

頻率調變連續波雷達(FMCW)之設計 應用於汽車主動安全系統

作者: John Zhao Product Manager, Marco Roggero Application Engineer, Giorgia Zucchelli
Technical Marketing, MathWorks Inc.

摘要

汽車製造商、汽車電子供應商以及全球各大學，正在致力於為先進汽車駕駛輔助系統 (ADAS) 開發新的電子系統。頻率調變連續波雷達 (FMCW radar, Frequency modulated continuous waveform radar) 正適合汽車主動安全系統的需求，因為它們體積小、近程測量準確度高、對雜波靈敏度低，以及易於整合的特性，因此 FMCW 雷達已經被廣泛應用在汽車行業中先進汽車駕駛輔助系統 (ADAS) 間的一個關鍵零組件。

在本文中我們將利用一套獨特的工具鏈，來建模和模擬完整的 77 GHz 之 FMCW 雷達系統，包括波形形成、天線特性，通道干擾和雜訊，以及決定距離和速度的數位訊號處理演算法。對射頻減損模型(RF impairments)進行模擬和建模，如雜訊、非線性和頻率依賴(frequency dependencies)，可以使我們去測試由數據參數表所提供的“現成”(off the shelf)元件的行為，並能提供達成性能所需的特定組件配置及相關成本等資訊。

簡介

頻率調變連續波 (FMCW) 雷達越來越流行，尤其是在汽車應用，如主動車距控制巡航系統 (ACC, adaptive cruise control)。一個 FMCW 系統的發射器發送高頻和大頻寬的線性調頻(chirp signal)訊號，所發射的訊號到達目標，並被反射回到接收器，其時間延遲(time delay)和頻率偏移(frequency shift)則取決於和目標之間的距離及相對的速度。

藉由混和發送和接收到的訊號，時間延遲(time delay)響應到差頻(frequency difference)產生一個拍頻(beat frequency)，這能對目標距離[1]進行非常精確和可靠的估計。通常我們會使用多個天線進行空間處理和波束成形，因這可使偵測更加可靠或可形成一個定向系統(directional system)，如圖 1 所描繪的。

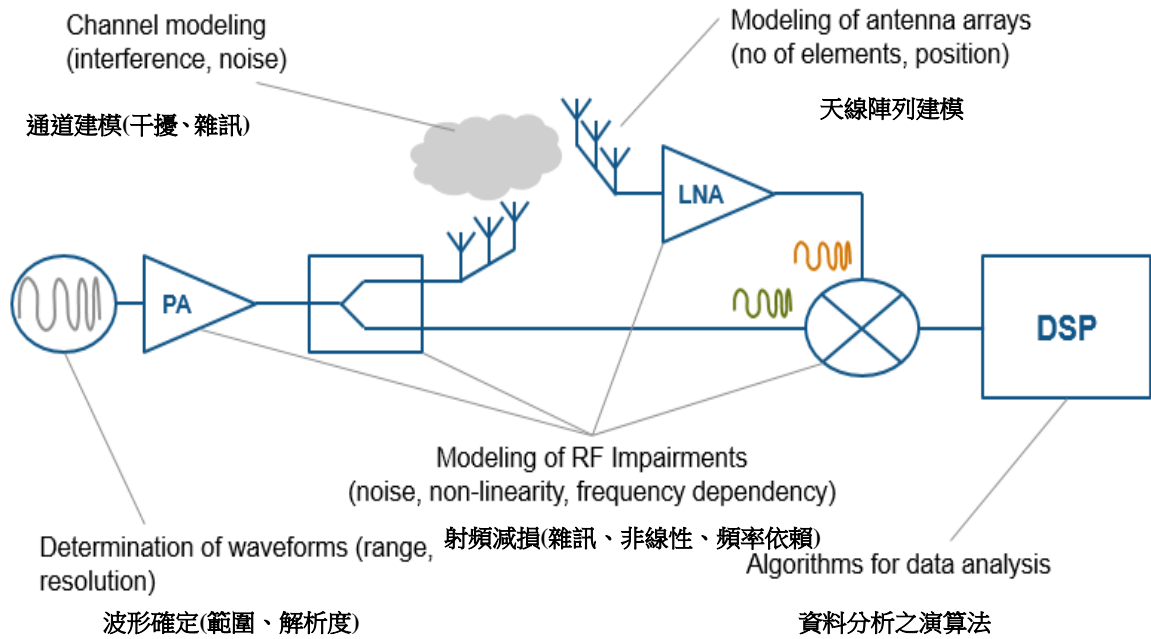


圖 1: FMCW 雷達系統之架構

進行 FMCW 雷達的設計、建模和模擬，設計人員必須考慮的不僅僅是一般的行為，在使用雷達方程式確定基本設計參數之後，設計者也必須分析 RF 前端所可能帶來缺陷的影響。非線性、雜訊、頻率選擇性和元件運作超過超大頻寬之間的不一致性，都會減少偵測訊號的實際動態範圍。

藉由準確地建立 RF 前端模型，設計者可以進行複雜的硬體架構和數位訊號處理演算法之間的權衡(tradeoffs)分析。此外，它們可以評估以前的設計實現是否可被重新使用，依增強的規格來重新定位雷達；或者現成的元件是否可以直接被用於前端的實現上。

FMCW 波形的確定

當設計一個新雷達系統時，我們第一個必須要應付的問題是要確定三角啁啾波形 (triangular chirp waveform) 的參數，以達到特定範圍所需要的解析度，當我們考慮自動巡航控制時使用汽車遠程雷達，通常頻寬約佔 77 GHz 千兆赫[2] [3]。

如圖 2 所示，接收訊號是一個傳送訊號之衰減及時間延遲的複製，其中延遲 Δt 和目標的距離相關，因為訊號在任何時刻總是掃過一個頻帶；而頻率差值 f_b ，通常被稱為拍頻 (beat frequency)，其傳送訊號和接收訊號之間是恆定的，因為掃描是線性的，可以從拍頻得知時間延遲，然後再從時間延遲推估到目標的距離。

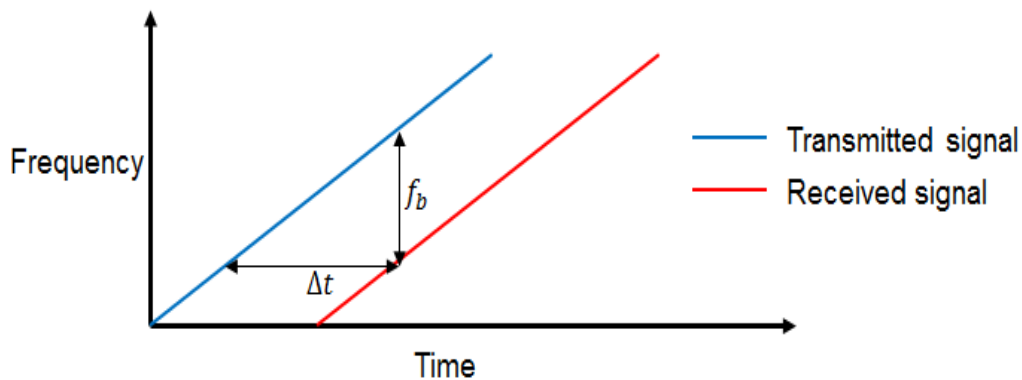


圖 2: 傳送及接收訊號的波形

使用 [MATLAB](#) 和 [相位陣列系統工具箱\(Phased Array System Toolbox\)](#) 的功能，我們可以輕鬆地確定如圖 3 所示的 77 千兆赫雷達的基本波形參數，如掃描頻寬和波形斜率(slop)、最大拍頻和採樣頻率(sample frequency)，根據使用者界定的距離解析度和最大速度等。

```

fc = 77e9;
c = 3e8;
lambda = c/fc;
range_res = 1; %resolution = 1 meter
v_max = 230*1000/3600; % Maximum speed 230 km/h

bw = range2bw(range_res,c); % sweep bandwidth
range_max = 200;
sweep_time = 2e-4;
sweep_slope = bw/sweep_time; % sweep slope

fr_max = range2beat(range_max,sweep_slope,c);
fd_max = speed2dop(2*v_max,lambda); % Doppler shift
fb_max = fr_max+fd_max; % maximum beat frequency

fs = max(2*fb_max,bw); % sample frequency
tstep = 1/fs; % sample rate

```

圖 3: 決定 FMCW 啁啾波形的參數

RF 元件、雜訊和非線性之建模

一旦線性調頻參數已被確定，就可以繼續進行雷達系統收發器的建模。

雷達系統的前端包括發送器、接收器和天線，這些模型在[相位陣列系統工具箱](#)中都有提供，我們可以參數化這些模型給定所需要的值，如相位雜訊和熱雜訊；或者，我們也可以使用 [Simulink](#) 中所提供的 RF 元件來建立發送器及接收器的模型，以及透過射頻模擬模塊組([SimRF](#)) 來建立元件層級之雜訊、非線性以及頻率選擇等模型的效果。

圖 4 顯示了我們如何使用射頻模擬模塊組([SimRF](#))工具之模塊來建立 RF 前端的模型；該函式庫提供一個內含求解器的電路，能快速模擬射頻系統和元件，例如放大器、混頻器和 S 參數模塊(S-parameter blocks)。

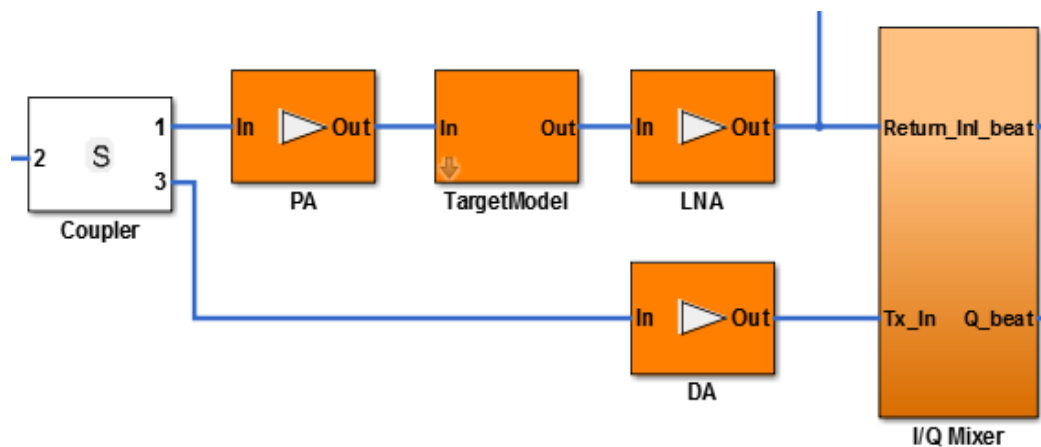


圖 4: 在 Simulink 中使用射頻模擬模塊組([SimRF](#))工具中的電路模塊來建立 RF 元件模型。

我們可以詳細描述收發器的結構，並使用數據表給予每個前端元件相關參數，例如，I/Q 混頻器的直接轉換，如圖 5 的建模，該元件對接收的訊號進行解調，並與原始的發射波形相乘。

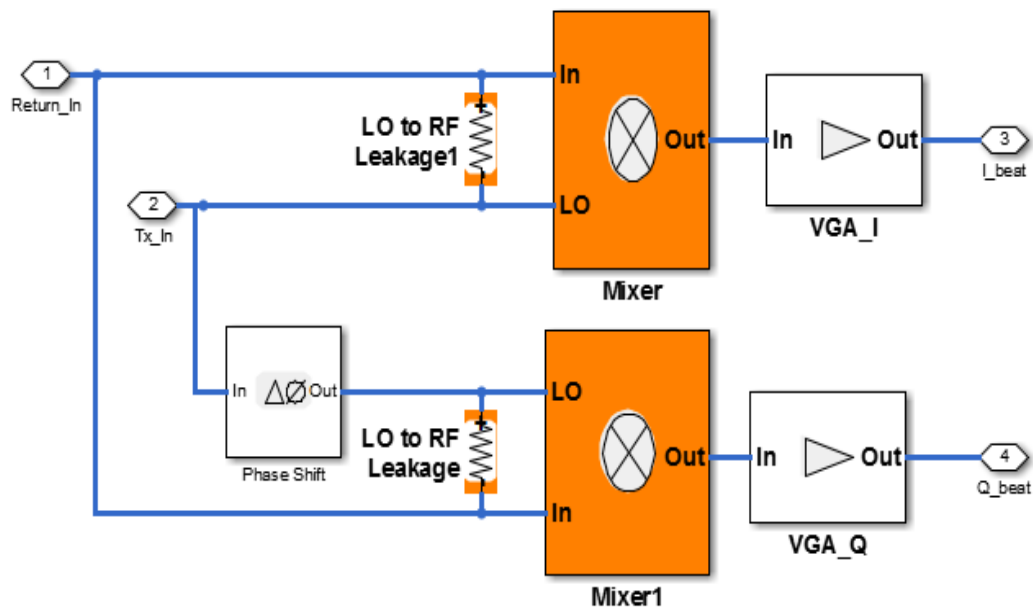


圖 5: I/O 直接轉換混頻器的架構

在 I / O 混頻器中使用的兩個乘法器的參數已經在模塊中直接設定，或者也可以使用工作區的變量。透過這樣的設置，使用者能很容易地嘗試及探索不同的設定，藉由使用不同的參數數據表來模擬現成的元件。

完整的系統模擬

當雷達系統的所有元件都已經正確的給予參數之後，我們可以進行一個完整的電腦桌機模擬，來測試系統是否會在不同的測試條件下正常運作。

當模擬運行中時，模型不僅能提供相對速度和物體之間距離的估計值，也能檢視發送和接收訊號的頻譜，如圖 6。

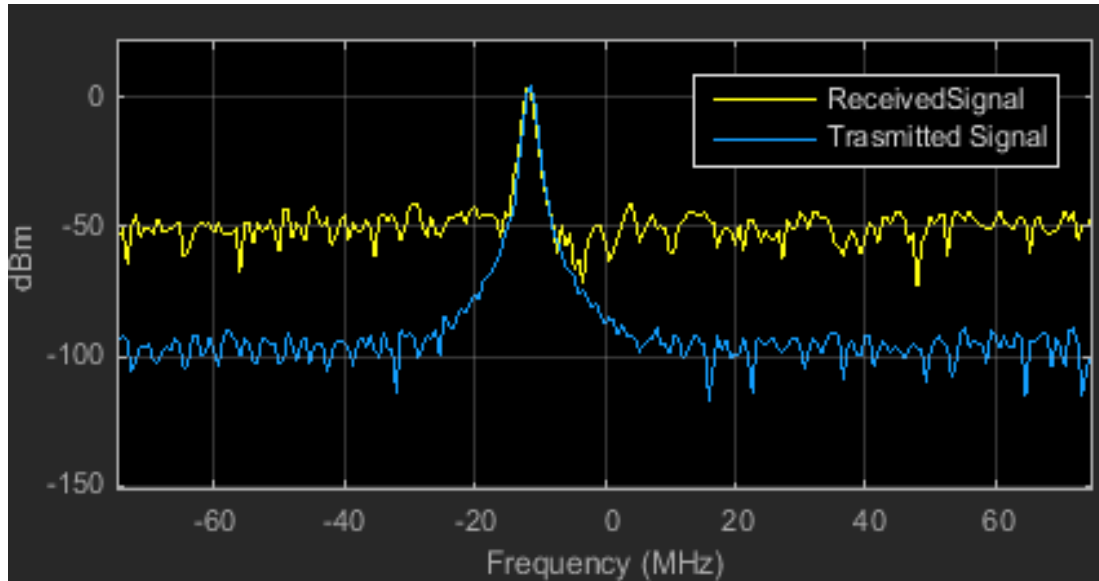


圖 6: 傳送及接收訊號的頻譜

在理想情況下（無雜訊和失真的）執行的第一個模擬顯示，使用中的所有目標其速度和位置都可以被正確地偵測到，這個模擬是為了驗證測試環境以及數位訊號處理的演算法；至於後續的模擬中再加入接收器非線性和雜訊之後，雷達就偏離了理想行為，不能偵測到汽車離遠的時候。

之後，我們再增加混合器的隔離和功率放大器的增益之後，雷達系統就能擴展其偵測的範圍，進行再次模擬時，即可正確地估計所述目標的速度和範圍。

因此，仔細權衡不同階段的增益以避免接收機的飽和操作是非常必要的，本模型允許我們使用不同的參數組來進行模擬，它還可幫助我們選擇合適的雷達元件進行後續的實現，並驗證這些元件對雷達性能的影響。

結論

本文使用了一些以 MATLAB 為基礎的工具鏈，進行應用於汽車主動安全系統的完整的 FMCW 雷達系統之建模與模擬流程。我們所提出的工作流程，能夠讓使用者在一個完整的系統級模型中模擬 RF 元件，其中包括數位訊號處理演算法。這種方法能夠同時降低雷達開發以及複雜系統測試的時間，同時可使整個開發週期的成本更低。要了解更多訊息，請參閱[相位陣列系統工具箱\(Phased Array System Toolbox\)](#)。

References

- [1] Design and Verify RF Transceivers for Radar Systems. Giorgia Zucchelli, MathWorks.
[mathworks.com/videos/design-and-verify-rf-transceivers-for-radar-systems-81990.htm](https://www.mathworks.com/videos/design-and-verify-rf-transceivers-for-radar-systems-81990.htm)
- [2] Automotive Adaptive Cruise Control Using FMCW Technology.
[mathworks.com/help/phased/examples/automotive-adaptive-cruise-control-using-fmcw-technology.htm](https://www.mathworks.com/help/phased/examples/automotive-adaptive-cruise-control-using-fmcw-technology.htm)
- [3] Karnfelt, C. et al. *77 GHz ACC Radar Simulation Platform*, IEEE International Conferences on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST), 2009.

MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See [mathworks.com/trademarks](https://www.mathworks.com/trademarks) for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.