دومین کنفرانس ملی توسعه پژوهش های نوین در مهندسی برق و کامپیوتر
۸ و ۹ اسفند ۹۷
موسسه آموزش عالی وحدت، تربت جام، ایران
2nd National Conference of Innovative Research Developmentsin
Electrical and Computer Engineering
27 & 28 February 2019
Vahdat Higher Education Institute, Torbat-e Jam, Iran

آشکارساز توان مایکروویو CMOS با حساسیت بالا و گستره دینامیکی بسیار وسیع برای کاربردهای 24 GHz

نادر جوادی‌فر[۱]، مسعود دوستی[۲] و حسن حاج قاسم صابون پز[۳]
[۱]گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، n.javadifar@srbiau.ac.ir
[۲]گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، m_dousti@srbiau.ac.ir
[۳]دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران، hajghassem@ut.ac.ir

چکیده - این مقاله به تشریح یک آشکارساز توان خطی در مقیاس دسیبل *(dB)* با حساسیت بسیار بالا و گستره دینامیکی بسیار وسیع با استفاده از فناوری *0.18um RF CMOS* می‌پردازد. این مدار متشکل از تعدادی واحد آشکارساز توان *(PDU)* به صورت موازی است که در گره خروجی با هم جمع می‌شوند و یک آشکارساز لگاریتمی با گستره دینامیکی گسترش یافته را محقق می‌سازند. این آشکارساز توان برای کار در محدوده فرکانس‌های *24* تا *24.3 GHz* طراحی شده و از گستره آشکارسازی توانی معادل *110 dB* برخوردار است. خطای آشکارسازی در گستره دینامیکی مورد نظر کمتر از *1.5 dB* ± بوده و توان مصرفی آن *150 mW* از منبع تغذیه *1.8 V* است. تحلیل *PDU* و نتایج شبیه‌سازی برای ده طبقه ارائه شده است.

کلید واژه- آشکارساز توان، تقویت کننده لگاریتمی، یکسوساز تمام موج، SDLA.

۱- مقدمه

بسیاری از کاربردها از قبیل تجهیزات تست و اندازه گیری، سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم و رادارها نیازمند تشخیص و آشکارسازی سیگنال‌هایی با سطوح توانی خیلی ضعیف هستند.

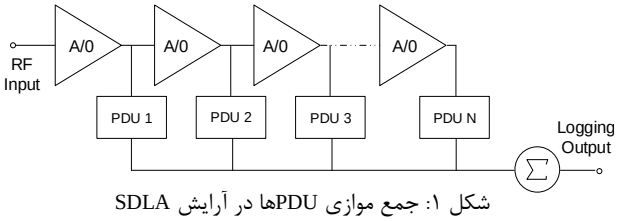
انتشار سیگنال‌های رادیویی و مایکروویو در اتمسفر همواره با اتلاف همراه است که عمدتاً ناشی از جذب به وسیله مولکول-های بخار آب و دیگر عناصر جوی است. بعلاوه، تلفات انتقال با افزایش فرکانس و فاصله بین فرستنده و گیرنده افزایش می‌یابد. بر روی باند مایکروویو، تلفات اتمسفریک دارای یک پیک در نزدیکی فرکانس GHz 24 است [۱]. از این رو، آشکارسازی سیگنال‌ها در این باند فرکانسی برای کاربردهایی نظیر آشکارسازی ابرها در هواشناسی که مسافت‌های بیش از چند کیلومتر را پوشش می‌دهند با چالش همراه است. این امر طراحی آشکارسازهایی با حساسیت بسیار بالا را برای این باند ضروری می‌سازد.

به طور کلی، مهم‌ترین ویژگی‌هایی که در یک آشکارساز مایکروویو باید مد نظر قرار گیرد عبارتند از فرکانس قطع، حداقل توان قابل آشکارسازی، گستره دینامیکی و البته پاسخ پالس سریع. یکی از شیوه‌های مرسوم در آشکارسازی سیگنال‌های مایکروویو، آشکارسازی با ایجاد یک خروجی متناسب با سطح توان سیگنال ورودی است که معمولاً با استفاده از دیودهای سریع از نوع شاتکی و یا آشکارسازهای مبتنی بر ترانزیستور انجام می‌شود. دیودهای شاتکی در فناوری استاندارد CMOS وجود ندارند و اضافه کردن آن‌ها در مکان مورد نظر بر روی تراشه مستلزم پردازش‌های اضافی در فناوری CMOS است که افزایش هزینه را در پی خواهد داشت [۲]. علاوه بر این، حداقل توان قابل آشکارسازی به وسیله دیودهای آشکارساز با بایاس صفر از dBm 60- تجاوز نمی‌کند. همچنین آشکارسازهای مبتنی بر ترانزیستور، در فرکانس‌های مایکروویو عمدتاً گستره دینامیکی‌ای کمتر از این مقدار دارند. با این حال، پیشرفت‌های خوبی از حیث توان مصرفی در این نوع آشکارسازها در سال‌های اخیر به وقوع پیوسته است [۳]-[۵].

یک روش مفید برای بسط گستره دینامیکی آشکارسازهای توان، جمع موازی PDUها، یا همان واحدهای آشکارساز توان، در پیکربندی تقویت کننده لگاریتمی با آشکارسازی متوالی (SDLA) است که در شکل ۱ نمایش داده شده است [۶]. با این وجود، افزایش تعداد بخش‌های PDU منجر به افزایش توان مصرفی خصوصاً در فرکانس‌های بالا می‌شود. بنابراین، طراحی یک آشکارساز با گستره دینامیکی بسیار وسیع و توان مصرفی

Archive of SID
www.SID.ir

کم به طور همزمان یک چالش به حساب می‌آید.



شکل ۱: جمع موازی PDUها در آرایش SDLA

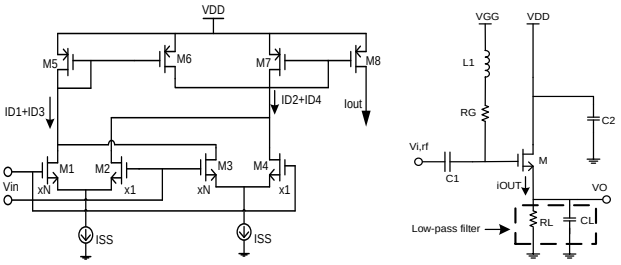
در این مقاله، یک PDU کم توان با ساختاری ساده برای باند فرکانسی پر اتلاف GHz 24 (در بازه GHz 24.05-24.25) پیشنهاد و تحلیل می‌شود. سپس نتایج شبیه‌سازی مدار آشکارساز توان کلی بر مبنای آرایش SDLA ارائه می‌شود.

۲- آرایش PDU پیشنهادی و تحلیل آن

توسعه گستره دینامیکی آشکارسازها، توان مصرفی را افزایش داده و فرکانس قطع کلی را کاهش می‌دهد. بنابراین، به PDUهایی با حداقل توان مصرفی و پهنای باند وسیع نیازمندیم. در اینجا یک آشکارساز ترانزیستوری با تنها یک ماسفت به عنوان PDU استفاده شده که مبتنی بر آشکارساز توان گزارش شده در [۳] بوده و دارای توان مصرفی بسیار پایینی است (شکل ۲(الف)). این مدار دارای آرایش سورس فالوور (درین مشترک) است که ذاتاً پهن باند است. با این حال، PDU پیشنهادی گستره دینامیکی محدودی دارد. مدار مذکور برای آشکارسازی متوالی در پیکربندی SDLA به منظور توسعه گستره دینامیکی کل بسیار مناسب است، چرا که توان آشکار شده توسط هر PDU به راحتی قابلیت جمع کردن به صورت جریان در گره خروجی را دارد.

ساختار SDLA به طور معمول از تعدادی تقویت کننده محدود شده (یا سلول A/0) به شکل کسکید تشکیل شده، که هر کدام یک سلول آشکارساز (یا یکسو ساز) را راه‌اندازی و سیگنال RF ورودی را به یک ولتاژ DC متناسب با توان آن تبدیل می‌کنند.

رایج‌ترین روش آشکارسازی در ساختار SDLA، استفاده از یکسوساز تمام موج (متشکل از دو زوج تفاضلی نامتعادل با تزویج سورس) است که در شکل ۲(ب) نشان داده شده است [۶]-[۸]. این مدار در مقایسه با واحد آشکارساز توان پیشنهادی (PDU)، به تعداد قطعات فعال بیشتری نیاز دارد که خود موجب کاهش پهنای باند شده و سطح تراشه فعال را افزایش می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل ۲: الف) واحد آشکارساز پیشنهادی (PDU) ب) آشکارساز تمام موج

عملکرد سلول‌های A/0 به گونه‌ای است که تا زمانی که دامنه سیگنال RF ورودی آن‌ها از حداقل مقدار لازم برای اشباع کوچکتر باشد، این تقویت کننده‌ها در مود خطی کار می‌کنند و چنانچه دامنه ورودی از این مقدار فراتر رود، خروجی سلول A/0 در یک مقدار مشخصی اشباع (محدود) می‌شود. بنابراین، در آرایش SDLA (شکل ۱)، بسته به دامنه ورودی در هر لحظه، برخی از سلول‌های A/0 ممکن است در مود اشباع باشند.

در ادامه نشان خواهیم داد که PDU پیشنهادی چگونه قادر است به عنوان یک سلول آشکارساز توان عمل کند. با توجه به شمای ساده شده مدار PDU در شکل ۲(الف)، جریان خروجی لحظه‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$i_{OUT} = K(V_{GS} + v_{gs} - V_t)^2$$
$$= K(V_{GS} - V_t)^2 + K\left[v_{gs}^2 + 2(V_{GS} - V_t)v_{gs}\right] \quad (۱)$$

بخش اول، $K(V_{GS} - V_t)^2$، مؤلفه DC جریان درین را تشکیل می‌دهد که تنها بر آفست DC ولتاژ خروجی اثر می‌گذارد. بخش دوم، $K\left[v_{gs}^2 + 2(V_{GS} - V_t)v_{gs}\right]$، در واقع از سیگنال RF در ورودی PDU نشأت می‌گیرد که ما آن را مؤلفه ac جریان خروجی می‌نامیم و ولتاژ خروجی متناظر با آن به صورت زیر خواهد بود:

$$v_o = R_L.K\left[v_{gs}^2 + 2(V_{GS} - V_t)v_{gs}\right] \quad (۲)$$

با در نظر گرفتن ولتاژ ورودی RF به صورت $v_{i,rf}$ و همچنین بهره ولتاژ PDU به صورت G، و با جایگزین کردن v_{gs} به شکل $v_{gs} = v_{i,rf} - v_O = (1 - G)v_{i,rf}$ در معادله (۲)، داریم:

Archive of SID
www.SID.ir

$$v_o = R_L.K\left[(1-G)^2 {v_{i,rf}}^2 + 2(V_{GS}-V_t)(1-G)v_{i,rf}\right] \quad (۳)$$

اگر تقویت کننده در مود خطی کار کند، خروجی‌اش یک سینوسی به صورت $v_{i,rf} = V_m Cos\omega t$ خواهد بود. با جایگزینی $v_{i,rf}$ در معادله (۳) و ساده کردن آن داریم:

$$v_o = \frac{R_L.K.(1-G)^2}{2}{V_m}^2 + \frac{R_L.K.(1-G)^2}{2}{V_m}^2 cos\,2\omega t + 2R_L.K(V_{GS}-V_t)(1-G)V_m cos\,\omega t \quad (۴)$$

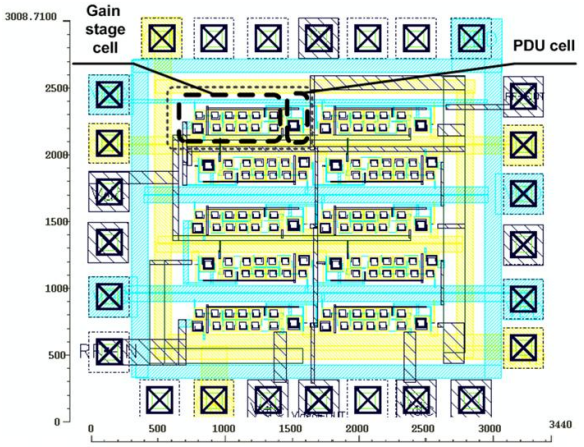
چنانچه یک فیلتر پایین‌گذر در خروجی قرار دهیم، مؤلفه‌های شامل فرکانس اصلی و هارمونیک‌های آن را حذف خواهد کرد و ولتاژ خروجی PDU از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_O = \frac{1}{2}R_L.K.(1-G)^2{V_m}^2 \quad (۵)$$

رابطه فوق ثابت می‌کند مادامی که تقویت کننده‌ها در مود خطی باشند، ولتاژ خروجی DC متناسب با توان سیگنال RF ورودی است. در مود اشباع، خروجی سلول‌های A/0 یک موج مربعی است که سطوح آن تغییر نمی‌کند. لذا، واحد آشکارساز PDU تنها یک مقدار ثابتی را به خروجی DC اضافه می‌کند.

۳- نتایج شبیه‌سازی پس از جانمایی و مقایسه

جانمایی آشکارساز توان طراحی شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

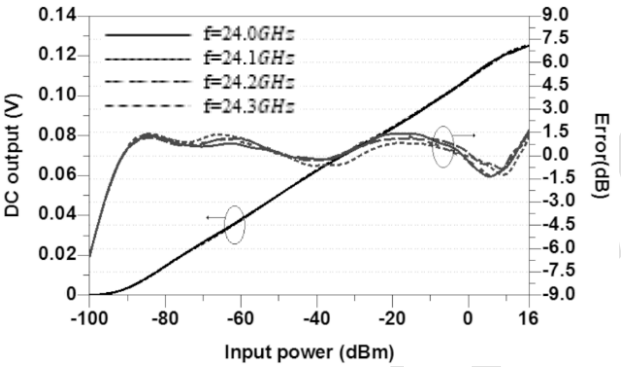


شکل ۳: جانمایی آشکارساز توان لگاریتمی طراحی شده مبتنی بر SDLA

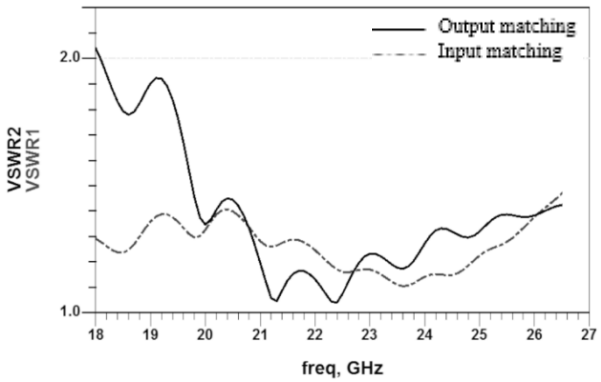
مساحت کل تراشه شامل ده طبقه، شبکه‌های تغذیه و پدها برابر 3mm×3.44mm است که از این مقدار، سهم هر عنصر لگاریتمی شامل یک سلول A/0 و PDU مربوطه برابر 1mm×0.4mm است.

شکل ۴، منحنی مشخصه انتقالی مدار کامل آشکارساز توان مبتنی بر توپولوژی SDLA و نیز خطای آشکارسازی را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود گستره دینامیکی کل برابر 110 dBm از 94- تا 16 dBm+ است و حداکثر خطا در گستره مذکور برابر 1.5 dB± است. حداقل توان قابل آشکارسازی 94- dBm است که نشان دهنده حساسیت بسیار بالای آشکارساز طراحی شده است.

تطبیق ورودی و خروجی 2:1 در محدوده فرکانس کاری مورد نظر و در کل باند فرکانسی K (محدوده 18 تا 26.5 GHz) حفظ شده است (شکل ۵).



شکل ۴: مشخصه انتقالی آشکارساز توان لگاریتمی و خطای آن

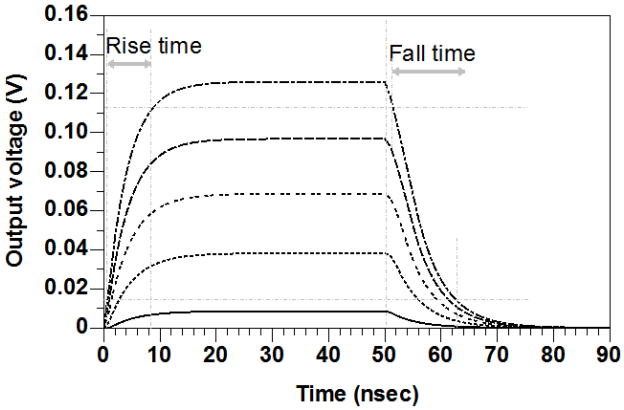


شکل ۵: تطبیق ورودی و خروجی در کل باند K

داشتن پاسخ پالس سریع در برخی کاربردها بسیار مهم است. شکل ۶، پاسخ پالس مدار آشکارساز را به ازای سطوح مختلف توان‌های ورودی در 24.2 GHz نشان می‌دهد. همان طور

www.SID.ir

که مشاهده می‌شود، حداکثر زمان‌های صعود و نزول بر مبنای تعریف 10% تا 90% به ترتیب برابر 8nsec و 10nsec به ازای حداکثر توان اعمال شده است.



شکل ۶: پاسخ پالس به ازای توان‌های مختلف در فرکانس 24.2 GHz

۳-۱- مقایسه

در جدول ۱، مشخصات آشکارساز توان به طور خلاصه آورده شده و با تحقیقات پیشین مقایسه گردیده است.

جدول۱: مقایسه با تحقیقات پیشین

شماره مرجع	[۶]	[۷]	[۸]	پیشنهادی
فرکانس (GHz)	DC to 8	2 to 18	1	24 to 24.3
گستره دینامیکی (dB)	40 60	33	65 74	110 95
خطای لگاریتمی (dB)	±1	±1	±2 ±3	±1.5 ±1
توان مصرفی (mW)	70 150	690	24	150
توپولوژی	SDLA	SDLA	SDLA	SDLA
تکنولوژی	0.18um CMOS	InP DHBT	65nm CMOS	0.18um CMOS

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک آشکارساز توان حساس با گستره دینامیکی بسیار وسیع برای باند فرکانسی پر اتلاف 24 GHz ارائه و تجزیه و تحلیل شد. واحد آشکارساز PDU با ساختاری ساده و توان بسیار پایین معرفی شد و برای اولین بار در آرایش تقویت کننده لگاریتمی با ساختار جمع موازی به کار گرفته شد. گستره دینامیکی آشکارساز به ازای کل ده طبقه برابر 110 dB (در بازه 94- dBm تا 16+ dBm) و حداقل توان قابل آشکارسازی 94- dBm است. خطای آشکارسازی در گستره دینامیکی مذکور کمتر از ±1.5 dB بوده و در بازه 94- dBm تا 1+ dBm کمتر از ±1 dB است.

آشکارساز توان طراحی شده دارای پاسخ پالس سریع بوده و توان مصرفی آن 150 mW از منبع ولتاژ 1.8 V است.

مراجع

[1] "Millimeter Wave Propagation: Spectrum Management Implications," FCC - OET Bulletin No. 70 (July 1997), http://www.fcc.gov/oet/info/documents/bulletins/#70

[2] W. Jeon, T.M. Firestone, J.C. Rodgers, and J. Melngailis, "Design and fabrication of Schottky diode, on-chip RF power detector", *Solid-State Electronics*, Vol. 48, No. 10-11, pp. 2089–2093, 2004.

[3] S. Rami, W. Tuni, and W.R. Eisenstadt, "Millimeter wave MOSFET amplitude detector", *IEEE Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF)*, pp. 84–87, 2010.

[4] S. Rami, A. Paganini, and W.R. Eisenstadt, "A minimally invasive wideband mixed-mode detector for mm-wave BIST applications", *IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 735-743, 2010.

[5] Ch-Ch. Chou, W-Ch. Lai, T-H. Huang and H-R. Chuang, "A low minimum detectable power, high dynamic range, V Band CMOS millimeter-wave logarithmic power detector," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, pp. 642 - 645, 2017.

[6] J. Wu, K. Hsu, W. Lai, C. To, S. Chen, C. Tang, Y. Juang, "A linear-in-dB radio-frequency power detector", *IEEE Microwave Symposium Digest (MTT)*, pp. 1-4, 2011.

[7] M. Haynes, "Wideband Monolithic SDLA Design Using InP DHBT Technology", *IET Seminar on RF and Microwave IC Design*, pp. 1-6, 2008.

[8] K. Kiela, M. Jurgo, and R. Navickas, "Design of a linear-in-dB power detector in 65nm CMOS technology", *Elektron Elektrotech*, Vol.19, pp. 91-94, 2013.

Archive of SID
www.SID.ir