

Zadoff-Chu 系列を用いた PMCW レーダの基本特性評価

2018SC070 岡田浩平

指導教員:奥村康行 梅比良正弘

1 はじめに

現在の車載レーダは、FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 方式が主流であるが、将来の LSI (Large Scale Integration) 技術の進歩により、通信とレーダセンサの融合に適した PMCW(Phase Modulated Continuous Wave) レーダの小型経済化が期待できる [1]. 従来の PMCW レーダでは、符号系列として、2 値の疑似雑音系列である M 系列が検討されているが、理想的な自己相関特性を持たないため、受信レベル差の大きな複数ターゲットの分離・検出ができない問題がある [2]. この問題を解決するため、本研究では理想的な自己相関特性を持つ Zadoff-Chu 系列を用いた PMCW レーダを提案し、送受信フィルタにガウスフィルタを用いた場合の基本特性を評価した.

2 PMCW レーダの原理

図 1 に PMCW レーダの構成を示す. 符号系列により直交変調器で搬送波を位相変調して送信する. 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. 検波出力の実部 (I) と虚部 (Q) を ADC でデジタル信号に変換し、デジタルフィルタで帯域制限した後、相関器で送信符号系列と受信符号系列の相関値を計算し、ピーク検出によりターゲットを検出する.

図 2 に PMCW レーダの原理を示す. T は送信信号のシンボル周期で、送信波形は矩形波とする. 送信信号の送信タイミングを基準とすると、 kT (k は 0 より大きい整数) だけ遅延した点で相関値のピークが検出される時、一往復遅延時間 $\tau = kT$ であるので、相対距離 d は次式で与えられる.

$$d = \frac{\tau}{2}c = \frac{kT}{2}c \quad (1)$$

距離分解能はシンボル周期 T に比例し、距離分解能を向上するには T を小さくする必要があり、高速 ADC が必要になると共に、広い周波数帯域が必要となる.

3 PMCW レーダに用いる系列

3.1 M 系列

M 系列は 2 値 (1,0) の疑似雑音系列 (PN(Pseudo-Noise) 系列) の中で最長の周期 $N = 2^n - 1$ をもつ. n は M 系列の生成多項式の次数で、M 系列生成回路のシフトレジスタの段数と等しい. M 系列の値を m_i ($m_i = \pm 1$) とすると、M 系列の自己相関関数 $X_M(k)$ は次式で与えられる.

$$X_M(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=0}^{N-1} m_i \cdot m_{i+k} \right| = \begin{cases} 1 & : k = KN \\ \frac{1}{N} & : k \neq KN \end{cases} \quad (2)$$

ここで K は整数である. M 系列では、自己相関の相関値が $\frac{1}{N}$ 以下にならないため、複数ターゲットから反射信号の受信レベル差が $\frac{1}{N}$ より大きいと、低レベルで受信された信号を分離・検出できない問題がある.

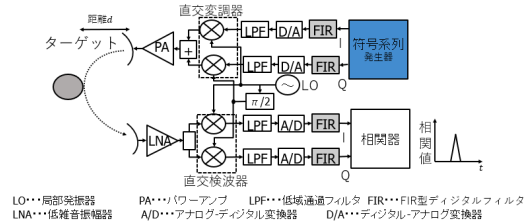


図 1 PMCW レーダの構成

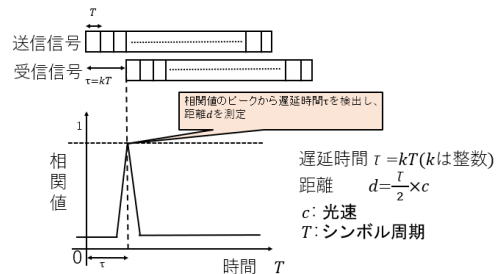


図 2 PMCW レーダの原理

3.2 Zadoff-Chu 系列

M 系列の自己相関の問題を解決する符号として、理想的な自己相関特性を持つ Zadoff-Chu 系列の適用が考えられる. Zadoff-Chu 系列は定振幅で遅延時間 0 以外の自己相関が 0 となる CAZAC(Constant amplitude zero autocorrelation) 系列の一つである [3]. 周期 N の循環シフト Zadoff-Chu 系列 $x(n)$ は次式で与えられる.

$$x(n) = \begin{cases} \exp(-j\frac{\pi\mu n^2}{N}) & : N \text{ が偶数} \\ \exp(-j\frac{\pi\mu n(n+1)}{N}) & : N \text{ が奇数} \end{cases} \quad (3)$$

$n = 0 \sim N - 1$ で、 N と μ は互いに素である. Zadoff-Chu 系列の自己相関関数 $X_Z(k)$ は次式で与えられる.

$$X_Z(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot x(n+k)^* \right| = \begin{cases} 1 & : k = KN \\ 0 & : k \neq KN \end{cases} \quad (4)$$

[*] は複素共役, K は整数で M 系列と異なり、 $k \neq KN$ では相関値は 0 となる.

4 Zadoff-Chu 系列を用いる PMCW レーダの基本特性

図 1 に示すように、PMCW レーダでは FIR 型デジタルフィルタで帯域制限を行う. フィルタ帯域幅を小さくすると占有帯域幅 (送信電力の 99% が含まれる周波数幅) を小さくできるが、符号間干渉により自己相関特性が劣化する

る。そこで、過渡応答特性に優れるガウスフィルタを用いた場合の、フィルタ帯域幅 BT に対する占有帯域幅と自己相関特性、ターゲット検出における距離分解能を評価した。ガウスフィルタの伝達関数 $H(f)$ は次式で与えられる。

$$H(f) = e^{(\frac{1}{BT} \sqrt{\frac{\log 2}{2}})^2 f^2} \quad (5)$$

なお、M 系列と Zadoff-Chu 系列の系列長 $N=127$, $\mu = 1$, ADC は 8 サンプル/シンボルとした。

4.1 占有帯域幅

ガウスフィルタの正規化帯域幅 BT に対する送信信号の占有帯域幅を図 3 に示す。図 3 よりわかるように BT を小さくすると、所要周波数幅を小さくできる。

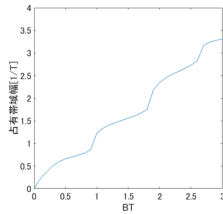


図 3 占有帯域幅

4.2 自己相関特性

図 4 に帯域幅 BT=0.5, 1, 2 の場合の M 系列と Zadoff-Chu 系列の自己相関特性を示す。M 系列では相関値は -43dB 以下とならないが、Zadoff-Chu 系列では相関値が 0 ($-\infty$ dB) となり、ダイナミックレンジを大きくできることがわかる。BT が小さくなると符号間干渉により相関値が急峻に低下しないため、距離分解能が低下する。

4.3 距離分解能

図 5 に M 系列と Zadoff-Chu 系列の、先行信号と受信信号のレベル差に対する距離分解能を示す。一般的には CFAR(Constant false alarm rate) を用いてピークの検出を行うが、今回は 2 つのターゲットがある場合の、二つのピーク間で相関値が 10dB 以上低下すると分離できると仮定した。M 系列はレベル差が 10dB, 20dB では検出できるが、30dB 以上では、検出不能となった。一方、Zadoff-Chu 系列は理想的な自己相関特性を持つためレベル差が 40dB でも検出できており、レベル差が大きい場合でも優れた距離分解能を持つことがわかる。

4.4 間引き演算による演算量低下の影響

M サンプル/シンボルでオーバーサンプリングした信号を、シンボル毎に間引いて相関値を計算すると、相関演算量を $\frac{1}{M}$ に低減できる。 $x(i)$ を符号系列、 $r(i \cdot M + k)$ を M サンプル毎の受信信号とすると、自己相関 $X(k)$ は次式で与えられる。

$$X(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N x(i) \cdot r(i \cdot M + K)^* \right| \quad (6)$$

図 6 に間引き演算の場合の自己相関特性を示す。間引き演算による自己相関特性の劣化がないことがわかる。

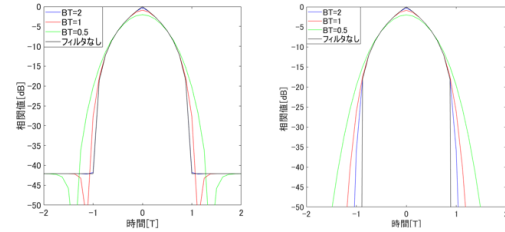


図 4 自己相関特性 (左:M 系列 右:Zadoff-Chu 系列)

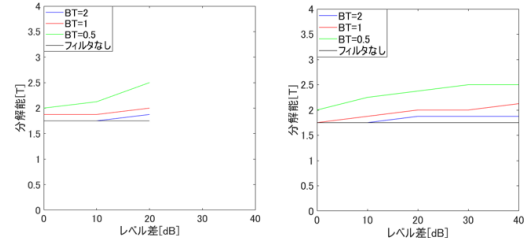


図 5 距離分解能 (左:M 系列 右:Zadoff-Chu 系列)

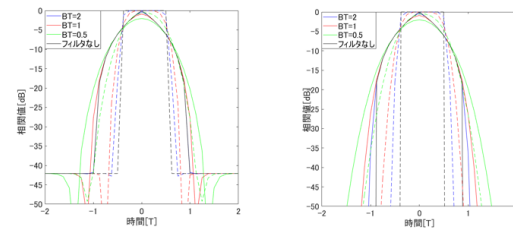


図 6 間引き演算を行った場合の自己相関特性 (左:M 系列 右:Zadoff-Chu 系列)

5 おわりに

Zadoff-Chu 系列を用いた PMCW レーダにおけるフィルタ帯域幅が相関特性に与える影響等の基本特性を評価し、ガウスフィルタの帯域幅を狭くすると、占有帯域幅を低減できるが、符号間干渉により距離分解能が劣化すること、Zadoff-Chu 系列は M 系列に比べ相関特性が優れており、ダイナミックレンジを改善できるが、距離分解能に差はないことを明らかにした。

参考文献

- [1] David Guermandi 他, "A 79-GHz 2×2 MIMO PMCW Radar SoC in 28-nm CMOS," IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 52, NO. 10, OCTOBER 2017.
- [2] Chunming Fan, 安田 明生, "測距信号として M 系列の検出性能," 電子情報通信学会論文誌, B-vol. J80-B-, No.4 pp.361-367 1997 年 4 月
- [3] Mohammed H.AlSharif 他, "Zadoff-Chu Coded Ultrasonic Signal for Accurate Range Estimation." 25th European Signal Processing Conference, ISBN 978-0-9928626-7-1, EuRASIP 2017.