

漏洩同軸ケーブルによる豪雨の線状モニタリング

水谷司・藤野陽三・長山智則*・猪又憲治・辻田亘・鹿井正博**

* 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

** 三菱電機先端技術総合研究所

要 旨

漏洩同軸ケーブル(LCX)は同軸ケーブルの外部導体表面にスロットが設けられたVHFアンテナの一種であり、移動体通信用のアンテナとして主に利用されている。豪雨時に受信信号が変動することが経験的に知られているため、この変動を解析することでLCXに沿ってリアルタイムに豪雨を検出できないか検討した。まず、理想的な状態で人工降雨実験を行った結果、受信信号のノイズレベルは極めて大きく降雨強度との相関は見られなかった。そこで、水滴がLCX表面に付着した時に発生する不連続点を検出するため多重解像度解析(MRA)を使ってノイズ除去を行った結果、ノイズに埋もれた降雨による変動を抽出することができた。実降雨実験データにこのMRAを適用した結果、約40mm/h以上の豪雨については、検出することに成功した。これにより、既に日本中に設置されたLCXネットワークを用いて豪雨を検出できる可能性を示せたと考えられる。

キーワード: 漏洩同軸ケーブル(LCX), 電磁波, 降雨モニタリング, 降雨実験, ウェーブレットによる多重解像度解析(MRA)

1. 豪雨モニタリングの必要性和研究目的

近年、メソγスケールあるいはマイクロスケール以下の集中豪雨が増加傾向にある。既存の気象庁の気象観測システムの一つである AMeDAS の空間分解能は平均約 17km 格子であり、集中豪雨のスケールを考えると必ずしも十分な観測密度を持っているとはいえない。これを補完するように気象レーダーが併用されているが、山岳にビームが遮蔽される、レーダーで観測される上空雨量と実際に必要とされる地上雨量との間にギャップが存在する、などの問題点も指摘されている。そこで本研究では現在の気象観測システムをさらに補完する技術として、漏洩同軸ケーブル(Leaky Coaxial Cable: LCX)に着目した。LCXは同軸ケーブルの外部導体に周期的スロットが設けられたスロットアレーアンテナの一種である(Fig.1)。LCXは新幹線沿線などに設置されており、主に移動体通信用の VHF アンテナとして利用されている(岸本(1982))。経験的に、LCXの漏洩電界が降雨時に変動することが知られているため、本研究で

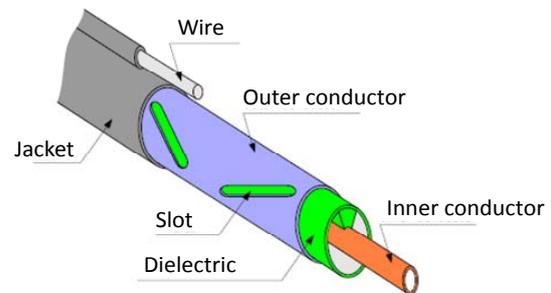


Fig. 1 Leaky Coaxial cable (LCX)

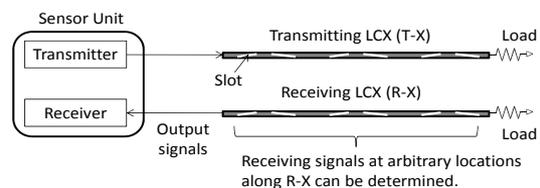


Fig. 2 Dual LCX System

はそれを定量的に評価することによって、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研究目的とする。

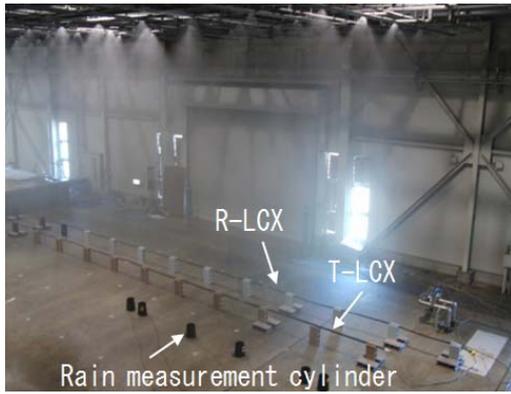


Fig.3 Transmitter and Receiver of LCX under artificial rainfall experiment

2. モニタリングへの表面波モードの応用

モニタリングには、送受信 LCX 対を平行に配置したバスタティックレーダー方式をとる (Fig.2)。FM-CW 方式で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 (Inomata(2007), Inomata(2008))。集中豪雨が局地的に発生した場合、特定のパスのみが乱れるので、それを観測することで、集中豪雨の位置と範囲を推定できると予想される。ただし、使用周波数帯域は VHF であるため、雨滴径に対して波長が十分に大きい。そのため、LCX 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、著者は LCX 表面に直接付着する雨滴によってアンテナゲインが僅かに変化し、それに伴う信号のゆら

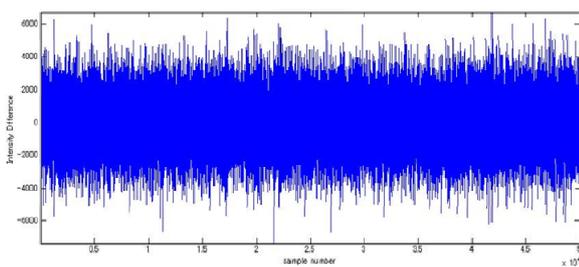
ぎを評価できないか考えた。LCX は一種の周波数走査アンテナであり、周波数を変化させることで、電磁エネルギーの放射特性を変化させることができる。放射特性には「放射モード」と「表面波モード」の 2 種類があり、前者は電磁エネルギーが LCX 表面から放射される状態であるのに対して、後者は *Evanescent* (非伝搬) 状態で電磁エネルギーが LCX 表面極近傍に集中した状態となる (水谷(2009), 猪又, 水谷(2009))。降雨により LCX 表面に形成される水膜の挙動に着目するため、この表面波モードを利用して降雨のモニタリングを行うものとした。

3. 人工降雨実験とデータの信号処理

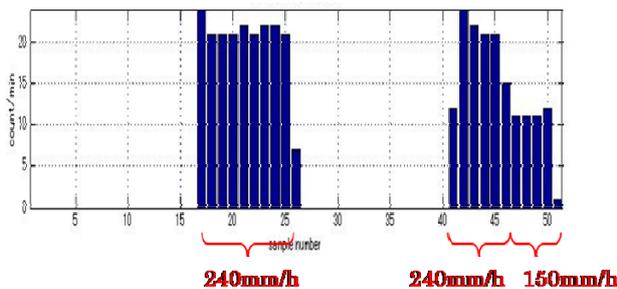
送信 LCX に表面波モードを動作させ、まず理想的な状態で人工降雨実験を行った。人工降雨実験には、京都大学防災研究所所有の雨水流出実験装置を用いた。雨水流出実験装置は 30m×18.75m の大きさで、約 100mm/h~300mm/h の人工降雨を再現できる。

Fig.3 に、本実験場で 1 分間降雨強度 240mm/h の人工降雨を降らせた状況を示す。この実験場に長さ 20m の LCX を 1.5m 間隔で 2 本平行に配置し、それぞれを計測機に接続し、表面波モードが動作する周波数帯域幅 285~315MHz で電波を送受信できる双 LCX システムを構築した。豪雨として、1 分間降雨強度 150mm/h , 240mm/h の 2 段階の人工降雨を用いた。リファレンス用の降雨強度の計測には、LCX から約 1m 離して設置した転倒マス式雨量計 (分解能 0.2mm) を用いた。受信信号の標本化周波数は、16Hz とする。

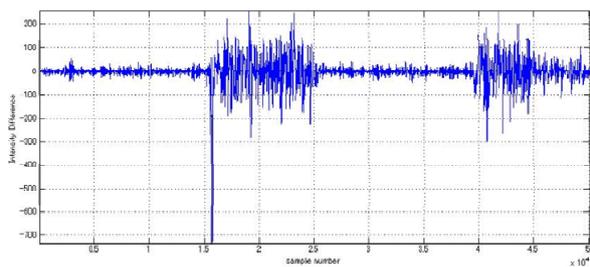
受信信号は計測機および LCX の温度特性に影響を受けるため、信号強度あるいは位相そのものの値



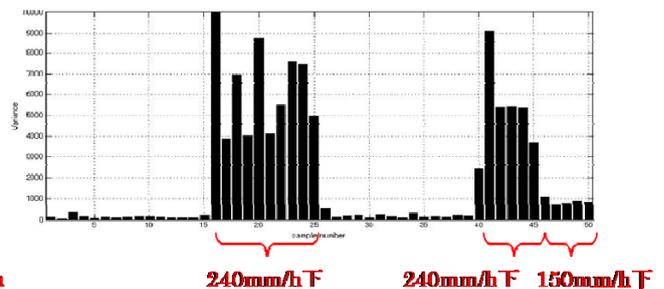
(a): original signal



(b): one-minute rainfall intensity



(c): denoised signal using MRA



(d): one-minute square average of (c)

Fig.4 results of artificial rainfall experiments

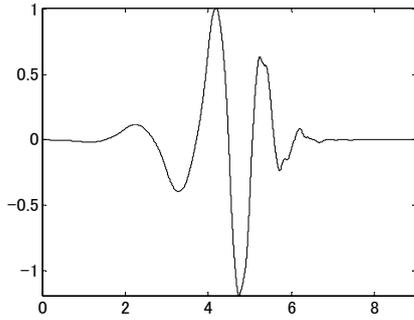


Fig.5 A Daubechies wavelet with $p = 5$ vanishing moment

と降雨量との相関を見出すことは困難である。従って、変動成分として信号強度 $E(t_i)$ の一次差分値

$$\Delta|E(t_i)| = |E(t_i)| - |E(t_{i-1})| \quad (i \text{は正の整数}) \quad (1)$$

に着目する。実験で計測した 51 分間 48960 点の受信強度の一次差分値と雨量計により計測した 1 分間降雨強度の時系列をそれぞれ Fig.4(a), (b)に示す。(a), (b)を比較すると約 240mm/h の極めて強い降雨強度の状態でも降雨による変動がノイズフロアに埋もれて確認できないことが分かる。(a)から降雨による変動のみを抽出するために、非定常時系列解析の一つである、1 次元離散ウェーブレット変換による多重解像度解析(MRA)によりノイズ除去を行った。多重解像度解析(Addison(2002), Mallat(2009))は、デジタル信号を高周波成分を示す詳細係数(detail coefficient)と低周波成分を示す近似係数(approximation coefficient)に分解する手法である。詳細係数と近似係数はそれぞれ信号 $s(t)$ とウェーブレット関数 $\{\psi_{i,j}(t) = 2^{-i/2}\psi(2^{-i}t - j)\}_{(i,j) \in \mathbb{Z}^2}$ 、信号 $s(t)$

とスケーリング関数 $\{\phi_{i,j}(t) = 2^{-i/2}\phi(2^{-i}t - j)\}_{(i,j) \in \mathbb{Z}^2}$ との内積をとることによって計算される。すなわち、

detail coefficient

$$\langle s, \psi_{i,j} \rangle = 2^{-i/2} \int_0^{t_{m,max}} s(t)\psi(2^{-i}t - j)dt \quad (2)$$

approximation coefficient

$$\langle s, \phi_{i,j} \rangle = 2^{-i/2} \int_0^{t_{m,max}} s(t)\phi(2^{-i}t - j)dt. \quad (3)$$

ノイズ除去には、 $i = i_0 > 0$ の詳細係数を除去して、以下の式(4)により信号を再構成すれば、ある周波数以下の低周波成分 s' を抽出することができる(cf. scale-dependent smoothing (Addison, 2002))。今、簡単のため $\psi_{i,j}$ は正規直交ウェーブレットであると仮定する。

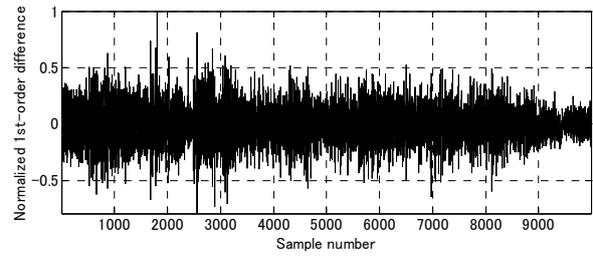
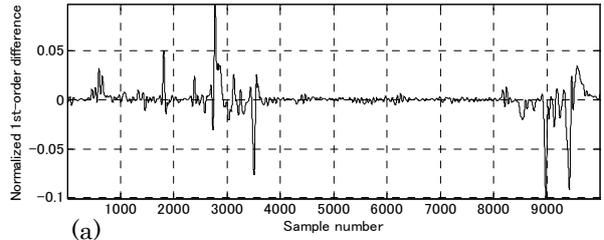
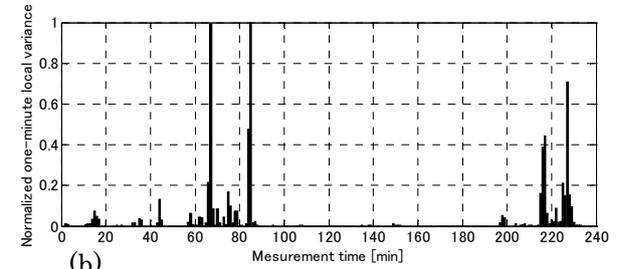


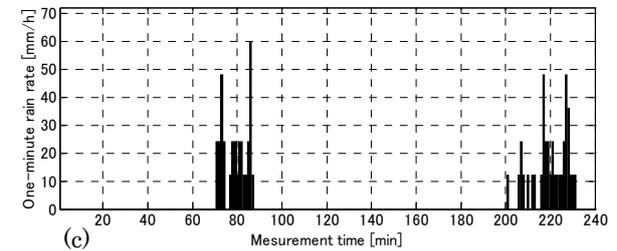
Fig. 6 Normalized first-order difference under real rain fall



(a)



(b)



(c)

Fig.7 (a) A high-frequency-filtered signal (by elimination of detail coefficients up to scale $\text{index}=5$) of figure 8, (b) Normalized one-minute local sample variance of (a), (c) One-minute rainfall intensity of real rainfall

$$s' = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \langle s, \phi_{i_0,j} \rangle \phi_{i_0,j}(t) + \sum_{i=0}^{i_0} \sum_{j \in \mathbb{Z}} \langle s, \psi_{i,j} \rangle \psi_{i,j}(t) \quad (4)$$

以上の MRA を用いて Fig.4(a)の信号に対してノイズ除去を行う。正規直交ウェーブレットには Fig.5 に示す消失モーメント $p = 5$ の Daubechies 直交ウェーブレットを使用する。Daubechies のウェーブレットはコンパクトサポート、すなわち有限インパルス応答フィルタ(FIR)の一種であり、リアルタイムの処理に対し有効である。式(2)から式(4)までを用いてノイズの影響

が顕著なレベル 1 からレベル 5 までのウェーブレット係数をゼロにして、再構成を行った。(c)は、(a)の受信強度の 1 次差分値をノイズ除去した結果であり縦軸は見やすいようにスケリングしてある。(d)は(c)のノイズ除去後の信号の 1 分間ごとの局所 2 乗平均を計算した結果である。(d)から 240mm/h と 150mm/h の異なる降雨強度下で受信信号から推定した標本分散に有意な差があることが読み取れる。1 回目、2 回目それぞれの 240mm/h の降り始め直後に標本分散が大きくなっている理由は、ウェーブレット変換の特性に依存しているものと考えられる。ウェーブレットは信号の特異性(n 回微分の不連続性)に顕著に反応する特性を持っており、降雨の降り始めは LCX が乾燥した状態から雨滴の着水により突如濡れた状態となるため、受信信号に不連続な変化が生じると予想される。そのため、降雨が降る前と降り始めとの境界でウェーブレットが強く反応し、再構成の結果、その部分での差分値が大きくなったと考えられる。また、2 回目の 240mm/h において降り始めを除けば、標本分散がおおよそ一定値を示しているのに対して、1 回目の 240mm/h の場合には降り始め後もばらつきが大きいことが分かる。これは、送信用 LCX が散水詮直下に設置されているため降雨量が安定していなかった可能性が考えられる。

4. 人工降雨実験データとその信号処理

次に東京都文京区の東京大学本郷キャンパス内において、2009 年 6 月に実降雨実験を行った結果を示す。Fig.6 は、受信強度の一次差分値を、Fig.7(c)はその時に観測された実降雨の 1 分間降雨強度を示している。計測期間は 2009 年 6 月 15 日 18:00 から 23:00 までの 5 時間である。40mm/h 以上の豪雨が 4 回観測されているが、人工降雨実験の結果同様、降雨強度と信号との間には相関見られない。これはノイズによる影響であると考えられる。従って、人工降雨実験の解析で用いた MRA を用いてレベル 1 からレベル 5 までのウェーブレット係数をゼロにして、再構成し、ノイズ除去を行った。Fig.7(a)はノイズ除去後の結果を示し、(b)はその 1 分毎の局所 2 乗平均を示している。(b)と(c)を比較すると、約 40mm/h 以上の豪雨が発生している時点で、2 乗平均も大きくなっていることから、これらは閾値判定により検出できると考えられる。例えば東海道新幹線では 40mm/h 以上の豪雨が発生した場合、運行を休止するため、この LCX を使って受信信号を MRA により解析すれば、運行休止の判断をこれによりリアルタイムに行うことができると考えられる。

5. 結論

漏洩同軸ケーブルという特殊な VHF 用アンテナを用いて豪雨の線状モニタリング手法について検討した。人工降雨実験および実降雨実験で得られた信号は豪雨下でもノイズにより変化が見られなかったもので、水滴が LCX 表面に付着することで発生する特異点(不連続点)をウェーブレットを用いた多重解像度解析を用いて抽出することを試みた。その結果、極めてノイズレベルの高い信号から、豪雨による信号の変動を検出することができた。この結果より、LCX に沿ってリアルタイムに豪雨を検出できる可能性があることを示唆している。今後は、より大規模な実験を行い、集中豪雨の位置と範囲までも LCX により捉えられるかどうか検討を行いたい。

謝 辞

本研究は(独)科学技術振興機構の Core Research for Evolutional Science and Technology (CREST) プロジェクトの支援によって行うことができました。また、京都大学防災研究所の中川一教授ならびに防災研究所関係者の皆様の多大なるご支援のもと、雨水流出実験装置を使った実験が実現しました。関係者の皆様に心から御礼申し上げます。

参考文献

- 猪又憲治, 水谷司(2009): LCX の表面波崩れを利用した降雨量の計測, Technical report of IEICE. SANE 2009-141, pp.13-18.
- 岸本利彦(1982): LCX 通信システム, 電子情報通信学会編.
- 水谷司(2009): 表面波モードに着目した漏洩同軸ケーブルによる降雨量検知のための電磁波理論の展開, 土木学会年次学術講演会講演概要集, vol. 64, no. II-174, pp. 347-348.
- Addison, P. S.(2002), The illustrated Wavelet Transform Handbook Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance, Institute of Physics.
- Inomata, K.(2007): Target Detection with Surface and Radiation Mode of Leaky Coaxial Cable, ISAP2007, vol. 2D4-3, pp. 510-513.
- Inomata, K.(2008): Two-dimensional target location estimation technique using leaky coaxial cable, IEICE Trans. Communications, vol. E91-B, no.3, pp878-886.
- Mallat, S(2009), a wavelet tour of signal processing The Sparse Way Third Edition, ACADEMIC PRESS.

Monitoring of Torrential Rain along a pair of Leaky Coaxial Cables

Tsukasa MIZUTANI, Yozo FUJINO, Tomonori NAGAYAMA*,
Kenji INOMATA, Wataru Tsujita, and Masahiro SHIKAI**

* Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

** Mitsubishi Electric Research Laboratories Advanced Technology Research & Development Center,
Mitsubishi Electric Corp.

Synopsis

Use of Leaky Coaxial cable (LCX) of a VHF/UHF antenna is proposed to monitor intensity of heavy rains along the cable in real time. Using a pair of LCXs with a transmitting antenna and a receiving antenna installed in parallel each other, receiving signals at arbitrary locations along LCX can be determined. For quantitative evaluation between rainfall intensity and the LCX signals, an artificial rainfall experiment was conducted. The LCX signal was nonstationary, and a component of fluctuation due to rainfall was below a noise floor. For denoising, a multiresolution analysis using a Daubechies wavelet was applied to the signals. As a result, the component of the fluctuation due to rainfall was extracted, and one-minute rainfall intensity of the artificial heavy rains was detected successfully. Conducting a field rainfall experiment using the dual LCX system as well, real heavy rains were also detected from a noisy signal using MRA.

Keywords: Leaky Coaxial cable, electromagnetic wave, rainfall monitoring, artificial/real rainfall experiment, wavelet, multi-resolution analysis(MRA)