

Zadoff-Chu 系列を用いた PMCW レーダにおけるフィルタ系が相関検出特性に与える影響

2020SC072 櫻井 凱仁
指導教員：梅比良 正弘

1 はじめに

高度運転支援システム ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems)や自動運転には、レーダが広く用いられている[1]. 一方, V2X (Vehicle to X)通信を用いた ITS (Intelligent Transportation System)が検討されてきており, 将来の自動運転では通信とレーダの双方が利用されると予想され, 近年, レーダ・通信融合システムが注目されている[2][3].

高速無線通信とレーダ機能を両立するため, 当研究室ではシングルキャリア変調の変調信号に一定振幅で理想的な自己相関特性を有するZadoff-Chu 系列を用いた PMCW (Pulse Modulation Continuous Wave) レーダを提案している. しかし, PMCW レーダでは, 送受信フィルタが必要である. 本報告では, バタワースフィルタを用いた場合のフィルタ特性が相関検出特性の影響を評価したので報告する.

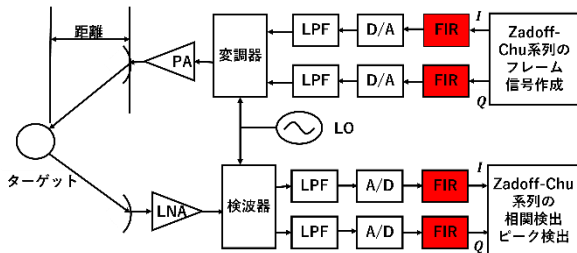
2 Zadoff-Chu 系列を用いた PMCW レーダの構成

PMCWレーダに用いる符号系列は, 定振幅で理想的な自己相関特性を持つ符号系列は CAZAC (Constant amplitude zero autocorrelation)系列と呼ばれる. CAZAC 系列の一つである Zadoff-Chu 系列 $ZC_u(n)$ は次式であらわす.

$$ZC_u(n) = \begin{cases} \exp\left(-j\frac{\pi un^2}{N}\right) & : N \text{は偶数} \\ \exp\left(-j\frac{\pi un(n+1)}{N}\right) & : N \text{は奇数} \end{cases} \quad (1)$$

N は符号系列長で, $0 \leq n < N$, $0 < u < N$ であり, u と N の最大公約数は 1, $ZC_u(n) = ZC_u(n + N)$ となる.

また, N が素数の場合, $ZC_u(n)$ の DFT は別の Zadoff-Chu 系列の複素共役となる性質を持つ.



LPF:低域通過フィルタ LNA:低雑音増幅器 FIR:FIRフィルタ LO:局部発信機
HPA:大電力増幅器 A/D:アナログ/デジタル変換器 D/A:デジタル/アナログ変換器

図1 Zadoff-Chu 系列を用いた PMCW レーダの構成

図1にZadoff-Chu 系列を用いた PMCW レーダの構成を示す. Zadoff-Chu 系列は複素系列であるため, 送信側では実部(I)と虚部(Q)の複素系列を変調して送信する. ターゲットからの反射信号を受信し, 直交検波器で送信搬送波信号により直交検波を行い, LPF で高調波を除去する. N 個の送信符号系列と N 個の受信 IQ 信号との相関値を計算し, 雑音レベルを基準とした一定の閾値以上のピークをターゲットとして検出する. また, ターゲットとの距離を基準タイミングとピークの時間差から距離を計算する.

3 PMCW レーダにおける相関検出の原理

Zadoff-Chu 系列を PMCW レーダへの応用することにおいて $ZC_u(n)$ と巡回シフトした $ZC_u(n + N)$ の相互相関は 0 であることにある. PMCW レーダの最大検知距離に応じて, 任意の値の N を用いることができる[1]. Zadoff-Chu 系列を $ZC_u(n) (n = 1 \sim N)$ とし, 送信フィルタ, 受信フィルタの伝達関数を $H_T(f)$, $H_R(f)$ とする. この時, 総合の伝達関数は $H(f) = H_T(f) \cdot H_R(f)$ となり, そのインパルス応答 $h(t)$ とすると, 受信信号の複素包絡線 $r(t)$ は次式で与えられる.

$$r(t) = \sum_{n=0}^{N-1} ZC_u(n)h(t - nT) \quad (2)$$

ここで T は変調信号のシンボル周期である. PMCW レーダでは, 遅延時間 τ の受信信号 $r(t - \tau)$ を周期 T で標本化した受信信号 $r(nT - \tau)$ と $ZC_u(n + k) (k = 0 \sim N - 1)$ の複素相関を計算し, その絶対値が予め定められた閾値より大きな値となる k を探索し, ターゲット検出を行う. その相関出力 $X(k)$ は次式で与えられる [1]. この時, 遅延時間 $\tau = nT_c$ となり, 光速を c とするとターゲットとの距離は $\tau c / 2$ で与えられる.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} ZC_u^*(n + k)r(nT - \tau) \quad (3)$$

4 フィルタが相関検出特性に与える影響

本文では, 群遅延特性が平坦なバタワースフィルタを仮定する. この伝達関数 $H(f)$ は次式で与えられる.

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{B}\right)^{2n}}} \quad (4)$$

ここで B は 3dB 帯域幅である. シミュレーションではフィルタ次数は $n=7$, 系列長は $N=256$ とした.

図 2 にターゲット数が1で $\tau = 0$ の時の, $BT=1\sim 2$ ならびにフィルタなしの場合の $k=0\sim N-1$ に対する相関検出特性を示す. 図よりわかるようにフィルタなしでは理想的な相関検出特性となり, $k=0$ で相関値は 1(0dB), $k\neq 0$ のときに相関値は 0($-\infty$ dB)となる. しかし, フィルタの符号間干渉によりレンジサイドローブが発生し, $k\neq 0$ で相関値が 0 とならず, BT 積が小さくなるとレンジサイドローブが大きくなる.

図 3 に遅延時間 τ に対する $k=0$ での相関検出特性を示す. (1)はターゲット数が1, (2)はターゲット数が2で遅延時間差が $2T$ の場合である. 図 2(1)では, フィルタなしでは $\tau > T$ でレンジサイドローブが 0 となるが, BT が小さくなるとサイドローブが大きくなり, $BT=1$ ではメインローブの相関値は 0dB より小さくなる. $\tau = 1$ では $BT=1$ で -9dB, $BT=2$ で -13dB となり, 距離差の小さい複数のターゲットの分離が困難になることがわかる.

図 2(2)は, $2T$ の遅延差がある場合の相関検出特性で, $\tau = 0$, $2T$ にメインローブがあり, ターゲットが検出できることがわかる. フィルタなしでは遅延時間差が T 以上でターゲットを分離検出できるが, $BT=1$ では $\tau = T$ での相関値は -6dB と大きくなり, 受信レベル差が 10dB 以上になるとターゲットの分離が困難になると考えられる.

5 おわりに

レーダ・通信融合システムをコンセプトに PMCW レーダのシステムと信号の構成, 原理, 相関検出特性におけるフィルタ特性の影響の評価を示した. BT が小さくなるとレンジサイドローブが大きくなることを示した. 今後は相関検出特性と帯域外漏洩電力のトレードオフを考慮したフィルタの最適化の検討を進める.

参考文献

- [1] 梅比良正弘, "レーダ・通信融合のための Zadoff-Chu 系列を用いた PMCW レーダの基礎検討", 信学技報, vol. 122, no. 408, SANE2022-108 pp. 54-59, 2023 年 3 月.
- [2] S. Zeadally, M. A. Javed and E. B. Hamida, "Vehicular Communications for ITS: Standardization and Challenges," in IEEE Communications Standards Magazine, vol. 4, no.

1, pp. 11-17, March 2020, doi: 10.1109/MCOMSTD.001.1900044.

- [3] M. H. C. Garcia et al., "A Tutorial on 5G NR V2X Communications," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 3, pp. 1972-2026, thirdquarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3057017.

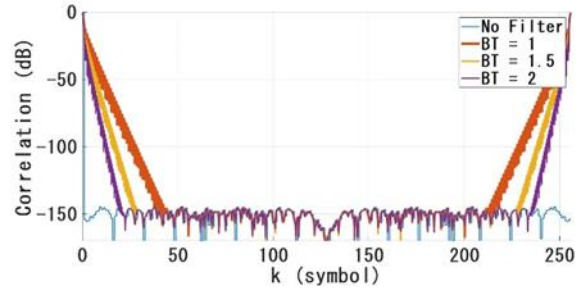
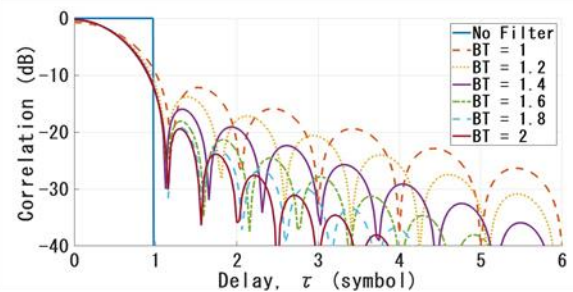
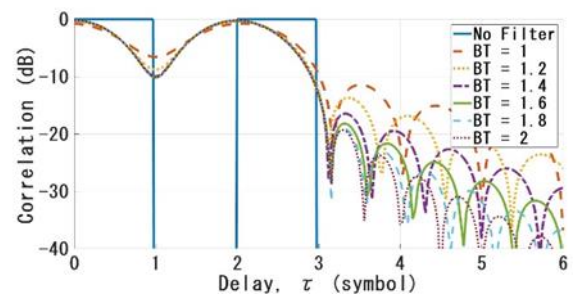


図 2 $\tau = 0$ の場合の相関検出特性



(1)ターゲット数が1の場合



(2)ターゲット数が2で遅延時間差が $2T$ の場合

図 3 BT 積をパラメータとした相関検出特性