

وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات
پژوهشگاه ارتباطات
و فناوری اطلاعات



رویکرد جهانی استفاده از فناوری تقویت‌کننده های نیمه‌هادی (SSPA) در ماهواره‌ها

پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات

WWW.ITRC.AC.IR



چکیده

تقویت کننده های توان، از مهم ترین و در عین حال گران ترین بخش های سیستم های مخابراتی هستند. اکثر این سیستم ها نیاز به تقویت کننده های ارزان و با قابلیت اطمینان بالا دارند. SSPA و TWTA ها، دو دسته کلی از تقویت کننده های توان با تکنولوژی ساخت متفاوت می باشند.

TWTA ها بدلیل توان خروجی و بازدهی بالا، در محموله های مخابراتی GEO و همچنین ایستگاه های زمینی در باندهای Ku و Ka کاربرد دارند. در حال حاضر، سهولت ساخت، قیمت پایین و ایمنی استفاده به دلیل ولتاژ پایین و جریان بالا در SSPA ها، موجب گردیده است که این تقویت کننده ها در کاربردهای زمینی و ماهواره های LEO در باندهای فرکانسی X، L و C مورد استفاده قرار گیرند.

تکنولوژی ساخت تقویت کننده های TWTA، انحصاراً در اختیار چند کشور محدود است و به همین دلیل جزء یکی از اقلام بسیار گران قیمت برای سایر کشورها به حساب می آید. از همین رو، تلاش ها به منظور یافتن راه حل های جایگزین از سال ها قبل در سطوح بین المللی آغاز شده است. با ظهور ترانزیستورهای تطبیق نیافته گالیوم نیتراید (GaN) نسل جدید با بازدهی بالا در باند فرکانسی بالاتر از X، امکان ساخت SSPA با بازدهی بالا به منظور بکارگیری در پروژه های فضایی مطرح گردید. علاوه بر کاربردهای ماهواره ای در حال حاضر، تقویت کننده های SSPA در ایستگاه های زمینی، رادارها، هوافضا و حوزه های مختلف نظامی کاربرد دارند. با به کارگیری تقویت کننده های SSPA با بازدهی بالاتر، در مصرف توان صرفه جویی شده و همچنین خنک کاری سیستم بسیار آسان تر می گردد.

در این راستا و همگام با روند پیشرفت تکنولوژی جهانی، استفاده از SSPA به جای TWTA در سیستم های مخابراتی به ویژه ارتباطات ماهواره ای می تواند به یک فناوری کلیدی تبدیل شود؛ به گونه ای که در اکثر موارد استفاده و در مکان های مختلف گزینه ای مناسب برای برقراری ارتباط باشد.

با توجه به ساخت و پرتاب ماهواره های LEO و برنامه ریزی کلان برای ساخت ماهواره ملی GEO در کشور و عدم امکان تأمین TWTA برای محموله مخابراتی، بومی سازی طراحی و ساخت SSPA با بازدهی بالا یک ضرورت راهبردی است.

پس از حمایت های وزارت ارتباطات در پیشبرد برنامه راهبردی بومی سازی ساخت تقویت کننده های SSPA در این پژوهشگاه و موفقیت در ساخت نمونه های مهندسی تقویت کننده های ۵۰ وات و ۱۰۰ وات باند Ku، می توان عنوان داشت در صورت تحقق حمایت های مورد نیاز و با توجه به دانش کسب شده در این پژوهشگاه، ساخت نمونه فضایی تقویت کننده های یاد شده با بهبود مشخصات عملکردی آنها در این پژوهشگاه امکان پذیر است. از طرف دیگر، با توجه به افزایش فرکانس کاری و روند بهره برداری از باندهای فرکانسی بالاتر از جمله Ka در ماهواره ها، امکان طراحی و ساخت تقویت کننده های این باند فرکانسی نیز در این پژوهشگاه مهیا می باشد. همچنین، با استفاده از تکنولوژی به دست آمده، امکان ساخت تقویت کننده های مشابه برای ایستگاه های زمینی نیز که امروزه از چالش های ارتباطات ماهواره ای است، وجود دارد. در حال حاضر علاوه بر کاربردهای فضایی، تقویت کننده های SSPA در ایستگاه های زمینی ماهواره، رادارها، حوزه های مختلف نظامی نیز کاربرد دارند که استفاده از تجربیات و تخصص این پژوهشگاه، موجب تسریع در فرآیند دسترسی به محصول بومی در این حوزه ها و رفع چالش مراکزی از قبیل سازمان فضایی ایران، پژوهشگاه فضایی ایران، سازمان صدا و سیما و مراکز نظامی می گردد.

پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات با توجه به پیشگامی در حوزه طراحی و ساخت تقویت کننده SSPA با بازدهی بالا به واسطه تجربیات خود در سال های گذشته و تخصص و دانش فنی حاصل از پروژه های منجر به ساخت نمونه، می تواند در جهت حرکت به سمت بومی سازی و همچنین رفع نیاز کشور به تقویت کننده های SSPA، ایفای نقش نماید.

۱- مقدمه

بخش تقویت کننده های توان RF که وظیفه تامین توان خروجی سیستم های مخابراتی را برعهده دارند، یکی از کلیدی ترین اجزاء در فرستنده های مخابراتی می باشند که ۸۰ تا ۹۰ درصد توان مصرفی سیستم را به خود اختصاص می دهند. TWTA ها و SSPA ها دو گزینه اصلی برای تقویت کننده های توان در ماهواره ها هستند. مزیت اصلی استفاده از TWTA ها، قابلیت تامین توان خروجی بیشتر و بازدهی انرژی بالاتر، به عنوان دو پارامتر با اهمیت بالا در

محموله های مخابراتی فضایی، به ویژه در باندهای فرکانسی بالا است. اگرچه TWTAها از گذشته در این دو زمینه برتری قابل ملاحظه ای نسبت به SSPAها داشته اند، لیکن دچار مشکلاتی هستند که موجب می شوند تا تلاش ها برای افزایش توان خروجی و بازدهی انرژی SSPAها به منظور گسترش به کارگیری آنها در فضا جریان داشته باشد. علاوه بر مشکلات عمومی استفاده از TWTAها برای کمپانی های مختلف در دنیا، استفاده از آنها در کشور ما مشکلات خاص خود را دارد. این نوع تقویت کننده ها بسیار گران قیمت بوده و به دلیل کاربردهای خاص در صنایع نظامی و دارای تکنولوژی به روز، در رده کالاهای تحریمی برای ایران قرار دارند و تهیه آنها در بازار بین المللی چالش برانگیز است. لذا، تامین TWTA به عنوان گلوگاه اصلی ساخت یک ترانسپوندر ماهواره ای در کشور ما به شمار می رود. البته از دهه های گذشته (دهه ۱۹۸۰) تقویت کننده های توان Solid State با بازدهی بالا در باندهای فرکانسی پائین تر و توان های کمتر، جانشین لامپ های TWTA در ترانسپوندرهای ماهواره شده اند. امروزه با ظهور تکنولوژی GaN و همچنین نمونه های موفق تقویت کننده های SSPA با استفاده از روش ترکیب توان فضایی، پیش بینی می شود که توان خروجی و بازدهی انرژی SSPAها افزایش یافته و در آینده نزدیک در باندهای بالاتر (همچون Ku، Ka و ...) نیز SSPAها جانشین تقویت کننده های توان TWTA خواهند شد. با این جایگزینی، تقویت کننده هایی با دسترسی راحت تر، ارزان تر، سبک تر و با ابعاد کوچک تر در محموله های فضایی به کار گرفته می شوند و به این ترتیب امکاناتی را برای پیشرفت جنبه های دیگر ماهواره ها فراهم می کنند.

به نظر می رسد که ظهور GaN و ترکیب توان فضایی برای کشور ما فرصتی است که می توان با استفاده از آن با تکنولوژی روز دنیا همگام شده و علاوه بر آن یکی از گلوگاه های مهم ساخت ترانسپوندر بومی را پشت سر گذاشت.

با توجه به مطالب یاد شده، در این گزارش، ابتدا روند و ویژگی های تقویت کننده های مورد نیاز ماهواره های امروزی بررسی می شود. پس از آن به معرفی جزئی تر TWTAها و SSPAها پرداخته می شود و روند تکنولوژی آنها و همچنین مزایا و معایب به کارگیری آنها مورد بررسی و مقایسه قرار می گیرد. در ادامه، طرح ها و توانمندی های تولید کننده های تقویت کننده های فضایی در زمینه SSPAها آورده می شود؛ و در انتها، محصولات SSPA ساخته شده در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات معرفی و با محصولات مشابه کمپانی های بزرگ مقایسه می شوند. علاوه بر آن، دستاوردها و همچنین برنامه های آتی پژوهشگاه در این حوزه نیز ارائه می گردند.

۲- روند الزامات تقویت کننده های فضایی

با توجه به بررسی ها و مطالعات گسترده، اطلاعاتی در خصوص روند نیاز به تقویت کننده ها در ماهواره ها، از کمپانی Thales که یکی از بزرگترین تولیدکننده های قطعات مختلف ماهواره می باشد، حاصل گردید که خلاصه آن در ادامه آمده است.

برای چندین دهه، پخش تلویزیون دیجیتال با استفاده از ماهواره های GEO، سهم غالب بازار ارتباطات ماهواره ای را در اختیار داشته است. چنین ماهواره هایی اغلب دارای چندین محموله برای پوشش بیم های مختلف و عموماً با ابعاد بزرگ مانند اروپای غربی، آسیای شرقی و ... بوده اند. عمده ی این ماهواره ها در باند C و یا Ku عمل کرده و از آنجایی که مأموریت اصلی آنها پخش تلویزیونی بوده است، نیازی به برقراری ارتباط دو طرفه نداشته اند. برای چنین نیازی، از منظر تقویت کننده های توان، فراهم کردن تقویت کننده هایی با توان و بازدهی بیشتر مورد توجه بوده است. از گذشته تا به امروز، تکنولوژی اصلی تقویت کننده های به کار گرفته شده در این ماهواره ها TWTA بوده است. چنین تقویت کننده هایی توانایی فراهم کردن عرض باند ۲۰٪ در باند Ku و توان ۱۰۰ تا ۱۵۰ وات و بازدهی (در اشباع) بیش از ۶۵٪ را دارند. در این ماهواره ها اغلب تقویت کننده ها در توان اشباع به کار گرفته می شوند (البته در سیستم های چندحاملی مانند VSAT ها، قدری عقب گرد توان خروجی صورت می گیرد) و تنها یک حامل با عرض باند 36 MHz که شامل ۱۰ تا ۱۲ کانال استاندارد تلویزیونی است، توسط تقویت کننده ارسال می شود.

این شرایط، در میانه ی سال ۲۰۰۰ با پرتاب اولین ماهواره های HTS تغییر کرد. با پرتاب این ماهواره ها الگوی ارتباط ماهواره ای به سمت افزایش نرخ داده برای رقابت با شبکه های اینترنت زمینی تغییر کرد و به این ترتیب مدل از ارتباط یک طرفه ی تلویزیونی به سمت ارتباط دو طرفه اینترنت با نرخ های 2 Mbps، 10 Mbps و حتی 50 Mbps پیش رفت. تنها راه برای برقراری چنین ارتباطی، طراحی ماهواره هایی با قابلیت فراهم کردن نرخ تا 1 Tbps است. راه دستیابی به چنین ماهواره هایی، افزایش تعداد بیم ها در محدوده پوشش ثابت به همراه افزایش عرض باند و همچنین افزایش بازدهی طیفی است. از طرفی، اقتضای فن آوری های جدید از قبیل 5G، موجب شده است تا توسعه ماهواره های HTS مورد توجه قرار گیرد.

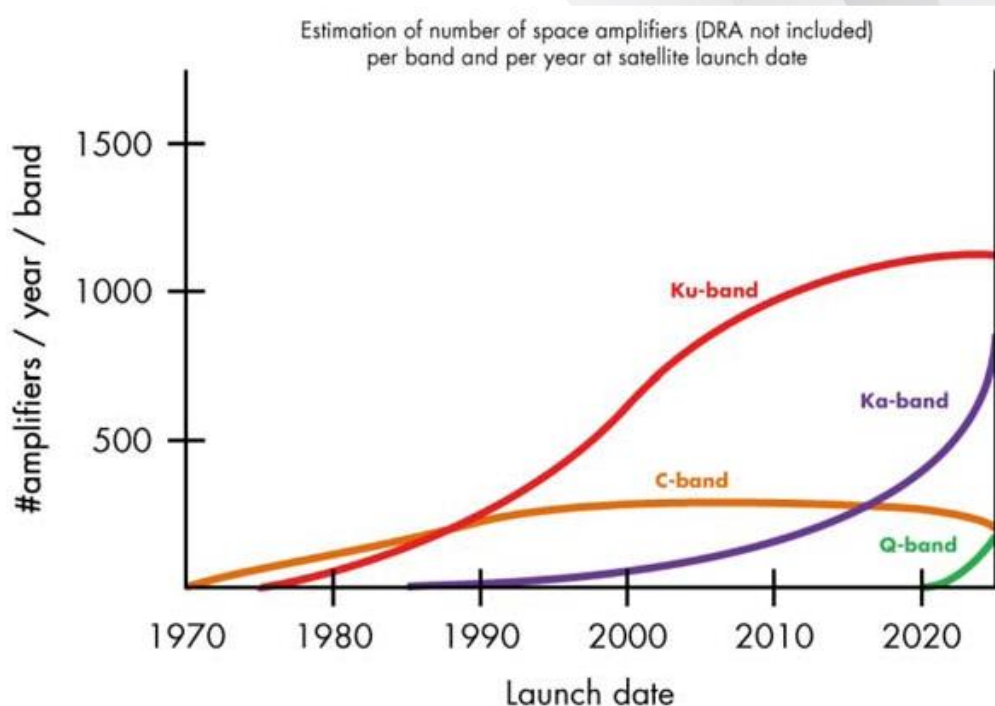
چنین روندی، نیازهای ذیل را برای تقویت کننده های امروزی و آینده ایجاد می کند:

باند فرکانسی: اگرچه برای سه دهه، باندهای Ku و C برای ارتباطات ماهواره ای مورد استفاده بوده اند اما، با نیاز

به عرض باندهای بیشتر و همچنین اشباع این باندها در برخی نواحی مانند آمریکا (از سال ۲۰۰۰)، نیاز به استفاده از باندهای فرکانسی جدید پدید آمد که بر همین مبنا باند Ka به ارتباطات ماهواره ای اضافه شد. از ویژگی های این باند کاری، عرض باند زیاد آن (2.9 GHz) است که طراحی تقویت کننده های آن را پیچیده می نماید. به علاوه، این باند از منظر تنظیم مقررات نیز دچار پیچیدگی است. تنها، بخشی از این باند به صورت جهانی به کاربران ماهواره ای اختصاص داده شده است و بخش دیگر آن توسط رگولاتورهای محلی مدیریت می شود که عمدتاً برای gateway ها به کار گرفته می شود. با این وجود، فشارها برای اختصاص عرض باند بیشتر برای کاربران ماهواره موجب شده است که بخش بیشتری از این باند به آن ها اختصاص داده شود و در عوض باند Q در اختیار gateway ها قرار گیرد. شکل ۱، به طور تقریبی روند نیاز به تقویت کننده ها در باندهای مختلف را نمایش می دهد.

عرض باند فرکانسی: اگرچه برای ارسال سیگنال تلویزیون دیجیتال تنها از 36 MHz عرض باند استفاده می شود،

اما ظهور ماهواره های HTS نیاز به عرض باند بیشتر را افزایش داده است. امروزه TWTA ها را به نحوی طراحی می کنند که عرض باند کامل در باندهای Ku و Ka، یعنی به ترتیب 2GHz و 2.9GHz را پوشش دهند.



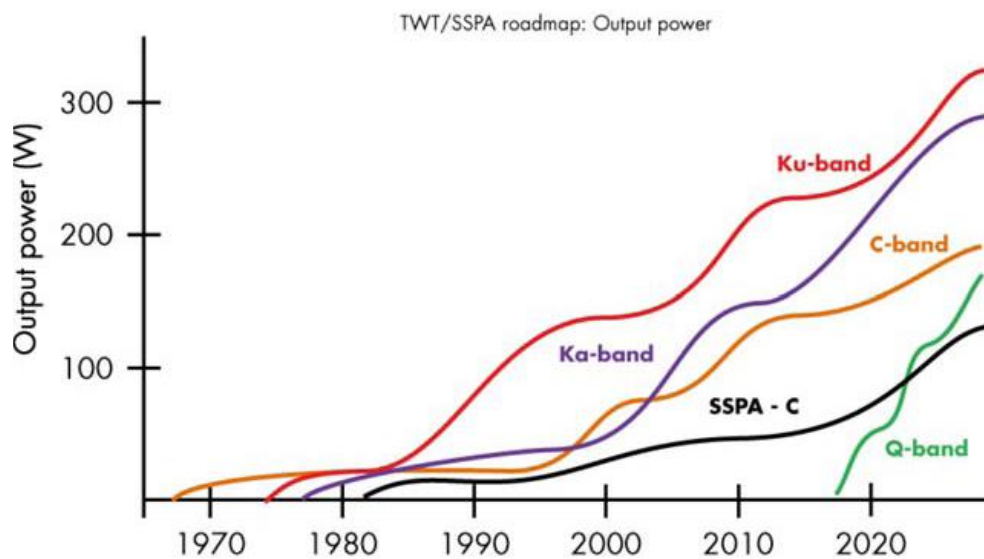
شکل ۱- روند نیاز به تقویت کننده های فضایی در باندهای مختلف

بازدهی انرژی: از آن جایی که ۸۰٪ از توان باس ماهواره توسط تقویت کننده ها مصرف می شود، بازدهی انرژی سخت گیرانه ترین شرطی است که تقویت کننده های فضایی بایستی برآورده نمایند. بایستی به یاد داشت که افزایش بازدهی نه تنها توان سلول های خورشیدی، بلکه توان اتلافی که بایستی به نحوی دفع شود را نیز کاهش می دهد. در دهه های گذشته، بازدهی TWTA ها از ۵۰٪ به ۷۰٪ افزایش پیدا کرده است. پیش بینی می شود که امکان افزایش بازدهی تا ۸۰٪ نیز وجود داشته باشد.

از آن جا که تقویت کننده های استفاده شده در سرویس های چند حاملی، در مقداری عقب گرد از توان اشباع به کار گرفته می شوند، می توان نتیجه گرفت که بازدهی در توان اشباع همه چیز نیست و میزان بازدهی در عقب گرد از توان اشباع خروجی نیز حائز اهمیت است. از آن جایی که بازدهی با عقب گرد از توان خروجی اشباع کاهش پیدا می کند، همواره تلاش می شود تا میزان عقب گرد کمترین مقدار ممکن باشد و از این روی است که اکثر تقویت کننده های به کار برده شده در ماهواره ها را خطی سازی می کنند. البته امروزه با طراحی collector های چند طبقه در TWTA ها، امکان افزایش بازدهی در عقب گردهای ۲ dB تا ۴ dB از توان اشباع خروجی فراهم شده است. به عنوان نمونه کمپانی Thales در سال های اخیر توانسته است که بازدهی در عقب گرد ۳ dB را از ۴۲٪ به ۵۰٪

افزایش دهد که این مساله تاثیر زیادی در بازدهی کل محموله ماهواره HTS خواهد داشت. مشابه TWTA ها، تکنیک های افزایش بازدهی در عقب گرد از توان اشباع خروجی برای SSPA ها نیز توسعه داده شده اند. از تکنیک های متداول برای افزایش بازدهی در عقب گرد برای SSPA ها، روش Doherty است.

توان خروجی: از منظر توان اشباع، با ظهور ماهواره های HTS، دو روند بر خلاف یکدیگر وجود دارد. از یک طرف، برای تقویت سیگنال های چندحاملی با عرض باند زیاد، نیاز است که برای داشتن خطینگی لازم، به مقدار مناسبی عقب گرد از توان اشباع صورت گیرد؛ که این به معنی نیاز به تقویت کننده هایی با توان اشباع بیشتر است. از طرف دیگر، با کاهش ابعاد پوششی بیم ها، نیاز توانی آن ها کاهش پیدا می کند. برآیند این دو روند موجب شده است که توان اشباع مورد نیاز برای تقویت کننده ها در باندهای L تا Ka، در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ وات قرار گیرد. شکل ۲- به صورت تقریبی روند توان اشباع مورد نیاز در باندهای مختلف را نمایش می دهد.



شکل ۲- روند توان اشباع مورد نیاز برای تقویت کننده های فضایی

انعطاف پذیری: اگرچه برای پخش تلویزیونی نیاز چندانی به انعطاف پذیری وجود نداشت، اما این مهم برای ماهواره های HTS یک ضرورت است. لازم است که انعطاف پذیری در طیف، عرض باند و پوشش ایجاد شود. به منظور فراهم کردن انعطاف پذیری طیفی از منظر تقویت کننده ها، لازم است که تقویت کننده هایی با عرض باند زیاد به کار گرفته شوند. در سال ۲۰۰۰، تقویت کننده های باند Ku با عرض باندهایی در حدود 0.5-1 GHz

ارائه می شدند؛ اما امروزه ادواتی با پاسخ فرکانسی صاف تر و با عرض باندهای 2 GHz در باند Ku و 2.9 GHz در باند Ka ارائه می شوند.

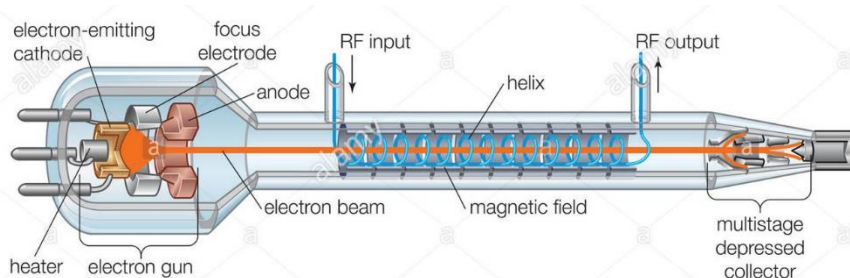
انعطاف پذیری در عرض باند به معنی توانایی اپراتور ماهواره در تطبیق نرخ داده ای ارسالی با نیاز کاربر است که این امر نیازمند آن است که تقویت کننده در توان های مختلف، بدون تغییر قابل توجه در بازدهی کار کند.

انعطاف پذیری در پوشش، یک مفهوم پیچیده است که نیاز به آنتن های پیشرفته و شکل دهی پرتوی دیجیتال دارد که این تکنولوژی ها، امروزه توسط سازندگان ماهواره، در دسترس هستند. تا آنجایی که به تقویت کننده ها مرتبط است، به تقویت کننده های با محدوده عملکردی گسترده تر، دارای عرض باند زیاد و توان اشباع خروجی بین ۱۰ تا ۳۰۰ وات نیاز است. برای چنین بازه ای، TWTA ها بخشی از پاسخ هستند و همچنین بایستی از SSPA ها در توان های پایین تر بهره برد.

۳- TWTA ها

TWTA ها اولین نوع موفق از تقویت کننده های توان RF برای سیستم های مخابراتی به شمار می روند. از ابتدای نسل فضا (از دهه ۱۹۶۰) تاکنون، از TWTA ها به طور گسترده در ماهواره ها استفاده شده است. مشخصاً در ۶۹٪ از ماهواره های GEO پرتاب شده از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۶ از TWTA ها بهره گرفته شده است. از نگاه کلان، TWTA ها از یک بخش EPC و یک بخش TWT تشکیل شده اند. بخش EPC دارای زیربخش های زیادی شامل مبدل های DC-DC و DC-AC، مدارهای حفاظتی و زیربخش سنجش و فرمان از راه دور می باشد. بخش EPC به طور مستقیم به ولتاژ باس ماهواره متصل می شود و ولتاژ DC چند هزارولتی را برای الکتروود TWT فراهم می کند. TWT شامل یک تفنگ الکترونی، یک SWS، یک سیستم تمرکزدهنده مغناطیسی، کوپلرهای RF ورودی و خروجی و یک گُلکتور می شود که در شکل ۳، نمایش داده شده است. با اعمال ولتاژ به تفنگ الکترونی، الکترون ها از کاتدی که تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد گرم شده است، به SWS تزریق می شوند و همزمان توسط تمرکزدهنده مغناطیسی، به طور متمرکز در محور SWS حرکت می کنند. از طرف دیگر، سیگنال RF نیز با استفاده از کوپلر ورودی به SWS تزریق می شود و در طول SWS حرکت می کند. با حرکت موج RF و الکترون ها با سرعت یکسان در SWS، تبادل انرژی میان

ذرات بیم الکترونی و موج RF رخ می دهد که این تبادل انرژی، موجب تقویت سیگنال RF می گردد. در انتهای SWS، یک کلکتور برای جمع کردن الکترون ها قرار دارد. حدوداً ۷۰٪ از انرژی مصرف شده، به توان RF تبدیل می شود و ۳۰٪ باقی مانده به حرارت اتلافی تبدیل می گردد. کلکتور، بیشترین سهم از توان اتلافی را به خود اختصاص می دهد و به همین دلیل تمرکز اصلی برای افزایش بازدهی TWTA ها، کاهش این اتلاف است.



شکل ۳- ساختار TWT

TWTA ها را بر مبنای توان اشباع خروجی دسته بندی می کنند. این قطعات معمولاً در عقبگرد از توان اشباع به کار گرفته می شوند. در چنین حالتی، بخشی از توان DC مصرفی که به توان RF تبدیل می گردد کاهش پیدا می کند و توان اتلافی بیشتر می شود. در عوض، ممکن است که در توان خروجی در حالت اشباع، به دلیل پدید آمدن اعوجاج اینترمدولاسیون (IMD)، تداخلاتی رخ دهد. انتخاب توان اشباع TWTA و میزان عقبگرد از توان اشباع، انتخاب مهمی است که بایستی برای حداقل شدن توان مصرفی و همچنین جلوگیری از IMD بیش از حد مجاز انجام شود. البته لازم به ذکر است که مساله IMD در SSPA ها نیز وجود دارد؛ اما در مقام مقایسه، SSPA ها خطی تر هستند و در توان کاری اشباع، IMD کمتری نسبت به TWTA ها دارند.

۳-۲- مزایا و مشکلات TWTA ها

به طور کلی TWTA ها قابلیت ارائه توان خروجی بیشتر و بازدهی بهتری را نسبت به SSPA ها در فرکانس های کاری بالاتر دارند. علاوه بر آن، TWTA ها قابلیت عملکرد در دمای کاری بیشتری را دارند که با توجه به پیچیدگی های کنترل حرارتی در ماهواره ها، مزیتی قابل توجه است.

یکی از نگرانی های اساسی در مورد TWTA ها، تضمین عملکرد به طول ۱۵-۲۰ سال در مدار است، که البته به طور متوسط چنین طول عمری برای TWTA ها قابل دسترس است. کاتد TWTA، منبعی محدود از الکترون است که طول عمر نهایی آن را مشخص می کند. البته TWTA هایی با طراحی عالی دیده شده اند که به طور پیوسته بیش از ۱۰۰,۰۰۰ ساعت عملکرد داشته اند و به طول عمر ۲۰ سال دست یافته اند. مساله دیگر در مورد TWTA ها، نیاز به تغذیه با ولتاژ در حد کیلو ولت است که چنین تغذیه هایی اغلب سنگین و گران قیمت هستند. به مشکلات فوق، مشخصات غیرخطی قابل توجه و ابعاد و وزن زیاد TWTA ها را می توان اضافه نمود. از طرفی به دلیل تکنولوژی خاص و همچنین انحصار ساخت به چند شرکت، این تقویت کننده ها قیمت بالایی داشته و امکان تهیه آن ها با توجه به تحریم ها بسیار دور از ذهن است.

۳-۳- تکنولوژی روز TWTA ها

در این بخش، اطلاعاتی در مورد تکنولوژی های اخیر در TWTA ها ارائه می شود.

۳-۳-۱- انعطاف پذیری و قابلیت پیکربندی مجدد

امروزه، افزایش عرض باند و توان خروجی محموله با استفاده از پیکربندی مجدد و خطی سازی توان RF در بیم ها و کانال های مختلف انجام می پذیرد. پیکربندی مجدد با استفاده از محموله های انعطاف پذیر انجام می شود، که TWTA های انعطاف پذیر نیز از اجزای چنین محموله هایی هستند. چنین TWTA هایی دارای قابلیت باز-توزیع توان در دسترس در بیم های مختلف در شرایط عدم تعادل ترافیک در طول زمان هستند. TWTA های انعطاف پذیر از یک فرمان از راه دور برای تغییر شرایط بایاس (ولتاژ آند) که مشخص کننده بهره و توان اشباع است، استفاده می کنند. به این ترتیب، در مصرف توان محموله صرفه جویی شده و می توان ابعاد محموله را کاهش داد، یا قابلیت های بیشتری را به آن اضافه کرد.

۳-۳-۲- خطی سازی TWTA ها

TWTA ها به خودی خود تقویت کننده های غیرخطی هستند؛ لذا می بایست برای دستیابی به معیارهای مشخص شده در استاندارد مخابراتی که در آن به کار گرفته می شوند، مانند میزان مجاز گسترش طیفی و یا IMD، خطی سازی

در مورد آن‌ها صورت گیرد. در طول دو دهه گذشته، تلاش‌های قابل توجهی در این مسیر صورت گرفته است. برای TWTAها، پیش اعوجاج متداول‌ترین روش خطی‌سازی است. این خطی‌سازها، مشخصه‌های بهره و فاز تقویت‌کننده را اصلاح می‌نمایند. به عنوان نمونه کمپانی L3، TWTAهای خطی شده با EPC، TWT و خطی‌ساز یک‌پارچه را فراهم می‌نماید.

۳-۳-۳- قابلیت‌های امروزی سازندگان TWTA

مشخص نمودن وضعیت امروزی تکنولوژی TWTA به دلیل محرمانگی اطلاعات سازندگان آن‌ها، امری دور از دسترس است. از زمان پرتاب ماهواره Syncom-II در سال ۱۹۶۳، تکنولوژی ساخت TWTAها با محوریت افزایش توان خروجی و بازدهی و کاهش ابعاد، پیشرفت اساسی داشته است. امروزه، از شرکت‌های تولیدکننده TWTA، می‌توان به L-3 Communications Electron Technologies که تولیدکننده TWT و EPC است؛ L-3 Narda West که تولیدکننده LCAMP است؛ Thales Electron Devices که تولیدکننده TWT است و Tesat Spacecom که تولیدکننده EPC و LCAMP است اشاره کرد.

۳-۴- نسل جدید TWTAها

همانطور که اشاره شد، در طول دهه‌های گذشته، TWTAها پیشرفتی چشمگیر داشته‌اند؛ اما به نظر می‌رسد که (در مقایسه پیشرفت قابل توجه SSPAها با ظهور تکنولوژی GaN) فعلاً اتفاق مهمی در تکنولوژی TWTAها قابل تصور نیست. در عین حال، تولیدکنندگان TWTA همواره سعی می‌کنند تا آن‌ها را از لحاظ بازه فرکانسی، توان خروجی و بازدهی بهبود دهند و علاوه بر آن از قیمت، ابعاد و وزن TWTAها بکاهند. یکی از پیشرفت‌های محتمل در زمینه TWTAها، استفاده گسترده‌تر از Mini-TWTها است که دارای طول کوتاه‌تر و همچنین وزنی کمتر (حدود یک پنجم TWTهای معمول) هستند.

۴- SSPA ها

SSPA ها نخستین بار، در اواخر دهه ۱۹۷۰ و با بهره گرفتن از تکنولوژی های BJT و GaAs MESFET در فضا مورد استفاده قرار گرفتند و با اثبات توانایی فراهم آوردن توان ۱۵-۱۰ وات در دهه ۱۹۸۰، به عنوان جایگزین های TWTA ها متداول تر شدند. از لحاظ تاریخی، SSPA ها در باندهای فرکانسی پایین تر مانند باند L و S و در توان های پایین تر (در حدود ۱۰ وات) به دلیل وزن کمتر نسبت به TWTA ها، مورد استفاده قرار گرفته اند. اگرچه SSPA ها در فرکانس های پایین تر و توان های کمتر ترجیح داده می شوند، لیکن نمونه هایی وجود دارند که از این تقویت کننده ها در توان های بالاتر نیز (توان های ۲۰ تا ۴۰ وات)، برخلاف بازدهی کمترشان بهره برده شده است.

مشابه TWTA ها، SSPA ها نیز دارای بخش EPC هستند. برای تولید توان RF، در SSPA ها از ترانزیستورهای FET بهره برده می شود. به منظور دستیابی به توان بالا، لازم است که ترانزیستورهای FET به نحوی به صورت موازی با یکدیگر قرار گرفته و توان خروجی آن ها ترکیب گردد. تلفات ترکیب کننده و همچنین انتقال حرارت اتلافی ترانزیستورها، از مهمترین چالش های طراحی SSPA ها است.

۴-۱- مزایا و مشکلات SSPA ها

مزیت های بسیاری، مشوق استفاده از SSPA ها هستند. بخش پایه RF یک SSPA معمولاً کوچک تر و کم وزن تر از TWT است. به علاوه، هزینه ساخت کمتری دارد و از لحاظ IMD بهتر است. علاوه بر آن، SSPA ها به ولتاژ DC کمتری (۵-۱۰ ولت برای GaAs ها و یا ۱۲-۴۰ ولت برای نسل جدید، یعنی GaN ها) در مقابل ولتاژ در مرتبه کیلو ولت مورد نیاز برای TWTA ها نیاز دارند.

ایراد اساسی در SSPA ها، توان خروجی کمتر و بازدهی کمتر در فرکانس های بالا نسبت به TWTA ها است. همچنین بازدهی کمتر SSPA ها موجب می شود تا توان اتلافی آن ها، مقدار قابل توجهی باشد که دفع آن در ماهواره ها مساله ای مهم است. در حالی که بخش اصلی RF در SSPA ها از TWT کوچک تر است، لیکن استفاده از هیت سینک های مورد نیاز جهت دفع حرارت آن ها موجب می شود که ابعاد SSPA ها به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کند.

۴-۲- تکنولوژی نسل جدید SSPAها

در سال های اخیر، دو پیشرفت مهم در زمینه SSPAها رخ داده است. دستاورد اول، ظهور و بلوغ تکنولوژی GaN است که به طراحان این امکان را می دهد تا با استفاده از چیپ هایی با ابعاد کوچک تر، تقویت کننده هایی با توان و بازدهی بیشتر در فرکانس های کاری بالا بسازند. دستاورد دیگر، پیاده سازی موفقیت آمیز روش ترکیب توان فضایی است که امکان ترکیب توان تعداد زیاد تقویت کننده ها را در فضای کمتر، عرض باند بیشتر و با تلف بسیار کم، فراهم می کند. در ادامه، این دو دستاورد، بیشتر توضیح داده می شوند.

۴-۲-۱- معرفی تکنولوژی GaN

تکنولوژی GaN، در مقایسه با سایر تکنولوژی های ساخت ادوات نیمه هادی، مانند سیلیکون (Si) و گالیوم آرسناید (GaAs) که بیش از ۴۰ سال در SSPAها به کار گرفته شده اند، یک تکنولوژی نسبتاً جدید به حساب می آید که به گزینه مورد استفاده بسیاری از کاربردهای رادیویی با مصرف توان بالا برای ارسال سیگنال به فاصله های دور مانند رادارها، BTSها، ماهواره ها، جنگ الکترونیک و ... تبدیل شده است. اولین تقویت کننده های SSPA بر مبنای تکنولوژی GaN در سال ۲۰۰۰ توسط وزارت دفاع ایالات متحده آمریکا به کار گرفته شده اند.

از مهم ترین ویژگی های این تکنولوژی که آن را در کاربردهای رادیویی از سایر تکنولوژی ها متمایز می کند، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- **اندازه زیاد میدان شکست:** تکنولوژی GaN فاصله بین دو تراز انرژی باند بزرگ تر و به تبع آن، اندازه میدان شکست بیشتری نسبت به سایر تکنولوژی های نیمه هادی دارد. این ویژگی به این نیمه هادی، توانایی کار کردن در ولتاژ کاری بالاتر را نسبت به سایر نیمه هادی ها اعطا می کند. به این ترتیب، می توان از ترانزیستورهای GaN در کاربردهایی با توان بالاتر نسبت به سایر نیمه هادی ها استفاده کرد.
- **سرعت اشباع زیاد:** الکترون ها در تکنولوژی GaN سرعت اشباع بیشتری دارند؛ که این به معنی چگالی جریان بیشتر نسبت به سایر نیمه هادی ها است.

○ از آن جایی که توان رادیویی خروجی، متناسب با ضرب ولتاژ در جریان است، ولتاژ بالاتر و چگالی

جریان بیشتر، می تواند توان بیشتری را در ابعاد مشخصی از ترانزیستور فراهم کند.

▪ **ویژگی های حرارتی منحصر به فرد:** ادوات با تکنولوژی GaN-on-SiC ویژگی های حرارتی منحصر به فردی

را ارائه می کنند؛ به این معنی که دمای این ادوات در توان اتلافی یکسان به میزانی کمتر نسبت به ادوات Si

و یا GaAs بالا می رود و به این ترتیب قابلیت اطمینان آن افزایش پیدا می کند.

مجموعه ویژگی های فوق در ادوات GaN به معنی امکان فراهم آوردن چگالی توان زیاد (تا ده برابر بیشتر از تکنولوژی

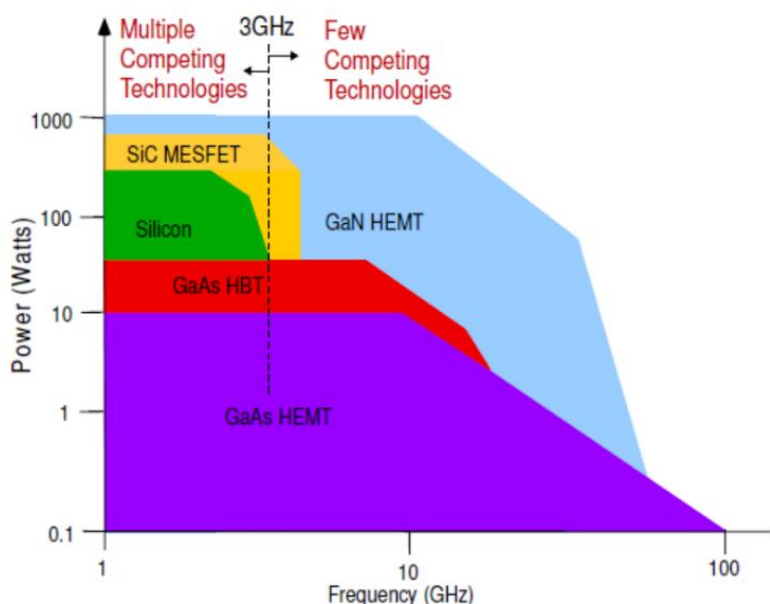
GaAs) در این تکنولوژی است. به طور مشخص، چگالی توان بیشتر، به معنی آن است که با استفاده از قطعه ای با

ابعاد کوچکتر می توان به توان بیشتری دست یافت. چگالی توان تکنولوژی های مختلف بر مبنای فرکانس کاری در

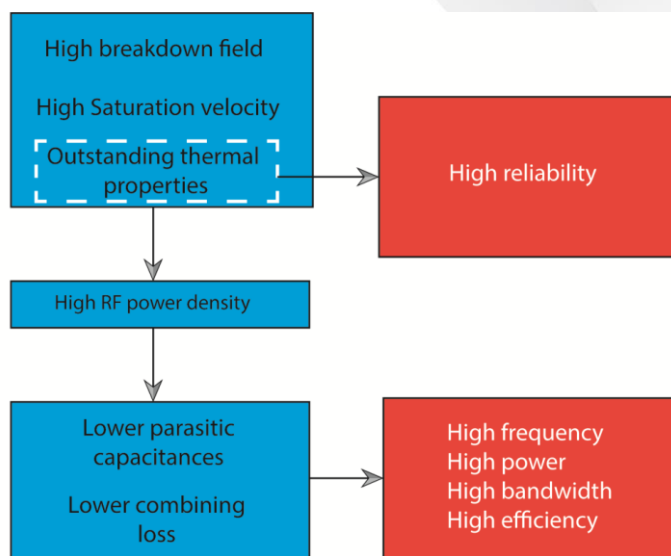
شکل ۴ نمایش داده شده اند. از مزایای قطعه با ابعاد کوچک، کاهش خازن های ناخواسته و همچنین کاهش تلفات

ترکیب توان است. با کاهش تلفات ترکیب توان، بازدهی، بهره و در نهایت توان بیشتری در دسترس خواهد بود.

مجموعه ویژگی های ترانزیستورهای GaN در شکل ۵ خلاصه شده است.



شکل ۴- مقایسه چگالی توان در تکنولوژی های مختلف



شکل ۵- ویژگی های ترانزیستورهای GaN.

تجهیزات شبکه های موبایل امروزی از قبیل سیستم های نظامی پیشرفته مانند رادارهای آرایه فازی، جنگ الکترونیک و ... به قطعاتی با فرکانس بالا، عرض باند زیاد، توان زیاد و بازدهی بالا نیاز دارند. در چنین کاربردهایی، ویژگی های عملکردی GaN، آن را نسبت به سایر تکنولوژی ها متمایز می نماید.

جدول ۱ - مقایسه ویژگی های تکنولوژی GaN-on-SiC و GaAs.

ویژگی	بهبود GaN نسبت به GaAs	نتیجه
چگالی توان	ده برابر بیشتر از GaAs	افزایش فرکانس کاری، عرض باند، توان و بازدهی
ولتاژ کاری	پنج برابر بیشتر از GaAs	طراحی راحت تر تقویت کننده
جریان	دو برابر بیشتر از GaAs	عرض باند بیشتر
رسانایی حرارتی	شش برابر بیشتر از GaAs	مشخصات حرارتی بهتر

لازم به ذکر است که هزینه، فاکتوری مهم در تقویت کننده ها بوده و یکی از محدود مواردی است که در آن، تقویت کننده های GaAs شرایط بهتری نسبت به تقویت کننده های GaN دارند. تقویت کننده های GaN نسبت به

GaAs، به دلیل گرانی مواد خام و پروسه ساخت، هزینه بیشتری دارند. به عنوان نمونه در سال ۲۰۱۶ تخمین هزینه GaN نسبت به GaAs دو تا سه برابر بوده است. بررسی انجام شده حوزه SSPA در سال ۲۰۱۷ نشان داد که در مقابل بازار سالانه حدود چندین میلیارد دلاری برای تقویت کننده های GaAs، بازار GaN بسیار کوچک تر بوده است. با این وجود، با کاهش قیمت محصولات GaN و افزایش تقاضا، این بازار در حال رشد گزارش شده است. ضمن اینکه، در مراجع صنعتی این باور وجود دارد که تقویت کننده های GaN جایگزین TWTAها در کاربردهای ماهواره ای و راداری خواهند شد خواهد.

۴-۲-۲- ترکیب توان فضایی

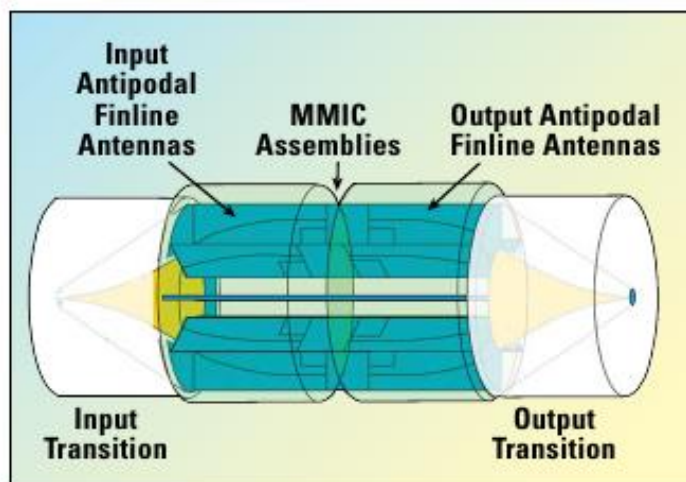
اگرچه ترانزیستورهای GaN به میزانی قابل توجه، چگالی توان و عرض باند بیشتری را نسبت به سایر تکنولوژی ها فراهم می نمایند؛ اما هنوز توان قابل ارائه یک ترانزیستور GaN برای اکثر کاربردها محدود و ناکافی است. به این ترتیب و به منظور دستیابی به توان بالا، لازم است تا توان خروجی چندین ترانزیستور به نحوی با یکدیگر ترکیب شوند. روش های متفاوتی برای ترکیب توان به کار گرفته می شود. از مهم ترین پارامترهای ارزیابی یک روش ترکیب توان، ابعاد ترکیب کننده، بازدهی ترکیب توان، میزان تلفات آن و همچنین نحوه دفع حرارت اتلافی ترانزیستورها در آن است.

ترکیب توان خروجی ممکن است در سطح قطعه باشد که اصطلاحاً ترکیب توان در سطح چیپ نامیده می شود. در این روش تعداد زیادی از قطعات اکتیو (ترانزیستورها) به صورت موازی و به طور مستقیم، با استفاده از لایه های اتصال مدار مجتمع به یکدیگر متصل می شوند. مزایای این روش هزینه پایین ساخت و سازگاری با ساختارهای مدار مجتمع می باشد. معایب این روش نیز دشواری برقراری تطبیق امپدانس بین این مدارات و مدارات خارجی و همچنین ایجاد ایزولاسیون بین خود قطعات می باشد. با افزایش فرکانس، ابعاد مدارات کوچک تر شده و تلف کردن توان بالای تولید شده توسط قطعات اکتیو که در کنار هم قرار گرفته اند، دشوارتر می گردد. به همین دلیل، چالش های ناشی از تاثیر متقابل حرارتی بین قطعات، قابل توجه خواهد بود. با توجه به این توضیحات، در روش ترکیب توان در سطح قطعه، تعداد قطعات اکتیو و در نتیجه توان ماکزیمم خروجی محدود خواهد بود.

علاوه بر ترکیب توان در سطح قطعه، روش های متفاوت دیگری برای ترکیب توان وجود دارند. از مهم ترین ملزومات یک روش ترکیب توان، تلفات کم است. در اغلب موارد برای ترکیب توان از روش های دودویی دو دهانه و ساختارهایی مانند Wilkinson و یا Magic-Tee استفاده می شود. ترکیب دو تقویت کننده نیازمند یک ترکیب کننده دو دهانه و یک طبقه ترکیب توان، چهار تقویت کننده نیازمند سه ترکیب کننده دو دهانه و دو طبقه ترکیب توان، و به همین ترتیب، ترکیب توان 2^N تقویت کننده نیازمند استفاده از $2^N - 1$ ترکیب کننده دو دهانه و N طبقه ترکیب توان است. به عنوان نمونه، ترکیب کننده های Magic Tee معمولاً تلفی برابر با 0.3 dB دارند. به این ترتیب، برای ترکیب توان ۱۶ تقویت کننده، ساختار ترکیب کننده شامل ۴ طبقه بوده و تلف مجموعه ترکیب کننده ها در حدود 1.2 dB خواهد بود که مقدار قابل توجهی است. به طور کلی در این روش، تلفات به تعداد تقویت کننده هایی که ترکیب می شوند، وابسته است و ترکیب تعداد زیاد تقویت کننده ها، منجر به تلفات قابل توجهی می شود.

در مقابل، تکنیک های ترکیب توان فضایی با هدف ترکیب توان با تلفات کم برای تعداد بالای تقویت کننده ها معرفی شده اند و قابلیت بهبود سطح توان خروجی را تا حدی قابل مقایسه با تقویت کننده های TWTA دارند.

اصل اساسی در ترکیب کننده های فضایی این است که تقسیم و ترکیب توان در یک مرحله و به طور موازی بین تقویت کننده های مختلف، در فضای آزاد و یا ساختارهای هدایتی و یا رزونانسی، انجام شود. در این حالت، بر خلاف روش دودویی، تلفات وابستگی کمی به تعداد تقویت کننده ها دارد. تلفات ترکیب توان فضایی به صورت بالقوه از روش های دودویی کمتر است. یکی از روش های ترکیب توان فضایی روز دنیا، روش ترکیب توان فضایی به صورت هم محور است که در شکل ۶- نمایش داده شده است. در این ساختار، از آنتن های antipodal finline ورودی برای تبدیل مود هم محور به مایکرواستریپ استفاده می شود. سیگنال پس از تقویت توسط MMIC ها، مجدداً از طریق آنتن های antipodal finline به مود هم محور تبدیل می شود و به این ترتیب، توان خروجی تقویت کننده ها در فضای آزاد با یکدیگر ترکیب می شوند. این روش، امکان ترکیب توان چندین MMIC را در یک مرحله با عرض باند زیاد، تلفات کم و ساختار کم حجم فراهم می نماید. به طور معمول، این ترکیب کننده ها، توان خروجی ۱۶ تقویت کننده را با تلفی در حدود 0.5 dB با یکدیگر ترکیب می نمایند.

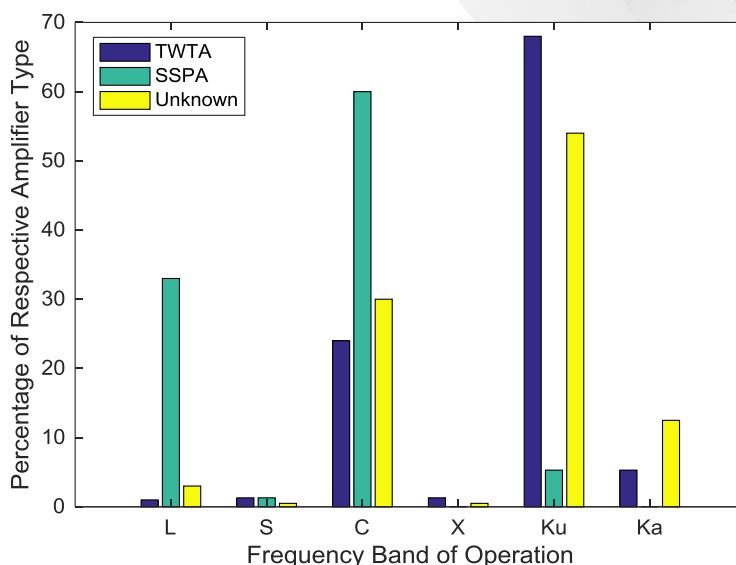


شکل ۶- ساختار یک ترکیب کننده توان فضایی به صورت هم محور (coaxial)

۵- مطالعه تجربی TWTA ها و SSPA های به کار گرفته شده در فضا

در این بخش نتایج برخی از مطالعات تجربی انجام شده در زمینه SSPA ها و TWTA های به کار گرفته شده در محموله ماهواره ها را ارائه می نماییم. نمونه مطالعه شده، از ۵۶۵ ماهواره پرتاب شده بین سال های ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۶ تشکیل شده است. از این میان، تنها اطلاعات ۳۰۵ ماهواره از لحاظ نوع تقویت کننده های به کار گرفته شده در دسترس بوده است. از میان ۱۸۹۰۲ تقویت کننده به کار گرفته شده در این ماهواره ها، ۶۴۲۸ عدد TWTA و ۲۱۵۸ عدد SSPA بوده و نوع بقیه آن ها مشخص نیست. همچنین، از میان ۳۰۵ ماهواره با تقویت کننده های مشخص، ۲۲۶ عدد، یعنی ۷۴٪ از آن ها TWTA، ۱۹ عدد، یعنی ۶٪ از آن ها SSPA و الباقی محموله ها، یعنی ۲۰٪ از آن ها مشترکاً از TWTA و SSPA بهره برده اند.

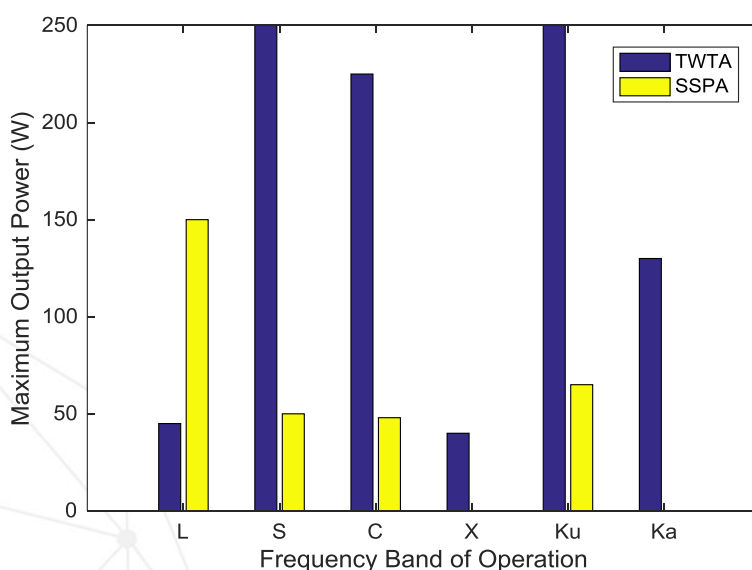
شکل ۷، توزیع آماری تقویت کننده های مطالعه شده در باندهای فرکانسی مختلف را نمایش می دهد. همانطور که دیده می شود، بیشتر SSPA ها در باندهای پایین تر و بیشتر TWTA ها در باندهای بالاتر به کار گرفته شده اند. البته نکته قابل توجه این است که از SSPA ها حتی در باند Ku نیز استفاده شده است.



شکل ۷- توزیع فرکانسی تقویت کننده های به کار گرفته شده در فضا

• حداکثر توان خروجی تقویت کننده ها:

حداکثر توان خروجی تقویت کننده های به کار گرفته شده در جامعه آماری مطالعه ای انجام شده، در شکل ۸- نمایش داده شده است. همانطور که دیده می شود، قابلیت تولید توان TWTA ها در باندهای بالاتر از SSPA ها، بیشتر است و بالعکس SSPA ها در باندهای فرکانسی پایین تر قابلیت قابل توجهی دارند و از آن ها در کاربردهای فضایی بهره برده شده است.

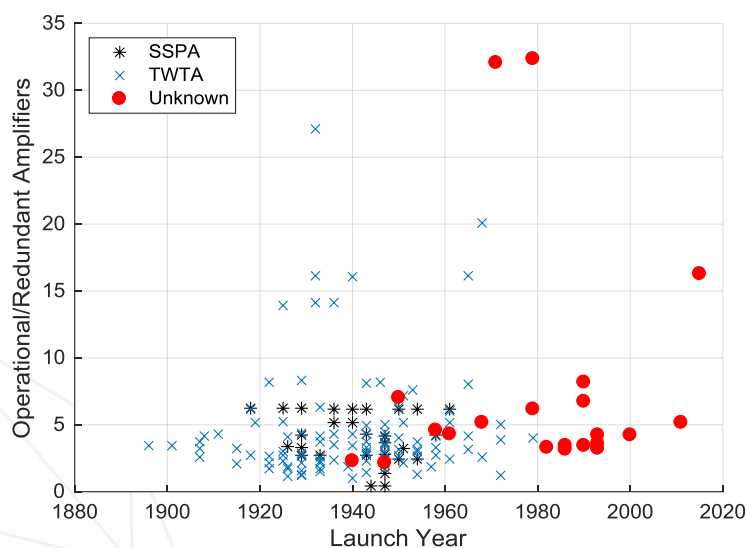


شکل ۸- حداکثر توان خروجی تقویت کننده های به کار گرفته شده در فضا در باندهای کاری مختلف

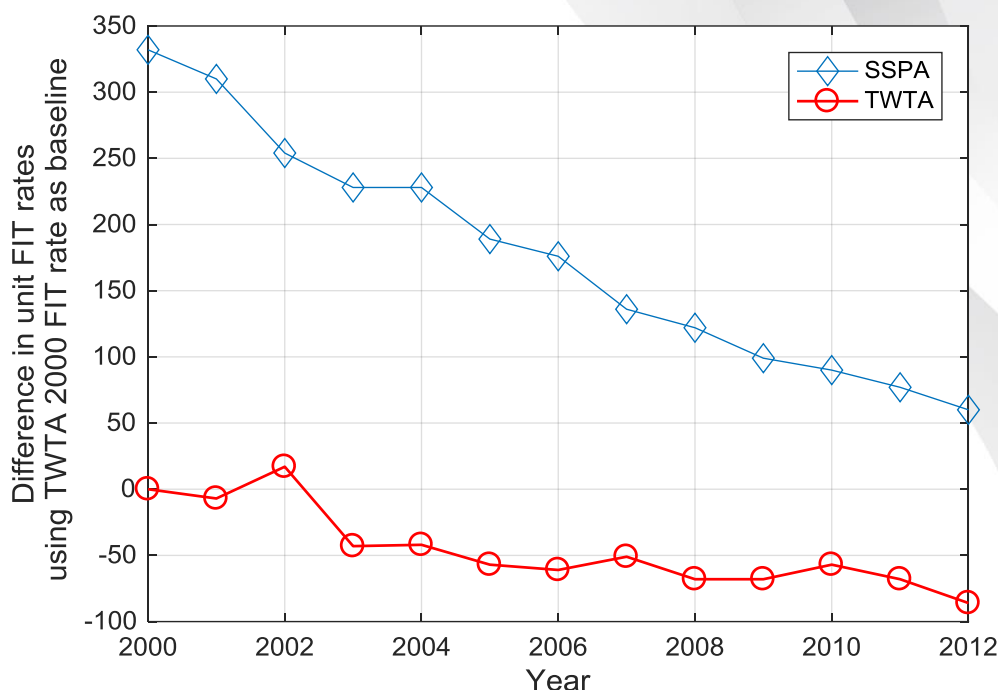
• قابلیت اطمینان تقویت کننده ها:

یکی دیگر از معیارهای مهم برای تقویت کننده های به کار گرفته شده در فضا، قابلیت اطمینان آنها است. اگرچه که قابلیت اطمینان برای تقویت کننده های به کار گرفته شده در جامعه آماری یاد شده در دسترس نیست، اما می توان افزودن آنها را به عنوان معیاری از قابلیت اطمینان آنها در نظر گرفت. همانطور که دیده می شود، نسبت تعداد تقویت کننده های عملیاتی به اضافی در SSPA ها هیچ گاه از عدد ۶ تجاوز نکرده است؛ اما این نسبت برای TWTA ها به ۲۷ نیز می رسد. به طور متوسط این نسبت برای SSPA ها ۰,۴۷ و برای TWTA ها ۵,۱۳ بوده است که نشان دهنده قابلیت اطمینان بیشتر TWTA ها نسبت به SSPA ها است.

این طور به نظر می رسد که قابلیت اطمینان TWTA ها بسیار بیشتر از SSPA ها است؛ اما مطالعات Boeing در مورد قابلیت اطمینان TWTA ها و SSPA ها که در شکل ۱۰- آورده شده است، نشان می دهد که اگرچه قابلیت اطمینان TWTA ها از SSPA ها بیشتر است، اما، قابلیت اطمینان SSPA ها با سرعت بیشتری رو به بهبود است و انتظار می رود که در آینده SSPA ها نیز قابلیت اطمینانی در حدود TWTA ها داشته باشند. در این شکل، نرخ تغییرات خرابی TWTA ها و SSPA ها در سال های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که دیده می شود، هردو نمودار رو به کاهش هستند اما شیب کاهش نرخ خرابی SSPA ها بیشتر از TWTA ها است.



شکل ۹- نسبت تعداد تقویت کننده های عملیاتی به تعداد تقویت کننده های اضافی به تفکیک سال پرتاب



شکل ۱۰- تغییرات نرخ خرابی TWTA ها و SSPA ها در طول سال های گذشته (نرخ خرابی TWTA ها در سال ۲۰۰۰ به عنوان مرجع قرار داده شده است)

۶- برآیند کلی مقایسه میان SSPA ها و TWTA ها

با توجه به مطالعات صورت گرفته، نتایج مقایسه TWTA و SSPA در این بخش خلاصه می شوند.

جدول ۲ - مقایسه ویژگی های TWTA و SSPA

ویژگی	برتری		توضیحات
	SSPA	TWTA	
ابعاد و وزن	✓		در توان های پایین، SSPA ها ابعاد و وزن کمتری دارند. در توان های بالا، به دلیل تلفات زیاد و مسائل خنک کاری SSPA، ابعاد و وزن آنها با TWTA ها برابری می کند.
توان خروجی		✓	TWTA ها توان خروجی بیشتری را به ویژه در باندهای فرکانسی بالاتر فراهم می کنند؛ اما با ظهور GaN و ترکیب توان فضایی، این مساله برای SSPA ها رو به بهبود است.
بازدهی و تلف حرارتی		✓	SSPA های مبتنی بر GaN در باندهای L/S/C و در NPR های متداول با TWTA ها رقابت می کنند.

عرض باند TWTA ها در حدود ۱ تا ۲ Octave و عرض باند SSPA ها با تکنولوژی GaN و ترکیب فضایی در حدود یک دهه است.	✓		عرض باند
نرخ خرابی SSPA ها با شیب بیشتری نسبت به TWTA ها رو به کاهش است.		✓	نرخ خرابی
با ظهور GaN محدوده دمایی عملکردی SSPA ها به گستردگی TWTA ها رسیده است.	—	—	محدوده دمایی عملکرد
در توان یکسان، SSPA ها ارزان تر هستند.	✓		هزینه
بسته به نوع ماموریت و کاربرد، ممکن است هر کدام از تکنولوژی ها برتری داشته باشند.	—	—	جمع بندی برتری ها

۷- معرفی برنامه ها و محصولات چند کمپانی بزرگ در تولید SSPA

در این بخش به بررسی برنامه کمپانی های بزرگ در زمینه تولید SSPA ها می پردازیم. در ابتدا برنامه ی کمپانی های سازنده تقویت کننده های فضایی برای ساخت SSPA ها را بیان می کنیم و پس از آن به معرفی چند محصول از سازندگان مهم SSPA در دنیا می پردازیم.

برنامه ی اعلامی و قابلیت های سازندگان تقویت کننده های فضایی برای ساخت SSPA های فضایی در جدول ۳ - خلاصه شده است. لازم به ذکر است که این اطلاعات، توسط سازندگان به ندرت در دسترس عموم قرار می گیرد و اطلاعات جمع آوری شده، اطلاعات قابل دسترس در اینترنت در تیر ماه ۱۳۹۹ است. با توجه به این جدول، مشخص می شود که کمپانی های مهم دنیا در زمینه تولید تقویت کننده های فضایی، ساخت SSPA ها را در دستور کار خود قرار داده اند.

جدول ۳ - خلاصه برنامه کمپانی های سازنده تقویت کننده های فضایی

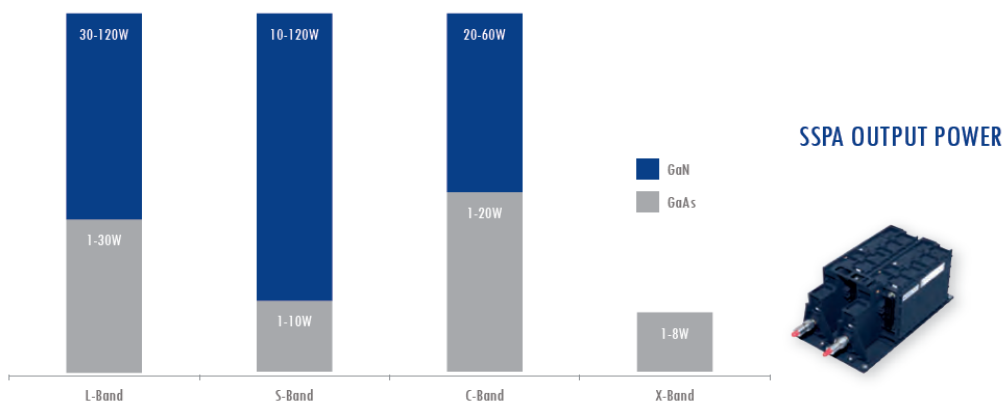
نام کمپانی	برنامه در زمینه SSPA های فضایی
Airbus Defence & Space	طبق آخرین اطلاعات در دسترس، این کمپانی از سال ۲۰۱۶ ساخت SSPA های فضایی باند L با توان ۵۰ و ۱۰۰ وات با تکنولوژی GaN و همچنین نمونه های آزمایشگاهی تقویت کننده های باند L، S و C با توان بیش از ۲۰۰ وات را آغاز نموده است
Thales IMS	این شرکت، سرمایه گذاری مشترک با کمپانی Airbus و European GaN foundry UMS را برای قرار دادن SSPA های GaN در محصولات خود آغاز کرده است

محصولات SSPA نظامی با تکنولوژی GaN این کمپانی در دسترس است؛ اما از وجود برنامه برای SSPA های فضایی این کمپانی اطلاعاتی به صورت عموم در دسترس نیست.	L3 Communications Narda Satellite Networks
این کمپانی در حال حاضر نمونه های فضایی تقویت کننده های ۵۵ وات باند L، ۴۰ وات باند C و ۱۰ وات باند X را فراهم می نماید	NEC Toshiba Space Systems
این شرکت علاوه بر تامین SSPA های GaN زمینی، توانایی تامین SSPA های فضایی ۱۲۰ وات را در باندهای L و S و همچنین ۶۰ وات در باند C را دارد. این شرکت سرمایه گذاری در حوزه GaN را آغاز کرده است و در آینده نمونه های فضایی باند Ku و Ka را نیز عرضه خواهد نمود	Tesat spacecom
این کمپانی SSPA های فضایی برای محموله های UHF، S، X، Ku و Ka تولید می کند. همچنین مسئولیت ساخت تقویت کننده های GaN نسل جدید ماهواره های Galileo را بر عهده دارد؛ اما اطلاعات دقیق و جزئی در این خصوص در دسترس نیست	TTI
نمونه SSPA باند 25-27.5 GHz با توان خروجی ۱۰ وات با قابلیت فضایی شدن توسط این کمپانی در دسترس است	Quinstar

در ادامه برخی از SSPA های ساخته شده توسط کمپانی های بزرگ از جمله Qorvo و Kratos، TESAT SPACECOME آورده می شوند.

• TESAT SPACECOME:

کمپانی TESAT SPACECOME، محصولات TWTA و SSPA برای کاربردهای فضایی تولید می کند. این کمپانی TWTA فضایی تا باند فرکانسی Ka و توان خروجی ۶۰ وات و همچنین SSPA فضایی با فناوری GaAs و GaN در باندهای L، S و C و تا توان ۱۲۰ وات، تولید نموده است. طبق گزارش ها، این کمپانی، در حال تحقیقات بر روی تولید SSPA با فناوری GaN در باند Ku و Ka می باشد و هنوز محصولی به بازار ارائه نکرده است. شکل ۱۱- محصولات SSPA فضایی این کمپانی در باندهای فرکانسی مختلف به همراه فناوری های استفاده شده در آن را نشان می دهد. بنابراین دستیابی به این فناوری، همگام با فعالیت های جهانی می باشد.



شکل ۱۱- محصولات SSPA فضایی کمپانی TESAT SPACECOM در باندهای فرکانسی مختلف

از طرفی، باند فرکانسی X، باند متداولی است که برای فرستنده های ارتباط فروسو در ماموریت های مشاهده زمین مورد استفاده قرار می گیرد. در یکی از پروژه های آژانس فضایی اروپا، شرکت SpaceForest یک SSPA ی بسیار یک پارچه با هزینه کم برای باند X طراحی کرد. در این پروژه SSPA X-Band، الزاماتی سخت گیرانه، از جمله سطح توان خروجی زیاد و بسیار پایدار در محدوده دمایی وسیع، بازدهی توان افزونه ی بالا و طول عمر ۷ سال در مدار زمین، مدنظر قرار گرفت. همچنین، می بایست قیمت SSPA X-Band ساخته شده، کمتر بوده و رقابت پذیری آن، نسبت به TWTA بهبود یافته باشد. در دسامبر سال ۲۰۱۹ اولین پروژه SSPA X-Band با سطح آمادگی فناوری ۵ (TRL5) به پایان رسید. هدف این است که در پروژه ای دیگر و در مدت زمان دو سال، یک مدل کامل مهندسی واجد شرایط (EQM) در TRL7 توسعه داده شود. شریک اصلی این پروژه TESAT SPACECOM GmbH از Backnang آلمان است.

• Kratos:

کمپانی Kratos، یکی از کمپانی های فعال در زمینه ساخت SSPA با تکنولوژی GaN می باشد. این کمپانی، چندین تقویت کننده SSPA دارد که مشخصات دو محصول آن در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴ - مشخصات دو محصول SSPA کمپانی Kratos

PARAMETER	SPECIFICATION	
	 SSPA MODEL SPA-X2-100 Error! Reference source not found.	 SSPA MODEL SGN-X4-50 Error! Reference source not found.
Frequency Range (GHz)	X band	X band
Bandwidth, %, max	9	9
Peak Saturation Output Power, min. (W)	100	40
Average output power, min. (W)	25	Same as Peak
Amplitude Flatness, dB PTP	1.2	----
RF Out Amplitude Droop @pulse width of 250 μ Sec. max. (dB)	1.5	----
Output load VSWR. max.	2:1	Any Load
Large Signal Gain, min. (dB)	53	50
Input RF Drive (dBm), max.	5	5
RF Pulse Width (μ Sec.), max.	250	Up to CW
RF Rise/Fall Time, max. (nSec)	50	----
Duty Cycle, max. (%)	25	----
PRF (kHz)	1 – 600	----
Input Supply Voltage (V)	+28V	----
Average Input Current, max. (A)	7	----
DC power Consumption, max. (W)	215	268
Switching Power Supply (provided as part of the SSPA)	Ultra quiet, non-synchronized architecture	----
Spurious Level between PRF Control Lines, min. (dBc)	70	----
Efficiency (%)	15 (min.)	25 (typ.)
Operating Temperature Range ($^{\circ}$ C)	-40 to +85	-30 to +70
Dimension LxWxH (inch)	9.00x7.00x1.2	----
Dimension LxWxH (mm)	228.6x177x30.5	184.15 x 120.65 x 25.4

• Qorvo:

کمپانی Qorvo، از بزرگترین عرضه کننده های تقویت کننده و ترانزیستورهای Die با تکنولوژی GaN می باشد. این کمپانی، محصولات SSPA در باندهای فرکانسی 2-32GHz معرفی نموده است. یکی از بارزترین آنها، محصولی با نام تجاری Spatium می باشد.

Spatium® RF Qorvo که به نام این کمپانی نیز ثبت اختراع نیز شده است، از فن آوری ترکیب توان فضایی بسیار مطمئن و کارآمد برای جایگزینی تقویت کننده TWTA استفاده می کند. خانواده محصولات Spatium، در کاربردهایی از قبیل ارتباطات ماهواره ای و زمینی، رادار، جنگ الکترونیک (EW) و تست و اندازه گیری قابل به کارگیری هستند.

این کمپانی مدعی است که تقویت کننده های خانواده Spatium، به راحتی قابلیت سفارشی سازی برای هر نیازی را دارند و از طریق تکنیک های ترکیب توان فضایی هم محور و استفاده از تقویت کننده های GaAs یا GaN، به طوری چشم گیر پهنای باند توان RF و بازدهی را بهبود می بخشند. تقویت کننده های Spatium طول عمر طولانی تری را نسبت به TWTA های قابل مقایسه یا محصولاتی که از ترکیب توان استفاده می کنند، ارائه می دهند. این دسته از محصولات مزایای اندازه کوچک، وزن کم، توان بالا و قیمت پایین (C-SWaP) را ارائه می دهند.



شکل ۱۲- نمایی از تقویت کننده SSPA از نوع Spatium

از مزایای Spatium می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- پهنای باند عملکردی بسیار وسیع
- ترکیب توان ۱۰، ۱۶، ۲۰ یا ۳۲ تقویت کننده با یکدیگر
- بازدهی ترکیب توان ۹۳٪

- اندازه کوچک تر در مقایسه با TWTA
 - قابلیت اطمینان بالاتر (۷ سال بیشتر) نسبت به TWTA
 - ولتاژ تغذیه پایین (20-48 V)
 - فراهم نمودن پهنای باند مذکور بدون نیاز به زمان Warm-up
- مقایسه ای از مشخصات عملکردی TWTA و تقویت کننده SSPA از نوع Spatium در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵ - مقایسه TWTA با تقویت کننده SSPA با نام تجاری Spatium از کمپانی Qorvo

Parameter	TWTA	Spatium
	500-1kW CW power	500-1kW CW power
Bandwidth	1-2 Octave	Decade+
Power/gain flatness	Bell shaped	Flat
DC supply voltage	1500-2500 V	5-50 V
Reliability (MTBF)	10-100kHRs	100k-1MHRs
Failure characteristic	Single point failure	Graceful degradation
Warm-up time	3 minutes	Instant on

مشخصات دسته ای از خانواده محصولات Spatium در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶ - مشخصات محصولات SSPA با نام تجاری Spatium از کمپانی Qorvo

Part Number	Frequency (GHz)	Psat Typical (W)	Minimum Power Gain (dB)	Minimum Small Signal Gain(dB)	Minimum PAE (%)	Vd (V)
QPB1006	2-7.5	150	22	30	22	28
QPB10005	2-6	400	18	26	27.3	28
QPB1000	2-18	75	12	20	14	22
QPB2731	27-31	200	18	24	25	22
QPB3238	32-38	125	8	19	15	24

۸- بومی سازی محصولات SSPA در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات

به طور کلی، TWTAها در توان خروجی بالاتر نسبت به SSPAها مزیت دارند؛ اما در توان های خروجی پایین، بازدهی پایین تر SSPAها قابل مدیریت و کنترل است. لذا با توجه به هزینه ساخت، ابعاد و وزن کمتر SSPAها نسبت به TWTAها در این توان ها، استفاده از آنها مقرون به صرفه خواهد بود. با توجه به ظهور تکنولوژی نوین GaN در ساخت SSPAها، جایگزینی TWTA با SSPA بسته به ماموریت و کاربرد، منطقی به نظر می رسد؛ به نحوی که بسیاری از شرکت های سازنده تقویت کننده های فضایی، ساخت SSPAها را در برنامه کاری خود قرار داده اند. در همین راستا، روند استفاده از SSPAها به جای تقویت کننده های TWTA در فرستنده ها، به سرعت در حال پیشرفت است.

در طول دهه اخیر بهبودی قابل توجه در قابلیت های SSPAها و کاهش C-SWaP این دسته تقویت کننده ها دیده شده است. ضمن اینکه استفاده از تکنیک های ترکیب توان به بهبودی قابل توجه در توان خروجی این تقویت کننده ها منجر شده است. بررسی ها نشان می دهد که با توجه به پیشرفت های تکنولوژی ادوات GaN حضور روزافزون این تقویت کننده ها در کاربردهای آتی فضایی و سایر حوزه های حیاتی، قابل پیش بینی است. در واقع پیشرفت های قابل توجهی در بازدهی، چگالی توان، قابلیت اطمینان و میزان توان خروجی برای ادوات GaN در طول دهه اخیر مشاهده می شود. آنچه که مشخص است ادامه روند کلی به سمت تولید ادوات GaN با بازدهی و توان بیشتر، پیش بینی می شود. با توجه به ساخت و پرتاب ماهواره های LEO و برنامه ریزی کلان برای ساخت ماهواره ملی GEO در کشور و عدم امکان تأمین TWTA برای محموله مخابراتی، نیاز به بومی سازی طراحی و ساخت SSPA با بازدهی بالا وجود دارد. با توجه به روند تکنولوژی ترانزیستورهای نیمه هادی تطبیق نیافته و نیاز کشور، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات با حمایت وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات، ساخت SSPA با بازدهی بالا در باند Ku را در دستور کار خود قرار داد. هدف از این فعالیت، طراحی و ساخت تقویت کننده SSPA با بازدهی بالا با به کارگیری ترانزیستورهای با تکنولوژی GaN به عنوان جایگزین TWTA، در محموله های مخابراتی بوده است.

در راستای تحقق اقتصاد مقاومتی و خودکفایی کشور در زمینه ساخت تقویت کننده های توان، این پژوهشگاه موفق به ساخت تقویت کننده های توان SSPA با بازدهی بالا با به کارگیری ترانزیستورهای GaN تطبیق نیافته و باتوان های خروجی مختلف ۴، ۸، ۵۰ و ۱۰۰ وات و بازدهی بالا در بازه های فرکانسی 10.95-11.25GHz گردید. با

توجه به بازدهی بالای تقویت کننده های ساخته شده و امکان ساخت نمونه فضایی و نظامی آن ها در کشور با هزینه به مراتب کمتر از محصولات مشابه در کمپانی های معتبر دنیا، قابلیت جایگزینی TWTA با SSPA ساخته شده، با استفاده از تکنولوژی روز دنیا و با مشخصات مدنظر در حوزه های مختلف فراهم گردیده است.

از طرفی، با توجه به اطلاعات ناکافی از انجام تست های محیطی برای SSPA با ترانزیستورهای تکنولوژی GaN در گزارش ها و مقالات بین المللی، لازم بود که عملکرد این تکنولوژی در شرایط محیطی فضا، مورد ارزیابی قرار گیرد. لذا، تست های محیطی از قبیل سیکل حرارتی، خلاء حرارتی، تشعشعات فضایی، EMC، شوک و لرزه بر روی تقویت کننده های SSPA با توان خروجی ۸ وات انجام گرفت که نتایج موفقیت آمیزی از آنها، حاصل گردید.

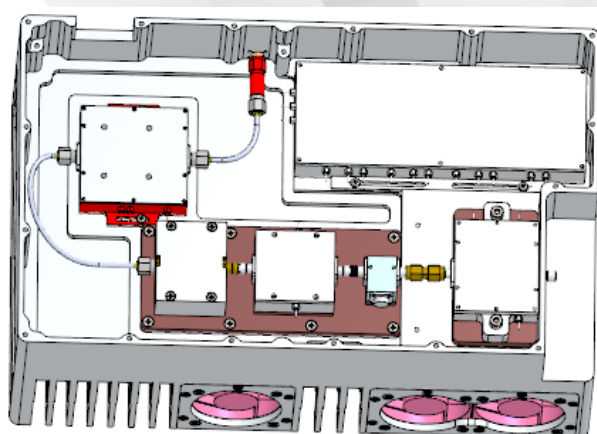
در ادامه، تقویت کننده های ۵۰ و ۱۰۰ وات به عنوان دو محصول مهم، با جزئیات بیشتر در ادامه توضیح داده خواهند شد.

۸-۱- تقویت کننده SSPA با توان خروجی ۵۰ وات و بازدهی ۴۰ درصد (بدون احتساب کارایی منبع تغذیه DC-DC)

تصویر داخلی و بیرونی SSPA ساخته شده در شکل ۱۳- آمده است. این SSPA متشکل از طبقات مختلف تقویت کننده به همراه مدار تغذیه و توالی راه انداز می باشد. همچنین به منظور خنک سازی ترانزیستورها و عملکرد مناسب آنها، هیت سینک و فن مناسب تعبیه شده است.



(ب) تصویر بیرونی



(الف) تصویر داخلی

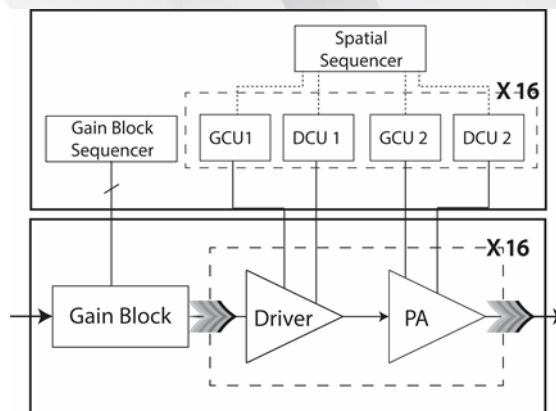
شکل ۱۳- تصویر داخلی و بیرونی SSPA ساخته شده با توان خروجی ۵۰ وات

بروشور این محصول در پیوست ۱ آمده است. از مشخصات SSPA ساخته شده، می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- شامل طبقات پیش تقویت کننده و تقویت کننده اصلی با استفاده از ترانزیستورهای تطبیق نیافته GaN به منظور دستیابی به بازدهی بالاتر نسبت به محصولات مشابه
- بازه فرکانسی 10.95GHz-11.2GHz (پهنای باند 250MHz)
- توان خروجی ۵۰ وات به صورت موج پیوسته (CW)
- بهره سیگنال بزرگ 66dB
- منبع تغذیه DC-DC
- بازدهی ۴۰ درصد (بدون احتساب کارایی منبع تغذیه DC-DC)
- دارای مدار راه انداز توالی
- کانکتورهای ورودی - خروجی SMA
- دارای سیستم خنک کنندگی برای کاربردهای زمینی

۸-۲- تقویت کننده SSPA با توان خروجی ۱۰۰ وات و بازدهی ۳۳ درصد (بدون احتساب کارایی منبع تغذیه DC-DC)

دیگرام بلوکی ساختار این تقویت کننده در شکل ۱۴- آمده است.



(ب) تصویر بیرونی

(الف) دیاگرام بلوکی

شکل ۱۴- دیاگرام بلوکی و تصویر SSPA ساخته شده با توان خروجی ۱۰۰ وات

از مشخصات SSPA ساخته شده، می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- شامل طبقات پیش تقویت کننده و تقویت کننده اصلی با استفاده از ترانزیستورهای تطبیق نیافته GaN به منظور دستیابی به بازدهی بالاتر نسبت به محصولات مشابه
- بازه فرکانسی 10.95GHz-11.25GHz (پهنای باند 250MHz)
- توان خروجی ۱۰۰ وات به صورت موج پیوسته (CW)
- بهره سیگنال بزرگ 75dB
- بازدهی ۳۳ درصد
- دارای مدار راه انداز توالی و مدارهای حفاظتی و نظارتی
- کانکتورهای ورودی - خروجی NType-SMA
- دارای سیستم خنک کنندگی برای کاربردهای زمینی

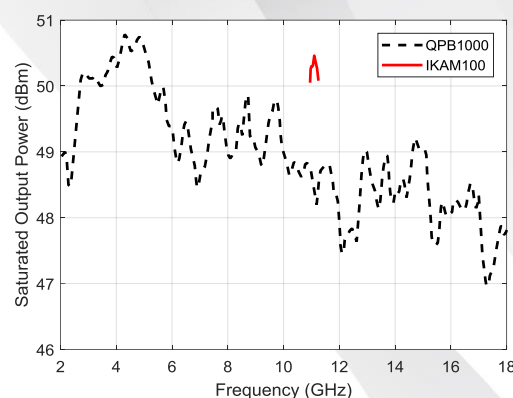
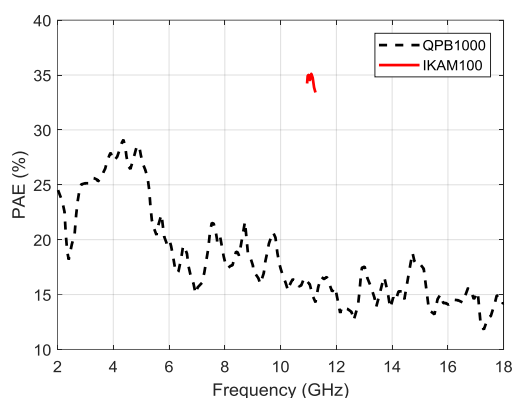
همانطور که در جدول ۷- نشان داده شد، کمپانی Kratos دو محصول با مشخصات بسیار نزدیک به SSPA ساخته شده در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات دارد. بازده این محصولات با توان های خروجی ۵۰ و ۱۰۰ وات در حدود ۲۵٪ و ۱۵٪ با احتساب تغذیه DC-DC می باشد. محصولات ساخته شده در پژوهشگاه دارای بازدهی ۴۰ و ۳۳ درصد بدون احتساب تغذیه DC-DC برای توان های خروجی ۵۰ و ۱۰۰ وات است. به منظور مقایسه بهتر می توان

با احتساب بازدهی ۸۵ درصدی DC-DC، بازدهی محصولات ساخته شده در پژوهشگاه به ترتیب به ۳۴ و ۲۸ درصد، در نظر گرفت.

شکل ۱۵، توان خروجی و بازدهی تقویت کننده SSPA ۱۰۰ وات ساخته شده در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات را با تقویت کننده QPB100 ساخته شده توسط کمپانی Qorvo مقایسه می کند. مشاهده می شود که تقویت کننده ۱۰۰ وات ساخته شده، در بازه فرکانسی 250 MHz مدنظر آن، بازدهی و توان خروجی بیشتری نسبت به تقویت کننده QPB100 دارد. لازم به ذکر است که هر دو تقویت کننده مورد مقایسه فاقد DC-DC هستند.

جدول ۷ - مقایسه مشخصات SSPA ساخته شده در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات با محصول کمپانی Kratos.

نام محصول	باند فرکانسی	سطح توان خروجی	پهنای باند	بازده
IKAM50 (SSPA ساخته شده توسط پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات)	X	50 W (GaN)	250MHz	40%(Without DC-DC) 34% with Eff. DC-DC 85%
SGN-X4-50 (SSPA ساخته شده توسط کمپانی Kratos)	X	50 W (GaN)	500 MHz	25% (with DC-DC)
IKAM100 (SSPA ساخته شده توسط پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات)	X	100 W (GaN)	250MHz	33%(Without DC-DC) 28% (Assuming DC-DC with 85% Eff.)
SPA-X2-100 (SSPA ساخته شده توسط کمپانی Kratos)	X	100 W (GaN)	500 MHz	15% (with DC-DC)



شکل ۱۵- مقایسه توان خروجی و بازدهی SSPA ۱۰۰ وات ساخته شده در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات با تقویت کننده QPB100 کمپانی Qorvo.

در همین راستا، با توجه به ساخت محموله مخابراتی ماهواره GEO در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات (که با موضوع قرارداد طراحی و توسعه محموله مخابراتی GEO این پژوهشگاه با پژوهشگاه فضایی ایران می باشد)، تست و ارزیابی محموله مخابراتی ماهواره GEO با نمونه مهندسی SSPA های ساخته شده نیز از برنامه های آتی می باشد.

به علاوه، در صورت حمایت از هر کدام از برنامه های ذیل، انجام آن ها در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات امکان پذیر است:

- ساخت نمونه های فضایی تقویت کننده SSPA با بازدهی بالا
- ساخت SSPA های مورد استفاده در ایستگاه های زمینی

۹- جمع بندی

کاربردهای SSPA ها شامل نسل جدید ماهواره های مخابراتی تجاری، مخابرات نظامی و دولتی و سیستم های انتقال داده (از جمله TDRS ها)، ماهواره های کوچک و رادارهای فضاپایه است. بسترهای هوایی برای شبکه های بی سیم، ترمینال های زمینی، شبکه های 5G، رادارهای هواپایه، سیستم های تصویربرداری و حسگرها نیز کاندید استفاده از این تقویت کننده ها هستند.

از طرفی با توجه به گسترش ماهواره های HTS و همچنین منظومه های ماهواره ای، نیاز به ترانسپوندرهای با توان خروجی کمتر نیز وجود خواهد داشت که این امر موجب می گردد تا در آینده نزدیک، SSPA ها جایگاه ویژه ای در ارتباطات ماهواره ای داشته باشند.

در این راستا و همگام با دنیا، پس از حمایت های وزارت ارتباطات در پیشبرد برنامه راهبردی بومی سازی ساخت تقویت کننده های SSPA در این پژوهشگاه، نمونه های مهندسی تقویت کننده های ۵۰ وات و ۱۰۰ وات باند Ku ساخته شد که مشخصات آن ها، قابل رقابت با محصولات کمپانی های مطرح دنیا، می باشد. با توجه به ساخت محموله مخابراتی ماهواره GEO در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات (که با موضوع قرارداد طراحی و توسعه محموله مخابراتی GEO این پژوهشگاه با پژوهشگاه فضایی ایران می باشد)، جمعیت، تست و ارزیابی محموله مخابراتی ماهواره GEO با نمونه مهندسی SSPA های ساخته شده از برنامه های آتی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات می باشد. شایان ذکر است، با توجه به ساخت و پرتاب ماهواره های LEO و برنامه ریزی کلان برای ساخت ماهواره ملی GEO در کشور و چالش های تأمین TWTA برای محموله های مخابراتی، همچنین با توجه به دانش کسب شده در این پژوهشگاه، در صورت حمایت از برنامه های ذیل، انجام آن ها در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات امکان پذیر است:

- ساخت نمونه های فضایی تقویت کننده SSPA با بازدهی بالا
 - ساخت SSPA های مورد نیاز در باندهای فرکانسی Ka
 - ساخت SSPA های مورد استفاده در ایستگاه های زمینی
 - تقویت کننده های SSPA با مشخصات کاری مورد نیاز با بیشترین بازدهی در جهت رفع نیاز کشور
- در حال حاضر علاوه بر کاربردهای فضایی، تقویت کننده های SSPA در ایستگاه های زمینی ماهواره، رادارها، هوا فضا و حوزه های مختلف نظامی نیز کاربرد دارند. در مجموع، استفاده از تخصص و تجربه پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات در زمینه تقویت کننده های SSPA، موجب تسریع در فرآیند دستیابی به محصول بومی در این

حوزه و رفع چالش ارگان‌هایی از قبیل سازمان فضایی ایران، پژوهشگاه فضایی ایران، سازمان صدا و سیما و مراکز
نظامی می‌گردد.

پیوست ۱: بروشور محصول SSPA ساخته شده در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات با توان خروجی ۵۰ وات



ICT Research Institute
(Iran Telecommunication Research Center)



Islamic Republic of IRAN
Ministry of ICT



IKAM50

*Highly Efficient GaN HEMT
Solid State Power Amplifier (SSPA)*

Features

- 50 W-CW Output power
- Ku Band Frequency Range
- 250MHz BandWidth
- 66dB of Large Signal Gain
- Built-in DC-DC Convertor
- 40% of Efficiency (DC-DC not included)
- Based on the GaN HEMT Technology

The efficient Solid State Power Amplifier (SSPA) is designed using the state of the art GaN HEMT technology, providing high power and efficient amplifiers with customizable frequency range. It provides Continuous Wave (CW) 50W output power with 66dB of large signal gain and 40% of efficiency.

The optimal goal of the SSPA is to replace space qualified TWTAs in GEO-synchronous transponders in the near future. It includes specific DC-DC convertor with input voltage between 32V to 50V, SMA input and output ports and reliable cooling system for ground testing.



www.itrc.ac.ir

پیوست ۲: دیتاشیت محصول SSPA ساخته شده در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات با توان خروجی ۱۰۰ وات



IKAM100-10951125-S3PA

10.95 – 11.25 GHz 100 Watt Amplifier

General Description

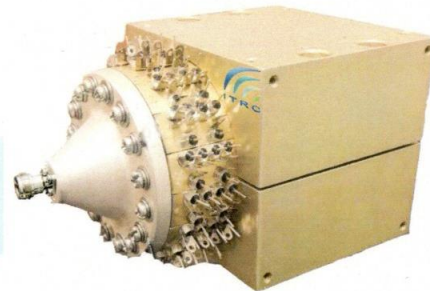
The S3PA technology from ITRC is an alternative to the TWTAs for satellite communications and aerospace and defense applications. The S3PA is customizable in the frequency range of 2 – 18 GHz with output power from 50 to hundreds of watts with unprecedented efficiency. S3PA technology has the key benefits

- High combining & power efficiency
- Wideband compact power combining structure
- Smaller size and weight than TWTAs
- Longer service lifetime than TWTAs
- Easy thermal management
- Repair capability
- Lower cost

The IKAM100-10951125-S3PA is a system including RF gain block, high power SSPA, bias circuit and control, and monitoring modules. The amplifier system requires +32 and +16Volts DC and customer supplied thermal management (water cooling, fan & heat-sink or heat-pipe). The device is an excellent candidate for Ku band satellite downlink signal transmission.

The IKAM100-10951125-S3PA incorporates high-efficiency GaN dies, spatially combined in a compact structure to achieve robust, high-performance power amplification across the 10.95 - 11.25 GHz frequency range.

The included bias circuit module provides and sequences all required DC voltages from customer supplied +32 and +16Volts DC inputs. Each GaN die is individually over current and over/under voltage protected. The control and monitoring GUI is available with serial or CAN bus.



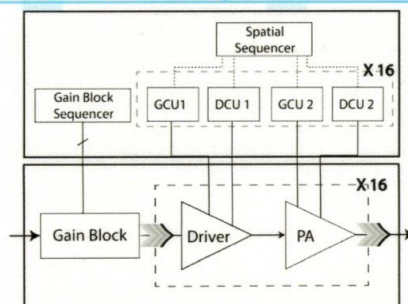
Product Features

- Frequency: 10.95 – 11.25 GHz
- Input Port: Coaxial
- Output Port : Coaxial or Waveguide
- Saturated Output Power: 100 watts (nominal)
- Small Signal Gain: 80 dB
- Bias Conditions: +32 and +16Volts supply, $I_{DQ} = 0.8$ A and $I_{DQ} = 0.8$ A respectively
- Included gate voltage generation
- Included gate and drain voltage sequencing
- Included current & temperature monitoring with GUI using serial or CAN bus
- 2.5 kg weight
- Size: 195mm×77mm×77 mm

Current Application

- Satellite Communications

Functional Block Diagram



Potential Applications

- Ground Stations
- Aerospace Communications
- Military Communications
- Test & Measurement
- EMC Susceptibility Testing
- Radar

IKAM100-10951125-S3PA

10.95 – 11.25 GHz 100 Watt Amplifier

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Rating
RF Input Power, CW, 50Ω, T _{case} = 25°	-18 dBm
32V Drain Current (I _{DD,+32V})	8.5 A
16V Drain Current (I _{DD,+16V})	3.0 A

Exceeding any one or a combination of the Absolute Maximum Rating conditions may cause permanent damage to the device.

Recommended Operating Conditions

Parameter	Typ.	Units
Operating Temperature	+25	°C
32V Quiescent Current (I _{DD,+32V})	0.8	A
16V Quiescent Current (I _{DD,+16V})	0.8	A

IKAM100-10951125-S3PA

10.95 – 11.25 GHz 100 Watt Amplifier

Electrical Specifications – IKAM100-S3PA

Please reference data plots for more details.

Parameter	Conditions ⁽¹⁾	Min.	Typ.	Max.	Units
Operational Frequency Range		10.95		11.25	GHz
Saturated Output Power	10.95 GHz		50.05		dBm
	11.00 GHz		50.30		dBm
	11.05 GHz		50.31		dBm
	11.10 GHz		50.46		dBm
	11.15 GHz		50.36		dBm
	11.20 GHz		50.27		dBm
	11.25 GHz		50.08		dBm
Power Added Efficiency at Saturated Output Power	10.95 GHz		34.2		%
	11.00 GHz		35.0		%
	11.05 GHz		34.5		%
	11.10 GHz		35.1		%
	11.15 GHz		34.8		%
	11.20 GHz		33.9		%
	11.25 GHz		33.4		%
Small Signal Gain	10.95 GHz		80.6		dB
	11.00 GHz		80.9		dB
	11.05 GHz		81.3		dB
	11.10 GHz		81.7		dB
	11.15 GHz		82.3		dB
	11.20 GHz		82.7		dB
	11.25 GHz		83.3		dB
Small Signal Gain Flatness			±1.5		dB
Input Return Loss			See plot		dB
Non-Harmonic Spurious	$f_0 = 10.95\text{--}11.25\text{ GHz}$, $P_{IN} = -20\text{ dBm}$			-60	dBc
3 rd Order Intermodulation Distortion (IMD3)	$f_0 = 10.95\text{--}11.25\text{ GHz}$, Input Back-Off Level = 0 dB			-12.4	dBc
	$f_0 = 10.95\text{--}11.25\text{ GHz}$, Input Back-Off Level = 3 dB			-13.6	dBc
	$f_0 = 10.95\text{--}11.25\text{ GHz}$, Input Back-Off Level = 6 dB			-16.5	dBc
	$f_0 = 10.95\text{--}11.25\text{ GHz}$, Input Back-Off Level = 9 dB			-19.8	dBc
	$f_0 = 10.95\text{--}11.25\text{ GHz}$, Input Back-Off Level = 13 dB			-27.0	dBc
				See plot	
				See plot	
Output Power Ripple	$f_0 = 10.95\text{--}11.25\text{ GHz}$, $P_{IN} = -20\text{ dBm}$		±0.35		dB
DC Input Power (average)	$P_{IN} = -20\text{ dBm}$			320	W

Notes:

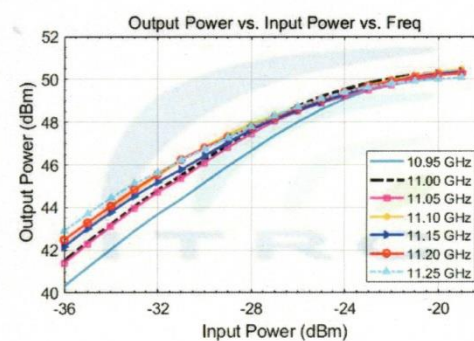
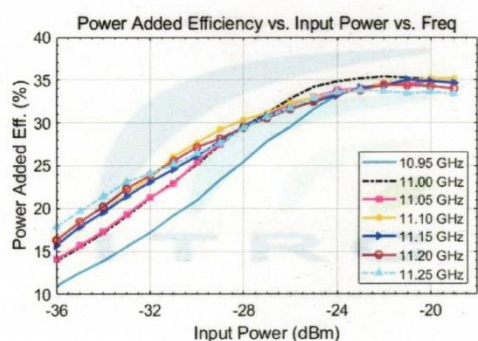
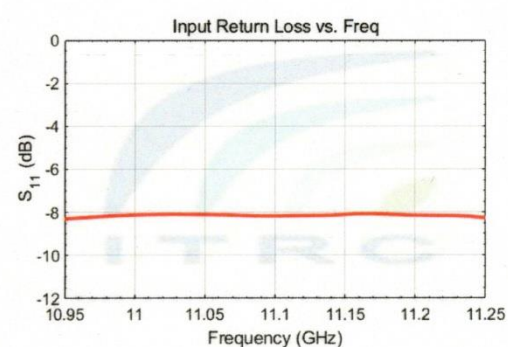
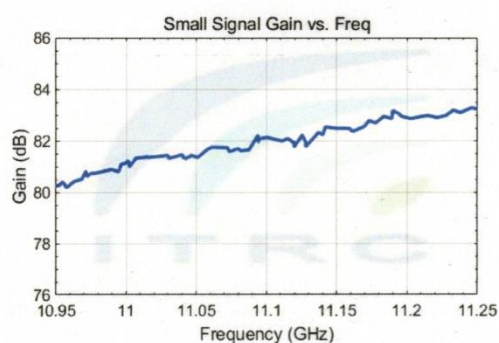
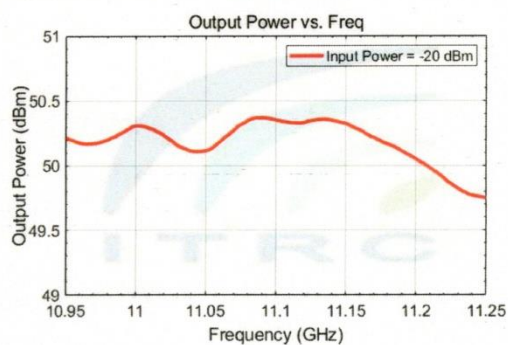
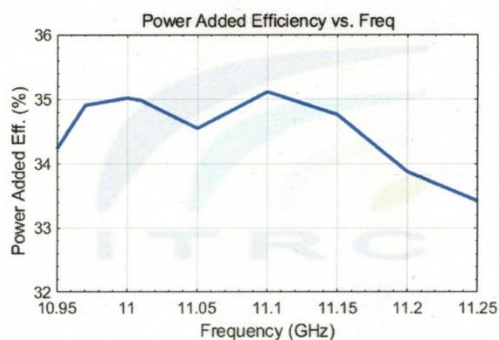
1. Test conditions unless otherwise noted: $V_{DC} = +32\text{ V}$, $+16\text{V}$, Outer Clamp Temperature = $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 50 Ohm system

IKAM100-10951125-S3PA

10.95 – 11.25 GHz 100 Watt Amplifier

Performance Plots – IKAM100-S3PA Large Signal, Small Signal

Test conditions unless otherwise noted: $V_{DC} = +32\text{ V}$, $+16\text{V}$, Outer Clamp Temperature = $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 50 Ohm system

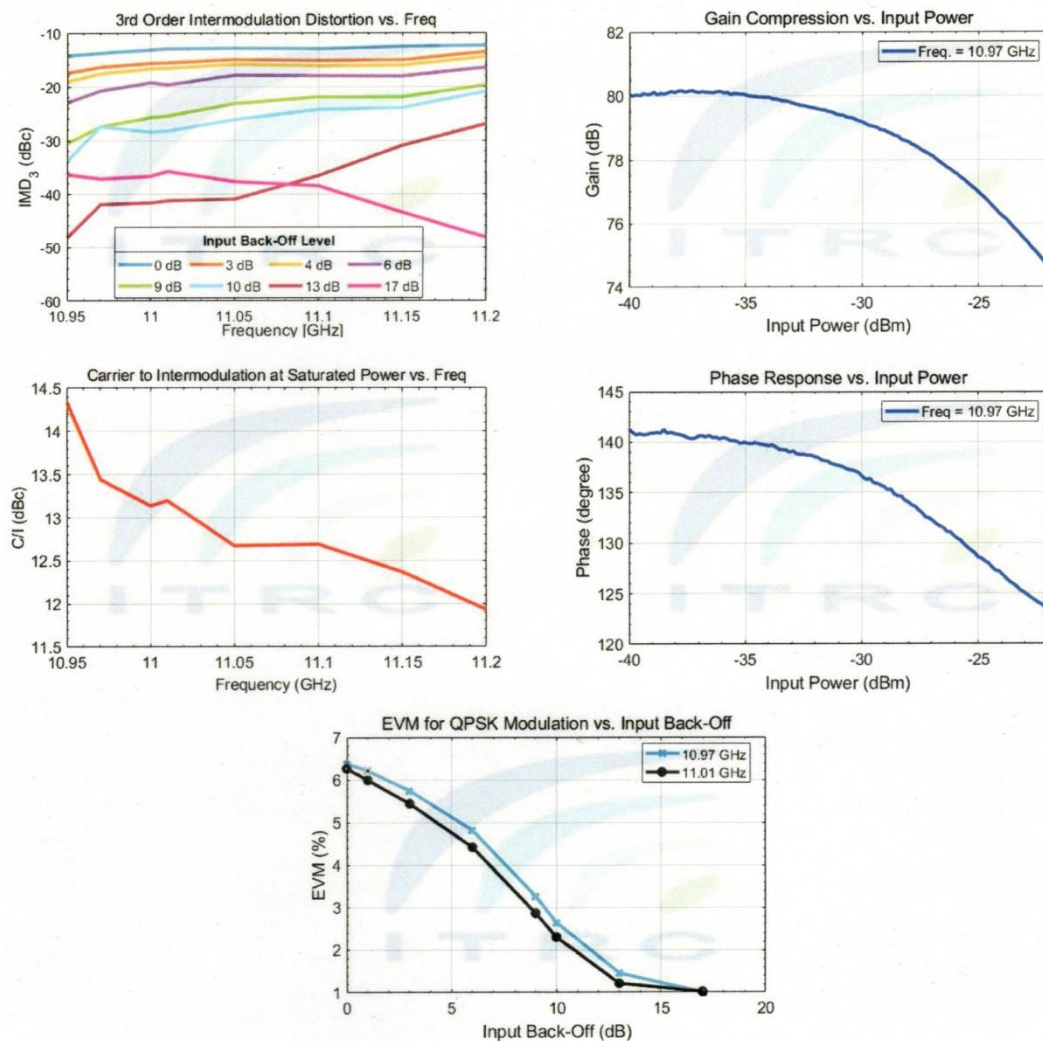


IKAM100-10951125-S3PA

10.95 – 11.25 GHz 100 Watt Amplifier

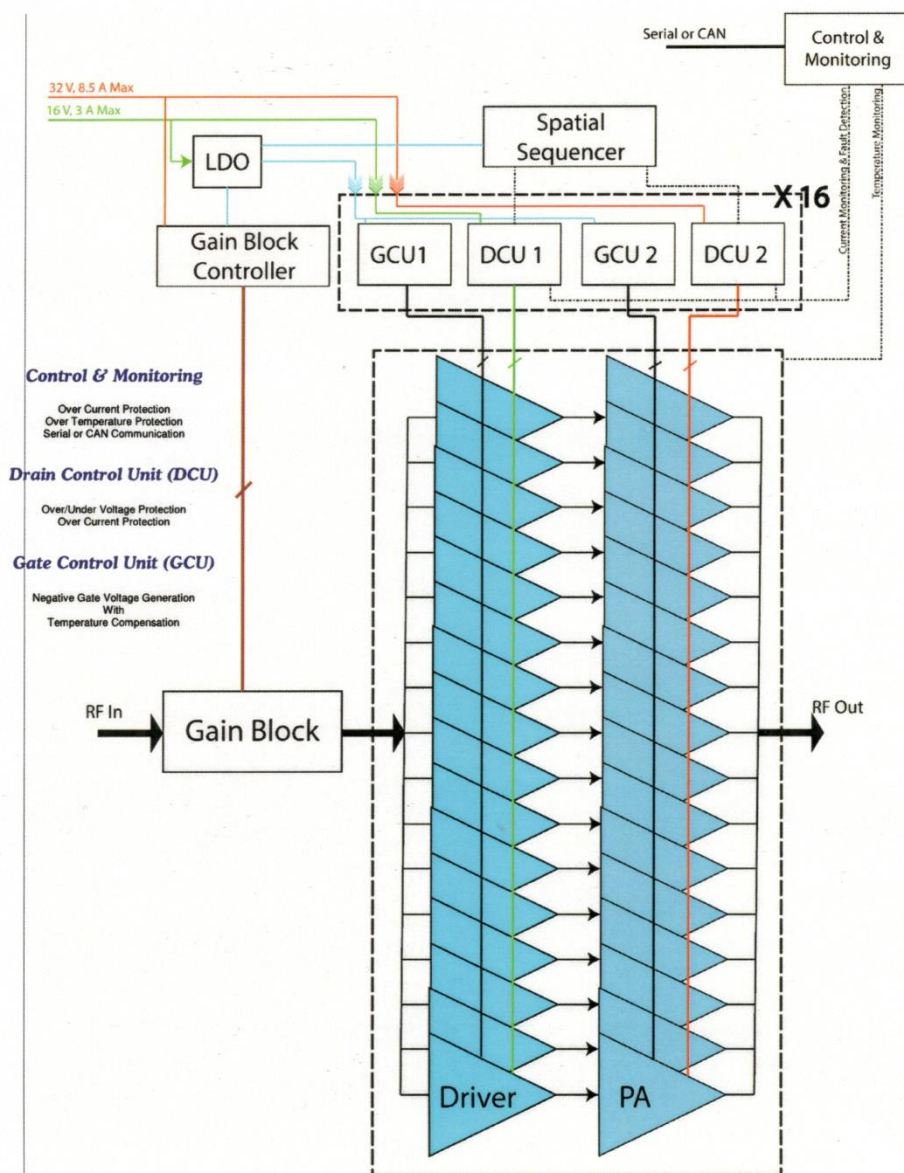
Performance Plots – IKAM100-S3PA Large Signal

Test conditions unless otherwise noted: $V_{DC} = +32\text{ V}$, $+16\text{ V}$, Outer Clamp Temperature = $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 50 Ohm system



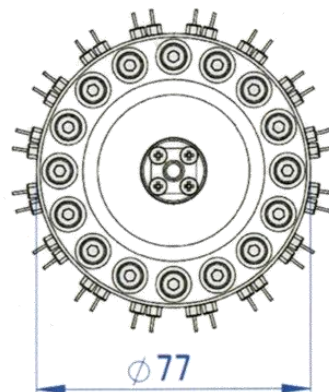
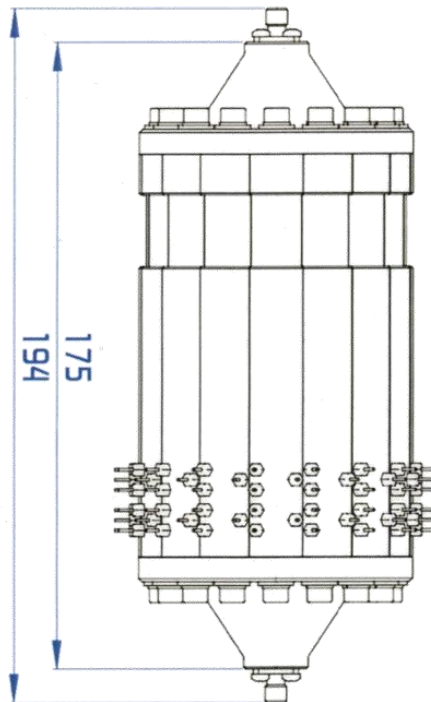
IKAM100-10951125-S3PA

10.95 – 11.25 GHz 100 Watt Amplifier



IKAM100-10951125-S3PA

10.95 – 11.25 GHz 100 Watt Amplifier



All Dimensions are in Millimeters



نشانی: تهران، انتهای کارگر شمالی،
پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات،
معاونت پژوهش و توسعه ارتباطات علمی

تلفن: ۰۲۱-۸۸۶۳۰۳۵۵

نمابر: ۰۲۱-۸۸۶۳۰۳۵۶