

符号化パルス圧縮における時間サイドロープ低減に関する研究

佐藤 玲 司

論文の内容の要旨

レーダは、開発当初は、単に遠隔から目標の存在を認識する機能しか無かったが、技術の発展に伴い、多目標の搜索と追尾を同時に行う多機能性を持ち、目標に関する多様な情報を取得しうる高度センサーシステムへ発展し、様々な機能・性能がレーダに求められるようになっていく。レーダに求められるこれらの機能・性能の殆どは、レーダの送信エネルギーと分解能に依存しており、送信エネルギーを大きくするほど、また分解能を高くするほど改善させる。通常の変調パルスでは、大きな送信エネルギーと高い距離分解能を同時に実現するには、パルス幅を狭くし、そのかわり尖塔電力を大きくする必要がある。しかしハードウェア等の限界があり、尖塔電力は無制限に大きくできるものではなく、半導体素子を用いたアクティブフェーズドアレイレーダ等では、特にこの限界が著しい。このため、尖塔電力を大きくせずに、大きな送信エネルギーと高い距離分解能を同時に実現するパルス圧縮は、レーダにおいて必要不可欠な技術となっている。しかし、パルス圧縮により生ずる不要なTSL(Time Side-Lobe)は目標のゴーストエコーを生じ、探知性能等に悪影響を与える。このため、パルス圧縮においては、TSLの低減が最も重要な要件となっている。

パルス圧縮は、特殊な変調を与えることにより信号帯域幅を広くした長いパルスを送信する。一般に、広い信号帯域幅は、実質的に短いパルス幅を暗示しており、この信号を整合フィルタで処理することにより、送信パルスは圧縮される。パルス圧縮は、この信号に与える変調により、大きく2つに分類される。ひとつはパルスをFM変調したチャープ方式であり、もう一方は、送信パルスを多くのサブパルスに分割し、サブパルスごとの位相を変化させた符号方式である。

符号方式は、互いに異なる符号を用いることによって、複数のレーダが同じ周波数帯域を共有できることや、あるいは、1基のレーダにおいてパルス毎に符号を変えることで、妨害波等の強い干渉波に対抗することができるなど、対干渉性に非常に優れている。このため符号方式は多くのレーダに用いられており、そのサイドロープの低減に関しては、多くの研究がなされてきた。

しかし、従来提案されている方式は、ほとんど全ての場合、信号を1つのサブパルス幅に圧縮する方式である。言い換えると、符号方式は、元々、1つのサブパルス幅に圧縮することを前提に考えられており、従来は、中心のメインピークのみを圧縮パルスと見なし、それ以外は、全てTSLと見なししていた。しかし、メインピークも、また、それと隣接する部分に形成される信号も、どちらも目標のエコーを圧縮して形成された信号であり、区別する根拠はない。従って、メインピークに隣接した部分にも、積極的に信号エネルギーを集め、メインピークとそれに隣接した部分全体で、圧縮パルスを形成させてもいい筈である。ただし、これにより、圧縮パルスの幅は広くなる。また、

チャープ方式では、圧縮パルス幅を広げる犠牲を払って、TSLを下げる方法が非常に効果を上げており、これとの類推から、符号方式においても、複数のサブパルス幅に圧縮させ、圧縮パルス幅を広げることで、TSLを低減できると考えられる。

本研究では、従来とは異なり、複数のサブパルス幅に信号を圧縮させる方式を提案し、それにより、従来よりも小さなTSLをもつ符号系列や、簡単かつS/N損失の少ないTSL抑制方式が得られることを示す。

第1章では、本研究の背景、レーダの概要、本研究の位置付け等について述べる。

一般に符号変調では、サブパルス幅を τ とすると、信号の殆どのスペクトルエネルギーは搬送周波数を中心にして $\pm 1/\tau$ の範囲に集中する。そこで、符号の位相を緩やかに(位相の変化が π より小さい)、かつ単調に増加、あるいは、減少させると、スペクトルの中心は高周波数側、あるいは、低周波数側にシフトする。このため、スペクトルエネルギーは、搬送周波数と搬送周波数 $\pm 1/\tau$ 、あるいは、搬送周波数 $-1/\tau$ の間のより狭い範囲に集中し、信号の帯域幅はより狭くなる。その結果、圧縮パルス幅が信号帯域幅に逆比例することから、信号は、複数のサブパルス幅に圧縮されることになる。

第2章では、この変調において、隣り合う位相の変化を $\pi/2$ とするパルス圧縮符号系列を提案する。そして、圧縮比が4~5の小さな領域で、この符号系列の中には、小さなPSL(Peak Sidelobe Level)を持つ符号が存在し、それらのPSLはBarker系列等よりも小さいことを示す。

第3章では、位相の変化を $\pi/2$ より大きくし、また多相化する。位相の変化をより π に近づけることで、符号の変調は、緩やかな単調な変調から、ランダムな変調に近づき、信号帯域幅は広がる。その結果、圧縮比は、第2章より大きくなる。そして、圧縮比が8~11の比較的小さな領域で、この符号系列の中には、小さなPSLを持つ符号が存在し、それらのPSLは、Barker系列等よりも小さいことを示す。

第4章では、初めは、位相が緩やかに、かつ単調に増加し、ある時点で1度だけ反転し、その後、緩やかに、かつ単調に減少する変調などを提案する。この変調を与えた符号は、位相が緩やかに単調に増加する符号の端に、再び、位相が緩やかに単調に減少する符号を付け足したと考えることができる。従って、符号を構成する2つの部分符号が複数のサブパルス幅に圧縮されることから、提案符号も複数のサブパルス幅に圧縮されると考えられる。この章では、圧縮率が11程度の領域で、この符号系列の中に、小さなPSLを持つ符号が存在し、そのPSLは、3章で示した符号系列よりも、小さいことを示す。

第5章では、2値符号に対して、簡単な処理によりPSLを低減させるために、TSSWA(Two-sample Sliding Window Adder)処理を適用する。TSSWA処理は、自己相関処理後に、信号を2つに分け、一方にサブパルス幅分の遅延を与えた後、それらの2つの信号を再び加算するだけの非常に簡単な処理であり、P1系列等の多相符号に対して、PSLを低減する方法として提案されたものである。TSSWA

処理は、信号スペクトルの観点からみると、周波数ウェイトを掛けていると見ることができ、チャープ方式のTSLの低減によく用いられる手法に類似している。チャープ方式では、一般に、周波数ウェイトにより信号帯域が狭くなるほどTSLは小さくなる傾向にある。TSSWA処理も回数を増やすほど、信号帯域が狭くなることから、TSSWA処理を1回よりも2回行ったほうが、TSLの低減に効果があると考えられる。この章では、TSSWA処理は2値符号に対しても効果があり、特にTSSWA処理を2回行うことで、圧縮比15程度以下の領域において、PSLを非常に低減できることを示す。

第6章では、TSSWS(Two-sample Sliding Window Subtractor)処理、及びTSSWA処理を包含し、かつ、より拡張された処理方法を提案する。TSSWS処理は、Frank系列等の多相符号に対して、PSLを低減する方法として提案された処理で、TSSWA処理と良く似ている。違いはTSSWA処理が、2つに分けた信号を、後で再び加算するのに対し、TSSWS処理では減算する。しかし、加算も減算も、絶対値1の複素定数を掛けた後、足し合わせると見れば、同一に扱える。そこで、2つに分けた信号を再び足す前に、一方に絶対値1の複素定数を掛け、複素定数の位相をパラメータとし、出力のPSLが最小となるように調整するETSSWA(Extended Two sample Sliding Window Adder)処理を提案する。また、第5章と同様、周波数ウェイトの観点から、ETSSWA処理も1回よりも2回行ったほうが、TSLの低減に効果があると考えられる。この章では、Frank系列等に対して、ETSSWA処理を特に2回行った場合に、PSLが非常に低減され、従来に比べ、0.5～6.0dB程度小さくできることを示す。

第7章では、5章で提案したTSSWAを2回行う処理に伴うS/N損失を詳細に評価し、その結果、圧縮比が14～16程度のとき、従来に比べ、より少ないS/N損失で、同等のPSLの低減を実現できることを示す。

以上