

毫米波接收機之混頻器與振盪器設計

CMOS mixer and oscillator design for millimeter wave receiver

組別：A60 組員姓名：連紹歲、呂俊璋

指導教授：劉怡君 教授

摘要

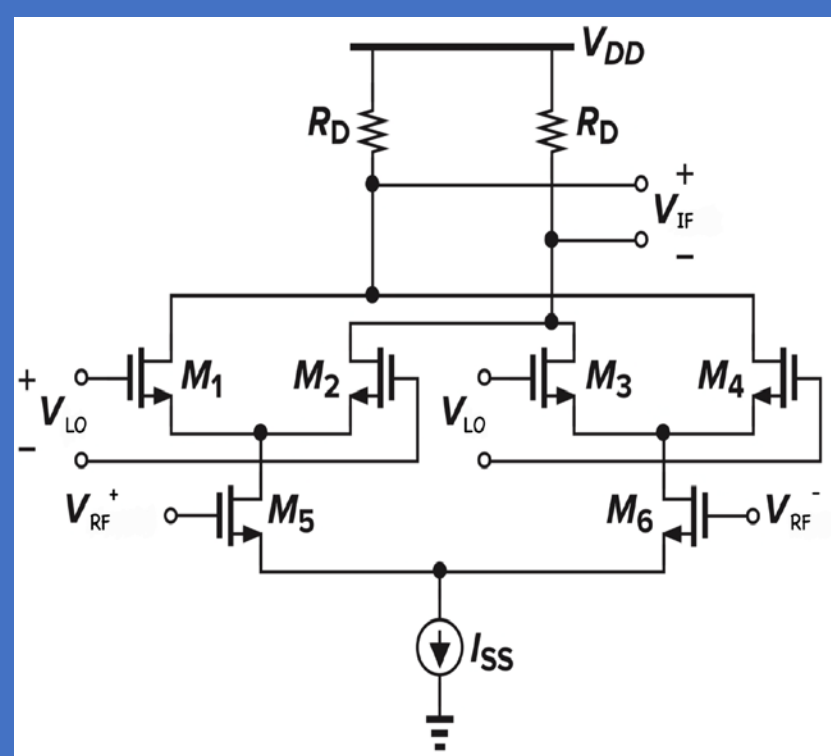
隨著無線通訊的蓬勃發展與5G的興起，對於無線收發機的要求也越來越高。有別於傳統的低頻電路，射頻(RF)前端電路有著非常複雜的效應。在此專題中，我們設計了以TSMC .18um CMOS製程，實現頻率為28 GHz之接收機中最重要的兩個電路——混頻器(Mixer)與振盪器(Oscillator)。

在混頻器的部分，由於訊號從天線到基頻電路間僅經過少數的射頻電路，因此足夠大的轉換增益(Conversion gain)、好的雜訊指數(Noise figure)與高線性度(Linearity)為設計混頻器主要的考量。在此專題中，基於雙平衡主動式混頻器(Double-balanced active mixer)，又稱吉爾伯特單元混頻器(Gilbert cell mixer)，輔以交叉耦合的結構(Cross-coupling structure)，以提升線性度為目標來進行設計。

振盪器的部分，為求電路架構簡單及高可靠度，以最基本的交叉耦合振盪器(Cross-Coupled Oscillator)及差動振盪器(Differential Oscillator)為雛型，分別又衍生出加上尾電流(tail current)的電路，以及加上Abidi提出的濾波電路(filtering circuit)的架構，分別比較不同架構之間的優劣勢，著重在相位雜訊(Phase Noise)、輸出振幅(output swing)、輸出品質因素(Figure of Merit, FOM)的分析，找到設計簡單且高性價比的振盪器為目的。

內文

為了將不同頻率的訊號做有效的隔離，利用差動訊號的特性，衍生出了「平衡」的觀念。如今主要混頻器的核心架構為吉爾伯特單元(Gilbert cell)，為雙平衡主動混頻器。在以線性度為主要考量下，採用折疊式疊接的架構以降低 V_{dd} ，而在轉導級部分的交叉耦合架構則提升了整體電路的線性度，電感除了不消耗功率，在28 GHz時仍保有足夠的阻抗，最後轉阻級由於頻率已降到基頻，因此採用面積較小的電阻來達成，並產生足夠的增益。



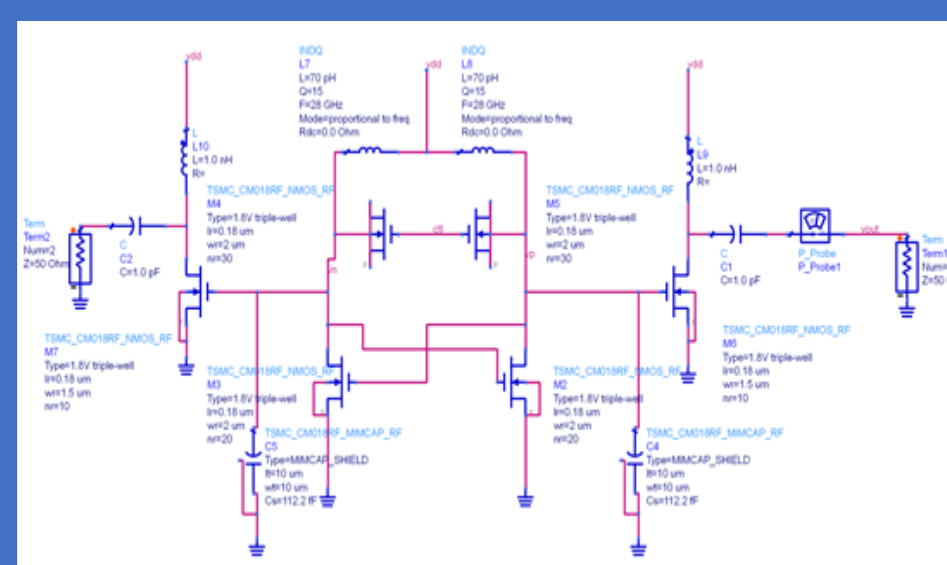
吉爾伯特單元

振盪器在接收機的功能為提供一個穩定的振盪頻率以供混頻器使用。先探討尾電流在振盪器中的角色，在交叉MOS同樣的尺寸下，尾電流的存在引進額外的相位雜訊，尤以閃爍雜訊(Flicker Noise)所造成的近端相位雜訊特別嚴重，此外，輸出振幅下降，另需要額外提供的定電壓的電路，增加電路複雜度。另一方面，尾電流的存在可以控制操作電流，降低功耗，抑制從power supply來的雜訊，此外，減少交叉MOS進入線性區(linear region)時間，而最終設計電路時，是否使用尾電流取決於電路規格要求。

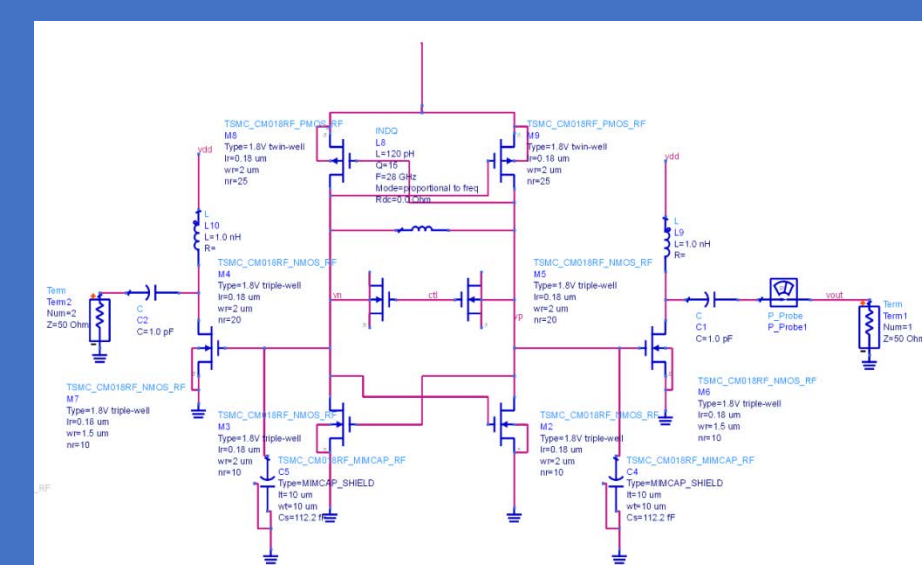
$$L(\Delta\omega) = 10\log\left\{\frac{2FkT}{P_{sig}} \left[1 + \left(\frac{\omega_0}{2Q\Delta\omega}\right)^2\right] \left(1 + \frac{\Delta\omega_{1/f^3}}{|\Delta\omega|}\right)\right\}. \quad (1)$$

根據計算相位雜訊的Lesson's equation(1)，若是能夠提升電路Q值，或是避免Q值下降，那麼便能提升振盪器相位雜訊的表現，基於這樣的想法，Abidi提出的濾波技巧(filtering technique)能夠有效降低相位雜訊，是利用額外的電感及電容形成濾波電路，將電容並聯在尾電流的旁邊，並在尾電流及交叉MOS之間加入電感，一方面使交叉MOS在振盪時在Source端看見等效高阻抗，避免振盪器Q值下降；另一方面，利用電容將高頻雜訊濾掉，使相位雜訊下降。

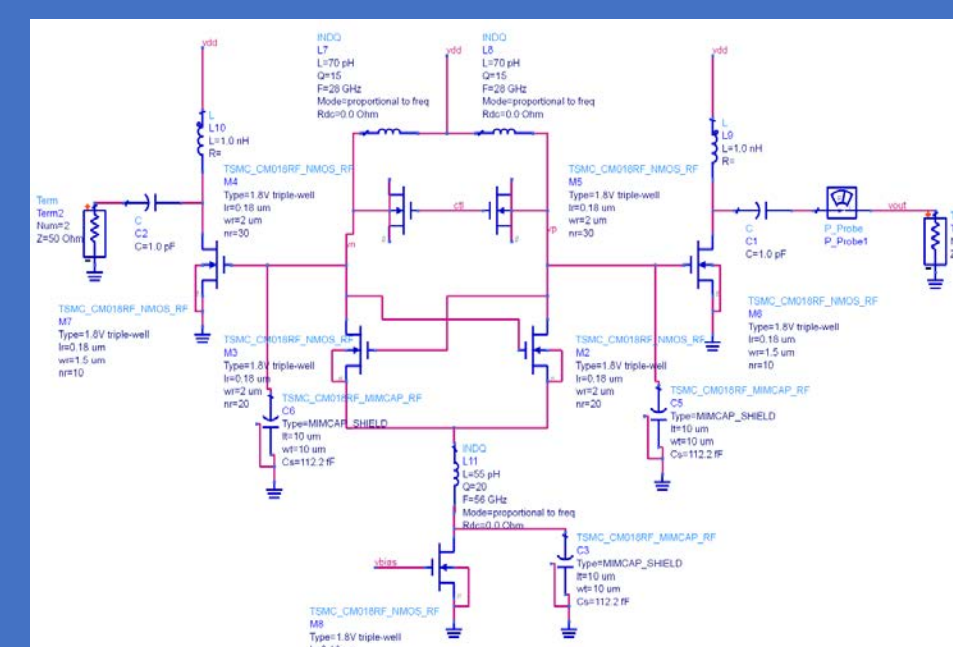
利用交叉耦合振盪器及差動振盪器作為主架構，分別對加入尾電流及濾波電路的衍生電路進行模擬，同時將buffer電路納入考量，一併進行模擬分析。



Cross-Coupled Oscillator



Differential Oscillator



Filtered Cross-Coupled Oscillator with tail current

結論

由於混頻器在進行初步的模擬時，首先觀察轉換增益。但是由於模擬結果的轉換增益非常的低，因此推論出那裡可能出了問題。截止目前為止，由於轉換增益低，因此尚未觀察其他該注意的部分，如線性度(Linearity)、雜訊指數(Noise figure, NF)與隔離度(Isolation)等等。

雖然有許多參考文獻的轉換增益分貝值低於零，但是由於本專題所參考的文獻中做出來的轉換增益有15.8 dB，因此在以此架構為目標的情形下，將繼續探討導致轉換增益低落的原因。當未來解決轉換增益低落的問題後，將開始從線性度著手，觀察電路的第三截斷點(IP3)與1dB增益壓縮點(P1 dB)，檢視在28 GHz與該文獻中2.4 GHz線性度的差異，觀察雜訊指數(Noise figure, NF)與隔離度。

振盪器部分，濾波技巧在Cross-Coupled Oscillator架構中效果較明顯，尤其在Cross-Coupled Oscillator with tail current中，加上濾波電路可以降低近端相位雜訊將近5~6dB，雖然比起基本的Cross-Coupled Oscillator多加上一個尾電流電路，但相位雜訊的表現卻可以與之相當，甚至更佳。

在Differential Oscillator family中，加上濾波電路的濾波效果不明顯，因此似乎沒必要為了微小的效果而特地設計電感，增加電路複雜度，再者，若加上尾電流，兩者消耗的電流差不多，但輸出振幅下降，而且額外引進雜訊，近端相位雜訊表現變差，而且佈局圖面積較大，顯然設計最簡單而且性價比最好的Differential Oscillator架構應為首選。

最後依照要求的電路規格選擇適當的振盪器結構，若是重點考慮輸出振幅大的電路，則應選擇Cross-Coupled Oscillator with tail current架構；若是考慮低電流、低功耗的電路，而輸出振幅沒有特別要求的門檻，並且在意近端相位雜訊的表現的話，則應選擇Differential Oscillator。