

振動可視化レーダの開発

アルウェットテクノロジー株式会社

代表取締役 能美 仁

アルウェットテクノロジー(株)	能美	仁
アルウェットテクノロジー(株)	能美	陽
アルウェットテクノロジー(株)	九十歩	修
アルウェットテクノロジー(株)	白井	郁夫

はじめに

近年、橋梁やトンネル等、インフラ構造物の老朽化が社会問題となっており、それらインフラ構造物の健全性を早急に調査することが求められている。インフラ構造物の点検では、動揺や固有振動数を計測する手法がある。主に橋梁の点検では、斜張橋のケーブルの張力管理のため加速度計を設置してケーブルの固有振動数を計測することがある。しかし、橋梁各部に多数の計測センサーを取り付けるには膨大な手間・コストを要し、また交通規制や高所作業等の危険な作業も多い。そのため、安全に短時間で正確な計測ができる非接触計測システムが望まれている。

開発のねらい

安全で且つ短時間で正確な非接触計測システム

ムが望まれるなか、インフラ構造物の点検・モニタリング・診断を可能にするシステムを提供することを目的に、振動可視化レーダの開発を行った。VirA(Vibration Imaging Radar)は、遠隔から観測対象にマイクロ波のレーダ信号を照射し、計測対象からの受信信号を処理したレーダ画像上の任意点の振動や微小変位を面的に計測することができるレーダである。またデジタルビームフォーミング(DBF)技術を用いることで、従来型レーダのようにレーダビームを走査することなく、毎秒最高1,000枚の2次元または3次元レーダ画像が得られる。そして画像データの位相情報を解析することで、5 μ m程度距離変化を計測し、観測対象全体の揺れが記録できると共に、計測場所で準リアルタイムに確認することができることを特徴とする計測システムである。

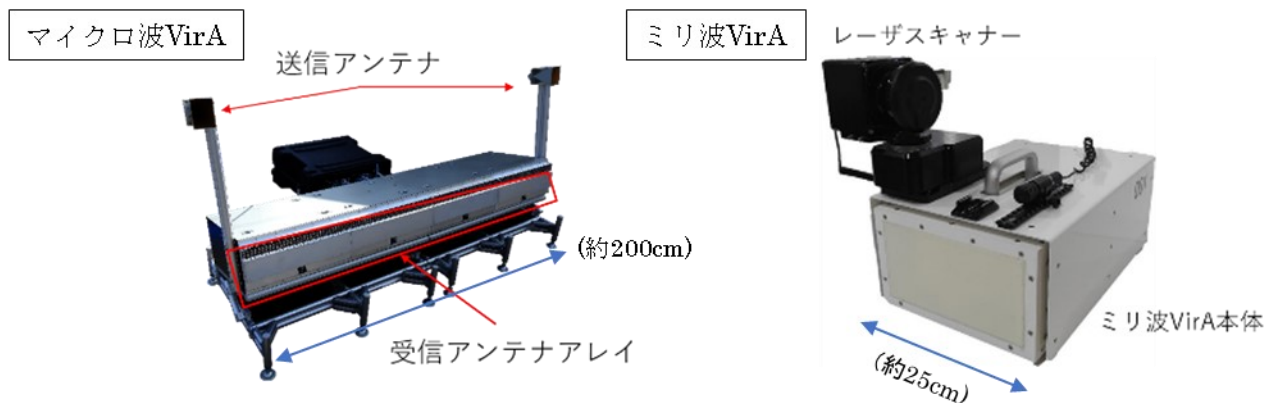


図1 VirA外観

装置の概要

振動可視化レーダ (VirA) は、マイクロ波とミリ波の 2 種がある。図 1 にその写真を示し、図 2 に、計測原理図を示す。

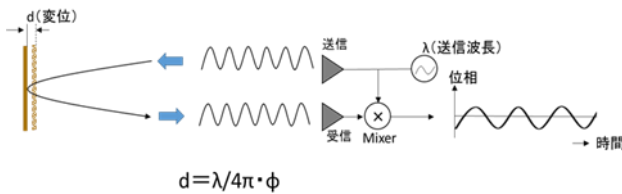


図2 変位・振動を計測する原理図

図 2 に示すように VirA は送信信号の一部を受信ローカル信号として、中間周波信号を生成する。送信波が計測対象に照射され、その反射波が受信され Mixer でベースバンド信号に変換される。反射点が振動している場合、アンテナから反射点までの距離が変化するため、このベースバンド信号の位相が変化する。この位相変化から反射点の変位量を求めることができる。レーダの波長を λ 、位相変化を Φ とすると、反射点の変位 d は式(図 2 に記載)のように表される。また、VirA の計測概念図を図 3 に示す。図 3 に示すように受信アンテナを含む受信系を多数配置して、各受信系で受信した反射信号の位相は、反射点の振動によって変調される。変位の振幅と周波数は、この位相変化を分析することにより測定される。変位を正しく測定するには、レーダの繰り返し周波数をターゲット振動周波数より高くする必要がある。ビームスキャンを使用する従来のイメージングレーダは、高い繰り返し周期で受信信号を受信することは困難である。一方 VirA はデジタルビームフォーミングテクノロジー (DBF) の適用により、アンテナビームスキャンが不要になり、送信の繰り返し周期ごとに画像が処理可能である。VirA は、従来の FMCW レーダと同じ方法でターゲット距離を

決定すると共に、ターゲットに対する方位角を DBF 処理によって決定するため、2 次元のレーダ画像を、繰り返し周期ごとに取得することが可能である。

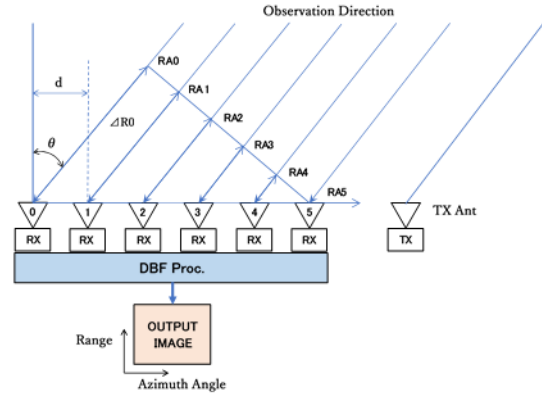


図3 フェーズドアレイ技術とDBF 技術

技術上の特徴

(1) FPGA による高速処理

計測対象からの受信信号は多数の受信系で同時に受信されデジタル信号に変換されて画像処理部に送られる。観測データからレーダ画像を処理するには膨大な演算が必要となり、高速な PC でも実時間の 100 倍以上必要である。そのため、FPGA による画像処理ハードウェアプロセッサを開発した。これによりリアルタイムにレーダ画像の表示、振動解析、変位量の表示を可能にした。

(2) 高精度な変位計測

表 1 は、マイクロ波 VirA とミリ波 VirA の性能表である。VirA は、高純度の信号源を使用することにより微細な変位も抽出することができる。図 6 は、ミリ波 VirA の信号強度と揺らぎ量を送信繰り返し周期 1ms のデータを用いて、10ms、100ms 積分した実際のレーダで取得した計測揺らぎ量の分布を示している。それぞれ 1ms 積分に比べ 10dB、20dB と SN が改善しており、揺らぎ量をそれぞれ青、橙、黄の点で示す。100ms 積分で信号強度 40dB 以上の時、変位揺らぎ量 $5\mu\text{m}$ の変位計測ができていることが解る。

表1 VirA仕様

型名	マイクロ波 VirA	ミリ波 VirA
周波数	17GHz	79GHz
計測距離	10m~10km	1m~100m
振動周波数	< 5kHz	
計測振幅	> 20 μ m	> 5 μ m
画角	32度	30度
方位分解能	> 0.5度	> 0.5度
距離分解能	> 50cm	> 4cm
送信電力	100mW	10mW
サイズ	横幅約2m	横約25cm
無線従事者資格	必要	不要



図5 ビル計測時写真

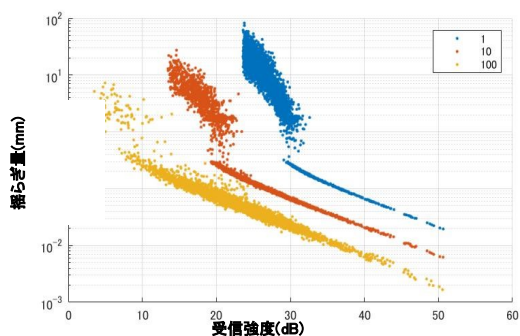


図4 ミリ波VirAの信号強度と揺らぎ量

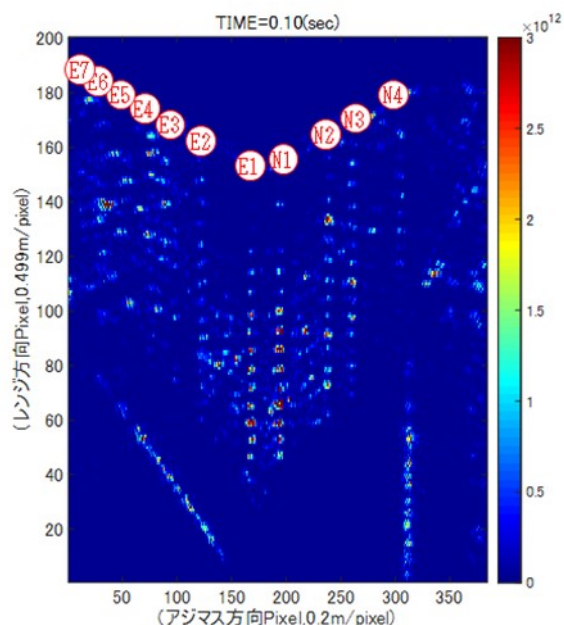


図6 レーダ画像

実用上の効果

様々な分野での計測検証を行ったなかで、VirA の特徴を顕著に発揮している計測結果として、高層ビルの動揺計測結果、および建物の壁面（ガラス窓）の計測結果を以下に示す。

(1) 高層ビル動揺計測（マイクロ波 VirA）

図5、6、7は、27階建てビルの動揺を計測した例である。約30分間の各点の変位は、約2mm程度の動揺があることが判る。図7は60秒間の変位を時間軸に拡大したもので、このビルが約3.5Hzの固有振動を有して揺れていることが解る。

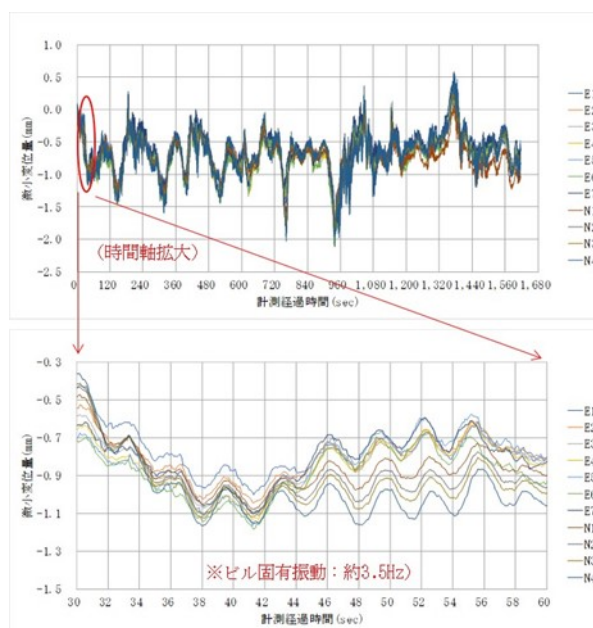


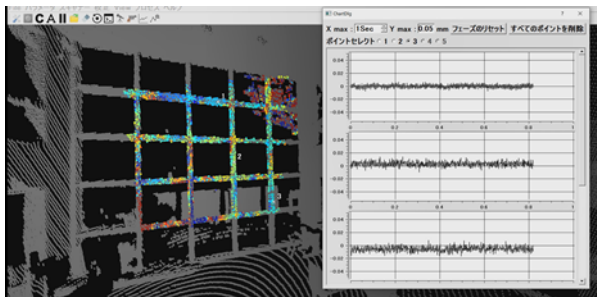
図7 変位計測結果

(2) 大型窓計測(ミリ波 VirA)

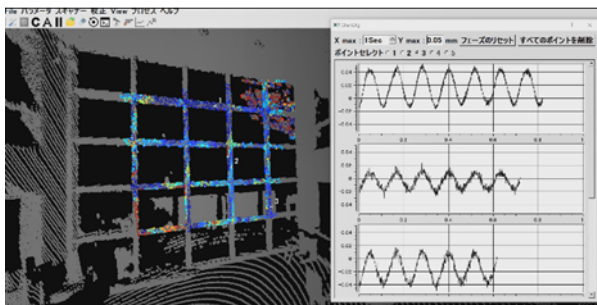
ミリ波 VirA はマイクロ波 VirA に比べて観測距離は短い、高分解能、高精度で高い周波数の振動まで計測可能である。図8、9は、建物の大型ガラス窓の振動を計測した例である。空調が作動時窓枠は約 10Hz、50 μ m P-P の振幅で振動していることが判る。また空調が停止すると振幅は 5 μ m 以下となりほとんど振動していないことが確認できる。



図8 ガラス窓計測時写真



(空調OFF)



(空調ON)

図9 リアルタイム計測確認状況図

知的財産権の状況

本開発品の装置に関する特許登録は下記の通りである。

① 日本国特許第 6363209 号

名称：干渉型振動観測装置、振動観測プログラム、記録媒体、振動観測方法および振動観測システム

② US 特許第 10,718,659 B2 号

名称： INTERFEROMETRIC VIBRATION OBSERVATION DEVICE, VIBRATION OBSERVATION PROGRAM, RECORDING MEDIUM, VIBRATION OBSERVATION METHOD AND VIBRATION OBSERVATION SYSTEM

US 特許第 10,989,589 B2 号

名称： INTERFEROMETRIC VIBRATION OBSERVATION DEVICE, VIBRATION OBSERVATION PROGRAM, RECORDING MEDIUM, VIBRATION OBSERVATION METHOD AND VIBRATION OBSERVATION SYSTEM

むすび

振動可視化レーダ VirA は当初、インフラモニタリング用に開発された。本システムは数百 m の遠隔から数十 μ m の変位、数 kHz の振動を面的に計測可能であり、インフラモニタリング以外にも、様々な応用が考えられる。

近年、豪雨による堤防決壊、斜面崩落等が発生しているが、微小変位の検知により、これらの災害防止にも応用可能である。掘削工事現場(地下道路、トンネル掘削等)周辺地域の陥没事故も散見されている。土木工事では、表面での振動、変位等の微細な変化をモニタすることで予兆をとることが可能である。発電用風車のブレード振動、大型機械装置の振動源調査および計測、高層ビルの高次振動モードの計測から耐震性の評価等も提案されている。

このように VirA による振動計測は、幅広い分野にわたり社会の安心安全向上に貢献できると考える。