

انتخاب مناسب تقویت کننده ماکروویو برای ماهواره

ماهواره مخابراتی یک ماهواره مصنوعی است که سیگنال ارتباطات رادیویی را از طریق یک فرستنده تقویت و بازپخش می‌کند. این ماهواره‌ها معمولاً از این قسمت‌ها تشکیل شده‌اند: (۱) زیر سیستم مخابراتی شامل ترنسپوندر، آنتن و سیستم سوئیچینگ، (۲) موتورهایی جهت قرار دادن ماهواره در مدار دلخواه، (۳) زیرسیستم پایدارساز جهت تثبیت حرکت ماهواره در مدار اصلی خود، (۴) زیر سیستم تغذیه ماهواره و (۵) زیر سیستم فرمان و کنترل. بحث در مورد مقایسه لامپ‌های ماکروویو (TWTA) و تقویت کننده‌های حالت جامد (SSPA) از نظر قابلیت اطمینان برای استفاده در ماهواره سابقه‌ای طولانی دارد. مطالعات بسیاری در مورد مقایسه بین SSPAها و TWTAها انجام شده است که اساس همه آن‌ها داده‌های حاصل شده از تست عمر ترانزیستور بر روی زمین برای SSPAها است. دلیل آن فقدان داده‌های آماری هنگام کار در مدار است. در این مقاله ضمن انجام مطالعه‌ای آماری بر روی عملکرد مداری ماهواره، مقایسه‌ای کاربردی با هدف انتخاب ساختار مناسب‌تر برای تقویت کننده ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: TWTA، SSPA، قابلیت اطمینان مداری

مهدی عالمی رستمی*، استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

*نویسنده مخاطب، آدرس تهران، کد پستی: ۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱

alemi@ari.ac.ir

Selecting the Microwave Amplifier for the Satellite Application

A communications satellite is an artificial satellite that relays and amplifies radio telecommunications signals via a transponder; it creates a communication channel between a source transmitter and a receiver on different locations on Earth. Communications satellites are used for television, telephone, radio, internet, and military applications. Communications satellites are usually composed of the following subsystems: 1) Communication payload, normally composed of transponders, antennas, and switching systems; 2) Engines used to bring the satellite to its desired orbit; 3) Station keeping tracking and stabilization subsystem used to keep the satellite in the right orbit; 4) Power subsystem, used to power the satellite systems, normally composed of solar cells; and 5) Command and control subsystem. There has been longstanding debate regarding the comparative reliability of solid-state power amplifiers (SSPAs) versus traveling wave tube amplifiers (TWTAs) for the satellite downlink. Many trade studies on comparing SSPAs and TWTAs rely on transistor device life test data on the ground for SSPAs due to the lack of statistically significant data on orbit. It is expected that the current on-orbit statistics in the industry shed relevant light on the debate.

Keywords: SSPA, On-orbit Reliability, Traveling Wave Tube Amplifiers (TWTA)

M. Alemi Rostami*, Assistant Professor. Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology

*Corresponding Author, Postal Code: 1465774111, Tehran, IRAN
alemi@ari.ac.ir

مقدمه

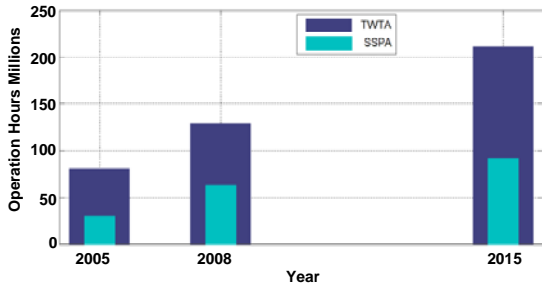
ماهواره‌های مخابراتی امکان ایجاد ارتباطات سریع و ارزان را در جهان فراهم کرده‌اند. روزی نمی‌توان یافت که در آن دست کم یک بار از ماهواره‌های مخابراتی استفاده نکرده باشیم. ماهواره‌ها نقش فعالی در زمینه ارتباطات ایفا می‌کنند [۱]. ماهواره مخابراتی سیگنال‌هایی که از رسیده به زمین را تقویت و به مکان دیگری روی زمین منعکس می‌کند. ماهواره‌های مخابراتی از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند که مهمترین آن‌ها سامانه‌های تله‌متری، کنترل وضعیت، کنترل حرارت، تغذیه و تأمین توان و محموله‌های مخابراتی هستند [۲]. یکی از اجزای مهم محموله مخابراتی، بخش تقویت‌کننده توان آن است. شرکت بووینگ^۱ به‌عنوان بزرگترین شرکت تولیدکننده ماهواره‌های مخابراتی بیشترین اطلاعات را در زمینه کارکرد ماهواره در جهان ارائه کرده است [۳]. این شرکت، از بین ۲۵۸ ماهواره مخابراتی موجود در فضا نزدیک به ۱۱۴ ماهواره را در اختیار دارد. TWTA^۲ های مورد مطالعه دارای EPC^۳ های ساخت شرکت ال تری کامیونیکیشن^۴ است که سابقه همکاری با شرکت تالس^۵ فرانسه و نک^۶ را دارد [۴].

در ماهواره‌های مخابراتی از انواع مختلفی از تقویت‌کننده‌های توان استفاده می‌شود که دو دسته مهم آن‌ها لامپ‌های ماکروویو (TWTA) و تقویت‌کننده‌های حالت جامد (SSPA^۷) هستند. بحث در مورد مناسب‌تر بودن کدام یک از این تقویت‌کننده‌ها از نظر قابلیت اطمینان برای ماهواره، سابقه‌ای طولانی دارد. تمام مقایسه‌های گذشته بین این دو تقویت‌کننده بر مبنای داده‌های به‌دست آمده از تست این تقویت‌کننده‌ها بر روی زمین حاصل شده است. در این مقاله مطالعه‌ای آماری بر روی عملکرد مدارهای ماهواره انجام شده است و براساس آن، مقایسه‌ای بین انواع تقویت‌کننده‌ها صورت گرفته است.

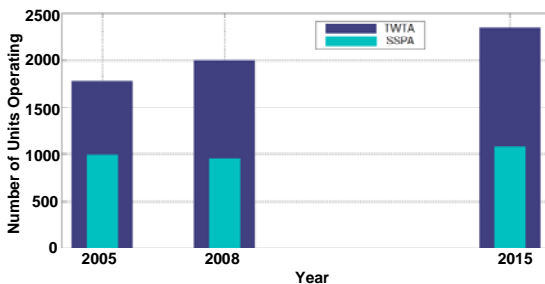
مطالعات آماری

داده‌های جمع‌آوری شده از اواسط ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۱۵ برای مجموعاً ۲۳۴۵ ماژول TWTA با مجموع ۲۱۱ میلیون ساعت کارکرد مداری و ۱۰۷۶ ماژول SSPA با مجموع ۹۲ میلیون ساعت کارکرد مداری است. شکل (۱) تعداد و شکل (۲) زمان کارکرد ماهواره‌ها را در مدار بر حسب سال نمایش می‌دهد.

1. Boeing
2. Travelling Wave Tube Amplifier
3. Electronic Power Conditioner
4. L3-Communication
5. Thales
6. NEC
7. Solod State Power Amplifier



شکل ۱ - ساعت عملکرد تقویت‌کننده‌های مخابراتی بر حسب سال در مدار



شکل ۲ - تعداد تقویت‌کننده در مدار در سال‌های مختلف

بحث اصلی در مورد قابلیت اطمینان TWTA و SSPA می‌باشد. ولتاژ بالا، پدیده ترموبونیک^۸، زمان ارسال سیگنال و عملکرد محیط خلأ مهمترین چالش‌ها در مورد قابلیت اطمینان است. در نگاه اول می‌توان استنباط کرد که SSPA به صورت ذاتی قابلیت اطمینان بالایی دارد. زیرا، SSPA برای تقویت‌کنندگی تنها به ولتاژ پایین نیاز دارد و این موضوع سبب کاهش چشمگیر شکست در کار می‌شود [۵].

اشاره به این موضوع حائز اهمیت است که بسیاری از مطالعات مقایسه‌ای بین SSPA و TWTA بر پایه عملکرد زمینی و عدم داده‌های مداری انجام شده است. بنابراین، توجه به عملکرد این ادوات در فضا اهمیت خاصی دارد. میزان خرابی تقویت‌کننده‌ها در ماهواره‌ها به صورت شکل (۳) است. این شکل درصد ماهواره‌های دارای خرابی صفر، یک، دو یا بیشتر را نشان می‌دهد. حدود ۱۳ درصد از ماهواره‌ها دارای یک خطا هستند. ۸۳ درصد TWTAها و ۸۰ درصد SSPAها بدون خطا بوده‌اند. تنها تعدادی از SSPAها بیشتر از دو خطا داشته‌اند که ۹ درصد کل ماهواره‌ها را تشکیل می‌دهند.

توزیع TWTAها و SSPAها براساس فرکانس مطابق شکل (۴) است. بیشتر TWTAها در باند Ku بوده و بیشتر خطاهای آنها نیز در همین باند است. SSPAها بیشتر در باند C کار می‌کنند. بیشتر خطاهای آنها نیز در همین باند روی می‌دهد. ۶۸ درصد لامپ‌های TWTA در باند Ku و ۷۰ درصد SSPAها در باند C هستند. مسئله مهم دیگر این است که

8. Thermionic Emission

مربوط به TWTA است، برابر x باشد. در سطر اول جدول خطاهای اتفاق افتاده برای کلیه باندهای فرکانسی تمامی تقویت‌کننده‌ها (TWTAها و SSPAها) نشان داده شده است. جدول (۱) نشان می‌دهد که تعداد خطاهای اتفاقی برای TWTA حداقل ۸۷ بار کمتر از SSPA است. درحالی که خطاهای تصادفی و غیرتصادفی مد نظر باشد، آنگاه خطا برای TWTA حداقل ۶۰۹ بار کمتر از SSPA است. مقدار x برای TWTA به دلیل نداشتن خطای تصادفی در TWTAها همواره ثابت است. اگر این مقایسه در باند C انجام شود که SSPAها دارای جمعیت غالب در این باند هستند، آمار خرابی بسیار بدتر است. توان تولیدی و فرکانس کاری TWTAها قابل مقایسه با SSPA در فرکانس کاری خود نیست. SSPAها به طور متوسط ۶۶ وات کمتر از TWTAها در باند C توان تولید می‌کنند [۶].

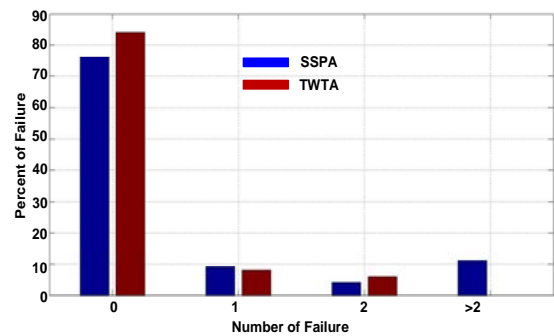
جدول ۱- نتایج خطاهای تصادفی و غیرتصادفی TWTA و SSPA [۶]

		TWTA	SSPA
کل	خطاهای تصادفی	X	X+87
	خطاهای غیرتصادفی	X	X+435
تقویت‌کننده‌ها	خطاهای تصادفی	X	X+297
	خطاهای غیرتصادفی	X	X+609

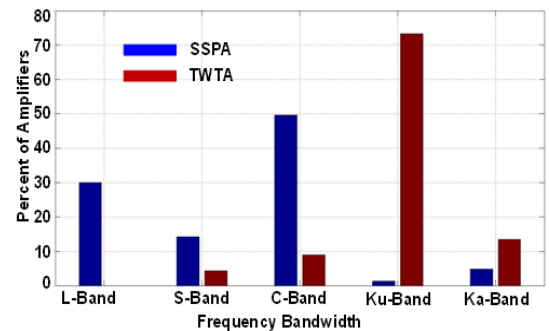
برای توان و فرکانس‌های بالا فناوری SSPA به سادگی در دسترس نیست. برای توان رادیویی بالا، حفظ درجه حرارت برای عملکرد مناسب در هر دو فناوری اهمیت دارد. لامپ‌های TWTA به صورت ذاتی تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد کار می‌کنند. در صورتی که در SSPAها دمای اتصال پیوند حداکثر حدود ۲۵۰ درجه است. در نتیجه بازده دمایی برای TWTAها بالاتر از SSPAهاست. اختلاف برای دمای عملکرد در TWTA حدود ۱۲۰ درجه سانتیگراد است. بنابراین، در مجموع هیت سینک^۹ و سیستم خنک‌کنندگی مجزا برای TWTA نیاز نیست و این لامپ از طریق تشعشع یا قراردادن یک هیت سینک پره‌ای کوچک خنک می‌شود [۷-۹].

شکل (۵) خطاهای اتفاق افتاده در SSPAها را نشان می‌دهد. ۸۰ درصد این خطاها، گزارش قطع ناگهانی توان^{۱۰} است. این مشکل به سبب از دست دادن توان نیست. حدود ۶ درصد اتفاقات به دلیل از دست رفتن تغذیه به وجود آمده است. برای TWTAها این مقدار کمتر بوده است. عموماً خطاهای موجود در TWTAها ناشی از قطع توان (تغذیه) در ماهواره است.

TWTAها به طور متوسط ۷۰ وات بیشتر از SSPAها در باند خودشان تولید توان می‌کنند.



شکل ۳- میزان خرابی تقویت‌کننده‌ها در ماهواره‌ها



شکل ۴- توزیع TWTAها و SSPAها براساس فرکانس

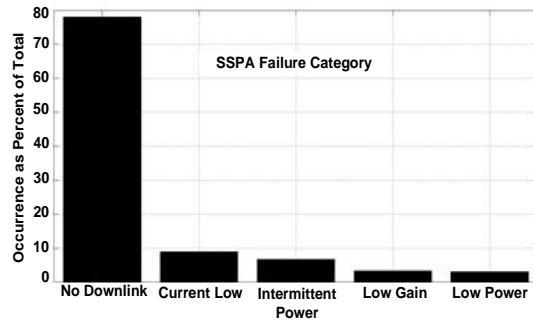
برخی از پارامترهای ماهواره مانند ولتاژ لینک، جریان مصرفی ماژول‌ها، توان مصرفی و غیره توسط لینک ماهواره برای ایستگاه زمینی ارسال می‌شود. بنابراین، با تجزیه و تحلیل داده‌های ارسالی از ماهواره برخی از خطاها را می‌توان مشخص کرد. خطاهای موجود در تقویت‌کننده‌ها به دو دسته خطاهای تصادفی و غیرتصادفی تقسیم می‌شوند. خطاهای تصادفی دارای منشأ و دلیل مشخصی نیستند و خطاهای غیرتصادفی دارای دلیل مشخص هستند. در نتیجه می‌توان این نوع خطاها را در طراحی‌های بعدی حذف کرد. خطاهای TWTAها بیشتر از نوع غیرتصادفی و خطاهای SSPAها بیشتر تصادفی هستند. کلیه مطالعات خطاها در یک بازه زمانی مشخص اتفاق می‌افتد.

عملکرد نامناسب و قطع شدن تقویت‌کننده، توان مأموریتی ماهواره را دچار مشکل می‌کند. بنابراین، از نظر مهندسی سیستم در طراحی ماهواره بین دو خطا تفاوت خاصی وجود ندارد و مجموع دو خطا برای محاسبات قابلیت اطمینان مد نظر قرار می‌گیرد.

جدول (۱) نتایج خطاهای TWTA و SSPA در ماهواره‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. فرض کنید مقدار شکست‌های قابل قبول براساس حداقل خطاهای موجود که

9. Heat Sink
10. No Downlink

و SSPA حدود ۲۷۷ درصد رشد داشته است. در ضمن توان خروجی برای لامپ TWTA در باند C در این بازه زمانی رشد حدود ده برابری را نشان می‌دهد. از نظر پهنای باند SSPAها دارای پهنای کمتر از ۱۰۰MHz هستند و سه تا از SSPA با بیشترین پهنای باند حدود ۸۶MHz هستند. بالاترین پهنای باند برای لامپ TWTA برای باند Ku حدود ۸۰۰MHz و برای باند Ka حدود ۲۵۰MHz است. از نظر اندازه و وزن، SSPA به تنهایی از مجموع TWTA و مدولاتور آن، کوچکتر است. در توان‌های بالا SSPA نسبت به TWTA دارای بازده پایین‌تری است و همچنین برای خنک‌کاری نیاز به هیت سینک دارد. در نتیجه در یک توان مشابه، SSPA در مجموع از لامپ بزرگتر و سنگین‌تر می‌شود. TWTA در توان‌های پایین نیاز به هیچ گونه خنک‌کاری ندارند. در جدول (۲) جمع‌بندی پارامترهای مختلف بر روی TWTAها و SSPAها ارائه شده است.



شکل ۵- توزیع خطاها در SSPAها

از نظر توان خروجی در سال ۱۹۹۱ حداکثر توان خرجی در باند Ku توسط TWTAها حدود ۷۰ وات و حداکثر توان خروجی در باند C برای SSPAها حدود ۱۸ وات بوده است. در سال ۲۰۱۵ حداکثر توان خرجی در باند Ku توسط TWTAها حدود ۲۵۰ وات و حداکثر توان خرجی در باند C برای SSPAها حدود ۵۰ وات بوده است. TWTA حدود ۳۵۷ درصد

جدول ۲- جمع‌بندی مزایا و معایب TWTA و SSPA

SSPA		TWTA		عملکرد
معایب	مزایا	معایب	مزایا	
			عموماً دارای توان بالا	توان خروجی قابل دسترس
جریان بالا		ولتاژ بالا	دارای بازده بالاتر	بازده
هیت سینک سبب افزایش ابعاد کلی نسبت به TWTA می‌شود.	ماژول SSPA به تنهایی کوچکتر هستند.		TWTA کوچکتر هستند.	وزن و ابعاد
تلفات حرارتی یکی از مشکلات اصلی			اتلاف حرارتی در سطح بزرگی انجام می‌شود.	حرارت تلفاتی
بخش تغذیه قابلیت اطمینان کمتری نسبت به ماژول تقویت‌کننده دارد.	زمان عملکردی بسیار بالاتری دارد - حدود یک میلیون ساعت	لامپ محدوده زمان عملکردی کمتری نسبت به SSPA دارد. حدود دویست هزار ساعت	سال‌های بسیاری با قابلیت اطمینان بالا در فضا کار کرده‌اند	قابلیت اطمینان
نیاز به جبران‌سازی دمایی دارند.			نسبت به تغییرات دما و تشعشع بسیار پایدار هستند	پایداری دمایی و تشعشع کیهانی
	عموماً باند C		عموماً Ku و Ka	باند فرکانسی
کمتر از ۱۰۰ مگا هرتز			حدود ۸۰۰ مگا هرتز	پهنای باند

قابلیت اطمینان، باند فرکانسی، توان، وزن و ابعاد، راندمان، پایداری در برابر تشعشع و زمان کارکرد آن‌هاست. نتیجه این مقایسه بدین شرح حاصل شد:

- TWTA دارای خطای خیلی کمتر از SSPA هستند و در نتیجه قابلیت اطمینان بالاتری دارند. گرچه برای خطی کردن و افزایش محدوده دینامیکی TWTAها نیاز به یک ماژول مجزا است ولی این ماژول تأثیری روی قابلیت اطمینان ماهواره ندارد.

نتیجه‌گیری

TWTA و SSPA دو نوع از تقویت‌کننده‌های توان رایج در ماهواره‌ها هستند. هر کدام از این تقویت‌کننده‌ها ویژگی‌هایی دارند که آن را برای استفاده در کاربردی خاص مناسب می‌کند. بنابراین انجام یک مقایسه میان پارامترهای مختلف این دو تقویت‌کننده می‌تواند راهنمای مناسبی برای انتخاب نوع تقویت‌کننده در کاربردهای مختلف باشد. این پارامترها شامل

- Plasma Science*, Vol. 30, No. 3, 2003, pp. 1238–1264.
- [5] Doshi, R. J., D. Ghodgaonkar, D. K. Singh, P. S. Bhardhwaj and D.K. Das, "Compensation Technique to Improve the Reliability of SSPA for Space Applications," *9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, Gwalior, 2014, pp. 1-4.
- [6] Nicol, E. F., B. J. Mangus, J. R. Grebliunas, K. Woolrich and J. R. Schirmer, "TWTA Versus SSPA: A Comparison Update of the Boeing Satellite Fleet on-Orbit Reliability," *IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, Paris, 2013, pp. 1-2.
- [7] Dong Ge and Hu Boxiong, "Methods to Improve the Phase Stability of High-Power TWTA," *IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Beijing, 2016, pp. 150-152.
- [8] Nicol, E.F., J. Robison, R. Ortland, A. Ayala and G.S. Saechao, "TWTA On-Orbit Reliability for Space Systems Loral Satellite Fleet," *IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, Monterey, CA, 2016, pp. 1-2.
- [9] Robbins, N. R., W. L. Menninger, Xiaoling Zhai and D. E. Lewis, "Space Qualified, 150–300-Watt K-Band TWTA," *IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, Monterey, CA, 2016, pp. 1-2.

- در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰ مگاهرتز و توان‌های بالاتر از ۵۰ وات SSPA با وزن پایین و راندمان بالا وجود ندارد. در نتیجه در این شرایط از TWTA استفاده می‌شود. در توان‌ها و فرکانس‌های پایین‌تر، هر دو فناوری قابل استفاده هستند.
- پایداری دو فناوری در برابر تشعشع تقریباً با یکدیگر برابر است.
- زمان کارکرد برای TWTAها حدود دویست هزار ساعت و برای SSPAها حدود یک میلیون ساعت است.

مراجع

- [1] Komm, D. S., R. T. Benton, H. C. Limburg, W. L. Menninger and X. Zhai, "Advances in Space TWT Efficiencies," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 48, No. 1, 2001, pp. 174–176.
- [2] Weekley, J. M. and B. J. Mangus, "A Comparison of on-Orbit Reliability Data," *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, 2004, p. 263.
- [3] Available, [Online]: Data Collected from The Satellite Encyclopedia <http://www.tbs-satellite.com/tse/online/>
- [4] Petillo, J. and *et al.*, "The MICHELLE Three-Dimensional Electron Gun and Collector Modeling Tool: Theory and Design," *IEEE Transactions on*