

論文の内容の要旨

論文題目 漏洩同軸ケーブルによる電磁界の表面波モードを用いた
豪雨の線状モニタリング

(Monitoring of torrential rain along a pair of leaky coaxial cables by means of its
electromagnetic surface wave modes)

氏名 水谷 司

近年、度々甚大な水災害をもたらしている集中豪雨が増加傾向にあり、そのモニタリングの需要が高い。しかし、既存の気象庁の気象観測システムである 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。

そこで本研究では、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)に着目した。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。LCX から漏れる微弱な電界の雨滴によるゆらぎ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認することを研究目的とする。

モニタリングには、送受信 LCX 対を平行に配置したバイスタティックレーダー方式をとる。リニア周波数変調波を送受信し、そ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)を特定し、LCX に沿った各点での応答を推定することができる。従って、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。ただし、使用周波数は LCX のアンテナ特性上 VHF 帯域に制限される。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 である。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 10⁻⁸dB/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、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た。

LCX は一種の周波数走査アンテナであり、周波数を変化させることで、電磁エネルギーの放射特性を変化させることができる。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、前者は電磁エネルギーが LCX 表面から放射される状態であるのに対して、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に着目するため、表面波モードを利用して降雨をモニタリングすることを提案した。また、既往の研究結果から、放射モードは遠方の壁面により反射波が発生し、受信信号に影響することが知られている。表面波モードを動

作させれば、近傍界のみの影響しか捕捉しないので、そのようなクラッターの影響を軽減できるという利点もある。

まず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人工降雨実験を行った。回帰分析を行った結果、受信信号強度の差分ゆらぎの1分間局所 rms(2乗平均平方根)と1分間降雨強度との間に以上の高い線形相関があることを確認した。この結果から、豪雨のモニタリングには表面波モードが有用であること、低レベルの外来雑音の電波環境であれば、得られた相関関係を用いて豪雨レベルを推定できるということ、一般的に気象レーダーで用いられない VHF 帯域でもアンテナ表面への水滴の付着による電界のゆらぎを捉えれば、高精度で降雨モニタリングができる可能性があることを示した。

次に、屋外で実降雨実験を行った結果、非正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相関が見られなかった。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に広帯域特性があり、また、連続性雑音は高周波雑音であることが明らかとなった。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も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することに成功した。

さらに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を行った。フラクタルとは自己相似図形や波形を意味し、マルチフラクタルとは複数の特異性強度(Lipschitz-Hölder 指数)を持つ特異点で構成されるフラクタルである。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、本研究の成果から、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た。

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確認した。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。

本研究の成果から、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、構築したアルゴリズムを適用することで、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。