

KONTROLABILNI STRUJNI POJAČAVAČ U CMOS TEHNOLOGIJI OPTIMIZOVAN ZA PRIMJENE U OPTO-ELEKTRONSKIM INFORMACIONO-KOMUNIKACIONIM TEHNOLOGIJAMA

CMOS CONTROLLABLE CURRENT AMPLIFIER OPTIMIZED FOR OPTO-ELECTRONIC INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Alija Dervić, Nikša Tadić, Milena Erceg, *Elektrotehnički fakultet*

Sadržaj: U ovom radu predstavljen je naponom kontrolisan strujni pojačavač u CMOS tehnologiji čiji se rad bazira na otpornom ogledalu. Prikazani strujni pojačavač je namijenjen za rad u opto-elektronskim sistemima koji se koriste u informaciono-komunikacionim tehnologijama. Naponom kontrolisan strujni pojačavač je realizovan u diskretnoj tehnici, sa naponom napajanja od 2.1 V. Izmjereni dinamički opseg pojačanja iznosi 53.6 dB, dok simulacije pokazuju da se frekventni opseg kreće od 10 MHz do 120 MHz.

Abstract: Resistive-mirror based CMOS voltage-controlled current amplifier is presented in this paper. Proposed current amplifier is intended for opto-electronic systems which are used in information and communication technologies. It has been realised using discrete components with a supply voltage of 2.1 V. Measured gain dynamic range is 53.6 dB, while simulated frequency bandwidth is between 10 MHz and 120 MHz.

1. UVOD

Strujno procesiranje dobija na značaju 1968. godine, sa pojavom Wilson-ovog strujnog ogledala, strujnih prenosnika i translinearne petlje sa bipolarnim tranzistorima. Iako je naponsko procesiranje i dalje dominantan pristup, analogna obrada signala (kao osnova za digitalnu obradu signala) u strujnom domenu postaje nezamjenljiva u određenim oblastima elektronike. To se prije svega odnosi na one oblasti u kojima osnovni gradivni elementi imaju ulazne veličine u strujnom domenu, kao što je slučaj, npr., u optoelektronici.

Osnov svake analogne obrade signala je pojačavanje signala. Poseban kvalitet pojačavačkim kolima daje svojstvo kontrolabilnosti. Pod pojmom kontrolabilni pojačavač podrazumijeva se pojačavačko kolo čije se pojačanje može mijenjati promjenom određenog parametra, najčešće promjenom kontrolnog napona ili kontrolne struje. Kontrolabilni strujni pojačavač predstavlja osnovni gradivni element jedne klase optičkih prijemnika [1]. Sa druge strane, optički prijemnici predstavljaju sastavni dio sistema za prenos podataka optičkim putem. Prenos podataka koji se danas obavlja posredstvom optičkih kablova iznosi blizu 80% cjelokupnog internet saobraćaja [2], što predstavlja jak motiv za rad na unapređenju karakteristika strujnih pojačavača.

Zahvaljujući translinearnim petljama [1], kontrolabilni strujni pojačavači u bipolarnoj tehnologiji imaju značajno bolje karakteristike u odnosu na kontrolisane strujne pojačavače u CMOS tehnologiji. Međutim, zbog manjih troškova proizvodnje koje zahtijeva CMOS u odnosu na bipolarnu tehnologiju, istraživački rad u oblasti kontrolabilnih strujnih pojačavača u CMOS tehnologiji sve više dobija na značaju.

2. KONTROLABILNI STRUJNI POJAČAVAČ

2.1 Otporno ogledalo

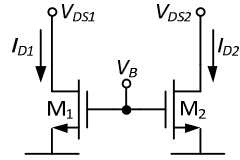
Otporno ogledalo [3] prikazano je na slici 1. Otpornost kanala MOSFET-ova definisana je kao odnos napona drejn-sors i struje drejna koja protiče kroz MOSFET-ove. Otpornosti R_{DS1} i R_{DS2} otpornog originala M_1 i otpornog lika M_2 , redom, biće jednake ako su oba MOSFET-a identičnih karakteristika, i ako su oba MOSFET-a u omskom režimu rada. Matematički model koji opisuje rad otpornog ogledala dat je sljedećom relacijom:

$$R_{DS1} = R_{DS2} \Rightarrow \frac{V_{DS1}}{I_{D1}} = \frac{V_{DS2}}{I_{D2}} \quad (1)$$

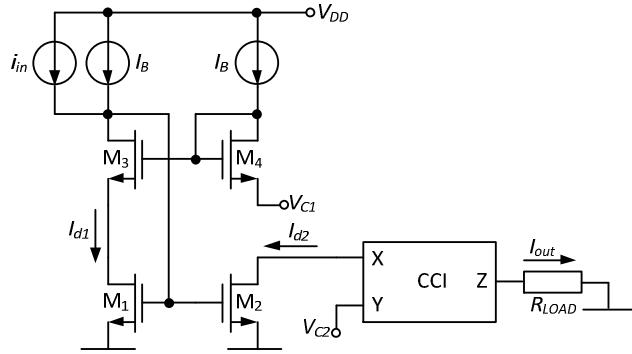
gdje je V_{DS1} napon drejn-sors MOSFET-a M_1 , V_{DS2} napon drejn-sors MOSFET-a M_2 , I_{D1} struja drejna MOSFET-a M_1 i I_{D2} struja drejna MOSFET-a M_2 .

2.2 Princip rada

Blok šema strujnog pojačavača prikazna ja na slici 2. Otporno ogledalo koga čine MOSFET-ovi M_1 i M_2 predstavlja bazni dio strujnog pojačavača. Preko polarizacionog strujnog izvora koji generiše struju I_B i kola za transfer kontrolnog napona V_{C1} , koga čine MOSFET-ovi M_3 i M_4 koji rade u režimu zasićenja, vrši se polarizacija gejtova MOSFET-ova M_1 i M_2 . Za transfer kontrolnog napona V_{C2} koristi se naponski *follower* u sklopu strujnog prenosnika prve generacije CCI [1], na čiji Y priključak se dovodi kontrolni napon V_{C2} .



Slika 1. Otporno ogledalo



Slika 2. Blok-šema kontrolabilnog strujnog pojačavača

Strujni izvor I_B realizovan je preko *wide-swing* strujnog ogledala. Iste struje protiču kroz MOSFET-ove M_3 i M_4 , i na taj način se obezbeđuje prenos kontrolnog napona V_{C1} na drejn MOSFET-a M_1 . Kontrolni napon V_{C2} se preko naponskog *follower*-a u sklopu strujnog prenosnika prve generacije CCI prenosi na drejn MOSFET-a M_2 . Pored toga što obavlja prenos kontrolnog napona V_{C2} , strujni prenosnik prve generacije CCI obavlja i ulogu izlaznog stepna. Struja koja teče kroz X priključak strujnog prenosnika prve generacije CCI se preko strujnog *follower*-a prenosi na Z priključak i ujedno predstavlja izlaznu struju I_{out} . Strujni *follower* u sklopu strujnog prenosnika prve generacije CCI konstruisan je kao dvoizlazno *wide-swing* strujno ogledalo [1].

Podrazumijevajući da se MOSFET-ovi M_1 i M_2 nalaze u omskom režimu rada, na osnovu relacije (1) dobija se da je izlazna struja I_{out} strujnog pojačavača prikazanog na slici 2 data sljedećim izrazom:

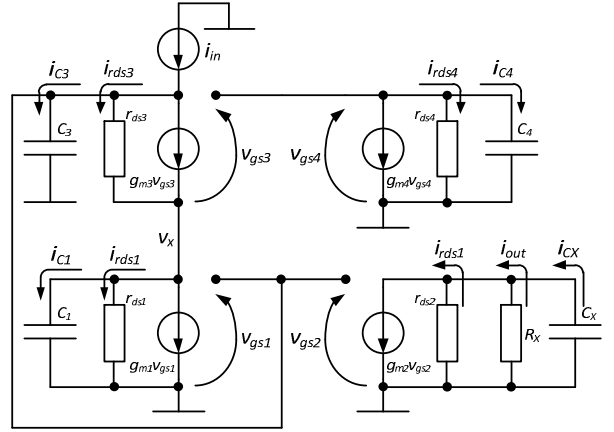
$$I_{out} = \frac{V_{C2}}{V_{C1}} I_{d1} \quad (2)$$

Jasno je da se promjenom odnosa kontrolnih napona V_{C2} i V_{C1} mijenja strujno pojačanje predloženog strujnog pojačavača.

Osnovni režim rada predstavljenog strujnog pojačavača jeste režim pojačanja, kada su oba MOSFET-a u sklopu otpornog ogledala M_1 i M_2 u omskoj oblasti. Takođe, predstavljeni dizajn može da se koristi i kao oslabljivač. Pored osnovnog pojačavačkog režima, strujni pojačavač može da obavlja pojačanje kada je MOSFET M_2 u oblasti zasićenja.

2.3 Analiza frekventnih karakteristika pojačavača

Na slici 3 prikazan je model za male signale kontrolabilnog strujnog pojačavača. Na osnovu ovog modela dobija se prenosna karakteristika strujnog pojačavača:



Slika 3. Model za male signale kontrolabilnog strujnog pojačavača

$$A_i(s) = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{r_{ds2}}{R_X + r_{ds2}} \frac{(1 + g_{m3}r_{ds1})g_{m2}}{r_{ds1}C_1C_3} \cdot \frac{1 + s \frac{r_{ds1}C_1}{1 + g_{m3}r_{ds1}}}{s^2 + s \frac{1 + g_{m3}r_{ds1}}{r_{ds1}C_1} + \frac{g_{m1}g_{m3}}{C_1C_3}} \quad (3)$$

gdje je: r_{ds1} izlazna otpornost MOSFET-a M_1 , r_{ds2} izlazna otpornost MOSFET-a M_2 , R_X ulazna otpornost strujnog prenosnika prve generacije, g_{m1} transkonduktansa MOSFET-a M_1 , g_{m2} transkonduktansa MOSFET-a M_2 , g_{m3} transkonduktansa MOSFET-a M_3 , C_1 ekvivalentna kapacitivnost drejna MOSFET-a M_1 i C_3 ekvivalentna kapacitivnost drejna MOSFET-a M_3 . Frekvencija pola uzrokovanog ulaznom otpornošću R_X i kapacitivnošću C_X strujnog prenosnika prve generacije CCI dovoljno je velika da se njegov uticaj može zanemariti. Prirodna učestanost ω_0 i faktor Q prenosne karakteristike $A_i(s)$ (3) dati su kao:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m3}}{C_1C_3}} \quad (4)$$

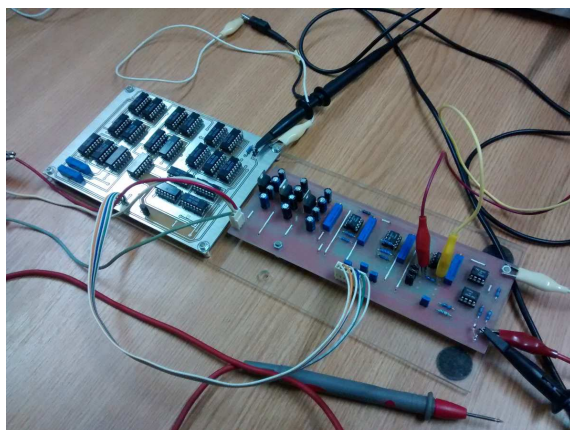
$$Q = \frac{r_{ds1}}{1 + g_{m3}r_{ds1}} \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m3}C_1}{C_3}} \quad (5)$$

Strujno pojačanje A_i za male frekvencije izražava se kao:

$$A_{i0} = A_i(s=0) = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} \frac{1 + r_{ds1}g_{m3}}{r_{ds1}g_{m3}} \frac{r_{ds2}}{r_{ds2} + R_X} \quad (6)$$

Ukoliko MOSFET-ovi M_1 i M_2 rade u omskom režimu, strujno pojačanje A_{i0} za male frekvencije izražava se kao:

$$A_{i0} = \frac{\beta_2}{\beta_1} \frac{V_{DS2}}{V_{DS1}} \frac{V_{DS1}}{V_{DS1} + R_X I_B} \left(1 + \frac{\sqrt{I_B}}{V_{DS1} \sqrt{2\beta_3}} \right) \quad (7)$$



Slika 4. Realizacija kontrolabilnog strujnog pojačavača u diskretnoj tehnici (lijeva štampana pločica), eksitacioni sistem (desna štampana pločica)

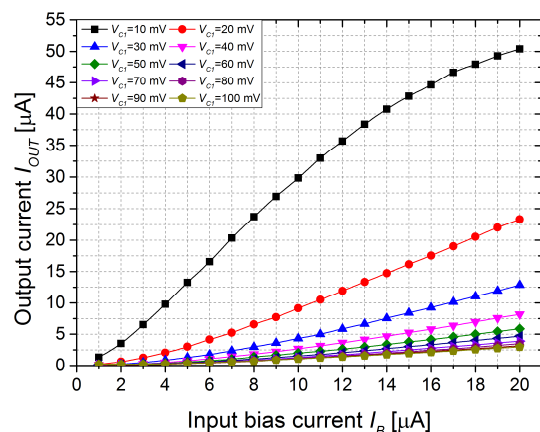
Ukoliko MOSFET M_2 radi u oblasti zasićenja, strujno pojačanje A_{i0} za male frekvencije zadovoljava relaciju:

$$A_{i0} = \frac{2\beta_2}{\beta_1^2 V_{DS1}^2} \left(1 + \frac{\sqrt{I_B}}{V_{DS1} \sqrt{2\beta_3}} \right) I_B \quad (8)$$

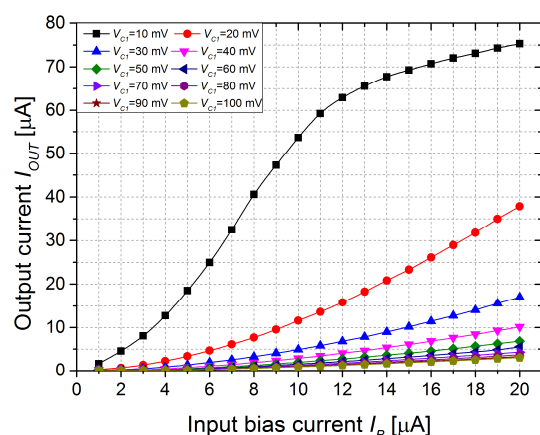
3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U ovom dijelu prikazani su postignuti rezultati predstavljenog strujnog pojačavača u diskretnoj tehnici. Za realizaciju kontrolabilnog strujnog pojačavača u diskretnoj tehnici korišćena su integrisana kola ALD1106 i ALD1107 koja sadrže po 4 n-kanalna, odnosno, p-kanalna MOSFET-a identičnih karakteristika. Takođe, rad predloženog kontrolabilnog CMOS strujnog pojačavača simuliran je korišćenjem softverskog paketa SPICE sa MOSFET modelom BSIM3v3 za TSMC 0.35 μm CMOS tehnologiju, koji je dobijen od strane MOSIS-a. Na slici 4 prikazan je prototip realizovan u diskretnoj tehnici.

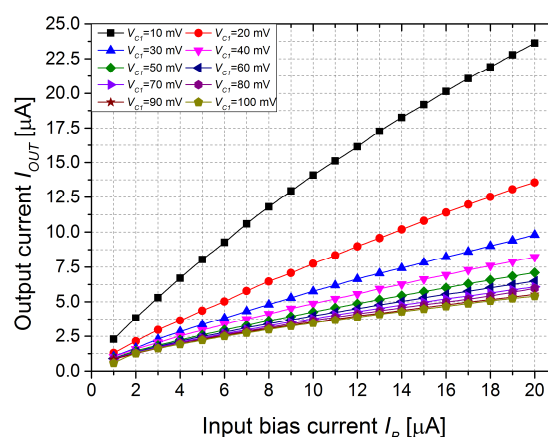
U cilju smanjenja napona napajanja strujnog pojačavača izvršena je paralelizacija MOSFET-ova. Zahvaljujući paralelizaciji MOSFET-ova postigao se veći faktor pojačanja β . Realizovan je sistem za testiranje koji se sastoji od: stabilisanog napona za napajanje strujnog pojačavača, polarizacionih napona, kontrolnih napona V_{C1} i V_{C2} , kao i jednosmjernog strujnog izvora koji generiše polarizacionu struju I_B . Napon napajanja strujnog pojačavača koji je postignut u diskretnoj realizaciji iznosi 2.1 V, što je blisko minimalnom naponu napajanja prikazanog u tehničkoj dokumentaciji [4] koji iznosi 2 V. Takođe, jednosmjerna polarizaciona struja I_B iznosi 10 μA . Korišćeni MOSFET-ovi su optimizovani za struje drejna reda mA, što omogućava maksimalni frekventni opseg od 30 MHz. Uzimajući u obzir ostvareni napon napajanja i struju polarizacije, frekventni opseg u diskretnoj tehnici se kreće u opsegu od svega nekoliko desetina kHz. U rezultatima simulacija pokazuje se da je frekventni opseg strujnog pojačavača u integrisanoj tehnologiji između 10 MHz i 120 MHz, u zavisnosti od vrijednosti pojačanja. Maksimalni proizvod strujnog pojačanja i propusnog opsega postignutog u simulacijama



Slika 5. Jednosmjerna prenosna karakteristika kontrolabilnog strujnog pojačavača kada oba MOSFET-a u sklopu otpornog ogledala rade u omskom režimu, pri čemu je $V_{C2}=100\text{ mV}$



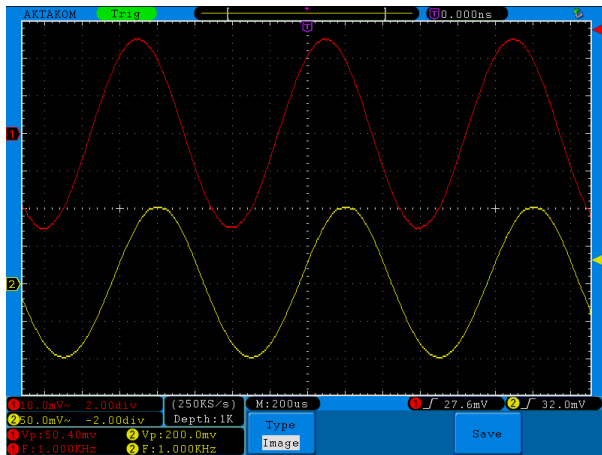
Slika 6. Jednosmjerna prenosna karakteristika kontrolabilnog strujnog pojačavača kada MOSFET M_2 radi u režimu zasićenja, pri čemu je $V_{C2}=250\text{ mV}$



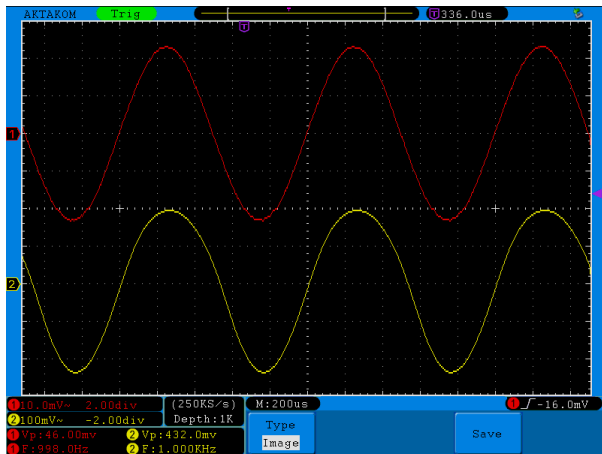
Slika 7. Jednosmjerna prenosna karakteristika kontrolabilnog strujnog oslabljivača, pri čemu je $V_{C2}=10\text{ mV}$

iznosi 1.05 GHz, što je 4.5, 5.8, 21.8 puta više nego u [6], [9], [5], redom.

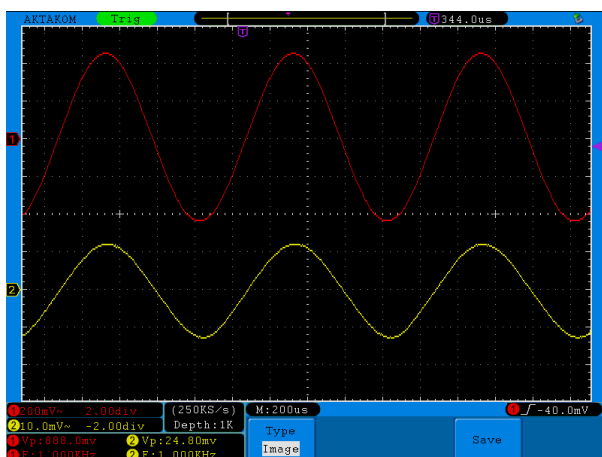
Na slikama 5-7 prikazane su jednosmjerne karakteristike zavisnosti izlazne struje od ulazne struje, pri različitim



Slika 8. Vremenski odziv strujnog pojačavača (MOSFET-ovi M_1 i M_2 u se nalaze omskom režimu). Parametri: $I_B=10 \mu A$, $V_{C2}=100 \text{ mV}$, $V_{C1}=10 \text{ mV}$, $A_f=32 \text{ dB}$



Slika 9. Vremenski odziv kontrolabilnog strujnog pojačavača (MOSFET M_2 u zasićenju). Parametri: $I_B=10 \mu A$, $V_{C2}=250 \text{ mV}$, $V_{C1}=10 \text{ mV}$, $A_f=39 \text{ dB}$



Slika 10. Vremenski odziv kontrolabilnog strujnog oslabljivača. Parametri: $I_B=10 \mu A$, $V_{C2}=10 \text{ mV}$, $V_{C1}=100 \text{ mV}$. $A_f=-11 \text{ dB}$

režimima rada, za različite vrijednosti pojačanja. Na slikama 8-10 predstavljen je vremenski odziv strujnog pojačavača pri

prostioperiodičnoj pobudi. Na ovim slikama crvena linija predstavlja ulazni, dok žuta linija predstavlja izlazni signal.

Predstavljeni kontrolabilni strujni pojačavač ima najveći dinamički opseg pojačanja (odnos maksimalnog i minimalnog pojačanja) do sada ostvaren u CMOS tehnologiji. Izmjereni dinamički opseg u diskretnoj tehnici iznosi 53.6 dB (478.6), što je 2.4, 2.85, 19, 30.2, 120.2 puta više nego u [7], [9], [6], [5], [8], redom. Simulacije u integrisanoj tehnologiji se veoma dobro poklapaju sa izmjerenim dinamičkim opsegom.

4. ZAKLJUČAK

Predstavljen je naponom kontrolisan strujni pojačavač realizovan u CMOS tehnologiji. Princip rada bazira se na otpornom ogledalu. Izmjereni rezultati na prototipu realizovanom u diskretnoj tehnici pokazuju veoma dobre performanse koje su u skladu sa matematičkim modelima. Realizacijom ovog dizajna u integrisanim CMOS tehnologijama sa minimalnom dimenzijom manjom od 100 nm ostvarile bi se frekventne karakteristike koje odgovaraju zahtjevima u savremenim opto-elektronskim informaciono-komunikacionim tehnologijama.

LITERATURA

- [1] N. Tadić at al., "A 78.4 dB Photo-Sensitivity Dynamic Range, 285 TQHz Transimpedance Bandwidth Product BiCMOS Optical Sensor for Optical Storage Systems," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 46, no. 5, pp. 1170-1182, March 2011.
- [2] V. Alwayn, *Optical Network Design and Implementation*, Cisco Press, March 2004.
- [3] N. Tadić, "Resistive mirror-based voltage controlled resistor with generalized active devices," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 2, pp. 587-591, April 1998.
- [4] "Quad/Dual N-channel matched pair MOSFET array," Advanced Linear Devices, Inc. (Revised 2012). [Online]. Available: <http://www.aldinc.com/pdf/ALD1116.pdf>
- [5] F. Esparza-Alfaro at al., "Low-Power Class-AB CMOS Voltage Feedback Current Operational Amplifier With Tunable Gain and Bandwidth," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 61, no. 8, pp. 574-578, May 2014.
- [6] J. De Lima, "A low-voltage programmable-gain current-mode amplifier," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 41, pp. 147-157, December 2004.
- [7] K. Kaewdang at al., "A design of CMOS tunable current amplifiers," *IEEE International Symposium on Communications and Information Technology ISCIT 2004*, vol. 1, pp. 519-522, October 2004.
- [8] C.A. De La Cruz-Blas, at al., "A $\pm 0.75\text{-V}$ Compact CMOS Class-AB Current-Mode Exponential Variable Gain Amplifier," *IEEE Trans. on Circuits and Systems II*, vol. 54, no. 12, pp. 1042-1046, December 2007.
- [9] Z. Wang, "Two CMOS large current-gain cells with linearly variable gain and constant bandwidth," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, vol. 39, no. 11, pp. 1021-1024, December 1992.