XII. FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 2007. március 16–17.

NAGYFREKVENCIÁS OSZCILLÁTOR TERVEZÉSE ÉS OPTIMALIZÁLÁSA MINIMÁLIS FÁZISZAJRA

Hodány Ákos

Abstract

High frequency oscillators are main parts of RF data transceivers. The phase noise is one of the key parameters of microwave oscillators. The phase noise influences the signal-to-noise ratio of the received and down-converted signal, so it has an effect on the quality and performance of the RF data path. Integrated high frequency oscillators are usually implemented by LC tank based circuits. There is a direct connection between the quality factor of the applied LC tank and the phase noise of the output signal of the circuit. The optimization of the phase noise can be traced back to that of the quality factor of the LC tank. The design and accurate sizing of monolith inductors raise several problems in practice. The evaluation of the inductance, stray capacitances and other parasitic components by analytical procedures is hard to do. It is more practical to evaluate these by numerical procedures in a proper simulation environment that can make optimization of circuit parameters.

Összefoglalás

A rádiófrekvenciás adatátviteli rendszerekben használatos integrált áramkörök egyik fő elemét képezik a nagyfrekvenciás oszcillátorok. A mikrohullámú RF tartományban működő integrált oszcillátorok fontos minőségi jellemzője a fáziszaj. Ez alapvetően befolyásolja az adatátviteli rendszer vevőoldalán jelentkező jel/zaj viszonyt, és ezáltal a rádiókapcsolat minőségét, megbízhatóságát is. Az integrált nagyfrekvenciás oszcillátorok megvalósítása elsősorban LC rezgőkörös áramkörökkel lehetséges, s az alkalmazott rezgőkör jósági tényezője közvetlen kapcsolatban van az oszcillátor fáziszajával. A fáziszajra való optimalizáció visszavezethető a rezgőkör jósági tényezőre való optimalizációjára. Az integrált áramkörön belül megvalósított monolit rezgőköri induktivitások tervezése és pontos méretezése azonban sok megoldandó problémát felvet. A monolit tekercs induktivitásának – és parazitáinak – értékét analitikus úton nehézkes meghatározni, ezért a rezgőkör optimalizálását nem célszerű ezen az úton végezni. Numerikus közelítő módszerekkel, megfelelő szimulációs környezetben az optimalizáció könnyen elvégezhető.

1. Az LC rezgőkör mint zajformáló szűrő

A nagyfrekvenciás oszcillátorok fontos minőségi jellemzője a fáziszaj. Az oszcillátorok zajának három fő összetevője van: a termikus zaj, a flicker zaj és a sörétzaj [1]. A zajkomponensek az erősítő áramkörök nemlinearitása miatt átkonvertálódnak a rezonanciafrekvencia alap- és felharmonikusai köré. Ezeken a komponenseken a rezonáns elemek szűrő hatást fejtenek ki [2, 3]. A szűrés vizsgálatára tekintsük az 1. ábrát.

1. ábra. A rezgőkör szűrőhatása a zajon

A $H(j\omega)$ átviteli karakterisztikájú szűrő az oszcillátort felépítő rezgőkör-erősítő lánc nyílthurkú átviteli karakterisztikájának lineáris közelítését reprezentálja. $X(j\omega)$ az oszcillátorban keletkező zaj, míg $Y(j\omega)$ a kimeneten jelentkező, szűrt zaj spektruma. Az oszcilláció feltételeként a rezonanciafrekvencián: $H(j\omega_0)=1$. Adott $(\omega_0+\Delta\omega)$ körfrekvencián a szűrő teljesítmény-átvitele (és így az oszcillátor fáziszajának teljesítménye) a rezgőkör jósági tényezőjének (Q -nak) négyzetével fordítottan arányos [3], vagyis a rezgőkör jósági tényezőjét növelve a fáziszaj csökken:

$$\left| \frac{Y}{X}(j(\omega_0 + \Delta\omega)) \right|^2 = \frac{1}{4Q^2} \left(\frac{\omega_0}{\Delta\omega} \right)^2 \quad (1)$$

Ez azt jelenti, hogy a fáziszajra való optimalizálást a rezgőkör jósági tényezőjének optimalizálására vezethetjük vissza. A nagyfrekvenciás integrált LC rezgőkörök jósági tényezőjét elsősorban az alkalmazott monolit tekercs jósági tényezője határozza meg, mert az integrált kondenzátorok vesztesége általában elhanyagolható. Alapesetben az optimalizálást tehát elegendő a rezgőköri tekercsre elvégezni.

2. Az integrált induktivitás szimulációja

Az integrált induktivitás felépítését és a parazita komponensek értelmezését szemlélteti a 2. ábra.

Az ábrán használt jelölések:

- L : a tekercs öninduktivitása;
- R_l : a tekercs soros veszteségi ellenállása;
- R_s : a szubsztrát-ellenállás;
- C_s : a vezeték szubsztrát-kapacitása;
- C_l : a tekercs menetkapacitása;
- w : a vezeték szélessége;
- a : a négyzet alakú tekercs oldalhossza;
- d : a menetek közti távolság;
- „A”, „B”, „C”: a tekercs kivezetései.

2. ábra. Az integrált induktivitás felépítése és parazitái

A monolit induktivitással kialakított LC rezgőkör helyettesítő képét mutatja a 3. ábra. A további cél egy olyan numerikus modell kifejlesztése volt, amely adott geometriai paraméterek alapján meghatározza a tekercs parazitáinak értékét, és amely segítségével optimalizálni tudunk a maximális jósági tényezőre. A paraziták értékét meghatározó függvényeket intuitív módszerrel, általános elméleti összefüggések kisebb módosításaival határoztam meg.

3. ábra. Az LC rezgőkör helyettesítő kapcsolása

Az összefüggések pontosítása érdekében néhány, különböző geometriájú induktivitás parazitáinak pontos értékét az ASITIC nevű végelem-szimulátor segítségével határoztam meg. Az elméleti összefüggéseket görbeillesztéssel ezen szimulált értékekhez igazítottam úgy, hogy a származtatott paraméterek szórása a gyakorlati szempontból fontos $a=250\ldots350\mu\text{m}$ mérettartományban kedvező legyen.

3. Optimalizálás

A módosított összefüggésekből kiindulva, a rezgőkör jósági tényezőjét szimulálhatjuk az induktivitás geometriai jellemzői alapján. A vezeték w szélességét és a tekercs a oldalhosszát változtatva, majd minden egyes pontra a rezgőkört a C kapacitás segítségével a kívánt rezonancia frekvenciára hangolva megkapjuk a Q jósági tényező $Q(a,w)$ függvényét (4. ábra). Az optimalizálás során ennek a függvénynek keressünk a maximumát a és w szerint. Az eljárást APLAC szimulációs környezetben végeztem el, melynek eredményeképpen a monolit induktivitás paraméterei $a=314\mu\text{m}$; $w=26\mu\text{m}$ lettek.

4. ábra. A monolit induktivitás $Q(a,w)$ függvénye

4. A nagyfrekvenciás oszcillátor

Az optimalizált induktivitással felépített oszcillátor kapcsolási rajza látható az 5. ábrán. Az „LC kör” nevű blokk a 3. ábrán bemutatott rezgőkört tartalmazza. Az áramkör két N-csatornás mosfetet tartalmaz, differenciális üzemben működik, és szimmetrikus kimenettel rendelkezik. A tranzisztorokból felépített, keresztbe csatolt erősítő a rezgőkör veszteségeit hivatott kompenzálni. Az $U1$ és $U2$ csomópontok között keletkező kimeneti jel amplitúdóját az I_0 árammal állíthatjuk be. A tranzisztorok paraméterei: $wf=60\mu\text{m}$; $lf=0,36\mu\text{m}$.

5. ábra. Az oszcillátor kapcsolási rajza

5. Eredmények

A 6. ábra a négy különböző jósági tényezőjű LC rezgőkörre elvégzett fáziszaj szimuláció eredményét mutatja. A grafikonon szereplő legfelső görbe a $Q=6,5$ paraméterhez tartozik, míg a többi görbe rendre a $Q=9,2$; 13 ; $18,4$ értékekhez. A feltüntetett frekvenciaskála az alapharmonikustól számított frekvencia offszetet (Δf -et) jelöli. A legalacsonyabb fáziszajt az optimalizáció eredményeként kapott induktivitással ($Q=18,4$) sikerült elérni, tehát az optimalizáció sikeres volt. Az eljárás helyességét igazolja, hogy a tekercs méreteit bármilyen irányban megváltoztatva a jósági tényező, és ezzel együtt a fáziszaj is romlik.

6. ábra. A szimulált fáziszaj

Irodalom

- [1] W. P. Robins: Phase Noise in Signal Sources, Peter Peregrinus Ltd., Stevenage, 1998., 47-55. old
- [2] Behzad Razavi: RF Microelectronics, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1998., 220-222.old.
- [3] Cadence: Affirma RF Simulator Theory, Cadence Design Systems Inc., San Jose, 2000., 45-47.old.

Hodány Ákos, villamosmérnök hallgató

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar,
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

Cím: H-2083. Solymár, Ifjúság u. 4.

Telefon: +36-20-452-22-00

E-mail: ha493@hszk.bme.hu