

Optimizacija integriranih vezij z algoritmom simuliranega ohlajanja

Jernej Olenšek, Janez Puhani, Árpád Búrmen, Iztok Fajfar, Sašo Tomažič in Tadej Tuma
Fakulteta za elektrotehniko
Univerza v Ljubljani
Tržaška 25, 1001 Ljubljana, Slovenia
jernej.olensek@fe.uni-lj.si

Optimization of integrated circuits by means of simulated annealing algorithm

In this paper we examine the feasibility of integrated circuit (IC) optimization with a version of the simulated annealing algorithm. The method was used on three real-world cases of IC design. Comparison with a modified simplex method shows that the used algorithm can produce very good results, especially in more complex cases, where the number of design variables is high and many corner points are considered.

1 Uvod

Algoritmi za numerično optimizacijo so bili v zadnjih letih deležni precejšnje pozornosti. Veliko praktičnih problemov z vseh področij znanosti, tehnike in iz poslovnega sveta je možno namreč izraziti kot problem parametrske optimizacije naslednje oblike:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} f(\mathbf{x}) \\ f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \\ \mathbf{x} \in [\mathbf{L}, \mathbf{U}] \end{aligned} \quad (1)$$

$f(\mathbf{x})$ je tako-imenovana kriterijska funkcija (KF), \mathbf{x} je n -dimenzionalni vektor optimizacijskih parametrov, \mathbf{L} in \mathbf{U} pa sta n -dimenzionalna vektorja spodnjih in zgornjih meja, ki določajo dopustne vrednosti optimizacijskih parametrov. Žal je problem (1) v praksi le redko analitično rešljiv. KF je običajno zelo nelinearna, pogosto pa njena oblika sploh ni znana (na primer kadar je KF rezultat numerične simulacije ali meritev). Zaradi teh razlogov se vedno več raziskovalcev z vseh področij posveča razvoju učinkovitih algoritmov za reševanje problema (1). Obstaja že cela množica zelo učinkovitih algoritmov, vendar pa so običajno le-ti zelo specifični in so posebej prirejeni za reševanje problemov točno določene vrste, pri drugih problemih pa je njihova uspešnost precej omejena.

Optimizacijske metode lahko razdelimo glede na

več kriterijev. Prva delitev je lahko delitev na deterministične in stohastične metode. Prve ob enakih začetnih pogojih vedno najdejo isto rešitev, medtem ko vključujejo druge nek naključen proces. Po drugi delitvi lahko metode razdelimo na gradientne in direktne. Gradientne metode izkoriščajo odvode KF za hitro konvergenco, vendar pa je njihova uporabnost omejena, saj je računanje odvodov računsko zahtevna naloga, poleg tega pa mora biti KF zvezna. V primerih, ko je KF rezultat simulacij ali meritev, je v njej vedno prisoten šum in gradientne metode v teh primerih odpovejo. Takrat pridejo v poštev sicer počasnejše direktne metode, ki uporabljajo le vrednosti KF in torej lahko obvladajo tudi nezveznosti. Tretja delitev pa loči metode na lokalne in globalne. Lokalne metode so metode sestopa in težijo k čim hitrejši konvergenci v lokalni minimum, ki ga nato ne morejo več zapustiti. Globalne metode na drugi strani dopuščajo tudi naraščanje KF in se torej lahko izognejo lokalnim minimumom in nadaljujejo iskanje v drugih področjih parametrskega prostora. Vendar pa to običajno pomeni občutno povečanje števila potrebnih izračunov KF, zato so praktični algoritmi pogosto nek kompromis med lokalnim in globalnim iskanjem.

2 Ortogonalno Simulirano Ohlajanje - OSA

Osnovna metoda simuliranega ohlajanja (SA - Simulated Annealing) [1] sodi med direktne stohastične globalne optimizacijske metode. Zaradi preprostosti in relativne uspešnosti je algoritem zelo priljubljen in pogost na mnogih raziskovalnih področjih. Bistvo metode je naključno izbiranje točk v prostoru, pri čemer se vedno zgodijo prehodi v točke z nižjo KF, poleg tega pa z določeno verjetnostjo dopuščamo tudi prehode v točke z višjo KF. Verjetnost prehoda iz točke x v točko y uravnava parameter T (temperatura) po enačbi (2), ki je znana kot Metropolis-ov kriterij:

$$P = \exp(-(f_y - f_x)/T) \quad (2)$$

kjer označuje f_y vrednost KF v točki y . Na začetku iskanja dobi T visoko vrednost, kar omogoča globalno iskanje po celem prostoru. Nato se T med procesom ohlajanja počasi zmanjšuje, s čimer postane verjetnost povečanja KF zelo majhna in algoritem dejansko teče kot metoda sestopa. Osnovni koraki algoritma SA so naslednji:

Inicializacija
 Ponovi dokler ni izpolnjen ustavitveni kriterij
 Ponovi dokler ni konec temperaturne stopnje
 Izbira nove točke
 Prehod v novo točko (Metropolis kriterij)
 Konec zanke
 Ohlajanje
 Konec zanke

Za algoritem v takšni obliki se teoretično da dokazati konvergenca h globalnemu minimumu [2], vendar zahtevajo takšni algoritmi izredno počasno ohlajanje in neučinkovite mehanizme generiranja novih točk, kar pomeni zelo počasno konvergenco. Zato se v literaturi pojavljajo vedno nove različice osnovnega algoritma, ki sicer pogosto žrtvujejo teoretično konvergenco, vendar pa so sposobne v doglednem času najti relativno dobre rešitve. Ortogonalno simulirano ohlajanje (OSA) [3] je ena od takšnih različic, ki v vsakem koraku s pomočjo majhnega števila ortogonalnih eksperimentov izbere potencialno dobro točko za naslednjo iteracijo. S tem se poveča verjetnost izbire dobrih točk in posledično lahko ohlajanje poteka hitreje. Algoritem se ustavi, ko doseže T končno vrednost, v našem primeru 10^{-6}

3 Optimizacija integriranih vezij (IV)

Pri realnih problemih optimizacije integriranih vezij se pojavljajo številne težave. Prva je zagotovo sama definicija KF. Naročnik vezja postavi načrtovalcu vezja vrsto zahtev, ki jih mora vezje izpolnjevati. Teh je lahko zelo veliko, med sabo si pogosto nasprotujejo, vse zahteve niso enako pomembne, poleg tega pa naročnik običajno želi, da so izpolnjene ne samo v nominalnih pogojih delovanja ampak tudi v primerih, ko se okoljski parametri spreminjajo. Načrtovalec mora na osnovi znanja in izkušenj izbrati ustrezno topologijo vezja. Problem, ki se nato pojavi, pa je izbira optimalnih vrednosti parametrov elementov, saj je to zelo dolgotrajen in zahteven postopek. Če želimo dano topologijo čim bolj izkoristiti, je potrebno uporabiti učinkovit optimizacijski algoritem, ki bo zmožgal samodejno poiskati optimalne vrednosti elementov glede na izbrano merilo kakovosti vezja, to je KF. V našem primeru združimo načrtovalske zahteve kot

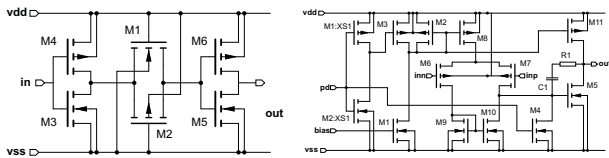
so ojačenje, frekvenčna meja itd. v eno samo realno vrednost [4], pogoje delovanja, kot so temperatura, nihanje procesnih parametrov itd. pa obravnavamo s pomočjo optimizacije preko več ogliščnih točk. Oboje nato združimo v vrednost KF v dani točki parametrskega prostora.

Naslednja težava optimizacije IV pa je nelinearnost in kompleksnost KF. Njeno analitično obliko je možno določiti le za zelo preproste probleme z malo parametri. V praksi je edini način za določitev vrednosti KF v določeni točki parametrskega prostora numerična simulacija vezja. Ta je običajno dolgotrajna in ker je za končno rešitev potrebnih veliko iteracij algoritma, pomeni to optimizacijske teke, ki lahko trajajo tudi več dni. Simulacija vnaša v KF tudi šum, kar onemogoča uporabo hitrih gradientnih metod. Kompleksnost KF pa prinaša še eno težavo. Ker njene oblike ne poznamo, tudi ne moremo določiti, ali je najdena rešitev res najboljša možna. Hitre metode sestopa sicer lahko najdejo lokalni minimum KF relativno hitro, vendar pa to ne pomeni, da v danem optimizacijskem prostoru ne obstaja še kakšen lokalni minimum, kjer je KF še nižja. Potrebna je torej metoda, ki bi bila sposobna izmed več lokalnih minimumov poiskati najboljšega. V ta namen že obstaja več metod in OSA je ena med njimi. Zaradi spremenjenega mehanizma generiranja točk in hitrejšega ohlajanja sicer ne zagotavlja več globalne konvergenca, vendar pa rezultati na raznih primerih kažejo, da je kljub temu še vedno relativno uspešna.

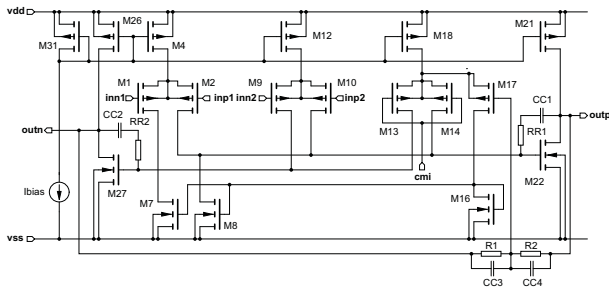
V tem prispevku želimo ugotoviti primernost metode OSA za optimizacijo integriranih vezij. Za referenco so služili rezultati, dobljeni z nadgrajeno Boxovo metodo COMPLEX (CONstrained siMPLEX). Osnovna Box-ova metoda [5] je deterministični lokalni direktni optimizacijski postopek, ki v praksi izkazuje relativno dobre konvergenčne lastnosti. V simulacijskem in optimizacijskem orodju SPICE OPUS [6] je že implementirana nadgrajena različica te metode, ki uporablja pametno izbiranje začetnih točk in princip večkratnih zagonov [7]. Tako dobi sicer lokalna metoda lastnosti globalnih metod. OSA pa je v tem kontekstu nova metoda in je bila implementirana v jeziku C in integrirana v SPICE OPUS.

Obe metodi smo preizkusili na treh realnih primerih načrtovanja IV. Topologije vseh treh primerov so prikazane na slikah 1 in 2. Prvo vezje predstavlja relativno preprost zakasnilni element. Za to vezje ne izvajamo optimizacije preko večih ogliščnih točk in tudi število načrtovalskih zahtev je relativno majhno. Drugo vezje je primer operacijskega ojačevalnika, pri katerem že upoštevamo ogliščne točke in večje število načrtovalskih zahtev. Tretji primer je vezje precej kompleksnega ojačevalnika z največjim številom zahtev, ogliščnih točk in optimizacijskih parametrov.

V vseh treh primerih so bili optimizacijski parametri dolžine in širine kanalov tranzistorjev ter njihovi



Slika 1: Testni vezji 1 in 2
Figure 1: Test cases 1 and 2



Slika 2: Testno vezje 3
Figure 2: Test case 3

multiplikativni faktorji, ter kapacitivnosti in upornosti. Tabela 1 prikazuje glavne lastnosti vseh treh optimizacijskih primerov.

Upešnost optimizacijskih algoritmov ocenjujemo glede na vrednost KF v končni rešitvi in predvsem glede na število potrebnih izračunov KF. Ker lahko vsak optimizacijski tek traja tudi več dni, smo vsak primer optimizirali le enkrat. Rezultati so zbrani v tabeli 2. Tabela vsebuje število izračunov KF (FE) in vrednosti KF, poleg tega pa tudi končno število izračunov KF, ko je bila optimizacija dejansko prekinjena. Za nadgrajeno metodo COMPLEX je podana tudi zaporedna številka zagona, v katerem je bila najdena najboljša rešitev.

V prvem primeru, ki ima najmanj optimizacijskih parametrov, ne upošteva ogliščnih točk in ima relativno malo zahtev, je bila nadgrajena metoda COM-

Primer	število optimizacijskih parametrov	število načrtovalskih zahtev	število ogliščnih točk
1	12	7	1
2	15	14	14
3	17	32	17

Tabela 1: Povzetek optimizacijskih problemov: število optimizacijskih parametrov, število načrtovalskih zahtev in število ogliščnih točk.

Table 1: Summary of considered optimization cases: number of optimization parameters, number of design goals and number of corner points.

Primer		nadgrajena metoda COMPLEX	OSA
1	FE do $KF < 100 \cdot 10^3$	253 (1)	1011
	FE do $KF < 20 \cdot 10^3$	660 (1)	12758
	minimalna KF	$6.39 \cdot 10^3$	$11.3 \cdot 10^3$
	FE do minimalne KF končna FE	21409 (28) > 100000	14703 16122
2	FE do $KF < 50$	124 (1)	58
	FE do $KF < 10$	2483 (2)	33595
	minimalna KF	8.07	7.37
	FE do minimalne KF končna FE	96912 (69) > 100000	47605 47768
3	FE do $KF < 10$	3672 (3)	32014
	FE do $KF < 1$	26688 (21)	34248
	minimalna KF	0.282	0.088
	FE do minimalne KF končna FE	41131 (32) > 45000	43877 44164

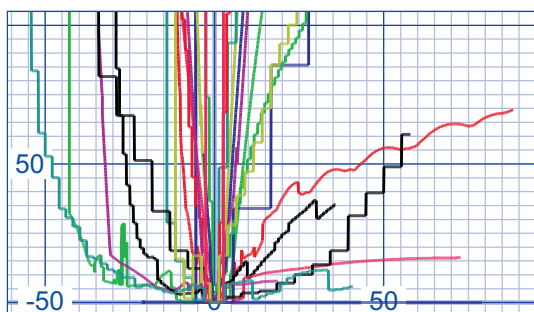
Tabela 2: Rezultati optimizacije: FE - število izračunov vrednosti KF. Za nadgrajeno metodo COMPLEX so v oklepajih podane tudi zaporedne številke zagonov, v katerih je bila najdena najboljša rešitev.

Table 2: Optimization results: FE - number of cost-function evaluations and cost-fuction values (KF). For modified COMPLEX method the number of the run in which the best solution was found is also given in brackets.

PLEX precej uspešnejša od OSA. Čeprav je metoda OSA porabila več izračunov KF, je končna rešitev še vedno slabša. Je pa nadgrajena metoda COMPLEX potrebovala 28 zagonov, da je našla takšno rešitev. V drugem primeru, ki je že bolj kompleksen, saj upošteva tudi ogliščne točke in več zahtev, pa se že kaže prednost metode OSA. Nadgrajena metoda COMPLEX potrebuje veliko število ponovnih zagonov in posledično tudi veliko število izračunov KF, medtem ko uspe OSA v enem samem zagonu s precej manj izračuni KF najti boljšo rešitev. V tretjem primeru, ki ima največ optimizacijskih parametrov, ogliščnih točk in zahtev, je bila metoda OSA zopet uspešnejša, tokrat s primerljivim številom izračunov KF. Ti rezultati kažejo, da lahko nadgrajena metoda COMPLEX precej hitro najde lokalni minimum, vendar pa potrebuje veliko število ponovnih zagonov, da najde dober lokalni minimum. Metoda OSA pa je sposobna prezreti področja z nekaterimi lokalnimi minimumi slabše kakovosti in v enem samem zagonu najti dobro rešitev. Slika 3 na primer prikazuje prerez KF po vseh optimizacijskih parametrih v točki, ki jo je našel algoritem OSA za tretji obravnavan primer. Slika dobro prikazuje težave, ki nastopajo pri optimizaciji IV. KF je nelinearna in vsebuje več lokalnih minimumov. Prav tako je razvidno, da zaradi optimizacije multiplikativnih faktorjev tranzistorjev KF ni gladka. Obe lastnosti predstavljajo velike težave za gradientne metode. Vendar pa je uspela metoda

OSA precej dobro opravi z vsemi težavami. Končna rešitev v resnici ni globalni minimum, saj lahko iz profila KF ugotovimo, da je možno KF še nekoliko znižati z majhnimi spremembami nekaterih parametrov. Ker algoritem ne izpolnjuje konvergenčnih pogojev osnovnega algoritma SA, to ni nepričakovano. Vendar pa konvergenčna teorija tudi zahteva, da algoritem teče neskončno dolgo, kar v praksi ni izvedljivo. Glede na porabljeno število izračunov KF je končna rešitev metode OSA še vedno precej dober približek globalnega minimuma. Sposobnost globalnega iskanja metode OSA je bolj očitna v kompleksnih primerih z več parametri, ogliščnimi točkami in načrtovalskimi zahtevami.

vrednost KF



normirana vrednost parametrov [%]

Slika 3: Prerez KF po vseh optimizacijskih parametrih v končni točki optimizacije z metodo OSA za tretji optimizacijski problem.

Figure 3: Cost-function profile for every optimization parameter through the final solution found by OSA for case number 3.

4 Zaključek

V tem prispevku smo preizkusili uporabnost metode OSA pri optimizaciji integriranih vezij. Metodo smo preizkusili na treh realnih primerih načrtovanja IV. Za referenco so služili rezultati, dobljeni z nadgrajeno metodo COMPLEX, ki uporablja princip ponovnih zagonov in pametno izbiranje začetnih točk. Rezultati optimizacije kažejo, da je nadgrajena metoda COMPLEX uspešnejša, kadar gre za enostavnejše probleme majhnih dimenzij in kadar želimo hitro najti vsaj lokalni minimum KF. V primerih, ko upoštevamo še ogliščne točke, večje število zahtev in optimizacijskih parametrov ter nas bolj zanimajo globalno dobre rešitve, pa pride do izraza večja sposobnost globalnega iskanja metode OSA. Algoritem sicer ne zagotavlja konvergence h globalnemu minimumu, kljub temu pa prikazani primeri kažejo, da je pri optimizaciji IV metoda OSA v primerjavi z nadgrajeno

metodo COMPLEX sposobna najti boljše rešitve v krajšem času, še posebej, ko gre za bolj kompleksne probleme večjih dimenzij.

5 Zahvala

Raziskave je sofinancirala Agencija za raziskovalno dejavnost v okviru programa P2-0246 - Algoritmi in optimizacijski postopki v telekomunikacijah.

6 Literatura

Literatura

- [1] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, vol.220, pp. 1277-1292,1983.
- [2] R.L. Yang Convergence of simulated annealing algorithm for continuous global optimization. *Journal of optimization theory and applications*, vol.104, No.3, pp. 691-716, 2000.
- [3] Li-Sun Shu, Shinn-Ying Ho. A Novel Orthogonal Simulated Annealing Algorithm for Optimization of Electromagnetic Problems. *IEEE transactions on magnetics*, vol.40, No.4, pp. 1790-1795, July 2004.
- [4] Bürmen A, Strle D, Bratkovič F, Puhan J, Fajfar I, Tuma T. Automated robust design and optimization of integrated circuits by means of penalty functions. *AEU- International journal of electronics and communications*, vol.57 (1): pp. 47-56 2003
- [5] M.J. Box. A new method of constrained optimization and a comparison with other methods. *Computer Journal*, vol.8, pp. 42-52, 1965.
- [6] SPICE OPUS circuit simulator homepage:
URL: <http://www.fe.uni-lj.si/spice/>
Faculty of Electrical Engineering, Electronic Design Automation Laboratory:
URL: <http://www.fe.uni-lj.si/edalab/> .
- [7] Puhan J, Bürmen A, Tuma T. Analogue integrated circuit sizing with several optimization runs using heuristics for setting initial points. *Canadian journal of electrical and computer engineering*, vol.28 (3-4): pp. 105-111 JUL-OCT 2003