

# مقایسه توان خروجی بر حسب فرکانس های موج ورودی در لوله های موج رونده در رفتارهای خطی و غیر خطی لوله ها

فایق شیخهء

گروه فیزیک، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

## چکیده

لوله های موج رونده <sup>1</sup>(TWT) به عنوان یکی از اجزای اصلی در سیستم های الکترونیکی و مخابراتی، نقش مهمی در تقویت و پردازش سیگنال ها ایفا می کنند. این مقاله رفتار خطی و غیر خطی یک لوله موج رونده را در برابر عبور فرکانس امواج ورودی مورد بررسی و مقایسه قرار می دهد. به کمک حل معادلات حاکم بر رفتار یک لوله فعال ابتدا پاسخ خطی لوله را تفسیر کرده که در این حالت خروجی لوله با حداقل اعوجاج و هارمونیک در نظر گرفته می شود، در ادامه رفتار غیر خطی لوله ها که با تولید چشمگیری از هارمونیک های مرتبه بالا و اعوجاج همراه است، تعبیر می شوند و در نهایت توان خروجی دو حالت خطی و غیر خطی بر حسب فرکانس با هم مقایسه می شوند. این تحلیل می تواند در راستای بهینه سازی طراحی لوله های موج رونده جهت کاربردهای مختلف، از جمله سیستم های مخابراتی و راداری، مورد استفاده قرار بگیرد.

واژگان کلیدی: لوله های موج رونده، توان خروجی، فرکانس، پاسخ خطی و غیر خطی

<sup>1</sup> Traveling wave tube

## مقدمه

لوله‌های موج رونده (TWT) دستگاه‌های مهم میکروویو هستند که به طور گسترده در سیستم‌های ارتباطی، جنگ الکترونیک و رادار استفاده می‌شوند (Pierce, ۱۹۵۰). از زمان اختراع TWT (۱۹۴۲, kampfner)، به دلیل پهنای باند ذاتی گسترده، نقاط عملیاتی با فرکانس بالا و توان بالا، همچنان کاربرد گسترده‌ای پیدا می‌کنند. اما یک محدودیت عملی مهم، رفتار غیرخطی TWT ها است، تلاش‌هایی برای کاهش این اثرات غیرخطی انجام شده است (Aarti et al, ۲۰۰۵) غیرخطی بودن به عنوان یک مکانیسم اعوجاج طیفی و اشباع آشکار است (Wöhlbier et al, ۲۰۰۲). هر دوی این اثرات کارایی TWT را محدود می‌کنند. بنابراین، به منظور بهبود کارایی TWT و غلبه بر آن محدودیت‌ها، تلاش‌های زیادی در زمینه طراحی هندسی (John et al, ۲۰۰۷)، شبیه‌سازی (Meyne, ۲۰۱۶)، برنامه‌نویسی کامپیوتری (singh, ۲۰۰۳) و ارائه مدل‌های ریاضی (Srivastava and joshi, ۱۹۸۹) صورت گرفته است. هدف همه مدل‌ها ارائه سیستم معادلات است که برای کسانی که می‌خواهند در مورد لوله‌های موج رونده بدانند، طراحی یا تحقیق کنند مفید باشد. مکانیسم پوشش‌های نظری بهمکنش بین پرتو-موج الکترونی و در نهایت تقویت موج ورودی به دلیل انرژی دریافتی از پرتو است (Wöhlbier et al, ۲۰۰۲). چندین نویسنده غیرخطی‌های TWT را با استفاده از مختصات پرتو الکترونی اوپلری و لاگرانژی مدل‌سازی کرده‌اند (Wöhlbier, ۲۰۰۳). هدف نهایی در عملکرد یک TWT تقویت دامنه موج خروجی یا به عبارت دیگر بالا بردن توان خروجی موج است. لذا اثراتی که سه بخش باریکه‌ی الکترونی (پلاسمای غیر خنثی)، ساختار هیلکسی، و موج عبوری از هیلکس، روی همدیگر دارند نباید مکانیسم تقویت موج را به راحتی تصور کرد. آن رفتار غیر خطی TWT است که بیشتر از هر چیزی کسب توان خروجی بالا را با مشکل مواجه می‌کند. می‌دانیم که پاسخ TWT به یک فرکانس ورودی  $f_1$  و  $f_2$  تولید هارمونیک‌های مرتبه‌ی دوم ( $2f$ )، سوم ( $3f$ ) و بالاتر است، در پاسخ TWT به دو تک فرکانس ورودی  $f_1$  و  $f_2$  اضافه بر هارمونیک‌ها، محصولات دیگری هم که انتر مودیلشن مرتبه‌ی سوم و پنجم نامیده می‌شوند تولید می‌شوند که بیشتر از هارمونیک‌ها روی عملکرد TWT اثر می‌گذارند زیرا که به علت فاصله‌ی فرکانسی که هارمونیک‌ها از فرکانس‌های اصلی دارند به راحتی قابل فیلتر کردن هستند در حالی که این امر به علت نزدیکی انتر مدلشن‌ها به فرکانس‌های اصلی در باند فرکانسی مشکل است. جهت بهبود و ارتقای توان خروجی تلاش‌های زیادی شده است.

در مقاله حاضر، اثرات خطی و غیرخطی TWT را بر روی توان و توزیع فرکانسی بررسی می‌کنیم. در بخش دوم رفتار یک TWT را در حضور باریکه‌ی الکترونی به کمک معادلات لازم مدله می‌کنیم، سپس نتایج عددی را در بخش سوم ارائه داده و در نهایت بحث و نتیجه‌گیری تحقیق خاتمه مقاله خواهد بود.

## بیان ریاضی مسئله

اساس فرمول ریاضی TWT از معادلات خط انتقال، پواسون، پیوستگی و ولاسوف مشتق شده است. که در حوزه زمان به صورت زیر بیان می‌شوند (Wöhlbier et al, ۲۰۰۲) :

## معادلات خط انتقال

$$\frac{\partial V}{\partial z} = h_1 \frac{\partial I}{\partial t} \quad 1$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = h_2 \frac{\partial V}{\partial t} - A \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad 2$$

معادله پواسون

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad 3$$

معادلات پیوستگی و ولاسوف

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{e}{m_e} h_1 \left( \frac{\partial I}{\partial t} \right) + \frac{e}{m_e} \Re E \quad 4$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) = - \rho \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad 5$$

برای هر مسئله، یک چارچوب مرجع مختصات باید پیدا شود تا پیچیدگی و فشرده سازی اطلاعات را کاهش دهد، تبدیل فوریه تابعی از زمان  $S(t)$  را به عنوان تابعی از فرکانس  $S(\omega)$  بیان می کند. اکنون با استفاده از تبدیلات زیر (Wöhlbier, ۲۰۰۳):

$$z = z \quad 6$$

$$\psi = \omega_0 \left( \frac{z}{u_0} - t \right) \quad 7$$

معادلات ۱ تا ۵ به ترتیب به معادلات ۸ تا ۱۱ تبدیل می شوند.

$$\frac{\partial V}{\partial z} = RI - \frac{\omega_0}{u_0} \frac{\partial V}{\partial \psi} - \omega_0 L \frac{\partial I}{\partial \psi} \quad 8$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = GV - \omega_0 C \frac{\partial V}{\partial \psi} - \frac{\omega_0}{u_0} \frac{\partial I}{\partial \psi} + A \omega_0 \frac{\partial \rho}{\partial \psi} \quad 9$$

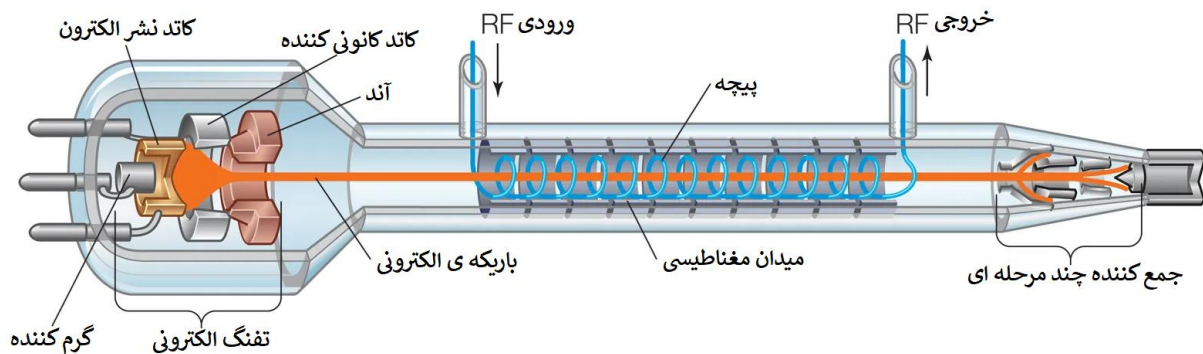
$$\frac{\partial E}{\partial z} = - \frac{\omega_0}{u_0} \frac{\partial E}{\partial \psi} + \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad 10$$

$$v \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{e}{m_e} \left( \omega_0 L \frac{\partial I}{\partial \psi} - RI \right) + \frac{e}{m_e} \Re E + \omega_0 \left( 1 - \frac{v}{u_0} \right) \frac{\partial v}{\partial \psi} \quad 11$$

$$v \frac{\partial \rho}{\partial z} = \omega_0 \left(1 - \frac{v}{u_0}\right) \frac{\partial \rho}{\partial \psi} - \rho \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\omega_0}{u_0} \frac{\partial v}{\partial \psi} \right) \quad 12$$

هر TWT شامل سه بخش اصلی است. اولی منبع پرتو الکترونی است، دومی ساختار موج آهسته است که موج RF را تقویت می کند (شکل ۱). در نهایت، انتشار یک موج الکترومغناطیسی با سرعت فاز تقریباً یکسان در جهت جریان الکترون است. معادلات ریاضی حاکم بر هر سه بخش یک سیستم معادلات دیفرانسیل را تشکیل می دهند که مکانیسم TWT را توصیف می کند. برای نرمال سازی این معادلات، مقادیر مشخصه زیر تعریف شده است (Wöhlbier et al, ۲۰۰۲):

$$Z = L, \quad U = u_0, \quad T = \frac{Z}{U}$$



شکل ۱: شکل یک لوله موج رونده، که موج از ابتدای پیچه وارد و از انتهای آن خارج می شود، این موج ضمن عبور از پیچه توسط

باریکه ی الکترونی که از محور پیچه می گذرد تقویت می شود.

بعد از نرمال سازی متغیرهای وابسته و مختصات مستقل و تعریف یک سری معادلات تبدیل و پارامترهای ثابت که در جدول ۱ لیست شده اند، معادلات حاکم به صورت روابط ۱۳ تا ۱۷ در می آیند.



جدول ۱: جدول متغیرهای وابسته، مختصات مستقل، کمیت های نرمالیزه و ثابت و مشتقات نسبی متغیرها

مختصات مستقل	$\hat{z} = \frac{z}{L}$	$\hat{t} = \frac{t}{T}$	$\hat{\psi} = \frac{\psi}{\omega_0 T} = (\hat{z} - \hat{t})$	—	—
کمیت های نرمالیزه شده	$\hat{L} = L \frac{U}{K}$	$\hat{R} = R \frac{L}{K}$	$\hat{\Re} = \frac{eDT^2}{m_e \epsilon_0} \Re = \omega_p^2 T^2 \Re$	$\hat{C} = (UK)$	$\hat{G} = G(ZK)$
متغیرهای وابسته	$\hat{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}$	$\hat{v} = \frac{v}{u_0}$	$\hat{E} = \frac{\epsilon_0}{L \rho_0} E$	$\hat{I} = \frac{C}{I_0} I$	$\hat{V} = \frac{C}{KI_0}$
مشتقات نسبت به Z و $\psi$	$\frac{\partial}{\partial \hat{z}} = \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial z}$		$\frac{\partial}{\partial \hat{\psi}} = \frac{1}{\omega_0 T} \frac{\partial}{\partial \psi}$	—	—
پارامترهای ثابت تعریف شده	$\square = \left(\frac{KI_0}{4V_0}\right)^{\frac{1}{3}}$		$I_0 = \rho_0 u_0 A$	$u_0 = \left(\frac{2eV_0}{m_e}\right)^{\frac{1}{2}}$	

$$\frac{d\tilde{V}_j}{dz} = -\frac{if_j\omega_0}{u_0}\tilde{V}_j - \frac{if_j\omega_0\tilde{K}(f_j\omega_0)}{\tilde{v}_{ph}(f_j\omega_0)}\tilde{I}_j \quad 13$$

$$\frac{d\tilde{I}_j}{dz} = -\frac{if_j\omega_0}{\tilde{K}(f_j\omega_0)\tilde{v}_{ph}(f_j\omega_0)}\tilde{V}_j - \frac{if_j\omega_0}{u_0}\tilde{I}_j + if_j\omega_0\tilde{\rho}_j \quad 14$$

$$\frac{d\tilde{E}_j}{dz} = -\frac{if_j\omega_0}{u_0}\tilde{E}_j + \frac{\tilde{\rho}_j}{\epsilon_0} \quad 15$$

$$\sum_{\substack{m,n \\ f_m+f_n=f_j}} \tilde{v}_m \frac{d\tilde{v}_n}{dz} = \frac{if_j\omega_0 e \tilde{K}(f_j\omega_0)}{m_e \tilde{v}_{ph}(f_j\omega_0)} \tilde{I}_j + \frac{e}{m_e} \Re(f_j\omega_0) \tilde{E}_j + if_j\omega_0 \tilde{v}_j - \sum_{\substack{m,n \\ f_m+f_n=f_j}} \frac{if_j\omega_0}{u_0} \tilde{v}_m \tilde{v}_n \quad 16$$

$$\sum_{\substack{m,n \\ f_m+f_n=f_j}} \tilde{v}_m \frac{d\tilde{\rho}_n}{dz} = if_j\omega_0 \tilde{\rho}_j - \frac{if_j\omega_0}{u_0} \sum_{\substack{m,n \\ f_m+f_n=f_j}} \tilde{v}_m \tilde{\rho}_n - \sum_{\substack{m,n \\ f_m+f_n=f_j}} \frac{d\tilde{v}_m}{dz} \tilde{\rho}_n \quad 17$$

روش تحقیق

حال با توجه به معادلات فوق می توان جواب های عددی متغیرها و پارامترهای مجهول را بدست آورد. هرگاه دو فرکانس  $f_1, f_2$  با اختلاف ۱ گیگاهرتز به یک لوله موج رونده (TWT)، ضمن اینکه این فرکانس ها در خروجی سیستم وجود دارند، رفتار غیر خطی لوله باعث می شود که پدیده هایی مانند تولید هارمونیک ها، فرکانس های ترکیبی، فرکانس های تفاضلی و جمعی و فرکانس های بین مدولاسیون هم بوجود بیایند. بنابراین برهم کنش غیرخطی بین امواج در محیط غیرخطی، TWT، می توانند به ایجاد سیگنال های جدید یا تغییر در سیگنال های موجود منجر شوند. این سیگنال ها شامل قسمت های زیر می شوند.

- ۱- فرکانس های اصلی (Original frequencies):  $f_1, f_2$
- ۲- فرکانس تفاضلی (Difference frequency):  $|f_1 - f_2| = 1\text{GHz}$
- ۳- فرکانس های جمعی (Sum frequency):  $f_1 + f_2$
- ۴- هارمونیک ها (Harmonics):  $2f_1, 3f_1, 3f_1, \dots, 2f_2, \dots$
- ۵- فرکانس های ترکیبی (Intermodulation products):  
 $2f_1 + f_2, 2f_1 + f_2, 2f_1 - f_2, 2f_1 - f_2$
- ۶- فرکانس های مرتبه بالاتر (Higher-order frequencies):  
 $3f_1 \pm f_2, 3f_2 \pm f_1$

این فرکانس ها به دلیل رفتار غیرخطی TWT بوجود می آیند. همانطور که در معادلات ۱۳ تا ۱۷ دیده می شود، پارامتر  $f_j$  بیانگر همان فرکانس های تولید در خروجی TWT است. که از رابطه ی زیر تبعیت می کند.

$$f_j = (mf_1 \pm nf_2) \quad 18$$

که در اینجا  $-\infty < j < \infty$ ،  $f_j = f_m + f_n$ ، به ازای  $n < m$ ،  $f_n < f_m$ ، اکنون شرایط اولیه

$$\tilde{v}_0(0) = u_0, \tilde{\rho}_0(0) = \rho_0, j=0, \tilde{E}_0 = \tilde{V}_0 = \tilde{I}_0 = 0 \text{ و } j \neq 0, \tilde{E}_j = \tilde{v}_j = \tilde{\rho}_j = 0$$

مقادیر پارامترهای در نظر گرفته شده در جدول ۲، همچنین اعمال شرایط اولیه متناسب با ویژگی های TWT و استفاده از روش عددی رانگ-کوتا مرتبه چهارم، سیستم های معادلات دیفرانسیل ۱۷-۱۳ حل می شوند (Sheykhe et al, ۲۰۱۸).

جدول ۲: جدول پارامترهای بکار رفته در حل عددی معادلات

Symbol	Beam construction parameters	symbol	Helix Construction parameters
$u_0$	Initial beam velocity , $m / s$	$L$	TWT circuit length, $m$
$\rho_0$	DC linear charge density, $c / m^3$	$G$	Conductance per unit length , $S / m$
$\Re$	Space charge reduction factor	$L$	Inductance per unit length , $H / m$
$A$	Cross section of electron beam, $m^2$	$\square$	Resistance per unit length, $\Omega / m$
$m_e$	Mass of the electron , $kg$	$K$	Circuit impedance, $\Omega$
$V_0$	DC beam voltage, <i>volt</i>	$R_h$	Helix radius, $m$
$I_0$	DC beam current , $Am$	$v_{ph}$	Cold circuit phase velocity, $m / s$
$R_b$	Beam radius, $m$	$w$	Helix Patch, $m$
$\omega_p$	Plasma frequency, $GHz$	$\square$	gain parameters
$\omega_0$	fundamental frequency, $GHz$	$\psi$	phase respect to cold circuit wave

اکنون رفتار خطی و غیر خطی TWT را در برابر فرکانس امواج ورودی مورد مطالعه قرار می دهیم.

الف: پاسخ خطی TWT به فرکانس ورودی

در این قسمت فرض بر این است که رفتار TWT نسبت به فرکانس ورودی خطی است، یعنی فرکانس خروجی TWT با فرکانس ورودی یکسان است. در شرایطی که سیستم به صورت خطی عمل می کند، اگر فقط یک فرکانس وجود داشته باشد،

$$\text{یعنی: } m=1, n=0, f_l = f_1$$

در این حالت معادلات ۱۳ تا ۱۷ به صورت زیر بیان می شوند.

$$\frac{d\tilde{V}_l}{dz} = -\frac{if_l\omega_0}{u_0}\tilde{V}_l - \frac{if_l\omega_0\tilde{K}(f_l\omega_0)}{\tilde{v}_{ph}(f_l\omega_0)}\tilde{I}_l \quad 27$$

$$\frac{d\tilde{I}_l}{dz} = -\frac{if_l\omega_0}{\tilde{K}(f_l\omega_0)\tilde{v}_{ph}(f_l\omega_0)}\tilde{V}_l - \frac{if_l\omega_0}{u_0}\tilde{I}_l + if_l\omega_0\tilde{\rho}_l \quad 28$$

$$\frac{d\tilde{E}_l}{dz} = -\frac{if_l\omega_0}{u_0}\tilde{E}_l + \frac{\tilde{\rho}_l}{\epsilon_0} \quad 29$$

$$\frac{if_l\omega_0}{u_0}\tilde{v}_l\tilde{v}_0 = \frac{if_l\omega_0 e\tilde{K}(f_l\omega_0)}{m_e\tilde{v}_{ph}(f_l\omega_0)}\tilde{I}_l + \frac{e}{m_e}\Re(f_l\omega_0)\tilde{E}_l + if_l\omega_0\tilde{v}_l \quad 30$$

$$\tilde{\rho}_0 \frac{d\tilde{v}_l}{dz} = if_l\omega_0\tilde{\rho}_l - \frac{if_l\omega_0}{u_0}\tilde{v}_l\tilde{\rho}_0 \quad 31$$

ب: پاسخ غیرخطی TWT به فرکانس ورودی

در این بخش، پاسخ غیرخطی TWT به فرکانس های ورودی را در نظر می گیریم. محصولات اعوجاج غیرخطی به صورت هارمونیک ( $\omega_1, \omega_2, \dots$ )، و برای عملکرد چند حامل، محصولات درون مدولاسیون ( $mf_1 \pm nf_2$ ) در خروجی تقویت کننده ظاهر می شوند [۷]. از آنجایی که این محصولات اعوجاج با نزدیک شدن به اشباع لوله برای دستیابی به حداکثر توان خروجی قابل توجه تر می شوند، پهنای باند قابل استفاده تقویت کننده و راندمان اساسی کاهش می یابد. در اینجا، ما محدوده فرکانس ۱ تا ۱.۶ گیگاهرتز را در نظر می گیریم. حال می خواهیم عملکرد لوله ای را که پاسخ غیرخطی به فرکانس های ورودی نشان می دهد، مطالعه کنیم (جدول ۳).

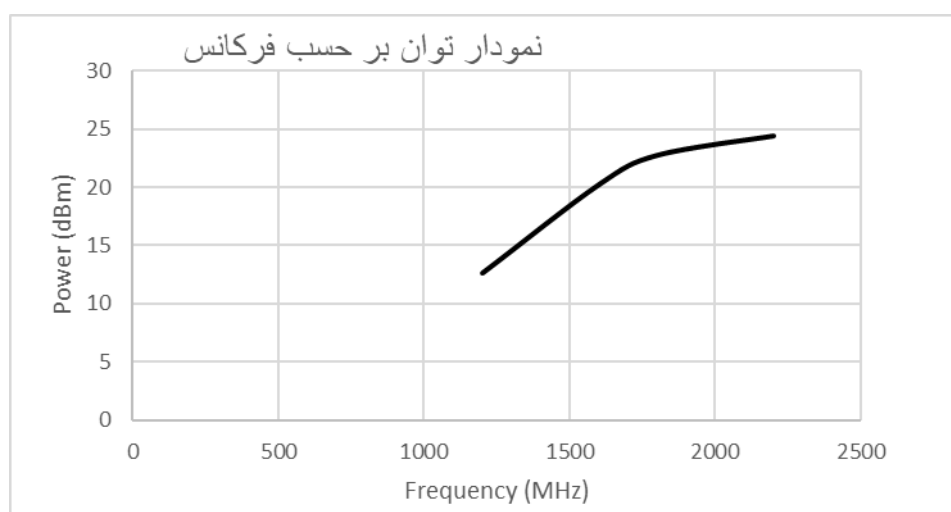
جدول ۳: جدول فرکانس های تولید شده در حالت غیر خطی



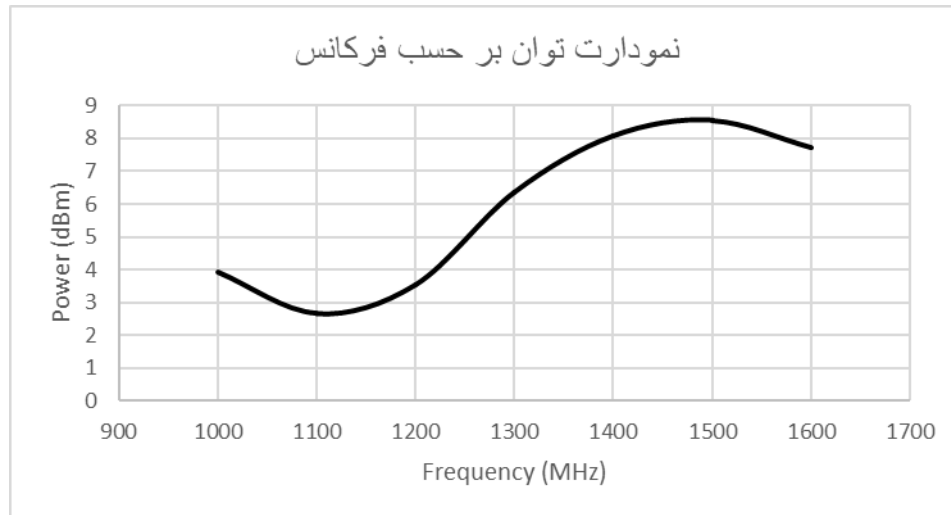


فرکانس های ورودی (MHz)	فرکانس های تولید شده توسط TWT			
	مرتبه اول	مرتبه دوم	مرتبه سوم	
فرکانس های موج ورودی			هارمونیکها	درون مدولاسیون
۱۰۰۰, ۱۰۰۱	۱۰۰۰, ۱۰۰۱	۱,۲۰۰, ۲۰۰۱, ۲۰۰۲	۳۰۰۰, ۳۰۰۳	۹۹۹, ۱۰۰۲, ۳۰۰۱, ۳۰۰۲
۱۱۰۰, ۱۱۰۱	۱۱۰۰, ۱۱۰۱	۱,۲۲۰, ۲۲۰۱, ۲۲۰۲	۳۳۰۰, ۳۳۰۳	۱۰۹۹, ۱۱۰۲, ۳۳۰۱, ۳۳۰۲
۱۲۰۰, ۱۲۰۱	۱۲۰۰, ۱۲۰۱	۱,۲۴۰, ۲۴۰۱, ۲۴۰۲	۳۶۰۰, ۳۶۰۳	۱۱۹۹, ۱۲۰۲, ۳۶۰۱, ۳۶۰۲
۱۳۰۰, ۱۳۰۱	۱۳۰۰, ۱۳۰۱	۱,۲۶۰, ۲۶۰۱, ۲۶۰۲	۳۹۰۰, ۳۹۰۳	۱۲۹۹, ۱۳۰۲, ۳۹۰۱, ۳۹۰۲
۱۴۰۰, ۱۴۰۱	۱۴۰۰, ۱۴۰۱	۱,۲۸۰, ۲۸۰۱, ۲۸۰۲	۴۲۰۰, ۴۲۰۳	۱۳۹۹, ۱۴۰۲, ۴۲۰۱, ۴۲۰۲
۱۵۰۰, ۱۵۰۱	۱۵۰۰, ۱۵۰۱	۱,۳۰۰, ۳۰۰۱, ۳۰۰۲	۴۵۰۰, ۴۵۰۳	۱۴۹۹, ۱۵۰۲, ۴۵۰۱, ۴۵۰۲
۱۶۰۰, ۱۶۰۱	۱۶۰۰, ۱۶۰۱	۱,۳۲۰, ۳۲۰۱, ۳۲۰۲	۴۸۰۰, ۴۸۰۳	۱۵۹۹, ۱۶۰۲, ۴۸۰۱, ۴۸۰۲

اکنون با حل معادلات ۱۳ تا ۱۷ برای حالت غیر خطی و همچنین حل معادلات ۱۹ تا ۲۳ برای حالت خطی توان خروجی سیستم بر حسب فرکانس بدست می آید که نمودار توان- فرکانس را در نمودار های ۱ و ۲ رسم شده اند.



نمودار ۱: توان خروجی TWT بر حسب فرکانس در حالت رفتار خطی سیستم



نمودار ۲: توان خروجی TWT بر حسب فرکانس در حالت رفتار غیر خطی

## بحث و نتیجه گیری

همانطور که در دو نمودار ۱ و ۲ مشاهده می شود تفاوت در توان خروجی بین (TWT) با رفتار خطی و غیرخطی به دلیل چگونگی مکانیزم تقویت سیگنال در این لوله ها است. بعنوان مثال در فرکانس ۱۴۰۰GHz اختلاف بین توان خروجی در نمودار ۲ که مربوط به TWT با رفتار غیر خطی است تقریباً نصف توان خروجی در همان لوله اما با رفتار خطی می باشد. این اختلاف بیانگر این است که در لوله های با رفتار خطی، تقویت سیگنال به صورت خطی انجام می شود، یعنی نسبت تقویت سیگنال ورودی به سیگنال خروجی ثابت است و تغییرات سیگنال ورودی به طور مستقیم و بدون اعوجاج به خروجی منتقل می شود. در این حالت، انرژی الکترون های پرتو در لوله به طور کارآمد به انرژی امواج الکترومغناطیسی تبدیل می شود و تلفات انرژی کمتری وجود دارد. به همین دلیل، توان خروجی در لوله های خطی بیشتر است. این در حالی است که در TWT های با رفتار غیرخطی، تقویت سیگنال به صورت غیرخطی انجام می شود. به این معنی که نسبت تقویت سیگنال ورودی به خروجی ثابت نیست و ممکن است اعوجاج هایی در سیگنال خروجی ایجاد شود. در فرکانس های بالا (مانند ۱۴۰۰ گیگاهرتز)، اثرات غیرخطی مانند تولید هارمونیک ها، اعوجاج فاز و کاهش بازدهی انرژی بیشتر می شود. این پدیده ها باعث می شوند بخشی از انرژی سیگنال به جای تقویت، به صورت گرما یا هارمونیک های ناخواسته تلف شود.



## منابع

Pierce, J. R. (۱۹۵۰), Traveling Wave Tubes, D. Van Nostrand, New York.

Kompfner, Rudolf (November ۱۹۶۴). The Invention of the Traveling-Wave Tube. San Francisco Press. p. ۳۰. ISBN ۹۷۸-۰-۹۱۱۳۰۲۰۱۱.

Aarti Singh, John E. Scharer, John H. Booske, John G. Wöhlbier.(۲۰۰۵) “ Second- and Third-Order Signal Predistortion for Nonlinear Distortion Suppression in a TWT ”IEEE Transactions on Electron Devices , Volume: ۵۲, ۷۰۹ - ۷۱۷, May ۲۰۰۵.

J. G. Wöhlbier, J. Booske and Ian Dobson.( June ۲۰۰۲) “The Multi-Frequency Spectral Eulerian (Muse) Model Of A Traveling-Wave Tube,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol ۳۰, No ۳.

John A. David ; Carol L. Kory ; Hien T. Tran ; R. Lawrence Ives ; David Chernin.( ۲۰۰۷)“ Enhanced Features for Design of Traveling Wave Tubes Using CHRISTINE-۱D ” IEEE Transactions on Plasma Science , Vol: ۳۵, Issue: ۴, pp.۱۰۵۶ - ۱۰۶۴.

Sascha Meyne.( ۲۰۱۶) “Simulation and Design of Traveling-Wave Tubes with Folded-Waveguide Delay Lines” Doctor of Philosophy's thesis, Technical University of Hamburg-Harburg.

Aarti Singh.( ۲۰۰۳)“Experimental Investigation of TWT Nonlinearities and Distortion Suppression by Signal Injection” A thesis for the degree of Master of Science,University of Wisconsin – Madison.

V. Srivastava, S.N. Joshi .( ۱۹۹۲).“Improved Nonlinear Model for Multi-Signal Analysis of Helix TWTs” IEE proceedings-h, vol. ۱۳۹, no. ۲, April.

J. G. Wöhlbier (۲۰۰۳)“Nonlinear Distortion and Suppression in Traveling wave tubes: Insights and Methods”. Doctor of Philosophy's thesis, University of Wisconsin-Madison.

Sheykhe, F., Saviz, S., Salem, M.(۲۰۱۸)“ Investigating variations of the electron beam voltage on the traveling wave tube output power in the different frequencies”, Journal of Theoretical and Applied Physics, Vol. ۱۲ No. ۳ (۲۰۱۸) .



## Comparison of output power in terms of input wave frequencies in traveling wave tubes in linear and nonlinear tube behaviors

Fayeq, Sheykheh

Department of physics, Sanandaj branch, Islamic Azad university, Sanandaj, Iran

### Abstract

Traveling Wave Tubes (TWT) as one of the main components in electronic and telecommunication systems play an important role in signal amplification and processing. This paper investigates and compares the linear and nonlinear behavior of a traveling wave tube against the frequency of the input waves. By solving the equations governing the behavior of an active tube, the linear response of the tube is first interpreted, in which the output of the tube is considered to have minimal distortion and harmonics. Next, the nonlinear behavior of the tubes, which is accompanied by significant production of high-order harmonics and distortion, is interpreted, and finally the output power of the two linear and nonlinear modes is compared in terms of frequency. This analysis can be used to optimize the design of traveling wave tubes for various applications, including telecommunication and radar systems.

**Keywords:** “Traveling Wave Tubes (TWT)”, “linear and nonlinear”, “output power”, “Frequency”.