

Electronics and electrical engineering Elektronika ir elektros inžinerija

TRIKONTŪRIO LC ĮTAMPA VALDOMO GENERATORIAUS PROJEKTAVIMAS IR MODELIAVIMAS

Vytautas MAČAITIS^{1, 2,*}, Romualdas NAVICKAS^{1, 2}

¹Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

²FTMC, puslaidininkų fizikos institutas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2018 m. birželio 20 d.; priimta 2018 m. birželio 27 d.

Santrauka. Straipsnyje pateikiamas trikontūrio LC įtampa valdomo generatoriaus (LC-ĮVG) projektavimas ir pagrindinių parametrų kompiuterinio skaičiavimo rezultatai. Trikontūris LC-ĮVG suprojektuotas naudojant 65 nm technologinio žingsnio aukštadažnę septynių metalų KMOP integrinių grandynų gamybos technologiją. Projektuoti ir modeliuoti naudotas „Cadence IC“ integrinių grandynų projektavimo ir modeliavimo programinis paketas. Induktyvumo ritė parinkta taip, kad suprojektuotas LC-ĮVG veiktu plačiame dažnių derinimo ruože nuo 2,64 iki 6,72 GHz. Norint pasiekti didžiausią induktyvumo ritės kokybę, kontūras suprojektuotas septintame technologiniame metale, naudojant tik vieną kontūro sūkį. Suprojektuoto trikontūrio LC-ĮVG modeliavimo rezultatai yra šie: dažnio valdymo ruožas kinta nuo 2,64 GHz iki 6,72 GHz; fazės triukšmas kinta nuo $-128,8$ dBc/Hz iki $-132,1$ dBc/Hz; vartojamoji galia kinta nuo 20,31 mW iki 25,48 mW; startavimo laikas kinta nuo 2,76 ns iki 5,97 ns; išėjimo signalo amplitudė kinta nuo 1,34 V iki 2,26 V; induktyvumo ritės kokybė kinta nuo 20,15 iki 31,04. Apskaičiuotas FOM_T rezultatas $-209,73$ dBc/Hz.

Reikšminiai žodžiai: įtampa valdomas generatorius, integriniai grandynai, KMOP IG technologija, lustai.

Įvadas

Pastaruosiu metu sparčiai vystosi belaidės mobiliojo ryšio technologijos ir tai paskatino įrenginių, gebančių perduoti duomenis belaidžiu ryšiu, paklausą. Kuriant naujus belaidžio ryšio standartus, stengiamasi įvykdyti keletą reikalavimų: darbas standartizuotose dažnių juostose, vartojamosios galios sumažinimas, dažnių juostos pločio parinkimas ir lusto užimamo ploto sumažinimas. Šiuolaikinės moderniosios belaidžio ryšio komunikacijos sistemos įgyvendinamos naudojant daugiajuosčius, daugiastandarčius belaidžio mobiliojo ryšio siųstuvus-imtuvus (angl. *multi-standard, multi-band transceiver*) (Bajestan et al., 2014). Tokios sistemos geba apdoroti heterogeninę informaciją (tekstą, balsą, garsą, vaizdą) naudojant skirtingus belaidžio mobiliojo ryšio standartus. Taip pat daugiastandarčių belaidžio mobiliojo ryšio sistemos geba perduoti vientisus duomenis tarp skirtingų belaidžio ryšio tinklų, kurių duomenų perdavimo greitis skiriasi (Cornetta, Santos ir Vázquez, 2012).

Norint naudotis tame pačiame luste keliomis belaidžio ryšio technologijomis būtinas daugiastandartis, daugiajuostis siųstuvus-imtuvus. Imtuvą sudaro mažatriukšmis

stiprintuvas, demoduliatorius, žemųjų dažnių filtras ir žemadažnė sistema. Siųstuvus sudarytas iš žemadažnės sistemos, žemųjų dažnių filtro, modulatoriaus ir galios stiprintuvo. Belaidžio ryšio siųstuve-imtuve kaip dažnio sintezatorius dažniausiai naudojama fazės derinimo kilpa FDK (angl. *phase locked loop*, PLL). Dažniausiai tokie siųstuvai-imtuvai veikia dažnių ruože nuo 0,1 GHz iki 13 GHz. Norint padengti platų dažnių ruožą, reikalinga fazės derinimo kilpa, kurioje dažnį generuoja vienas arba keletas LC įtampa valdomų generatorių (LC-ĮVG) (T. P. Wang ir S. Y. Wang, 2013).

Klasikinę FDK sudaro penki pagrindiniai elementai: fazės detektorius (FD), krūvio pompa (KP), žemojo dažnio filtras (ŽDF), įtampa valdomas generatorius (ĮVG) ir dažnio daliklis ($\div N$). FD nustato dažnio ir fazės neatitiktį tarp atraminio f_{REF} ir grįžtamojo ryšio f_{DIV} įėjimų. Kitas žingsnis – FD UP arba DN signalų generavimas. UP signalai generuojami, kai grįžtamojo ryšio signalo f_{DIV} dažnis atsilieka nuo f_{REF} . Priešingu atveju generuojami DN signalai. KP gaunant UP signalą generuojamas teigiamasis srovės impulsas, priešingu atveju, gavus DN signalą, generuojamas impulsas, kuris yra neigiamasis. Srovės im-

*Autorius susirašinėti. El. paštas vytautas.macaitis@ftmc.lt

pulsai iš KP patenka į ŽDF. Čia vyksta signalų integravimas ir filtravimas. ŽDF siunčia valdymo signalą į ĮVG, tuomet ĮVG išėjimo dažnis didinamas arba mažinamas, tokiu būdu pašalinama fazės paklaida. Jei FD išsiunčia UP signalą, tuomet ĮVG didina išėjimo dažnį, jei išsiunčiamas DN signalas – ĮVG išėjimo dažnis mažinamas (Best, 2007)

Šio darbo tikslas – sukurti trikontūrį įtampa valdomą generatorių, veikiantį plačiame dažnių ruože.

Straipsnyje pateikiami šie skyriai: trikontūrio LC-ĮVG projektavimas, kuriame pateikiama principinė elektrinė schema, aptariami pagrindiniai blokai, jų svarba ir veikimas; trikontūrio LC-ĮVG kompiuterinio modeliavimo skyriuje pateikiami pagrindinių trikontūrio LC-ĮVG parametrų modeliavimo rezultatai skirtingomis modeliavimo sąlygomis; išvadų skyriuje pateikiamas pagrindinių parametrų, gautų kompiuterinio modeliavimo metu, apibendrinimas.

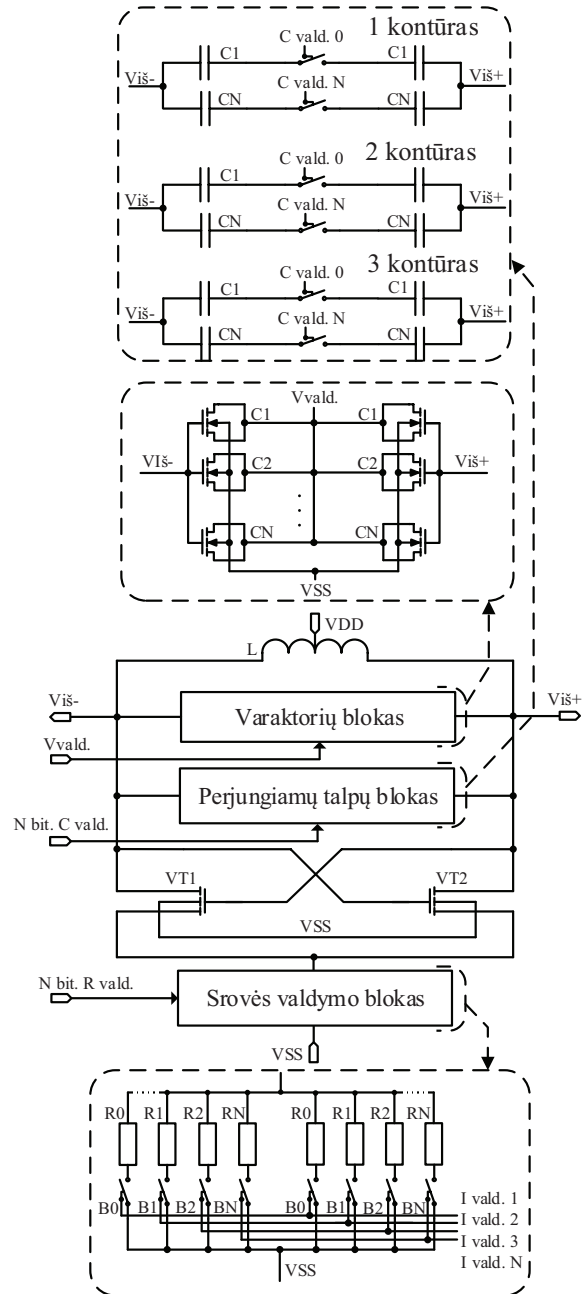
1. Trikontūrio LC-ĮVG struktūra

Suprojektuoto trikontūrio LC-ĮVG principinė elektrinė schema pateikta 1 paveiksle. LC-ĮVG sudarytas iš šių pagrindinių blokų: aukštos kokybės induktyvumo ritės (L), varaktorių ir perjungiamų kondensatorių bloko (šie elementai kartu su L sudaro LC kontūrą), neigiamos pilnutinės varžos tranzistorių (VT1, VT2) ir srovės valdymo bloko. Siekiant padidinti LC-ĮVG išėjimo signalo dažnių derinimo ruožą, papildomai suprojektuoti trys perjungiamų talpų kontūrai (1 kontūras, 2 kontūras, 3 kontūras).

Trikontūris LC-ĮVG suprojektuotas naudojant 65 nm technologinio žingsnio aukštadažnę septynių metalų KMOP integrinių grandynų gamybos technologiją. Projektuoti ir modeliuoti naudotas „Cadence IC“ integrinių grandynų projektavimo ir modeliavimo programinis paketas. Induktyvumo ritė parinkta taip, kad suprojektuotas LC-ĮVG veiktų plačiame dažnių derinimo ruože (2,64 GHz – 6,72 GHz). Norint pasiekti didžiausią induktyvumo ritės kokybę, kontūras suprojektuotas aukščiausiam technologiniame metale naudojant tik vieną kontūro sukį. Derinamame dažnių ruože ritės kokybė kinta nuo 20,15 (kai generuojamas mažiausias LC-ĮVG išėjimo dažnis) iki 31,04 (kai generuojamas didžiausias LC-ĮVG išėjimo dažnis). Suprojektuotos aukštos kokybės ritės induktyvumas – 440 pH. Norint gauti kuo didesnę trikontūrio LC-ĮVG generuojamo išėjimo signalo dažnį, naudojama N tipo neigiamos pilnutinės varžos tranzistorių pora.

LC-ĮVG dažnis keičiamas dviem būdais – galimas apytikslis ir tikslus generuojamo dažnio valdymas. Apytiksliai nustatant dažnį naudojami perjungiamų talpų blokai. Šis blokas gali būti sudarytas iš keleto kondensatorių masių, sujungtų lygiagrečiai. Suprojektuotame trikontūriame LC-ĮVG dažniui praplėsti panaudoti trys atskiri lygiagrečiai sujungti perjungiamų talpų kontūrai.

Priklausomai nuo reikiamos talpos šie masyvai skaitmeniškai įjungiami arba išjungiami. Šis įjungiamų arba išjungiamų talpų masių valdymas gali būti įgyvendintas panaudojus tranzistorius arba kondensatorius.



1 paveikslas. Trikontūrio LC ĮVG principinė elektrinė schema
Figure 1. Schematic of multicore LC-VCO

Tiksliam LC-ĮVG dažnio valdymui naudojamas varaktorių blokas. Šis blokas sudarytas iš varaktorių, kurie, norint padidinti talpą, dažniausiai jungiami lygiagrečiai. Keičiant valdymo įtampą V_{vald} , ĮVG dažnį galima keisti dideliu tikslumu, kuris priklauso nuo išorinės įtampos kintimo žingsnio. Įtampa V_{vald} dažniausiai keičiama nuo 0 V iki ĮVG maitinimo įtampos.

Srovė valdoma siekiant optimizuoti galios sąnaudas, tiksliai generuoti dažnio signalą, kintant aplinkos sąlygoms: temperatūrai, drėgmei ar maitinimo įtampoms. 1 paveiksle pateiktoje LC-ĮVG principinėje elektrinėje schemoje srovė valdoma skaitmeniškai (Mačaitis ir Barzėnas, 2014).

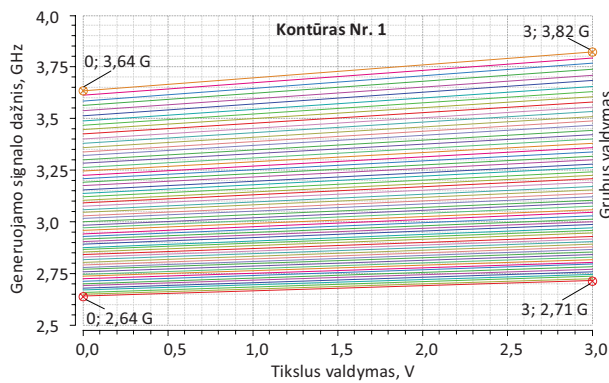
2. Trikontūrio LC-ĮVG skaičiavimo rezultatai

Atliekant kompiuterinį modeliavimą buvo skaičiuojami šie pagrindiniai trikontūrio LC-ĮVG parametrai: generuojamo išėjimo signalo nešlio dažnis (GHz); generuojamo išėjimo signalo nešlio dažnio derinimo ruožas (GHz, %); generuojamo išėjimo signalo amplitudė (V); fazės triukšmas ties tam tikru poslinkio dažniu nuo nešlio dažnio (dBc/Hz); vartojamoji galia (mW); induktyvumo ritės kokybė; generatoriaus paleidimo laikas (ns) ir kokybės funkcija FOMt, (dBc/Hz).

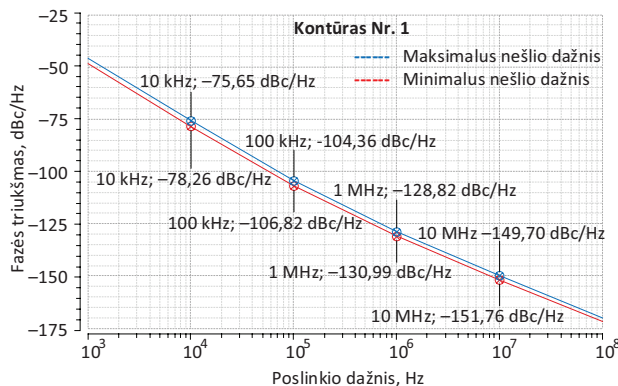
Trikontūrio LC-ĮVG schemas pagrindinių parametru modeliavimas atliktas šiomis sąlygomis: maitinimo įtampa – 1,8 V, temperatūra – 40 °C; modeliavimo ribinės sąlygos yra nominaliosios.

Suprojektuoto LC-ĮVG nešlio dažnio derinimo ruožas, veikiant kontūrai Nr. 1, pateiktas 2 paveiksle. Iš šio paveiklo matyti, kad dažnio derinimo ruožas kinta nuo 2,64 GHz iki 3,82 GHz (dažnių juostos plotis – 1,18 GHz).

Nešlio dažnio derinimo ruožas, kai veikia skirtingi kontūrai, pateiktas 1 lentelėje. Iš lentelės matyti, kad bendras nešlio dažnio derinimo ruožas yra nuo 2,64 GHz iki 6,72 GHz (dažnių juostos plotis – 4,08 GHz).



2 paveikslas. Trikontūrio LC-ĮVG nešlio dažnio derinimo ruožas, veikiant kontūrai Nr. 1
Figure 2. Tuning range of the proposed multicore LC-VCO, when core Nr. 1 is working



3 paveikslas. Trikontūrio LC-ĮVG fazės triukšmas, veikiant kontūrai Nr. 1
Figure 3. Phase noise of the proposed multicore LC-VCO, when core Nr. 1 is working

LC-ĮVG fazės triukšmas, veikiant kontūrai Nr. 1, pateiktas 3 paveiksle. Dažniausiai fazės triukšmo vertė pateikiama ties 1 MHz poslinkio dažniu nuo nešlio dažnio. Ties šiuo poslinkiu fazės triukšmas: –130,1 dBc/Hz, kai nešlio dažnis mažiausias 2,64 GHz, ir –128,8 dBc/Hz, kai nešlio dažnis didžiausias 3,82 GHz.

LC-ĮVG fazės triukšmas, kai veikia skirtingi kontūrai, pateiktas 2 lentelėje. Lentelėje matoma, kad geriausias rezultatas gautas, kai veikia kontūras Nr. 3, esant mažiausiam nešlio dažniui (4,92 GHz) fazės triukšmas –132,1 dBc/Hz ties 1 MHz poslinkio dažniu nuo nešlio dažnio.

LC-ĮVG induktyvumo ritės kokybė Q pateikta 4 paveiksle, kuriame matomas ritės kokybės kitimas visame LC-ĮVG nešlio dažnio derinimo ruože nuo 2,64 GHz iki 6,72 GHz. Didžiausia ritės kokybė (31,04) gaunama esant didžiausiam nešlio dažniui (6,72 GHz).

LC-ĮVG generuojamo išėjimo signalo amplitudė, esant mažiausiam ir didžiausiam dažniui, kinta nuo 1,34 V iki 2,26 V; pradžios laikas – nuo 2,76 ns iki 5,97 ns; vartojamoji galia kinta nuo 20,31 mW iki 25,48 mW.

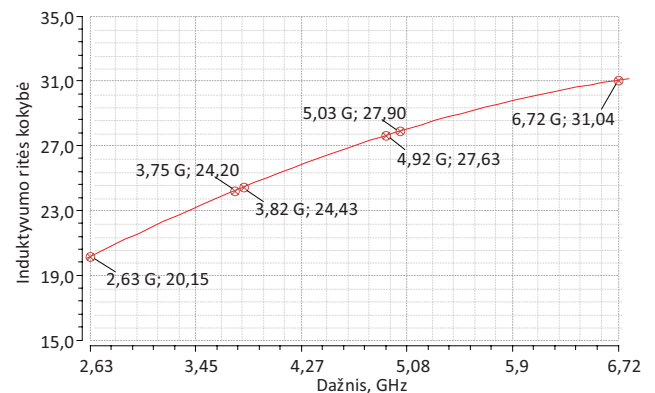
Žinant LC-ĮVG parametrus buvo apskaičiuotas dažnio valdymo ruožas, išreikštas %, lyginant su centriniu dažniu,

1 lentelė. Bendras LC-ĮVG nešlio dažnio derinimo ruožas
Table 1. Joint tuning range of the proposed LC-VCO

Kontūro Nr.	Dažnio ruožas, GHz	Dažnio ruožo plotis, GHz	Bendras dažnio ruožas, GHz
1	2,64–3,82	1,16	2,64–6,72 (4,08)
2	3,75–5,03	1,28	
3	4,92–6,72	1,8	

2 lentelė. Bendras LC-ĮVG fazės triukšmas
Table 2. Joint phase noise of the proposed LC-VCO

Kontūro Nr.	Dažnio ruožas, GHz	Fazės triukšmas, dBc/Hz	Poslinkio dažnis, MHz
1	2,64–3,82	–130,1; –128,8	1
2	3,75–5,03	–131,3; –129,7	1
3	4,92–6,72	–132,1; –130,5	1



4 paveikslas. LC-ĮVG induktyvumo ritės kokybė Q
Figure 4. Inductors quality factor Q of the proposed LC-VCO

ir FOM_T kokybės funkcijos vertė. Kadangi ĮVG turi kelis pagrindinius parametrus jų tarpusavio palyginimas tampa sudėtingas. Norint charakterizuoti ĮVG kokybę, naudojama FOM_T kokybės funkcija (angl. *figure of merit*) (M. Dixit, Shrivastava, P. Dixit, 2015). ĮVG kokybės funkcijos vertė FOM_T apskaičiuojama pagal formulę:

$$FOM_T = FT(dF) - 20 \log \left(\frac{F_0 \cdot \Delta F}{dF \cdot 10} \right) + 10 \log \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right), \quad (1)$$

čia F_0 – ĮVG centrinis dažnis; ΔF – dažnio valdymo ruožas; FT – fazės triukšmas; dF – dažnio poslinkis, kuriam esant nustatomas fazės triukšmas; P – vartojamoji galia. ĮVG kokybės funkcijos vertė FOM_T yra $-209,73$ dBc/Hz.

Kadangi FOM_T kokybės funkcija įvertina ne visus ĮVG parametrus, todėl šiame darbe taip pat pasiūloma išplėstinė kokybės funkcija FOM_{TT} , kuri papildomai įvertina integrinių grandynų technologinį žingsnį hp ir maitinimo įtampą U . Išplėstinė kokybės funkcija FOM_{TT} apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$FOM_{TT} = FT(dF) - 20 \log \left(\frac{F_0 \cdot \Delta F}{dF \cdot 10} \right) + 10 \log \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right) + 10 \log \left(\frac{hp \cdot U}{100 \cdot 1 \text{ nm} \cdot 1 \text{ V}} \right). \quad (2)$$

Siekiant nenutolti nuo pradinės FOM_T kokybės funkcijos verčių, naujiems parametrams įvestas dalybos koeficientas (Mačaitis ir Navickas, 2015). Apskaičiuota FOM_{TT} kokybės funkcijos vertė yra $-209,05$ dBc/Hz.

Išvados

Atlikus trikontūrio LC-ĮVG projektavimą ir modeliavimą galima daryti tokias išvadas:

- Trikontūris LC-VCO sudarytas iš trijų atskirų perjungiamų talpų bloką, kurie su induktyvumo rite ir varaktoriais sudaro tris atskirus LC kontūrus. Naudojant šią struktūrą gaunamas platus dažnio derinimo ruožas.
- LC-ĮVG suprojektuotas naudojant 65 nm technologinio žingsnio aukštadažnį septynių metalų KMOP integrinių grandynų gamybos technologiją.
- Gautas dažnio valdymo ruožo kitimo ribos [2,64; 6,72] GHz.
- Gautas fazės triukšmo kitimo ribos [−128,8; −132,1] dBc/Hz.
- Gautas vartojamosios galios kitimo ribos [20,31; 25,48] mW.
- Gautas pradžios laikas [2,76; 5,97] ns.
- Išėjimo signalo amplitudė [1,34; 2,26] V.
- Induktyvumo ritės kokybė [20,15; 31,04].

- Apskaičiuotas FOM_T rezultatas yra $-209,73$ dBc/Hz, kurią paveikė mažas fazės triukšmas (fazės triukšmo vidurkis yra $-131,1$ dBc/Hz) bei platus dažnio valdymo ruožas (2,64–6,72 GHz). Mažas fazės triukšmas gautas dėl suprojektuotos aukštos kokybės induktyvumo ritės.

Literatūra

- Bajestan, M. M., et al. (2014, June). A 2.75–6.25 GHz low-phase-noise quadrature VCO based on a dual-mode ring resonator in 65nm CMOS. *Proceedings of the Radio Frequency Integrated Circuits Symposium* (pp. 265-268). Tampa, USA.
- Best, R. (2007). *Phase locked loops: design, simulation, and applications* (6th ed.) (490 p.). New York: McGraw-Hill Professional.
- Cornetta, G., Santos, D. J., & Vázquez, J. M. (2012). Design issues for multi-mode multi-standard transceivers. *Wireless radio-frequency standards and system design* (29 p.). Advanced Techniques. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-0083-6.ch010>
- Dixit, M., Shrivastava, S. C., & Dixit, P. (2015, February). A 5–5.47 GHz LC-VCO using varactor configuration in 0.18 um CMOS. *Proceedings of the 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN 2015)* (pp. 87-89). Noida, India.
- Mačaitis, V. ir Barzdėnas, V. (2014). Aukštadažnių, 65 nm KMOP technologijos, LC įtampa valdomų generatorių projektavimas ir tyrimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika*, 6(2), 198-201. Vilnius: Technika.
- Mačaitis, V. ir Navickas, R. (2015, April). CMOS technology based LC VCO review. *Proceedings of the Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2015)* (pp. 1-4). Vilnius, Lithuania.
- Wang, T. P., & Wang, S. Y. (2013, June). A low-voltage low-power low-phase-noise wide-tuning-range 0.18-μm CMOS VCO with high-performance FOM T of -196.3 dBc/Hz. *Proceedings of the IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (MTT 2013)* (pp. 1-4). Seattle, USA.

DESIGN AND SIMULATION OF MULTICORE LC-VCO

V. Mačaitis, R. Navickas

Abstract

This paper reports 2.64–6.72 GHz multicore CMOS LC Voltage Controlled Oscillator (VCO) designed in 65 nm RF CMOS technology. The three cores of switched capacitor array provides wide LC-VCO tuning range. With 1.8 V supply voltage and 40°C temperature, simulation results show that the tuning range is from 2.64 GHz to 6.72 GHz, while average phase noise value across the entire tuning range is (−131.1) dBc/Hz. Power dissipation average is only 22,9 mW. Output signal amplitude varies from 1.34 V to 2.26 V. Startup time varies from 5.97 ns in highest frequency and 2.76 ns in lowest frequency. Figure of merit FOM_T – (−209,73) dBc/Hz, extended figure of merit FOM_{TT} – (−209,05) dBc/Hz. Proposed LC-VCO can be used in modern multi-standard wireless applications.

Keywords: CMOS technology, integrated circuits, LC-VCO, nano electronics.