

審査の結果の要旨

氏名 水谷 司

近年、局所的集中豪雨による甚大な水災害が増加傾向にあり、その高密度常時モニタリングの社会的必要度が極めて高い。既存の気象庁の気象観測システム AMeDAS や気象レーダーは集中豪雨を的確に捕捉するだけの十分な時空間分解能を有していない状況の中で、新しい降雨高密度計測法の開発が望まれている。

そこで、本論文は、VHF 帯域用の移動体通信用媒体として新幹線軌道沿線などに既に設置されている漏洩同軸ケーブル(LCX; Leaky Coaxial Cable)を利用した雨量計測に着目し、屋内実験、屋外実験を実施し、また、得られた時系列データの高度な信号処理法を開発し、その適用可能性が十分であることを示したものである。論文は全6章と付録から構成されている。第一章では研究の背景、既往の雨量計測法をレビューし、第二章では降雨の物理的性質と降雨強度の推定法を論じている。

LCXは同軸ケーブルの外部導体に周期的にスロットが配列されたスロットアレーアンテナの一種である。本研究は、雨滴の付着によりLCXから漏れる微弱な電界にゆらぎが発生することを定量的に評価することで、豪雨をLCXに沿って線状にかつリアルタイムにモニタリングする技術を確立することを目的としている。そこで第三章ではLCXの漏洩電磁界の基礎的特性を電磁気学をベースにモードに展開し、各種モードの特性を論じている。LCXの放射特性には「放射モード」と「表面波モード」の2種類があり、後者は evanescent (非伝搬) 状態で電磁エネルギーがLCX表面極近傍に集中した状態となる。降雨によりLCX表面に形成される水膜の挙動が表面波モードに摂動を与える性質を利用して降雨をモニタリングすることを提案している。

モニタリングには、2本の並行におかれたLCXケーブルを用い、一本を送信に、他方を受信側LCXとする。リニア周波数変調波の遅延プロファイルを観測することによって、電磁波の伝搬経路(パス)、つまりLCXに沿った各点毎の応答を特定し、その点の雨量を推定することができる。この方式については第四章で述べている。このことにより局地的な豪雨による特定のパスの信号のゆらぎを観測することができれば、豪雨の位置をリアルタイムに推定することが可能である。

第五章は屋内実験、屋外実験、時系列電磁波データの信号処理法について述べるもので、本論文において最も重要な部分である。

使用周波数はLCXのアンテナ特性上VHF帯域に制限され、VHF帯域での雨滴のRCS(後方散乱断面積)は、一般的な気象レーダーで用いられる5GHz帯の数1000分の1であり、また、雨滴による電磁波の吸収・散乱により生じる降雨減衰はVHF帯域では150mm/hの豪雨でも 10^{-8} dB/m以下である。そのため、LCX周辺の空間に存在する雨滴による電磁波の吸収・散乱レベルは工学的には観測不能なほど小さくなる。そこで、本研究では、LCX

表面に直接付着する雨滴によるアンテナゲインの変化に伴う信号のゆらぎを評価することを試みている。

表面波モードを動作させた状態で電磁遮蔽された低外来雑音レベルの電波環境での人工降雨実験を京都大学防災研究所宇治川ラボ雨水流出実験装置で行い、その結果を述べている。受信信号強度の差分ゆらぎの1分間局所RMSと1分間降雨強度との間に高い線形相関があることを明らかにした。豪雨のモニタリングには表面波モードの有効性、外来雑音が低い場合は、電磁波の乱れから豪雨レベルを推定できることを示した。

次に東京大学工学部一号館屋上で実降雨実験を行った結果を述べている。非定常かつ高レベルの連続性雑音と衝撃性雑音とで構成される外来雑音が受信信号に重畳され、ゆらぎの大きさと降雨強度との間には相関が見られなかった。

そこで、信号処理による有意情報の抽出を試みている。まず、連続ウェーブレット変換を用いて、信号の時間周波数構造を調べた結果、豪雨時には不連続点が発生するため広帯域特性があり、また、連続性雑音は高周波雑音であることが明らかにした。そこで、離散ウェーブレット変換を用いたサブバンドフィルタリングにより連続性雑音の持つ高周波成分を除去した結果、低周波領域に残った豪雨由来の不連続点の情報を抽出することに成功した。ただし、豪雨による不連続点と同様に広帯域特性を有する衝撃性雑音や雑音レベルが急峻に変化する点(エッジ)などの不要不連続点も同時に抽出されたため、これらを排除する3段階のアルゴリズムを構築した。1段階目では、連続性雑音レベルより圧倒的に大きな衝撃性雑音を閾値判定により検出/排除する。2段階目では、信号の各点での特異性強度(Lipschitz-Hölder 指数)を連続ウェーブレット変換により推定し、エッジを検出/排除する。3段階目では、1段階目の閾値判定で排除できない小さな衝撃性雑音をパーセンタイルを用いた外れ値検定により検出/排除する。以上の3段階で構成される不要不連続点排除のアルゴリズムを信号に適用した結果、1分間降雨強度で約30mm/h(気象庁定義で「激しい雨」)以上の豪雨をリアルタイムに捕捉できることを明らかにした。

降雨時と非降雨時の信号のマルチフラクタル性の違いについての検討も行っている。既往の研究で、降雨の時空間的変動にはマルチフラクタル性があることが報告されている。一方、本研究では、降雨時には不連続点が発生し、降雨強度に応じてその大きさが変化することが示唆された。以上の知見から、非降雨時に比べて降雨時の信号のマルチフラクタル性が大きくなると推測し、WTMM(Wavelet Transform Modulus Maxima)に基づくマルチフラクタル解析のアルゴリズムを構築し実降雨時の信号に適用した結果、実際に非降雨時と比較して降雨時のゆらぎのマルチフラクタル性は有意に大きくなることを示した。この結果から、前述のサブバンドフィルタリングと不要不連続点で構成されるアルゴリズムでは検出ができなかった、10mm/h~20mm/hの「やや強い雨」についても検出することができた。

第六章では、本論文のまとめを述べている。

本論文は、社会基盤学の分野ではこれまであまり研究実績のない、電磁気学をベースにした電磁波を利用した降雨計測の課題にチャレンジし、既設の移動体通信用アンテナの一種であるLCXに表面波モードを動作させ、特徴抽出アルゴリズムを駆使することで、LCXに沿って高時空間分解能で豪雨をモニタリングできる可能性を示した。実用化に向けての課題も多いが、その可能性を定量的に明らかにした学術的貢献は大きい。以上、本論文は工学上多大な知見を呈示していると判断される。よって、博士（工学）の学位請求論文として合格と認める。