



دانشگاه صنعتی سهند

شهریه سالانه برای غیرنظمی در مهندسی برق

دوره ۶ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۳۹۸

صفحات ۹۱ الی ۱۰۴

ISSN: 2322-3146

http://jnsee.sut.ac.ir

طراحی آنتن و مدل سازی غیرخطی یکسوساز با هدف برداشت انرژی فرکانس رادیویی پهن باند و چندحاملی

پیمان حسنی^۱ و سید محمد هاشمی^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

^۲نویسنده مسئول، استادیار دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، sm.hashemi@sru.ac.ir.

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۷)

چکیده

در این مقاله، آنتن یکسوساز پهن باند بدون استفاده از مدار تطبیق ارائه شده است. علاوه بر پهنای باند عریض، الگوی تشعشی همه جهته، راندمان تبدیل توان فرکانس رادیویی (RF) به dc حداکثر، قابلیت برداشت حداقل سطح توان و طراحی ساده، این ساختار را به گزینه‌ای مناسب برای کاربرد برداشت کننده انرژی فرکانس رادیویی تبدیل کرده است. برای برداشت انرژی با راندمان حداکثر، شبکه تطبیق حذف و از ساختار آنتن برای تطبیق با یکسوساز استفاده شده است. با توجه به حداقل سطح توان ورودی، دو ساختار مختلف آنتن یکسوساز با مشخصه‌های متفاوت نسبت به سطح توان ورودی پیشنهاد شده‌اند. مدل پیشنهادی، در محدوده ۱/۷۱ تا ۲/۵ گیگاهرتز راندمان مناسبی داشته و حداکثر راندمان آنتن‌های یکسوساز افزاینده ولتاژ و تک دیود به ترتیب در سطوح توان ورودی ۰ dBm و -۵ dBm رخ داده و برابر با ۷۴ و ۶۸ درصد است. راندمان ۴۲ و ۴۴ درصدی برای هر دو ساختار با بررسی حالت چندحاملی به ترتیب در حالت ۲ و ۳ حاملی، حاصل شده است.

واژه‌های کلیدی

آنتن یکسوساز،

راندمان تبدیل توان،

فرکانس رادیویی،

الگوی تشعشی همه جهته،

پهن باند،

چندحاملی.



Sahand University
of Technology

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.6, No.2

Autumn and Winter 2019

ISSN: 2322 – 3146

<http://jnsee.sut.ac.ir>

Antenna Design and Nonlinear Modeling of Rectifier for Wideband and Multi-Tone Radio Frequency Energy Harvesting

Peyman Hasani ¹and Seyed Mohammad Hashemi²

¹M.Sc. Student, Department of Electrical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

²**Corresponding Author**, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, sm.hashemi@sru.ac.ir.

ABSTRACT

Keywords

Rectenna,
Power conversion efficiency,
Radio frequency,
Omnidirectional radiation pattern,
Wideband,
Multi-tone.

In this paper, a wideband rectenna without using matching networks is presented. In addition to wide bandwidth, the omnidirectional radiation pattern, maximum radio frequency to dc conversion efficiency, harvesting capability of the minimum input power level, easy fabrication process causes this antenna be a good choice for radio frequency energy harvesting applications. Matching network has been eliminated and the antenna structure has been used to match with rectifier for energy harvesting with maximum efficiency. Based on the minimum input power level, two different structures have been suggested as the rectenna. The proposed model meets proper efficiency within the frequency band of 1.71-2.5 GHz and harvests the input power levels of 0 dBm and -5 dBm by implementing the two proposed structures with the maximum efficiencies of 74 and 68%, respectively. The multi-tone state has been also investigated which indicates the maximum obtained efficiencies of about 42 and 44% for the 2- and 3-tone modes, respectively.

۱ - مقدمه

در سال‌های گذشته تلاش‌های زیادی برای برداشت حداکثر انرژی از منابع فرکانس رادیویی با ساختارهای مختلف برداشت‌کننده انرژی فرکانس رادیویی صورت گرفته است. منابع فرکانس رادیویی به دو دسته تخصیص‌یافته و محیطی تقسیم می‌شوند. در صورت نیاز به انرژی قابل پیش‌بینی از منبع تخصیص‌یافته مورد استفاده قرار می‌گیرد. منابع فرکانس رادیویی محیطی در دو دسته پویا و ایستا بررسی می‌شوند. در حالت ایستا، در طول زمان توانی نسبتاً پایدار از طرف فرستنده فراهم می‌شود و از انواع آن می‌توان به ایستگاه تلویزیون و رادیو اشاره کرد. در حالت پویا، توان ارسالی متغیر با زمان از طرف فرستنده ارسال می‌شود. برای نمونه نقطه دسترسی وای‌فای و کاربران مجوزدار در شبکه رادیو از این دسته هستند [۱]. منابع فرکانس رادیویی مذکور در جدول ۱ با توجه به چگالی توان منبع، چگالی توان متوسط قابل دسترس و باندهای فرکانسی ارائه شده‌اند [۱].

حساسیت بالا به حداقل سطح توان ورودی، پهنای باند فرکانسی عریض، حداکثر راندمان تبدیل توان RF به dc و حداقل اندازه ساختار از مشخصه‌های مهم برداشت‌کننده انرژی فرکانس رادیویی هستند. در طراحی یکسوساز به‌عنوان یکی از عنصرهای برداشت‌کننده، نیاز به بررسی تطبیق در سطوح توان و فرکانس‌های مختلف با توجه به خاصیت غیرخطی دیود است. ساختارهای پهن‌بند و چندبند برای برداشت انرژی فرکانس رادیویی در فرکانس‌های مختلف استفاده می‌شوند. در سال‌های اخیر ساختارهای تک‌بند، چندبند و پهن‌بند برای برداشت انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به امکان تطبیق کامل در یک فرکانس مشخص، برای ساختارهای تک‌بند راندمان بالایی گزارش شده است. در مقاله‌های [۲ و ۳] هدف اندازه کوچک برداشت‌کننده انرژی بوده است. در مقاله [۴] با استفاده از ساختاری ساده با سطح توان ورودی ۰ dBm در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز، راندمان ۸۰ درصد گزارش شده است. در مقاله‌های [۵-۸] برای برداشت انرژی به صورت چندبند، ساختار پیچیده شبکه تطبیق ارائه شده است. در مقاله [۹]، آنتن یکسوساز پهن‌بند با ساختاری بسیار پیچیده و راندمان پایین ارائه شده است. در مقاله [۱۰] آنتن یکسوساز پهن‌بند با پیچیدگی ساختاری متوسط، راندمان پایین در برداشت سطح توان ورودی بالا و اندازه بزرگ گزارش شده است. در مقاله [۱۱] با استفاده از ساختاری ساده، حداکثر راندمان ۷۵ درصد با سطح توان ورودی ۲۰ dBm و پهنای باند ۱/۱ - ۰/۹ و ۲/۵ - ۱/۸ گیگاهرتز گزارش شده است. در مقاله [۱۲] یکسوسازی با ابعاد کوچک برای برداشت انرژی فرکانس رادیویی با استفاده از هر آنتن تطبیق شده به امپدانس ۵۰ اهم در بازه ۰/۱ تا ۲/۹ گیگاهرتز و حداکثر راندمان ۶۰ درصد در سطح توان ورودی ۰ dBm طراحی شده است.

جدول ۱. باندهای فرکانسی منابع انرژی فرکانس رادیویی محیطی [۱].

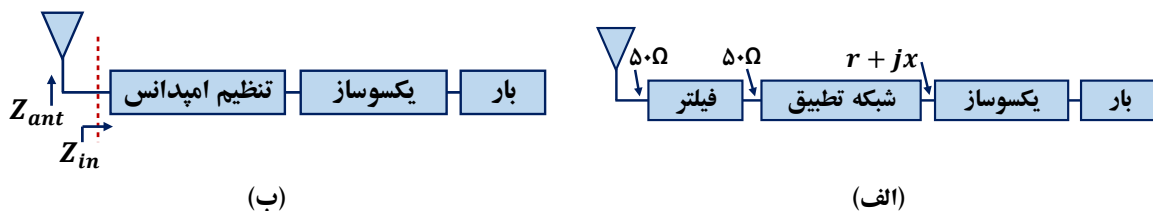
باند فرکانسی	بازه فرکانسی MHz	متوسط چگالی توان (nW/cm ²)	حداکثر چگالی توان (nW/cm ²)
DTV	۴۷۰-۶۱۰	۰/۸۹	۴۶۰
GSM900 (MTx)	۸۸۰-۹۱۵	۰/۴۵	۳۹
GSM900 (BTx)	۹۲۵-۹۶۰	۳۶	۱۹۳۰
GSM1800 (MTx)	۱۷۱۰-۱۷۸۵	۰/۵	۲۰
GSM1800 (BTx)	۱۸۰۵-۱۸۸۰	۸۴	۶۳۹۰
3G (MTx)	۱۹۲۰-۱۹۸۰	۰/۴۶	۶۶
3G (BTx)	۲۱۱۰-۲۱۷۰	۱۲	۲۴۰
WiFi	۲۴۰۰-۲۵۰۰	۰/۱۸	۶

در این مقاله، ساختاری ساده بدون استفاده از مدار تطبیق با راندمان حداکثر در ورودی حداقل ارائه می‌شود. در بخش ۲، ساختار برداشت‌کننده انرژی فرکانس رادیویی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۳ مدارهای یکسوساز پیشنهادی معرفی شده و مقایسه‌ای در عملکرد آن‌ها صورت گرفته است. در بخش ۴ ساختار کلی آنتن معرفی شده، راندمان تبدیل توان RF به dc در سطوح مختلف توان ورودی به صورت تک‌حاملی و چندحاملی ارائه می‌شود و در نهایت مدل پیشنهادی با کارهای گذشته مقایسه شده است. در بخش ۵ جمع‌بندی مقاله ارائه می‌شود.

۲- ساختار برداشت‌کننده انرژی فرکانس رادیویی

ساختار کلی آنتن یکسوساز به شکل سنتی همان‌طور که در شکل ۱(الف) نشان داده شده دارای ۵ عنصر اصلی است که عبارتند از [۱۲]: (۱) آنتن با امپدانس ورودی تطبیق شده به مقدار استاندارد ۵۰ اهم، (۲) فیلتر میان‌گذر (برای جلوگیری از کاهش راندمان برداشت‌کننده در اثر برگشت هارمونیک‌های دوم و سوم به آنتن)، (۳) ساختارهای پیچیده مدار تطبیق (برای برداشت حداکثر توان به این صورت که در فرکانس‌های مختلف، امپدانس ورودی یکسوساز به ۵۰ اهم تطبیق داده شود)، (۴) یکسوساز (برای تبدیل توان RF ورودی به dc)، (۵) بار (می‌تواند یک مقاومت، مبدل dc-dc برای افزایش ولتاژ خروجی و یا ابر خازن برای ذخیره انرژی باشد). در اکثر تحقیقات در زمینه برداشت انرژی فرکانس رادیویی به صورت چندبند و پهن‌بند، از ساختارهای پیچیده شبکه تطبیق برای خطی کردن امپدانس ورودی یکسوساز استفاده شده که باعث افزایش خطای ساخت، تلفات و هزینه می‌شود. با توجه به شکل ۱(ب)، ساختار پیشنهادی از چهار قسمت تشکیل شده که در این حالت به جای استفاده از شبکه تطبیق پیچیده، آنتن با یکسوساز به صورت مستقیم تطبیق داده می‌شود. قبل از یکسوساز، بلوک تنظیم‌کننده متشکل از القاگر و خازن سری برای تنظیم امپدانس یکسوساز به مقدار قابل پیاده‌سازی با آنتن به کار می‌رود. در این ساختار از آنتن در نقش شبکه تطبیق و فیلتر استفاده شده، به این صورت که امپدانس آنتن در فرکانس‌های مختلف با توجه به ساختار آنتن پیشنهادی که در قسمت ۴ بررسی می‌شود به صورت مزدوج امپدانس ورودی قبل از بلوک تنظیم‌کننده امپدانس است ($Z_{ant} = Z_{in}^*$). در مقاله‌های [۳] و [۱۱] نیز از شبکه تطبیق استفاده نشده، ولی با توجه به عدم استفاده از عنصرهای تنظیم‌کننده امپدانس در تطبیق آنتن و یکسوساز نتایج مناسبی برای برداشت انرژی فرکانس رادیویی گزارش نشده است. به طوری که در مقاله [۳] تطبیق تنها در یک فرکانس برقرار شده و در مقاله [۱۱] در سطح توان بسیار بالای ۲۰ dBm راندمان مطلوب گزارش شده است.

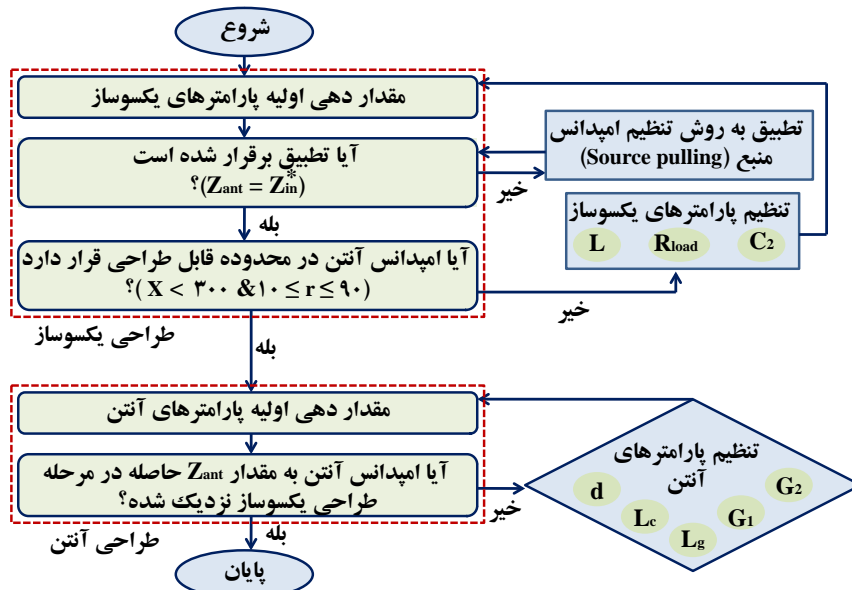
روندنمای طراحی آنتن یکسوساز در فرکانس و توان مشخص (برای مثال توان ۱۰ dB- و فرکانس ۱۸۴۰ MHz) در شکل ۲ نشان داده شده است. مراحل مختلف طراحی در ادامه به شکل جزء به جزء بررسی شده است.



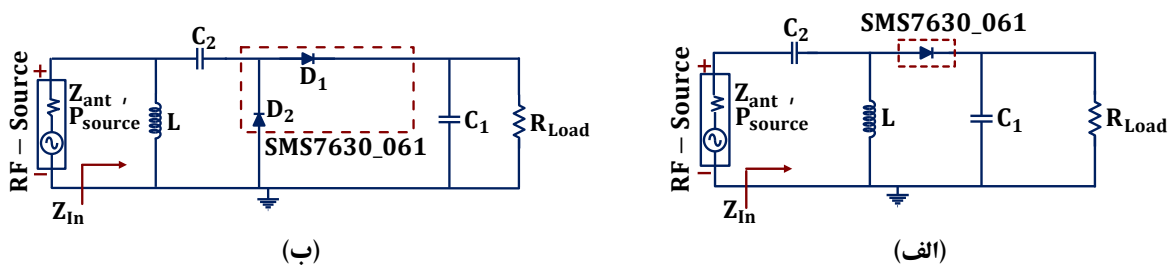
شکل ۱. بلوک دیاگرام آنتن یکسوساز (الف) سنتی [۱۱]، (ب) پیشنهادی.

۳- طراحی یکسوساز

در این مقاله از دو ساختار یکسوساز برای تبدیل توان RF به dc استفاده شده و در ادامه تفاوت هر کدام از نظر راندمان و حساسیت به حداقل سطح توان ورودی بررسی می‌شود. مدار یکسوسازهای تک دیود و افزایش ولتاژ به همراه بلوک تنظیم‌کننده امپدانس آن‌ها به ترتیب در شکل‌های ۳(الف) و ۳(ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، آنتن در این ساختار با یک منبع با توان P_{source} و امپدانس سری Z_{ant} مدل شده است. در هر دو ساختار از دیود شاتکی SMS7630_061 استفاده شده که دلیل این انتخاب، زمان انتقال کوتاه‌تر و ولتاژ آستانه پایین آن در مقایسه با دیودهای PN و کارایی مناسب‌تر نسبت به سایر دیودهای شاتکی در توان‌های پایین‌تر از ۰ dBm است [۱۳]. در طراحی ساختار یکسوساز از روش غیرخطی هارمونیک بالانس نرم افزار ADS استفاده شده است. روال شبیه‌سازی به این صورت بوده که: (۱) ابتدا توان و فرکانس آنتن به ترتیب ۱۰ dBm - و ۱۸۴۰ MHz تعریف شده است. (۲) مقداری فرضی برای Z_{ant} در نظر گرفته شده است. (۳) شبیه‌سازی اجرا شده و امپدانس ورودی یکسوساز (Z_{in}) مشخص شده است. (۴) Z_{ant} مساوی مزدوج Z_{in} قرار داده شده است. (۵) شبیه‌سازی اجرا شده و Z_{in} جدید مشخص می‌شود. (۶) Z_{ant} مساوی مزدوج Z_{in} جدید قرار داده شده است. به همین ترتیب تا جایی ادامه داده شده که Z_{in} دقیقاً برابر با مزدوج Z_{ant} شود. ۶ مرحله مذکور و مراحل تکرار مورد نیاز برای تطبیق کامل آنتن و یکسوساز، به روش تنظیم امپدانس منبع (Source Pulling) در شبیه‌سازی شناخته شده است.

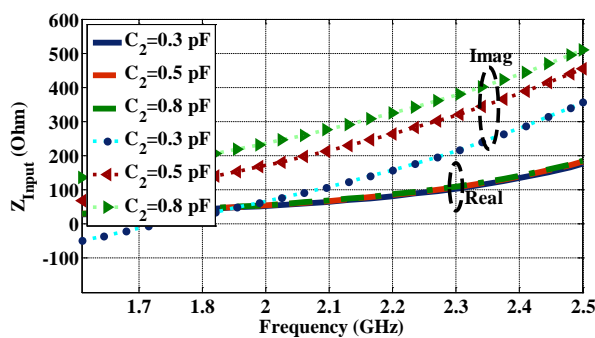


شکل ۲. روندنمای طراحی آنتن یکسوساز در فرکانس و توان مشخص.

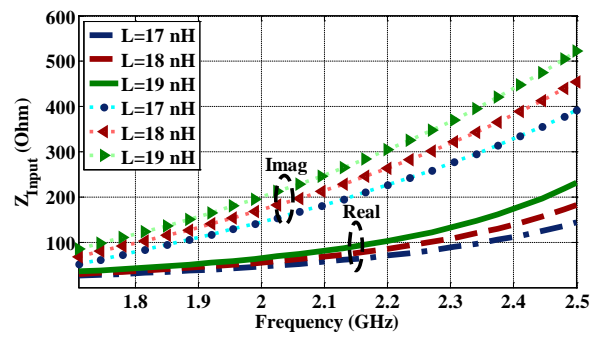


شکل ۳. مدار یکسوساز به همراه بلوک تنظیم‌کننده امپدانس با ساختار (الف) تک‌دیود، (ب) افزایش ولتاژ.

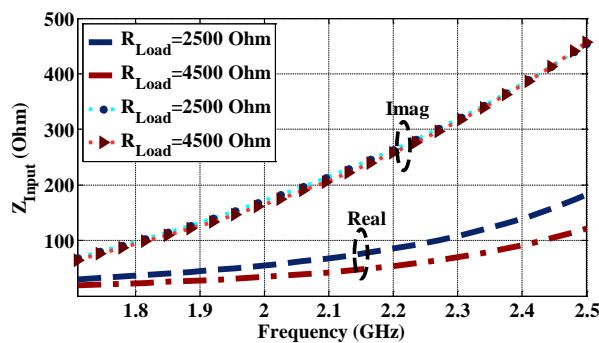
برای تطبیق امپدانس با استفاده از ساختار آنتن در بخش ۴ مقاله نیاز به تعیین Z_{ant} در سه فرکانس ابتدایی، میانی و انتهایی باند فرکانسی هست. در نتیجه مراحل تنظیم امپدانس منبع برای فرکانس‌های ۱۹۳۰ و ۲۱۴۰ مگاهرتز نیز تکرار می‌شود. در طراحی آنتن محدودیتی در پیاده‌سازی Z_{ant} هست ($10 \leq r \leq 90$)، که با استفاده از عناصر فشرده القاگر، خازن و مقاومت می‌توان در طراحی یکسوساز به Z_{ant} مطلوب رسید. در ادامه دو عنصر را ثابت گرفته و یکی از عناصر مذکور را تغییر داده تا تأثیر آن روی Z_{ant} مشخص شود. برای مثال با مقدار ثابت خازن و مقاومت، مقدار القاگر تغییر کرده و تغییرات امپدانس ورودی ترسیم شده است (شکل ۴ الف). به همین ترتیب در شکل‌های ۴ (ب) و (ج) به ترتیب تأثیر تغییرات دو عنصر خازن و مقاومت بار بر امپدانس ورودی یکسوساز مشخص شده و در نهایت با تنظیم مقدار آن‌ها، Z_{ant} مطلوب حاصل شده است. با توجه به شکل‌ها با افزایش عناصر تنظیم‌کننده امپدانس (القاگر، ظرفیت خازنی (C_2) و مقاومت بار)، قسمت موهومی امپدانس ورودی یکسوساز القائی تر شده است. با افزایش عناصر القاگر، ظرفیت خازنی (C_2) و مقاومت بار، مقدار حقیقی امپدانس به ترتیب روند کاهشی (در فرکانس‌های بالا)، افزایشی و ثابت دارد. مقدار عنصرهای فوق برای Z_{ant} مطلوب در ۳ فرکانس مذکور (ابتدا، میانه و انتهایی پهنای باند) در جدول ۲ ارائه شده‌اند.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۴. تأثیر مقدار (الف) القاگر، (ب) ظرفیت خازنی، (ج) مقاومت بار بر امپدانس ورودی یکسوساز در توان ورودی ۱۰ dBm.

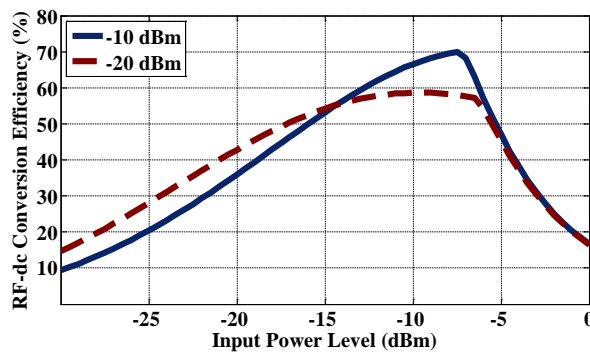
جدول ۲. مقادیر المان‌های یکسوساز تک‌دیود و افزایشنده ولتاژ.

یکسوساز افزایشنده ولتاژ				یکسوساز تک‌دیود			
L	۱۱ nH	C ₁	۱۰ pF	L	۱۸ nH	C ₁	۱۰ pF
R _{Load}	۴۰۰۰ Ω	C ₂	۱۰ pF	R _{Load}	۴۰۰۰ Ω	C ₂	۰/۵ pF

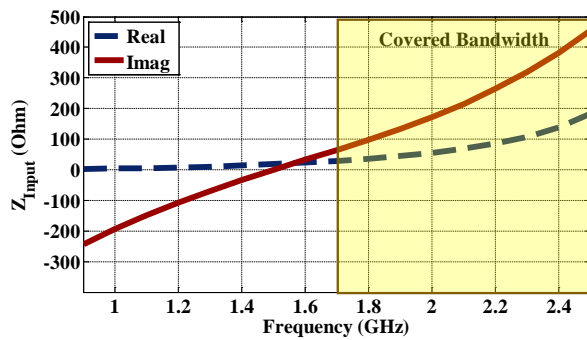
در مرحله بعدی، شرایط تطبیق در دو سطح توان ورودی -10 dBm و -20 dBm در شکل ۵ بررسی شده است. با توجه به راندمان بالاتر دیده شده در بازه توانی قابل برداشت از منابع فرکانس رادیویی $(-5$ تا $-15)$ dBm، در تمام شبیه‌سازی‌ها تطبیق در سطح توان ورودی -10 dBm برقرار شده است. راندمان تبدیل توان RF به dc برابر با نسبت توان dc خروجی یکسوساز به توان منبع فرکانس رادیویی (P_{source}) است.

مشخصه امپدانس ورودی یکسوسازهای افزایش‌دهنده ولتاژ و تک‌دیود بر حسب فرکانس به ترتیب در شکل‌های ۶(الف) و ۶(ب) نشان داده شده است. تطبیق امپدانس در بازه فرکانسی نشان داده شده در شکل ۶ صورت گرفته است.

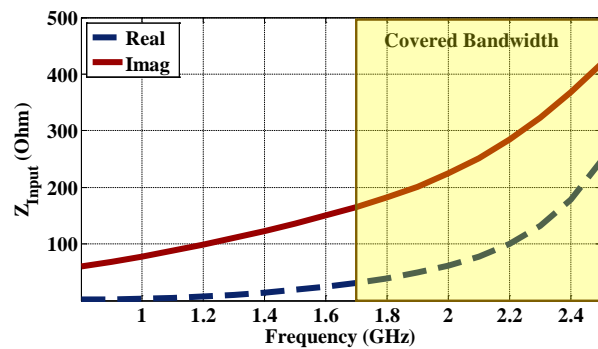
امپدانس حاصل شده از مراحل قبل برای دو ساختار یکسوساز پیشنهادی در جدول ۳ مشخص شده که با استفاده از آن می‌توان برای هر یک از ساختارها آنتنی طراحی کرد که امپدانس ورودی برابر با مزدوج امپدانس مذکور داشته باشد.



شکل ۵. مقایسه تطبیق در توان‌های -10 dBm و -20 dBm در فرکانس 1840 MHz



(ب)



(الف)

شکل ۶. نمودار امپدانس ورودی یکسوساز (الف) افزایش‌دهنده ولتاژ، (ب) تک‌دیود بر حسب فرکانس در توان ورودی -10 dBm.

جدول ۳. امپدانس ورودی یکسوساز تک‌دیود و افزایش‌دهنده ولتاژ.

فرکانس (MHz)	۱۹۳۰	۱۸۴۰	۲۱۴۰
یکسوساز تک‌دیود	$46/144 + j848/791$	$39/112 + j992/632$	$69/229 + j696/222$
یکسوساز افزایش‌دهنده ولتاژ	$52/534 + j207/867$	$43/092 + j189/976$	$86/492 + j258/648$

مقایسه دو ساختار یکسوساز در دو فرکانس ۱۸۴۰ و ۲۱۴۰ مگاهرتز به ترتیب در شکل‌های ۷(الف) و ۷(ب) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷، هر دو ساختار در فرکانس پایین‌تر راندمان بالاتری دارند. از طرفی یکسوساز تک دیود در توان‌های ورودی پایین‌تر نسبت به افزایش ولتاژ راندمان بالاتری دارد و معیار استفاده هر یک از دو ساختار توان ورودی در دسترس است. در نتیجه زمانی که منابعی با چگالی توان بالاتر در دسترس هستند از یکسوساز افزایش ولتاژ استفاده می‌شود و بالعکس.

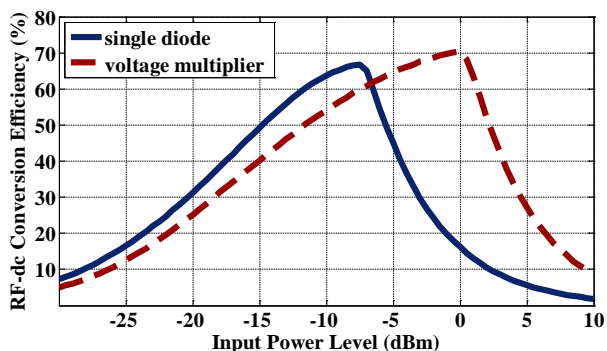
در شکل ۸ تطبیق امپدانس در فرکانس‌های ۱۸۴۰ و ۲۱۴۰ مگاهرتز و ۳ سطح توان ۱۰-، ۲۰- و ۳۰- دسی‌بل برای هر دو ساختار یکسوساز صورت گرفته است. انرژی منابع فرکانس رادیویی 3G و GSM1800 با تطبیق در این فرکانس‌ها قابل برداشت است. با توجه به شکل ۸، یکسوساز افزایش ولتاژ حساسیت کم‌تری به تغییرات فرکانس داشته و طراحی آنتن برای این ساختار ساده‌تر است. از طرفی اختلاف راندمان یکسوساز تک دیود در سطح توان‌های پایین‌تر از یکسوساز افزایش ولتاژ بیشتر شده و استفاده از این یکسوساز مطلوب در طراحی است.

۴- طراحی آنتن

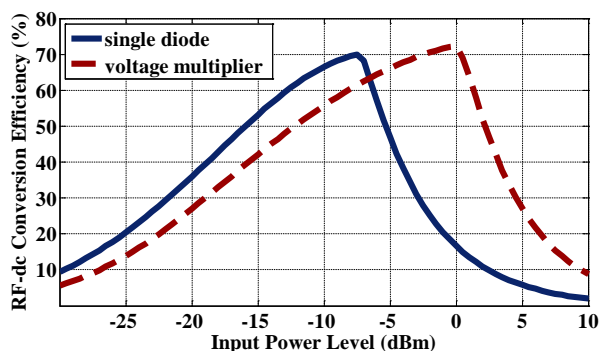
همان‌طور که اشاره شد برای دریافت حداکثر توان، نیاز به تطبیق امپدانس آنتن و یکسوساز در فرکانس‌های مختلف است که با توجه به عدم استفاده از شبکه تطبیق به شکل مجزا نیاز به پیاده‌سازی آن با ساختار آنتن است. در شکل ۹، مدل پیشنهادی متشکل از یک خط تغذیه CPW، متصل به یک تشعشع‌کننده اصلی به صورت مدار چاپی نشان داده شده است.

در این ساختار از خازن اینتردیجیتال به شکل سری برای افزایش خاصیت خازنی امپدانس آنتن و از دی‌الکتریک Rogers4003 با ثابت دی‌الکتریک ۳/۵۵ و ضخامت ۰/۸۱۳ میلی‌متر استفاده شده است. مهم‌ترین پارامترها در طراحی آنتن پیشنهادی، طول خازن اینتردیجیتال مورد استفاده (L_c)، فاصله خازن با محل تغذیه (d)، طول صفحه زمین (L_g)، فاصله بین صفحه زمین با خط تغذیه CPW (G_1) و قسمت تشعشعی (G_2) است. تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده در طراحی آنتن در نرم‌افزار تمام موج FEKO صورت گرفته‌اند.

در ادامه، تأثیر هر یک از پارامترهای تأثیرگذار بر امپدانس آنتن در شکل ۱۰ و جدول ۴ بررسی شده است. در نهایت مقادیر بهینه نشان داده شده در جدول ۵ برای پارامترهای آنتن در حالت یکسوساز تک‌دیود و افزایش ولتاژ حاصل شده است. در تمام شبیه‌سازی‌ها در شکل ۱۰، زمانی که تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر مورد بررسی قرار می‌گیرد، سایر پارامترهای مورد تحقیق ثابت در نظر گرفته شده و با فرایند تکرار مقادیر بهینه تعیین شده‌اند. تأثیر پارامترهای L_c ، d ، G_1 ، G_2 و L_g بر امپدانس آنتن به ترتیب در شکل‌های ۱۰(الف)، ۱۰(ب)، ۱۰(ج)، ۱۰(د) و ۱۰(و) نشان داده شده است. در جدول ۴ اثر افزایش هر یک از پارامترهای مذکور، با تحلیل شکل ۹ در فرکانس‌های بالا و پایین پهنای باند نشان داده شده که برای تطبیق امپدانس آنتن با یکسوساز در فرکانس‌های مورد نظر استفاده می‌شود.

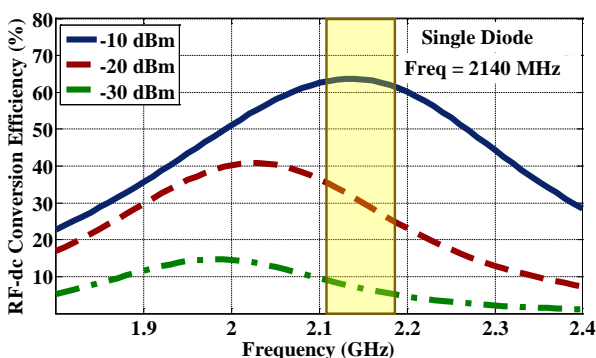
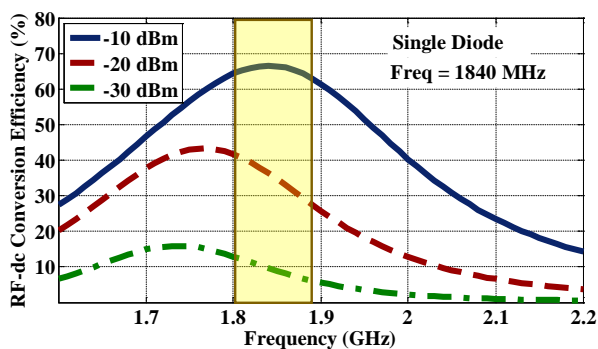


(ب)

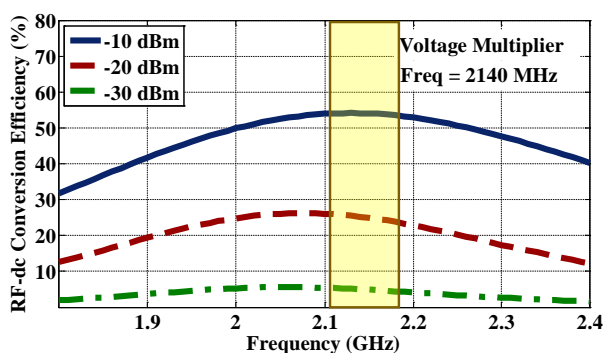
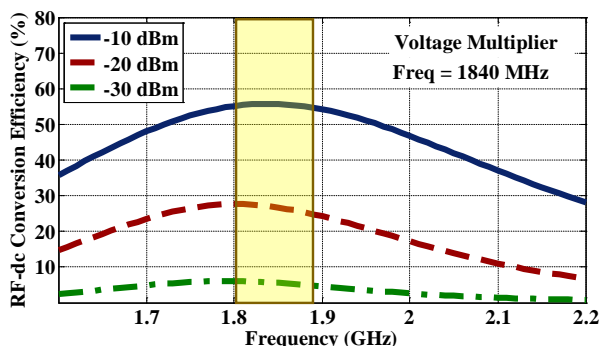


(الف)

شکل ۷. مقایسه دو یکسوساز با تطبیق در فرکانس (الف) ۱۸۴۰، (ب) ۲۱۴۰ مگاهرتز و توان ورودی ۱۰ dBm-.

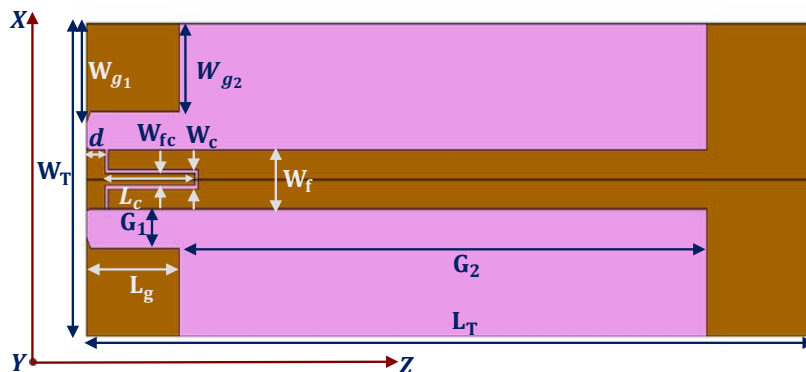


یکسوساز تک دیود

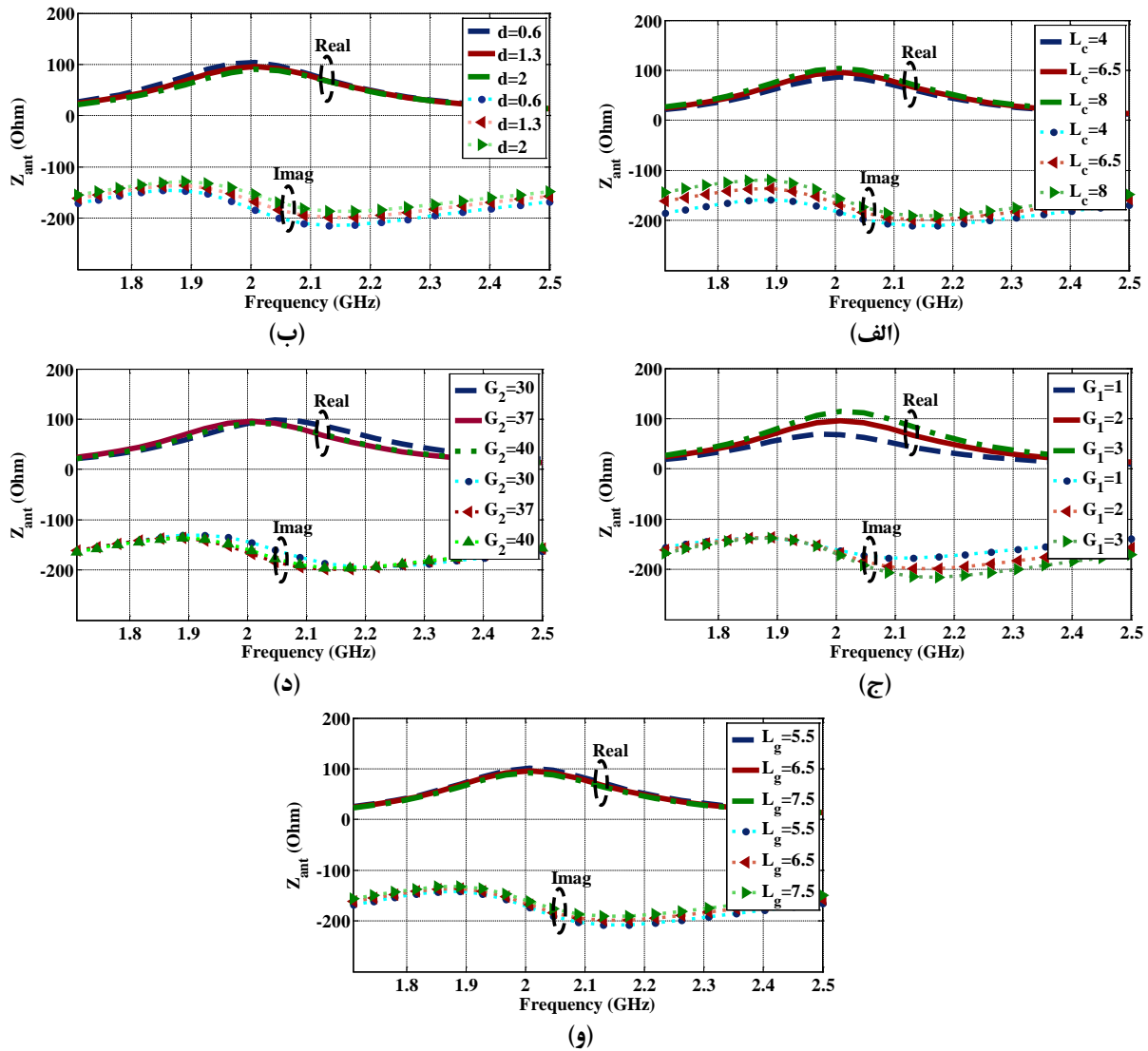


یکسوساز افزایش دهنده ولتاژ

شکل ۸. تأثیر تغییر فرکانس در راندمان یکسوساز تک دیود و افزایش دهنده ولتاژ در حالت تطبیق در فرکانس ۱۸۴۰ و ۲۱۴۰ مگاهرتز.



شکل ۹. آنتن طراحی شده برای ساختار یکسوساز.



شکل ۱۰. تأثیر پارامترهای (الف) L_c ، (ب) d ، (ج) G_1 ، (د) G_2 ، (و) L_g در تنظیم امپدانس آنتن.

جدول ۴. تغییرات امپدانس ورودی آنتن در فرکانس‌های بالا و پایین پهنای باند با افزایش اندازه پارامترهای آن.

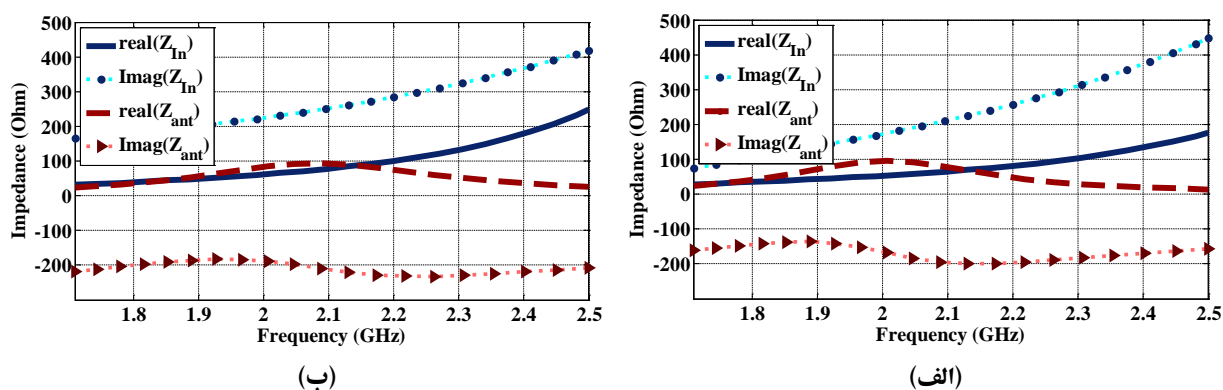
قسمت موهومی امپدانس					قسمت حقیقی امپدانس					افزایش اندازه پارامتر	تغییرات امپدانس ورودی آنتن در فرکانس‌های
L_g	G_2	G_1	d	L_c	L_g	G_2	G_1	d	L_c		
ثابت	افزایشی	افزایشی	کاهشی	افزایشی	القائی‌تر	خازنی‌تر	ثابت	القائی‌تر	القائی‌تر	پایین باند	
ثابت	کاهشی	افزایشی	ثابت	ثابت	القائی‌تر	ثابت	خازنی‌تر	القائی‌تر	القائی‌تر	بالای باند	

جدول ۵. مقادیر بهینه در نتیجه مطالعه پارامتری برای پارامترهای آنتن یکسوساز تک‌دیود و افزایش ولتاژ.

یکسوساز افزایش ولتاژ				یکسوساز تک‌دیود			
ابعاد	(mm)	ابعاد	(mm)	ابعاد	(mm)	ابعاد	(mm)
L_T	۵۳	W_T	۱۵	L_T	۵۱	W_T	۱۶
L_g	۳	W_{g1}	۴/۴۲۵	L_g	۶/۵	W_{g1}	۵/۰۸
L_c	۶	W_{g2}	۳/۷۵	L_c	۶/۵	W_{g2}	۴/۵
d	۰/۷	W_f	۳/۵	d	۱/۳	W_f	۳
G_1	۲	W_c	۱/۰۳	G_1	۲	W_c	۱/۰۳
G_2	۳۰	W_{fc}	۰/۶۲	G_2	۳۷	W_{fc}	۰/۶۲

با توجه به تنظیم المان‌های آنتن و یکسوساز، نمودار تغییرات امپدانس ورودی آنتن (Z_{ant}) و یکسوساز (Z_{in}) در شکل ۱۱ برای هر دو ساختار یکسوساز نشان داده شده و در جدول ۶ امپدانس ورودی آنتن و یکسوساز در ۳ فرکانس نمونه به ترتیب برای حالت تک‌دیود و افزایش ولتاژ مورد مقایسه قرار گرفته که به مقدار مزدوج مطلوب نزدیک است.

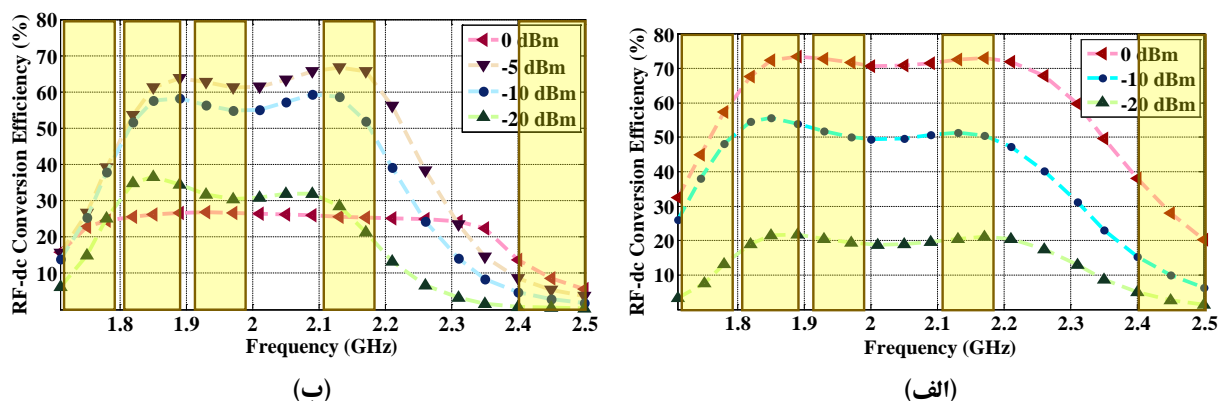
راندمان نهایی دیده شده از آنتن‌های یکسوساز تک‌دیود و افزایش ولتاژ در بازه فرکانسی ۱/۷ تا ۲/۵ گیگاهرتز به ترتیب در شکل‌های ۱۲(الف) و (ب) نشان داده شده است. باندهای قابل برداشت معرفی شده در جدول ۱ در این بازه فرکانسی (WiFi و 3G، GSM1800)، در شکل مشخص شده است. با توجه به شکل، حداکثر راندمان آنتن‌های یکسوساز تک‌دیود و افزایش ولتاژ به ترتیب در -۵ dBm و ۰ dBm رخ داده و در حدود ۶۸ و ۷۴ درصد است.



شکل ۱۱. تغییرات امپدانس ورودی آنتن و یکسوساز (الف) تک‌دیود، (ب) افزایش ولتاژ در سطح توان ورودی ۱۰ dBm.

جدول ۶. امپدانس ورودی آنتن و یکسوساز تک‌دیود و افزایش ولتاژ در سطح توان ورودی ۱۰ dBm.

یکسوساز افزایش ولتاژ		یکسوساز تک‌دیود		فرکانس (MHz)
Z_{ant}	Z_{in}	Z_{ant}	Z_{in}	
$۴۲/۱۹۲ - j۶۹۶/۰۸۳$	$۴۳/۰۹۲ + j۱۸۹/۹۷۶$	$۵۱/۱۳۸ - j۸۶۹/۲۸۴$	$۳۹/۱۱۲ + j۹۹۲/۶۳۲$	۱۸۴۰
$۶۳/۱۸۲ - j۹۵۶/۹۱۱$	$۵۲/۵۳۴ + j۲۰۷/۸۶۷$	$۸۱/۱۴۱ - j۷۰۱/۳۹۵$	$۴۶/۱۴۴ + j۸۴۸/۷۹۱$	۱۹۳۰
$۸۸/۴۳۹ - j۲۲۱/۶۸۲$	$۸۶/۴۹۲ + j۲۵۸/۶۴۸$	$۶۴/۱۹۹ - j۳۰۹/۳۱۹$	$۶۹/۲۲۹ + j۶۹۶/۲۲۲$	۲۱۴۰

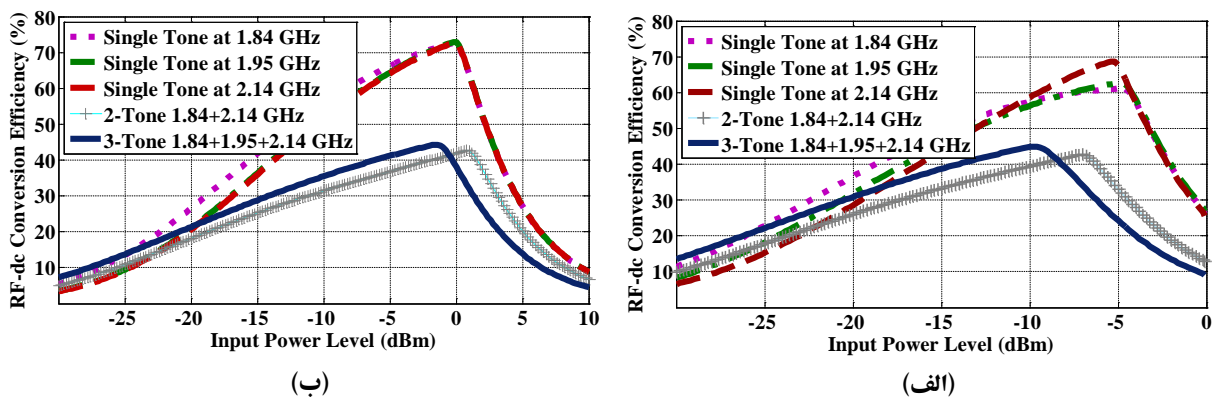


شکل ۱۲. مشخصه راندمان آنتن یکسوساز (الف) تک‌دیود، (ب) افزایش ولتاژ در سطوح توان مختلف.

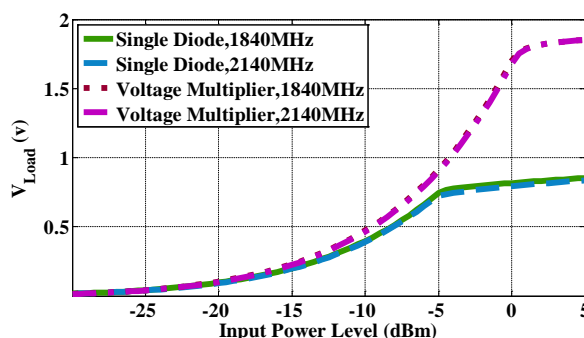
حالت چندحاملی با توجه به امکان دسترسی به چند منبع با فرکانس کاری مختلف بررسی شده که نتیجه شبیه‌سازی با در نظر گرفتن این مهم در شکل‌های ۱۳(الف) و (ب) به ترتیب برای آنتن‌های یکسوساز تک‌دیود و افزایش ولتاژ نشان داده شده است. نکته قابل توجه در این حالت، جابه‌جایی نقطه حداکثر راندمان در هر دو ساختار است و در هر دو ساختار، حداکثر راندمان به ترتیب در حالت ۲ و ۳ حاملی ۴۲ و ۴۴ درصد است.

تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب سطح توان ورودی در دو فرکانس ۱۸۴۰ و ۲۱۴۰ مگاهرتز برای آنتن‌های یکسوساز تک‌دیود و افزایش ولتاژ در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۴، حداکثر ولتاژ ۰/۸۳ و ۱/۸ ولت به ترتیب برای آنتن‌های یکسوساز تک‌دیود و افزایش ولتاژ حاصل شده و برای سطح توان بالاتر از -۱۵ dBm می‌توان از تنظیم‌کننده dc-dc برای افزایش ولتاژ خروجی استفاده کرد که ولتاژ شروع به کار ۰/۳ ولت دارد.

شکل ۱۵، الگوی تشعشی آنتن‌های یکسوساز تک‌دیود و افزایش ولتاژ را در صفحه‌های E و H و در ۳ فرکانس ابتدا، میانه و انتهای پهنای باند نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشخص است، هر دو ساختار دارای الگوی تشعشی مشابه آنتن تک‌قطبی در صفحه E و الگوی تشعشی همه‌جهته در صفحه H هستند.



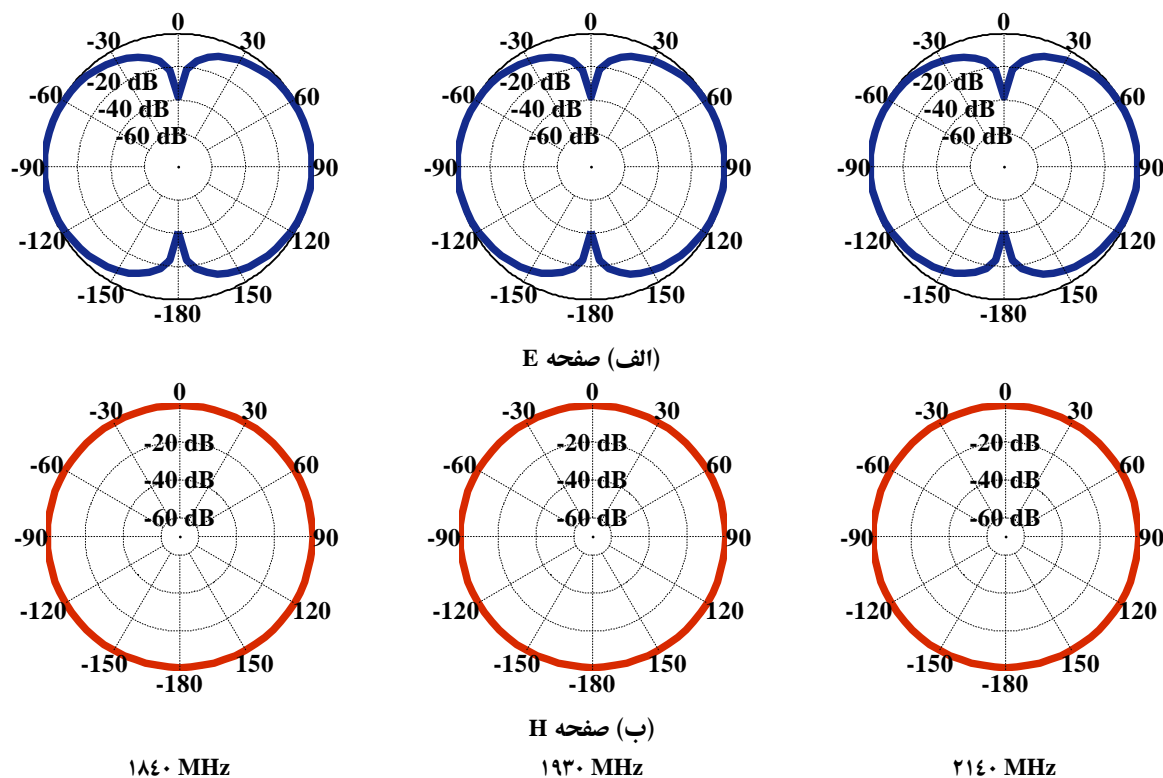
شکل ۱۳. مشخصه راندمان در حالت تک‌حاملی و چندحاملی برای ساختار آنتن یکسوساز (الف) تک‌دیود، (ب) افزایش ولتاژ.



شکل ۱۴. مشخصه ولتاژ خروجی بر حسب سطح توان ورودی برای آنتن‌های یکسوساز تک‌دیود و افزایش ولتاژ.

در جدول ۷، آنتن‌های یکسوساز پیشنهادی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی سایر تحقیقات از نظر پهنای باند، اندازه ساختار، حداقل سطح توان مورد نیاز برای دستیابی به حداکثر راندمان و پیچیدگی ساختار مقایسه شده‌اند. با توجه به موارد اشاره شده در این جدول، آنتن‌های یکسوساز پیشنهادی با طراحی ساده، پهنای باند مطلوب و سایز کوچک‌تر، نسبت به سایر منابع پهن‌بند سطح توان پایین‌تری را با حداکثر راندمان مشابه برداشت می‌کنند. از نتایج ارائه شده در جدول مشخص است که مراجع [۳] و [۱۱] بهترین

نتایج را نسبت به سایر تحقیقات دارند و قابل مقایسه با مدل پیشنهادی هستند. از معایب مرجع [۳] نک‌باند بودن آنتن یکسوساز و امکان برداشت حداقل انرژی از منابع فرکانس رادیویی جدول ۱ با وجود راندمان بالای آن است. از طرفی آنتن یکسوساز مرجع مذکور اندازه بزرگ‌تری نسبت به مدل پیشنهادی دارد. آنتن یکسوساز مرجع [۱۱] در سطح توان ورودی بسیار بالای ۲۰ dB راندمان بالایی دارد، ولی در عمل منابع فرکانس رادیویی، چگالی توان بسیار پایینی دارند و در طراحی برداشت‌کننده انرژی فرکانس رادیویی یکی از مشکلات، طراحی ساختاری برای برداشت حداقل سطح توان ورودی است. از طرفی آنتن یکسوساز مرجع [۱۱] ابعاد بزرگ‌تری نسبت به مدل پیشنهادی دارد.



شکل ۱۵. الگوی تشعشی مؤلفه E برای آنتن یکسوساز تک‌دیود و افزایش یافته و ولتاژ.

جدول ۷. مقایسه مشخصه‌های آنتن‌های یکسوساز پیشنهادی با سایر منابع.

ابعاد (W×L×(h))	حداکثر راندمان (%)	پیچیدگی طراحی	فرکانس (GHz)	منبع (سال)
۰/۳۱۵λ × ۰/۳۱۵λ	۶۷/۵ (در -۲/۵dBm)	پیچیده	تک باند (۲/۴۵)	[۲] (۲۰۱۸)
۰/۲۴۵λ × ۰/۱۴۷λ	۷۵/۵ (در ۵dBm)	پیچیده	تک باند (۲/۴۵)	[۳] (۲۰۱۸)
۰/۸۵۶λ × ۰/۶۸۵λ	۸۲ (در -۵dBm)	ساده	تک باند (۲/۴۵)	[۴] (۲۰۱۲)
۱/۷۱λ × ۱/۰۵۲λ	۵۲ (در -۵dBm)	متوسط	۲ باند (۱/۹۸، ۱/۸۸)	[۵] (۲۰۱۸)
۲/۲۴λ × ۲/۲۴λ × ۰/۳۹۲λ	۶۵ (در -۲/۵dBm)	خیلی پیچیده	۳ باند (۳/۵، ۲/۵، ۲)	[۶] (۲۰۱۸)
۱/۳۴λ × ۰/۸۱λ	۶۷/۵ (در -۶/۵dBm)	متوسط	۲ باند (۱/۹۸، ۱/۸۸)	[۷] (۲۰۱۸)
۰/۴۶۳λ × ۰/۴۶۳λ	۶۲ (در ۰dBm)	خیلی پیچیده	۳ باند (۰/۷۹ - ۰/۱۷ - ۱/۷۱ - ۲/۶۹ - ۲/۵)	[۸] (۲۰۱۸)
۰/۵۹λ × ۰/۳۴λ	۴۳ (در -۱۰dBm)	خیلی پیچیده	پهن باند (۱/۶-۲)	[۹] (۲۰۱۸)
۱/۲۴λ × ۱/۰۶λ	۴۸/۹ (در ۱۵dBm)	متوسط	پهن باند (۳ - ۶/۲۵)	[۱۰] (۲۰۱۹)
۰/۵۱۴λ × ۰/۵۱۴λ	۷۵ (در ۲۰dBm)	ساده	پهن باند (۱/۱ - ۰/۹ - ۲/۵ - ۱/۸)	[۱۱] (۲۰۱۷)
۰/۵۶۹λ × ۰/۱۶۱λ	۷۴ (در ۰dBm)	ساده	پهن باند (۱/۷ - ۲/۵)	آنتن یکسوساز افزایش یافته و ولتاژ
۰/۵۴۸λ × ۰/۱۷۲λ	۶۸ (در -۵dBm)	ساده	پهن باند (۱/۷ - ۲/۵)	آنتن یکسوساز تک‌دیود

۵- نتیجه‌گیری

برای برداشت انرژی فرکانس رادیویی به شکل پهن‌بند و چندحاملی، دو ساختار آنتن یکسوساز پیشنهاد شده‌اند. این ساختارها دارای سادگی در ساخت، حساسیت به حداقل سطح توان ورودی و مشخصه راندمانی مناسب در پهنای باند موردنظر و تشعشع همه‌جبهه می‌باشند. راندمان بالای ۵۰ درصد با استفاده از آنتن یکسوساز تک‌دیود، در بازه فرکانسی ۱/۸۲ تا ۲/۲۳ گیگاهرتز و سطح توان ورودی -۵ dBm و برای آنتن یکسوساز افزاینده ولتاژ با سطح توان ورودی ۰ dBm در بازه فرکانسی ۱/۷۵ تا ۲/۳۵ گیگاهرتز حاصل شد. در حالت ۲ و ۳ حاملی، تقریباً برای هر دو ساختار راندمان ۴۲ و ۴۴ درصدی حاصل می‌شود. آنتن یکسوساز تک‌دیود و افزاینده ولتاژ قابلیت برداشت انرژی از باندهای فرکانسی GSM1800 (MTx, BTx)، 3G (MTx, BTx) و WiFi را با راندمان مناسب دارند.

مراجع

- [1] M.T. Penella-López, M. Gasulla-Forner, "Powering autonomous sensors": an integral approach with focus on solar and RF energy harvesting (Springer Science & Business Media, Springer, pp.180, 125-147, 2011).
- [2] S. H. Wang and S. Y. Zheng, "A Compact Rectenna for Nondirectional Ambient RF Energy Harvesting," 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Busan, Korea (South), 2018, pp. 1-2.
- [3] Q. Awais, Y. Jin, H. T. Chattha, M. Jamil, H. Qiang and B. A. Khawaja, "A Compact Rectenna System with High Conversion Efficiency for Wireless Energy Harvesting," in IEEE Access, vol. 6, pp. 35857-35866, 2018.
- [4] Y. Chen and C. Chiu, "Maximum Achievable Power Conversion Efficiency Obtained Through an Optimized Rectenna Structure for RF Energy Harvesting," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 5, pp. 2305-2317, May 2017.
- [5] A. Khemar, A. Kacha, H. Takhedmit and G. Abib, "Design and experiments of a dual-band rectenna for ambient RF energy harvesting in urban environments," in IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 12, no. 1, pp. 49-55, 10 1 2018.
- [6] S. Chandravanshi, S. S. Sarma and M. J. Akhtar, "Design of Triple Band Differential Rectenna for RF Energy Harvesting," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 6, pp. 2716-2726, June 2018.
- [7] K. Bhatt, S. Kumar, P. Kumar and C. C. Tripathi, "Highly Efficient 2.4 & 5.8 GHz Dual Band Rectenna for Energy Harvesting Applications," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, October 2019.
- [8] V. Palazzi et al., "A Novel Ultra-Lightweight Multiband Rectenna on Paper for RF Energy Harvesting in the Next Generation LTE Bands," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 66, no. 1, pp. 366-379, Jan. 2018.
- [9] S. Shen, C. Chiu and R. D. Murch, "Multiport Pixel Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 2, pp. 644-656, Feb. 2018.
- [10] C. Guo and W. Zhang, "A Wideband CP Dipole Rectenna for RF Energy Harvesting," 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), Taiyuan, China, 2019, pp. 1-3.
- [11] C. Song et al., "Matching Network Elimination in Broadband Rectennas for High-Efficiency Wireless Power Transfer and Energy Harvesting," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 5, pp. 3950-3961, May 2017.
- [12] M. M. Mansour and H. Kanaya, "High-Efficient Broadband CPW RF Rectifier for Wireless Energy Harvesting," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 29, no. 4, pp. 288-290, April 2019.
- [13] C. H. P. Lorenz, S. Hemour and K. Wu, "Physical Mechanism and Theoretical Foundation of Ambient RF Power Harvesting Using Zero-Bias Diodes," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, no. 7, pp. 2146-2158, July 2016.