



بررسی انواع ساختارهای پایه جهت تقویت کننده های با بهره متغیر و آنالوگ

علی دوست رستمی زاده^۱، آزیتا رستمی زاده^۲ *

چکیده:

تقویت کننده بهره متغیر بر اساس فیدبک از لحاظ ساختار و پیاده سازی ساده است اما این توپولوژی دارای تغییرات پیوسته بهره با دقت قابل قبول نیست. در نتیجه برای تقویت کننده بهره متغیرهای پیشرفته مناسب نیست. تقویت کننده بهره متغیر بر اساس ضرب کننده آنالوگ دارای خاصیت خطی و کنترل پذیری بهره مناسبی است اما سوئیچینگ این تقویت کننده توسط بهره به شدت محدود می شود. لذا این توپولوژی توانایی فراهم کردن نیازهای طراحی یک تقویت کننده بهره متغیر را ندارد. تقویت کننده بهره متغیر بر اساس زوج تفاضلی با دیفرانسیون سورس دارای خاصیت خطی خوبی است اما هدایت انتقالی آن به دلیل ضریب مخرج مناسب نیست، لذا در این پژوهش به معرفی و بررسی انواع ساختارهای پایه تقویت کننده های بهره متغیر آنالوگ خواهیم پرداخت.

کلمات کلیدی: تقویت کننده، بهره متغیر، آنالوگ، دیجیتال

^۱ عضو هیات علمی دانشگاه، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه ای، یاسوج، ایران

rostami0418@gmail.com

^۲ مدرس هنرآموز هنرستان فنی و حرفه ای سمیه، یاسوج، ایران

Azita.ave@gmail.com

مقدمه

در این پژوهش ساختار رایج تقویت کننده بهره متغیر آنالوگ معرفی خواهد شد. مزایا و معایب هر یک از ساختارهای تقویت کننده بهره متغیر پایه از لحاظ قواعد کنترل بهره، خطی بودن و توان مصرفی به طور کامل بررسی و مقایسه می شود. به طور کلی چهار ساختار تقویت کننده بهره متغیر عبارتند از:

- تقویت کننده بهره متغیر با فیدبک پایه^۳
- تقویت کننده بهره متغیر با ضرب کننده آنالوگ پایه^۴
- تقویت کننده بهره متغیر با زوج تفاضلی با سورس واکوراند^۵
- تقویت کننده بهره متغیر با زوج تفاضلی با بار اتصال دیودی^۶

تقویت کننده بهره متغیر با فیدبک پایه

فیدبک مقاومتی متغیر در طراحی تقویت کننده بهره متغیر مورد استفاده قرار می گیرد [1]. فیدبک مقاومتی می تواند به شبکه مقاومتی یا ماسفت هایی که در ناحیه ترایودی عمیق بایاس شده اند سوئیچ شود. این ماسفت ها بعنوان یک مقاومت کنترل شده خطی مورد استفاده قرار می گیرند. یک تقویت کننده ولتاژ با فیدبک مقاومتی دارای ضرب پهنای باند در بهره ثابت است [2]. زمانیکه بهره افزایش می یابد، پهنای باند کاهش می یابد که این باعث توزیع تاخیر ضعیفی می شود. این اثر را ممکن است با تنظیم جبران سازی تقویت کننده همراه با تنظیم بهره کاهش داد بطوریکه هر وقت بهره افزایش می یابد، ضرب بهره در پهنای باند نیز افزایش یابد. تقویت کننده بهره متغیر نشان داده شده در شکل (۱-۲) بر اساس تقویت کننده عملیاتی است که از سوئیچ هایی برای کاهش ظرفیت فیدبک به منظور افزایش بهره استفاده می کند. این مدار یک توپولوژی پایه ای برای تقویت کننده بهره متغیر است و به تعداد بهره ها، سوئیچ مورد نیاز است. زمانیکه مقاومتی بوسیله یک سوئیچ روشن می شود بهره تقویت کننده بهره متغیر تغییر می کند. مقدار بهره معادل است با نسبت مقاومت مرجع R_F به مقاومت سوئیچ شده R_X . دو عیب مهم این مدار عبارتند از:

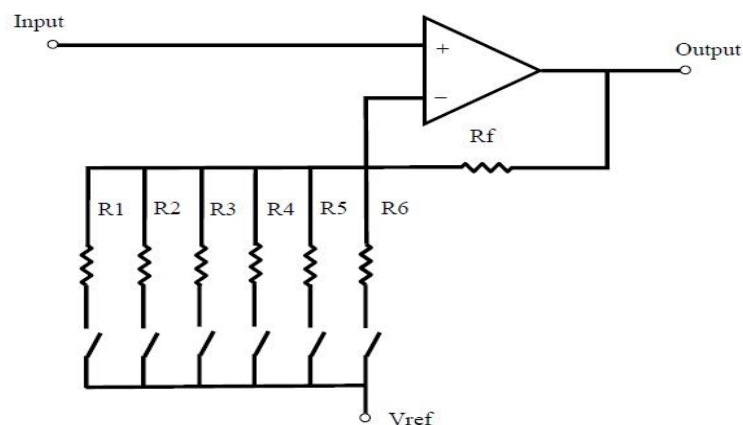
- ۱- در این مدار امکان اینکه یک بهره خروجی پیوسته داشته باشیم ممکن نیست از اینرو ممکن است سازگاری لازم را با بقیه مدارها در یک کاربرد خاص نداشته باشد.
- ۲- در صورتیکه تنظیمات بیشتری برای بهره مورد نیاز باشد در آن صورت مقاومت بیشتری مورد نیاز است و مقاومت بیشتر سطح چپ بیشتری را طلب خواهد کرد. [3]

³ -feedback-based

⁴ -Analog multiplier based

⁵ - Differential pair with source degeneration

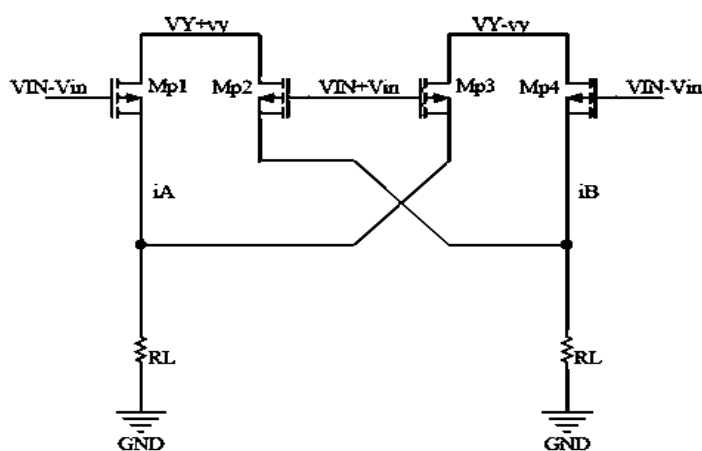
⁶ Differential pair with diode-connected loads



تقویت کننده بهره متغیر بر اساس فیدبک

تقویت کننده بهره متغیر با ضرب کننده آنالوگ پایه

توپولوژی رایج دیگر در طراحی تقویت کننده بهره متغیر، استفاده از ضرب کننده آنالوگ است. اگر یکی از ورودی های ضرب کننده آنالوگ به سیگنال DC وصل شود در آن صورت بعنوان بلوک هدایت انتقالی خطی سازی شده عمل خواهد کرد. ساختار تقویت کننده بهره متغیر با ضرب کننده آنالوگ در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. [4]



تقویت کننده بهره متغیر با ضرب کننده آنالوگ

در این مدار V_Y ولتاژ مدمشترک برای V_Y و V_{IN} ولتاژ مد مشترک برای V_{in} است و همه ترانزیستورها در ناحیه اشباع هستند. برای این اساس هدایت انتقالی کلی مدار برابر است با :

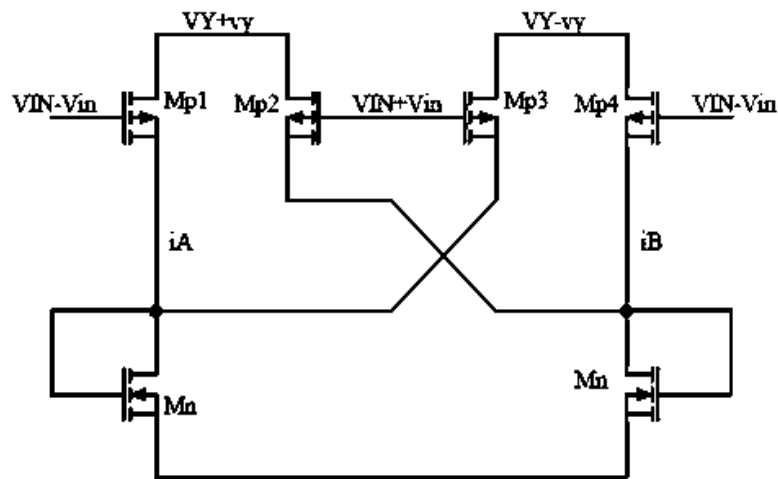
$$G_m = 2\mu_p c_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) V_Y$$

گر از مدولاسیون کانال و اثر بدنه صرف نظر شود و همچنین زوجهای تفاضلی کاملاً مشابه باشند در آن صورت هدایت انتقالی ضرب کننده آنالوگ خطی است. بهره DC این تقویت کننده بهره متغیر با ضرب کننده آنالوگ با مقاومت بار R_L برابر است با: [5]

$$A_V(0) = 2\mu_p c_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) V_Y R_L$$

براساس معادله (۲-۲)، تغییرات بهره با استفاده از تغییر ولتاژ کنترلی V_Y حاصل می شود. رنج خطی تقویت کننده بهره متغیر با ضرب کننده آنالوگ وابسته به ولتاژ کنترلی V_Y است لذا زمانیکه ولتاژ کنترلی V_Y برای تغییر بهره افزایش می یابد این افزایش باعث کاهش رنج خطی ضرب کننده بطور خطی می شود.

مقاومت بار R_L در این مدار را می توان با یک ترانزیستور اتصال دیودی مطابق شکل (۳-۲) جایگزین نمود.



تقویت کننده بهره متغیر با ضرب کننده آنالوگ با استفاده از بار فعال

کل ترانزیستورها باید در ناحیه خطی کار کنند. این تقویت کننده در محدوده خطی ویژه ای بصورت خطی عمل می کند این محدوده

بصورت زیر بدست می‌آید. [6]

$$V_{linear-range} = \frac{1}{2}(V_{dd} - V_{DSATbp} - V_{DSATp} - V_{DSATn} - V_{thn})$$

V_{DSATbp} ولتاژ اشباع ترانزیستور بایاس است که در شکل نشان داده نشده است این ترانزیستور ولتاژ سورس زوجهای ورودی تقویت کننده را فراهم می‌کند. V_{DSATp} ولتاژ اشباع زوج ترانزیستورهای PMOS ورودی است. V_{DSATn} ولتاژ اشباع ترانزیستورهای NMOS اتصال دیودی است و V_{thn} ولتاژ آستانه ترانزیستور NMOS است. با جایگذاری $V_{DSATp} = V_Y + v_y - V_{IN} - |V_{thp}|$ در معادله (۳-۲) داریم:

$$V_{linear-range} = \frac{1}{2}(V_{dd} - V_{DSATbp} - (V_Y + v_y - V_{IN} - |V_{thp}|) - V_{DSATn} - V_{thn})$$

بعلاوه با توجه به معادله (۲-۲) برای V_Y خواهیم داشت:

$$v_y = \frac{A_v(0)}{2\mu_p c_{ox}(\frac{W}{L})R_L}$$

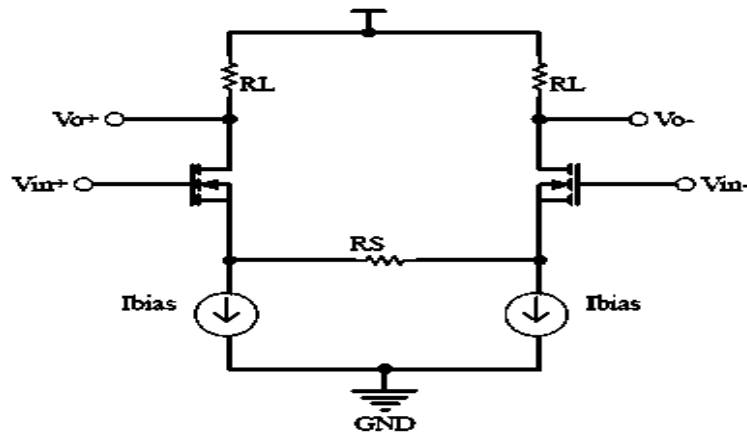
اگر V_Y در معادله (۴-۲) جایگزین شود خواهیم داشت:

$$V_{linear-range} = \frac{1}{2}\left(V_{dd} - V_{DSATbp} - V_Y - \frac{A_v(0)}{2\mu_p c_{ox}(\frac{W}{L})R_L} + V_{IN} + |V_{thp}| - V_{DSATn} - V_{thn}\right)$$

معادله (۶-۲) نشان می‌دهد که افزایش بهره ولتاژ $A_v(0)$ باعث کاهش متناسب در رنج خطی خواهد شد. در نتیجه تقویت کننده بهره متغیر بر اساس ضرب کننده آنالوگ، مناسب برای طراحی تقویت کننده بهره متغیر با بهره بزرگ نمی‌باشد. [7,8]

تقویت کننده بهره متغیر با زوج تفاضلی با دیژنراسیون سورس

زوج تفاضلی با دیژنراسیون سورس، توپولوژی رایج در طراحی تقویت کننده بهره متغیر است [۲]. مدار پایه این توپولوژی در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. این توپولوژی خاصیت خطی خوبی دارد. اما هدایت انتقالی کوچکی دارد.



زوج تفاضلی با دیژنراسیون سورس

برای تحلیل آن، با استفاده از روش نیم مدار، مدار تقویت کننده تفاضلی را به دو نیم مدار سورس مشترک تبدیل می کنیم که در سورس آنها مقاومت $R_S/2$ دیده می شود. از اینرو هدایت انتقالی تقویت کننده تفاضلی برابر خواهد شد با: [9]

$$G_m = \frac{g_m}{1 + \frac{g_m R_S}{2}}$$

در این معادله R_S

مقاومت دیژنراسیون سورس و $g_m R_S/2$ فاکتور دیژنراسیون سورس نام دارد. معمولاً فاکتور دیژنراسیون بزرگتر از یک می باشد. در صورتیکه از یک مخرج صرف نظر کنیم برای معادله (۲-۷) خواهیم داشت:

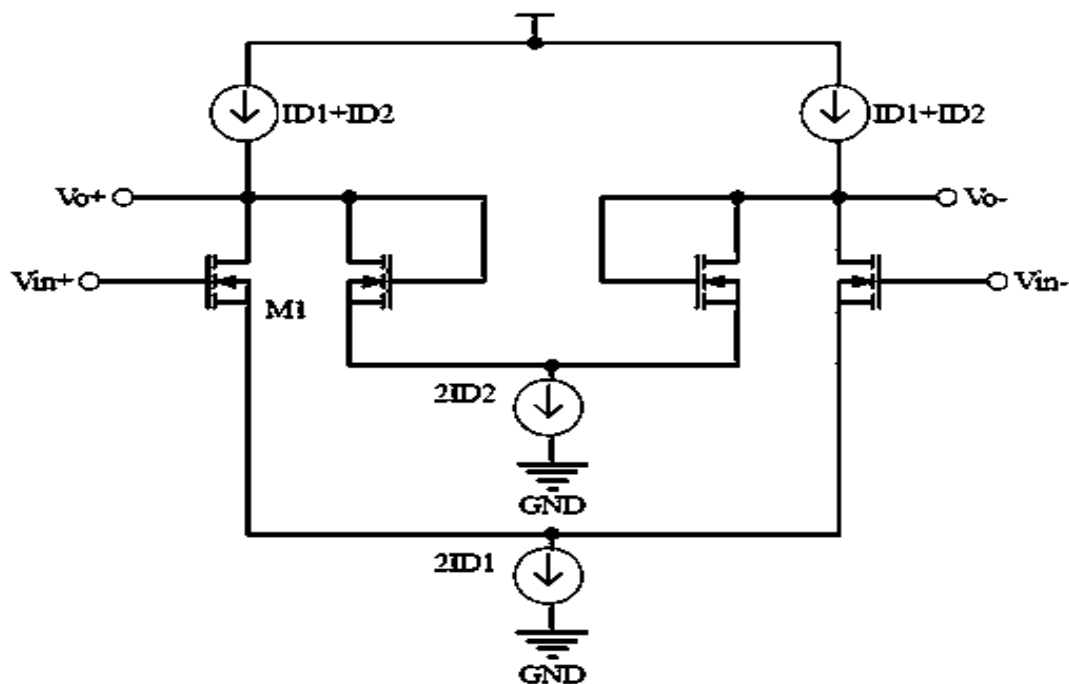
$$G_m \approx \frac{g_m}{\frac{g_m R_S}{2}} = \frac{2}{R_S}$$

در این حالت هدایت انتقالی زوج تفاضلی با دیژنراسیون سورس، بوسیله مقاومت دیژنراسیون R_S تعیین می گردد. با تغییر مقدار R_S بهره تقویت کننده تنظیم می شود. در مقایسه با هدایت انتقالی زوج تفاضلی ساده، g_m زوج تفاضلی با مقاومت دیژنراسیون در $1/(N+1)$ ضرب شده است. [10]

ازاینرو، بهره نسبتاً بزرگی با این توپولوژی می‌توان بدست آورد. هرچند یک مقاومت خروجی بزرگی لازم است که برای طراحی تقویت ولتاژ مناسب نیست.

تقویت کننده بهره متغیر با زوج تفاضلی با بار اتصال دیودی

تقویت کننده براساس زوج تفاضلی با بار اتصال دیودی اخیراً برای طراحی تقویت کننده های بهره متغیر پیشنهاد می‌شود. این توپولوژی در شکل (۵-۲) نشان داده شده است.



زوج تفاضلی با بار اتصال دیودی

سیگنال ولتاژ ورودی به جریان، برای استفاده در زوج تفاضلی ورودی غیر خطی تبدیل می‌شود. سپس جریان تفاضلی به وسیله بار، دوباره به ولتاژ تبدیل می‌شود. این بار زوج تفاضلی با اتصال دیودی است. ترانزیستورهای زوج تفاضلی دارای هدایت انتقالی کوچکی هستند. [11]

مقاومت بار اتصال دیودی، ترانزیستور M_2 برابر با $1/g_{m2}$ است که خیلی کوچکتر از مقاومت خروجی زوج ورودی، ترانزیستور M_1 و مقاومت خروجی منابع جریان $I_{D1}+I_{D2}$ است که با ترانزیستور PMOS پیاده سازی شده اند [۸]. بهره ولتاژ DC این توپولوژی برابر

است با:

$$A_v(0) = \frac{g_{m1}}{g_{m2}} = \frac{\sqrt{2k'_n(\frac{W}{L})_1 I_{D1}}}{\sqrt{2k'_n(\frac{W}{L})_2 I_{D2}}}$$

معادله (۹-۲) نشان می دهد که بهره ولتاژ DC زوج تفاضلی با بار اتصال دیودی خطی و پیوسته است. بهره وابسته به مقدار جریان بایاس ترانزیستورهای NMOS است. زیرا بهره از نسبت جریان های بایاس بدست می آید. این خصوصیت باعث می شود که این توپولوژی حساسیت به تغییرات دما و فرایند نداشته باشد [۲]. چون مقاومت خروجی تقویت کننده برابر با $1/g_{m2}$ است و این مقدار خیلی کوچکتر از مقاومت ترانزیستورهای خروجی است لذا تقویت کننده می تواند یک بار نسبتاً کوچک مقاومتی را راه اندازی نماید [12]

مقایسه توپولوژی های رایج تقویت کننده بهره متغیر

تقویت کننده بهره متغیر بر اساس فیدبک از لحاظ ساختار و پیاده سازی ساده است اما این توپولوژی دارای تغییرات پیوسته بهره با دقت قابل قبول نیست. در نتیجه برای تقویت کننده بهره متغیرهای پیشرفته مناسب نیست. تقویت کننده بهره متغیر بر اساس ضرب کننده آنالوگ دارای خاصیت خطی و کنترل پذیری بهره مناسبی است اما سوئینگ این تقویت کننده توسط بهره به شدت محدود می شود. لذا این توپولوژی توانایی فراهم کردن نیازهای طراحی یک تقویت کننده بهره متغیر را ندارد. تقویت کننده بهره متغیر بر اساس زوج تفاضلی با دیژنراسیون سورس دارای خاصیت خطی خوبی است اما هدایت انتقالی آن به دلیل ضریب مخرج مناسب نیست. به منظور داشتن عملکرد مناسب در طراحی تقویت کننده بهره متغیر، توپولوژی تقویت کننده بهره متغیر زوج تفاضلی با بار اتصال دیودی پیشنهاد می گردد. از طرفی همه تقویت کننده های بهره متغیر جریانی نمی توانند تغییرات دسی بلی خطی داشته باشند. در این تحقیق تقویت کننده بهره متغیر با مدار کنترل بهره جدیدی پیشنهاد می شود. [13,14]

نتیجه گیری:

توپولوژی رایجی که در طراحی تقویت کننده بهره متغیر، استفاده می شود استفاده از ضرب کننده آنالوگ است. اگر یکی از ورودی های ضرب کننده آنالوگ به سیگنال DC وصل شود در آن صورت بعنوان بلوک هدایت انتقالی خطی سازی شده عمل خواهد کرد. ساختار تقویت کننده بهره متغیر با ضرب کننده آنالوگ را به صورت کلی در این پژوهش توضیح داده و تقویت کننده بهره متغیر بر اساس

فیدبک از لحاظ ساختار و پیاده سازی ساده را بیان نمودیم اما این توپولوژی دارای تغییرات پیوسته بهره با دقت قابل قبول نیست. در نتیجه برای تقویت کننده بهره متغیرهای پیشرفته مناسب نیست. تقویت کننده بهره متغیر بر اساس ضرب کننده آنالوگ داری خاصیت خطی و کنترل پذیری بهره مناسبی تری که به صورت کلی در این پژوهش آنها را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادیم.

منابع:

- [1] J. Smith, "Modern Communication Circuits," United State of America: McGraw-Hill Inc, 1986.
- [2] L. Chen, "A Low Power, High Dynamic Range, Broad Band Variable Gain Amplifier for an Ultra Wideband Receiver". Texas A&M University Dissertation, May 2006.
- [3] J. M. Khoury, "On the Design of Constant Settling Time AGC Citcuits," *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 45, no. 3, March 1998.

- [4] S. Krishnanji, "Design of a Variable Gain Amplifier for An Ultra Wideband Receiver". Texas A&M University Dissertation, August 2005.
- [5] T. Cao, "A Variable Gain Amplifier for Wide Temperature Applications". University of Arkansas Ph.D. Dissertation, May 2007.
- [6] B. Razavi, "*Design of Analog CMOS Integrated Circuits*," Second Edition, Upper New York, NY: McGraw-Hill Inc, 2001.
- [7] Q. Duong, "A 90dB 1.32mW 1.2V 0.13mm² Two-stage Variable Gain Amplifier in 0.18um CMOS," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. E91-C, no. 5, May 2008.
- [8] P. E. Allen; D. R. Holberg "*CMOS Analog Circuit Design*," Second Edition, New York, NY: Oxford University Press, Inc., 2002.
- [9] <http://www.trendcomms.com/multimedia/training/broadband%20networks/web/main/copper/Theme/Appendix%201/Why%20Use%20Decibels.html>
- [10] I. Martinez, "Automatic Gain Control (AGC) Circuits Theory and Design". University of Toronto Term Paper, Fall 2001.
- [11] Q. Duong, "Ultra Low-Voltage and Low-Power dB-linear V-I Converter Using Composite NMOS Transistors," *Electronic Devices and Soli-Stage Circuits*, vol., no., pp.101-104, 2003.
- [12] Q. Duong, "A 35 dB-Linear Exponential Function Generator for VGA and AGC Applications," *Design Automation Conference*, vol., no., pp.304-309, 2004.
- [13] I. Escorcia, " Design of a High Temperature Fully-differential CMOS Amplifier in Silicon-on-Insulator ". University of Arkansas MSEE Thesis, August 2010.
- [14] A. Hastings, "*The Art of Analog Layout*," Second Edition, Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2006.
- [15] M. Burns; G. W. Roberts, "*An Introduction to Mixed-Signal IC Test and Measurement*," New York, NY: Oxford University Press, 2001.

Investigating various types of basic structures for analog and variable gain amplifiers

Ali Dost Rostamizadeh *, Azita Rostamizadeh *

Abstract:

Variable gain amplifier based on feedback is simple in terms of structure and implementation, but this topology has continuous gain changes with acceptable accuracy. As a result, it is not suitable for advanced variable gain amplifier. The variable gain amplifier based on the analog multiplier has good linearity and gain controllability, but the swing of this amplifier is severely limited by the gain. Therefore, this topology does not have the ability to provide the design requirements of a variable gain amplifier. The variable gain amplifier based on the differential pair with source degeneration has a good linear property, but its transmission conductance is not suitable due to the denominator coefficient, so in this research we will introduce and examine the basic structures of analog variable gain amplifiers.

Keywords: amplifier, variable gain, analog, digital