

Mutual Interference Suppression Using Wavelet Denoising in Automotive FMCW Radar Systems

2021 年 11 月 11 日

1 Abstract

- 自動車用 FMCW レーダー間で生じる干渉波をウェーブレット変換から推定
- 推定した干渉成分をミキサー出力の信号から取り除く方法を提案
- 異なる方式の FMCW レーダーを使って実験も行っており有効性を確認

2 introduction

FMCW レーダー搭載の自動運転車が増えるにつれ、他の自動車からの送信波による干渉が問題になってくる。特に受信信号と干渉波の周波数差が FFT 前のローパスフィルタのカットオフ周波数よりも小さい場合が問題で、不要な周波数成分が FFT 出力から検出される。干渉周波数は時間領域ではパルスのように現れ、周波数領域では全ての周波数要素に広がるので、所望信号の周波数成分は干渉によって埋もれてしまう。

9-13 干渉が発生する部分をゼロパディング → 干渉区間が長いとターゲットの情報が失われる

21,22 干渉信号の位相、振幅から干渉信号を再構成し元の信号から引く → 実環境では位相ノイズがある [25] から位相情報を使うのは信頼性に欠ける

24 weighted-envelope normalization(AWEN) で干渉信号をセンシングし、その振幅を減衰させて干渉を抑制 → 経験則からパラメータを決定するからレーダーシステムの調整がいる

シンプルかつ効果的な方法として wavelet-denoising[26] を使う。通常 wavelet denoising では信号を分解してノイズ、信号に対応する係数を閾値にかける [27] がローパスフィルタ アウトプットには所望信号の sin 波と干渉信号のパルス波が混在していて、干渉波は直接他のレーダーから飛んでくるから所望信号の電力より 30dB くらい高い。[9] ここでは所望信号をノイズに見立てて、強い電力をもつ干渉波を wavelet で推定→推定干渉波をミキサー出力から引いて、干渉を除去する方法を提案する。

3 interference effect

干渉のパターンは傾きが同じ場合 (a) I^{SS} と違う場合 (b) I^{DS} の 2 パターンある。干渉波は I 個の干渉レーダー波の和からなる。ターゲットの情報を含んだ $r(t)$ と同じように考えると、受信機に入ってくる干渉信号は

$$I^{SS}(t) = \sum_{i=1}^I A_{R_i} e^{j2\pi \left[(f_{c_i} + f_{D_i} - \frac{B_i}{2})(t - \tau_i) + \frac{B_i}{2T_i} (t - \tau_i)^2 \right]} + n(t)$$

f_{c_i}, B_i, T_i は干渉レーダーのパラメータ

$$I^{DS}(t) = \sum_{i=1}^I A_{R_i} e^{j2\pi \left[(f_{c_i} + f_{D_i} + \frac{B_i}{2})(t - \tau_i) - \frac{B_i}{2T_i} (t - \tau_i)^2 \right]} + n(t)$$

送信信号 $S(t)$ と干渉波 I^{SS} or I^{DS} の積から生じる信号は

$$\begin{aligned} L(s(t)I^{SS}(t)) &= s(t)\{I^{SS}(t)\}^* \\ &= A_T \sum_{i=1}^I A_{R_i} e^{j2\pi \left[\{(f_c - f_{c_i}) - (\frac{B - B_i}{2}) + (\frac{B_i}{T_i} - f_{D_i})\}t + \frac{1}{2} \left(\frac{B}{T} - \frac{B_i}{T_i} \right) t^2 \right]} e^{j2\pi (f_{c_i} - \frac{B_i}{2} + f_{D_i})\tau_i} + n(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L(s(t)I^{DS}(t)) &= s(t)\{I^{DS}(t)\}^* \\ &= A_T \sum_{i=1}^I A_{R_i} e^{j2\pi \left[\{(f_c - f_{c_i}) - (\frac{B + B_i}{2}) - (\frac{B_i}{T_i} + f_{D_i})\}t + \frac{1}{2} \left(\frac{B}{T} + \frac{B_i}{T_i} \right) t^2 \right]} e^{j2\pi (f_{c_i} + \frac{B_i}{2} + f_{D_i})\tau_i} + n(t) \end{aligned}$$

Fig3 は干渉と送受信信号の傾きが違うケースの図で紫のラインが送信信号と干渉信号の周波数差を表している。カットオフ周波数以下のところは全て FFT の結果に現れるから所望成分が埋もれる。

干渉の影響を見るため $(R_I, v_I) = (20m, -15m/s)$, $(R_T, v_T) = (100m, 10m/s)$ に設定

して Fig1 の状況でシミュレーションした結果が図 4(a),(b) に示されている。(a) から $t = 2.75ms$ の時に強いパルス風の波があって、(b) からそれが周波数領域全体に影響を与えているのがよくわかる。(b) のようにピークと周りの周波数要素の電力差に大差がない場合 CFAR によるピーク検出はうまくいかない。

4 proposed mutual interference suppression using wavelet denoising

ミキサー出力をローパスフィルタにかけた出力は、干渉波と送信信号の傾きが異なる場合 (Fig3(a) みたいな時)

$$L_I(t) = L(M(t)) + L(S(t)I^{DS}(t))$$

となる。この論文では干渉成分 $L(S(t)I^{DS}(t))$ の電力が所望信号 $L(M(t))$ に比べて非常に大きいので、まず $L(S(t)I^{DS}(t))$ を wavelet 変換を使って推定する。その後、推定したパラメータを使って $L(S(t)I^{DS}(t))$ を再構成して $L_I(t)$ から取り除くことで所望信号 $L(M(t))$ を得る。

$$\hat{L}(M(t)) = L_I(t) - \hat{L}(S(t)I^{DS}(t))$$

4.1 Decomposition of Low-Pass Filter Output Using Wavelet Transform

Haar ウェーブレットのマザーウェーブレット関数 $\psi(t)$ は

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t < 1/2) \\ -1 & (1/2 \leq t < 1) \\ 0 & (t < 0, t \geq 1) \end{cases}$$

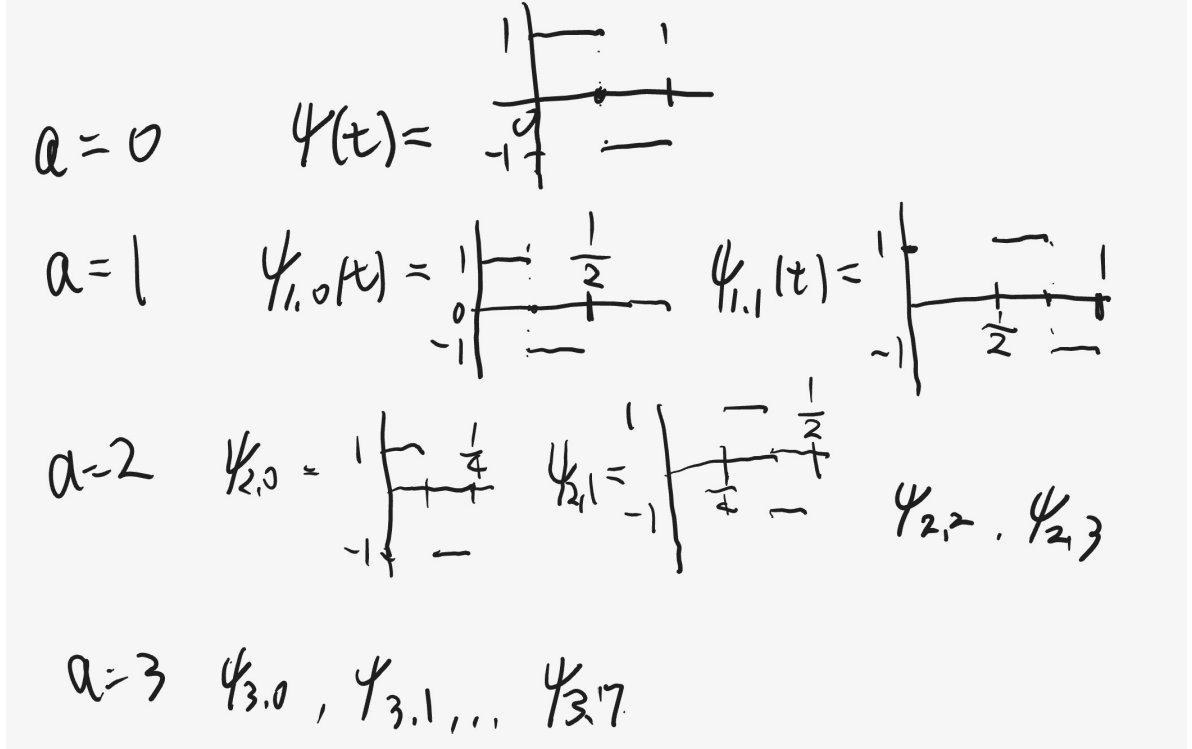
$L_I(t)$ への離散ウェーブレット変換は

$$W_{a,b} = \int_{-\infty}^{\infty} L_I(t) \psi_{a,b}^*(t) dt$$

で表され、

$$\begin{aligned} \psi_{a,b}(t) &= 2^{\frac{a}{2}} \psi(2^a t - b) \\ &= 2^{\frac{a}{2}} \psi\left(\frac{t - 2^{-a}b}{2^{-a}}\right) \quad (a = 1, 2, \dots, a_T). \end{aligned}$$

である。 a, b はそれぞれスケーリング要素と時間要素になっていて、 a を大きくすれば $\psi_{a,b}$ は収縮する。



前についでる $2^{\frac{a}{2}}$ は正規化係数で各スケールでの基底の電力の合計が 1 になるように正規化されている。

4.2 thresholding

ウェーブレット変換で係数 $W_{a,b}$ が得られたら、どの係数が干渉信号に対応するか閾値から判定する。一般的によく使われるのは soft thresholding と hard thresholding でどちらも λ より絶対値が小さい $W_{a,b}$ は消される。

$$f_s(W_{a,b}) = \begin{cases} W_{a,b} - \text{sgn}(W_{a,b})\lambda & |W_{a,b}| \geq \lambda \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_h(W_{a,b}) = \begin{cases} W_{a,b}, & |W_{a,b}| \geq \lambda \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここでは [33] で与えられる modified-universal threshold を使っている。

$$\lambda = \hat{\sigma}_a \sqrt{2 \log(N_I)}$$

5 simulation results

シミュレーション 1

- ターゲット $(R_T, v_T, \theta_T) = (100m, 20m/s, 1), (80m, 5m/s, 10)$
- 干渉 $(R_I, v_I, \theta_I) = (15m, -15m/s, -3)$
- 送信信号と干渉信号のチャープの傾きは異なる (fig2(b) のケース)
- 角度の推定は受信アンテナ 4 つでアンテナ間の間隔は 0.5λ

シミュレーション 2

- ターゲット $(R_T, v_T) = (100m, 0m/s)$
- 干渉 $(R_I, v_I) = (80m, -10m/s)$
- 干渉波の変調周期が自分のレーダーに比べて短い \rightarrow fig11 のように時間領域に複数の干渉パルスが生じる

6 measurement results

実験はこんな感じでやった

