

# 非周期相関低サイドローブ複素符号を用いた パルス MIMO レーダーへのフロントエンド特性の影響

芝 隆司† 渡辺 優人† 秋田 学† 稲葉 敬之†

† 電気通信大学大学院 情報理工学研究所 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: shiba.takashi@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし 1次符号に非周期相関低サイドローブ複素符号を、2次符号にWalsh符号を用いた周期型パルスレーダーのMIMO化方法を提案している(既報)。本報告では、以前我々が開発したレーダー解析用RF回路シミュレータを用い、前記MIMO型パルスレーダーのRFフロントエンド特性を含む特性を計算し、先ず、直交符号が割り当てられた各アンテナ特性の独立性の確認を行った。また、そのシミュレーションの際に明確となった、フロントエンド回路の非線形歪とそのサイドローブ特性に及ぼす影響についても報告する。

キーワード 非周期相互相関、複素符号、直交符号、サイドローブ、Walsh符号、符号多重

## Effect of Front-end Characteristics on Sidelobe of Pulse MIMO Radar Using Complex Sequence with Low Sidelobe Aperiodic Correlation

Takashi SHIBA† Masato WATANABE† Manabu AKITA† and Takayuki INABA†

Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications 1-5-1 Chofugaoka,  
Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: shiba.takashi@inabalab.ee.uec.ac.jp

**Abstract** MIMO method of periodic pulse type radar using complex sequence with low sidelobe aperiodic correlation as 1st modulation code and Walsh sequence as 2nd modulation code has been already reported. RF-simulation for Radar analysis has been also reported. We confirmed independency of each Tx-antenna signal which were applied orthogonal codes by the above RF-calculating whole characteristics including RF front-end in this report. We also reported effects of nonlinearity on RF front-end for sidelobe characteristics.

**Keywords** Aperiodic self-correlation, Complex code, Orthogonal code, Sidelobe, Walsh sequence, MIMO, Code division multiplex, Pulse radar

### 1. まえがき

UWB(Ultra Wide Band)パルス方式レーダーの高探知距離化を狙った、High Pulse Repetition Frequency(以下 HPRF と略す)レーダーの Ambiguity 性排除の為、信号パルスに符号変調を掛けた、PCHPRF(Phase Coded HPRF)レーダー [1][2] が検討されている。さらに我々は、MIMO (Multi Input Multi Output) 用の各アンテナ送信信号に、2次符号として直交性を有する Walsh Sequence(以下 WS-Code と記す)を割り当て、2次符号変調によるサイドローブ劣化を抑える為に、1次符号に

非周期相関低サイドローブ複素符号を用いる方式 [3] を提案した。一方、我々は、レーダーにおける、RF フロントエンド部分の影響を調べるため、レーダー用の RF シミュレータ [4] を開発した。

本報告では、レーダーフロントエンド部分通過後の信号に関して、この方式におけるアンテナ送信信号の独立性、即ち符号相関の直交性を、前述の RF シミュレーションを用いて確認し、さらに、上記計算過程で明らかとなった、送信フロントエンド部分の非線形性(2次、3次の歪み定数)と受信信号サイドローブ特性との関係に関して報告する。

## 2. 非周期相関低サイドローブ符号

まず、非周期相関低サイドローブ符号に関して説明を行う。2つの符号列をベクトル表現を模して、

$$\{A\} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_{N_1}\} \quad \text{-----(1)}$$

$$\{B\} = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_{N_2}\} \quad \text{-----(2)}$$

と表した場合、1次符号{A}に2次符号{B}の変調を施した後の符号{C}を

$$\{C\} = \{A\}\{B\} \equiv \{a_1 b_1, \dots, a_{N_1} b_1, a_1 b_2, \dots, a_{N_1} b_2, \dots, a_1 b_{N_2}, \dots, a_{N_1} b_{N_2}\} \quad \text{-----(3)}$$

と定義する。また、符号{C}と符号{D}の相関特性{E}は、畳み込み積分となり、

$$\{E\} = \{C\}_{n=1-N_1} \otimes \{D\}_{n=1-N_2} = \sum_{n=1}^{N_2} \{c_{m+n} d_n\}_{m=0-N_1-N_2} \quad \text{-----(4)}$$

と表される。

まず、前述のPCHPRF方式レーダーで用いられるIpatov符号を例として、自己相関サイドローブに関して説明する。符号長Ncode=624のIpatov ternary sequence[5](以下簡単のため、符号長と一緒にIpatov624と記載する。以下の符号表現も同様の表現を用いる)の自己相関特性を図1に示す。図1は、符号列{A}をIpatov624(送信側)とし、変調符号列{B}={1,1,-1}とし、得られた符号列{C}と、符号列{D}をIpatov624(受信参照信号側)として相関を取った場合の、出力符号列{E}の絶対値を示したものである。良く知られているように、Ipatov符号等の周期相関符号は周期相関値(即ち上記{B}が{1,1,1,----}の場合)のサイドローブがゼロとなるため、同図(a)左半分のサイドローブ特性はゼロとなる。一方、非周期相関値(例えば上記{B}が{1,-1,1,-1,----}の場合)は有限値となるため、同図右半分のように、サイドローブ特性は劣化する。この問題は、これらの周期相関符号に2次符号変調をかけて、直交化を試みる場合の障害となる。

一方で、従来より、非周期相関のサイドローブを抑圧する符号の探索[6]は行われている。我々も独自の方法で、相関波形のサイドローブ劣化が充分小さい符号[3](非周期相関低サイドローブ符号, Aperiodic correlation Low Sidelobe Code, 以下LS-Codeと称する事とする)を、非線形最適化探索法を用いて見出した。また、同時に、上記LS-Codeを1次、2次符号として変調を掛けた符号もLS-Codeである事[3]を示している。図1の(b)はこのようにして、LS-Code8から求めたLS-Code512(8x8x8)の非周期自己相関特性(上記

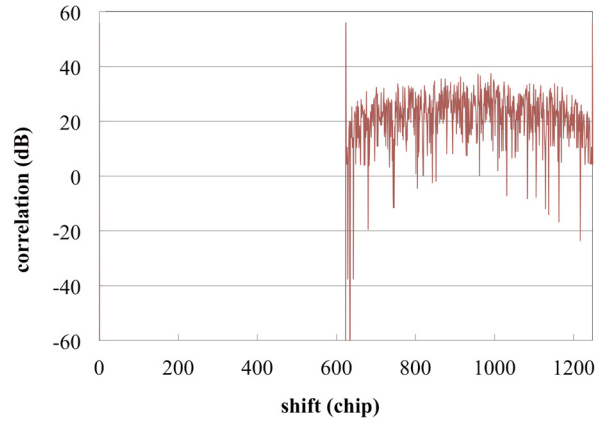


図1 2次符号変調{1,-1}で変調されたIpatov624の自己相関特性

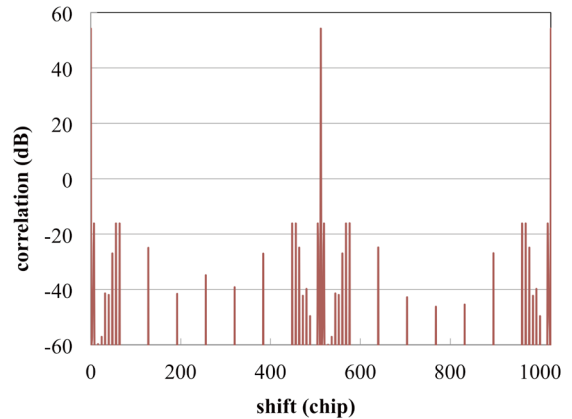


図2 2次符号変調{1,-1}で変調されたLS-Code512(非周期相関低サイドローブ複素符号)の自己相関特性

の{B}={1,1,-1}に相当)である。サイドローブ特性は、Peak/S(ピークとサイドローブ最大サブピークとの比)70dBが得られ、レーダー信号として用いる事が可能なレベルであると考えられる。以下、このLS-Codeを用いた、レーダーの送信アンテナ信号を直交化させる方法に関して記載する。

## 3.LS-codeとWS-codeを用いたパルスレーダーの送信信号の多重化

本提案法は1次符号に前節のLS-Codeを用い、(3)式による変調用の2次符号として、Walsh Sequence, WS-Codeを用いるものである。図2に本報告で想定しているアンテナ出力信号の時間配列を示す。送信信号は時分割多重を想定している。図では2次符号として符号長Nws=4のWS-Code4を用い、アンテナ数もWS-Codeの直交符号数4とした場合である。本方式では、WS-Codeの符号数が送信アンテナ数(あるいはそれ以下)となるため、アンテナ数に応じたWS-Code長を設定する必要がある。本方式はパルスレーダー一般

に適用可能であるが、ここでは、PCHPRF レーダーを例として説明する。図9に、本提案法によるPCHRF レーダー用の信号処理例を示した。図は、1個の受信アンテナ信号に対応する送信信号識別方法に関するものである。受信した信号は、先ずアンテナからの出力単位をZとした、 $N_{code} \cdot N_{ws}$ の符号列に分割し、得られた $N_{seq}$ 個のそれぞれの符号を、列方向にフーリエ変換し、ドップラー周波数領域の符号信号に変換する。次に、得られた信号に、LS-Codeの受信参照信号LS-Code(r)を1次符号、WS-Codeを2次符号とした、(3)式による変調符号を参照信号として、(4)式による相関処理を行い、各ドップラー周波数毎の目標信号(相関ピーク)を得る。

各相関信号のサイドローブ特性と各アンテナ信号の直交性を確認するため、目標に相対速度成分は含まず(従ってドップラー周波数 $v=0$ )、符号繰り返し数 $N_{seq}=1$ としてベースバンド信号でシミュレーション検討を行った。信号は遅延時間成分を持たない信号と、各アンテナ信号に遅延時間100,200,300,400chipを与えて合成した複合信号を、2次のWS-Codeのみを変えて相関処理を行った。図10はその結果である。(a)が2次のWS-Code  $WS1=\{1,1,1,1\}$ , (b)が  $WS2=\{1,1,-1,-1\}$ , (c)が  $WS3=\{1,-1,-1,1\}$ , (d)が  $WS4=\{1,-1,1,-1\}$ に対応した信号である。各相関信号共、他のアンテナからの妨害信

号は見られず、各アンテナ信号の遅延時間に対応した遅延信号が観測され、直交性が確認された。また、サイドローブ特性も、フロントエンドRF特性の影響が無い状態では、 $Peak/S=70dB$ の良好な特性が得られている。

上記計算ではレーダーフロントエンド部の影響は考慮されていないが、実際には、RFフロントエンド部分の影響を受け、パルス波形は鈍り、また符号間の干渉も発生する可能性が有る。次章では、フロントエンド部分の影響を考慮したシミュレーションを行い、各アンテナからの信号の独立性を検証する。

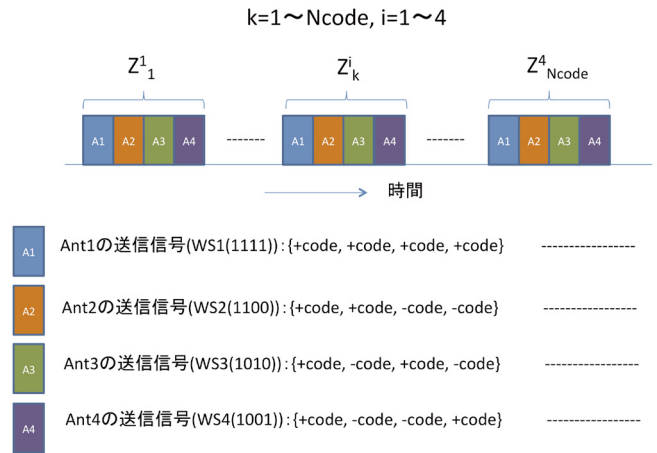


図3 Ant. 出力信号の時分割出力配列

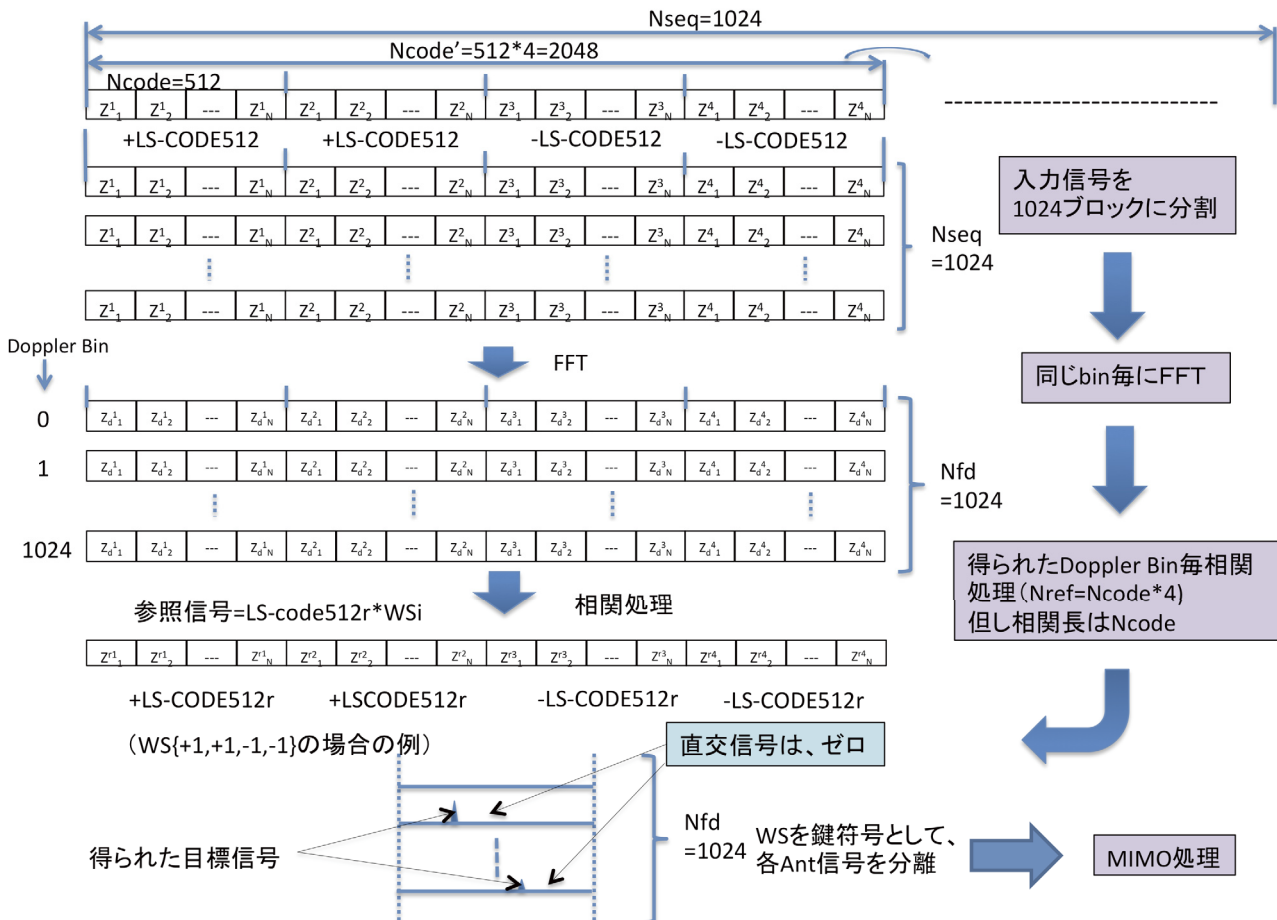
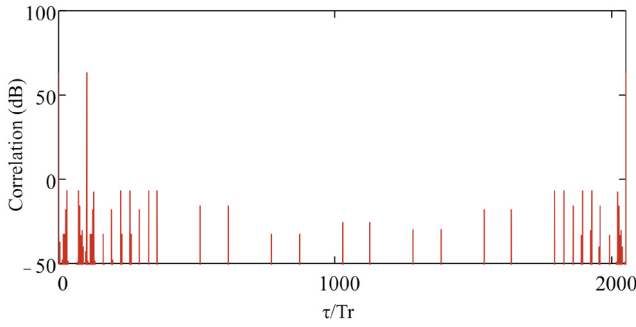
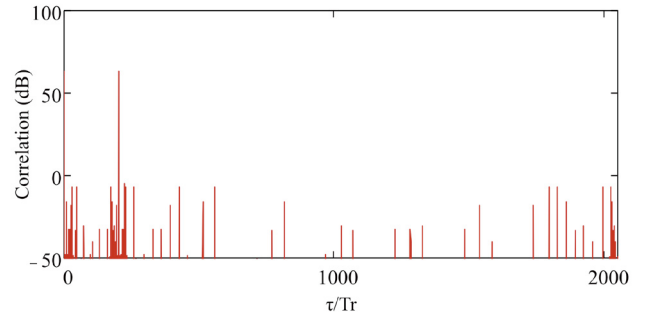


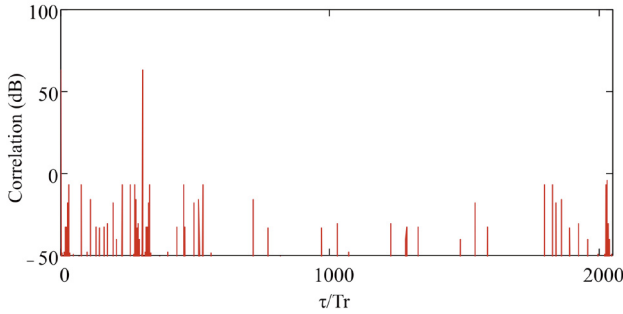
図4 1次符号にLS-Code512, 2次符号にWS-Code4を用いたMIMO用Ant. 信号識別方法



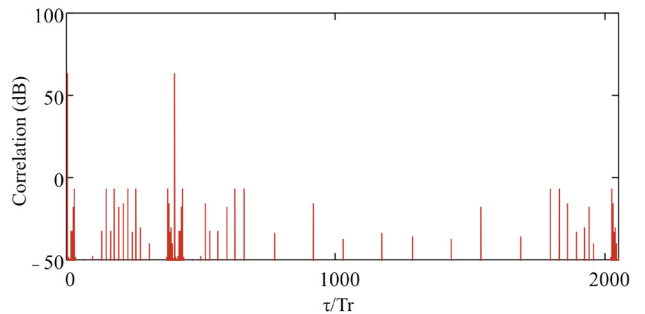
(a) 2次符号変調 {1, 1, 1, 1} に対応した符号の相関特性



(b) 2次符号変調 {1, 1, -1, -1} に対応した符号の相関特性



(c) 2次符号変調 {1, -1, 1, -1} に対応した符号の相関特性



(d) 2次符号変調 {1, -1, -1, 1} に対応した符号の相関特性

図5 各Walsh符号(各Txアンテナ)に対応した信号出力(ベースバンド)結果

#### 4. フロントエンドRF特性を考慮した場合の各アンテナ信号の独立性

本章では、我々が開発したRFシミュレータを用い、レーダーフロントエンド部分の特性の各送信アンテナ信号間相互の影響(独立性)を調べる。我々が開発した1T1Rのパルスレーダー試作機[7]のシステムブロックを図6に示す。中間周波数(IF)を8GHzとし、任意信号発生器から直接8GHzのIF信号を出力して、RF部に入力している。信号源として任意信号発生器を用いているため、パルスレーダーの方式は、比較的任意に選ぶ事が可能である。RF部に入力されたIF信号は、71.5GHzのLocal信号でアップコンバートされ、79.5GHzのRF信号としてPower Amp(PA)から出力される。受信側では、上記Local信号を用いて同様に8GHzにダウンコンバートされ、さらに、任意信号発生器から出力される2GHzの基準信号から形成した8GHzのLocal信号

を用いて、IQ-Mixerによりベースバンド信号が得られる。また、得られたベースバンド信号は、2GHzで送信側とキャリア同期を取って、A/D変換されてデジタル信号として格納される。

上記装置を複数台、送信受信で配置した構造が、所謂MIMOで有るが、問題となる部分は送信信号の独立性であるため、ここでは受信1とした。例として、4Tx-1Rxの場合に関して、RFシミュレーションのフローとして表したものが図7である。フロントエンド部分のフィルタにより帯域制限される事により、出力されるパルスは裾特性が広がる。また、本シミュレーションでは、系の分散特性もフィルタの遅延時間特性として考慮している。また、任意信号発生器のデジタル量子化の影響も、また、受信AD変換器のデジタル量子化の

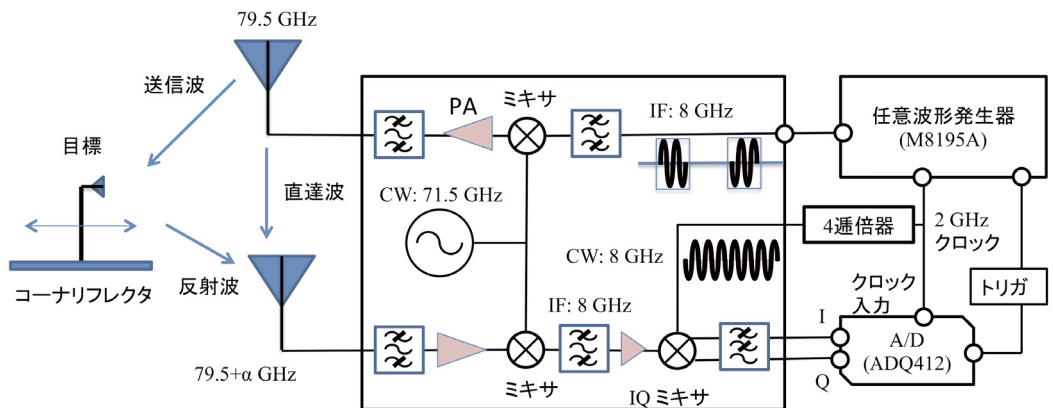


図6 パルスレーダー試作機のシステムブロック

影響も考慮している。また、さらに、フロントエンドの非線形効果はPAの歪み定数として考慮した。

得られた信号を図8に示す。(a)～(d)は、その信号に、一次符号をLS-Code512受信用符号とし、2次符号にそれぞれ4符号長のWalsh符号で変調した符号を、参照信号として上記のデータと相関を取った結果である。また、各アンテナ信号の区別を付けるため、各信号の目標信号を2m刻みで遠くへ離している。(実際には、各アンテナから目標までの距離差は僅かであるが、信号の違いが観測できるように、ここでは2mと大きな距離差とした。) (a) (b) (c) (d)の順に、2m毎に、直達波から遠ざかって

おり、また、別のアンテナ信号からの影響も見られない。この結果より、実際のRFフロントエンド部分を含むレーダーでも、送信アンテナ信号の独立性が保たれ、MIMO化が可能であると予想される。

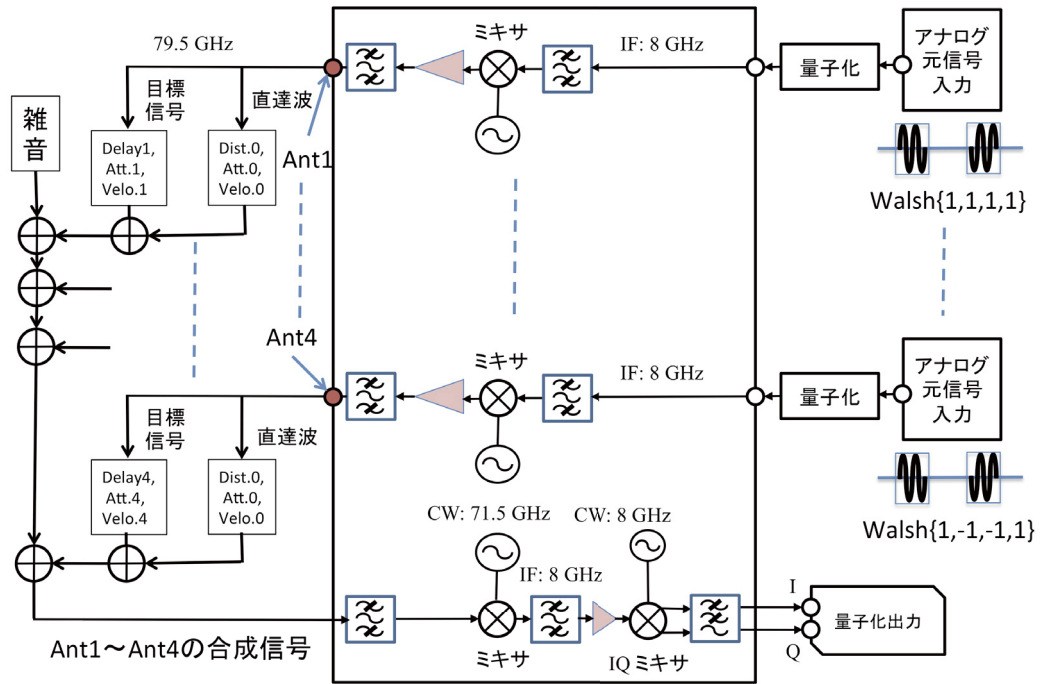
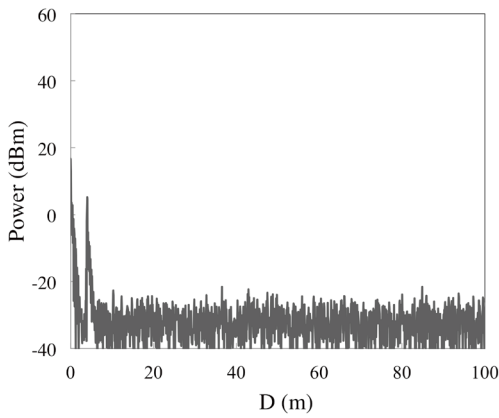
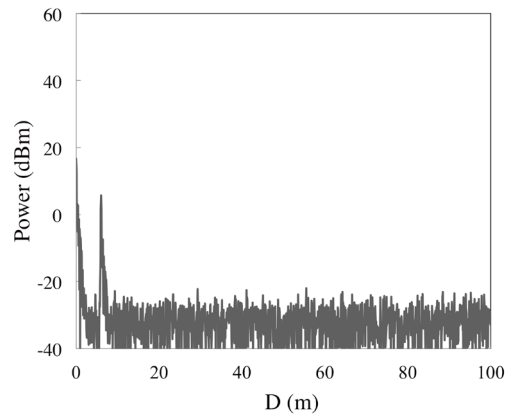


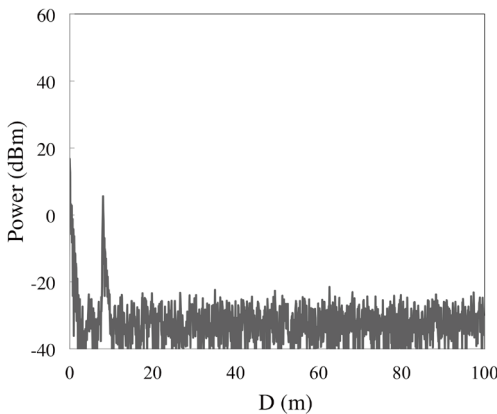
図7 RFシミュレーションの処理フロー



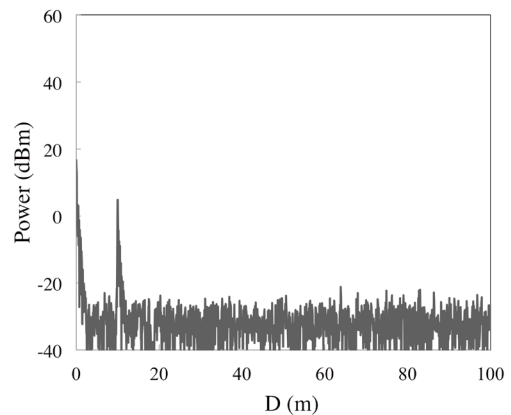
(a) 2次符号変調 {1, 1, 1, 1} に対応した符号の相関特性



(b) 2次符号変調 {1, -1, 1, -1} に対応した符号の相関特性



(c) 2次符号変調 {1, 1, -1, -1} に対応した符号の相関特性



(d) 2次符号変調 {1, -1, -1, 1} に対応した符号の相関特性

図8 各Walsh符号(各Txアンテナ)に対応した受信信号出力(RF信号)結果

5. フロントエンドの非線形特性と  
サイドローブ特性の関係

この章では、前述の RF シミュレータを用い、フロントエンド部の PA 部分の非線形性が LS-Code の受信相関信号のサイドローブ特性に及ぼす影響を調べた。図 8 が 2 次の Output Intercept Point (OIP2) 依存性、図 9 が 3 次の Output Intercept Point (OIP3) 依存性である。図中実線が Peak/S (ピークとサイドローブ最大サブピークとの比)、破線が Peak/Sm (ピークとサイドローブの平均電力の比) である。ここで、本検討の目的が、歪み定数とサイドローブの関係を明確にすることであるから、シミュレーションは、雑音を付加せず、またサイドローブ特性に比較的影響の強い送信側のデジタル量子化の幅を (実際の試作機では 8bit であるが,) 受信と同じ 12bit として計算を行った。図 8, 9 から分かるように、OIP2 の影響は見られず、逆に OIP3 の依存性が高い事が分かる。また、CW リークの影響がサイドローブの OIP3 依存性に与える影響も大きい事 [8] が知られているが、ここでは OIP3 の影響を調べる事が目的であるため、CW リークは考慮していない。この事から、特に本システムで遠距離信号を観測する必要がある場合は、近距離信号のサイドローブの影響を抑えるため、3 次歪み特性の良好な PA を用いる必要があることが分かった。

6. むすび

本稿では、1 次符号に LS-Code を用い、2 次符号に WS-Code を用いて、MIMO 用の送信アンテナに対応した送信信号振り分けを行う方法を、RF シミュレーションを用いて実環境に近い条件でシミュレーションを行った結果は、各信号間の直交性が確保されている事が分かった。また、上記 RF シミュレーションを用い、RF フロントエンド部の非線形性とサイドローブ特性の関係を求めた結果、OIP3 依存性が大きい事が分かった。

謝辞

本研究開発の一部は、総務省 SCOPE (受付番号 175003002)」の委託を受けたものです。

文献

[1] Levanon, N., "Mitigating Range Ambiguity in High PRF Radar using Inter-Pulse Binary Coding," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on , vol.45, no.2, pp.687,697, April 2009.

[2] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, "UWB インパルスレーダにおけるパルス間周期符号変調による遠距離性の改善," 信学論 (B)Vol.J97-B,no.7pp.556-564,Jun.2014

[3] 芝隆司, 渡辺優人, 石井雅博, 秋田学, 稲葉敬之, "PC-HPRF 方式多重化のための非周期相関低サイドローブ複素符号," 信学技報 SANE2015-48 (2015-10)

[4] 芝隆司, 渡辺優人, 石井雅博, 秋田学, 稲葉敬之, "PC-HPRF 方式レーダー用 RF シミュレーションの開発," 信学技報 MW2015-134 (2015-12)

[5] V. P. Ipatov, "Ternary sequences with ideal autocorrelation properties", Radio Eng. Electron. Phys., vol. 24, pp.75 -79 1979.

[6] H. He, P. Stocia and J. li, "On aperiodic-correlation bounds", IEEE Signal Process. Lett., vol. 17, no. 3, pp. 253-156, Mar. 2010.

[7] 芝隆司, 渡辺優人, 石井雅博, 秋田学, 稲葉敬之, "PC-HPRF 方式 79GHz 帯ミリ波レーダー実験用試作機の開発," 信学技報 SANE2016-113 (2017-01)

[8] T. Shiba, M. Watanabe, M. Ishii, M. Akita and T. Inaba, "Nonlinear Effects for Sidelobe Characteristics of Pulse Radar," 2017 IEEE MTT-S International Conference on Microwave for Intelligent Mobility (ICMIM), pp.41 -44, Mar. 2017.

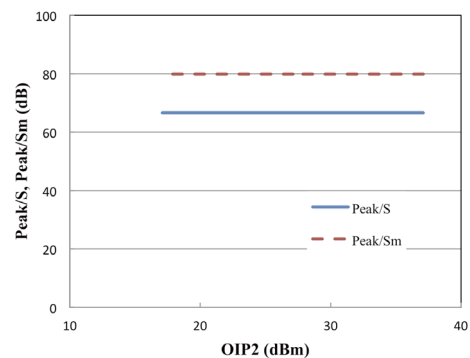


図 9 サイドローブ特性のフロントエンドの OIP2 依存性

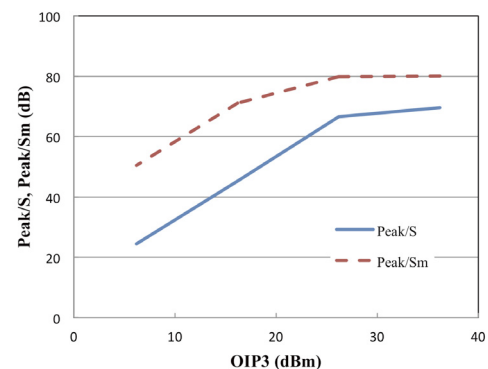


図 10 サイドローブ特性のフロントエンドの OIP3 依存性