

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630179

研究課題名(和文)パイプロドップラ超解像イメージング技術の創出と原理検証

研究課題名(英文)Development of vibro-Doppler super-resolution imaging and its experimental validation

研究代表者

三輪 空司 (Takashi, Miwa)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：30313414

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はコヒーレント波をセンシングに用いたイメージングにおいて、計測対象を加振することで高空間周波数情報を低域にシフトする空間変調効果を利用し、加振を行わない従来画像に、加振ドップラ計測により得られた画像を復調して、高空間周波数に逆シフトし、合成することにより超解像イメージングを行う手法をの基本原理を創出し、超解像アルゴリズムの定式化を行った。また、ネットワークアナライザを用いた新たな加振ドップラ計測システムを構築し、寒天ファントムを用いた超音波イメージングにおいて、従来法では分離できない2本の反射体を本手法で分離でき、実験的に3倍の空間分解能向上が得られることを示した。

研究成果の概要(英文)：Generally, the cross-range resolution in coherent imaging is restricted by a point spread function (PSF) of the sensor. Due to the low-pass characteristics of PSF in a spatial-frequency domain, we cannot obtain the high spatial-frequency information. In order to improve the cross range resolution, the bandwidth should widen in the spatial frequency domain. We propose a method in which the spatial frequency shift by using a vibro-Doppler measurement. In this research, we experimentally demonstrate the super-resolution method with vibro-Doppler measurement. The vibro-Doppler measurement can measure high spatial frequency information. Moreover, it can be applied to super-resolution imaging by applying amplitude compensation and demodulation of spatial frequency. we found that this method can improve the spatial resolution by 3 times through the experiment. However, a disadvantage of this method is SNR degradation.

研究分野：計測工学

キーワード：イメージング 超解像 ドップラ 空間変調 加振

## 1. 研究開始当初の背景

イメージング技術の重要性は電気電子、機械、化学、生物等の工学分野のみならず、ライブイメージング技術の発展により生命科学等のライフサイエンス分野においても極めて重要な技術に位置付けられ、より細かく、より正確に対象の構造をライブで観測したいという要求は尽きることない課題であるといえる。イメージング手法には微細プローブをスキャンし、トンネル電流や原子間力を映像化する近接的な手法(STM, AFM, SNOM 等)と、波動を用いる手法(光学顕微鏡、電子顕微鏡等)とに大別される。その空間分解能は前者では探針の物理的なサイズ、後者は波源の点広がり関数のサイズが空間的な分解能を決定する。後者のうち、光学顕微鏡はライブイメージングに向いているが、分解能は光の回折限界である 200 nm 程度の点広がり関数で制限される。これは、点広がり関数が波数領域でローパス特性を有しており、高空間周波数情報を復元することは原理的に困難である。

一方、我々はこれまで、超音波映像系の分野において、加振器により計測対象に連続的なずり弾性波を発生させ、加振波により振動する散乱体のドップラ効果を超音波で計測するバイプロドップラ計測の応用を研究しており、その中で、バイプロドップラ計測が「空間変調効果」を与えることを見出した。この効果は、真の反射係数分布に対する空間領域での正弦的な反射係数変動の積と等価であり、波数領域でのスペクトルシフトを与えるものである。通常、我々はAMラジオ放送の原理として、数 kHz 以下の可聴帯域を高周波数帯に変調(アップコンバート)し、電波により空中を伝搬させ、受信側で復調(ダウンコンバート)することにより、可聴帯域情報を復元する技術をよく知っているが、提案手法はこの原理を空間反射係数分布に応用し、超解像イメージングを実現しようとするものである。

## 2. 研究の目的

本手法の原理は、バイプロドップラ計測により、点広がり関数により失われる高空間周波数情報をバイプロドップラ計測による空間変調効果により低空間周波数成分にダウンコンバートして計測し、

計測後、ソフトウェア的に復調(アップコンバート)することにより、ベースバンドの情報を元の高空間周波数域に戻して、従来の低解像度画像と帯域合成することにより、超解像を実現する。そのため、本研究における目的を以下に挙げる。

(1) 本手法の原理となる「バイプロドップラ超解像イメージング法」なる全く新規な超解像イメージング法の原理を創出し、定式化を行うこと。

(2) センシング波を超音波としてバイプロドップラ超解像イメージング法において、点広がり関数の3倍の分解能が得られることを実験的に実証し、本手法を適用条件や、問題点等を検討すること。

## 3. 研究の方法

(1) 目的(1)については、1次元的に伝搬する平面波状の加振波を仮定し、それに直交する方向からセンシング用の波を送受信することにより、加振により、センシング波のパスが変化し、ドップラ効果が起こるものとし、センサを移動させた際に得られる複素加振ドップライメージが、空間の反射係数分布と、加振波による反射係数の空間的な正弦変動の積すなわち、空間変調効果を起こすことや、空間領域において点広がり関数が広くぼやけたイメージであっても、バイプロドップラ計測による空間変調効果により、高空間周波数の情報を低空間周波数の帯域内にシフトさせれば、点広がり関数の帯域幅を超えた計測が可能となることを定式化する。

(2) 目的(2)については、以下の計測システム、実験概要により実証実験を行う。

### ①計測システム

計測システムの概要を示す。図1に開発した加振ドップラ計測システムのブロックダイアグラムを示す。本実験では、不要な反射波を時間的に分離するため、ネットワークアナライザをベースとしたステップ周波数方式を用いレンジ分解能を持たせている。ネットワークアナライザはその複素振幅を計測し、ステップ状に周波数を変化させることにより伝達特性を計測可能であるが、IF帯域幅のスペクトル幅の単一周波数成分しか計測できないため、通常ではドップラ周波数成分のみを検出することはできない。そこで、送信周波数を加振周波数であら

はじめ変調する。通常の変調では正の周波数変調に対して、負の周波数変調成分（イメージ成分）が発生するため、RF 信号と加振信号の直交成分どうしを変調して加算するイメージキャンセリングミキサにより、送信波は(1)式のように変調されることとなる。

$$s_{\pm}(t) = \cos(2\pi ft) \cos(2\pi f_v t) \pm \sin(2\pi ft) \sin(2\pi f_v t) = \cos(2\pi(f \mp f_v)t) \quad (1)$$

ここで、 $f$ 、 $f_v$  はそれぞれ、センシング波、加振波の周波数である。変調された信号  $s_{\pm}(t)$  は  $f - f_v$  の周波数を持ち、センシング波として出力される。その後、周波数  $f_v$  で加振された対象によりドップラ効果を受け、ドップラ成分は周波数  $f$  となって受信される。一方、同時に、 $f + f_v$ 、 $f + 2f_v$  の周波数成分も受信されるが、ネットワークアナライザの IF 帯域幅を  $f_v$  よりも十分狭くすれば、負のドップラ成分のみを検波することが可能である。

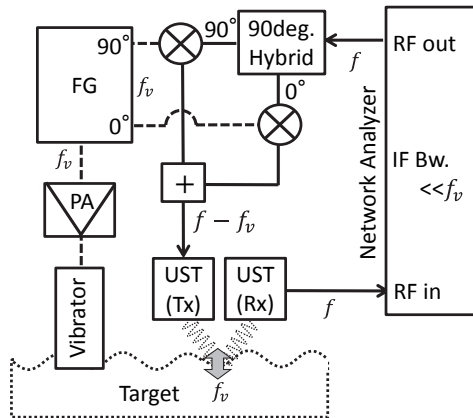


図1 開発した計測システムのブロック図

## ②実験概要

加振ドップラ計測では、まずネットワークアナライザ (R&SZVL) の中心周波数、掃引帯域幅、IF 帯域幅をそれぞれ 5.2MHz、0.4MHz、50Hz とし、レンジ方向の複素インパルス応答を得る。さらに、超音波をスキャンすることにより、任意の深さの反射体において、スキャン方向の加振ドップラ応答を議論できる。センシング波に用いる超音波トランスデューサは送受信分離型とし、図2のように水中内に配置した。また、測定距離 50mm、測定間隔 0.4mm、加振点より 2.5cm の条件で加振波の伝搬方向と平行

にスキャンする。また、反射体は水槽内のトランスデューサから 8cm 下方に配置した寒天内部に埋め込んだ直径 0.6mm の金属線とする。加振は加振ロッドを寒天表面に押し付けて加振する。加振器（旭製作所, SL1015）にはファンクションジェネレータ（NE, WF1973）からパワーアンプ（Marantz, MM7025）を介して 500Hz、2Vpp の正弦波を印加した。この実験系において、提案する超解像処理によりスキャン方向の空間分解能が向上することを実験的に実証する。

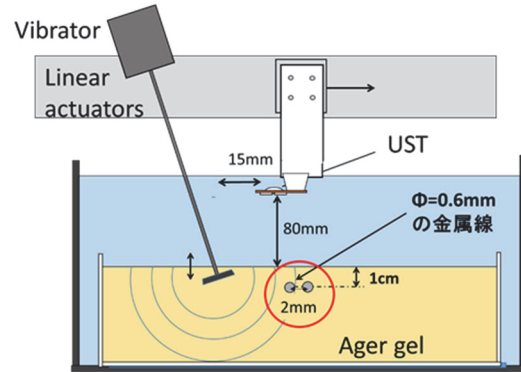


図2 実験の様子

## 4. 研究成果

(1) 超解像アルゴリズムの理論検討結果について示す。一般に、計測対象に正弦波加振を行うと、計測対象が変動を起こす。本論文では、計測対象の変動に伴ってセンシング波の伝搬距離が変化することに着目する。計測対象の加振波による変動  $\xi$  は以下の式で表すこととした。

$$\xi(t, x) = \delta \sin(2\pi f_v t - k_v x + \varphi) \quad (2)$$

ここで、 $\delta$ 、 $f_v$ 、 $k_v$ 、 $\varphi$  はそれぞれ振動振幅、加振波周波数、加振波数、センシング波との位相差である。計測対象表面から送受信センサへの伝搬距離は、従来法では変化しない。一方、加振を行うと計測領域が加振波により時間的、空間的に変動するため、センシング波の伝搬距離は変化する。その時間変化は加振周波数に依存し、空間変化は加振波の波長に依存するものとなる。加振によっておこるセンシング波の伝搬距離の微小変化は、取得する反射係数分布の位相変調としてとらえることができ、その位相変調は、センシング波の波数を  $k_u$  とすると(3)式で表すことができる。

$$\dot{\gamma}_v(t, x) = \dot{\gamma}(x) e^{-j2jk_u \xi(t, x)} \quad (3)$$

この式において、反射係数分布  $\dot{\gamma}_v$  は加振による変動  $\xi$  によって位相変調を受けた反射係数分布とみなすことができる。すなわち、加振ドップラ信号を計測することで、加振周波数に応じた空間変調を受けた信号を取得することが可能となる。

加振ドップラ計測では、加振による変調を受けた反射係数分布を取得することができるために、実際に得られる画像は(4)式のように表すことができる。

$$\dot{g}(t, x) = \int w(x - x') \dot{\gamma}_v(t, x') dx' \quad (4)$$

一方、(5)式のようなベッセル級数展開において

$$e^{jq \sin \theta} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(q) e^{jm\theta} \quad (5)$$

$q \ll 1$  のとき、

$$e^{jq \sin \theta} \cong 1 + \frac{qe^{j\theta} - qe^{-j\theta}}{2} \quad (6)$$

と近似できるため、これを(3)式に適用し、(4)式に代入すると、時間的に変動しない直流信号と、加振周波数で振動する1次のドップラ信号が得られる。

さらに、これらの波形を時間に対してフーリエ変換し、直流、及び加振ドップラ周波数における複素フーリエ成分を得ることができる。また、この信号を加振波の伝搬方向  $x$  でフーリエ変換し、波数スペクトルを求めると、以下の式で表すことができる。

$$\dot{g}_0(x) \cong \int w(x - x') \dot{\gamma}(t, x') dx' \quad (7)$$

$$\dot{g}_{\pm 1}(x) \cong K \int w(x - x') \dot{\gamma}(x') e^{-jk_v x'} dx' \quad (8)$$

ここで、 $K_{\pm} = \mp k_u \delta e^{\pm j\theta}$  である。この画像は、反射係数分布が加振波で空間的に変調を受け、その反射係数分布に通常と同様の点広がり関数がたたみ込まれることと等価である。空間領域でのある波長の正弦変動の乗算は、波数スペクトル領域での波数シフトになる。

次に、空間変調による反射係数分布の波数スペクトル上での変化に着目する。波数領域での画像スペクトルの式は以下のように表される。

$$G_0(k_x) = W(k_x) \dot{\Gamma}(k_x) \quad (9)$$

$$G_{\pm f_v}(k_x) = K_{\pm} W(k_x) \dot{\Gamma}(k_x \pm k_v) \quad (10)$$

(9)式は直流成分であり、従来法による画像の波数スペクトルであり、ローパス型の点広がり関数  $W(k_x)$  により帯域が正弦されている。一方、(10)式は加振ドップラ成分であり、高い波数スペクトルの情報が低域にシフトされて計測できることがわかる。これが、空間変調の原理であり、(10)式の加振ドップラ成分は高い波数スペクトルの情報を含んでいることがわかる。

加振ドップラ計測により取得した画像の波数スペクトルと、静的画像の波数スペクトルの帯域合成を行うことによって広帯域化が可能となる。スペクトルの重ね合わせを行う上では、加振ドップラ計測によって得られるスペクトルに対しては、振幅補償と復調を考慮する必要がある。

加振ドップラ計測によって得られるスペクトルの振幅は、計測周波数と加振波による変動振幅  $k\delta$  が乗せられたものとなる。したがって、静的画像スペクトルと重ね合わせる際には、その逆数を掛け合わせる振幅の補正が必要である。

また、加振ドップラ成分における波数スペクトルは、帯域合成のために、変調された波数スペクトルを元の反射係数分布に対応した位置に戻す(復調)のために、ソフトウェア的に加振周波数に応じた逆シフトを行う。上記の振幅の補償と復調処理、重ね合わせにより、合成後の波数スペクトルは(11)式で表すことができる。

$$G(k_x) = G_0(k_x) + \frac{G_{-f_v}(k_x - k_v)}{K_-} + \frac{G_{+f_v}(k_x + k_v)}{K_+} \quad (11)$$

(9)、(10)式を(11)式に代入すると、

$$G(k_x) = \Gamma(k_x) \times \{W(k_x) + W(k_x + k_v) + W(k_x - k_v)\} \quad (12)$$

となり、点広がり関数の波数スペクトル帯域幅が広がることになる。最適な合成を行うには、 $k_v$  を  $W(k_x)$  の帯域幅程度となるよう加振周波数を設定する必要がある。波数領域での帯域を広げることは、空間分解能を向上することと等価であり超解像処理が実現できる。尚、本理論は、計測に使用する波の種類にかかわらず適用することが可能であり、コ

ヒーレント波を用いたアクティブな計測系すべてにおいて成立する。

(2) 超解像法の実証結果について示す。

本実証実験では開発した計測システムにおいて得られた信号に対し、人為的に空間分解能を低下させ、白色ノイズを付加した疑似信号を用いた。

図3は深さ90mmに間隔2mmで設置した2本の金属線を従来法によりイメージングした結果であり、深さ90mmでの1次元プロファイルからも二つの金属線を分離できていないことがわかる。

また、図4に直流信号、及び正負の加振ドップラ信号の波数スペクトルも示すが、加振ドップラ信号は直流付近にあるものの、位相情報は高い波数の情報を有しているはずである。また、パワーは直流成分に比べ20dB程度小さく、合成を行うにはこの振幅を補償する必要がある。

図5に復調、振幅補償後の波数スペクトルを示す。波数帯域の復調における波数シフト量は加振周波数と媒質の加振波伝搬速度から推定した。また、振幅補償は加振ドップラ成分が直流成分の大きさと同じになるよう定めた。振幅補償を行って合成するため、SN比は直流成分に対し、低下することになるため、合成後のSN比はほぼ、加振ドップラ成分のSN比で決まることになる。

図6は合成後の波数スペクトルであり、図3の疑似信号作成においてローパスフィルタを適用する際に、そのカットオフ周波数を、復調時の波数シフトと同等になるように設定しており、帯域幅が3倍程度広がっていることがわかる。

最後に、図7に合成後のイメージング結果を示すが、青で示された従来法の反射プロファイルに対して、提案する超解像法は明確に二つに分離しており、その位置も真の反射係数分布に近いものとなっている。また、理論通り、加振ドップラ計測は高周波数スペクトルの情報を有しており、約3倍の空間分解能向上を実験データを用いて実証できたと言える。

一方、超解像に使用した実験データは分解能の効果を分かりやすくするため、人為的に空間周波数帯域幅を狭めており、実験データそのものではない点

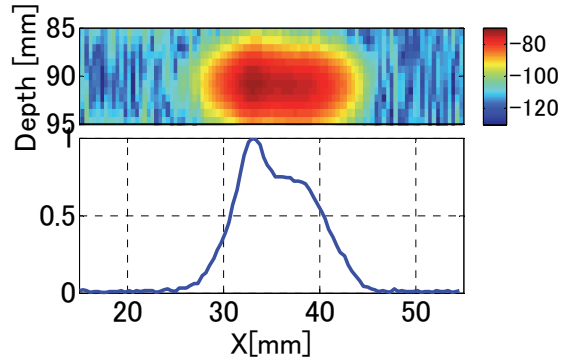


図3 直流成分のイメージング結果(従来法)  
上：2次元イメージング  
下：深さ90mmでのx方向のプロファイル

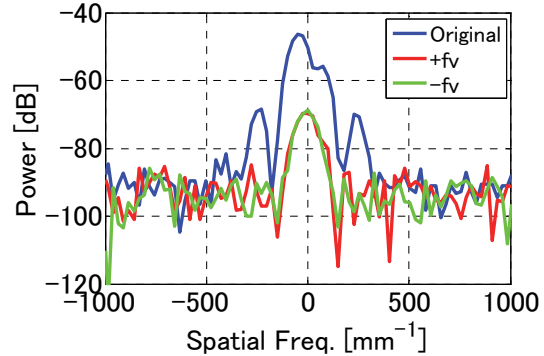


図4 直流成分(青)、正負の加振ドップラ成分(赤、緑)の波数スペクトル

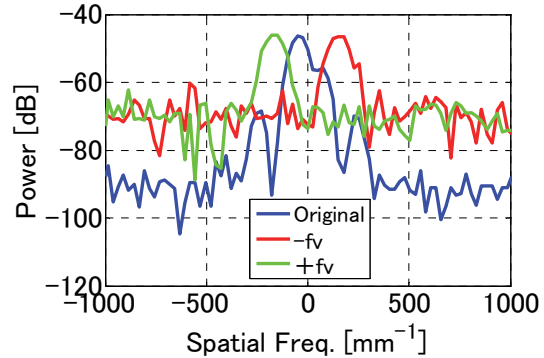


図5 波数領域での復調、及び振幅補償後の加振ドップラ信号

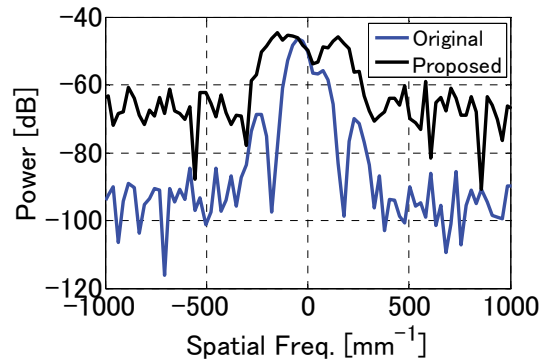


図6 合成後の波数スペクトル(青：直流成分、黒：提案法)

に注意が必要である。また、本手法を適用する際の注意点として以下があげられる。

- ①波数シフト量を推定するためには、加振波の伝搬速度が既知であること
- ②伝搬速度が空間的に変化しているとイメージング結果の位置にずれが発生すること
- ③加振波は平面波状に伝搬し、かつ加振波の反射波の振幅を30%程度に抑えること

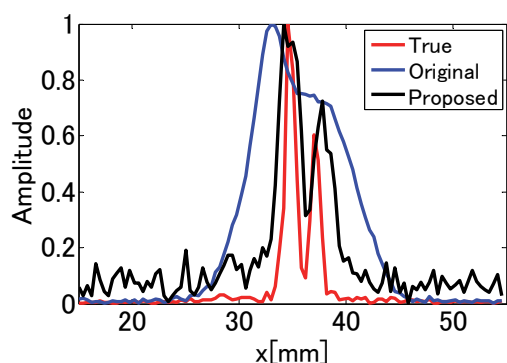


図7 提案する超解像イメージングの結果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2件)

(1)三輪空司, 栗田伸幸, 碓氷淳, 励磁コイルを用いた加振ドップラレーダによるコンクリート内振動体の選択的イメージング, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.38, 2016, 掲載予定.

(2)三輪空司, 周波数掃引加振ドップラ計測による逆合成開口イメージング, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.52, No.10, 2016, 掲載予定

[学会発表] (計 3件)

(1)三輪空司, 小林誠也, 周波数掃引加振ドップラ計測の ISAR イメージングへの応用, 第13回地下電磁計測ワークショップ, 2015年11月27日, 宮城県仙台市

(2)三輪空司, 小林誠也, バイプロドップラ計測による超解像イメージングに関する実験的検討, 第36回

超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2015年11月7日, 茨城県つくば市

(3)金子周嶺, 三輪空司, SFCW方式加振超音波ドップラ計測システムによる空間変調, 第35回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2014年12月3日, 東京都千代田区

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

三輪 空司 (MIWA Takashi)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号: 30313414

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし