

基於時序卷積網路之單FMCW雷達應用於非接觸式即時生命特徵監控

緒論

市面上有許多監測心率及呼吸率的產品，依監測方式可分為接觸式及非接觸式兩種。接觸式裝置的精確度通常較非接觸式來得高，然而也會有長期穿戴不適等問題。

接觸式

- 智慧手錶/手環、夾式血氧儀

非接觸式

- 無線雷達、雷射測距儀、熱成像攝影

此次研究使用的是**調頻連續波(FMCW)雷達**

心率/呼吸率提取方法

- 資料前處理
 - i. FMCW 雷達 -> 時域訊號
 - ii. 時域訊號->Range FFT-> 頻域訊號
 - iii. 頻域訊號->靜態雜波濾除->動態物體頻率與距離
 - iv. 用拍頻訊號之相位差提取心率及呼吸率
- 時序卷積網路
- Transformer Encoder
- Regressor

調頻連續波雷達 Frequency Modulated Continuous Waveform Radar



連續調變波

- 應用鎖相迴路（ Phase-Locked Loop，PLL ）作為訊號產生器。
- 透過不斷調整 PLL 裡的壓控振盪器(Voltage-Controlled Oscillator, VCO) 的頻率來生成頻率連續調變的信號



訊號表示

- 發射訊號: $x_T(t) = A_T \cos(2\pi f_T(t)t + \Phi_T(t))$, A_T 為發射的傳輸能量大小
- 接收訊號: $x_R(t) = A_R \cos(2\pi f_R(t)t + \Phi_R(t))$, A_R 為接收的傳輸能量大小

我們將 LNA 加強後的訊號與發射訊號做混頻處理，經過混頻後的訊號稱為拍頻訊號

- 拍頻訊號:

$$x_T(t) \cdot x_R(t) = A_T \cos(2\pi f_T(t)t + \Phi_T(t)) \cdot A_R \cos(2\pi f_R(t)t + \Phi_R(t))$$

將混頻完的訊號取低頻部分，即為我們所需的基頻訊號

- 基頻訊號:

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{2} A_T A_R \cdot \cos(2\pi(f_T(t) - f_R(t))t + (\Phi_T(t) - \Phi_R(t))) \\ &= A \cos(2\pi f_b(t)t + \Phi_b(t)). \end{aligned}$$

Φ_b 為拍頻訊號相位隨時間的變化

數位訊號處理器

將類比訊號取樣來獲得數位訊號

- 取樣表示

$$x[n, m] = A \cos(2\pi f_b(nT_f + mT_s)nT_f + \Phi_b(nT_f + mT_s))$$

- T_f 快速時間 (Fast-time): 針對每個 chirp 裡的時間做取樣
- T_s 慢速時間 (Slow-time): 針對不同 chirp 之間的時間間隔做取樣

距離推導

FMCW 雷達發射訊號的頻率會隨著時間變化，假設一個 chirp 的起始頻率為 f_s 、截止頻率為 f_e 、週期為 T_s 、頻寬為 B 、斜率為 S ，則可以表示成以下式子：

- $B = F_e - F_s$
- $S = \frac{B}{T_s}$

毫米波以光速 C 傳遞，因此可以透過前面得到的拍頻訊號經由下式推導出距離 $d(t)$

- $t_d = \frac{2d(t)}{C}$
- $f_b = St_b = \frac{B}{T_s} \cdot \frac{2d(t)}{C}$

一維快速傅立葉轉換將協助我們取得 f_b ，從而算得 $2d(t)$ 。

一維快速傅立葉轉換 Range FFT

我們得到經取樣過的拍頻訊號後，將每一個快速時間取樣點做 Range FFT，經過 FFT 的表示如下：

$$X_m[K] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n, m] e^{-j \frac{2\pi n k}{N}}, k = 0, \dots, N - 1$$

其中 K 為 FFT 指標(index)， N 為每個 chirp 裡的取樣數。當第 K 個達到最大值時，即可透過距離分辨率換算物體距離。其換算的公式如下：

$$d = \frac{t_d \cdot C}{2} = f_b T_c \cdot \frac{C}{2B}$$

其中 $C = 3 \times 10^8$ 為光速， B 為 chirp 之頻寬。 $\frac{C}{2B}$ 定義為距離分辨率。

靜態雜波濾除 Clutter removal

- 利用平滑處理來濾出環境中的靜態背景物件

$$X'_m[k] = \sigma X_m[k] + (1 - \sigma)X_{m-1}[k], 0 \leq \sigma \leq 1$$

- σ 為平滑系數， σ 越大，平滑效果越好，但較多的目標訊號也會被平滑掉； σ 越小，平滑效果越差，較多的靜態雜波會被保留。
- 最後，將平滑處理後的靜態雜波圖與原本未經處理的訊號相減，便能得到濾除靜態雜波後的結果。其表示如下：

$$Y_m[K] = X_m[k] - X'_m[k]$$

從這些 $Y_m[K]$ 找出最大值的頻率，結合推導的距離分辨率便能計算出物體距離，其表示如下：

$$k_{\max} = \arg_k \max |Y_m[K]|$$
$$d = f_b T_c \cdot \frac{C}{2B} = k_{\max} \cdot \frac{C}{2B}$$

