

論文の内容の要旨

論文題目 SN比が最大となるゼロ拘束条件付き相関フィルタの
理論的導出とパルス圧縮レーダにおけるその応用

氏 名 篠 永 充 良

レーダにおけるパルス圧縮方式は、長パルス内を変調した信号で送信し、受信後に送信パルス内変調信号に適合するパルス圧縮フィルタを介してSN比（以下、「 S/N 」と記載する）が改善された短パルス信号を得るものであり、パルス内送信エネルギーの増加による探知距離の延伸、高い距離分解能の実現、干渉・妨害波抑圧に有効などの利点から多くのレーダに適用されている。送信パルス内変調は、線形／非線形周波数変調信号、量子化位相符号変調信号などに大別され、これに対するパルス圧縮処理とは各種変調信号に対するマッチドフィルタ(Matched filter)受信、即ち、相関フィルタ処理となっており、レンジサイドローブの発生が不可避である。

従来からレンジサイドローブ低減のために相関フィルタに対して窓関数が適用されているが、窓関数を用いると信号損失として S/N ロスが発生する。ところが、クラッタ等の強大なエコーに近接する小目標信号検出のためにレンジサイドローブ低減が不可欠であり、同時に受信機雑音と競合する微弱信号を検出するためにレーダの受信感度を維持するという点から S/N ロスは最小限に保持することが強く求められており、パルス圧縮フィルタでのサイドローブ低減と S/N ロス最小化の両立は重要性の高い課題であった。

また従来の代表的手法の中にも、何らかの評価関数を用いて最急降下法などにより最適フィルタ係数を求める手法もあるが、系列長が長くなると繰り返し演算量が増えて求める最適解への収束が容易ではなかった。特に、本研究で取り扱うようなチャープ信号や多値複素位相系列などの多様な複素送信信号のパルス圧縮において、サイドローブに関する拘束条件のもとで S/N ロスを最小化する複素重み窓関数（振幅と位相からなる複素数系列）を収束演算法で求める場合には、実数だけを扱う2値位相符号系列の場合と異なり、

- (1) グローバル最適解かローカル最適解かの判定が難しいこと
- (2) 自由度の多い長系列信号や長位相符号系列を用いて低サイドローブを得るには、精細な複素フィルタ係数を求める必要があり、このための複素収束演算用の適正な初期値ベクトルや演算ステップを定めることが容易でないこと

などの理由から、収束演算の実行は実際上困難である。

本研究は、サイドローブについてゼロ出力という拘束条件とS/Nロス最小という条件を同時に満足するゼロ拘束条件付き最適フィルタ係数を直接導出する手法を示すものであり、長系列の複素信号に対しても収束演算を用いずにグローバル最適解を直接求める手法を示すものである。本論文は、以下の10章で構成されている。

第1章「序論」は、本報告の導入部として研究の背景と目的について述べている。

第2章「本研究の位置づけと概要」には、従来技術の概要とその問題点について概説するとともに、本研究の位置づけと概要を示している。

第3章「サイドローブフリー・パルス圧縮フィルタの導出」は、本研究の出発点となるサイドローブフリー・パルス圧縮フィルタの導出過程を示すとともに、代表的な結果例を示している。ここで導出されるパルス圧縮フィルタは、レンジサイドローブ抑圧の手段としてサイドローブ領域における出力波形サンプル点をゼロ出力（サイドローブフリー）に拘束するとともに、出力信号ピークにおけるS/Nロスが最小という条件を満たすもので、行列演算によりフィルタ係数が直接算出可能であることが示される。

第4章「サイドローブフリー・パルス圧縮フィルタの分析」には、第3章で導出されたフィルタが従来の窓関数による重み付けでは実現できず、窓関数を2次元に拡張した重み行列として表現できること、さらにこの重み行列によって重み付けされた一連のフィルタ群の総和としてパルス圧縮処理が表現できることを示している。また、この設計手法ではサイドローブにおけるゼロ拘束点の数を変化させることによって、拘束条件の無い窓関数なしのフィルタ係数から、サイドローブ・ゼロの逆フィルタとなる係数までが、S/Nロス最小化という同一の条件において導かれることを示している。

第5章「チャープレーダにおける特性評価」は、代表的なレーダ送信信号であるチャープ信号に対して本設計手法を適用して従来の窓関数との比較評価を行っている。特性評価としては、窓関数の評価指標であるS/Nロス、ピークサイドローブ特性、圧縮パルス幅等について実施している。その結果、チャープ帯域に対して4倍程度のオーバサンプリングによるフィルタ設計により、ハミング窓関数やテイラー窓関数よりも小さいS/Nロス

と狭い圧縮パルス幅を得ることができ、ピークサイドローブ特性も良好であり、導出されたパルス圧縮フィルタの実用性が高いことを述べている。

第6章「位相符号変調レーダにおける特性評価」には、この設計手法を位相符号変調波形に適用した結果を示している。本研究の手法は送信波形形状に依存しないため、評価対象には、2相符号についてはBarker符号、多相符号としてP4コードの2種を代表的な符号として取り上げて、シミュレーションにより評価している。その結果、符号の自己相関関数では実現できなかったサイドローブフリーという特性が実現可能であること、このパルス圧縮処理により少ないS/Nロスで符号チップ幅と同等の圧縮パルス幅が実現できることなどから、この設計手法は実用性が高く有効であることを述べている。

第7章「ゼロ出力を拘束条件とするS/N最大フィルタの数学的導出」は、本研究の最適化手法を統一的な設計手法として数学的に再定義するとともに、この拘束条件付き最適フィルタの成立条件を明確にしている。分析した結果、入力データ行列に相当する入力信号状態マトリクスを正則行列として定義すれば、サイドローブ出力をゼロ拘束する拘束条件付き最適フィルタ係数を直接算出する一般式が導かれるとともに、その最適解である拘束条件付き最適フィルタが必ず存在することを示している。

第8章「アンテナパターン設計への適用」では、7章に示した統一的な手法をアレイアンテナの開口面ウェイト設計へ適用した結果について示している。まずアンテナ設計における最適化手法について理論的な導出を行い、期待される性能について従来の重み付け手法と比較・評価を行っている。その結果、本設計手法は要求されるビーム幅が広い領域でのサイドローブ低減に有効であり、実現できる性能の柔軟性が高く、アンテナ利得も従来の重み付け手法以上であることを示している。

第9章「レーダにおける方位相関処理への適用」には、最適フィルタの適用例としてレーダの方位相関処理に適用した場合についても評価を行って、本手法の有効性を述べている。これは、バースト信号検出など一般的な相関フィルタにもこの手法が適用できることを示すものである。

第10章「結論」は、本研究で導出した最適化手法の意義およびその期待される効果を示すとともに、パルス圧縮レーダに対する本研究成果の適用方法と今後の技術展望についてまとめている。

本論文は、以上に示したように収束演算によらない行列演算でゼロ拘束条件付き最適フィルタを導出し、数値的に安定なグローバル最適解が直接算出できる手法を示している。さらに多数の適用事例での性能評価結果を示しており、当該分野に限らず広く応用可能な最適フィルタ設計手法が確立できたことを示すものである。