

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420394

研究課題名(和文) 低サイドローブ特性を有するパルス圧縮符号に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Pulse Compression Codes with Small Sidelobe Levels

研究代表者

高瀬 浩史 (TAKASE, Hiroshi)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：80306266

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、レーダの距離分解能の向上と探知距離の増大を実現するパルス圧縮技術で用いられる符号として、サイドローブの小さな符号を見出すことである。本研究では、これまでに提案した圧縮パルスを複数のサブパルスで構成する幅広パルス圧縮符号について、符号長の長い符号を見出すために符号探索アルゴリズムの検討を行った。計算機を用いた探索の結果、従来符号と比較してサイドローブの小さな提案符号を見出すことができた。また、発見した符号のドップラー周波数特性についてシミュレーションにより評価を行い、提案符号の有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Binary codes, which are compressed to a signal with a width of several subpulses and small sidelobes, are searched using a genetic algorithm because they cannot be found by exhaustive search. We found new codes with longer code length and that the peak-sidelobe to peak-mainlobe ratios are smaller than such conventional codes as optimum binary codes. We also indicate Doppler characteristics of the codes.

研究分野：電気電子工学

キーワード：パルス圧縮 符号化 サイドローブ レーダ

1. 研究開始当初の背景

レーダに求められる重要な性能要件として、距離分解能の向上と探知距離の増大がある。レーダは雑音などに埋もれた微弱な反射信号を検出しなければならないが、送信信号として狭帯域パルスを使うことにより受信機雑音を減らすことができる。しかし、狭帯域パルスでは送信パルス幅が大きくなるため十分な距離分解能を得ることができず、距離分解能を向上させるためには送信パルス幅を狭くする必要がある。これは距離分解能がパルス幅により決まるため、また帯域幅とパルス幅には反比例の関係があることに基づいている。そして、多くのレーダでは尖頭送信電力には制約があるため、探知距離を増大させるためには送信パルス幅を広くする必要がある。一方、距離分解能を向上させるためには送信パルス幅を狭くする必要があるが、平均送信電力が小さくなり探知距離が短くなってしまふ。これらは互いに相反する問題であるが、この問題を解決する技術としてパルス圧縮がある。パルス圧縮はパルス幅の長い送信信号に変調を施し、受信時に自己相関処理を行うことで、距離分解能と探知距離の向上を実現することができる。数多くのレーダでパルス圧縮が用いられているが、近年はレーダ信号処理のデジタル化が進み、送信信号の変調に用いるパルス圧縮符号の重要性が増している。パルス圧縮後の受信信号にはメインローブの他に探知には不要なサイドローブが発生する問題がある。このサイドローブは、変調に用いるパルス圧縮符号によりその大きさが決まるため、サイドローブの小さなパルス圧縮符号がいろいろと研究されている。古くから知られているバーカー符号、最適2値符号やM系列などはサイドローブの比較的小さな符号であるが、レーダの性能を向上させるためには更なるサイドローブを低減できる符号が必要である。

バーカー符号などの従来のパルス圧縮符号は、図1(a)に示すように圧縮後のパルスは一つのサブパルス幅で構成されている。一方、研究代表者らは、図1(b)に示すような圧縮後パルスを複数のサブパルスで構成するパルス圧縮符号(以下、幅広パルス圧縮符号と呼

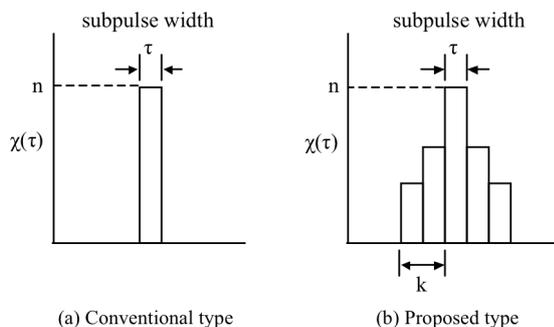


図1 自己相関関数(圧縮パルス波形)

ぶ)を提案している。これまでの研究において、幅広パルス圧縮符号として、従来のバーカー符号、最適2値符号やM系列に比べサイドローブレベルの小さな符号を発見した。

しかし、これまでに提案した非巡回2値および巡回2値の幅広パルス圧縮符号については、符号の探索時間の問題から限られた符号長についての検討に留まっており、探索が行われていない符号長についても幅広パルス圧縮符号が存在するか否かを明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

レーダではパルス圧縮技術により距離分解能の向上と探知距離の増大が実現できる。パルス圧縮では送信パルスの変調に用いるパルス圧縮符号としてバーカー符号などが知られているが、サイドローブがゼロではないため探知性能に悪影響がある。これまでに、研究代表者らはサイドローブの小さなパルス圧縮符号として、圧縮パルスを複数のサブパルスで構成する幅広パルス圧縮符号を提案している。しかし、この幅広パルス圧縮符号については、符号長が長い符号の探索には莫大な時間を要する。そこで、本研究では、組合せ最適化手法を用いた符号探索アルゴリズムを考案し、それにより符号探索を行い、従来符号に比べサイドローブの小さな符号を見出すことを目的とする。また、符号のドップラー周波数特性についても明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、幅広パルス圧縮符号の中から、バーカー符号と最適2値符号に対応する非巡回2値の幅広パルス圧縮符号を探索対象とする。幅広パルス圧縮符号の非巡回2値は符号長50までの全ての符号の組合せについて計算機を用いた探索が終了している。しかし、それ以降については計算時間が莫大となるため、全ての組合せについて探索を行うことは困難である。そこで、本研究では、符号探索を組合せ問題として捉え、最適化手法である遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, 以下GA)、焼きなまし法(Simulated Annealing, 以下SA)と粒子群最適化(Particle Swarm Optimization, 以下PSO)を用いた符号探索アルゴリズムをそれぞれ考案し、探索性能を比較評価し、幅広パルス圧縮符号に適した探索アルゴリズムを明らかにする。

また、これらの結果をもとに、幅広パルス圧縮符号を探索するアルゴリズムを決定し、実際に非巡回2値の幅広パルス圧縮符号の探索を実施する。探索で見つかった符号については、符号の詳細な特性を調べる。評価する特性としては、サイドローブ特性およびドップラー周波数特性について評価を行う。

### 3.1 幅広 2 値符号

探索対象とする非巡回 2 値幅広パルス圧縮符号について述べる. 長さ  $n$  の 2 値符号を

$$A_n = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (1)$$

とすると, この自己相関関数は

$$x(\tau) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot A_{i+\tau}^* \quad (2)$$

となる. ただし,  $\tau$  は時間シフト数,  $*$  は複素共役を表す. ここで, バーカー符号や最適 2 値符号などの従来符号は,

$$x(\tau) = \begin{cases} \text{Mainlobe}, & \text{for } \tau = 0 \\ \text{Sidelobe}, & \text{for all } |\tau| > 0 \end{cases} \quad (3)$$

を満たす自己相関関数となる. このときの圧縮パルス波形を図 1(a) に示す.

一方, 幅広パルス圧縮符号は自己相関関数が式 (4) のようになる.

$$x(\tau) = \begin{cases} \text{Mainlobe}, & \text{for } k \geq |\tau| \geq 0 \\ \text{Sidelobe}, & \text{for all } |\tau| > k \end{cases} \quad (4)$$

ここでは  $k \geq 0$  とする. この  $k$  は圧縮パラメータであり, 圧縮パルスの波形において隣接する片側のサブパルスの個数を表す. 式 (4) は  $k=0$  のとき, 式 (3) と同じになり従来符号を示し,  $k \geq 1$  のとき, 幅広パルス圧縮符号を示す. 図 1(b) に  $k=2$  の場合の圧縮パルス波形を示す.

幅広パルス圧縮符号は, 従来符号との比較を行う場合, 圧縮比 (Compression Ratio: CR) が同程度の符号同士で行う. 圧縮比は, 圧縮前のパルス幅と圧縮パルス幅の比で定義する.

### 3.2 遺伝的アルゴリズム

本研究では, 符号探索アルゴリズムを考案するにあたり, 組合せ最適化手法として GA, SA, PSO の適用を検討した. そのうち, GA については各種パラメータの設定がしやすく, 探索結果が良好であった. そこで, 符号探索アルゴリズムには GA を採用した.

図 2 に GA を用いた探索アルゴリズムのフローチャートを示す.

適応度関数は式 (5) のように定義する.

$$F = |S_p / M_p| = \left| 20 \log_{10} \left( \frac{\text{Peak Sidelobe}}{\text{Peak Mainlobe}} \right) \right| \quad (5)$$

### 3.3 特性評価

符号の特性評価は, サイドローブ特性およびドップラー周波数特性を計算機シミュレーションにより実施する. シミュレーションには MATLAB/Simulink を用いる.

#### (a) サイドローブ特性

サイドローブ特性は, 発見された符号の自己相関関数を計算し, メインローブのピーク値とサイドローブのピーク値の比 ( $S_p/M_p$ ) から求めることができる. この値が小さいものほどサイドローブ特性が優れていることを意味する. 従来符号と幅広パルス圧縮符号では,

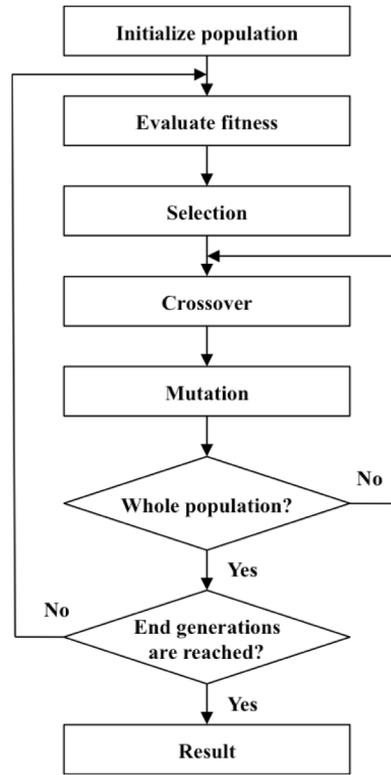


図 2 GA を用いた探索アルゴリズム

同じ符号長でも圧縮後のパルス幅が異なる. そこで, 圧縮前の送信パルス幅と圧縮後パルス幅の比から求まる圧縮比を求め, 同程度の圧縮比におけるサイドローブ特性を比較し評価する.

#### (b) ドップラー周波数特性

(a) のサイドローブ特性は静止目標の場合であるが, レーダでは目標物が移動体の場合も考えられる. そのとき受信する反射信号にはドップラー偏移が含まれることから, ドップラー偏移の影響を考慮したサイドローブ特性についても評価を行う.

## 4. 研究成果

本研究では, 従来符号に比べサイドローブの小さな幅広パルス圧縮符号を探索するために, 組合せ最適化手法を用いた符号探索について検討を行った. 非巡回 2 値幅広パルス圧縮符号を対象として, 探索アルゴリズムを考

表 1 GA パラメータ

Population size	300
Maximum generation	1000
Selection	Roulette wheel selection
Crossover	Uniform crossover 10%
Mutation	10%



縮符号と従来符号のドップラー周波数特性の一例を示したものである。提案符号はドップラー偏移が加わっても小さなサイドローブを維持していることが分かる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 神力正宣, 高瀬浩史, Binary Codes for Multi-range-resolution Radar and Pulse-compression Properties, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 査読有, Vol.50, No.2, 2014, pp.1549-1555  
DOI:10.1109/TAES.2014.120643
- ② 高瀬浩史, 神力正宣, A Dual-use Radar and Communication System with Complete Complementary Codes, 査読有, Proceedings of International Radar Symposium 2014 (IRS2014), 2014, CD-ROM, pp.1-4  
DOI:10.1109/IRS.2014.6869268
- ③ 高瀬浩史, 神力正宣, Search of Binary Pulse Compression Codes for Multi-range-Resolution Radar, 査読有, Proceedings of 16th International Radar Symposium (IRS2015), 2015, Vol.2, pp.1088-1093  
DOI:10.1109/IRS.2015.7226258
- ④ 高瀬浩史, 星野翔太, 神力正宣, Search of Binary Pulse Codes Compressed to Several Subpulses using Genetic Algorithm, 査読有, Proceedings of 17th International Radar Symposium (IRS2016), 2016, CD-ROM, pp.1-4  
DOI:10.1109/IRS.2016.7497274

[学会発表] (計1件)

- ① 星野翔太, 高瀬浩史, 神力正宣, GAを用いた幅広2値符号の探索アルゴリズムの検討, 平成26年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.1613-1617, 2014年9月4日, 島根大学(島根県)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高瀬 浩史 (TAKASE, Hiroshi)  
日本工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 80306266

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし

(4) 研究協力者  
なし