روش غیرتشدیدی استفاده شده است. البته لازم به ذکر است که ایجاد یک اتصال کوتاه یا مدار باز در ساختار ماریچ در عمل غیرممکن است، به همین دلیل استفاده از روش غیرتشدیدی بسیار ساده‌تر و عملی‌تر است. در این مقاله، ابتدا اهمیت آزمایش‌های سرد بیان شده است. سپس روش اختلال

تولید و تقویت سیگنال ریزموج با پهنای باند مناسب برای مقاوم‌سازی در برابر جنگ الکترونیک یکی از نیازهای اساسی رادارهای روز دنیا می‌باشد. یکی از راهکارهای مهم جهت دستیابی به این هدف استفاده از لامپ‌های موج‌رونده ماریچ می‌باشد. این لامپ در سایر صنایع نظامی و تجاری نظیر سیستم‌های جنگ الکترونیک، مخابرات ماهواره‌ای و زمین‌پایه نیز پرکاربرد می‌باشد. طراحی و ساخت منابع ریزموج در زمان‌های مختلف با مشکلاتی از جمله کمی پهنای باند و یا سطح توان روبه‌رو بوده است. به‌منظور داشتن سطح توان بالا و میدان‌های قوی از خانواده لامپ‌های کلاسترون [۱] و [۲] و به‌منظور داشتن پهنای باند بالا از لامپ‌های موج‌رونده استفاده شده است [۳]. برای برهم‌کنش مؤثر مؤلفه میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی و پرتوی الکترونی نیاز است که این دو با یکدیگر سنکرون باشند، علاوه بر این مؤلفه میدان الکتریکی باید مقدار قابل‌توجهی باشند. این دو شرط توسط دو پارامتر اساسی سرعت فاز (v_p) و امیدانس برهم‌کنش (K) بیان می‌شود که از تست‌های سرد به دست می‌آیند. روش‌های اندازه‌گیری سرعت فاز به دو دسته کلی تشدید و غیرتشدیدی دسته‌بندی می‌شوند [۳].

تئوری اختلال غیرتشدیدی اولین بار در سال ۱۹۵۷ با استفاده از سیگنال ارسالی بیان شد [۴]، خطای تکرارپذیری این اندازه‌گیری برای امیدانس در حدود ۵ درصد بود. این تئوری در

ماریپیچ با جهت چرخش خلاف ماریپیچ اصلی ساختار کندموج) به عنوان اختلال گر^۲ وارد ساختار کند موج می شود تا با حرکت دادن آن در طول ساختار کندموج و ثبت فاز ضریب انعکاس، ثابت انتشار از رابطه (۲) اندازه گیری شود [۱۶].

$$\beta = \frac{|\Delta\phi|}{2\Delta z} \quad (2)$$

در رابطه (۲) Δz میزان جابجایی و $\Delta\phi$ میزان تغییر فاز ضریب انعکاس می باشد. عدد ۲ در مخرج به علت در نظر گرفتن مسیر رفت و برگشت موج است. در عمل به جای استفاده از رابطه (۲) تغییر فاز در تعدادی نقطه ثبت می شود و سپس خطی به داده های به دست آمده برازش می شود و ثابت انتشار ساختار، نصف قدر مطلق شیب این خط می باشد [۱۶].

(ب) اندازه گیری امپدانس

روش اختلال غیرتشدیدی از این ویژگی برخوردار است که با اندکی تغییر می تواند برای اندازه گیری امپدانس برهم کنش به کار رود. رابطه امپدانس برهم کنش روی مرکز پرتوی الکترونی با رابطه (۳) بیان می شود [۱۷].

$$K = \frac{\hat{E}_z^2(0)}{2\beta^2 P} \quad (3)$$

مطابق رابطه (۳) با استفاده از تئوری اختلال غیرتشدیدی باید مجذور میدان الکتریکی بر توان موج الکترومغناطیسی ($\frac{\hat{E}_z^2(0)}{P}$) محاسبه شود. برای این منظور عایقی استوانه ای شکل

با ثابت دی الکتریک ϵ_r در مرکز ساختار کندموج و در تمام طول ساختار (شکل ۱) با اختلال گر کوچکی (یک ماریپیچ) بر روی آن به صورت غیرتشدیدی در مرکز ساختار کند موج قرار دارد و ثابت انتشار ساختار در حضور عایق اندازه گیری می شود. برای محاسبه امپدانس از تئوری اختلال [۳] استفاده می شود.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\int_V (\hat{e} \cdot \hat{D} - \hat{E} \cdot \hat{d}) dv}{\int_V (\hat{E} \cdot \hat{D} - \hat{H} \cdot \hat{B}) dv} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، \hat{E} ، \hat{H} ، \hat{D} و \hat{B} دامنه فـازور ($E = \hat{E} e^{j(\omega t - \beta z)}$) میدان های بدون اختلال و \hat{e} و \hat{d} میدان های اختلال یافته نسبت به میدان های قبلی هستند. در این رابطه با توجه به اینکه اختلال گر از جنس دی الکتریک است اختلالی در

غیرتشدیدی در نرم افزار CST شبیه سازی شده و شرایط پیاده سازی آن بررسی شده است. برای پیاده سازی این روش دستگاهی ساخته شده است که دقت لازم برای جابجایی اختلال گر را دارد. سپس این روش برای اندازه گیری پارامترهای هدف ساختار کندموج ماریپیچ به کار گرفته شده و در نهایت نتایج اندازه گیری با نتایج شبیه سازی راستی آزمایی شده است.

۲- روش اختلال غیرتشدیدی^۱

در طراحی لامپ موج رونده دو پارامتر b (پارامتر هم سرعتی) و C (پارامتر کوپلینگ) تأثیر به سزایی در بهره لامپ ایفا می کنند [۱۶].

$$b = \frac{u_0 - v_p}{C v_p}; C = \left(\frac{KI_0}{4V_0} \right)^{1/3} \quad (1)$$

در رابطه (۱) u_0 سرعت پرتوی الکترونی، v_p سرعت فاز موج الکترومغناطیسی، I_0 و V_0 جریان و ولتاژ پرتوی الکترونی هستند. K نیز امپدانس برهم کنش می باشد.

برای داشتن بیشترین بهره نیاز است که $u_0 \approx v_p$ باشد همچنین مقادیر K باید برای لامپ های موج رونده ماریپیچ در حدود چند ده اهم باشد. مؤلفه محوری میدان الکتریکی موج RF است که باعث تقویت در لامپ های ریزموج خطی به ویژه لامپ موج رونده می شود. میزان این تقویت با امپدانس برهم کنش بیان می شود. اندازه گیری دو پارامتر سرعت فاز موج و امپدانس برهم کنش کمک زیادی به طراحی لامپ می کند. با توجه به هزینه بر بودن فرآیند ساخت و آزمایش لامپ های موج رونده وجود آزمایش های میانی باعث کاهش هزینه تولید لامپ موج رونده می شود. یکی از این آزمایش ها اندازه گیری سرعت فاز و امپدانس برهم کنش ساختار کند موج در لامپ موج رونده ماریپیچ است. در این روش یک اختلال (برای برگشت موج از محل آن) بسیار کوچک وارد ساختار کندموج می شود و با جابه جایی آن ثابت انتشار (سرعت فازموج) اندازه گیری می شود، برای اندازه گیری امپدانس باید یک اختلال بزرگ در کل طول ساختار قرار داده شود و دوباره ثابت انتشار اندازه گیری شود. با استفاده از $\Delta\beta$ به وجود آمده و استفاده از تئوری اختلال امپدانس برهم کنش محاسبه می شود.

(الف) اندازه گیری ثابت انتشار

روش اختلال غیرتشدیدی جسمی رسانا و کوچک (یک

² Perturber

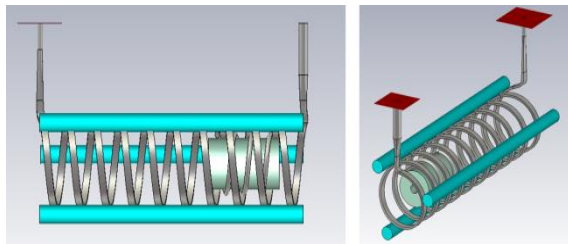
¹ Non-resonant perturbation

$$p_2 = I_0(\gamma r_p) I_0(\gamma' r_p) \left[\frac{2I_1(\gamma' r_p)}{\gamma' r_p I_0(\gamma' r_p)} + \frac{1}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{\gamma}{k} \right)^2 \left(\frac{2I_1(\gamma' r_p)}{\gamma' r_p I_0(\gamma' r_p)} - \frac{2I_1(\gamma r_p)}{\gamma r_p I_0(\gamma r_p)} \right) \right] \quad (10)$$

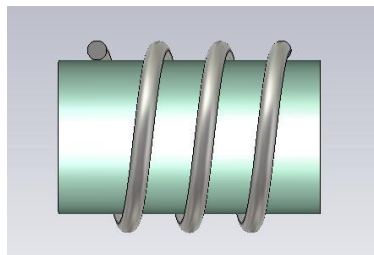
$$p_3 = \frac{I_0(\gamma r_p) I_0(\gamma' r_p)}{\epsilon_r - 1} \left[\frac{2I_1(\gamma' r_p)}{\gamma' r_p I_0(\gamma' r_p)} - \frac{2I_1(\gamma r_p)}{\gamma r_p I_0(\gamma r_p)} \right] \quad (11)$$

۳- شبیه‌سازی روش آزمایش

برای ارزیابی روش اختلال غیرتشدید از نرم‌افزار CST استفاده شده و برای اندازه‌گیری پارامترهای هدف، ساختار کندموجی که قبلاً ساخته شده با مشخصات بیان‌شده در جدول (۱) مطابق شکل (۲) مدل‌سازی شده است. در این شکل در مرکز مارپیچ اخلاگر (کمرنگ) و در اطراف آن سرامیک‌های نگهدارنده از جنس آلومینا (پررنگ) نشان داده شده است.



شکل (۲). ساختار کند موج با حضور اختلال گر مدل‌سازی شده در نرم‌افزار CST



شکل (۳). اختلال گر طراحی شده

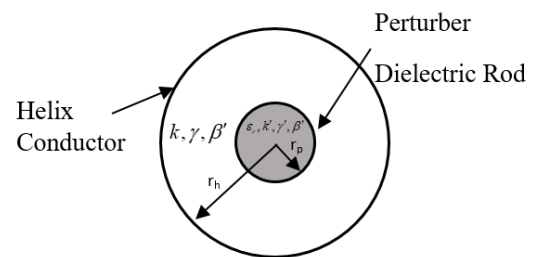
جدول (۱). مشخصات ساختار کند موج مارپیچ

۶/۴ میلی‌متر	قطر داخلی مارپیچ
۲/۹۷ میلی‌متر	گام مارپیچ
۱/۴۵ میلی‌متر	قطر دی‌الکترونیک نگهدارنده
آلومینا	جنس دی‌الکترونیک
۱۰/۹ میلی‌متر	قطر غلاف مارپیچ

میدان‌های مغناطیسی رخ نمی‌دهد. هدف از استفاده از این رابطه به دست آوردن دامنه میدان الکتریکی در مرکز ساختار کندموج می‌باشد. با ساده کردن آن رابطه (۵) حاصل می‌شود.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\epsilon_0(\epsilon_r - 1) \int E' \cdot E^* dv}{4W} \quad (5)$$

در این رابطه $E' = E + e$ و W انرژی ذخیره شده در ساختار و ϵ_r در کل ساختار است. با اعمال این تئوری بر روی مدل شکل (۱) رابطه تقریبی (۵) به دست می‌آید [۳].



شکل (۱). مشخصات هندسی اختلال گر و مارپیچ [۳]

$$K_{first-order} = \frac{2\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \beta (\gamma/k)^2 \Delta\beta}{\pi(\epsilon_r - 1) k} \left(\frac{1}{\beta} \right)^2 \left(\frac{1}{\gamma r_p} \right)^2 \quad (6)$$

در رابطه (۶) $\Delta\beta$ تغییر ثابت فاز در حضور و عدم حضور عایق دی‌الکترونیک می‌باشد. همچنین β ثابت فاز ساختار بدون دی‌الکترونیک، ϵ_r ثابت دی‌الکترونیک، r_p شعاع عایق استوانه‌ای، k ثابت انتشار فضای آزاد و $\gamma^2 = k^2 - \beta^2$ می‌باشد.

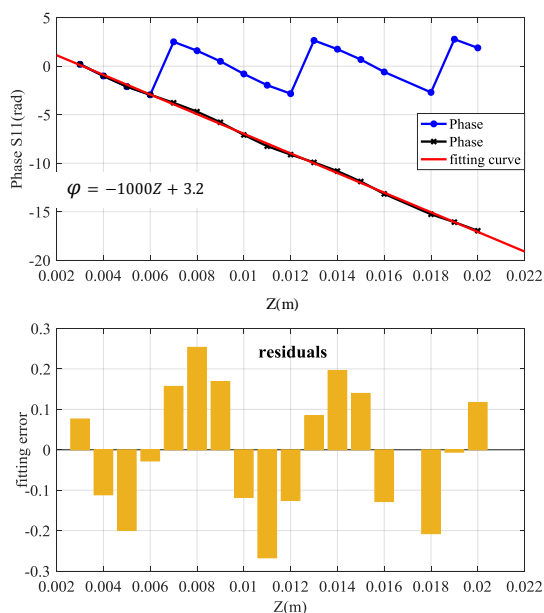
رابطه (۶) برای فرکانس‌های بالا تقریب مناسبی است و با نتایج تحلیلی (برای ساختارهای نواری که روابط تحلیلی دارند) همخوانی دارد و برای فرکانس‌های پائین‌تر باید مطابق با رابطه (۷) اصلاح شود [۱۸].

$$K = \frac{1}{G_{p,nu,r}} K_{first-order} \quad (7)$$

که $K_{first-order}$ از رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۸].

$$G_{p,nu,r} = p_1 \left(p_2 + \frac{\beta^2}{\gamma\gamma'} p_3 \right) \quad (8)$$

$$p_1 = \frac{1}{\gamma r_p \left(K_1(\gamma r_p) I_0(\gamma' r_p) + \frac{\gamma}{\gamma'} \epsilon_r K_0(\gamma r_p) I_1(\gamma' r_p) \right)} \quad (9)$$



شکل (۵). نمودار فاز ضریب انعکاس برحسب فاصله در فرکانس مرکزی (3.5GHz)

۴- پیاده‌سازی ساختار اندازه‌گیری

مطابق با تئوری بیان شده، برای اندازه‌گیری سرعت فاز و امپدانس برهم‌کنش ساختار کند موج مارپیچی نیاز به اندازه‌گیری پارامتر S_{11} در مکان‌های مختلف در طول ساختار کند موج است.

ساختار کند موج مارپیچ به‌ویژه در فرکانس‌های بالا ابعاد بسیار کمی دارند (ابعاد ساختار مارپیچ در حد میلی‌متر). بایستی یک اختلال‌گر با ابعادی کمتر از قطر داخلی مارپیچ وارد مارپیچ گردد. در شکل (۶) بلوک دیاگرام ساختار اندازه‌گیری سرعت فاز موج و امپدانس برهم‌کنش نشان داده شده است که مطابق آن دستگاه از قطعات زیر تشکیل شده است:

- بازوهای نگهدارنده^۱
- دو عدد سه نظام^۲
- بالابر اپتیکی میکرومتری قابل حرکت در جهت Z برای تنظیم مکان ارتفاع^۳ DUT
- تنظیم‌کننده اپتیکی میکرومتری در جهت X که با استفاده از آن مکان DUT به‌صورت دقیق تنظیم می‌شود.
- موتور پله‌ای^۴
- سیستم کنترلی برای کنترل دستگاه
- مدار حفاظت
- لوازم جانبی

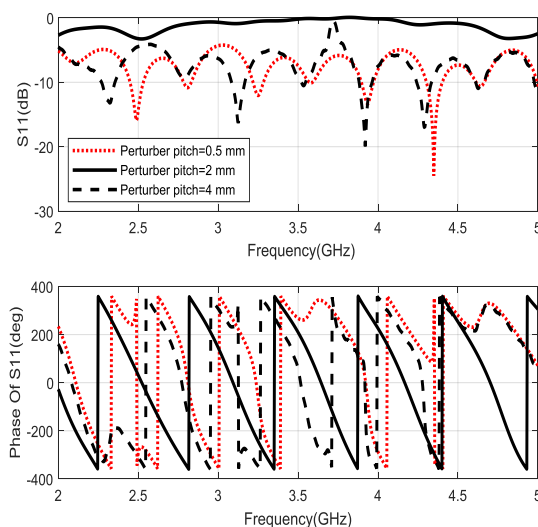
1. jaw of device
2. chuck
3. Device Under Test
4. Stepper motor

انتخاب و طراحی اختلال‌گر از دیگر پارامترهایی است که باید در آزمایش به آن توجه شود. در شکل (۳) اختلال‌گر مورد استفاده نشان داده شده است. این اختلال‌گر از یک استوانه تفلونی به همراه یک سیم فلزی که دور آن پیچیده شده است تشکیل شده است. برای نتایج بهتر نیاز است که گام مارپیچ به‌درستی طراحی شود. ملاحظات انتخاب اختلال‌گر شامل حرکت راحت درون مارپیچ، گام مناسب سیم‌پیچ روی آن متناسب با بازه فرکانسی می‌باشد.

در شکل (۴) دامنه و فاز پارامتر S_{11} (در شکل (۲) پورت‌ها نشان داده شده است و ساختار متقارن می‌باشد) با گام‌های مختلف اختلال‌گر نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها گام ۲ میلی‌متر برای آن مناسب است.

برای اطمینان از خطی بودن فاز ضریب انعکاس بر داده‌های آن یک خط برازش می‌شود که نمودار برازش شده به همراه خطای آن در شکل (۵) نشان داده شده است و بیانگر خطی بودن نمودار فاز برحسب فاصله می‌باشد. در این نمودار Z مکان اختلال‌گر در طول محور ساختار می‌باشد و از ابتدای ساختار سنجیده می‌شود. همچنین معادله‌ی برازش شده بر روی فاز در شکل نوشته شده است که نصف قدر مطلق شیب این نمودار ثابت فاز ساختار کند موج است.

حال با تکرار این کار در کل بازه فرکانسی سرعت موج الکترومغناطیسی در کل بازه فرکانسی محاسبه می‌شود. در این شبیه‌سازی باید دقت کرد که تعداد مش‌ها به‌طور مناسب انتخاب شود. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در شکل (۱۳) آمده است.



شکل (۴). الف) دامنه و فاز S_{11} با گام‌های مختلف اختلال‌گر

تهیه اولین اختلال گر به کارگرفته شده توسط کاربر در این آزمایش‌ها نتیجه مناسب در اختیار کاربر قرار نمی‌دهد (اختلال گر باید باعث عدم انطباق پورت ورودی شود)، لازم است که چندین اختلال گر با گام‌های متفاوت تهیه گردد و پارامتر S_{11} آن‌ها مورد بررسی قرار داده شود. همچنین برای اندازه‌گیری باید جابه‌جایی در یک سمت انجام شود و نمونه‌های اندازه‌گیری شده از پارامتر S ذخیره گردد. نکته حائز اهمیت در انجام مراحل اشاره شده نحوه ذخیره‌سازی اطلاعات است، بدین صورت که جابه‌جایی کردن ساختار کندموج و ذخیره شدن پارامتر برگشتی به دست آمده در تحلیلگر شبکه باید به گونه‌ای باشد که پارامتر S مربوط به هر مکان مشخص باشد (این تمایز با نام‌گذاری متفاوت هر پارامتر S امکان‌پذیر است). برای درک بهتر موضوع اشاره شده، دامنه و فاز پارامتر S اختلال گر در یک مکان در اواسط ساختار کندموج و همچنین یک میلی‌متر عقب‌تر و یک میلی‌متر جلوتر در طول ساختار کندموج یعنی در جهت تناوب ساختار کندموج به ترتیب در دو شکل (۹) و شکل (۱۰) نشان داده شده است. جهت حرکت اختلال گر در شکل (۷) مشاهده می‌شود.



شکل (۶). بلوک دیاگرام ساختار اندازه‌گیری سرعت فاز موج و امیدانس برهم‌کنش

قابلیت‌های این دستگاه شامل:

- دقت جابه‌جایی تا ۱۰ میکرومتر
- ارسال داده‌های جابجایی به کامپیوتر و ذخیره در آن
- تنظیم گام‌های جابجایی با دقت ۱۰ میکرومتر
- تنظیم سرعت جابجایی از ۱ تا ۲۰۰ درصد

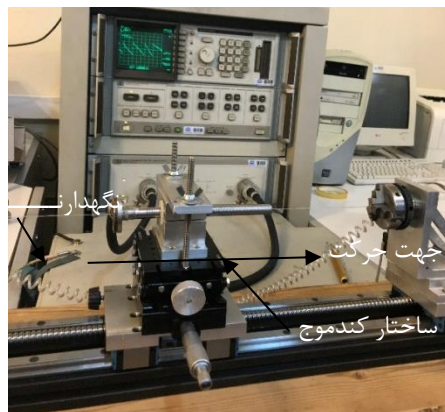
در این دستگاه اختلال گر مکانی ثابت دارد و ساختار کندموج حرکت می‌کند. بنابراین با استفاده از دو بازوی نگهدارنده اختلال گر توسط نخ نایلونی و بازوها بسته می‌شود. مکان دقیق ساختار کندموج توسط یک بالابر اپتیکی و تنظیم‌کننده اپتیکی دقیق نسبت به اختلال گر تنظیم می‌شود تا برخوردی به اختلال گر نداشته باشد. جابه‌جایی مکان ساختار کندموج توسط یک موتور پله‌ای با یک سیستم کنترلی مناسب صورت می‌پذیرد. کاربر با فرستادن اختلال گر به داخل ساختار کندموج به وسیله کلیدهای حرکتی بر روی بدنه اصلی دستگاه، از بازگشت موج RF توسط اختلال گر مطمئن می‌گردد، به گونه‌ای که به کمک فاز موج برگشتی، ثابت انتشار و سرعت فاز ساختار را اندازه گرفت. در صورتی که اختلال گر بر روی پارامتر S تأثیر نداشته باشد، لازم است اختلال گر تغییر کند و این امر می‌تواند به دو صورت سعی و خطا یا با استفاده از شبیه‌سازی مشخصات اختلال گر مناسب را به دست آورد. در شکل (۷) قسمت اصلی ساختار و نحوه اتصال آن به تحلیلگر شبکه^۱ نشان داده شده است.

۵- نتایج اندازه‌گیری

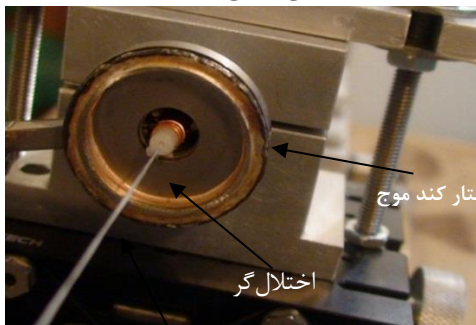
برای اندازه‌گیری پارامترهای هدف، ساختار کندموج با مشخصات بیان شده در جدول (۱) مطابق شکل (۷) روی دستگاه بسته می‌شود و نتایج اندازه‌گیری‌های زیر به دست می‌آید.

شکل (۸) دامنه اندازه‌گیری شده پارامتر S_{11} را در حضور اختلال گر و بدون حضور آن نشان می‌دهد. از آنجایی که طراحی و

(الف) قسمت اصلی و قابل حرکت ساختار اندازه‌گیر

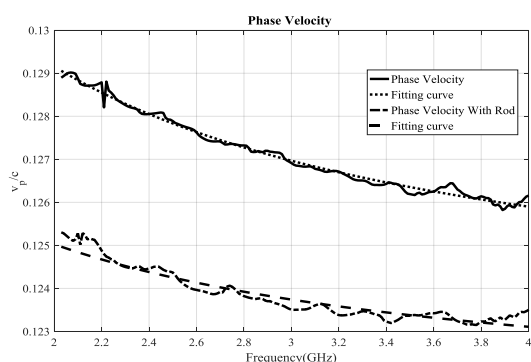


(ب) نمایی از یکی از آزمایش‌ها



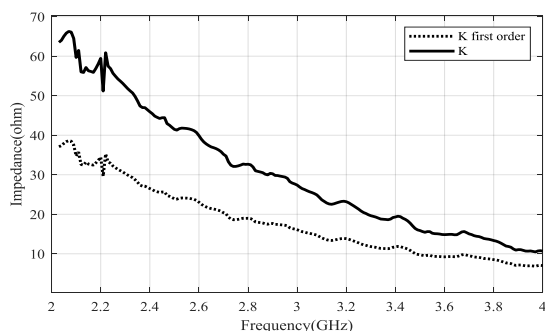
(ج) اختلال گر در ابتدای ساختار کندموج

شکل (۷). قسمت اصلی ساختار و اتصال آن به تحلیلگر شبکه



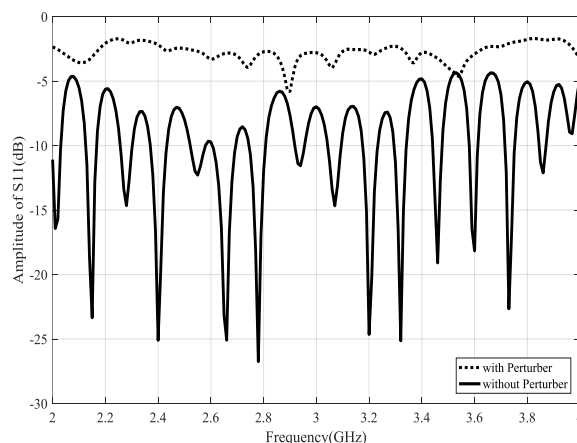
شکل (۱۱). سرعت فاز موج الکترومغناطیسی در حضور و عدم حضور میله دی الکتریک

در شکل (۱۲) نتایج امپدانس برهم کنش با هر دو رابطه اولیه و اصلاحی نشان داده شده است. نتایج این شکل نشان می‌دهد در فرکانس‌های بالا هر دو نتایج به هم نزدیک می‌شوند.

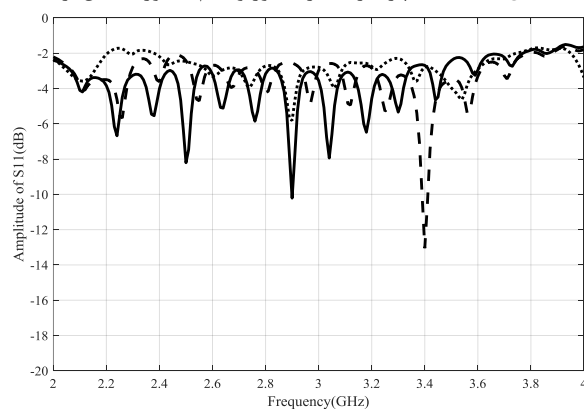


شکل (۱۲). امپدانس برهم کنش محاسبه شده اولیه و اصلاح شده

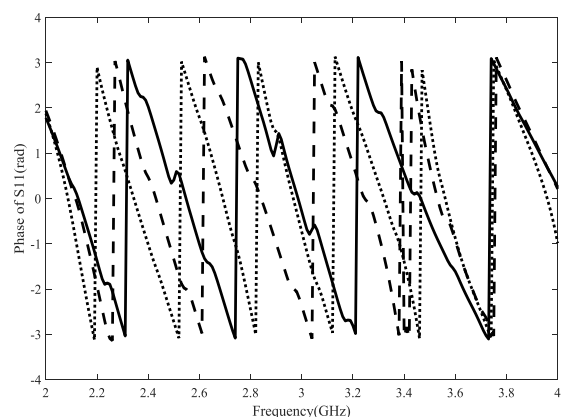
به منظور راستی آزمایی، نتایج اندازه‌گیری سرعت فاز و امپدانس برهم کنش با شبیه‌سازی با دو نرم‌افزار CST و HFSS مقایسه شده است و به ترتیب در دو شکل (۱۳) و (۱۴) گزارش شده است که نشان‌دهنده همخوانی مناسب است. برای شبیه‌سازی به روش مقادیر ویژه دوره تناوب (P) از ساختار کند موج در نرم‌افزار CST و HFSS مدل می‌شود و با استفاده از شرط مرزی فلوکه یک فاز ($\phi = \beta p$) و در نتیجه یک ثابت انتشار (β) به این دوره تناوب نسبت داده می‌شود. نرم‌افزار نیز بر اساس این ثابت انتشار فرکانس تشدید ساختار (ω) را محاسبه می‌کند. با دانستن این دو مقدار سرعت فاز و سرعت گروه ساختار محاسبه می‌شود. ($v_p = \omega / \beta, v_g = \partial \omega / \partial \beta$). برای محاسبه امپدانس برهم کنش طبق رابطه (3) باید میدان الکتریکی و همچنین توان RF ساختار محاسبه شود. بیشینه میدان الکتریکی با استفاده از بسط دادن میدان محاسبه شده توسط نرم‌افزار بر اساس قضیه فلوکه به دست می‌آید و توان RF نیز بر اساس رابطه ($P_{RF} = wv_g$) محاسبه می‌شود که w انرژی ذخیره شده در ساختار است در نرم‌افزار CST این انرژی برابر است با ۱ و در نرم‌افزار HFSS نیز بایستی محاسبه شود.



شکل (۸). دامنه پارامتر S_{11} در حضور و عدم حضور اختلال گر



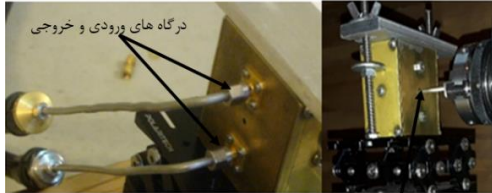
شکل (۹). دامنه پارامتر S_{11} در مکان‌های مختلف اختلال گر با تغییر مکان یک میلی‌متر



شکل (۱۰). فاز پارامتر S_{11} در مکان‌های مختلف اختلال گر با تغییر مکان یک میلی‌متر

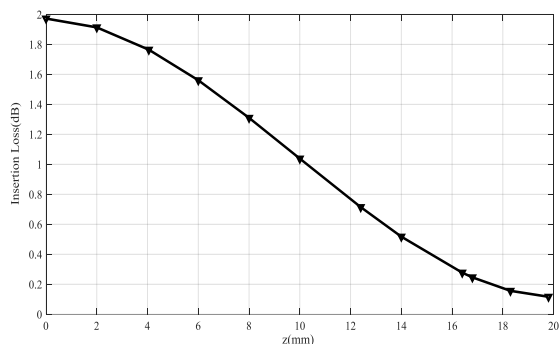
برای اندازه‌گیری امپدانس برهم کنش نیاز است ثابت انتشار ساختار با دی الکتریک (شیشه با ثابت دی الکتریک ۴٫۴۸) داخل ساختار و بدون آن اندازه‌گیری شود. پس از ثبت اطلاعات پارامترهای S_{11} اندازه‌گیری و پردازش آن نمودار سرعت فاز برای دو حالت محاسبه شده است و نتایج آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

می‌شود. نحوه قرار گرفتن محفظه روی دستگاه و قرار گرفتن میله دی‌الکتریک روی آن و اتصال آن به تحلیلگر شبکه در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

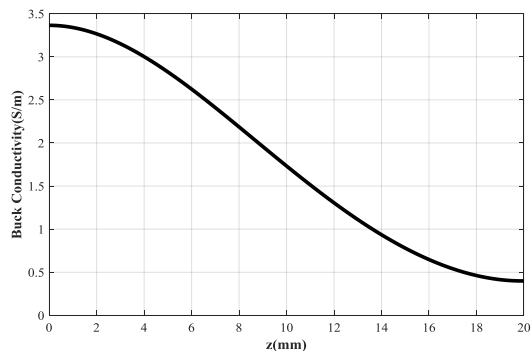


دی‌الکتریک نگهدارنده
 شکل (۱۶). قرارگیری محفظه روی دستگاه و اتصال آن به تحلیلگر شبکه

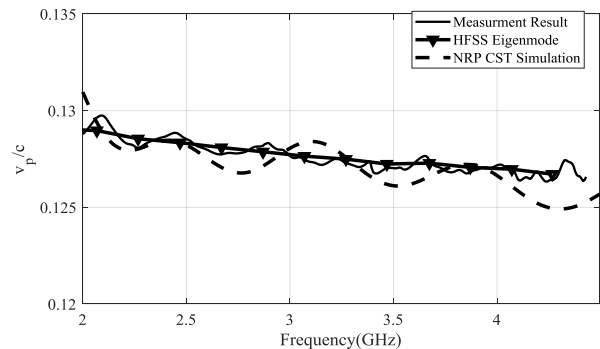
برای آزمایش دی‌الکتریک، لازم است با جابه‌جا کردن دی‌الکتریک در طول دستگاه مذکور، کمترین مقدار S_{21} مشاهده شود، که مکان این مقدار نیز بیشترین تلفات را دارد. لازم به ذکر است که با زدن کلید بازنشانی^۱ این مکان به‌عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود، و با تغییر دادن مکان محفظه توسط کاربر مقادیر S_{21} و بیشینه آن اندازه‌گیری و ذخیره می‌شود. با پردازش داده‌ها [۱۹] رسانایی دی‌الکتریک به دست می‌آید که نتایج تلفات و رسانایی در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است.



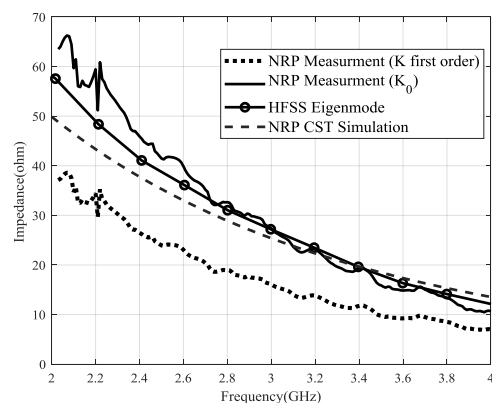
شکل (۱۷). نمودار تلفات اندازه‌گیری شده بر روی دی‌الکتریک نگهدارنده



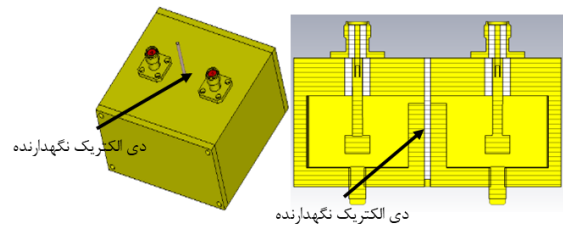
شکل (۱۸). نمودار رسانایی به‌دست‌آمده از نتایج اندازه‌گیری بر روی دی‌الکتریک



شکل (۱۳). مقایسه نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی سرعت فاز موج الکترومغناطیسی



شکل (۱۴). مقایسه نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی امیدانس برهم‌کنش یکی دیگر از کاربردهای مهم این دستگاه اندازه‌گیری تلفات بر روی دی‌الکتریک نگهدارنده می‌باشد که برای این کار از یک محفظه با شکافی باریک که با دی‌الکتریک نگهدارنده در همین شکاف باریک برهم‌کنش دارد و ارتفاع این شکاف ۲ میلی‌متر است، استفاده می‌گردد. همچنین میزان انتقال سیگنال (S_{21}) به میزان تلفات روی دی‌الکتریک نگهدارنده بستگی خواهد داشت. ساختار طراحی شده در شکل (۱۵) نشان داده شده است، به‌گونه‌ای که ابعاد و دهانه‌های ورودی و خروجی محفظه با استفاده از نرم‌افزار CST طراحی و بهینه‌سازی شده و مکان قسمت برش داده شده از ساختار به‌خوبی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۱۵). نمایی از طراحی ساختار برش داده شده در نرم‌افزار CST

محفظه فوق ساخته شده و با احتیاط و دقت کافی روی دستگاه بسته می‌شود و میله دی‌الکتریک نگهدارنده از شکاف محفظه گذرانده شده و توسط یکی از سه نظام‌های دستگاه ثابت

^۱ Reset

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روش اختلال غیرتشدیدی برای محاسبه و اندازه‌گیری دو پارامتر اساسی سرعت فاز و امپدانس برهم‌کنش ساختارهای کند موج، بررسی شد و بر اساس این روش دستگاهی ساخته شد که دقت لازم برای جابجایی اختلال‌گر را در درون ساختار کند موج داشته باشد. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی این روش در CST و HFSS، صحت نتایج اندازه‌گیری تأیید شد. دستگاه ساخته شده قابلیت اندازه‌گیری تلفات میله دی‌الکتریک نگهدارنده ساختار کند موج را نیز دارد.

۷- مراجع

- [9] P. Wang, R. Carter, & B. N. Basu, "An improved technique for measuring the Pierce impedance of helix slow-wave structures," *Europ. Microwave Conf.*, 1994.
- [10] C. L. Kory, & J. A. Dayton, "Computational Investigation of Experimental Interaction Impedance Obtained by Perturbation for Helical Traveling-Wave Tube Structures," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 45, no. 9, 1998.
- [11] D. T. Lopes, & C. C. Motta, "Phase Velocity and Interaction Impedance Measurements on Slow-Wave Structures for High-Power Traveling-Wave Tubes," *Proc. IVEC2008*, 2008.
- [12] D. T. Lopes, & C. C. Motta, "CAD of an X-band TWT interaction circuit with experimental validation," *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Belem, pp. 235-238, 2009.
- [13] D. T. Lopes, & C. C. Motta, "Phase velocity and interaction impedance on slow-wave structures for power traveling-wave tubes," *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Monterey, CA, pp. 107-108, 2008.
- [14] U. Chipengo, N. K. Nahar & J. L. Volakis, "Cold Test Validation of Novel Slow Wave Structure for High-Power Backward-Wave Oscillators," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 44, no. 6, pp. 911-917, 2016.
- [15] M. Sumathy, "Cold Circuit Analysis of a Coupled-Cavity Slow Wave Structure for Mm-Wave TWT," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 48, no. 9, pp. 3024-3029, 2020.
- [16] B. N. Basu, "Electromagnetic theory And Application In Beam-Wave Electronics," First edit. World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd, 1996.
- [17] A. S. Gilmour, "Microwave and Millimeter-Wave Vacuum Electron Devices," Artech House, 2020.
- [18] R.G. Carter, "Microwave and RF Vacuum Electronic Power Sources," Cambridge University Press, 2018.
- [1] J. B. Whitehead & W. Rueggeberg, "The Measurement of Dielectric Loss at High Frequencies an Under Changing Temperature," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 68, no. 1, pp. 520-524, 1949.
- [1] W. Yong, Y.G. Ding, P.K. Liu, J. Zhang, S.G. Wang, & X. Lu, "Development of an S-band klystron with bandwidth of more than 11%," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 34, no. 3, pp. 572-575, 2006.
- [2] Y. Ding, B. Shen, S. Shi, & J. Cao, "S-band multibeam klystron with bandwidth of 10%," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 52, no. 5, pp. 889-894, 2005.
- [3] S. J. Rao, S. Ghosh, P. K. Jain & B. N. Basu, "Nonresonant perturbation measurements on dispersion and interaction impedance characteristics of helical slow-wave structures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 9, pp. 1585-1593, 1997.
- [4] R.P. Lagerstrom, "Interaction-impedance measurements by perturbation of travelling waves," Technical Report, N0. 7, Electronics Laboratories, Stanford University, 1957.
- [5] C.W. Steel, "A nonresonant perturbation measurements," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. MTT-14, pp. 70-74, 1966.
- [6] K.B. Mallory & R.H. Miller, "On nonresonant perturbation measurements," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. MTT-14, 1966.
- [7] J.R. Legarra, "Measurement of microwave characteristics of helix travelling wave circuits," *IEEE Intemational Electronic Meetings*, pp. 408-411, 1979.
- [8] B.T.J. Maharaj, & E.W. Schumann, "Automated measurement methods to characterise- travelling wave tube slow-wave structures," *Elektron (South Africa)*, vol. 6, no. 1, pp. 8-10, 1989.