

Ipatov 完全周期符号の距離・ドップラ特性

渡辺 優人[†] 山下 遼[†] 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: watanabe.masato@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし インパルスレーダの送信繰り返し間隔(PRI)を HPRF(High Pulse Repetition Frequency)化し、パルス間で符号変調する PC-HPRF(Phase Code HPRF)方式を提案している。本方式は、高い距離分解能と HPRF による広い速度視野、およびインパルスレーダで課題となる探知距離性能を大きく改善可能とした上で、パルス間符号化により距離アンビギュイティを推定可能な方式である。このとき、HPRF であるため用いる符号は周期符号であることが望ましい。本稿では、完全周期符号である 2 つの Ipatov 符号について距離・ドップラ特性について評価し、ドップラシフト毎のサイドローブ特性について他の符号と比較する。

キーワード Ipatov 符号, 周期的自己相関, サイドローブ

Range and Doppler Characteristics of Ipatov perfect cycle code

Masato WATANABE[†] Ryo Yamashita[†] Manabu Akita[†] and Takayuki INABA[†]

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

E-mail: watanabe.masato@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract PC-HPRF(Phase Code HPRF) radar that use Inter-pulse Cyclic Coding and adopting HPRF (High Pulse Repetition Frequency) mode at impulse radar have proposed. The method improve long range performance of term in the impulse radar and mitigates the range ambiguity problem on HPRF mode by inter-pulse coding. In this case, it is desirable to use periodic code because HPRF mode. In this paper, characteristic of two ipatov codes which is a complete cycle code is show and compare other phase codes.

Keywords Ipatov code, Periodic autocorrelation, Side-lobe

1. まえがき

高分解能を実現するレーダの 1 つとしてインパルスレーダが知られている。インパルスレーダは時間幅の狭い短パルス(すなわち、広帯域)を送信するため、距離分解能に優れる。しかし、法定的にも送信電力が制限されており、また広帯域であるがゆえに受信雑音が増加し遠距離目標探知が困難とされている。

そこで、インパルスレーダの送信パルス繰り返し間隔(PRI)を目標までの電波往復時間より短くする HPRF(High Pulse Repetition Frequency)化し、パルス間で符号変調する PC-HPRF(Phase Code HPRF)方式を提案している。本方式は、高い距離分解能と HPRF による広い速度視野、およびインパルスレーダで課題となる探知距離性能を大きく改善可能とした上で、パルス間符号化により距離アンビギュイティを推定可能な方

式である。このとき、送信パルス列との相関処理などにより、PRI 単位の未知の時間遅延(PRI 遅延)である距離アンビギュイティを推定するため、周期相関に優れ、かつ相関処理量を低減するために、用いる符号は周期符号を用いる。その中でも、完全周期符号は 0 ドップラするとき、サイクリック自己相関がタイムラグ=0 以外で完全に 0 となる。しかし、ドップラの影響によりサイドローブ特性が劣化する。

本稿では、完全周期符号である Ipatov binary sequence(Ipatov 符号 1)[1][2]、および Ipatov ternary sequences(Ipatov 符号 2) [3][4]の距離・ドップラ(いわゆるアンビギュイティ関数)特性について評価し、ドップラシフト毎のサイドローブ特性について、M 系列、P4 符号と比較する。

2. Ipatov 符号

本検討では、図 1 に示す 121 ビットの Ipatov binary sequence (Ipatov 符号 1) を用いる。図 1 において、横軸は PRI で規格化した時間 t を表す。Ipatov 符号 1 は、 $\{1, -1\}$ の 2 値から構成され、送信符号と同じ長さの参照符号とのミスマッチドフィルタにより、サイドローブフリーな周期相関が得られる。A/D 変換後のデジタルデータに対して、相関処理を実施することから送信符号と異なる参照信号を用いることは問題とならない。しかし、符号長に制約があると同時に、ミスマッチドフィルタであるため S/N 比 (Signal to Noise Ratio) にこの場合、0.46dB の損失が発生する。

一方、 $\{1, 0, -1\}$ の 3 値からなる 183 ビットの Ipatov Ternary sequences (Ipatov 符号 2) を図 2 に示す。一般的なパルス内変調によるパルス圧縮レーダにおいて、“0” はパルス内の送信中断を意味するため使用されない。一方、パルス間符号化では、各符号を 1 つのパルスに割当ててため、“0” はあるパルスの送信休止となり、Ipatov 符号 2 の使用は検討に値する。Ipatov 符号 1 に対して、参照符号に送信符号の時間反転信号を用い、マッチドフィルタとなり S/N 損失が発生しない。しかし、観測時間あたりの送信エネルギーにロスが生じ、積分処理による S/N 比改善で同じ符号数と比較して 0.35dB 劣る。

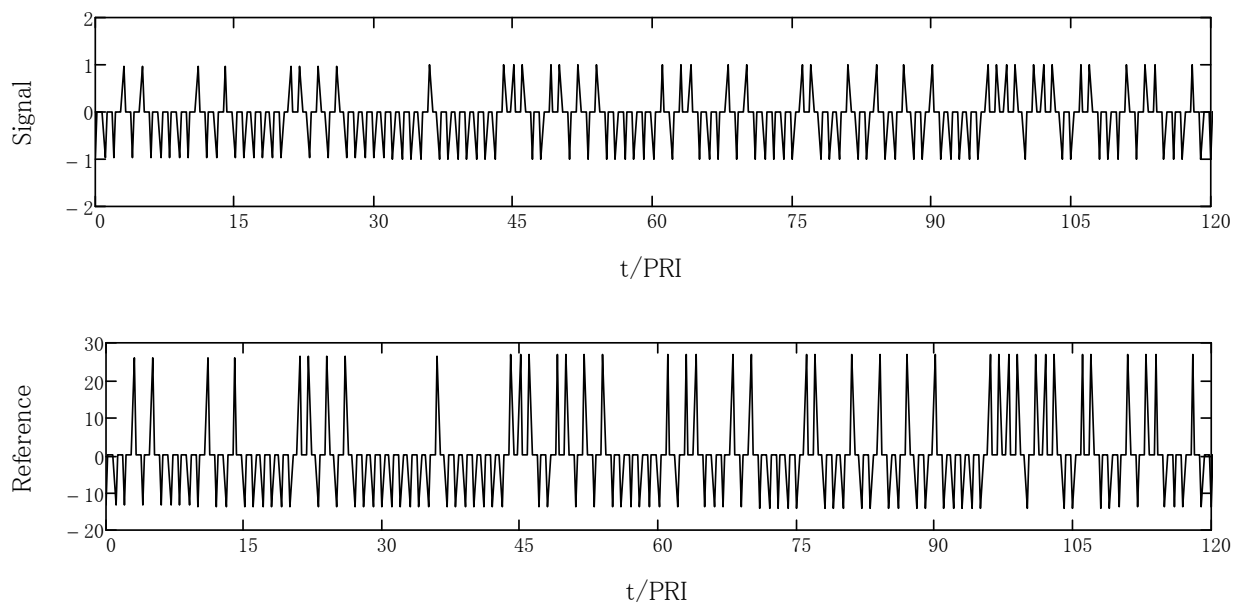


図 1 Ipatov 符号 1 の送信パルス(上)、参照パルス(下)

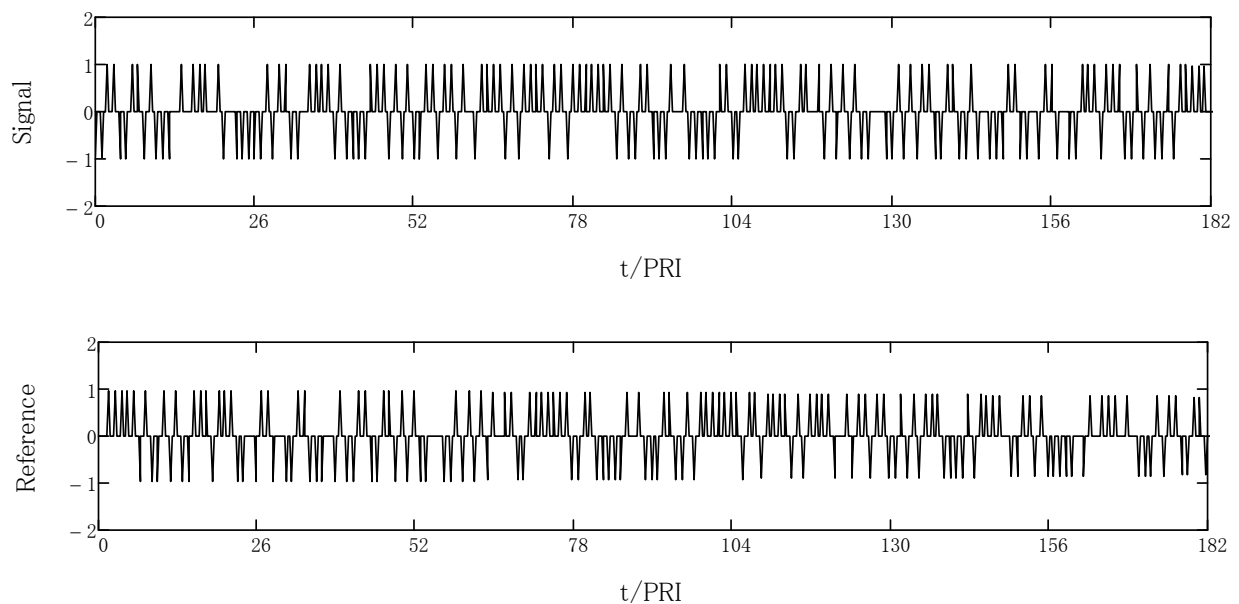


図 2 Ipatov 符号 2 の送信パルス(上)、参照パルス(下)

PC-HPRF方式では、パルス間符号化した信号に対して、送信パルスとの相関処理を文献[5]に示す方法により処理する。図3, 4, 5に送信パルス列との相関処理により、同じレンジビンに等速で異なるPRI遅延を持つ2目標環境でのPRI遅延推定結果を示す。

表1 レーダパラメータ
Table 1 Radar Parameter.

Transmit Frequency	79GHz
Bandwidth	1GHz
Pulse width	1ns (Range : 0.15m)
PRI	4ns (Range : 0.6m)
Repetition M	2048

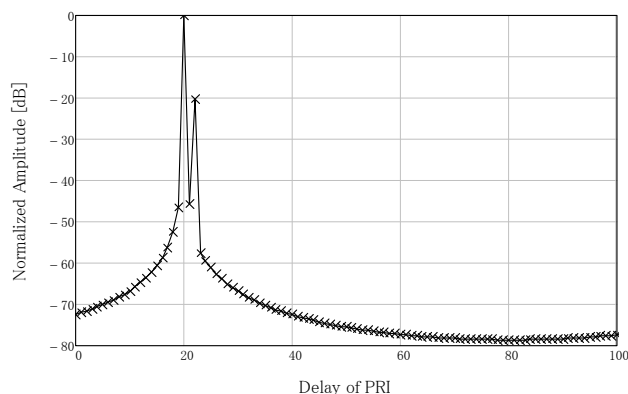


図3 多目標環境でのPRI遅延推定結果(P4符号)

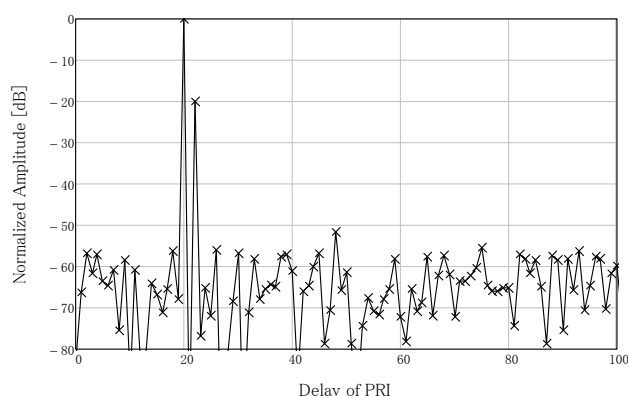


図4 多目標環境でのPRI遅延推定結果(Ipatov符号1)

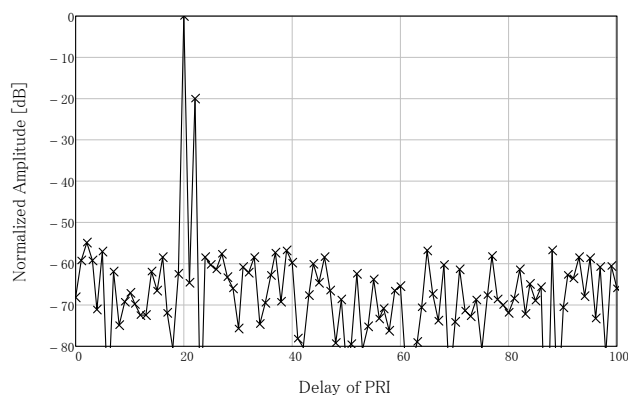


図5 多目標環境でのPRI遅延推定結果(Ipatov符号2)

図3,4,5の横軸はPRI単位の未知の時間遅延(PRI遅延)を、縦軸は第1目標の振幅により規格化した振幅を表す。設定した条件は、第1目標のPRI遅延を20、第2目標を22とし、信号振幅は第1目標に対して第2目標が20dB小さいとした。目標に与えたドップラ周波数は、ドップラ周波数分解能 $\Delta f (=1/PRI \cdot N \cdot M)$ より、 $10.5 \Delta f$ とした。ここでNは1周期の符号長、Mは送信符号の周期数を表す。

図3,4,5よりいずれの場合もドップラがあるため、サイドローブは完全に0とならず悪化する傾向を示す。PRI遅延方向のサイドローブ特性は同じレンジビン上に等速で異なる遅延PRIを持つ目標があるときに影響する。インパルスレーダでは、表1を例にするとHPRFであるため送信デューティ比を25%とすると、PRIは4nsecと短く、遅延PRIは0.6mとなる。このとき、目標のニアサイドローブ特性は目標分離において重要な性能となる。

図3より、P4符号(121符号)[6]では強信号と弱信号の間のサイドローブは遅延PRIが80付近の-78dBと比較して高く、近接2目標環境において目標の分離に影響する可能性があると考えられる。一方、図3, 4よりIpatov符号1,2ではドップラがある条件においてもサイドローブが急峻に落ち、遅延PRIが80付近のサイドローブとほぼ同じ特性を示す。しかし、この条件においてはP4符号と比較してサイドローブは高い傾向を示す。文献[5]に示すPRI遅延推定法では、まずドップラ周波数を推定し、ドップラ周波数チャンネル毎にPRI遅延を推定する。推定したドップラ周波数を用いてドップラ周波数の補正を行うと、補正値は推定値(速度分解能で分けられた離散値)であり補正誤差が発生する。

3. 距離・ドップラ特性比較

図1, 2に示すIpatov符号1, 2の送信信号を16周期使用したときの距離・ドップラ特性を示す。このとき参照符号は図1, 2を用いた。図6, 7にIpatov符号1の距離・ドップラ特性を示す。ここで、送信パルス幅 $T_p=1$ 、PRIは4とし、速度分解能 $\Delta V = \lambda/2(N \cdot PRI \cdot M)$ および速度視野は $f_{max} = \lambda/2(2 \cdot N \cdot PRI)$ である。

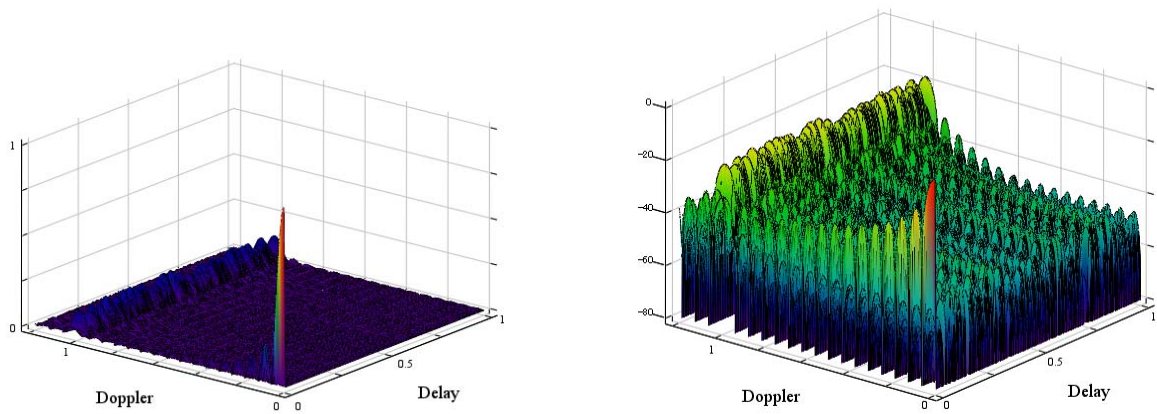


図 6 PRI 遅延、ドップラ特性 (Ipatov 符号 1)

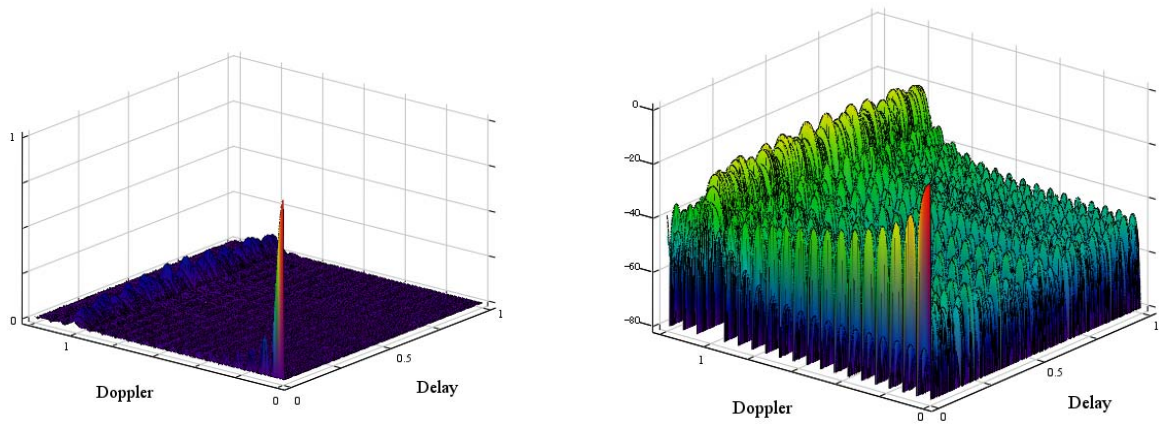


図 7 PRI 遅延、ドップラ特性 (Ipatov 符号 2)

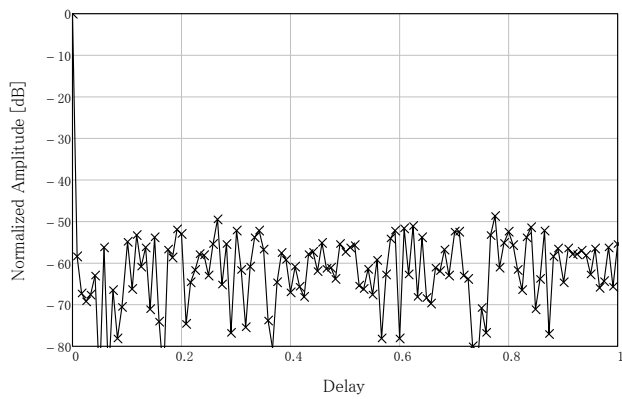


図 8 目標近傍での特性 $\Delta v/8$ (Ipatov 符号 1)

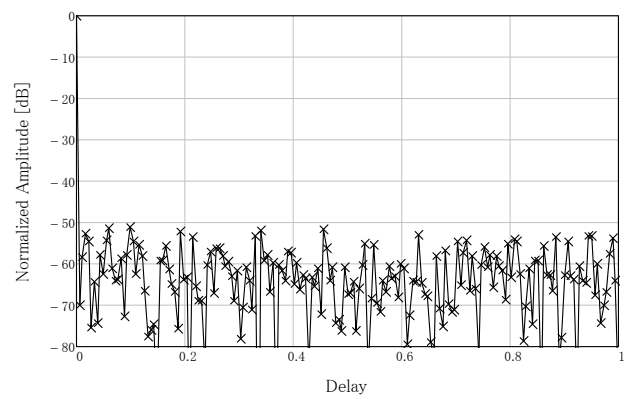


図 9 目標近傍での特性 $\Delta v/8$ (Ipatov 符号 2)

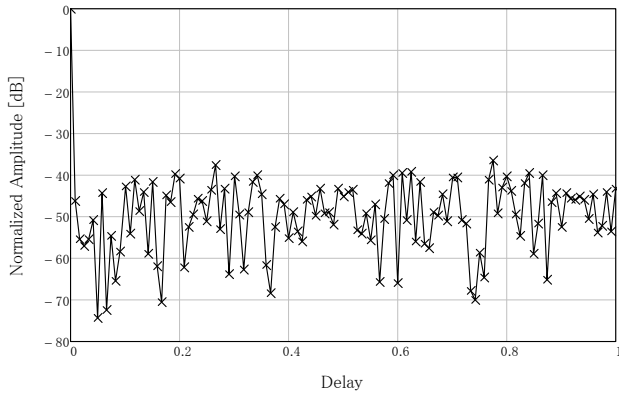


図 10 目標近傍での特性 $\Delta v/2$ (Ipatov 符号 1)

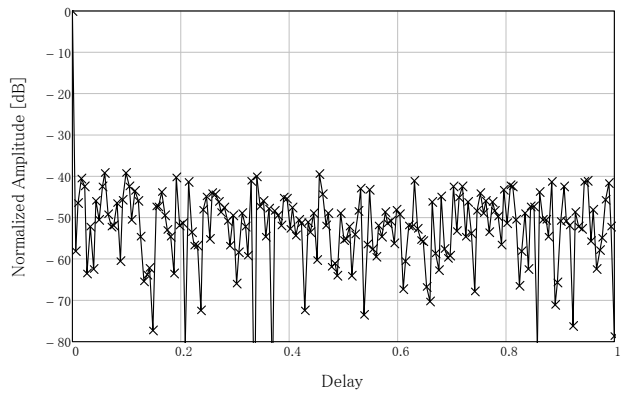


図 11 目標近傍での特性 $\Delta v/2$ (Ipatov 符号 2)

距離軸は符号長 N および PRI で規格化した $0 \leq \tau/N \cdot \text{PRI} \leq 1$, 一方, ドップラ軸は $0 \leq v/V_{\max} \leq 1.2$ とする.

図 6, 7 左の Z 軸はピークで規格化した相関出力の絶対値, また図右は相関出力の絶対値を対数軸 ($20 \cdot \log$) を表す. 図 6, 7 右において, 距離軸 0 に着目すると, ドップラ方向のサイドローブは Sinc 関数と同じ傾向を示す. また, $v/V_{\max} = 1$ のとき, 距離方向に尾根のようなサイドローブが表れる. 一方, ドップラが 0 のとき距離軸方向のサイドローブは 0 となる. しかし, ドップラが増加するにつれてサイドローブ特性は悪化する傾向を示す. 図 8, 9 に速度分解能 $\Delta v/8$ のときの距離特性を示す. 図 8, 9 よりわずかなドップラでも Ipatov 符号 1, 2 ではサイドローブ特性は劣化する. さらに, 速度分解能の半分 $\Delta V/2$ のドップラを与えると, サイドローブ特性は, 図 10, 11 に示すようにどちらもピーク対平均サイドローブ 12dB 悪化する.

次に, ドップラシフト毎のサイドローブ特性について, M 系列(127 ビット), P4 符号(121 ビット)と比較する. 図 12 にドップラシフト毎のピーク対平均 SL 特性を示す. 横軸は速度分解能 ΔV で規格化したドップラ周波数を, 縦軸はピークに対する平均サイドローブレベル [dB] を表す. さらに, 図 13 にドップラシフト毎のピーク SL 特性を示す. 横軸は規格化ドップラ周波数, 縦軸はピークサイドローブ [dB] を表す. 図 12, 13 のプロット点はそれぞれ速度分解能 ΔV の 1/512, 1/256, 1/128, 1/64, 1/32, 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 を表す. まず, 図 12 より Ipatov 符号 2 は Ipatov 符号 1 に対して, 2.3dB サイドローブが低い傾向が見られた. また図 13 よりピークサイドローブに関しても Ipatov 符号 1 に対して, Ipatov 符号 2 は 2.6dB サイドローブが低い. ここで, ランダムに位相を与えた N 個の符号列のサイドローブレベルが $10 \cdot \log(N)$ で与えられるとする. Ipatov 符号 1, 2

の符号数の差, Ipatov 符号 2 に 0 が 14 個含まれることを考慮すると, 符号長によるサイドローブの差は 1.4dB となり, Ipatov 符号 1 と 2 のサイドローブの差は 1dB となる. これらの使い分けは使用可能な符号数, もしくは 2 項で述べた S/N 比損失等を考慮して選択する.

図 12 より, M 系列はドップラの影響をほぼ受けず符号長から期待されるサイドローブ -42dB が得られている. 一方, Ipatov 符号 1, 2 はドップラが 0 の条件ではサイドローブが 0 となり, ドップラが増加するとともに, サイドローブ特性も線形的に悪化する. Ipatov 符号 1, 2 はドップラ 0.5 のときであっても M 系列と比較して低く, それぞれ -47, -49dB を示した. これと

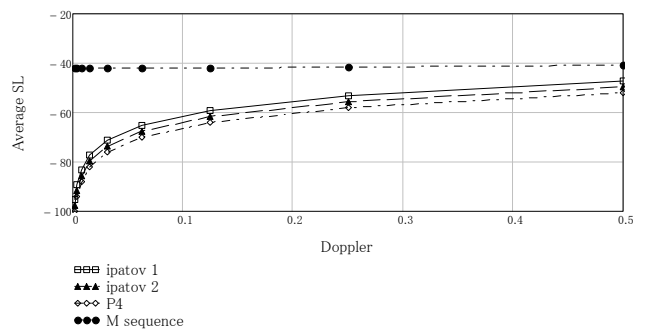


図 12 ドップラシフト毎のピーク対平均 SL 特性

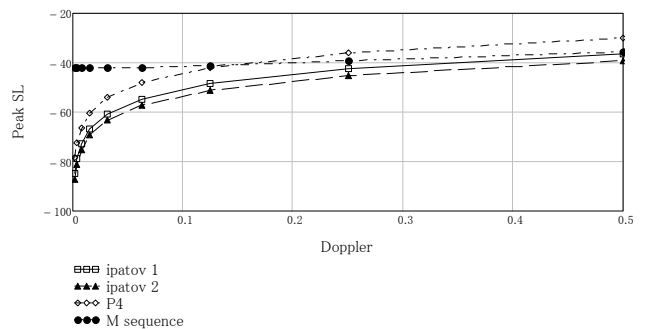


図 13 ドップラシフト毎のピーク SL 特性

同様のサイドローブ特性を得るためには、255 ビットを必要とする。また P4 符号と比較すると、ピーク対平均サイドローブで劣る特性を示すが、図 3 に示すように目標から遠方のサイドローブが低くなるためである。図 13 より、ピーク SL 特性では P4 符号は Ipatov 符号 1, 2 や M 系列と比較して悪い結果を示す。これは、ドップラがある場合 P4 符号は図 3 に示すように高いショルダーが表れるからと考えられる。

4. むすび

本稿では、完全周期符号である Ipatov binary sequence(Ipatov 符号 1), および Ipatov ternary sequences(Ipatov 符号 2)の距離・ドップラ特性について評価し、ドップラシフト毎のサイドローブ特性について、M 系列, P4 符号と比較した。本稿に示す研究内容は、総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発

(狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダー技術の研究開発)」により実施されたものである。

文 献

- [1] V. P. Ipatov and B. V. Fedorov "Regular binary sequences with small losses in suppressing sidelobes", Radioelectron. a. Commun. Syst. (Radioelektronika), vol. 27, no. 3, pp.29 -33 1984
- [2] 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
- [3] V. P. Ipatov, "Ternary sequences with ideal autocorrelation properties",Radio Eng. Electron. Phys., vol. 24, pp.75 -79 1979
- [4] Hoholdt, T.; Justesen, J., "Ternary sequences with perfect periodic autocorrelation (Corresp.)," Information Theory, IEEE Transactions on , vol.29, no.4, pp.597,600, Jul 1983.
- [5] 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.7 pp.556-564,Jun.2014.
- [6] LEWIS B. L., "A new class of polyphase pulse compression codes and techniques", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. AES-17(3), 364-372, 1981