

شبیه سازی سیگنال بزرگ لامپ موج رونده با حفره های کوپل شده

زینب زیبایی نژاد^{۱*}، دکتر حبیب الله عبیری^۲، حسن زیبایی نژاد^۳

^۱ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه شیراز

^۲ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه شیراز

^۳ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه شیراز

zibaenejad.z@gmail.com^۱

abiri@shirazu.ac.ir^۲

zibaenejad.h@gmail.com^۳

چکیده- در این مقاله با در نظر گرفتن نیروی فضای بار و بهره گیری از مدل دیسکی جریان کاتد، به شبیه سازی سیگنال بزرگ لامپ موج رونده با حفره های تزویج پرداخته شده و بدون استفاده از هرگونه نرم افزار شبیه ساز واسط و صرفاً با دریافت مشخصات هندسی هریک از حفره ها نظیر شعاع تونل، طول حفره و لوله سوق، ابعاد شکاف تزویج، ولتاژ و جریان کاتد و توان موج ورودی، منحنی $\omega - \beta$ ، امپدانس برهم کنش و بهره، با سرعت و دقت بالایی محاسبه شده و نتایج برای یک نمونه لامپ در باند فرکانسی X ارائه شده است.

کلید واژه- امپدانس برهم کنش، بهره شبیه سازی، لامپ موج رونده با حفره های تزویج، منحنی $\omega - \beta$

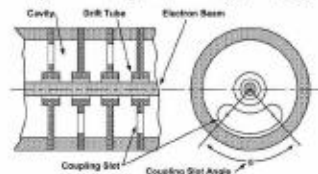
سیگنال بزرگ عمل می نماید. [1] تلاش هایی جهت شبیه سازی عملکرد سیگنال بزرگ لامپ ارائه شده است. [3-1] این شبیه سازی ها علاوه بر نیاز به وارد نمودن ابعاد هندسی لامپ، توان ورودی، ولتاژ و جریان کاتد، نیازمند مقادیر ورودی نظیر امپدانس پیرس یا امپدانس برهم کنش و فاز موج نیز هستند که به کمک نرم افزارهای واسط نظیر CST STUDIO یا HFSS و یا انجام آزمایش سرد به دست می آیند. [4] باید توجه داشت که در عمل، هر دو حفره از یک لامپ، دارای ابعاد دقیقاً یکسانی نیستند، لذا برای یافتن مقادیر فاز و امپدانس برهم کنش برای هر حفره، زمان زیادی صرف خواهد شد. از سویی هرگونه تغییر در ابعاد توسط کاربر مستلزم تکرار روند ذکر شده است. در روش شبیه سازی ارائه شده در این مقاله صرفاً با داشتن ابعاد هندسی حفره های تزویج، ولتاژ و جریان کاتد و توان ورودی و بدون بهره گیری از هرگونه نرم افزار و یا آزمایش سرد ضمن به دست آوردن مقادیر امپدانس برهم کنش و فاز و سرعت فاز، مقادیر بهره و توان خروجی با سرعت و دقت بالایی محاسبه گردیده و در نهایت یکی از انواع لامپ های Coupled-Cavity با شکاف های staggered (شکل ۱) در باند X ، شبیه سازی شده و نتایج ارائه گردیده است.

۲- مدل سازی لامپ و پرتوی الکترونی

جریان پرتوی الکترونی، به صورت دسته های N_H تایی از

۱- مقدمه

لامپ موج رونده با حفره تزویج Coupled Cavity TWT به علت داشتن خواص منحصر به فردی چون بهره بالا، پهنای باند زیاد، توان بالا و خطی بودن پاسخ فاز آن، به طور وسیع در مخابرات فضایی و سیستم های پیشرفته رادار مورد استفاده قرار می گیرد. در چنین لامپ هایی تعدادی حفره تقریباً شبیه به یکدیگر، پشت سرهم قرار گرفته و به وسیله شیارهایی به یکدیگر کوپل شده اند. (شکل ۱) این مجموعه متناوب به گونه ای طراحی شده که بتواند یک موج الکترومغناطیسی با سرعت فازی نزدیک به سرعت پرتوی الکترونی ایجاد نماید تا برهم کنش مؤثر بین الکترون ها و امواج الکترومغناطیسی باعث تقویت موج گردد.



شکل ۱: تزویج بین حفره ها در لامپ با حفره تزویج مدل Staggered Slot

اگر طول لامپ به اندازه کافی بزرگ بوده و دامنه سیگنال ورودی هم بزرگ باشد، تأثیر آن بر میدان ها و باریکه الکترونی منجر به پدیده های غیرخطی شده و در نتیجه لامپ در حالت

گیری از معادله (۱)، سرعت دیسک $\dot{u}_i(t)$ و با انتگرال گیری مجدد از آن، مکان آن ها $z_i(t)$ به دست می آیند. به جای استفاده از توابع $u_i(t)$ و $z_i(t)$ جهت توصیف سرعت و مسیر حرکت الکترون ها، z به عنوان متغیر مستقل انتخاب شده و dt_i/dz و $t_i(z)$ به عنوان توابع وابسته در نظر گرفته شده‌اند. [1] مهمترین مزیت انتگرال گیری نسبت به مکان در هر پله مکانی این است که مسیر حرکت دیسک ها، سرعت و زمان رسیدن آنها به پله های مکانی، مستقیماً به صورت تابعی از مکان محاسبه می‌شوند. نیروی حاصل از دیسک ها بر روی یکدیگر، به صورت زیر محاسبه شده است [7]:

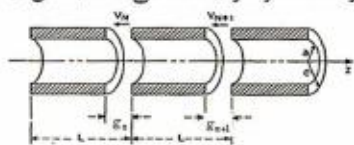
$$F_{SC} = \frac{4q^2 \operatorname{sgn} z}{\pi \epsilon_0 w^2 a^2 b^2} \sum_{\gamma=1}^{\infty} \frac{J_1^2(\mu_{10} r_b)}{\mu_{10}^4 J_1^2(\mu_{10} r_a)} \times \begin{cases} 2 \sinh^2 \frac{\mu_{10} w}{2} e^{-\mu_{10} |z_0|} & \text{for } |z_0| \geq w \\ 1 - e^{-\mu_{10} |z_0|} - e^{-\mu_{10} w} \sinh(\mu_{10} |z_0|) & \text{for } |z_0| \leq w \end{cases} \quad (2)$$

که $\mu_{10} = Z_{10}/r_a$ ، Z_{10} صفر n ام تابع بسل نوع اول مرتبه صفر J_0 ، r_a شعاع تونل سوق، z_0 فاصله دو دیسک از یکدیگر و $q = \pi b^2 w \rho$ ، بار کلی یک دیسک با پهنای w و چگالی ρ می-باشد. (مطابق با شکل ۲ و شکل ۴)

همچنین نیروی میدان الکتریکی موج rf به صورت زیر است [8]:

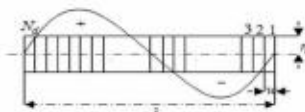
$$F_{RF} = \frac{-q}{L} \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\beta_n \frac{g_n}{2})}{\beta_n \frac{g_n}{2}} \times \frac{2I_1(\gamma_n r_b)}{\gamma_n b I_0(\gamma_n r_a)} \times \frac{\sin(\beta_n \frac{w}{2})}{\beta_n \frac{w}{2}} \times \operatorname{Re} [r_n e^{j\omega t}] \quad (3)$$

که $\beta_n = \beta_0 + 2n\pi/L$ و $\gamma_n = \sqrt{\beta_n^2 - (\omega/c)^2}$ و z فاصله دیسک از مرکز حفره، g_n فاصله شکاف درون تونل سوق در حفره n ام است که پرتوی الکترونی ورودی به لامپ، از آن عبور می‌کند و در شکاف، ولتاژ V_n القا می‌کند. (شکل ۳)



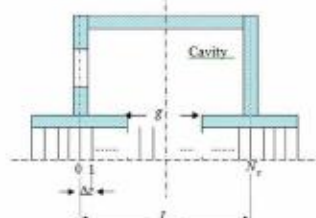
شکل ۳: لوله سوق یا فضای برهم کنش موج و جریان الکترونی

دیسک های باردار استوانه ای با ابعاد یکسان (مدل دیسکی) [11] با قابلیت جابجایی محوری مدل شده اند که در هر تناوب T از موج ورودی، یک گروه N_d تایی وارد لوله سوق می‌شوند. (شکل ۲)



شکل ۲: نمایش پرتوی الکترونی توسط مدل دیسکی در یک تناوب rf (شعاع پرتو، w پهنای آن و λ طول موج پرتو می باشد)

جهت محاسبه مسیر حرکت دیسک ها و محل معادلات حرکت دیسک ها از رابطه (۱)، هر حفره به N_c قسمت مساوی به طول Δz تقسیم گردیده است (شکل ۳)



شکل ۳: تقسیم بندی طول هر حفره به N_c قسمت مساوی و به طول Δz

زمان رسیدن هر دیسک به این نقاط (گره ها)، جهت محاسبه جریان القایی و ولتاژ القایی طبق روابط (۵) و (۶) و (۷) باید تعیین گردد. حد استاندارد به دست آمده برای N_c در برنامه های مشابه ۱۶ و برای N_d ۲۴ می باشد. [5]

۳- دینامیک حرکت دیسک ها و برهم کنش موج و ذره

با لحاظ کردن اثر نسبیت در حرکت دیسک، تغییرات سرعت u_z ناشی از نیروی وارده به هر دیسک F_z به صورت زیر خواهد بود. [6] در این رابطه c مقدار سرعت نورو جرم در حال سکون الکترون است.

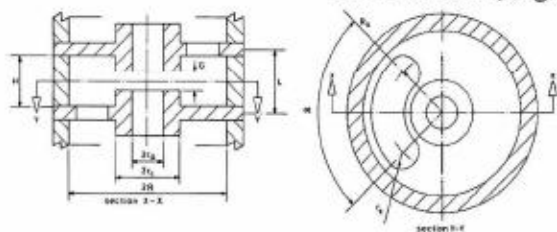
$$\frac{du_z}{dt} = \frac{F_z}{m_0} \left(1 - \frac{u_z^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

نیروهای اعمالی شامل نیروی موج rf و نیروی ایجاد شده توسط پتانسیل ناشی از بار یک دیسک بر دیسک دیگر F_{SC} (نیروی فضای بار) می‌باشد. نیروهای وارده بر هر دیسک تابعی از مکان خود دیسک و سایر دیسک های درون است. با انتگرال

برطبق رابطه (۵) به دست می آید. با خارج شدن دیسک ها از حفره $\Delta V_{F,k}$ و $\Delta V_{B,k}$ برای این حفره محاسبه می شود. بعد از محاسبه ولتاژهای القایی، ولتاژ اعمالی بر حفره $\Delta V_{F,k}$ به دست آمده و با ولتاژهای اولیه اعمالی بر حفره $\Delta V_{B,k}$ که قبل از ورود دیسک ها به آن در نظر گرفته شده جایگزین و بار دیگر دیسک ها وارد این حفره می شوند. یعنی مقادیر ولتاژ و جریان القایی در هر مرحله تصحیح می شود. این کار تا زمان رسیدن خطای ولتاژ القایی به مقدار قابل قبولو رسیدن به همگرایی مدنظر تکرار شده و ادامه می یابد. مراحل بیان شده، برای حفره $k+1$ تا حفره آخر نیز انجام می شود. بعد از محاسبه ولتاژ هر حفره میتوان توان منتشر شده را به صورت $P_k = |V_k|^2 / (2Z_k)$ محاسبه نمود. همانطور که در روابط (۳) تا (۷) دیده می شود باید مقادیر ثابت فاز β_n و امپدانس برهم کنش Z_k برای هر حفره برحسب فرکانس مشخص شود. بدین منظور در این شبیه ساز از روش مدار معادل حفره تزویج [9] استفاده شده است.

۵- نتایج به دست آمده با شبیه سازی

مقادیر ورودی شبیه سازی در جدول (۱) برحسب طول موج مرکزی λ_c آورده شده و با استفاده از مقادیر آنها، نمودار منحنی فاز برحسب فرکانس و منحنی امپدانس برحسب فرکانس ترسیم شده و بهره توان در طول یک نمونه لامپ با حفره staggered (شکل ۴) به دست آمده است.



شکل ۴: ساختار موج آهسته با حفره های تزویج مدل staggered

شکل (۵)، نمودار فرکانس نرمالیزه شده نسبت به فرکانس مرکزی f_c را برحسب فاز (βL) نشان می دهد. منحنی پرتنگ، فازهایی را نشان می دهد که در آنها سرعت الکترون ها و سرعت فاز موج IF درون لامپ نزدیک یکدیگر است. شکل (۶)، نمودار امپدانس برهمکنش Z برحسب فرکانس نرمالیزه را نشان می دهد که مینیمم مقدار آن برابر با ۰.۳۹ اهم می باشد.

طبق قضیه فلوکه، ولتاژ در هر حفره در حضور دیسک های بار و عدم شباهت ساختار هندسی بین حفره ها، به صورت زیر است:

$$V_{k+1} = \sqrt{\frac{Z_{k+1}}{Z_k}} e^{-(\alpha L)_k - i(\beta L)_k} V_k + \Delta V_{k+1} \quad (4)$$

که در این رابطه، α و β به ترتیب تلفات انتشار و ثابت انتشار مربوط به هر حفره می باشند. ΔV_{k+1} ولتاژ القایی ناشی از پرتوی الکترونی در حفره $k+1$ می باشد. Z_k و Z_{k+1} به ترتیب امپدانس برهم کنش حفره k و $k+1$ می باشند.

۴- مولفه فوریه چگالی جریان پرتو

اگر منبع جریان $J_a = J_1(z)e^{i\omega t}$ ناشی از پرتوی الکترونی در یک تک حفره از یک ساختار متناوب با حفره های کوپل شده وجود داشته باشد، مولفه فوریه جریان پرتو به صورت زیر بیان می شود [2]:

$$J_1(z) = \frac{2}{T} \frac{q}{\pi r_0^2} \sum_{i=1}^{N_d} \left(\frac{\sin \left[\frac{\omega w}{2u_i(z)} \right]}{\left[\frac{\omega w}{2u_i(z)} \right]} \right) e^{-i\omega t_i(z)} \quad (5)$$

که ω فرکانس زاویه ای، T تناوب موج IF، $u_i(z)$ و $t_i(z)$ به ترتیب سرعت و زمان رسیدن دیسک نام به نقطه z هستند.

ولتاژ القایی در شکاف، ΔV_F که در جهت مستقیم منتشر می شود و ΔV_B که در جهت برگشت منتشر می شود بدین صورت به دست می آیند [2]:

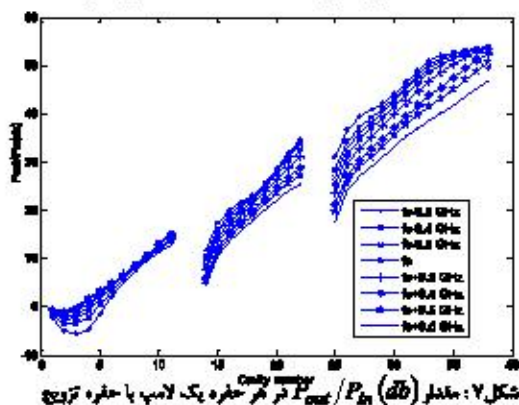
$$\Delta V_F = -\frac{Z}{2} \int_{vol} \sum_n C_n I_0(\gamma_n r) e^{i\beta_n z} J_1(z) dz \quad (6)$$

$$\Delta V_B = -\frac{Z}{2} \int_{vol} \sum_n C_n I_0(\gamma_n r) e^{-i\beta_n z} J_1(z) dz \quad (7)$$

که در آن $C_n = -\frac{1}{L} \left(\frac{\sin \frac{\beta_n g_n}{2}}{\frac{\beta_n g_n}{2}} \right) \frac{1}{I_0(\gamma_n a)}$ و ولتاژهای

القایی ΔV_F و ΔV_B با انتگرال گیری بر روی حجم حفره محاسبه می شوند. دیسک نام با وارد شدن به داخل لوله سوق و قرار گرفتن در ورودی، تحت تأثیر نیروی موج IF و نیروی فضای بار ناشی از دیسک های درون لامپ قرار می گیرد. جهت به دست آوردن یک تقریب اولیه برای $\Delta V_{F,k}$ در این برنامه با فرض آنکه دیسکها با سرعتی ثابت وارد حفره نام می شوند، زمان رسیدن هر دیسک از تناوب اصلی به نقاط گره با حل معادله (۱) محاسبه می شود. با داشتن زمان رسیدن همه دیسک ها به هر پله مکانی، $J_1(z)$

در هر فرکانس در یک رایانه ساده با پردازشگر 3.1GHz و حافظه 3GB RAM در حدود ۹۰ دقیقه محاسبه می‌شود.



۶- نتیجه گیری

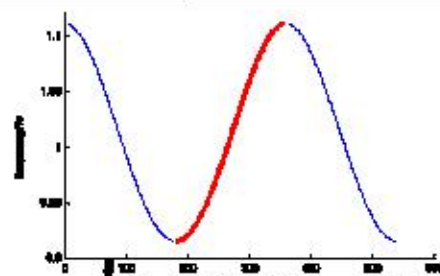
شبیه سازی اجرا شده در این مقاله با دقت خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارد لذا روشی مؤثر جهت شبیه سازی لامپ های با حفره تزویج است. همچنین به دلیل وابستگی آن صرفاً به مشخصات هندسی لامپ و سرعت بالای پردازش، می‌توان از آن در طراحی لامپ بهره برد.

مراجع

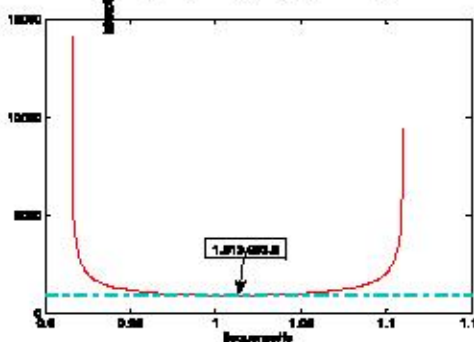
- [1] Vaughan, M and Rodney, J., "Calculation of Coupled-Cavity TWT performance," *IEEE Transactions on electron devices*, Vol. ED-22, No. 10, pp. 880-889, 1975.
- [2] Connolly, D.J., "A contribution to computer analysis of Coupled-Cavity traveling wave tubes," *IEEE Trans. electron devices*, Vol. ED-24, No. 1, pp. 27-31, 1977.
- [3] Vlasov, A.N., "A computationally efficient two-dimensional model of the beam-wave interaction in a coupled-cavity tube," *IEEE Transactions on plasma science*, Vol. 40, No. 6, pp. 1575-1589, 2012.
- [4] He, Fangming., "Theory, simulation and experiments of dispersion and interaction impedance for the double-dot coupled-cavity slow wave structure in twt," *IEEE Transactions on electron devices*, Vol. 60, No. 10, pp. 3576-3583, 2013.
- [5] Vishni, "A fast large signal model for coupled cavity TWTs," *IEEE Transaction on electron devices*, Vol. 35, No. 11, pp. 2068-2076, 1988.
- [6] Panofsky, *Classical Electricity and Magnetism*, Dover publications, New York, 2005.
- [7] Srivastava, Vishwa., "Effect of boundaries on the space charge potential in Coupled-Cavity travelling wave tubes," *IEE Proceedings*, Vol. 133, No. 5, pp. 185-188, 1986.
- [8] Komahl, "Generalized representation of electric fields in interaction gaps of klystron and travelling wave tubes," *IEEE Transactions on electron devices*, Vol. ED-20, No. 7, pp. 621-629, 1973.
- [9] Carter, J.G., "Method for calculating the properties of Coupled Cavity slow wave structures from their dimensions," *IEE Proceedings*, Vol. 133, No. 5, pp. 330-334, 1986.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای ورودی جهت شبیه سازی یک نمونه لامپ

مقادیر	پارامترها
~50mW	تولن ورودی موج P_{in}
~18Kv	ولتاژ DC (کاتد) V_c
2.5A	جریان کاتد I_c
38	تعداد حفره ها
۱۲، ۱۳، ۲۲ و ۲۴	شماره حفره های جدا ساز (SCFCS)
0.6 ps	شعاع پروتوی الکترونی کاتد r_c
$r_{in} = 0.037\lambda_c$	شعاع درونی تونل سوئی r_{in}
$r_{out} = 0.061\lambda_c$	شعاع بیرونی تونل سوئی r_{out}
$r_p = 0.037\lambda_c$	مشخصات هندسی شکاف تزویج
$R_s = 0.074\lambda_c$	
$\alpha = 78^\circ \sim 81^\circ$	
$L = 0.17\lambda_c$	طول بیرونی حفره L
$H = 0.15\lambda_c$	طول درونی حفره H
$G = 0.05\lambda_c$	طول شکاف درون تونل سوئی G



شکل ۸: منحنی فرکانس بر حسب فاز $(\angle L)$



شکل ۹: منحنی بهره گنشی بر حسب فرکانس به فرکانس مرکزی

شکل (۷) منحنی های بهره لامپ را در طول لامپ از حفره اول تا آخر به ازای فرکانس های مختلف نمایش می‌دهد بهره این لامپ در فرکانس مرکزی 53.4db و پهنای باند این لامپ نزدیک به 1GHz است که به نتایج تجربی (بهره 53.1db و پهنای باند 1.1GHz حاصل از لامپی موجود) نزدیک است. بهره لامپ