

財団法人テレコムエンジニアリングセンター

公益的調査研究助成

成果報告書

調査研究テーマ

衛星通信・放送システム及び衛星搭載レーダの広 域地表電力束密度(PFD)計測技術の研究

助成期間

平成 20年 4月 ~ 平成 23年 3月

提出期日

平成 23年 4月

研究代表者氏名

福地 一

所属機関・職名

首都大学東京 システムデザイン学部 教授

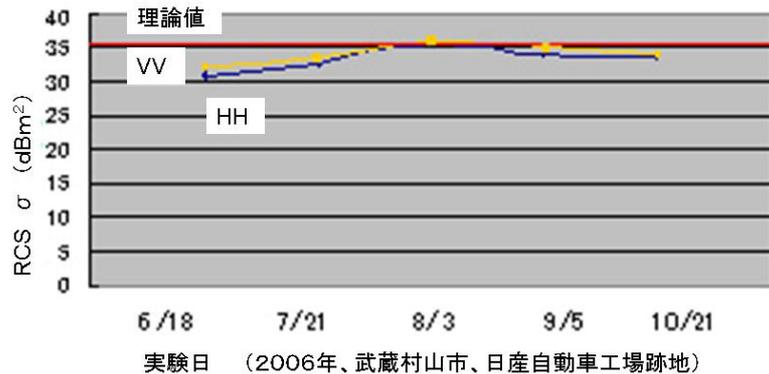
1. 調査研究の概要

調査研究テーマ	衛星通信・放送システム及び衛星搭載レーダの広域地表電力束密度（PFD）計測技術の研究	
助成期間	平成 20年 4月 ～ 平成 23年 3月	
報告者 (助成対象者)	福地 一	印
勤務先	機関名	首都大学東京 システムデザイン学部 航空宇宙システム工学域
	住所	〒191-0065 東京都 日野市 旭が丘 6-6
	TEL	
	E-mail	
助成金額		
本報告書作成日	平成 23 年 4 月 30 日	

調査研究概要

衛星から地上に照射される広域電力束密度を正確に測定する技術を確立した。

- BSAT 電波受信: 小型、安価な装置による衛星電波受信システムを構築し、装置の温度依存性、衛星軌道誤差による日周変動、降雨等大気に伴う受信レベル変動を補償して正確な受信レベルを算出するアルゴリズムを開発した。この装置では、晴天時の衛星受信電力を正確に推定することができるため、大気及び降雨による電波の減衰を客観的に抽出することが可能となった。
- ALOS/PALSAR の PFD 検証: ALOS/PALSAR は衛星搭載レーダであり、基準反射器(コーナリフレクタや金属板)のレーダ断面積(RCS)導出結果が理論結果とどの程度差があるかでレーダ PFD の検証が可能と思われる。この研究ではこのようなラジオメトリック校正の他、4つの偏波組み合わせ(HH, HV, VH, VV)について校正する手法が確認できた。図は、金属板の RCS 測定結果であり、8-10月実験では理論値と近い結果が得られ、ALOS/PALSAR の PFD 妥当性を検証できた。



2. 調査研究の詳細

2.1 課題名:

衛星通信・放送及び衛星搭載レーダの広域地表電力束密度(PFD)計測技術の研究

2.2 調査研究の背景

今後、衛星通信・放送システムにおいて、高周波化を通じて大容量化を図る際に、降雨減衰の影響を適応的に補償する適応型衛星送信電力制御などの手法が提案されている。この場合には、衛星の EIRP パターンを変化させることになり、その検証は、広い範囲で同時に受信電力を連続的に測定する必要がある。従って、安価・小型で正確な受信電力を測定できる装置と手法を確立する必要がある。

衛星搭載レーダのうち、合成開口レーダ搭載衛星が、ALOS(Lバンド、日本、2006年1月打上)、TerraSAR-X(Xバンド、独、2007年6月打上)、Radarsat2(Cバンド、加、2007年12月打上)と軌道上で観測を行う状態となっている。これらのレーダにより、複数の周波数・偏波で観測ができ、多くの情報を得ることができるが、正確な較正が必要となっている。このように、衛星による通信・計測分野で電波の利用が多様化・高度化することから、秩序ある電波利用の確立のためには、正確にルールに従った電波システムが運用されているかを検証する技術が重要となっている。

2.3 調査研究の目的:

本調査研究は、衛星通信・放送システムや衛星搭載レーダによる地表面での電波の電力密度(PFD: Power Flux Density)を、安価・小型でありながら正確に測定する手法の確立を目的としている。これら衛星通信・放送システムや衛星搭載レーダは将来、多様な周波数・電力で運用されることが予想され、PFDを正確に広範囲に測定する方法を確立することは、効率的な電波利用と電波秩序の維持に大きく貢献すると期待される。従来、PFDは、システム設計段階で定められたPFD制限を考慮していることを理由に、広範囲で実地計測することは少ない。また、地球観測パルスレーダの場合には、ある地点での電波受信時間が極めて短時間であることや複雑な変調パルスであることなどからPFDの直接測定が難しいとされている。これら、通信・放送衛星電波や地球観測衛星のPFDのを安価で可搬な装置で検証できれば、広域での計測が可能となり、ITU等の定める電波利用ルールに従ったシステムであるかの検証が容易になる。

本研究は、以下のサブテーマについて、小型・安価な装置による実現を図る研究である。

- (1)通信・放送衛星電波のPFD測定:主として、BSAT電波の晴天時受信レベルの正確な測定
- (2)衛星搭載レーダのPFD測定:日本が2006年1月に打ち上げた陸域観測衛星ALOSに搭載されている世界で最初のフルポラリメトリックレーダ、PALSAR(L-band)のPFDの検証

2.4 調査研究の意義:

今後、地上、衛星を問わず、広範な電波利用が進展することから電波秩序の維持のためには、定められたルールに従った送信電力、周波数幅であるかの正確な把握に資する技術は有意義である。

(1)通信・放送衛星電波のPFD測定

衛星通信・放送システムに及ぼす大気影響の詳細分析:今後、高い周波数帯の利用が想定される衛星通信・放送システムの実現のためには、大気ガス・気象粒子(雨、雪、雲等)による電波の減衰・交差偏波発生を正確に見積もり、その対策技術を並行して確立する必要がある。本申請測定システムの利用によりアジア多雨地域も含めて多くの伝搬実験が実施でき、多雨地域においても有効な減衰対策技術の醸成に貢献する。

(2)衛星搭載レーダのPFD測定

ポラリメトリック合成開口レーダの詳細分析:衛星搭載ポラリメトリック合成開口レーダのデータを活用するためには正確な偏波状態・電波強度の較正が不可欠である。複数の散乱マトリクス性能をもつ極めて安価な基準受動型反射器を実現することによって、ファラデーローテーションの影響や衛星搭載アンテナ特性の経年変化を正確に補正した観測データを得ることが容易になる。

2.5 調査研究の方法:

以下の2つのサブテーマに関する安価、小型軽量な計測システムを作成する。その性能の検証のために、図に示す既存の衛星電波受信装置を活用する。

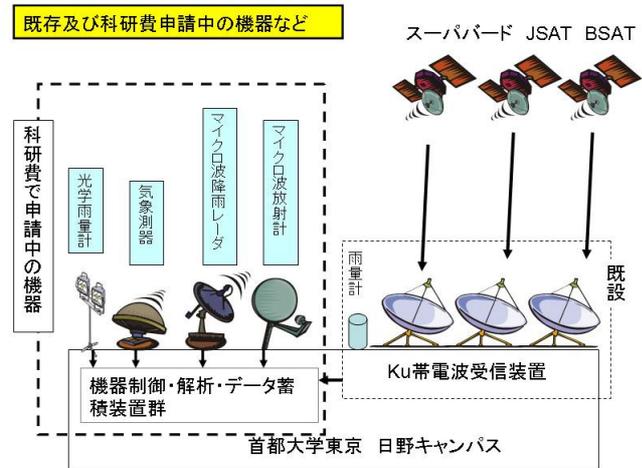
(1) 通信・放送衛星電波の PFD 測定

アンテナ、ODU、小型スペアナを組み合わせ、安価な受信装置を構成させる。この受信データに及ぼす衛星軌道、ODU部の温度、降雨等大気など受信レベル変動要因の調査を実施し、その影響を除去するアルゴリズムを開発し、理想的な状況の晴天時での受信レベルを正確に推定する。

(2) 衛星搭載レーダの PFD 測定

レーダ断面積が既知である基準

反射器(コーナリフレクタ、金属板、偏波選択反射器、偏波回転反射器など)を作成し、日本のALOS搭載レーダPALSARの受信レベル較正実験の他、PALSARが世界で最初の4偏波レーダ(HH,HV,VH,VVの測定が可能)であることから4偏波特性が既知の基準反射器によって偏波状態の校正実験を行う。これらの実験・解析にあたっては、2006年に武蔵村山市旧村山日産工場跡地にて集中的にデータ収集を行った結果を用いる。また、2009年以降に首都大学東京日野キャンパスで実施したドイツのTerraSAR-X衛星の観測実験の結果も用いる。



2.6 調査研究の特色

本研究は、近年及び将来の衛星通信・放送システムの高度化とマイクロ波合成開口レーダによる地球観測の本格化をふまえて、それらの研究を実施している中で思いついた重要な副産物といえる。つまり、ますます複雑・多様化する電波利用の秩序維持に不可欠な、宇宙から地表面に降り注ぐ電波強度(PFD: Power Flux Density)のより正確な実地計測が、安価・小型な装置により容易に必要な場所で、複数同時に実施できる可能性を思いついた。従来は、正確な測定のために特注開発するような装置でしか実現できないことを考慮すると、本申請のテーマは独創性・斬新性を有していると思う。

(1) 通信・放送衛星電波の PFD 測定

2000万台以上が普及しているといわれる衛星放送受信セット程度の安価・小型な受信セットから正確な地表PFDを求めようとする点に独創性がある。そのためにアウトドアユニットの温度影響、衛星軌道に伴う日周変動、雲・降雨による減衰などの誤差要因の補正アルゴリズムを開発する。この装置を大量に用いて、将来の21GHz帯衛星放送で想定されている降雨減衰対策用適応アンテナパターン可変機能の実地検証が可能となる。

(2) 衛星搭載レーダの PFD 測定

極めて安価な合成開口レーダ用受動基準反射器(偏波保存型及び偏波回転型)を自ら作成し、それらを用いた先進的な国内外のポラリメトリック衛星搭載合成開口レーダの観測に適用する点が斬新性を有している。

3. 年度ごとの調査研究内容

初年度分 平成 20.4～平成 21.3

平成20年度は、提案時に述べた以下の2つのサブテーマに関する実験・解析の機器・ソフト等を整備した。

(1) 通信・放送衛星電波の PFD 測定

既存のアンテナに小型スペアナおよび較正用信号発生器を組み合わせ、安価な受信装置を構成させた。初期的な測定から、アンテナ部の ODU (Out-Door-Unit) の温度により受信レベルの変動がわずかではあるが生ずることが判明したため、ODU 部の温度測定系を整備するとともに、衛星軌道、降雨、ODU 温度に伴う受信レベル変動の補償アルゴリズムを開発した。この副産物として、受信レベルから降雨減衰を客観的に抽出することができた。より正確な大気に伴う受信レベル変動を解析するため、ミリ波放射計による天空輝度温度測定データから大気ガス及び降雨減衰による受信レベル変動を推定する手法を Mie 散乱理論をもとに求めた。

(2) 衛星搭載レーダの PFD 測定

日本の陸域観測衛星 (ALOS) 搭載合成開口レーダ (PALSAR) による武蔵村山地域の観測データを用いてレーダの偏波較正 (ポラリメトリック較正) 及び受信レベル較正 (ラジオメトリック較正) を試みた。いずれも、武蔵村山の日産工場跡地に我々の手作りの複数レーダ反射器 (3 面コーナリフレクタ、1 辺 2m の平板反射器など) を設置し、そのレーダ反射信号をもとに較正を実施した。その結果、偏波較正には電離層によるファラデー回転の補償が必要なこと、受信レベル較正には作成した基準反射器の工作精度や設置角度 (仰角、方位角) 精度が影響することが判明した。特に、本研究の主題である受信レベル較正には、複数回の観測データを用いて最大受信レベルとなる結果を採用することが望ましいと判断した。その結果、条件の良い平板反射器による測定から平板のレーダ断面積が理論とほぼ同様となり、ALOS/PALSAR の地上放射電力密度が設計通りであることが推測された。

平成 21.4～平成 22.3

平成21年度は、提案時に述べた以下の2つのサブテーマに関する実験・解析を昨年度整備した計測システムをもとに進展させた。その成果の一部を、それぞれのサブテーマについて IEEE Transaction 論文及び電子情報通信学会ソサエティ大会の口頭発表として成果発表した。

(1) 通信・放送衛星電波の PFD 測定

既存のアンテナに小型スペアナおよび較正用信号発生器を組み合わせ、安価な Ku バンド衛星信号受信装置を構成させた。また、NICT との共同研究に基づき、高速インターネット衛星 (WINDS) の TDMA 波受信装置を整備し、Ka バンド信号の受信も可能とした。同時に、科研費等で整備した天空雑音温度測定装置 (放射計) を用いた降雨に伴う雑音温度上昇を測定することを可能にし、雑音温度上昇と昨年度の成果である降雨減衰の客観抽出結果を比較することにより、雑音温度測定から降雨減衰を推定する手法を検討した。この結果、降雨減衰の仰角依存性など、天空の任意の方向の降雨減衰を推定する手がかりを得ることができた。

(2) 衛星搭載レーダの PFD 測定

日本の陸域観測衛星 (ALOS) 搭載 L-band 合成開口レーダ (PALSAR) による武蔵村山地域の観測データを用いてレーダの偏波較正 (ポラリメトリック較正) 及び受信レベル較正 (ラジオメトリック較正) の高精度化を試みた。これらは 2006 年度に実施した武蔵村山日産工場跡地での実験データをもとに解析を進めた。加えて、今年度は、パスコ (株) からの研究委託に基づき、ドイツの TerraSAR-X 搭載 X-band 合成開口レーダによる首都大学東京日野キャンパスの観測実験を実施した。その結果、昨年度の成果も含め、L-band 観測における偏波較正には電離層によるファラデー回転の補償が必要なこと、受信レベル較正には作成した基準反射器の工作精度や設置角度 (仰角、方位角) 精度が大きく影響することが判明した。前者についてはそのファラデー回転角の補償も含めた偏波較正の手法を IEEE の論文として発表した。後者については、前述の TerraSAR-X 実験のために作成したコーナリフレクタの工作精度を高めて年度末に実験した。

最終年度分 平成 22.4～平成 23.3

平成22年度は、提案時に述べた以下の2つのサブテーマに関する実験・解析を昨年度整備した計測システムをもとに進展させた。その成果の一部を、それぞれのサブテーマについて、電子情報通信学会全国大会(2011年3月)の口頭発表として成果発表した。

(1)通信・放送衛星電波の PFD 測定

既存のアンテナに小型スペアナおよび較正用信号発生器を組み合わせ、安価な Ku バンド衛星信号受信装置を構成し、JSAT, BSAT の Ku バンド信号の降雨減衰を継続して観測した。また、高速インターネット衛星(WINDS)の TDMA 波受信装置により、Ka バンド信号(18GHz)の降雨減衰も継続して観測した。同時に、科研費等で整備した2周波(10GHz 及び 36GHz)での天空雑音温度測定装置(放射計)を用いた降雨に伴う雑音温度上昇を測定することを可能にし、雑音温度上昇とこれまでの成果である降雨減衰の客観抽出結果を比較することにより、雑音温度測定から降雨減衰を推定する手法を検討した。この結果、2周波放射計により従来降雨減衰の推定に必要な媒質温度の仮定を不要とする降雨減衰推定法を提案することができた。

(2)衛星搭載レーダの PFD 測定

日本の陸域観測衛星(ALOS)搭載 L-band 合成開口レーダ(PALSAR)による武蔵村山地域の観測データを用いてレーダの偏波較正(ポラリメトリック較正)及び受信レベル較正(ラジオメトリック較正)を引き続き試みた。加えて、昨年度に引き続き、ドイツの TerraSAR-X 搭載 X-band 合成開口レーダによる首都大学東京日野キャンパスの観測実験を数回実施した(2010年1, 4月)。上記のデータ処理・解析を通じて、PALSAR の L-band における偏波較正の電離層によるファラデー回転補償の高精度化を図った。基準反射器の工作精度の課題については、TerraSAR-X 実験のために作成したコーナーリフレクタの工作精度を高めて再度実験した。TerraSAR-X の X-band 観測については今年度データ解析を実施したが、校正用基準反射器の理論反射性能がまだ再現できていない。この点、TerraSAR-X のラジオメトリック校正アルゴリズムのチェックも含めて現在再検討中である。

4. 調査研究成果の説明

得られた成果に対する自己評価

電波利用の多様化・高度化が急速に進展する現在、電波秩序の維持のためには、各電波システムがルールに従って運用されているかを正確に把握する技術が不可欠である。しかも、その装置が大型ではなく、安価、小型、可搬で多くの場所での容易に測定が可能であることが重要である。この研究では、安価、小型の装置で、通信・放送衛星受信電力を正確に把握する手法及び衛星搭載地球観測レーダの受信強度、偏波状態の校正を実施する手法を提案することができた。ただし、通信・放送衛星受信電力に関しては、RF部の利得等を校正する装置が整備できないため、PFDの絶対値の把握とITUルールへの適合性に関する評価までには至らなかった。

副産物的な成果として、安価な受信装置の欠点であるODU利得の外気温依存性をODU部温度の測定を通じて補償する方法と衛星軌道特に軌道傾斜角の理想状態からのズレに起因する受信レベルの日周変化を補償する方法を確立できた。このことは、降雨等の大気に伴う減衰量の抽出に不可欠な晴天時受信レベルの正確で客観的な抽出につながることから、降雨減衰を正確に測定できることに繋がる。今後、アジア多雨地域での災害に強い通信インフラとしての衛星通信・放送システムの普及や衛星通信の大容量化に伴って不可欠な降雨減衰対策技術の検証のためには降雨減衰時系列の正確な把握が不可欠である。今後、この降雨減衰時系列データを用いて降雨減衰対策効果を評価する必要がある、アジア多雨地域の研究機関との共同研究を通じて進展させるべき研究であると考えます。

主な成果リスト

[誌上发表]

- A.Takeshiro, T.Furuya and H.Fukuchi, "Verification of polarimetric calibration method including Faraday rotation compensation using PALSAR data", IEEE TGRS, vol.47, no.12, pp.3960-3968, Dec. 2009.
N.Abe and H.Fukuchi, "Objective estimation of rain attenuation value along satellite-earth path", IEEE Trans. Antenna and Propagation, submitted.

[口頭発表]

- A.Takeshiro, Y.Aso, H.Fukuchi and M.Satake, "Polarimetric calibration method including Faraday rotation compensation using passive two reference reflectors", Int. Symp. Ant. And Prop.(ISAP2008), Taipei, Oct. 2008.
H.Fukuchi, N.Abe, T.Takahashi and T.Asai, "Ka-band satellite communication experiments and rain attenuation measurements using WINDS", Int.Conf. on Inf. Comm. And Signal Proc.(ICICS2009), Macau, Dec.2009.
N.Abe and H.Fukuchi, "Objective estimation of rain attenuation value along satellite-earth path", Int. Symp. Ant. And Prop.(ISAP2009), Bangkok, Oct. 2009.
阿部 亘仁、福地一、"21 GHz帯衛星放送システムの降雨減衰対策 — デジタル衛星放送波を用いた降雨減衰量の客観抽出 —"、2008年電子情報通信学会通信ソサエティ大会、B-1-27、川崎、2008年9月。
阿部 亘仁、中村優人、福地一、"Ku および Ka 帯における降雨減衰の周波数及び方向依存性"、2009年電子情報通信学会通信ソサエティ大会、B-1-37、新潟、2009年9月。
佐々木洋希、阿部 亘仁、福地一、"簡易型2周波放射計によるミリ波降雨減衰時系列の推定"、2011年電子情報通信学会 総合大会、B-1-40、2011年3月。