دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

ساخت ترکیب‌کننده‌ی توان مایکروویو از گونه‌ی فضایی در باند فرکانسی X

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات (میدان)

مرتضی احمدزاده

استاد راهنما

جناب دکتر رضا صفیان

1392

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق- مخابرات آقای مرتضی احمدزاده

تحت عنوان

ساخت ترکیب‌کننده‌ی توان مایکروویو از گونه‌ی فضایی در باند فرکانسی X

در تاریخ 92/10/14 توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

1- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر رضا صفیان
2- استاد مشاور پایان‌نامه	مهندس غلامرضا عسکری
3- استاد داور	دکتر ابوالقاسم زیدآبادی نژاد
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمد علی خسروی فرد

تقدیم به

پدرم،
که عالمانه به من آموخت
تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم.

و مادرم،
دریای بی کران فداکاری و عشق
که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب.....هفت
چکیده.....1
فصل اول: مقدمه
1-1 توان بالا و پهن‌باند مایکروویو.....2
1-1-1 لامپ‌های مایکروویو.....4
1-1-2 تقویت‌کننده‌ی توان حالت جامد.....5
2-1 مکانیزم‌های مختلف ترکیب توان.....7
1-2-1 ترکیب توان به صورت چند مرحله‌ای.....9
1-2-1-الف ترکیب‌کننده‌های سری.....9
1-2-1-ب ترکیب‌کننده‌های یک‌پارچه.....10
2-2-1 ترکیب توان به صورت چندراهه.....12
3-2-1 ترکیب توان به صورت فضایی.....17
3-1 ساختار پایان نامه.....19
فصل دوم: تعریف‌ها و پارامترهای ترکیب‌کننده‌های توان
1-2 واژگان پرکاربرد در ترکیب‌کننده‌های توان/ معیارهای ارزیابی.....20
1-1-2 بهره‌ی ترکیب.....20
2-1-2 تلف بازگشتی.....21
3-1-2 تلف عبوری.....22
4-1-2 تلف جداسازی.....23
5-1-2 تنزل هم‌گون.....23
فصل سوم: طراحی ساختار ترکیب‌کننده‌ی موج‌بری فضایی
1-3 تحلیل کلی ساختارهای ترکیب‌کننده توان.....24
2-3 روشهای طراحی ساختارهای مختلف ترکیب‌کننده.....27
3-3 یک خاصیت مهم ماتریس پراکندگی.....27
4-3 ترکیب‌کننده‌ی موج‌بری کواکسیال با پهنای باند وسیع در باند X.....30
1-4-3 تئوری عملکرد ساختار ترکیب‌کننده.....30
2-4-3 طراحی ساختار ترکیب‌کننده.....34
3-4-3 نتایج شبیه سازی.....38
5-3 ترکیب‌کننده‌ی موج‌بری کواکسیال با پهنای باند وسیع در باند L.....40
1-5-3 نتایج شبیه سازی.....42
6-3 ترکیب‌کننده‌ی موج‌بری کواکسیال باند باریک در باند X.....45
1-6-3 طراحی ساختار ترکیب‌کننده.....45

2-6-3 نتایج شبیه سازی 49
7-3 ترکیب‌کننده‌ی فضایی هشت‌راهه با موج‌بری شعاعی 51
1-7-3 طراحی ساختار ترکیب‌کننده 52
2-7-3 نتایج شبیه سازی 59
8-3 ترکیب‌کننده‌ی فضایی چهارراهه با موج‌بری شعاعی 62
1-8-3 نتایج شبیه سازی 63
9-3 ترکیب‌کننده‌ی فضایی چهارراهه با موج‌بری مستطیلی 65
1-9-3 طراحی ساختار ترکیب‌کننده 65
2-9-3 محاسبه ولتاژ شکست و حداکثر توان قابل تحمل 75
3-9-3 نتایج شبیه سازی 77
10-3 تحلیل هم‌زمان ترکیب و تقسیم‌کننده فضایی با موج‌بر مستطیلی 80
1-10-3 نتایج شبیه سازی 81
فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
1-4 نتیجه گیری 83
2-4 پیشنهادات 84
مراجع 85

چکیده

تقویت‌کننده‌های قدرت پهن باند مایکروویو یکی از قسمت های بسیار مهم سیستم های دفاعی و مخابراتی است. توان و بازدهی بالا، پهن باند، مشخصه خطی عالی، نویز پایین و طول عمر از مهم ترین مسائل در طراحی تقویت کننده ها به شمار می رود. قطعات حالت جامد و لامپ های خلأ برای فراهم نمودن این مشخصات دارای محدودیت هایی هستند. با استفاده از ترکیب فضایی توان می‌توان بر این محدودیت ها غلبه کرد .ترکیب فضایی بر خلاف ترکیب متداول مداری که دارای محدودیت های بازدهی، پهنای باند و انتقال حرارت می باشد، روشی برای ترکیب همدوس توان چندین قطعه حالت جامد با استفاده از فضای آزاد در درون یک ساختار موج‌بری می باشد. در فصل اول این پروژه ابتدا به بیان کاربردهای فناوری مایکروویو و موج میلی‌متری در زمینه‌های تجاری و نیز نظامی می‌پردازیم و سپس ویژگی‌های قطعات حالت جامد و لامپ های خلأ و نیز نواحی‌کاری آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم و در نهایت به بررسی انواع روش های ترکیب توان و مشخصات آن ها خواهیم پرداخت. در فصل دوم تعریف‌ها و پارامترهایی که در ترکیب‌کننده‌های توان برای ارزیابی به کار می‌روند ارایه خواهد شد و سپس در فصل سوم ابتدا به تحلیلی کلی درباره ترکیب‌کننده‌های توان می‌پردازیم و طراحی‌های مختلف ترکیب‌کننده‌های توان مایکروویو ازگونه‌ی موج‌بری و با توان بالا را مورد بررسی قرار می‌دهیم، و بعد از آن به بررسی و مراحل نحوه ساخت بهترین ترکیب‌کننده از نظر پهنای باند می‌پردازیم و در نهایت در فصل چهارم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌نماییم.

کلمات کلیدی: 1- ترکیب کننده‌ی فضایی 2-پهنای باند 3- ترکیب کننده‌ی توان 4- موج‌بر شعاعی و مستطیلی

فصل اول
مقدمه

1-1 توان بالا و پهن‌باند مایکروویو

تقویت‌کننده‌های با توان خروجی بالا و پهن‌باند در محدوده فرکانس‌های مایکروویو و موج میلی‌متری یکی از قسمت‌های بسیار مهم و ضروری دستگاه‌های مورد استفاده در سیستم‌های دفاعی و مخابراتی است. استفاده از این محدوده فرکانسی دارای مزایا و معایبی است. با افزایش فرکانس، طول‌موج کوتاه‌تر می‌شود، بنابراین امکان استفاده از اجزای کوچک‌تر و سبک‌تر را فراهم می‌کند که در کاربردهای نظامی و فضایی به خاطر وزن کم‌تر، هزینه کم‌تر و... حائز اهمیت است و نیز پهنای باند نیز زیادتر می‌شودکه توانایی انتقال داده را زیاد می‌کند. همچنین تضعیف اتمسفر دراین محدوده فرکانسی(مایکروویو و موج میلی‌متری) در مقایسه با طول‌موج‌های مادون قرمز و نور[1] کم‌تر است بنابراین در رادارها و دوربین‌هایی که می‌خواهند در ابر، دود و مه نفوذ کنند می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. ضمن آن‌که با افزایش فرکانس و در نتیجه کوچک شدن طول‌موج وکوچک شدن قطعات، انتقال حرارت در آن‌ها مشکل می‌شود و عناصر پارازیتی نیز مهم می شوند.

[1] Infrared and optical

فناوری مایکروویو و موج میلی‌متری در زمینه‌های تجاری و نیز نظامی دارای کاربردهای بسیار زیادی است از جمله درسیستم‌های مخابرات شخصی[2]، شبکه بی‌سیم محلی[3] ، سیستم‌های مخابرات ماهواره‌ای، سنجش از راه دور[4] و نیز در جستجوگر موشک[5]، رادار، جنگ الکترونیک، تصویربرداری موج میلی‌متری [6]، پارازیت اندازها [7] و... کاربرد دارد. از این رو یک سوال اساسی برای به دست آوردن یک سیگنال با توان بالا در فرکانس مایکروویو این است که چگونه می‌توان از یک منبع مایکروویو که سیگنال مایکروویو با توان پایین تولید می‌کند، سیگنال با توان بالا به دست آورد.

دو روش عمده‌ی موجود برای تقویت سیگنال‌های مایکروویو عبارت‌اند از:

- لامپ های مایکروویو[8]
- تقویت‌کننده‌ی توان حالت جامد[9]

هریک از دو روش بالا دارای مزایا و معایبی می‌باشند که هر کدام را برای کاربرد خاصی مناسب می‌سازد، که در ادامه به طور اجمالی به بررسی این دو روش و انواع آن‌ها می‌پردازیم.

[2] Personal communication systems

[3] Indoor-wireless local area network

[4] Remote sensing

[5] Missile seeker

[6] Millimeter wave imaging

[7] Jammers

[8] Microwave Tubes

[9] Solid state power amplifier (SSPA)

1-1-1 لامپ‌های مایکروویو

اولین منبع عملی واقعی مایکروویو لامپ مگنترون[10] بود که در دهه 1930 در انگلیس ساخته شد و سپس از آن در ساخت و توسعه سیستم رادار در خلال جنگ جهانی دوم استفاده شد. انواع بسیار متعددی از شکل لامپ‌ها در کنار مفاهیم مختلفی که بر اساس آن عملکرد لامپ بنا گذاشته شده‌است، وجود دارند اما تمامی لامپ‌ها جنبه‌های مشترک متعددی دارند، از جمله اینکه در تمامی لامپ‌ها بر هم کنش یک اشعه با یک میدان مغناطیسی در داخل روکش خلا شیشه‌ای یا فلزی را داریم. بنابراین می‌بایست به طریقی انرژی RF در خارج این روکش به آن تزویج شود، این کار معمولاً با پنجره‌های سطحی یا حلقه‌ها و پروب‌های تزویجی هم محور انجام می‌گیرد.

لامپ‌های مایکروویو انواع مختلفی دارند که از آن جمله می‌توان از لامپ مگنترون، لامپ کلایسترون [11] و لامپ موج متحرک [12] نام برد. برخی از لامپ‌های مایکروویو فقط عمل تقویت را انجام می‌دهند مانند لامپ موج متحرک و کلایسترون ، و برخی دیگر مانند مگنترون، عمل تولید و تقویت سیگنال را هم‌زمان انجام می‌دهند [1] .

ویژگی های لامپ های مایکروویو :

- توان خروجی بسیار بالا (در حدود چندصد کیلووات یا مگاوات)
- هزینه‌ی ساخت بسیار بالا
- عمر مفید پایین
- بزرگ و سنگین
- مستعد از کار افتادن ناشی از خرابی یک قسمت
- نویزپذیری بیشتر نسبت به قطعات حالت جامد
- نبود امکان مجتمع شدن و تولید انبوه با الکترونیک قطعات حالت جامد

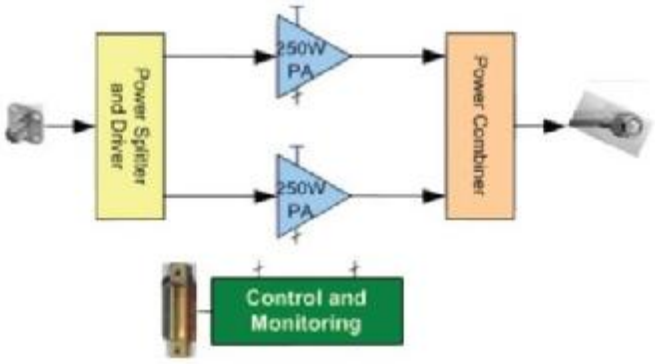
[10] Magnetron

[11] Klystron

[12] Traveling-wave tube

2-1-1 تقویت‌کننده‌ی توان حالت جامد

اساس کار تقویت‌کننده‌ی توان حالت جامد همان‌گونه که در شکل 1-1 نشان داده شده است به این صورت می‌باشد که در ابتدا سیگنال خارج شده از منبع مایکروویو که یک سیگنال مایکروویو با توان پایین‌می‌باشد، توسط یک تقسیم‌کننده‌ی توان به چند شاخه تقسیم می‌شود، سپس هر کدام از این شاخه‌ها توسط یک تقویت‌کننده‌ی ترانزیستوری تقویت می‌شود و در نهایت توان همه‌ی شاخه‌ها توسط ترکیب‌کننده‌ی توان با هم جمع می‌شود. در واقع تقویت یک سیگنال مایکروویو با تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری بسیار ساده و کم‌هزینه است ولی مشکل این‌جاست که توان خروجی این تقویت‌کننده‌ها نمی‌تواند بسیار زیاد باشد. بنابراین در سیستم تقویت‌کننده‌ی توان حالت جامد، ابتدا توانی که توسط یک منبع مایکروویو تولید شده (و بسیار کم است) توسط یک تقویت‌کننده‌ی اولیه تقویت می‌شود، سپس این سیگنال به چند شاخه (مثلا 8 شاخه) تقسیم می‌گردد و هر شاخه جداگانه تقویت می‌شود. حال توان‌های خروجی این شاخه‌ها توسط ترکیب‌کننده‌ی توان با هم جمع می‌گردند تا توان مورد نیاز به دست آید.

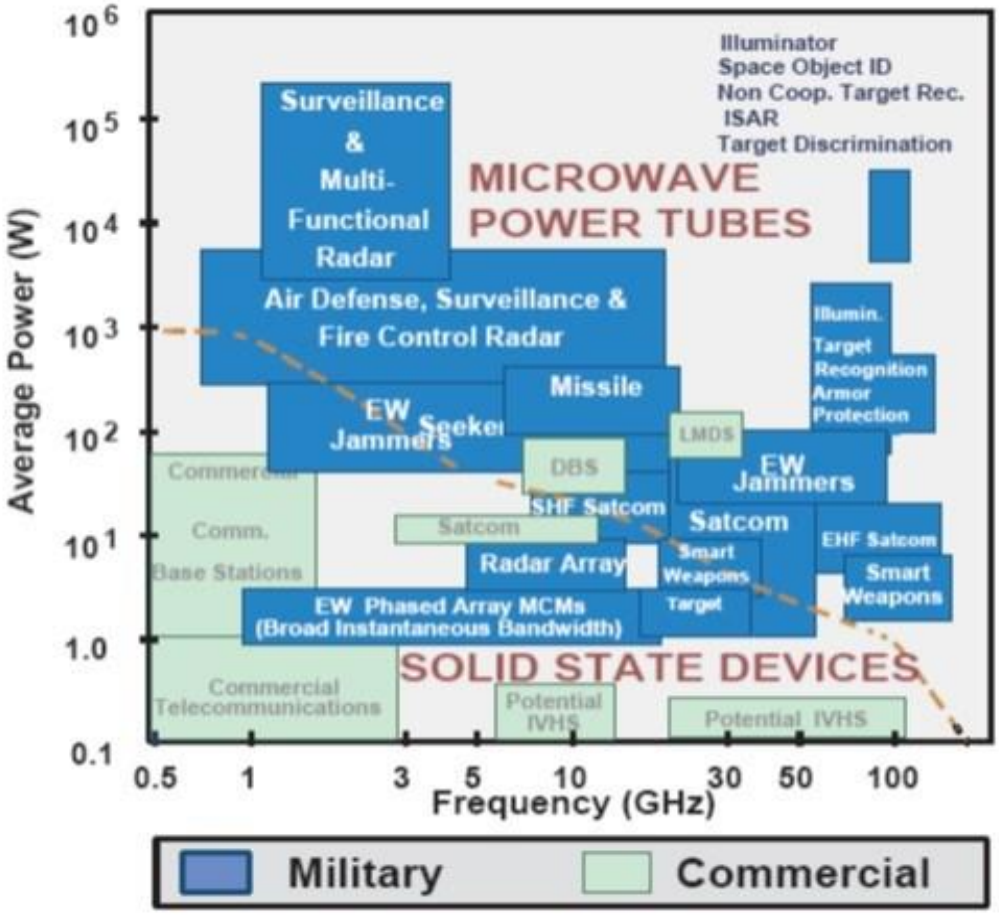


شکل 1-1 تقویت‌کننده‌ی توان حالت جامد (*SSPA*) [2]

ویژگی های تقویت‌کننده‌ی توان حالت جامد:

- توان خروجی نسبتا پایین
- هزینه‌ی ساخت کم
- کوچک وکم وزن
- نیاز به منبع تغذیه با ولتاژ کم
- امکان تولید انبوه با استفاده از تکنولوژی مدارهای مجتمع مدرن

نواحی کاری قطعات فرکانس‌های رادیویی (لامپ‌های مایکروویو و قطعات حالت جامد) و نیز کاربردهای فرکانس‌های مایکروویو و موج میلی‌متری در شکل 1-2 نشان داده شده است.



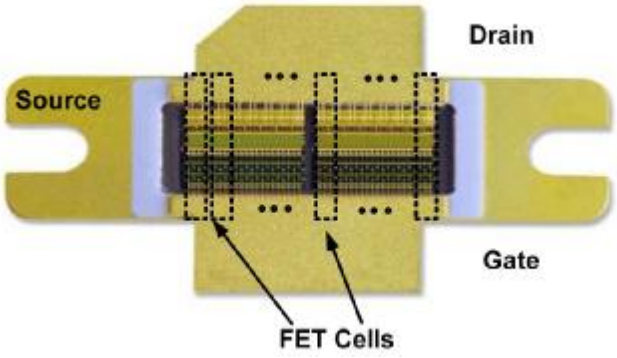
شکل 1-2 نواحی‌کاری قطعات فرکانس‌رادیویی وکاربردهای آن‌ها [3]

2-1 مکانیزم‌های مختلف ترکیب توان

در حالت کلی تمام روش‌های ترکیب توان را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم نمود [4] :

- ترکیب توان در سطح قطعه[13]
- ترکیب توان در سطح مداری[14]

در روش ترکیب توان در سطح دستگاه، یک گروه از قطعه‌های فعال در منطقه‌ای کوچک در مقایسه با طول موج (برای مثال در یک پیکربندی موازی) قرار گرفته‌اند. ترکیب توان در سطح قطعه به طور کلی توسط تعداد قطعه‌هایی که می‌توانند به طور موثر باهم ترکیب شوند، محدود می‌شود. شکل 1-3 ترکیب توان در سطح قطعه را در یک ترانزیستور توان نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود 16 سلول FET در یک پیکربندی موازی با هم ترکیب می‌شوند.



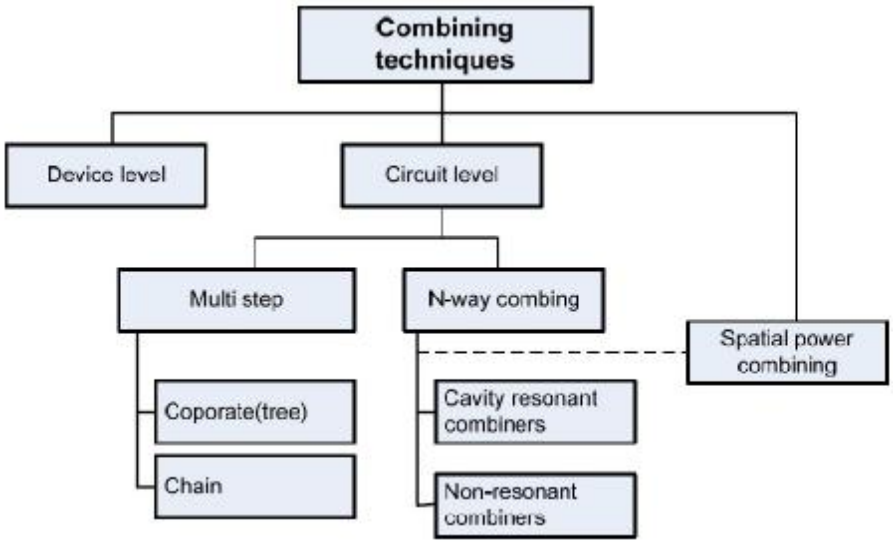
شکل 1-3 ترکیب توان در سطح دستگاه در تراشه ترانزیستور توان

در روش دوم یا همان ترکیب توان در سطح مداری، دستگاه‌ها را می توان توسط انواع مختلفی از روش‌های ترکیب، مانند ترکیب‌کننده ویلکینسون[15] باهم ترکیب کرد. اگر چه تعداد پورت‌های ترکیب در سطح مداری محدود است، اما با انتخاب استراتژی مناسب توان خروجی بالاتر قابل دست‌یابی است.

[13] Device-level combining
[14] Circuit-level combining
[15] Wilkinson combiner

روش ترکیب توان به صورت مداری به دو دسته کلی تقسیم می شود: روشی که در آن خروجی N دستگاه در یک مرحله با هم ترکیب می‌شوند و به ساختار طراحی شده مبتنی بر این روش، ساختار ترکیب چندراهه[16] گفته می‌شود. روش دوم ترکیب توان ساده‌تر می‌باشد و به طور گسترده‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این روش بر خلاف روش قبل، سیگنال‌ها مرحله به مرحله با هم جمع می‌شوند، که این روش خود نیز به دو دسته‌ی ساختارهای ترکیب درختی (یا یک‌پارچه)[17] و زنجیری (یا سری)[18] تقسیم می‌شود [4].

در روش ترکیب توان در سطح مداری، خروجی N تقویت کننده‌ها در یک محیط مانند مایکرواستریپ، کواکسیال و یا موج‌بر با هم ترکیب می‌شوند. در روش دیگر، که به عنوان ترکیب توان فضایی[19] شناخته شده، خروجی تقویت‌کننده‌ها در فضا باهم ترکیب می‌شوند. هر چند این روش را می‌توان در گروه ترکیب توان چندراهه جای داد. ترکیب‌کننده‌های چندراهه خود به دو زیردسته‌ی ساختارهای کاواکی[20] (رزونانسی) و غیررزونانسی[21] تقسیم می‌شوند. شکل 1-4 روش‌های مختلف ترکیب توان را در یک نمودار ساده نشان می‌دهد.



شکل 1-4 نمودار طبقه‌بندی شده روش‌های مختلف ترکیب توان [4]

[16] N-way combining structures

[17] Tree (corporate) combining structures

[18] Chain (serial) combining structures

[19] Spatial power combining

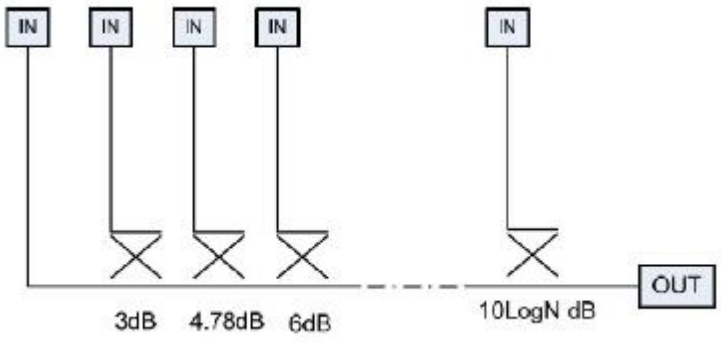
[20] Cavity combining structures

[21] Non-resonant combining structures

1-2-1 ترکیب توان به صورت چند مرحله‌ای

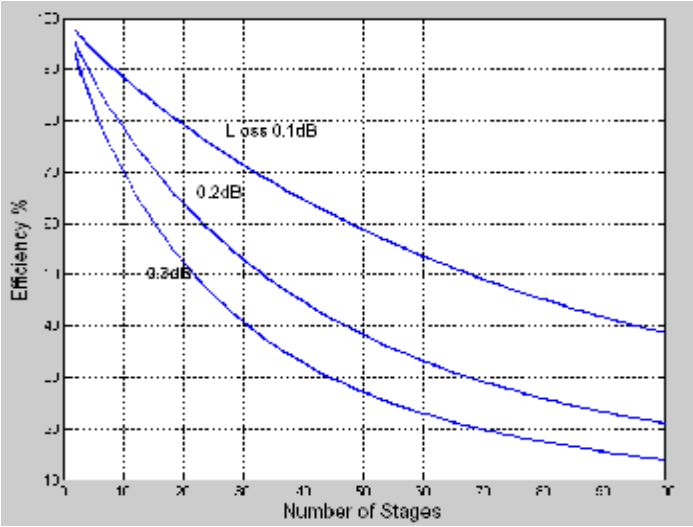
1-2-1-الف ترکیب‌کننده‌های سری

یک ترکیب‌کننده زنجیری یا سری در شکل 1-5 نشان داده شده است. در این ساختار یک خط اصلی انتقال توان وجود دارد و در هر مرحله توان تولیدی نوسان‌سازها به آن اضافه می‌شود. در واقع اگر تعداد طبقه‌ها یا تعداد ورودی‌ها N باشد، در هر مرحله $1/\mathrm{N}$ توان خروجی توسط کوپلر موجود در هر طبقه به خط اصلی اضافه می‌شود. در خروجی طبقه‌ی دوم، توان 2 برابر، در خروجی طبقه‌ی سوم، توان 3 برابر و به همین ترتیب توان زیاد می‌شود. بنابراین ضریب کوپلاژ مورد نیاز برای هر طبقه مطابق شکل 1-5 ، برابر با $10log\ (N)$ بر حسب دسی‌بل می‌باشد (کوپلر اگر به عنوان مقسم توان استفاده شود، برحسب ضریب کوپلاژش، توان ورودی را به دو قسمت مساوی یا نامساوی تقسیم می‌کند. وقتی به عنوان ترکیب‌کننده استفاده شود، نقش ورودی و خروجی در آن عوض می‌شود). یکی از مزیت‌های پیکربندی زنجیره‌ای این است که به سادگی یک مرحله دیگر با اتصال منبع جدید به خط بعد از مرحله N ام از طریق یک کوپلر با ضریب کوپلاژ $10log\ (N+1)$، می‌تواند اضافه شود. روش ترکیب زنجیره‌ای غیردوتایی می‌باشد و در اصل هر تعداد که لازم باشد می‌تواند ترکیب شود. تلفات درکوپلرها، راندمان و پهنای باند قابل دسترسی در این روش را کاهش می‌دهد. همچنین ساخت کوپلر با ضریب کوپلاژ بالا وقتی که تعداد زیادی دستگاه باید ترکیب شود، مشکل می‌باشد.



شکل 1-5 ساختار یک ترکیب‌کننده زنجیری [4]

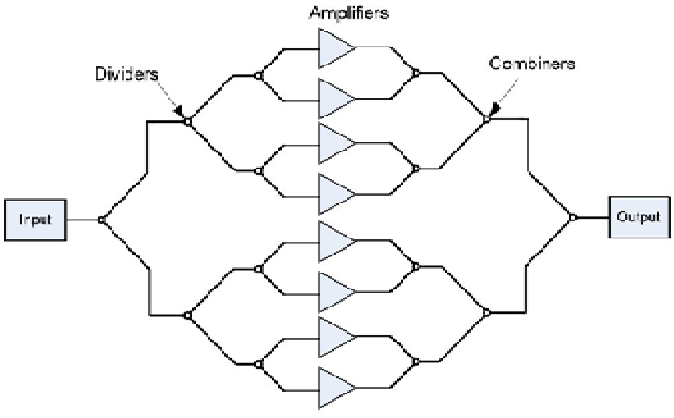
در شکل 1-6 راندمان ترکیب برای ساختار ترکیب‌کننده زنجیری بر حسب تعداد دستگاه‌ها نشان داده شده است. تلفات بر حسب دسی‌بل به تلفات هر خط توان در هر مرحله کوپلاژ اشاره دارد. کاملا مشخص است که راندمان ترکیب با افزایش تعداد دستگاه‌ها به شدت کاهش می‌یابد.



شکل 1-6 راندمان ترکیب برای یک ساختار ترکیب‌کننده زنجیری [4]

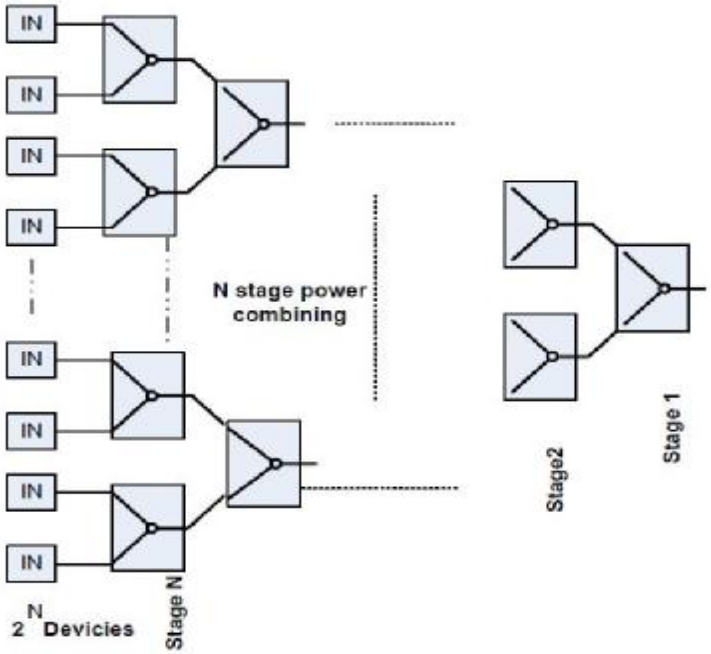
1-2-1-ب ترکیب‌کننده‌های یک‌پارچه

نوع دیگری از ترکیب‌کننده‌های مداری، ترکیب‌کننده یک‌پارچه یا دوتایی می‌باشد. طرح معمول ترکیب‌کننده‌های یک‌پارچه در شکل 1-7 نشان داده شده است.



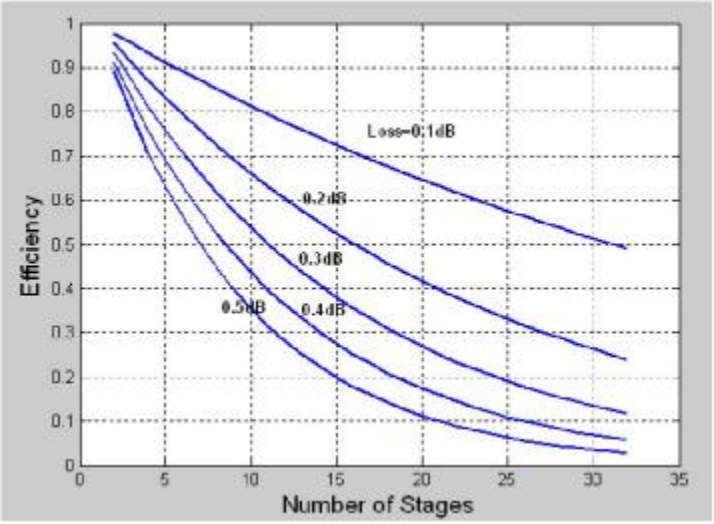
شکل 1-7 ساختار ترکیب‌کننده یک‌پارچه [4]

توان به صورت هم‌فاز توسط تعداد زیادی دستگاه‌های مجزا اضافه می‌گردد. همان‌طورکه در شکل 1-8 نشان داده شده است، خروجی از مدارهای مختلف پشت سر هم با استفاده از جمع‌کننده دو-راهه همچون ترکیب‌کننده ویلکینسون، باهم ترکیب می‌شوند.در این روش در هر مرحله دو به دو توان‌ها جمع می‌شوند. در این حالت تعداد کل سازه‌های ورودی 2^N است که N تعداد طبقه‌های ترکیب توان است. در حالت ایده‌آل که تلف به ازای هر طبقه صفر است، کل توان ورودی در خروجی به دست می‌آید ولی در حالت واقعی، به خاطر تلفات هر طبقه، هرچه تعداد طبقات بیش‌تر شود، بهره کم‌تر می‌شود و بنابراین این روش برای ترکیب‌های توان بالا زیاد مناسب نیست.



شکل 1-8 ترکیب یک‌پارچه (دوتایی) 2^N راهه [4]

همان‌طور که درشکل 1-9 نیز مشاهده می‌شود، تلفات ترکیب مداری با افزایش طبقات به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد و در نتیجه توان خروجی کاهش پیدا می‌کند.



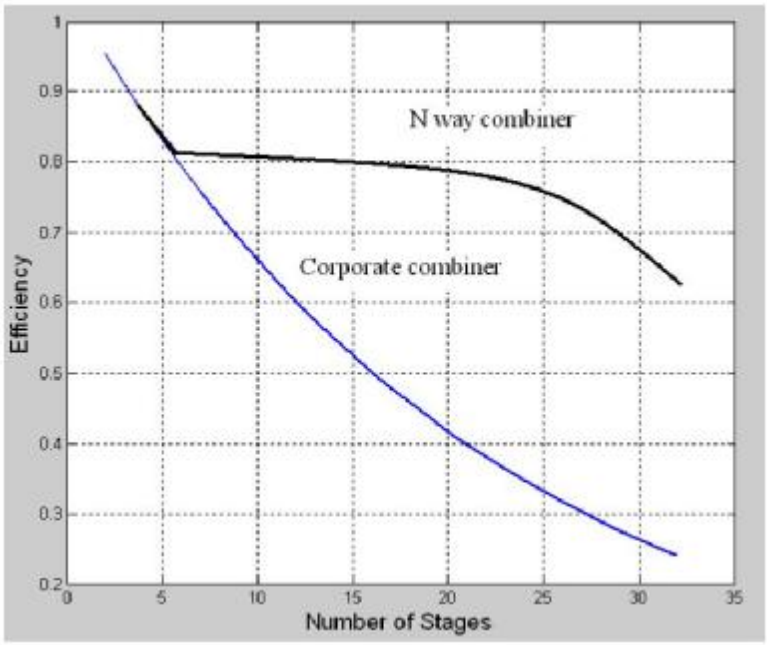
شکل 1-9 راندمان ترکیب برای یک ساختار ترکیب‌کننده یک‌پارچه ("Loss" نشان دهنده تلفات هر طبقه است) [4]

ساختارهای ترکیب زنجیری یا درختی می‌توانند در محیط‌های مختلفی همچون مایکرواستریپ، خط کواکسیال یا موج‌بر تولید می‌گردند. انتخاب محیط انتقال به شدت بر اندازه و تلفات مداری تاثیر می‌گذارد. به طور کلی ساختارهای ساخته شده با مایکرواستریپ، کوچک‌تر و ساختارهای ساخته شده با موج‌بر کم‌تلف‌تر می‌باشند.

1-2-2 ترکیب توان به صورت چندراهه

در روش ترکیب مداری با ساختارهای چندراهه یا ساختارهای فضایی تلفات اندک می‌باشد زیرا توان در یک محیط الکتریکی کم تلفات و یا در فضای بدون تلفات ترکیب می‌شود. ساختارهای ترکیب چندراهه، توان N دستگاه ورودی را مستقیما در یک مرحله و بدون نیاز به ادامه از طریق چند مرحله، با هم جمع می‌کند. این ویژگی امکان دست‌یابی به بهره ترکیب بالاتری را فراهم می‌کند زیرا لازم نمی‌باشد توان از چند مرحله ترکیب‌کننده عبور کند.

شکل 1-10 مقایسه‌ای را بین ترکیب‌کننده‌های مرسوم دوتایی و چندراهه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بر خلاف روش دوتایی که راندمان به میزان قابل توجهی به تعداد دستگاه‌ها وابستگی دارد، در روش چندراهه با افزایش دستگاه‌ها راندمان چندان تغییری نمی‌کند مگر در زمانی که تعداد دستگاه‌ها بسیار زیاد باشد.



شکل 1-10 مقایسه بین ترکیب‌کننده چندراهه و ترکیب‌کننده یک‌پارچه [4]

ساختارهای چندراهه خود به دو زیردسته‌ی ساختارهای کاواکی(رزونانسی) و غیررزونانسی تقسیم می‌شوند.

الف. ساختارهای ترکیب کاواکی

در این دسته از ترکیب‌کننده‌ها یک کاواک (بیشتر کاواک استوانه‌ای) وجود دارد که در فرکانس کار در حالت رزونانس است و سعی می‌شود تا مولفه‌های میدان در این کاواک با مولفه‌های میدان ناشی از پروب‌های ورودی و خروجی انتقال توان برابر شود (شکل 1-11). محیط کاواک می‌تواند کواکسیال یا موج‌بر باشد، اما در هر دوی آن‌ها N پورت ورودی یک کاواک منفرد را تحریک می‌کند.