

## بررسی تقویت کننده‌های الکترونیکی OTA با ضریب هدایت انتقالی قابل تنظیم و کاربرد آن در فیلترهای زمان پیوسته

ابراهیم بُرزآبادی<sup>(۱)</sup> - حمیدرضا تقوی<sup>(۲)</sup> - همایون مهدوی نسب<sup>(۳)</sup>

(۱) دانشیار - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

(۲) کارشناسی ارشد - مرکز تحقیقات صنایع شاهد، نیروی هوا فضای سپاه

(۳) استادیار - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

تاریخ دریافت: تابستان ۱۳۸۸

تاریخ پذیرش: تابستان ۱۳۸۹

**خلاصه:** هدف از این مقاله، ارائه یک تکنیک طراحی برای ساختن مدار CMOS OTA است که به صورت الکترونیکی و خطی قابل تنظیم می‌باشد. هدایت انتقالی ( $g_m$ ) در مدار، مستقیماً به جذر جریان بایاس بستگی دارد. در این مقاله برای ایجاد ولتاژ خروجی ماکزیمم و ایجاد یک گستره هدایت انتقالی به صورت تنظیمی و خطی از مدار CMOS OTA همسان استفاده می‌گردد. سپس تغییر هدایت انتقالی CMOS OTA مورد نظر و تاثیر این تغییر در عملکرد فیلترهای زمان پیوسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. جنبه نوآوری مقاله این است که، نشان داده می‌شود چگونه تابع تبدیل یک فیلتر مرتبه اول به فیلتر بالاگذر و پایین گذر و یک فیلتر مرتبه دوم به فیلترهای بالاگذر، پایین گذر، میان گذر و میان نگذر تغییر می‌یابد. شبیه سازی مدار از طریق نرم‌افزار Pspice و Matlab 7 صورت می‌پذیرد.

**کلمات کلیدی:** CMOS OTA، فیلترهای زمان پیوسته.

### ۱- مقدمه

OTA<sup>۱</sup> در اصطلاح مخفف «تقویت کننده عملیاتی هدایت انتقالی» می‌باشد. اولین تقویت کننده عملیاتی هدایت انتقالی با دو ورودی ولتاژ  $V^+$  و  $V^-$  و جریان خروجی  $I_{out}$  در سال ۱۹۶۹ معرفی شد. یکی از مزایای OTAها مانند CA3080 (OTA اولیه)، کنترل خروجی مدار با جریان بایاس آن می‌باشد و با تنظیم این جریان ورودی، خصلت خطی بودن مدار افزایش می‌یابد (تا حدود 98%) [۱-۴]. مشخصه OTA به صورت  $I_{out} = g_m (V_{in}^- - V_{in}^+)$  است و بلوک دیاگرام آن شباهت زیادی به تقویت کننده‌های تفاضلی (OPAMP) دارد [۵، ۶]. در این مقاله از بلوک پایه CMOS OTA استفاده شده است.

تفاوت این مقاله با [۷] و [۸] این است که، در آن دو مقاله هدایت انتقالی بلوک پایه CMOS OTA با فرض این که ترانزیستورها در ناحیه فعال عمل می‌کنند، محاسبه شده است، ولی در اینجا روابط جریان ترانزیستورها، شرایط لازم برای اینکه ترانزیستورها در ناحیه

فعال عمل نمایند و تغییرات هدایت انتقالی (وابسته به جریان بایاس) نسبت به ولتاژ تغذیه بلوک بررسی می‌گردد.

### ۲- تشریح عملکرد مدار CMOS OTA

شکل (۱) مدار CMOS OTA تک خروجی متعادل را نشان می‌دهد که با جفت MOSها و آینه‌های جریان ساخته شده است [۷]. در این جا  $V_{in}$  ولتاژ ورودی ( $V_{in} = V_1 - V_2$ )،  $I_{o1}$  جریان خروجی و  $I_{BB}$  جریان بایاس می‌باشد.

برای اینکه ترانزیستورها در ناحیه فعال عمل نمایند، بایستی دو شرط زیر برقرار باشد:

$$V_{GS} \geq V_T \quad (1)$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T \quad (2)$$

$V_{GS}$  ولتاژ گیت-سورس،  $V_{DS}$  ولتاژ درین-سورس،  $V_T$  ولتاژ آستانه در مدار MOSFET است.

$$g_m = \frac{d i_o}{d V_{in}} \Big|_{V_{in}=0} = \frac{d}{d V_{in}} \left( K \frac{W}{L} V_{in} \sqrt{\frac{4I_{BB}}{K \frac{W}{L}} - V_{in}} \right) \quad (9)$$

$$= \sqrt{2I_{BB} K}$$

اگر ترانزیستورها در ناحیه فعال عمل نمایند، آنگاه با استفاده از روابط (۳) و (۷) نامساوی زیر حاصل می‌شود:

$$V_{DD} \leq V_{SG3} - \left( V_T + \sqrt{\frac{2I_{BB}}{K \frac{W}{L}}} \right) \quad (10)$$

اگر ترانزیستورهای  $M_5$  و  $M_3$  در ناحیه فعال عمل کنند، روابط زیر به ازای حداکثر ولتاژ ورودی ( $V_{in}$ ) و با استفاده از روابط (۲)، (۳) و (۷) برقرار می‌گردد:

$$|V_{TP}| \leq |V_{SG3}|, |V_{SG5}| \leq V_{TP} + \sqrt{\frac{I_{BB}}{K \frac{W}{L}}} \quad (11)$$

$V_{TP}$  ولتاژ آستانه ترانزیستور P-کانال است و اگر به صورت  $V_{TP} + V_{TP} = 0$  تنظیم گردد، آنگاه محدوده  $V_{DD}$  با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۲) حاصل می‌شود:

$$V_{DD} \leq (\sqrt{2} + 1) \sqrt{\frac{I_{BB}}{K \frac{W}{L}}} \quad (12)$$

### ۲-۱- محاسبه تغییرات $V_{DD}$ بر حسب جریان بایاس $(S_{I_{BB}}^{V_{DD}}) \cdot I_{BB}$

برای محاسبه تغییرات  $V_{DD}$  بر حسب جریان بایاس  $I_{BB}$ ، از  $V_{DD}$  نسبت به  $I_{BB}$  مشتق گرفته می‌شود و در نتیجه:

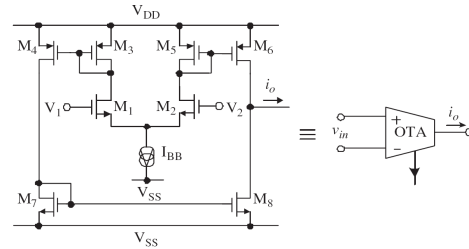
$$S_{I_{BB}}^{V_{DD}} = \frac{\partial V_{DD}}{\partial I_{BB}} = \frac{(\sqrt{2} + 1)}{2} \frac{1}{\sqrt{\frac{I_{BB}}{K \frac{W}{L}}}} \quad (13)$$

### ۳- بررسی هدایت انتقالی در فیلترهای OTA مرتبه اول

۳-۱- تبدیل فیلتر  $H(S) = \frac{SC + g_{m1}}{g_{m2} + SC}$  به فیلتر بالا گذر و

پائین گذر با تغییر هدایت انتقالی

شکل (۲) فیلتر مرتبه اولی را نشان می‌دهد که می‌تواند با تغییر جریان بایاس  $OTA_1$  و  $OTA_2$  فیلتری پائین گذر و بالاگذر بسازد.



شکل (۱): مدار CMOS OTA تک خروجی متعادل [۷]

Fig. (1): Schematic diagram of a balanced CMOS OTA [7]

برای این که شرط  $V_{DS} > V_{GS} - V_T$  در ترانزیستورهای  $M_1$  و  $M_2$  برقرار باشد، دو مسیر  $V_{DD}$ ،  $M_1$ ،  $M_2$  و مسیر  $V_{DD}$ ،  $M_3$ ،  $M_4$ ،  $M_5$  زده می‌شود و در نتیجه آن، نامساوی زیر حاصل می‌گردد:

$$V_{SG3} \geq V_{DD} - (V_T + V_{in}) \quad (3)$$

$$V_{SG5} \geq V_{DD} - V_T \quad (4)$$

ولتاژ DC ورودی برابر اختلاف ولتاژهای گیت-سورس ترانزیستورهای  $M_1$  و  $M_2$  است. همچنین با توجه به شکل (۱) مجموع دو جریان  $I_{D1}$  و  $I_{D2}$  برابر  $I_{BB}$  است. در نتیجه:

$$I_{D1} = \frac{I_{BB}}{2} + \frac{K}{2} \frac{W}{L} V_{in} \sqrt{\frac{4I_{BB}}{K \frac{W}{L}} - V_{in}} \quad (5)$$

$$I_{D2} = \frac{I_{BB}}{2} - \frac{K}{2} \frac{W}{L} V_{in} \sqrt{\frac{4I_{BB}}{K \frac{W}{L}} - V_{in}} \quad (6)$$

در فرمولهای (۵) و (۶)،  $K = \frac{\mu_0 C_{ox}}{2}$  می‌باشد، که  $\mu$  ضریب تحرک الکترون،  $C_{ox}$  ظرفیت خازن گیت-اکسید،  $W$  پهنای کانال و  $L$  طول کانال موثر MOSFET است.

برای این که شرط  $V_{GS} \geq V_T$  در ترانزیستورهای  $M_1$  و  $M_2$  برقرار باشد، محدوده ولتاژ DC ورودی تعیین می‌شود. از این رو:

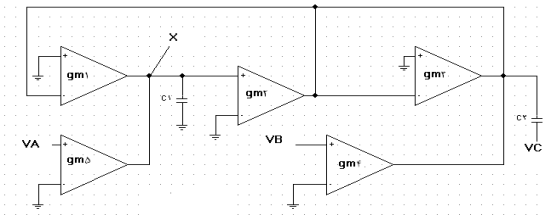
$$V_{in} \leq \sqrt{\frac{2I_{BB}}{K \frac{W}{L}}} \quad (7)$$

با توجه به آیینهای جریان شکل (۱)، جریان خروجی تفاضلی به صورت زیر و با استفاده از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید. در نتیجه:

$$i_o = I_{D1} - I_{D2} = K \frac{W}{L} V_{in} \sqrt{\frac{4I_{BB}}{K \frac{W}{L}} - V_{in}} \quad (8)$$

بهره هدایت انتقالی در مدار تفاضلی CMOS OTA با مشتق از جریان خروجی بر حسب  $V_{in}$  متناسب است و با استفاده از معادله (۸) و به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌گردد:

شکل (۳) این فیلتر مرتبه‌ی دوم را نشان می‌دهد. این مدار شامل ۵ هدایت انتقالی است که با تکنولوژی CMOS پیاده سازی شده است.



شکل (۳): فیلتر مرتبه دوم

$$V_o = \frac{S^2 C_1 C_2 V_C + S C_1 g_{m4} V_B + g_{m2} g_{m5} V_A}{S^2 C_1 C_2 + S C_1 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}}$$

Fig.3. The second- Order filter

این فیلتر دارای سه ولتاژ  $V_A$  و  $V_B$  و  $V_C$  است که برای تحریک‌های ویژه در فیلتر استفاده می‌شود.

با توجه به مشخصه OTA، جریان‌های خروجی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i_{o1} = -g_{m1} V_o \quad (19)$$

$$i_{o2} = g_{m2} V_x \quad (20)$$

$$i_{o3} = -g_{m3} V_o \quad (21)$$

$$i_{o4} = g_{m4} V_B \quad (22)$$

$$i_{o5} = g_{m5} V_C \quad (23)$$

۴-۱-۱- طراحی فیلتر  $V_o = \frac{S^2 C_1 C_2 V_C + S C_1 g_{m4} V_B + g_{m2} g_{m5} V_A}{S^2 C_1 C_2 + S C_1 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}}$  به صورت بالاگذر

اکنون فیلتر شکل (۳) در حالتی بررسی می‌شود که  $OTA_5$  و  $OTA_4$  وجود ندارد یا هدایت انتقالی‌های  $g_{m5}$  و  $g_{m4}$  صفر باشد و یا به عبارتی، با توجه فرمول  $g_m = \sqrt{2I_{BB}K}$  جریان بایاس متعلق به آنها صفر باشد.

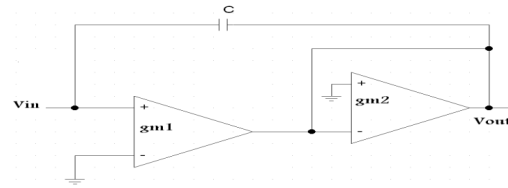
با زدن KCL در گره خروجی و گره X و همچنین با توجه به معادله (۲۱) و (۲۲)، معادله  $V_{o1}$  به صورت زیر محاسبه می‌شود، که فیلتری بالاگذر است:

$$V_{o1} = \frac{S^2 c_1 C_2 V_C}{S^2 C_1 C_2 + S C_1 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}} \quad (24)$$

فرکانس قطع مدار با توجه به معادله مشخصه (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$D(S) = S^2 + \frac{S}{C_2} g_{m3} + \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \rightarrow f_{o1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \quad (25)$$

برای محاسبه فاکتور کیفیت Q بایستی فرکانس مرکزی فیلتر بر پهنای باند تقسیم شود، از این رو با استخراج پهنای باند از رابطه زیر، فاکتور کیفیت Q محاسبه می‌گردد:



شکل (۲): فیلتر مرتبه‌ی اول  $H(S) = \frac{SC + g_{m1}}{g_{m2} + SC}$

Fig. (2): The first- Order filter of  $H(S) = \frac{SC + g_{m1}}{g_{m2} + SC}$

قبل از بررسی فیلتر فوق لازم است مقدمه‌ای در مورد فیلترهای پایین گذر و بالا گذر بیان گردد.

تابع تبدیل  $H(S) = \frac{as + b}{bs + c}$  را در نظر بگیرید. اگر  $H(\infty) = \frac{a}{b}$

بزرگتر از  $H(0) = \frac{b}{c}$  باشد، فیلتر  $H(S)$  به صورت فیلتری بالاگذر

عمل می‌کند و اگر  $H(\infty) = \frac{a}{b}$  کوچکتر از  $H(0) = \frac{b}{c}$  باشد، فیلتر

بالا فیلتری پایین گذر است. اکنون فیلتر شکل (۲) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جریان خروجی  $OTA_1$  به صورت زیر است:

$$i_{o1} = g_{m1} V_i \quad (14)$$

جریان خروجی  $OTA_2$  نیز عبارت است از:

$$i_{o2} = -g_{m2} V_o \quad (15)$$

با زدن KCL در گره  $V_o$  داریم:

$$i_{o1} + i_{o2} = (V_o - V_i) SC \quad (16)$$

با توجه به (۱۴) و (۱۵) و (۱۶)، عبارت است از:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{SC + g_{m1}}{SC + g_{m2}} \quad (17)$$

گین dc مدار با  $g_{m1}$  و با تغییر جریان بایاس  $I_{BB1}$  تغییر می‌یابد و قطب  $H(S)$  نیز با تغییر جریان بایاس  $I_{BB2}$  تغییر می‌یابد.

در فیلتر فوق اگر  $g_{m1} < g_{m2}$  باشد، فیلتر  $H(S)$  بالاگذر و اگر  $g_{m1} > g_{m2}$  باشد، فیلتر  $H(S)$  به صورت فیلتری پایین گذر است. بدین معنی که برای داشتن فیلتری بالاگذر  $I_{BB1} < I_{BB2}$  است و برعکس. اگر  $g_{m1} = g_{m2}$  باشد،  $H(S)$  تابعی ثابت است. فرکانس قطع نیز با تغییر جریان بایاس  $OTA_2$  و به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$f_{3dB1} = \frac{g_{m2}}{2\pi C} \quad (18)$$

#### ۴- بررسی هدایت انتقالی در فیلترهای OTA مرتبه‌ی دوم

۴-۱- بررسی تغییر هدایت انتقالی تابع

$$V_o = \frac{S^2 C_1 C_2 V_C + S C_1 g_{m4} V_B + g_{m2} g_{m5} V_A}{S^2 C_1 C_2 + S C_1 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}}$$

در این بخش فیلتری بررسی می‌شود که در آن با تغییر هدایت انتقالی‌ها، فیلتر به انواع فیلترهای مختلف تبدیل می‌گردد.

برای سادگی کار، در معادله بالا  $g_{m1} g_{m2} = g_{m5} g_{m2}$  در نظر

گرفته می‌شود، از این رو فرکانس مرکزی و فاکتور Q فیلتر از روابط زیر به دست می‌آید:

$$f_{c4} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m2}g_{m5}}{C_1C_2}} \quad (33)$$

$$Q_4 = \frac{1}{g_{m3}} \sqrt{\frac{C_2g_{m2}g_{m5}}{C_1}} \quad (34)$$

#### ۴-۲- محاسبه تغییرات Q بر حسب هدایت انتقالی $(S_{gm}^Q)$

در فیلتر بالاگذر و پایین گذر شکل (۳) فاکتور یکسان است. از این رو تغییرات Q نسبت به  $g_{m1}$ ،  $g_{m2}$ ،  $g_{m3}$  به صورت زیر است:

$$S_{gm1}^{Q_1} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \cdot \frac{1}{2g_{m3}} \sqrt{\frac{g_{m2}}{g_{m1}}} \quad (35)$$

$$S_{gm2}^{Q_1} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \cdot \frac{1}{2g_{m3}} \sqrt{\frac{g_{m1}}{g_{m2}}} \quad (36)$$

$$S_{gm2}^{Q_1} = -\sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \cdot \frac{\sqrt{g_{m1}g_{m2}}}{g_{m3}^2} \quad (37)$$

محاسبه تغییرات فاکتور Q بر حسب هدایت انتقالی‌های فیلتر میان گذر  $V_{o4}$  به صورت زیر است:

$$S_{gm1}^{Q_3} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2g_{m2}}{g_{m1}g_{m3}g_{m4}C_1}} \quad (38)$$

$$S_{gm2}^{Q_3} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2g_{m1}}{g_{m2}g_{m3}g_{m4}C_1}} \quad (39)$$

$$S_{gm3}^{Q_3} = -\frac{1}{2g_{m3}} \sqrt{\frac{C_2g_{m1}g_{m2}}{g_{m3}g_{m4}C_1}} \quad (40)$$

$$S_{gm4}^{Q_3} = -\frac{1}{2g_{m4}} \sqrt{\frac{C_2g_{m1}g_{m2}}{g_{m3}g_{m4}C_1}} \quad (41)$$

در پایان تغییرات فاکتور Q بر حسب هدایت انتقالی‌های فیلتر میان نگذر محاسبه می‌گردد:

$$S_{gm2}^{Q_4} = \frac{1}{2g_{m3}} \sqrt{\frac{C_2g_{m5}}{g_{m2}C_1}} \quad (42)$$

$$S_{gm5}^{Q_4} = \frac{1}{2g_{m3}} \sqrt{\frac{C_2g_{m2}}{g_{m5}C_1}} \quad (43)$$

$$S_{gm5}^{Q_4} = -\frac{1}{g_{m3}^2} \sqrt{\frac{C_2g_{m2}g_{m5}}{C_1}} \quad (44)$$

#### ۵- شبیه سازی

در این قسمت شبیه سازی مشخصه هدایت انتقالی CMOS OTA. تغییرات  $g_{mT}$  نسبت به جریان بایاس و پیاده سازی توابع تبدیل فیلترهای مرتبه اول و دوم انجام می‌شود. کلیه این شبیه سازی‌ها با استفاده از نرم افزار Pspice و Matlab صورت می‌پذیرد.

OTA CMOSها نیز با استفاده از پارامترهای CMOS از  $SCN_2$  سطح MOSIS<sub>2</sub> شبیه‌سازی شده است، همچنین ابعاد ترانزیستورهای  $M_1$

$$D(S) = 0 \rightarrow S_{1,2} = \frac{-C_1g_{m3} \pm \sqrt{(C_1g_{m3})^2 - 4(g_{m1}g_{m2})C_1C_2}}{2C_1C_2}$$

در نتیجه فاکتور Q به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_1 = \frac{\omega_0}{\Delta B} = \left( \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \right) / \left( \frac{g_{m3}}{C_2} \right) = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \cdot \frac{\sqrt{g_{m1}g_{m2}}}{g_{m3}} \quad (27)$$

$$V_{o1-4} = \frac{S^2C_1C_2V_C + SC_1g_{m4}V_B + g_{m2}g_{m5}V_A}{S^2C_1C_2 + SC_1g_{m3} + g_{m1}g_{m2}} \quad \text{فیلتر ۲-۱-۴}$$

به صورت پایین گذر

اگر در فیلتر شکل (۳)،  $V_A = V_B = 0$  باشد، آنگاه  $g_{m4}$  از مدار حذف می‌شود. حال با زدن دو KCL در دو گره خروجی و گره X و همچنین با توجه به معادله (۲۱) و (۲۲) و (۲۳) و (۲۴) معادله  $V_{o2}$  به صورت زیر محاسبه می‌شود، که فیلتری پایین گذر است:

$$V_{o2} = \frac{g_{m2}g_{m5}V_A}{S^2C_1C_2 + SC_1g_{m3} + g_{m1}g_{m2}} \quad (28)$$

فاکتور Q در فیلتر پایین گذر مشابه فیلتر بالاگذر محاسبه می‌شود.

$$V_{o3} = \frac{S^2C_1C_2V_C + SC_1g_{m4}V_B + g_{m2}g_{m5}V_A}{S^2C_1C_2 + SC_1g_{m3} + g_{m1}g_{m2}} \quad \text{فیلتر ۳-۱-۴}$$

صورت میان گذر

اگر فیلتر شکل (۳) در حالتی بررسی شود که جریان بایاس متعلق به OTA<sub>5</sub> صفر و  $V_A$  نیز از مدار حذف شده باشد، آنگاه مشخصه فیلتر به صورت زیر تغییر می‌یابد (که فیلتری میان گذر است):

$$V_{o3} = \frac{SC_1g_{m4}V_B}{S^2C_1C_2 + SC_1C_2g_{m3} + g_{m1}g_{m2}} \quad (29)$$

برای محاسبه فرکانس مرکزی فیلتر میان گذر  $V_{o3}$  از معادله (۲۹) بر حسب S مشتق گرفته و ریشه تابع به دست آورده می‌شود، از این رو:

$$f_{c3} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}g_{m3}}{g_{m4}C_1C_2}} \quad (30)$$

پهنای باند فیلتر میان گذر مشابه فیلتر بالاگذر محاسبه می‌شود. در نتیجه فاکتور Q به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Q_3 = \sqrt{\frac{C_2g_{m1}g_{m2}}{g_{m3}g_{m4}C_1}} \quad (31)$$

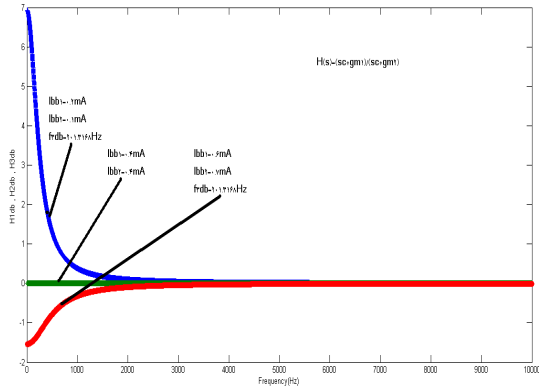
$$V_{o4} = \frac{S^2C_1C_2V_C + SC_1g_{m4}V_B + g_{m2}g_{m5}V_A}{S^2C_1C_2 + SC_1g_{m3} + g_{m1}g_{m2}} \quad \text{فیلتر ۴-۱-۴}$$

به صورت میان نگذر

اگر در فیلتر شکل (۳)، جریان بایاس متعلق به OTA<sub>4</sub> صفر باشد، آنگاه مشخصه فیلتر نامبرده به صورت زیر تغییر می‌یابد (که فیلتری میان نگذر است):

$$V_{o4} = \frac{S^2C_1C_2V_C + g_{m2}g_{m5}V_A}{S^2C_1C_2 + SC_1g_{m3} + g_{m1}g_{m2}} \quad (32)$$

در مرحله بعد فیلتر شکل (۲) به ازای  $C=50\text{nf}$ ,  $\mu K=20$ ,  $I_{BB1}=0.6\text{mA}$  و  $I_{BB2}=0.2\text{mA}$  برای فیلتر پایین گذر،  $I_{BB1}=0.1\text{mA}$  و  $I_{BB2}=0.7\text{mA}$  برای فیلتر بالا گذر و  $I_{BB2}=I_{BB1}=0.4\text{mA}$  به عنوان تابع ثابت تنظیم می‌گردد. این امر در شکل (۶) و با استفاده از نرم افزار Matlab رسم شده است.



شکل (۶): پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه اول  $H(S) = \frac{SC + g_{m1}}{g_{m2} + SC}$  با

استفاده از Matlab به ازای تغییرات  $g_{m2}$ ,  $g_{m1}$   
Fig. (6): Frequency response of first-Order

filter  $H(S) = \frac{SC + g_{m1}}{g_{m2} + SC}$  with the variation of  $g_{m2}$ ,  $g_{m1}$  by means of Matlab

$$\begin{cases} I_{BB1} = 0.2\text{mA} \\ I_{BB2} = 0.1\text{mA} \\ f_{3dB1} = 291.3168\text{HZ} \end{cases} \quad \text{حالت پایین گذر} \quad (45)$$

$$\begin{cases} I_{BB1} = 0.6\text{mA} \\ I_{BB2} = 0.1\text{mA} \\ f_{3dB3} = 201.3168\text{HZ} \end{cases} \quad \text{حالت بالاگذر} \quad (46)$$

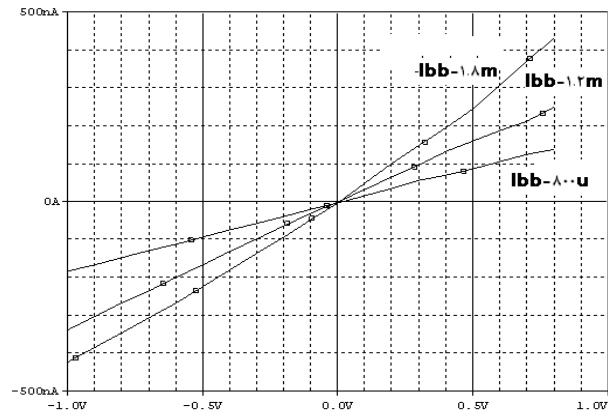
$$I_{BB1} = I_{BB2} = 0.4\text{mA} \quad \text{حالت تابع ثابت} \quad (47)$$

اکنون به شبیه سازی فیلترهای بالاگذر، پایین گذر، میان گذر و میان نگذر شکل (۳) می‌پردازیم. فرض کنید، فرکانس بالاگذر با فرکانس مرکزی  $4.525\text{kHz}$  مد نظر باشد، از این رو مقادیر فیلتر  $V_{01}$  با استفاده از معادله (۲۴) تنظیم می‌شوند. بنابراین:

$$\begin{cases} g_{m1} g_{m2} = 1 \frac{\text{mA}^2}{\text{V}} \\ c_1 c_2 = 1.2382e-13 \text{F}^2 \end{cases} \quad (48)$$

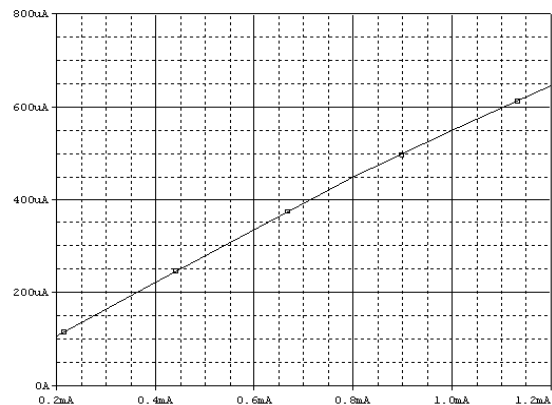
شکل (۷) شبیه سازی فیلتر بالاگذر با مشخصات رابطه (۴۸) و با استفاده از نرم‌افزار Pspice را نشان می‌دهد.

و  $M_2$  به صورت  $L=10\mu\text{m}$ ,  $W=50\mu\text{m}$  و ابعاد ترانزیستورهای  $M_3 - M_8$  نیز به صورت  $L=10\mu\text{m}$ ,  $W=100\mu\text{m}$  می‌باشد. ولتاژ منابع نیز به صورت  $V_{pp}=-V_{SS}=5\text{V}$  تنظیم شده است [۸]. اکنون می‌خواهیم جریان خروجی  $I_{out}$  در مدار را برحسب ولتاژ ورودی  $V_{in}$  رسم کنیم، یعنی مشخصات تبدیل DC از مدار OTA را ترسیم نماییم. برای این کار جریان بایاس  $I_{BE}$  در مقادیر  $800\mu\text{mA}$  و  $1.8\text{mA}$ ,  $1.2\text{mA}$  به عمل می‌گردد. سپس ولتاژ خروجی نسبت به جریان خروجی محاسبه و رسم می‌شود. این امر در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): خروجی جریان  $I_{out}$  برحسب ولتاژ ورودی  $V_{in}$   
Fig. (4): Current output ( $I_{out}$ ) proportional to input voltage ( $V_{in}$ )

اکنون می‌خواهیم رابطه‌ی بین هدایت انتقالی مدار OTA و جریان بایاس  $I_{BE}$  به دست آورده شود. برای این کار ولتاژ ورودی  $V_{in}$  روی  $1\text{V}$  تنظیم شده، سپس جریان بایاس  $I_{BE2}$  از  $0/2\text{mA}$  به  $1/2\text{mA}$  تغییر داده شود، آنگاه تغییرات  $g_{mT}$  (که همان تغییر جریان خروجی نسبت به ورودی مدار می‌باشد) محاسبه و با نرم‌افزار pspice رسم می‌گردد که نتیجه آن در شکل (۵) نشان داده شده است.

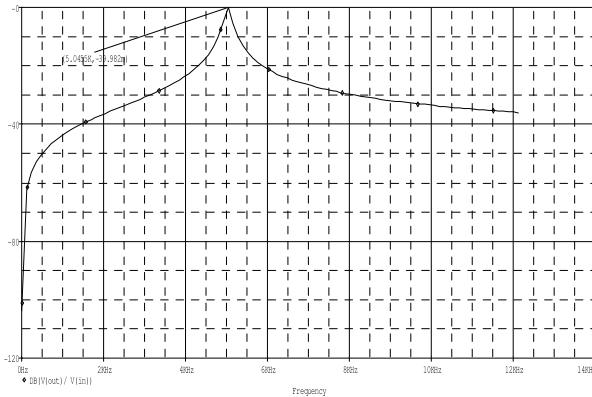


شکل (۵): هدایت انتقالی قابل تنظیم به صورت خطی  
Fig. (5): Linear transconductance tunable range

و برای فیلتر میان نگذر:

$$\begin{cases} c_1 g_{m4} = c_1 g_{m3} = 1 \frac{mA^2}{V} \\ g_{m1} g_{m2} = 1 \frac{FmA}{V}, c_1 c_2 = 1e-6 F^2 \end{cases} \quad (50)$$

حاصل می‌شود. شکل (۹) فیلتر میان گذر با مشخصات رابطه (۴۹) و شکل (۱۰) فیلتر میان نگذر با مشخصات رابطه (۵۰) را نشان می‌دهد، که با استفاده از Pspice پیاده‌سازی شده‌اند.



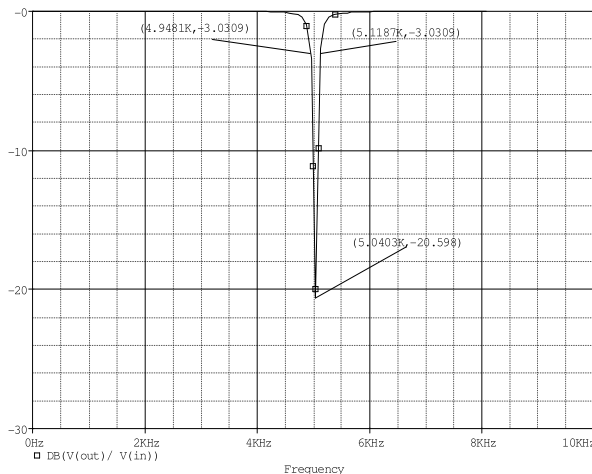
شکل (۹): پاسخ فرکانسی فیلتر میان گذر

$$V_{03} = \frac{SC_1 g_{m4} V_B}{S^2 C_1 C_2 + SC_1 C_2 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}}$$

$f_c = 5.433kHz, \Delta\beta = 14lh$

Fig. (9): Frequency response of band pass filter

$$V_{03} = \frac{SC_1 g_{m4} V_B}{S^2 C_1 C_2 + SC_1 C_2 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}} \text{ with the characteristics of } f_c = 5.433kHz, \Delta\beta = 14lh$$



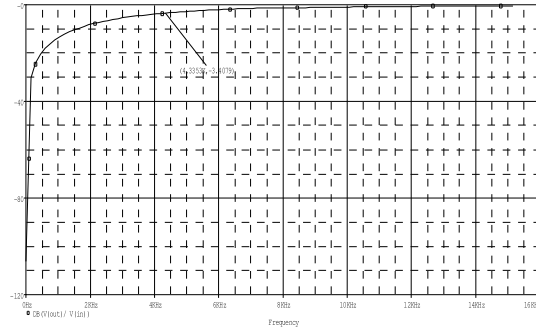
شکل (۱۰): فیلتر میان نگذر

$$V_{04} = \frac{S^2 C_1 C_2 V_C + g_{m2} g_{m5} V_A}{S^2 C_1 C_2 + SC_1 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}}$$

مشخصات  $f_c = 5.433kHz, \Delta\beta = 14lh$

Fig. (10): Frequency response of band rejection filter

$$V_{04} = \frac{S^2 C_1 C_2 V_C + g_{m2} g_{m5} V_A}{S^2 C_1 C_2 + SC_1 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}} \text{ with the characteristics of } f_c = 5.433kHz, \Delta\beta = 14lh$$



شکل (۷): شبیه سازی فیلتر بالا گذر

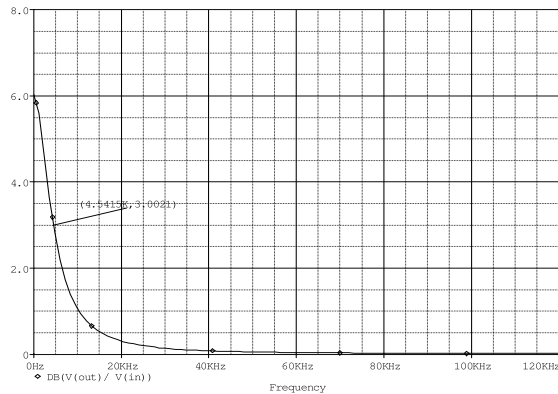
$$V_{01} = \frac{S^2 C_1 C_2 V_C}{S^2 C_1 C_2 + SC_1 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}}$$

Pspice با استفاده از

Fig. (7): Frequency response of high pass filter

$$V_{01} = \frac{S^2 C_1 C_2 V_C}{S^2 C_1 C_2 + SC_1 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}} \text{ by means of Pspice}$$

اگر تنظیمات رابطه (۴۸) برای تابع  $V_{02}$  نیز در نظر گرفته شود، آنگاه شکل (۷) به صورت زیر تغییر می‌کند (شکل (۸)).



شکل (۸): شبیه سازی فیلتر پایین گذر

$$V_{02} = \frac{g_{m2} g_{m5} V_A}{S^2 C_1 C_2 + SC_1 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}}$$

Pspice با استفاده از

Fig. (8): Frequency response of low pass filter

$$V_{02} = \frac{g_{m2} g_{m5} V_A}{S^2 C_1 C_2 + SC_1 g_{m3} + g_{m1} g_{m2}} \text{ by means of Pspice}$$

در طراحی فیلتر میان گذر و میان نگذر با فرکانس مرکزی و پهنای باند معلوم، می‌بایست مقادیر مجهول را به گونه‌ای انتخاب کرد که با روابط  $f_c$  و  $\Delta\beta$  فیلتر میان گذر و یا میان نگذر متناسب باشند. به طور مثال اگر  $f_c = 5/433kHz, \Delta\beta = 14lh$  برای فیلتر میان گذر و میان نگذر مد نظر باشد:

$$\begin{cases} c_1 g_{m4} = c_1 g_{m3} = 1 \frac{mA^2}{V} \\ g_{m1} g_{m2} = 1 \frac{FmA}{V}, c_1 c_2 = 1e-6 F^2 \end{cases} \text{ فیلتر میان گذر} \quad (49)$$

$\rightarrow f_c = 5.433kHz, \Delta\beta = 14lh$

## ۶- نتیجه گیری

همچنین نشان داده شد که می توان با تغییر هدایت انتقالی در فیلترهای مرتبه اول، فیلترهای بالاگذر و پایین گذر و در فیلترهای مرتبه دوم، فیلترهای بالاگذر، پایین گذر، میان گذر و میان گذر ساخت.

در این مقاله ساختار نمونه‌ای از بلوک پایه CMOS OTA، نحوه عملکرد آن و پارامترهای موثر بلوک تشریح گردید و نشان داده شد که هدایت انتقالی مدار با جذر جریان بایاس رابطه‌ای مستقیم دارد. سپس از بلوک ذکر شده در طراحی فیلترهای مرتبه اول و دوم استفاده گردید.

## پی نوشت:

1- Operational Transconductance Amplifier

## مراجع

- [1] D. Sauer, The LM13600 Story, (<http://www.idea2ic.com>), May 2003.
- [2] H. Camenzind, Designing analog chips. Virtualbookworm.com Publishers, (<http://www.designinganalogchips.com>), 2005.
- [3] Intersil Americas Inc., CA3080, CA3080A: 2MHz, "Operational transconductance amplifier" (OTA)", FN475.6, Aug. 2004.
- [4] H. Wittlinger, "Applications of the CA3080 high-performance operational transconductance amplifier. Intersil americas Inc", AN6668.2, May 2002.
- [5] I. Americas Inc., CA3280(A) Dual, 9MHz, "Operational transconductance amplifier" (OTA)", May 2002. FN1174.6.
- [6] MT. Abuelma'atti, "A novel analogue current-mode currentcontrolled frequency divider/multiplier". Int J. of Elec. 2002;89:455-65.
- [7] D. Pulsab, W. Surakamponorn, "Dual-mode multiphase sinusoidal oscillator, using CDBA", ECTI-CON 2007.
- [8] K. Kaewdang, W. Surakamponorn, "On the realization of electronically current-tunable CMOS OTA", Int. J. Elec. Comm., (AE) 61, pp.300 - 30, 2007.

