

氏名	はやし なおき 林 直樹
授与学位	博士(学術)
学位記番号	学術(環)博第138号
学位授与年月日	平成23年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院環境科学研究科(博士課程)環境科学専攻
学位論文題目	Broadband synthetic aperture radar for environment observation (広帯域合成開口レーダを用いた環境計測に関する研究)
指導教員	東北大学教授 佐藤 源之
論文審査委員	主査 東北大学教授 佐藤 源之 東北大学教授 新妻 弘明 東北大学教授 澤谷 邦男 教授 廣瀬 明
	(工学研究学科) (東京大学)

論文内容要旨

本論文は、環境計測を最終目的として広帯域合成開口レーダ(SAR)技術の可能性を広げることを目的としている。ここでの広帯域とは数 GHz 以上の周波数帯域幅を指し、このとき SAR 画像では数 cm から 10 cm 程度のレンジ分解能が得られる。従来から航空機や衛星搭載を目的として、10 MHz から 100 MHz 程度の帯域を利用したシステムに関しては研究開発が活発に進められてきた。ここで得られるレンジ分解能は 1 m から数 10 m 程度であり、それらのシステム開発と本論文の内容は差別化が可能である。システムの運用に関しては、電波法等クリアすべき点は多いが、技術的なポテンシャルは高く、研究開発が行なわれる意義は充分にあり、非常にエキサイティングな分野でもある。本論文では主に、広帯域 SAR システム構築を目的としたアンテナに関する議論、地表面近傍探査の為の手法の提案、水稻の観測、の 3 つのトピックを扱う。論文は 6 章立てである。

第 2 章では、本論文の内容に関して重要となる基礎知識を述べた。本論文で扱うレーダシステムは、ベクトルネットワークアナライザを用いたステップ周波数連続波システムであり、キルヒホッフマイグレーションにより SAR 画像を合成する。これらの動作原理、更に現行のシステムについて述べた。特にここでは、数値シミュレーションによって、信号の帯域幅の SAR 画像への影響を考察した。その結果、帯域幅がレンジ、アジマス両方向に影響を及ぼすことが明らかとなった。信号の帯域幅を広くすることで、SAR 画像のレンジ、アジマス方向の分解能が共に向上する。この点が、広帯域信号を用いることの価値である。従来から帯域幅とレンジ分解能の関係はよく知られていたが、アジマス分解能との関

係は論じられた例が無く、ここで得られた傾向は新規性があり、興味深い点である。また、SAR画像からは振幅、位相、偏波散乱特性の観測が可能である。

第3章では、広帯域SARシステムに用いるアンテナに関する議論を行なった。まず、FDTD法シミュレーションを活用し、優れた伝送特性を有するビバルディアンテナの設計を行い、新ビバルディアンテナと名付けた。ここでは、FDTD法によってアンテナ導体上の表面電流を可視化し、導体部端面での不要反射を抑えるよう、導体形状を決定した。その結果、従来型のビバルディアンテナと比較して、アンテナ反射係数を低く抑え、放射の効率を向上させることが出来た。加えて、表面電流の不要反射によって生ずるタイムサイドロブ成分を低く抑えることが出来、理想的な形状のパルスの送受信が可能となった。広帯域SARのアンテナとして用いる場合には、この特性が非常に効果的であり、理想的な形状のパルスによって高質なSAR画像が得られると期待できる。

更に広帯域特性を有するアンテナとして、新ビバルディアンテナ、デュアルリジッドホーンアンテナ、スパイラルアンテナ、ボウタイアンテナの4種のアンテナを用い、伝送特性、SAR画像、アンテナ指向性、電波散乱に入射角依存のあるターゲットの測定、アンテナ間結合、偏波特性に関して比較、議論を行なった。伝送特性に関しては、新ビバルディアンテナのものが、パルス幅、タイムサイドロブ成分の観点から最も優れており、それに伴って金属球をターゲットとした際には最も高質なSAR画像が得られることが実証された。しかし、電波散乱に入射角依存のあるターゲットを測定する際には、アンテナの指向性等を考慮する必要がある。アンテナの指向性ビームが広い場合には、入射角の異なる観測点における受信信号もSAR画像に足しあわされる。この場合、ターゲットの電波散乱に入射角依存が大きいと、観測点ごとに受信信号が異なるため、合成されるSAR画像には異なる特性の信号が足し合わされることとなる。結果として、SAR画像によってターゲットを観測した場合、本来のものと異なる散乱特性が読み取られることが予想される。ここでは、その検証実験を行なった。指向性ビームの広いアンテナとして新ビバルディアンテナを、ビームの狭いアンテナとしてデュアルリジッドホーンアンテナを使用し、散乱特性に入射角依存のあるターゲットとして二面反射鏡を使用した。観測結果から、本来ターゲット正面では現れないクロス偏波成分が、新ビバルディアンテナを用いた場合には大きく現れており、広い指向性ビームによって入射角依存性の大きいターゲットの観測結果が歪められる場合があることが分かった。また、アンテナ間結合に関しては、実験によって、アンテナ間結合に対するアンテナ

ナ正面のターゲットからの反射波を計測し評価した。その結果、デュアルリジッドホーンアンテナを用いた場合に最もアンテナ間結合を低く抑えることが出来ることが分かった。また、ボウタイアンテナの場合には、アンテナ配置によってアンテナ間結合を大きく抑えることが出来ることも分かった。アンテナの偏波特性に関しては、既知の事実を SAR システム構築と絡めて述べた。新ビバルディアンテナ、デュアルリジッドホーンアンテナ、ボウタイアンテナによって直線偏波を、スパイラルアンテナによって円偏波の送受信が可能となる。以上から、伝送特性と SAR 画像の観点からは新ビバルディアンテナが最も優れているが、全ての場合において新ビバルディアンテナを用いればよいと言うわけではなく、指向性、測定すべきターゲットの散乱特性、アンテナ間結合、偏波特性等を考慮し、場合によってアンテナを使い分ける必要があることが分かった。広帯域の SAR システムへの適用を念頭においた本章での議論は例が無く、本章の内容は広帯域 SAR システム設計の際の一つの指標となり得る内容である。

第 4 章では、地表面近傍の探査手法として、バイスタティック型地中レーダ (GPR) システムを提案した。一般の地中レーダでは、地表面反射波及び直達波が、特に地表面近傍のターゲット検知を困難とすることが知られている。ここでは、地表面反射波はブリュースター角、直達波は FK フィルタを基礎としたアルゴリズムの適用により抑圧する。測定前に地表面の比誘電率を測定し、そこからブリュースター角を算出する。そして、入射角がブリュースター角となるよう、送信アンテナを配置する。このとき、ブリュースター角の効果によって地表面反射は起きず、電波は全て地中に伝播する。直達波除去に用いる FK フィルタを基礎としたアルゴリズムは、送受信アンテナの位置情報から自動的に動作する。特にブリュースター角の適用は、バイスタティック型レーダシステムの特徴を有効に利用するものである。更に、非常に乾燥して均質な砂が敷き詰められた砂槽に、模擬地雷を埋設し、検証実験を行なった。模擬地雷の深さは 10cm である。合成された SAR 画像では、地表面反射波及び直達波が抑圧され、埋設ターゲットのみの検出に成功した。従来地表面反射波の干渉なしに地表面近傍のターゲット検知に成功した例は報告されておらず、この結果は地中レーダの分野では非常に稀有なものである。本章の内容は、広帯域 SAR による、比誘電率の異なる媒質の境界近傍の探査手法の提案に相当する。本章では地中レーダ地表面近傍の探査を述べたが、同様の手法によって壁面等の探査、航空機及び衛星リモートセンシングによる地表面の観測等も実現可能である。

第 5 章では、地表設置型偏波合成開口レーダ (GB-SAR) による、水稻の観測を扱った。特に出

穂による電波散乱への影響を調査するために、出穂前後に3回の測定を行なった。使用した周波数帯域は1GHzから10GHzで、多偏波計測を行なった。ここでは、信号を帯域幅1GHzの窓関数によって9分割し、それぞれの帯域においてSAR画像を作成し、作成されたSAR画像の平均値を算出した。その結果、出穂によって水平偏波成分の5-7GHz帯域で10dB以上の増加が確認できた。これは、出穂によって生じた穂が水平方向に垂れ、水平偏波の反射波を増加させたことが原因だと考えられる。また、三成分分解により、増加したのは体積散乱と表面散乱成分であることが分かった。これらの原因は今後数値シミュレーションによって解析する必要がある。ここでは、広帯域信号を用いたことで、植生の成長による電波散乱の周波数特性を議論することに成功した。この内容は、広大な農場をマイクロ波リモートセンシングで観測する際の基礎研究となり得る。

第6章は、結論である。各章から得られた知見及び今後の展望を述べた。本論文では、100MHzから10MHzの周波数帯域における技術を扱ったが、ここで提案した技術や考え方は今後研究開発が活発になるであろう、THz帯や光学の分野でも役に立つ可能性がある。そういった意味で、付録も含めた本論文の内容が、電磁波工学界の一つの財産になれば幸いである。

論文審査結果の要旨

本論文は、環境計測を最終目的として広帯域合成開口レーダ(SAR)技術の可能性を広げることを目的としている。論文は6章より構成される。

第2章では、本論文の内容に関して重要となる基礎知識を述べている。本論文で扱うレーダシステムは、ベクトルネットワークアナライザを用いたステップ周波数連続波システムであり、キルヒホッフマイグレーションにより SAR 画像を合成する。ここでは数値シミュレーションによって、信号の帯域幅の SAR 画像への影響を考察した。その結果、帯域幅がレンジ・アジマス両方向に影響を及ぼすことが明らかとなった。

第3章では、広帯域 SAR システムに用いるアンテナに関する議論を行なっている。まず FDTD 法シミュレーションにより優れた伝送特性を有するビバルディアンテナの設計法を提案し、本アンテナを用いることで、タイムサイドロブ成分を低く抑えることができ、高質な SAR 画像が得られることを示した。更に広帯域特性を有するアンテナとして、新ビバルディアンテナ、デュアルリジッドホーンアンテナ、スパイラルアンテナ、ボウタイアンテナの4種のアンテナとの比較を行った。理論的考察を加えることで広帯域 SAR システム設計の際の一つの指標を示した。

第4章では、地表面近傍の探査手法として、バイスタティック型地中レーダ(GPR)システムを提案した。ここでは、地表面反射波はブリュースター角、直達波はFKフィルタを基礎としたアルゴリズムの適用により抑圧する方法を提示した。更に、乾燥して均質な砂が敷き詰められた砂槽に、模擬地雷を埋設し、検証実験を行なった結果、地表面反射波及び直達波を抑圧でき、埋設ターゲットのみの検出に成功した。従来地表面反射波の干渉なしに地表面近傍のターゲット検知に成功した例は報告されておらず、この結果は地中レーダの分野では非常に稀有なものである。

第5章では、地表設置型偏波合成開口レーダによる、水稻の観測を行い、出穂状況と周波数帯域による影響の差異を見いだした。ここでは広帯域信号を用いたことで、植生の成長による電波散乱の周波数特性を議論することに成功した。

第6章は、結論である。

本論文では、システムの広帯域性を利用することでイメージングが有効に行えること、更に偏波や電波散乱の性質を利用することの重要性を明確に示した。これにより、更に新しい電波利用の領域を開拓する重要な知見を得ることに成功した。

よって、本論文は博士(学術)の学位論文として合格と認める。