

## 学位論文題名

Studies on MIMO UWB Time-Reversal MUSIC Imaging  
with Gating Preprocessing(ゲーティング前処理を用いたMIMO超広帯域時間反転MUSICイメージング  
に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

Over the years, remote sensing technologies have received much attention because of their excellent properties and unique capabilities for detection and localization, which can be exploited for many disciplines including acoustics, communications, medical and industrial areas. In general, they refer to the use of antenna technologies to detect and classify objects (both on the surface and internal characteristic) by means of propagated signals (e.g. electromagnetic radiation emitted from antennas). Hence, remote sensing technologies have no choice but to go through inevitable challenges such as meteorological phenomena, attenuation inside lossy materials and intervening media.

In wireless communication systems, reflection, diffraction, and scattering are the three fundamental propagation mechanisms which impact propagation. From these effects, the radio signal emitted from a transmitting antenna reaches through two or more paths receiving antenna, even when a line-of-sight (LOS) path exists. These waves, called multipath waves, cause constructive and destructive interference and phase shifting of the signal. In digital communications (such as global system for mobile communications (GSM), code division multiple access (CDMA) and long term evolution (LTE)), multipath waves can cause intersymbol interference (ISI) which yields errors in the decision device at the receiver output. For these reasons, in traditional radio propagation, multipath components impede the communication quality by causing errors. On the contrary, the recent findings based on multiple-input multiple-output (MIMO) antenna systems have created that multipath contributions can be exploited to improve the capacity of a two-way communication system. That is, the wireless channel can be decomposed into a set of independent paths (subchannels) between the transmitter and the receiver.

In remote sensing technologies, multipath components can make ghost scatterers, thus they cause focusing errors and affect the quality of remote sensing. The time-reversal (TR) technique, on the other hand, inversely exploits multipath contributions occurring in the intervening media to improve the imaging performance with a MIMO system. As the name suggests, the TR technique is an imaging method utilizing the time reversal theory which is based on the fact that most physical laws of nature are invariant. Although it may seem counterintuitive, the TR technique virtually expands the antenna aperture length; therefore it provides a vastly superior focusing region than the classical diffraction limitation. In the TR process, a pulse is first transmitted from one (or more) of the transceivers. The transmitted signal propagates through the scattering medium including channel impacts and is recorded at each transceiver. After that, these recorded signals are time-reversed and retransmitted back into the same medium. Then, the retransmitted signals experience the same reflection, diffraction and multiple scattering that they have undergone in the forward propagation, which results in energy focusing around the initial source.

Among the developed TR methodologies, the time-reversal multiple signal classification (TR-MUSIC) technique yields super resolution for detection and localization in single-frequency as well as ultrawideband (UWB) signals by utilizing the noise subspace of the time reversal operator (TRO), which is orthogonal to the signal subspace. Although TR-MUSIC imaging provides a superior resolution per-

formance, it requires certain essential factors such as sufficient sets of frequency-domain data (snapshots) and the assumption of scattering configuration. These provide the main motivation of this work. After giving the background and motivation of the dissertation in Chapter 1, an overview of time reversal which explores the invariance of the wave equation for remote sensing is presented in Chapter 2. Especially, the mathematical development and numerical simulations of the time-reversal approach with MUSIC in the distorted wave Born approximation have been investigated and shown. In comparison with the conventional imaging methodology including the decomposition of the time reversal operator method (DORT method), TR-MUSIC imaging provides a superior resolution performance for detection and localization utilizing multistatic data collected from an array antenna system. Basically, any TR-MUSIC technique assumes that an essential prerequisite of providing more antenna elements than scatterers. Moreover, it needs many snapshots in seriously noisy environments.

To overcome the above obstacles, one-dimensional preprocessing for TR-MUSIC imaging with the time-domain gating technique is proposed and developed with Fourier transform in Chapter 3. Instead of utilizing the conventional data, the developed approach employs a modified multistatic data matrix (MDM) obtained from the one-dimensional preprocessing. Because the modified data has not only much less noise components but also consists of fewer scatterer responses than the number of the transceivers, the resulting imaging function yields more reliable images with only a few frequency-domain data regardless of the limitation of the antenna arrays in both a uniform linear array and a uniform circular array.

Although TR-MUSIC imaging obtained from the one-dimensional preprocessing increases SNR, it only employs a center frequency data because the modified frequency-domain data has a distortion around both edge regions with the finite frequency bandwidth. By utilizing and combining relatively stable frequency-domain responses from the time-domain gated technique, the selective TR-MUSIC yields distinctive features such as super resolution and statistical stability. The detail considerations are stated in Chapter 4.

Chapter 5 develops the preprocessing theory for TR-MUSIC imaging from the one-dimensional gating to a two-dimensional one. If there are many scatterers in the time-domain gated region, the resulting image tends to cause focusing errors with deformed results. Combination of TR-MUSIC imaging, and the sequential and multiple angle-and-time-domain gating processes can overcome the above problem and advance the imaging results by extracting desired scatterer response(s) with the Fourier transform and spatial Fourier transform processing in both the time- and angle-domains complementarily. Unfortunately, the developed and extended TR-MUSIC process based on one- or two-dimensional gating assumes the configuration limitations.

To compensate these conditions, Chapter 6 shows an iterative two-dimensional preprocessing for TR-MUSIC imaging with the time- and angle-domain gating technique. By iteratively and selectively rearrange the data matrix, we have the performance improvement in the same restricted environment because we can exploit each domain's strength.

Finally, Chapter 7 concludes the dissertation and discusses future work.

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	小川恭孝
副査	教授	宮永喜一
副査	教授	野島俊雄
副査	特任教授	小柴正則
副査	准教授	大鐘武雄

## 学位論文題名

### Studies on MIMO UWB Time-Reversal MUSIC Imaging with Gating Preprocessing

(ゲーティング前処理を用いたMIMO超広帯域時間反転MUSICイメージング  
に関する研究)

リモートセンシングは探査すべき対象を遠隔から測定できるため、多くの研究がなされるとともに、資源探査、気象情報の把握、地球環境の監視など幅広い分野に応用されるに至っている。レーダーは電波により、遠隔に存在するターゲットの探査を可能とするので、リモートセンシングにおける重要な基礎技術といえる。高い分解能で複数のターゲットを識別する手法を開発することは、近年のレーダーの研究において特に注目を集めている。このような高分解能性を実現するため、複数のアンテナ素子から信号を送信し、全てのアンテナ素子で信号を受信する技術が有効であることが知られている。このような技術は多入力多出力であることから、Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 技術と呼ばれている。

MIMO 技術を用いたレーダーの分野では、探査領域に電波を照射し、ターゲットにより散乱された電波を各アンテナで受信する。この時、各アンテナで受信された時間波形を逆向きに送信したとすると、その信号は散乱源であるターゲットの位置に集中することになる。これは、電磁界の挙動を決定する波動方程式が、時間変数  $t$  の符号を反転させた  $-t$  としても成立するためである。探査領域のグリーン関数が既知であるとして、時間軸を反転させた挙動を計算により実現でき、ターゲット位置を推定することができる。このような手法を Time-Reversal (時間反転) 技術と呼んでいる。

一方、電波の到来方向をアレーアンテナにより高い分解能で推定する技術として Multiple Signal Classification (MUSIC) アルゴリズムが広く知られている。近年、時間反転技術を用いた MIMO レーダーに MUSIC 法を適用することにより、高分解能なターゲットの検出を可能とする手法 (時間反転 MUSIC イメージング) の研究が行われている。しかし、ターゲットの数がアンテナ素子数より少なくなければ適用が不可能であること、雑音が存在するときには、ターゲットの検出性能が劣化する欠点がある。

本論文では、この問題を解決するために、時間領域と空間領域でのゲーティング (フィルタリング) を受信データに適用し、一度に検出するターゲット数を減少させるとともに雑音を大幅に抑圧する前処理法を提案している。特に、時間領域での特性を改善するため、超広帯域信号を用いている。更に、計算機シミュレーションを行い、このような前処理を用いた時間反転 MUSIC イメージングの有効性を明らかにしている。

本論文は 7 章から構成されている。第 1 章は序論であり、研究の背景と本論文の概要について述べている。

第 2 章では、時間反転 MUSIC イメージングが高分解能なターゲット検出性能を有していることを述べている。次に、この手法を適用するためには、アンテナ素子数がターゲット数より多くなければならないこと、雑音が存在する環境では多くの観測数 (スナップショット数) を必要とすることを明らかにしている。

第 3 章において筆者は、MIMO レーダーにより得られたデータ行列 Multistatic Data Matrix (MDM) に逆フーリエ変換を施し、時間領域データに変換した後にフィルタリング (時間領域ゲーティング) を行い、ゲートの外側に存在する雑音と他のターゲットを抑圧することによって SN 比を格段に向上するとともに、一度に検出しなければならないターゲット数を減らす前処理法を提案している。計算機シミュレーションを用いることにより、提案前処理を用いた時間反転 MUSIC イメージングが信頼度の高いターゲット検出性能を有していることを確認している。

第 4 章では、時間領域ゲーティング後に、時間反転 MUSIC イメージングを行う周波数領域データの適用範囲について考察している。

第 5 章では、第 3 章で述べた時間領域ゲーティング (1 次元前処理) を時間・角度領域ゲーティング (2 次元前処理) に拡張している。時間領域のゲート範囲に多数のターゲットが存在する場合には、時間領域ゲーティングのみではイメージングの特性が改善しない。そこで、時間領域だけでなく角度領域でもフィルタリングを行うことにより、一度に処理しなければならないターゲット数を減らすことが可能となる。このような前処理はデータ行列 MDM に通常のフーリエ変換と空間領域フーリエ変換を適用することによって実現される。

更に、第 6 章では、データ行列 MDM に時間領域ゲーティングと角度領域ゲーティングを逐次的に施し、時間反転 MUSIC イメージング適用領域のターゲット数を著しく減少させることによって位置検出性能を格段に向上する手法を提案している。

第 7 章は結論であり、本研究で得られた成果を要約するとともに今後の課題を述べている。

これを要するに、著者は、レーダーによる高分解能ターゲット検出を可能とする、ゲーティング前処理を用いた時間反転 MUSIC イメージング法を提案し、その有効性を明らかにしたものであり、レーダー技術、および、リモートセンシング技術に貢献するところ大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。