

外 94-15

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

工業分野におけるレーダ応用計測に関する研究

申 請 者

長 棟 章 生

Akio NAGAMUNE

1994年 7月

レーダ(RADIo Detection And Ranging)は、電磁波を放射し、その反射波を検出することにより、目標とするターゲットの存在およびそこまでの距離を知るための計測装置であり、航空・船舶の分野では実用的に使用されている。工業分野においては、レーダが非接触の距離計測装置であること、電磁波の波動としての特徴を活かせることに着目して応用計測が試みられているが、その一部しか実用化されているにすぎない。工業計測における電磁波利用の長所としては次が挙げられる。①高温雰囲気においても伝播の直進性が確保される。②ダストの多い環境でも伝播時の減衰が比較的少なく、汚れにも強い。③地中においてもUHF帯以下の周波数はある程度透過するので不可視情報の計測の可能性がある。そこで、レーダ応用計測の領域として、地中不可視情報の計測あるいは悪環境下でのプロセス計測の分野に着目して、現状技術の課題を明らかにした。

地中不可視情報の計測に関連する土木・地質調査分野においては、地下探査レーダが近年開発され、土木工事の事前調査としての埋設物探査、路面下の空洞探査、地質調査、遺跡調査などへ応用が広がりつつある。しかし、地中での電磁波の減衰は大きく、現在のパルス方式の地表走査型の地中探査レーダの探査深度はたかだか3mと言われている。今後の用途拡大のためには最大探査可能深度の拡大が要請されており、そのためには地下探査レーダの高感度化技術の確立が待たれている。また、大都市に林立する地上構造物の下あるいは地中深層部での埋設物探査に対しては、土質探査技術として最近研究が行われている電磁波式ボアホールレーダが新たな地下探査技術として注目される。しかし、この技術を埋設管などの詳細な情報の探査に適用するには、土質調査の場合より高い分解能が必要となる。この場合、より高周波帯域の電磁波を使用することになり地中での伝播の減衰がさらに大きくなるので、高感度なレーダ計測法の開発が今後必要となる。

悪環境下でのプロセス計測へのレーダの応用に関しては、たとえば、鉄鋼分野において溶鋼のレベル計や高炉内の原料ストックラインのレベル計としての適用が試みられている。しかし、いずれも電波高度計に利用されているFMCW方式の応用であり、この方式固有の量子誤差と、正規の反射波と不要反射波を区別できないことによるSN比の劣化に問題がある。特に、対象物の反射係数が小さい場合には、相対的に不要反射波の影響が大きくなるので、現実の製造現場への応用に際しては従来方式の適用範囲は制限される場合が多く、高感度な反射波検出能および不要反射波を分離除去する性能が要求されている。

このように、工業分野における現状のレーダ計測技術に対するニーズ面からの問題点は、微弱信号に対するSN比を高めるための高感度化、不要な反射波と信号波を明瞭に区別するための高距離分解能化、高空間分解能化に整理される。

レーダ応用計測において、高距離分解能および高感度を実現する方法として、パルス圧縮技術の適用が有望である。パルス圧縮技術は、送信波にチャープ信号あるいは符号化信号を用い、その反射波を受信し、送信波形と相関を演算するこ

とで、元の波形の時間幅を圧縮し、信号の振幅を増大させ、SN比を向上させる信号処理技術である。この中でも、M系列信号を周期的に繰り返して送信する方法は、パルス圧縮した後の波形にサイドローブの発生が少なく、複数の反射波も時間軸上で分離でき、工業分野におけるレーダ応用計測の性能向上に有効と考えられる。しかし、パルス圧縮に必要な相関演算装置の構成は、従来は専用のデジタル演算装置やディレーラインを用いたアナログフィルタの方法が航空分野で使用されているが、工業分野での応用に対してはリアルタイム性や装置の複雑さの問題があるため適さない。一方、周期的に繰り返されるM系列信号の相関処理については、音響計測分野において、周期のわずかに異なる二つのM系列信号を用いる方法が速いインパルス応答の直示法として提案されており注目される。しかし、この提案は、高感度化の手段としては考えられていないため、ノイズの除去効果とその設計条件については未検討の問題として残されている。

高空間分解能化に対しては、アンテナの指向性を向上させ不要反射波を抑制することが課題である。特に、不要反射の到来方向が変化しても、パラボラアンテナのフィード部の電磁界分布を制御してビームの方向や形状を適応させる方法が将来有望と考えられる。しかし、従来の空間積分を用いた計算方法ではフィード部の電磁界分布を求めるのに、膨大な演算時間を要し実用的でない。そこで、パラボラアンテナのフィード部の電磁界分布を求めるための高速な計算手法の確立が要望される。

本論文では、工業分野におけるレーダ応用計測に対する以上のような技術課題に対して研究開発を実施して得られた成果について述べる。

第1章では、序論として本研究の背景・目的・課題について明確にした。

第2章では、ベースバンド波を送信するレーダとして地中探査レーダを取り上げ、簡単な装置で高感度性能を得るために、M系列信号を送信波とするレーダにおいて相関処理方法として周期のわずかに異なる二つのM系列信号を用いたアナログ演算方式を適用することを新たに提案した。この方式に対して動作解析を行い、二つのM系列信号のクロック周波数の差を小さくすれば、測定時間は長くなるが、極めて高いSN比が得られることを示し、そのノイズ除去効果を評価し設計条件を導出した。さらに、地中伝播に適した波形について検討し、クロック信号と同期した正弦波をM系列信号で位相変調した波形は従来のM系列信号波形より地中への電波放射効率が良好であることを示した。応用として、地表走査型の地中探査レーダおよびボアホールレーダへの適用を行い、本方式による高感度化性能を実証した。たとえば、ボアホールレーダへの適用事例では、従来のパルス波方式ボアホールレーダより約40dBもの高感度化が達成でき、レーダによる地下探査技術の適用拡大を可能にした。

第3章では、搬送波を用いたレーダとしてマイクロ波レベル計を取り上げた。高感度性能を得るためにM系列信号により搬送波となるマイクロ波を位相変調し

て得られる連続波を送信するレーダに対して、周期のわずかに異なる二つのM系列信号による相関演算と搬送波に対する同期検波との複合処理方式の適用を新たに提案した。本方式の動作解析を行いノイズ除去効果の評価と設計条件を導出した。さらに、ターゲットからの反射波と不要反射波との時間軸上での分離性能を向上させる方法として、従来のM系列信号波形を簡単な出力回路に通過させるだけで得られる3値化波形を適用することを提案した。応用として、各種鉄鋼プロセスにおいてレベル計測を実施し、本方式の高感度性能、高距離分解性能が実用的に有効であることを実証した。たとえば、転炉内スラグレベルは電波反射率が -40 dB と極めて小さいため従来のFMCW方式マイクロ波レベル計では不要反射波の強度が相対的に大きくなりその影響を受けやすくなる点が問題であったが、本方式により、微弱なスラグ面からの反射波の高感度検出と炉内原料などからの不要反射の影響を取り除く信号処理が適用できるようになり、安定したレベル計測を可能とした。

第4章では、将来の工業分野でのレーダ応用計測の展開に重要となる高空間分解能化に対して有効と思われるパラボラアンテナに関連し、そのフィード部の電磁界分布を不要反射波の変化に対応して制御し、ビーム方向やビーム形状をフォーミングする方法を実現する際に必要となるフィード部における電磁界分布の高速計算方法を提案した。この計算方法では前方の任意の方向から到来し受信される平面波がパラボラ面で反射・散乱し、焦点近傍で作る強い電磁界分布が求められれば、これに対して複素共役の電磁界分布をフィード部に与えると、その受信波が到来してきた方向と逆向きに電磁波が放射されるという可逆問題を考える。このとき、受信平面波が焦点近傍に作る電磁界分布を求めるための高速計算手法として、平面波スペクトル積分表示を用いた定式化により高速のFFT演算を適用できるようにした。本方法によれば、従来のパラボラ面上での空間積分を含む計算方法と比べ、約20倍の高速演算を可能とした。また、この方法において、被積分関数内のフレネル積分についてステップ的挙動と振動的挙動の役割を解析した結果、それぞれパラボラ面での反射波とパラボラ面端からの回折波からの寄与に関連していることが分かり、アンテナ動作の理解を深める上でも有益な計算方法であることを示した。

第5章では、本研究により、レーダ応用計測が工業分野における多様化した厳しい使用条件に対しても適用拡大されるべく、新しい有益な技術の確立が達成できたことを述べた。すなわち、レーダ応用計測において、二つのM系列信号による相関演算法の適用およびM系列信号波形の改善により高感度化・高距離分解能化技術を実現・実証することができた。また、空間分解能の向上に対してもアンテナのフィード部における電磁界分布の高速計算の方法を提案しアンテナビームの制御技術に新たな道を開くことができた。