

平成22年 5月15日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760262
 研究課題名（和文） マイクロ波加振映像法の創出

研究課題名（英文） Basic research on Microwave Elastography

研究代表者

三輪 空司（MIWA TAKASHI）
 群馬大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：30313414

研究成果の概要（和文）：

近年、がん等の周囲組織に比べ硬い病変を弾性率の違いを映像化することで、検出する技術が注目されている。しかし、数百 Hz のずり弾性波の伝播速度分布を超音波により計測する加振映像法では、超音波伝播速度の遅さに起因した計測繰り返し周波数の制限により、癌組織の早期発見で臨床的に求められる 5 mm の分解能まで達していない。そこで、伝播速度の速いマイクロ波を用い、数 KHz の高周波加振振動による孤立物体の新たなイメージング法を検討した。まず、高い繰り返し周波数を有する 5 GHz 帯の送受アレイレーダ計測システムの開発を行った。また、数値シミュレーションにより、外部加振により微小に変位する孤立物体を 9×9 の送受信アレイを用いて位置推定する際のアレイ配置や偏波を検討した。その結果、半径 2cm 程度の円アレイ内に交互に配置した送受信アレイにより、直径 3 mm、振動振幅 10 μ m 程度の散乱体であれば、100dB のダイナミックレンジで計測可能な範囲であることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：

The importance of the quantification of tissue elasticity has increased using shear elastic wave because of screening and diagnosis of the cancer. We developed high-PRF 5GHz MIMO radar system for a Microwave Elasticity Imaging. The numerical simulations were carried out in order to localize the independent shear wave scatterers using time reversal MUSIC algorithm with circular array. It implies that the scatterers having the radius of 3 mm and vibration amplitude of 10 μ m can be measurable using a 9×9 MIMO radar system with the circular array having the radius of 2cm

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：イメージング、レーダ、ドップラ計測、MIMO レーダ

1. 研究開始当初の背景

乳がん、前立腺がん、子宮筋腫の筋腫核な

どの病変は組織内に「しこり」として発現することが多く、生体組織内部の弾性率計測が

注目されている。従来、低周波振動、静圧、音響放射圧等を印加した時の生体組織のひずみや生体組織中を伝播するズレ弾性波の伝播速度を、超音波で映像化する加振映像法技術が開発され、臨床研究が盛んに行われている。しかし、癌組織の早期発見で臨床的に求められる5mmの分解能まで達していない。超音波加振映像法で高分解能が得にくい原因は、超音波の繰り返し周波数の制限により生体組織に印加できる振動の最大周波数が制限されてしまうことによる。

一方、近年、電磁波を用いたイメージング技術は著しい進歩を遂げ衛星からのリモートセンシング、地下探査、非破壊検査などに広く利用されている。しかし、生体に対しては、数cmの可探距離があるにもかかわらず、周波数5-10GHz帯では分解能1cm程度であり電波を用いた生体イメージング法はいまだ実用レベルに至っていないのが現状である。これは電波の伝播速度が超音波に比べ5桁程度速いため短波長化、すなわち高分解能化できないともいえるが、逆に、この速い電波伝播速度の特徴を積極的に利用することで超音波計測では得られない新たな情報を取得できる可能性がある。

2. 研究の目的

図1にその概念図を示すが、癌組織など生体組織中の一部の弾性率が変化すると、その組織は周囲組織の弾性率と組織の等価質量で決まる固有振動周波数を持つ。外部から加える振動の周波数を変化させると、この固有振動数に一致したときに組織の振動振幅は大きくなる。この周波数は組織が小さいほど、また周囲組織の弾性率が高いほど高くなるが、これは生体組織中に比較的高周波のドブラシフトを発生させる点状物体が存在することに相当し、MUSIC法などパラメトリックな像再生手法により電波を用いても高分解能化を図ることができる。またパルス繰り返し周波数の制限がない電波では加振のための振動周波数を大きな範囲でスイープする



図1 高周波加振による病変核の振動の概念図
ことができ、超音波では実現できない高分解能で定量性の高い微小物体の弾性係数の違いを映像化できる可能性がある。このように、本研究では、電波を用いて生体組織の弾性率の違いを映像化するマイクロ波加振映像法

(Microwave Elasticity Imaging)とも言うべき新規技術を創出することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究の目的は高周波加振を用いて孤立反射体を振動させ、マイクロ波アレイにより位置推定、イメージングする技術を開発し、生体組織の弾性率計測への応用の可能性を示すことである。このためには、加振の方法の検討、孤立物体からの多周波送受信計測システムの開発、位置推定アルゴリズムの開発などが検討課題となる。また、加振型の送受信マイクロ波アレイ計測システムも同時に開発を行い実験的な適応可能性の検討を行う。具体的には、以下の三点の課題を検討する予定である。

(1) 送受信計測システムの開発

数百 Hz での加振に制限される超音波加振映像法に対し、数 KHz での加振による組織内部の様子をマイクロ波で計測し、かつ位置分解能も持たせるためには、数 10KHz 程度の繰り返し周波数を有する高速なアレイ計測システムが重要となると考えられる。すでに開発している埋没生存者探査システムでは単一周波システムであり、送信アレイと受信アレイに時間切替方式を採用しているため電力効率が低いといった欠点がある。そこで、送受信アレイによる 5 GHz 帯周波数掃引型のドップラレーダシステムを新たに開発した。本システムは送受信アレイ間のアンテナ伝達関数を、送受信で異なる符号を用いて変調し、全アンテナからの受信信号を多重化した後に検波、計算機内で復調を行うことにより簡易なシステムを実現している。この送受信符号化方式の理論を検討し、実験的に有効性を検証した。

(2) 位置推定アルゴリズム

従来の埋没生存者探査システムでは MIMO-MUSIC 法として、送受信に線形アレイを対向するように配置していた。マイクロ波加振映像法ではアレイ形状、アレイサイズ、および偏波の選択に比較的自由度があり、最適なパラメータを決定する必要がある。5GHz では 6cm 程度の波長であり、生体の比誘電率を考慮すると 1cm 程度の波長となると考えられる。これらの解析には誘電体球の厳密界を用いたシミュレーションにより最適化を実施した。

(3) 加振法の検討

加振器を用いた加振には、スピーカ等による音波-弾性波の変換、もしくは音響放射圧を用いた加振法等の加振手法があり、多くの議論がなされているが、高周波での解析例は少なく、本手法のような媒質内の孤立振動体

の微小変位をその周囲に存在するアレイアンテナにより高感度に取り出すという観点での研究は行われていない。二次元アレイを皮膚表面に配置すると、波長の数倍程度の深さ分解能しか得られなかったため、深度方向の分解能は加振波のパルス化によって、深度分解能を得る手法も検討事項である。

4. 研究成果

(1) MIMO レーダシステムの開発

本システムでは、 100×100 素子といった多数のアンテナを用いた場合の変調方式として、 M 系列符号を用いた手法を提案した。プリファードペアとなる1組の M 系列符号をビットシフトさせて各送受信アンテナで変調することにより、各送受信アンテナの組み合わせによって異なる Gold 系列符号となっているため、ベースバンド信号を既知の Gold 系列符号で復調することにより、すべての送受信アンテナ間の伝達関数を計測できる。この手法では、 M 系列符号は直交符号ではなく符号長に依存した符号間干渉成分を有することが問題となる。40dB の符号間干渉では 32767 ビットの符号長となり、全計測のための繰り返し周波数は符号のチップレートを 10MHz とすると 300Hz 程度となる。

また、直交符号として、アダマル符号を用いた送受変調方式も提案した。送信、受信アレイをそれぞれ N 素子とすると、 $N \times N$ のアダマル行列より生成される N ビットのアダマル符号を考える。各変調符号には例えば送信には各符号を N 回繰り返した $N \times N$ ビットの符号、受信には各符号の 1 ビットを N ビットに拡張した $N \times N$ ビットの符号でそれぞれ、変

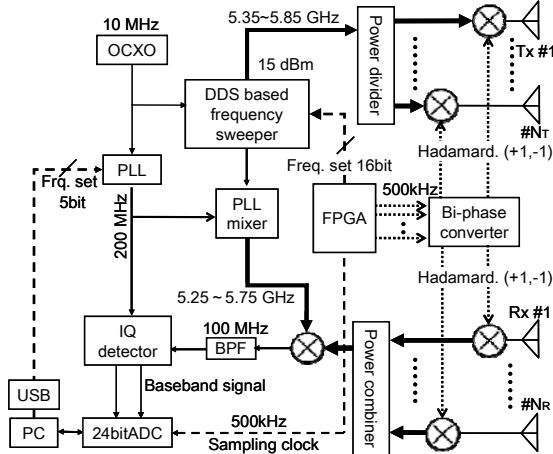


図1 試作システムのブロックダイアグラム

調することにより、符号間干渉のない符号化が可能である。このとき、ビット数はアンテナ数を8とすれば計測周波数1ポイントにつき64ビットであり、単一周波数計測の場合、最大150kHz程度の繰り返し周波数でアレイ計測が可能となることを示した。また、図1に示

すようなMIMOドップラレーダシステムを試作し、チップレート500kHzにおいて両者の有効性を実験的に確認し、アダマル符号を用いた場合1分間の計測においてダイナミックレンジは100dBであった。

(2) 位置推定アルゴリズム

アンテナ配置や偏波の最適化のシミュレーション結果を示す。送受信アレイは同一平面内 (x - y 面) に存在し、 z 軸方向および x - y 面内の偏波を考える。さらに、アレイ配置は直線アレイと円アレイを考え、直線アレイでは H-pol.、V-pol. が x 方向、 z 方向、円アレイでは H-pol. が円の中心から各アンテナ方向と直交する向き、V-pol. は z 方向をアンテナ軸とする。アレイの数は送受共に9個、アレイ間隔は $\lambda/2$ (リニアアレイ)、 1.5λ (円アレイ) である。本シミュレーションでは、散乱体は周囲との誘電率の比を2、半径 $\lambda/10$ の誘電体球とし、厳密界を用いて算出した。さらに、散乱体は $\lambda/1000$ の振動変位を持つものとしアレイ面からの深さ 2λ に位置するものとする。図2に SNR10dB における各アンテナ配置での位置推定結果を示す。推定領域は $5\lambda * 5\lambda$ とし、1波長離れた二つの波源を仮定している。MUSIC法の推定には波源の数を推定する必要があるが、ここでは2とした。直線アレイでは両偏波とも X 方向の位置推定が可能であるが、 Y 方向の分解能は低く、二つの散乱体を分離できていない。

一方、円アレイでは、アレイ間隔が 1.5λ 程度に広がっているため、両者ともスプリアスの影響も現れている。H-pol.の場合、アンテナの向きが円周方向に向くため全方向から得られた散乱信号が反射点でキャンセルされ、推定された位置は実際の位置とは大きく

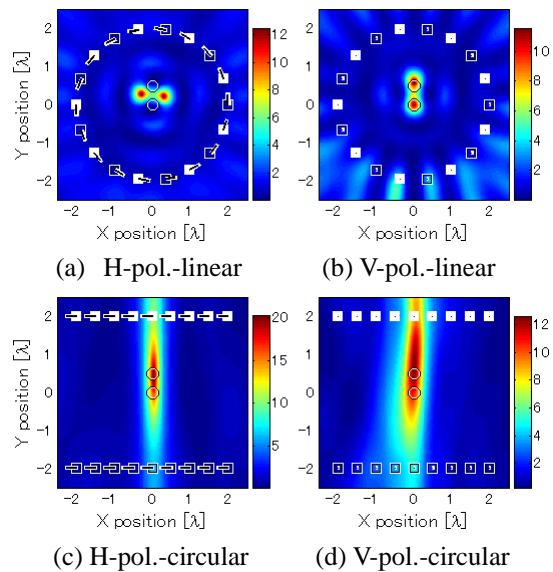


図2 SN比10dBにおける位置推定結果。■は受信アンテナ位置、□は送信アンテナ位置、○はターゲットの位置を示し、反射体 z 座標の水平面の評価関数値を dB スケールで表示している。(推定波数2、 $z=2\lambda$)

ずれている。V-Pol.は水平面内の分解能が最も高く SNR10dB でも 1 波長程度離れた散乱体を高精度に分離できることがわかる。またこのとき、アンテナ直達波の最大値に対する散乱波の強さは-90dB 程度であり、波長を 1cm とすると、直径 3mm、振動振幅 10 μ m 程度の散乱体であれば、100dB のダイナミックレンジで計測可能な範囲であると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

1. **T. Miwa**, S. Ogiwara and Y. Yamakoshi, “MIMO radar system for respiratory monitoring using Tx and Rx modulation with M-sequence codes”, *IEICE Trans. Commun.*, In Press (2010). 査読有
2. Y. Yamakoshi, **T. Miwa**, N. Yoshizawa, H. Inoguchi and D. Zhang, “Effect of pre-trapping of microbubbles in sonoporation using NIPA gel flow channel phantom”, *Japanese Journal of Applied Physics*, In Press (2010). 査読有
3. **T. Miwa**, Y. Yamakoshi and T. Mashiyama, “Optical scattering measurement of microbubble cloud dynamics in ultrasound”, *Japanese Journal of Applied Physics*, In Press (2010). 査読有
4. **T. Miwa** and Y. Yamakoshi, “Dynamics simulation of microbubbles in ultrasonic wave field considering the secondary Bjerknes force”, *Key Engineering Materials*, In Press (2010). 査読有
5. **T. Miwa** and Y. Yamakoshi, “Interdigital ring coupler sensor for parameter estimation of moving objects”, *Key Engineering Materials*, In Press (2010). 査読有
6. **T. Miwa**, S. Ogiwara and Y. Yamakoshi, “Localization of living-bodies using single-frequency multistatic Doppler radar system”, *IEICE Trans. Commun.*, vol.E92-B, no.7, pp.2468-2476 (2009). 査読有
7. Y. Yamakoshi and **T. Miwa**, “Microbubble adhesion to target wall by ultrasonic wave frequency sweep method”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.48, no.5, pp.(07G K02)1-6 (2009). 査読有

[学会発表] (計 5 件)

1. **T. Miwa**, and Y. Yamakoshi, “Interdigital ring coupler sensor for parameter estimation of moving objects”, *Int. conf. on. Advanced Micro Device Engineering*, 2009.12.11, Kiryu.
2. Y. Yamakoshi, **T. Miwa**, Y. Takahashi, H.

Inoguchi, “Effect of pre-trapping of micro bubbles on mechanical damage enhancement in bubble cavitation”, *2009 IEEE Int. Ultrasonic Symp.*, pp.163, 2009.9.22, Roma.

3. 奥野憲佑, 山越芳樹, **三輪空司**, “非観血的手法による血液流動特性の in vivo 評価”, 第 32 回日本バイオレオロジー学会, 2009.6.5, (桐生)
4. **三輪空司**, 荻原俊, 山越芳樹, “近距離 MIMOレーダのための M 系列送受変調によるチャンネル識別法”, 信学技報 SANE, 2008.12.19, 日本工業大学 (埼玉)
5. Y. Yamakoshi and **T. Miwa**, “Micro bubble adhesion to target wall by frequency sweep of ultrasonic pumping wave”, *2008 IEEE Int. Ultrasonic Symp.*, 2008.11.24, Beijing.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三輪 空司 (MIWA TAKASHI)

群馬大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号 : 3 0 3 1 3 4 1 4