

広帯域多周波ステップCPCレーダの実験的検証と速度視野改善

太田裕也[†] 秋田学[†] 渡辺優人[†] 稲葉敬之[†]

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

E-mail: ota.yuya@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし

本稿では、広帯域多周波ステップCPC方式の基本送信シーケンスを採用した79GHz帯ミリ波レーダを試作し、従来と同等の受信機帯域幅にて、帯域幅1.5GHzに相当する距離分解能が得られることを実験的に示す。また、超広帯域への拡張にともなう速度視野低下問題に対して、多周波ステップCPC方式の周波数ステップシーケンスのランダム化により、速度視野の改善を図った結果を報告する。さらに、多周波ステップCPCの合成帯域処理として圧縮信号処理を用いた高分解能化のシミュレーションの結果を示す。また、上記の79GHz帯ミリ波レーダによる実験データに圧縮信号処理を用いた結果についても示す。

キーワード レーダ, 多周波ステップCPC方式, ランダム周波数ステップシーケンス, 圧縮センシング

Experimental Verification of Wide-Band Stepped Multiple Frequency CPC and Improvement of Observable Maximum Velocity

Yuya OTA[†] Manabu AKITA[†] Masato WATANABE[†] and Takayuki INABA[†]

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

E-mail: ota.yuya@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract In this paper, we show the experimental verification results by a 79 GHz band millimeter wave radar adopting the linear frequency step sequence of Wideband Stepped Multiple Frequency CPC. The experimental results indicated that the range resolution equivalent to the transmission bandwidth of 1.5 GHz can be obtained by the receiver bandwidth of Stepped Multiple Frequency CPC radar. In addition, we report the result of improving the observable maximum velocity by adopting random frequency step sequence for the problem of observable maximum velocity degradation due to the expansion to ultra-wideband. Furthermore, we also show the results on the super resolution in which the synthetic bandwidth processing of multi-frequency step CPC is replaced by signal processing of Compressed Sensing with ADMM.

Keywords Radar, Stepped Multiple Frequency CPC, Random Frequency Step Sequence, Compressed Sensing

1. まえがき

安全・安心を担うセンサとして雨天・夜間・逆光等の条件下においても安定した性能が得られるミリ波レーダが着目されている。近年の省令改正等に伴い、60GHz帯、76GHz帯に加え79GHz帯(78GHz~81GHz(77GHz~81GHzに拡張される見込み))がミリ波レーダに割り当てられ、76GHz帯においても占有周波数帯

域幅が従来の500MHzから1GHzに変更する法制度の整備がなされている。広帯域を活用することで、高い距離分解能が期待される一方で、パルスレーダやパルス圧縮レーダのように瞬時帯域を広くとると、帯域内受信機雑音(kTB)が増加し、検知距離が劣化してしまうという深刻な課題を抱えている。そこで、著者等は、狭受信機帯域幅(すなわち遠距離性)と高距離分

解能という相反する能力を兼ね備えた多周波ステップ CPC レーダを提案し 60GHz 帯や 76GHz (ともに送信帯域幅約 430MHz, サンプリング周波数 160MHz)にて, 遠距離性と高距離分解能性能の両立を実験的に示している[1].

本稿では, 広帯域多周波ステップ CPC 方式の基本送信シーケンスを採用した 79GHz 帯ミリ波レーダを試作し, 従来と同等の受信機帯域幅にて, 帯域幅 1.5GHz に相当する距離分解能が得られることを実験的に示す.

また, 超広帯域への拡張ともなう速度視野低下問題に対して, 多周波ステップ CPC 方式の周波数ステップシーケンスのランダム化により, 速度視野の改善を図る[2]. ランダム周波数ステップシーケンスにより従来と同等の受信機帯域幅にて, 帯域幅 1.5GHz に相当する距離分解能が得られるとともに速度視野約 480km/h および速度方向に 35dB 程度の電力アイソレーションが得られることを確認する.

また, 多周波ステップ CPC の最後段の処理である合成帯域処理に MUSIC などの超分解能法を適用することで送信帯域幅相当の距離分解能以下を実験的に分離可能であることを報告している[3][4]. 本稿では, ランダム周波数ステップを採用した場合と, 上記実験と同等の等間隔周波数ステップを採用した場合において, 多周波ステップ CPC の合成帯域処理を圧縮信号処理に置き換えた高分解能化のシミュレーションの結果を示す. なお, 上記の 79GHz 帯ミリ波レーダによる実験データに圧縮信号処理を適用した結果についても示す.

2. 広帯域多周波ステップ CPC レーダによる原理検証実験

2.1 多周波ステップ CPC 方式原理

多周波数ステップ CPC 方式は, CPC パルス圧縮と合成帯域法を複合した筆者らが提案する新しいレーダ変調方式である. 時分割で 2 つの相補符号の送信と複数個の送信周波数切り替えを行う. 時分割送信によるドップラシフトに対する位相補正処理を行い, 相補の CPC 受信信号の加算により距離サイドローブを抑圧, さらに, 複数ステップの周波数方向に合成帯域することにより, 送信帯域幅と比較して狭受信機帯域幅で高距離分解能を得る. 図 1 に多周波ステップ CPC 方式送信シーケンスを示す.

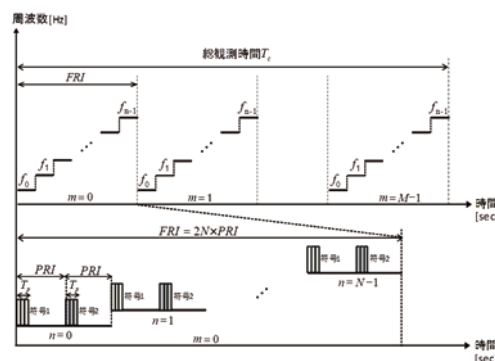


図 1. 多周波ステップ CPC 方式送信シーケンス

2.2 レーダパラメータ

表 1 に実験における多周波ステップ CPC 方式のレーダパラメータおよび期待性能を示す.

表 1. レーダパラメータおよび期待性能
多周波ステップ CPC 方式

パラメータ名	緒元
送信周波数 f_0	79GHz
パルス帯域幅 b	80MHz
位相切り替え間隔 Tchipl	0.0125ns
符号チップ数 P	16
パルス繰返し間隔 (PRI)	3.5 μ s
パルス数 (シーケンス数) M	128
周波数ステップ幅 Δf	50MHz
周波数ステップ数 N	32
送信帯域幅 B	1630MHz
観測時間 T_{cpi}	28.672ms
A/D サンプリング周波数 f_s	160MHz
速度視野	15.258km/h
距離分解能	0.092m
速度分解能	0.238km/h

2.3 1 目標環境における検証実験

本節では, 79GHz 帯ミリ波レーダを用いた 1 目標時の実験結果を示す. 目標条件は下記の通りであり, 目標の移動はアクチュエータを用いる. 実験はすべて図 2 に示す電波暗室内 (24m \times 15m \times 10m) にて実施した. またレーダパラメータは表 1 と同等である.

- ・ 目標: コーナーリフレクタ 1 つ (0dBsm)
- ・ 距離: 5.0 (m)
- ・ 速度: 4.0 (km/h) (レーダ視線方向)

図 3 に 1 目標での実験結果を示す, 図 3 より -3dB 距離幅は 0.089m であり送信帯域幅に相当する距離分解能が得られたことが確認された.

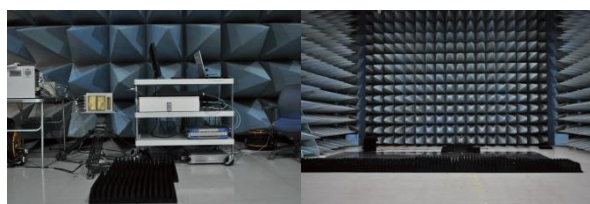


図 2. 電波暗室における実験風景

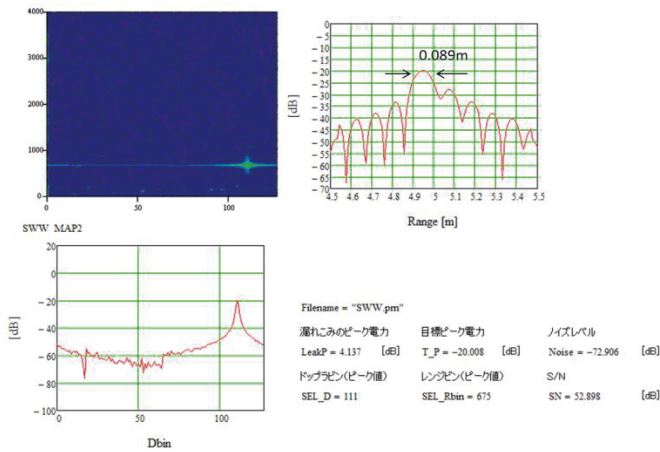


図 3. CR1 目標の電力マップ

2. 4 2 目標環境における検証実験

本節では、79GHz 帯ミリ波レーダを用いた 2 目標時の実験結果を示す。目標条件は下記の通りである。

- ・ 目標：コーナーリフレクタ 2 つ (0dBsm)
- ・ 距離：5.0, 5.1 (m) または 5, 5.17 (m)
- ・ 速度：4.0 (km/h) (レーダ視線方向)

図 4, 図 5 に広帯域多周波ステップ CPC 方式の合成帯域後の出力結果を示す。

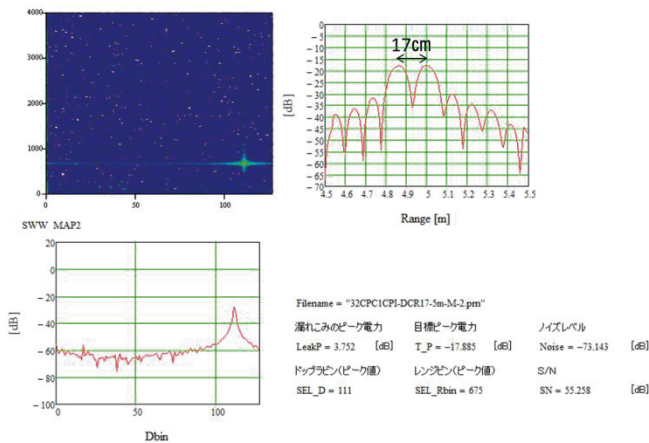


図 4. CR2 目標(距離差 17cm)の電力マップ

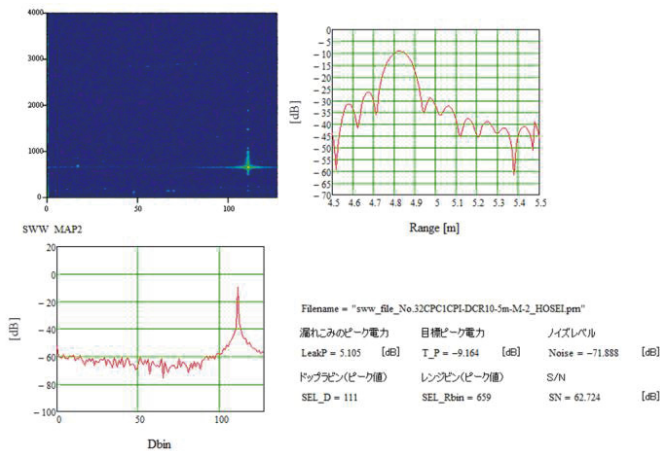


図 5. CR2 目標(距離差 10cm)の電力マップ

図 4 より CR2 目標に対して測定を行った場合、距離差 17cm は 2 目標の分離を行えていることが確認された、しかし、図 5 より距離差 10cm では分離を行えておらず、実用分解能不足であることも確認される。

3. 周波数ランダムステップによる速度視野拡張

本節では、多周波ステップ CPC 方式の周波数ステップシーケンスのランダム化による、速度視野の改善について述べる。

広帯域多周波ステップ CPC 方式の速度視野は以下の式 1 で求められる。

$$V_{max} = \frac{c}{4} \frac{f_0}{T_{cpl} M} \quad (1)$$

式 1 より観測時間を一定とすると超広帯域への拡張に伴い、ステップ数 N が増加し、パルス数 M が減少するために速度視野が低くなってしまふことが分かる。本稿では速度視野回復の一検討として、送信周波数の切り替えをランダム、同一符号列の同一レンジビンのサンプリング間隔を不等間隔とし PDF における FFT を DFT とする方法をとる。図 6 にランダムステップ多周波ステップ CPC 方式送信シーケンス、図 7 にランダムステップ多周波ステップ CPC 方式処理ブロック図を示す。表 1 に示すレーダパラメータを用いて、距離 20m, 速度 100km/h (>速度視野) の目標に対してシミュレーションを行う。

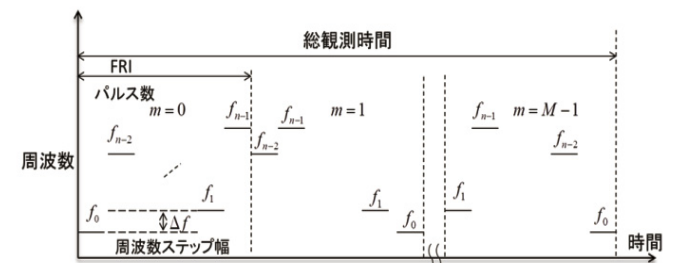


図 6 ランダムステップ多周波ステップ CPC 方式送信シーケンス

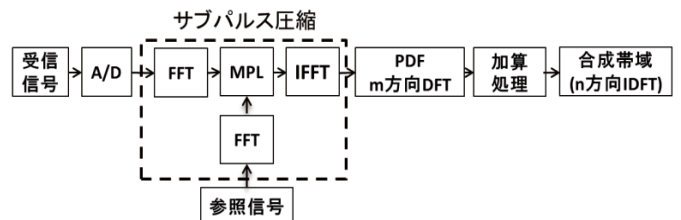


図 7 ランダムステップ多周波ステップ CPC 方式処理ブロック図

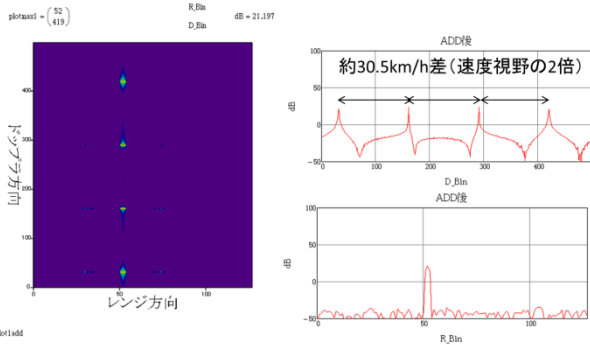


図 8 線形ステップ多周波ステップ CPC 方式加算処理後

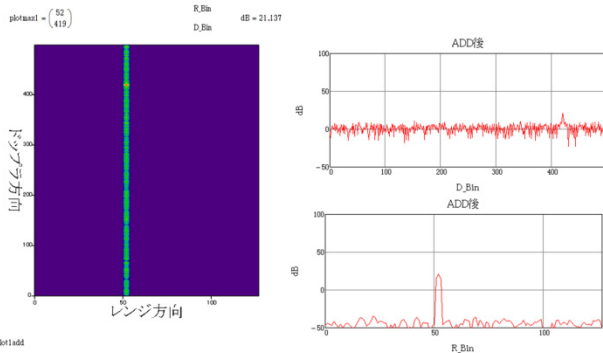


図 9 ランダムステップ多周波ステップ CPC 方式加算処理後

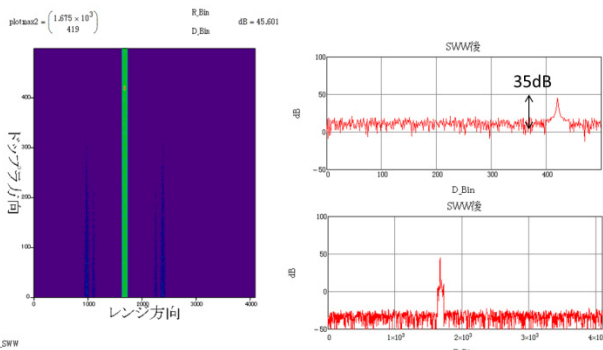


図 10 ランダムステップ多周波ステップ CPC 方式合成帯域後

線形ステップにおいて ADD 処理まで信号処理をした結果を図 8 に示す, またランダムステップにおいて加算処理・合成帯域処理まで信号処理をした結果を図 9・図 10 に示す. 図 8 において, 速度視野の 2 倍の間隔で速度の折り返しが発生していることがわかる. 一方, 図 9 においてはその速度間隔における真値以外のピークは消え, ドップラ方向に電力が拡散していることが確認できる. そのピーク対フロアの電力比は 35dB 程度となる. また, 速度視野は同じ周波数が 32 ステップごとに出現する制約がなくなり, 速度視野は線形ステップの 32 倍である約 480km/h に拡張された.

4. 広帯域多周波ステップ CPC 合成帯域への圧縮信号処理の適用評価

4. 1 実験結果に対する圧縮信号処理適用評価

実用分解能としては 10cm (1.1 倍距離分解能) の 2 目標の分離性能が十分でないことを 2 章で確認した. この対策として合成帯域処理に超分解能法を適用することで 1/2 距離分解能以下を実験的に分離可能であることが報告されている[3][4]. 一方, 本稿では合成帯域処理における距離分解能向上のために新たなアプローチである圧縮信号処理の適用評価を行う.

圧縮信号処理は劣決定で表される観測モデルにおいて, 原信号の時間または空間分布が十分にスパースであることを条件に原信号を推定する手法である. 本論文では圧縮信号処理の再構成アルゴリズムとして交互方向乗数法 (The alternating direction methods of multipliers: ADMM) を適用する. ADMM は制約つき最適化問題を拡張 Lagrange 法を用いてラグランジュ未定乗数項と罰金項の 2 つのコスト関数の組み合わせによる最適化問題として解く方法である[5].

初めにシミュレーションにおいて距離差 10cm の 2 目標に対して圧縮信号処理を適用する. レーダパラメータは表 1 と同一であり, 目標は距離 20m, 20.1m の位置に設定した. 図 11 より圧縮信号処理を適用することにより 2 目標の分離が行え, 2 目標の距離差が 10cm であることが確認でき, 合成帯域処理に超分解能法を適用することなく距離分解能を向上することが可能であることが分かる. また, 2 目標を対象にした 79GHz 帯ミリ波レーダでの実験結果についてもシミュレーションと同様に圧縮信号処理を適用する. 図 12, 図 13 より, 合成帯域処理のみでは行えなかった 10cm (1.1 倍距離分解能) の 2 目標の分離に対して圧縮信号処理を適用することによって分離を行えており, 距離分解能が向上していることが確認された.

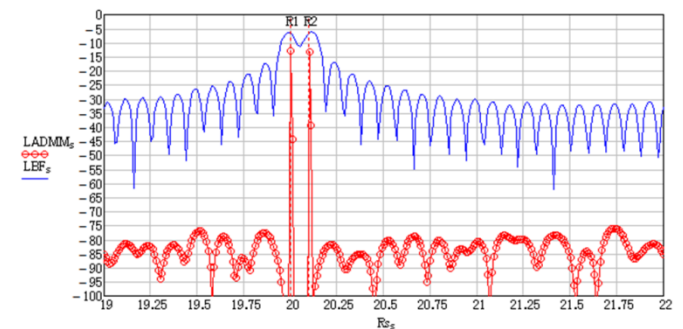


図 11. シミュレーションでの広帯域多周波ステップ CPC 方式による 2 目標(距離差 10cm)における圧縮信号処理適用結果(青線はビームフォーミング結果, 赤線は圧縮信号処理結果)

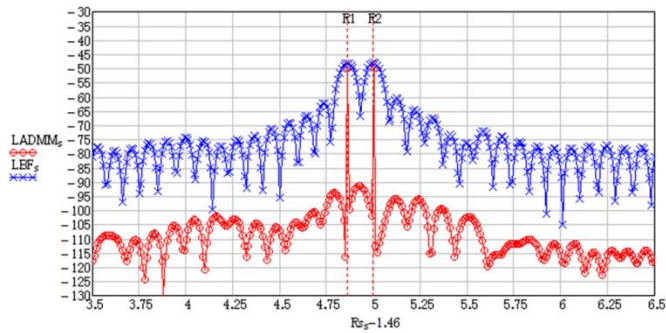


図 12. 広帯域多周波ステップ CPC 方式実データ CR2 目標(距離差 17cm)における圧縮信号処理適用結果

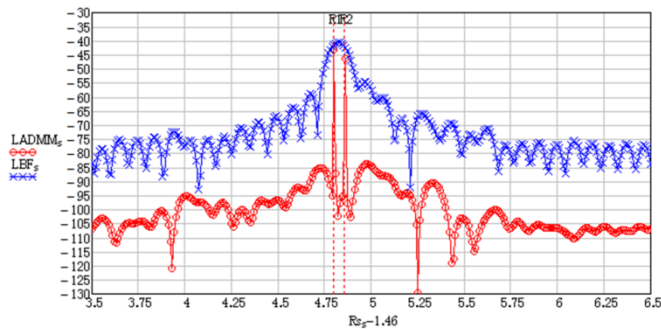


図 13. 広帯域多周波ステップ CPC 方式実データ CR2 目標(距離差 10cm)における圧縮信号処理適用結果

4. 2 ランダムステップシーケンスに対する圧縮信号処理適用評価

本節ではランダムステップシーケンスに対して圧縮信号処理の適用結果について示す. 表 1 に示すレーダパラメータを用いて, 距離 20m, 20.1m, 速度 100km/h の目標に対してシミュレーションを行う. 図 14 に線形ステップシーケンスに対して圧縮信号処理を適用した結果を, 図 15 にランダムステップシーケンスに対して圧縮信号処理を適用した結果を示す. 図 14, 15 から分かるようにランダムステップ多周波ステップ CPC 方式の合成帯域処理において圧縮信号処理を適用しても, 線形ステップとほぼ同等の結果を得られることが確認された.

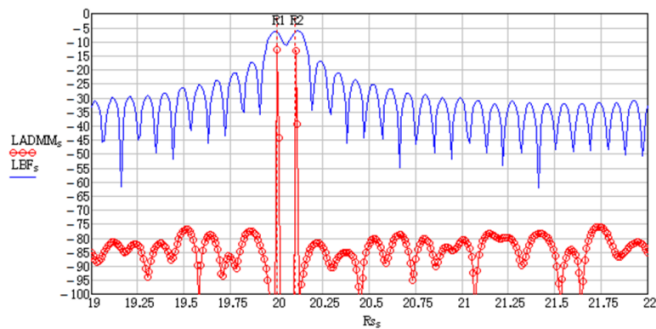


図 14 線形ステップに対する圧縮信号処理適用結果

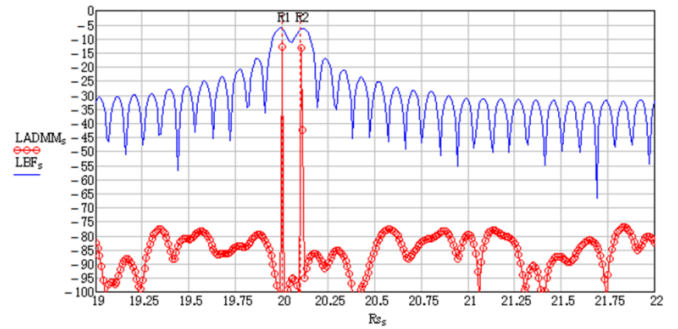


図 15 ランダムステップに対する圧縮信号処理適用結果

5. まとめ

本稿では, 広帯域多周波ステップ CPC 方式の基本送信シーケンスを採用した 79GHz 帯ミリ波レーダを試作し, 従来と同等の受信機帯域幅にて, 帯域幅 1.5GHz に相当する距離分解能が得られることを実験的に示した. また, 超広帯域への拡張にともなう速度視野低下問題に対して, 多周波ステップ CPC 方式の周波数ステップシーケンスのランダム化により, 速度視野の改善を図った. ランダム周波数ステップシーケンスにより従来と同等の受信機帯域幅にて, 帯域幅 1.5GHz に相当する距離分解能が得られるとともに速度視野約 480km/h および速度方向に 35dB 程度の電力アイソレーションが得られることが確認された.

また, 本稿では, ランダム周波数ステップを採用した場合と, 上記実験と同等の等間隔周波数ステップを採用した場合において, 多周波ステップ CPC の合成帯域処理を圧縮信号処理に置き換えた高分解能化のシミュレーションの結果を示した. なお, 上記の 79GHz 帯ミリ波レーダによる実験データに圧縮信号処理を適用した結果についても示した.

参考文献

- [1] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 多周波ステップ CPC レーダの提案と原理検証実験, 電学論 C, Vol. 135, No.3, pp.285-291, 2015
- [2] 秋田学, 渡辺優人, 稲葉敬之, 完全相補符号を用いた MIMO 多周波ステップ CPC レーダの検討, 2016 年電子情報通信学会総合大会, B-2-37, 2016
- [3] 山下遼, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 多周波ステップ CPC ミリ波レーダにおける最尤推定法を用いた到来方向推定, 信学技報 SANE2014-111, Vol. 114, No. 397, pp.41-46, 2015.
- [4] 稲葉敬之, 渡辺優人, 渡辺一宏, 秋田学, 次世代高度運転支援システムのためのレーダ技術の研究開発(招待講演), 2015 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, AS-1-2, 2015
- [5] Stephen .Boyd, Neal .Parikh, Eric .Chu, Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers ,Now Publishers Inc, 2011