

広帯域干渉抑圧を用いた CS レーダのレンジスペクトルにおける ランプ処理を用いたサイドローブ低減法

2020SC063 小島 慎二郎

指導教員：梅比良 正弘

1 まえがき

近年、高度運転支援システム(ADAS)や自動運転のセンサ技術として、CS(Chirp Sequence)レーダの使用が期待されている[1].今後自動運転の普及に伴い、レーダ数が増加し、レーダ間で発生する「干渉」が問題となる. レーダ間干渉には、ターゲットの不検出を招く広帯域干渉や、誤検出を招く狭帯域干渉がある[2]. 文献[3]では、CS レーダを対象として、希望信号の受信信号レベルを検出し、これを基準として干渉検出・抑圧を行う広帯域干渉抑圧法を提案している. この方法では、干渉をゼロとすると SN 比を最大にできるが、ゼロ抑圧では干渉抑圧部が矩形波となる AM 変調となり、レンジスペクトルにおいてサイドローブが発生する問題がある. この問題に対して、本研究では、ランプ処理によるサイドローブ低減法を提案し、シミュレーションにより評価した.

2 CS レーダ

図 1 に CS レーダのブロック図を示す[1]. 波形生成と PPL により位相と周波数の制御を行い、チャープ信号を送信する. 次に、送信アンテナから送信信号としてターゲットに送信し、ターゲットによって反射された信号を受信信号として受信する. そして、ミキサによって送信信号と受信信号を乗算し、LPF(Low Pass Filter)により高調波と雑音を除去してビート信号を抽出する. その後、ADC でデジタル信号に変換し、DSP でデジタル化された信号から、FFT(Fast Fourier Transform)を行い、2 次元での距離スペクトルと速度のスペクトルを得る.

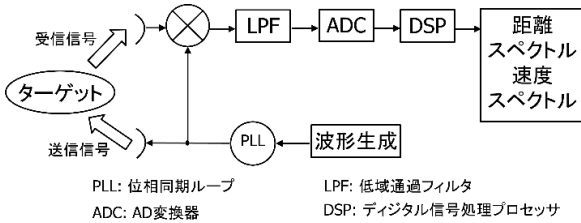


図1 CS レーダのブロック図

ビート周波数 f_B は、ドップラ周波数 f_d を用いて、次式で表される.

$$f_B = \frac{\Delta f}{\Delta T} \tau + f_d \quad (1)$$

ただし、 Δf は帯域幅であり、 $\Delta f / \Delta T$ はチャープ率を表す. ここで、 $\frac{\Delta f}{\Delta T} \tau \gg f_d$ となるように、掃引時間 ΔT は極めて小さく設定するため、

$$f_B \cong \frac{\Delta f}{\Delta T} \tau \quad (2)$$

と近似できて、距離 R は次式で与えられる.

$$R \cong \frac{c\Delta T}{2\Delta f} f_B \quad (3)$$

3 広帯域干渉

広帯域干渉はチャープ率が異なるレーダ間で発生する. 広帯域干渉あり・なしのビート周波数の時間波形を図 2 に示す.干渉信号は受信信号に比べて十分大きいため、時間波形ではこのようなパルス状のレベルの高い信号が発生する.このパルス状の干渉信号の幅は、干渉継続時間 T を表している.干渉継続時間 T は次式で与えられる.

$$T = \frac{2f_{LPF}}{\Delta f} \cdot \left| \frac{T_U \cdot T_I}{T_U - T_I} \right| \quad (4)$$

ただし、 f_{LPF} はフィルタの帯域幅、 T_U, T_I は送信信号と干渉信号のチャープ周期とする.時間波形をFFTした、広帯域干渉発生時の周波数スペクトルでは、干渉信号が雑音レベルの上昇を招き、ターゲットによるビート周波数と雑音との電力差が小さくなって、ターゲットの不検出が起こり得る.

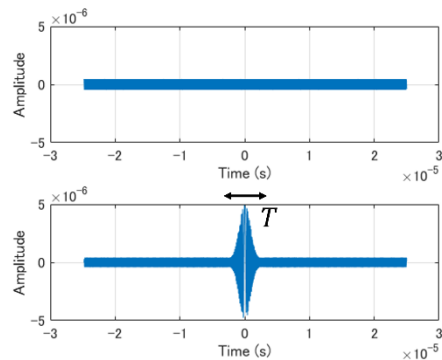


図2 干渉なし・ありのビート周波数の時間波形

4 広帯域干渉抑圧におけるサイドローブ低減法

文献[3]の広帯域干渉抑圧法では、受信信号の絶対値 $|R(n)|$ の包絡線を計算してソーティングを行い、ソーティング後の包絡線の 25%~50%の平均値の k 倍を干渉検出閾値 R_{th} として、干渉検出・抑圧を行う.干渉抑圧係数 $Q(n)$ は $|R(n)| > R_{th}$ の時に $Q(n) = 0$,それ以外は 1 とすると SN 比を最大化できる.しかし、広帯域干渉抑圧後は矩形波による AM 変調が行われた信号となり、レンジスペクトルでは、メインローブ周辺にサイドローブが発生し、ターゲットの誤検出となる可能性がある.このサイドローブを低減する手法を提案する.

提案法では、干渉抑圧係数 $Q(n)$ の計算と共に、干渉の開始位置 n_{STRT} と終了位置 n_{END} を検出する.ランプ窓幅 W をパラメータとして、下式のランプ係数 $Ramp(n)$ を計算し $R(n)Q(n)$ に乘算する.

$$Ramp(n) = (n - n_{STRT})/W \quad (n = n_{STRT} - W \sim n_{STRT})$$

$$Ramp(n) = (n - n_{END})/W \quad (n = n_{END} \sim n_{END} + W)$$

その他の点では $Ramp(n) = 1$ とする。

ランプ係数乗算後のビート周波数の時間波形を図3に示す。図からわかるとおりランプ処理後は、干渉部の遷移を滑らかにできている。

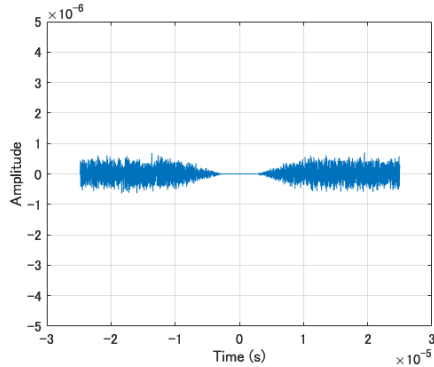


図3. ランプ処理後のビート周波数の時間波形

5 特性評価

提案手法の有効性を確認するため、シミュレーションにより特性評価を行った。主なパラメータを表1に示す。図4に、広帯域干渉抑圧前・後のレンジスペクトルを示す。広帯域干渉抑圧により雑音レベルは低下するがサイドローブが発生していることがわかる。

図5にランプ窓幅 W_l にサンプリング周期をかけた $W_l = 9[\mu s]$ のランプ処理前・後のレンジスペクトルを示す。ランプ処理によりサイドローブが低下するがメインローブも低下していることがわかるため、ランプ窓幅 W_l に対するメインローブとサイドローブのレベル評価した結果を図6に示す。ただし、サイドローブ1, 2は干渉継続時間 T とした時の周波数ピーク値を示す $1/2T, 3/2T$ の値である。サイドローブ1は窓関数をかけたことによるメインローブの広がりにより、サイドローブとメインローブが融合して検出できなくなるため、今回はピーク値の検出方法として、ピーク値の次のサンプル点との電力差が $3dB$ 以下であれば、ピーク値は存在しないとした。

図6より、 W_l が大きくなると、平均雑音レベルは同じように低下していて、 SN 比はほとんど変わらないが、メインローブと各サイドローブはなくなるかレベルが下がるかとなっていることがわかる。表1のパラメータによるシミュレーションでは、ランプ窓幅 W_l が $8\mu s$ 以上でサイドローブの低減を果たすと結論付けられる。

表1. シミュレーションパラメータ

掃引周波数	1[GHz]	中心周波数	78.0[GHz]
掃引時間(送信)	50[μs]	送信電力	10[dBm]
掃引時間(干渉)	200[μs]	FFT サイズ	2048[point]

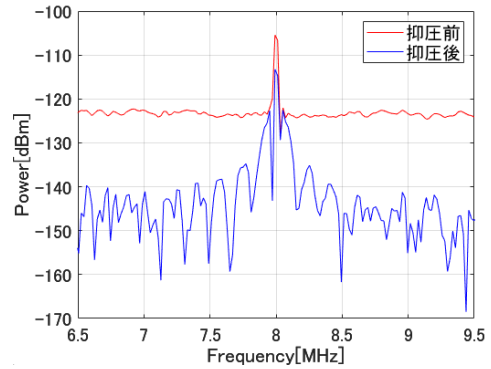


図4. 広帯域干渉抑圧前・後のレンジスペクトル

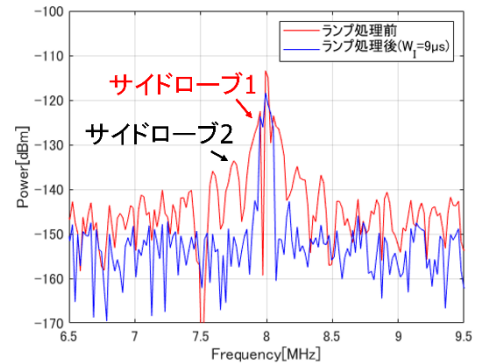


図5. ランプ処理前・後のレンジスペクトル

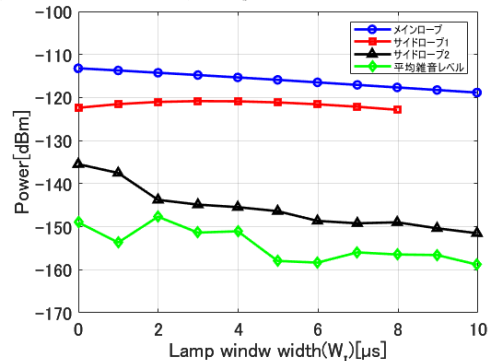


図6. ランプ窓幅 W_l に対する各ピーク値の関係

6 まとめ

広帯域干渉抑圧における、ランプ処理によるサイドローブ低減法を提案し、シミュレーションにより実現性を評価した。ランプ窓幅によりメインローブとサイドローブの大きさが変わるため、干渉継続時間に応じたランプ窓幅制御が今後の課題である。

<参考文献>

- [1] 梅比良 正弘「FMCW レーダにおける干渉低減技術」、伊東敏夫ほか『距離・画像センサの基礎と最先端』, S&T 出版, 2020, pp.186-197.
- [2] M Goppelt, H.-L. Blöcher and W. Menzel, “Analytical investigation of mutual interference between automotive FMCW radar sensors”, The 6th German Microwave Conference, March 2011
- [3] 志村拓人, 梅比良正弘, 渡邊祐, 玉瀧岩, 武田茂樹, “包絡線検出とソーティングによる干渉検出閾値制御を用いた FMCW レーダ用広帯域干渉抑圧法”, 信学技報, SANE2021-82, (2021-12).