

ポータブルマイクロ波インパルスレーダーの研究

Portable microwave impulse radar



吉川 公麿 (Takamaro Kikkawa, Ph. D.)
広島大学ナノデバイス研究所 特任教授

(Professor, Research Institute for Nanodevices, Hiroshima University)

IEEE 応用物理学会

受賞：応用物理学会論文賞(2000)他

著書：Biomedical Engineering, Jenny Stanford Publishing
(2022)他

研究専門分野：電子工学

あらまし

マイクロ波帯域において、人体の悪性腫瘍組織の複素誘電率が正常組織と異なることが報告されており、マイクロ波レーダーで腫瘍の検出ができる可能性がある。本研究では遠隔地における癌の早期検診に対応できる持ち運びが可能なポータブルマイクロ波インパルスレーダー装置を開発している。これまで開発したプロトタイプを用いて大学病院において臨床試験を実施してきた。さらに小型化を目指してマイクロ波インパルスレーダーの半導体集積回路化に挑戦している。本報告では、インパルス送信・受信回路やアナログ・デジタル変換回路を搭載した CMOS-LSI^{*1}および超広帯域ボウタイアンテナを実装したポータブルインパルスレーダーモジュールの有効性について述べる。

1. 研究の目的

本研究の目的は遠隔地や発展途上国での使用が可能なポータブルで小型軽量のマイクロ波レーダー装置を開発し、人体の悪性腫瘍組織を非侵襲で検出するシステムを開発することである。本研究では人体の比吸収

率や電力密度を考慮して、超広帯域 (UWB^{*2}) に対応するマイクロ波インパルスを用いる。ポータブル化のため、UWB インパルス生成・送信回路、超高速サンプリング回路、アナログ・デジタル変換回路等を搭載した CMOS 半導体集積回路の開発およびレーダーイメージングアルゴリズムの開発を行う。本報告ではマルチスタティック UWB アンテナと CMOS-LSI を搭載したポータブルインパルスレーダーモジュールの開発について述べる。

2. 研究の背景

人体の悪性腫瘍組織である癌はその複素誘電率がマイクロ波帯域において正常組織と異なることが報告されている[1],[2]。図1に乳癌組織の複素誘電率の周波数依存性を示す[2]。実部の誘電率、虚部の導電率ともに癌組織が正常組織より高い値を示している。インピーダンスの異なる物体からの反射波を測定して物体までの距離と方向を測定するマイクロ波レーダーは癌組織を区別して検出できる可能性があることから、医療用レーダー装置が欧米で開発されている[3-8]。それらは市販のベクトルネットワークアナライザー装置等を用いた病床型の大型装置である [6-8]。

一方、癌患者の生存率を高めるには、早期検診による発見が必須であり、都市部の病院だけでなく、医療体制が十分ではない地方の遠隔地や発展途上国などでのスクリーニングも重要である。

当研究室ではこれまで図2に示すような乳癌検出用ポータブルインパルスレーダー装置を開発してきた [9][10]。このプロトタイプ機を用いて倫理委員会の承認のもとで大学病院においてパイロット臨床試験を行い、感度 100%を実証している[11]。

3. 研究の方法および結果

ポータブルマイクロ波インパルスレーダーの実現に必要なアンテナの小型化とシステムの半導体集積回路化について述べる[12]。

ポータブルマイクロ波インパルスレーダーの研究

Portable microwave impulse radar

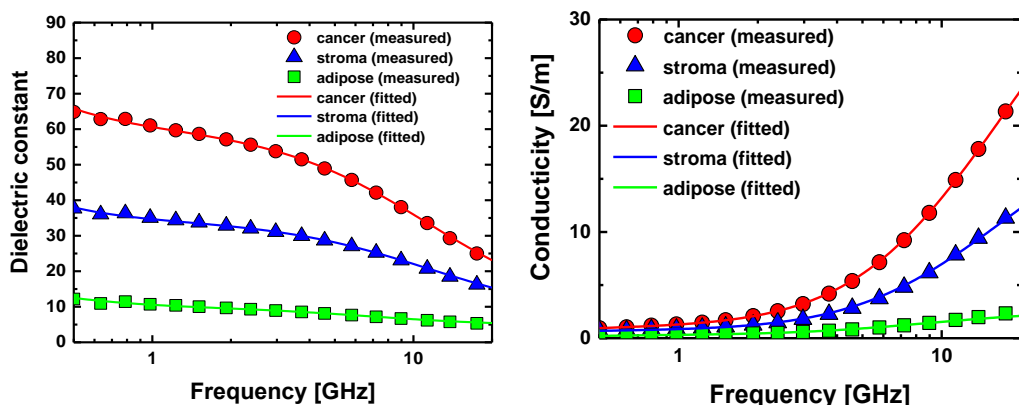


図 1. 乳癌組織の複素誘電率の周波数依存性 (a)誘電率 (実部) (b)導電率 (虚部)

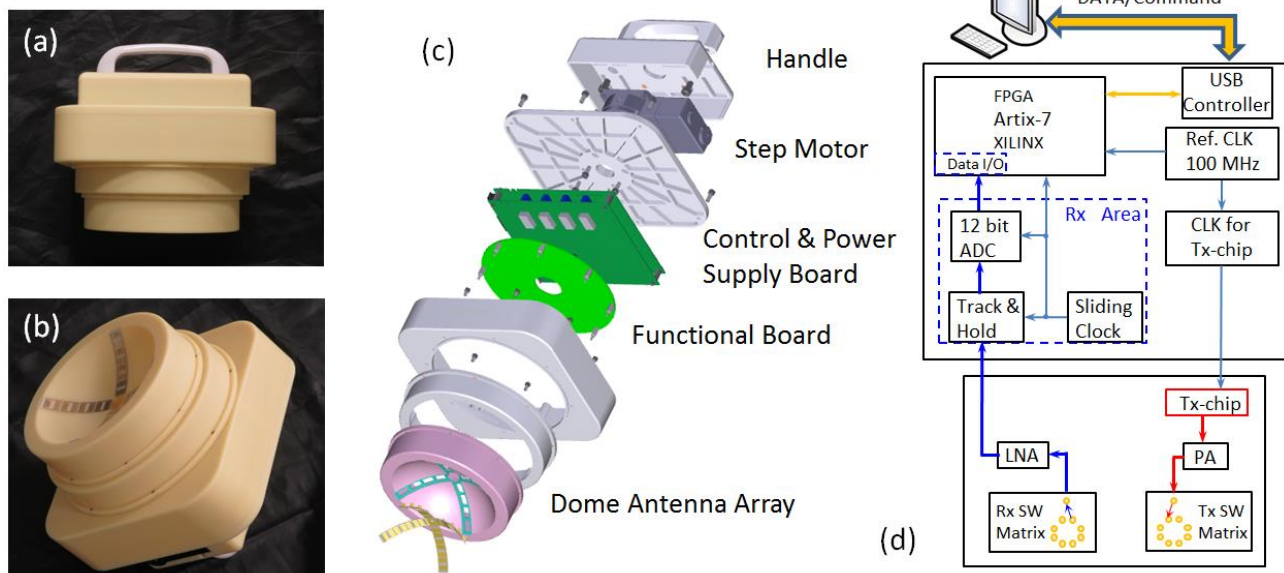


図 2. ポータブルインパルスレーダー乳癌検出装置

(a)プロトタイプ側面写真. (b)プロトタイプ底面写真. (c)システムの分解図. (d)システムのブロック図

3. 1 超広帯域アンテナ

アンテナから誘電率コントラストの異なる対象物である悪性腫瘍組織にマイクロ波を照射し、散乱した信号を受信し、遅れ時間と方位を測定する。アンテナから腫瘍組織までの距離は cm オーダーであるから電波の往復時間は ns オーダーである。したがって、測定用インパルスのパルス幅は約 0.1~0.3 ns に設計し、アンテナに求められる周波数帯域は約 3~10 GHz とする。

これを満足するアンテナ構造として、小型化基板実装が可能なボウタイアンテナを採用する。

乳癌組織は皮膚表面から深さ約 0.5~10 cm の位置にあるため、モノスタティック測定では微弱な受信信号が送信信号の干渉を受ける。これを避けるためマルチスタティック方式を採用する。図 3 に最適化設計した超広帯域ボウタイアンテナと周波数帯域を示す[12]。-10 dB 帯域は 2.5 - 3.4 GHz および 4.0 - 9.6 GHz であり、-9 dB 帯域は 2.5 - 9.8 GHz である。

ポータブルマイクロ波インパルスレーダーの研究

Portable microwave impulse radar

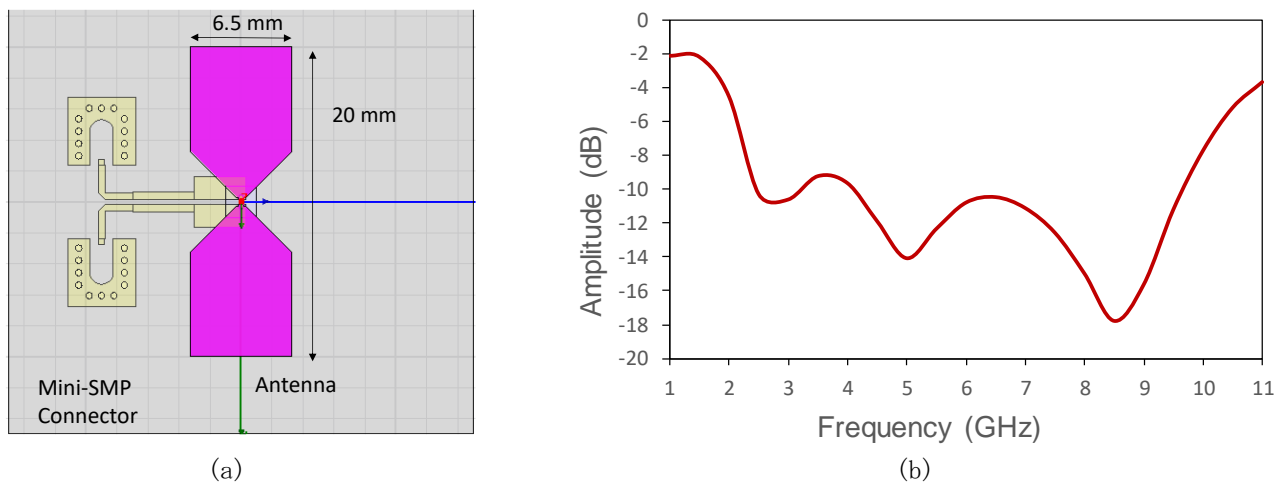


図3 超広帯域アンテナと周波数帯域 (a)ボウタイアンテナ平面図 (b)周波数帯域

送受信のボウタイアンテナは 360° 回転することで対象物探索エリアをカバーする。受信信号はデジタル処理し、コンピュータ上で往復飛行時間 (Time of Flight) と方向を計算することで、共焦点画像アルゴリズムによりイメージを再構築する。

3. 2 インパルスレーダーモジュール

図4に開発した超広帯域インパルスレーダー装置用 CMOS シングルチップインパルスレーダー半導体集積回路ブロック図を示す。

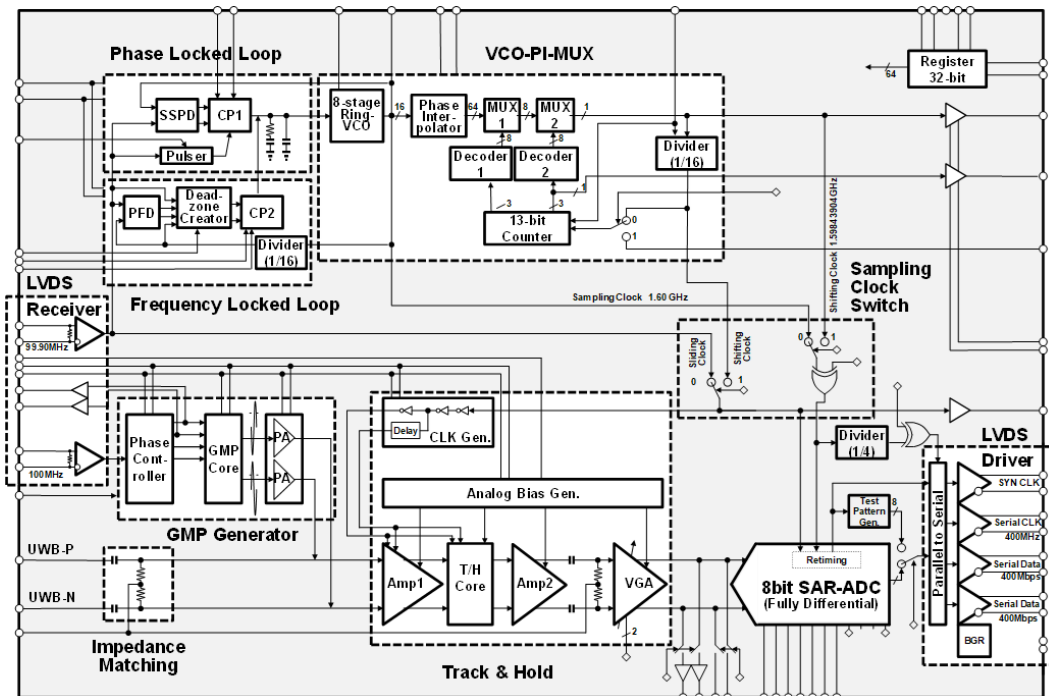
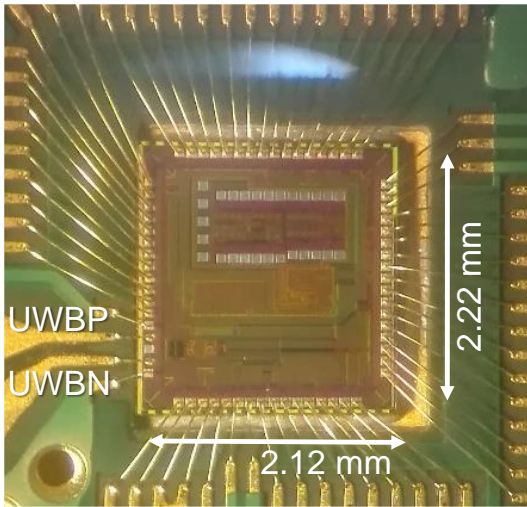


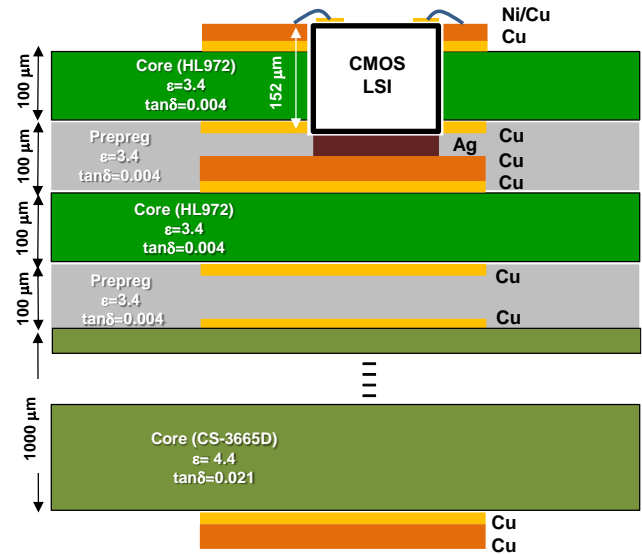
図4 超広帯域インパルスレーダーCMOS 半導体集積回路のブロック図

ポータブルマイクロ波インパルスレーダーの研究

Portable microwave impulse radar



(a)



(b)

図5 インパルスレーダーCMOS 半導体集積回路

(a) CMOS-LSI チップ写真 (b) CMOS 実装基板断面構造

CMOS-LSIは入力インパルス信号帯域5.9 GHz (2.3 - 8.2 GHz)の超広帯域要求を満足するために、低損失基板 ($\epsilon/\tan\delta = 3.4/0.004$ と $\epsilon/\tan\delta = 4.4/0.021$ の積層) 上にボンディングワイヤで実装する。超広帯域 5.9 GHz の信号を通すには寄生インダクタンスが 0.5 nH 以下、寄生容量が 60 fF 以下である必要があるから、ボンディングワイヤ長を水平距離 250 μm 以下となるように CMOS チップは基板に埋込んで実装している。

図5にインパルスレーダーCMOS-LSI チップ写真と実装基板断面図を示す。受信回路は微弱な入力信号を超広帯域低雑音アンプで増幅し、102.4 G サンプル/秒の高速トラック・ホールド(T/H)回路および 8 bit 逐次比較型アナログ・デジタル変換回路(SAR-ADC^{*3})でデジタル化する。サンプリングクロックは 8 段差動電圧制御発振回路で 1.6GHz 矩形波を生成し、等価時間サンプリング技術で約 10ps のサンプリングタイミングを実現している。

図6にこれらを実装したバイスタティックインパルスレーダーモジュールのブロック図を示す[12]。受信信号は 256 回測定し、それを平均化することでランダム雑音を除いてから信号処理する。CMOS-LSI の受信信号制御は FPGA^{*4}でシリアル・パラレル変換や ADC 後のデジタル信号平均化処理を行う。デジタル化され

た信号はコンピュータでオフライン処理し、共焦点画像アルゴリズムでイメージングを行う。

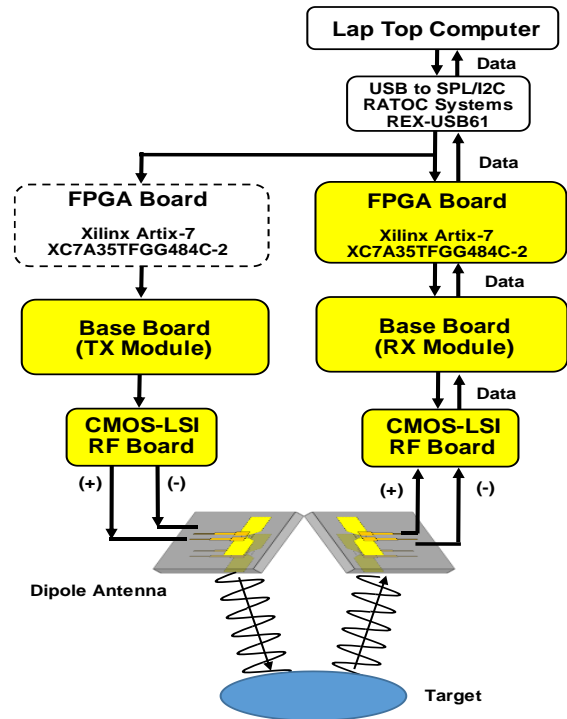


図6 バイスタティックインパルスレーダーモジュールブロック図

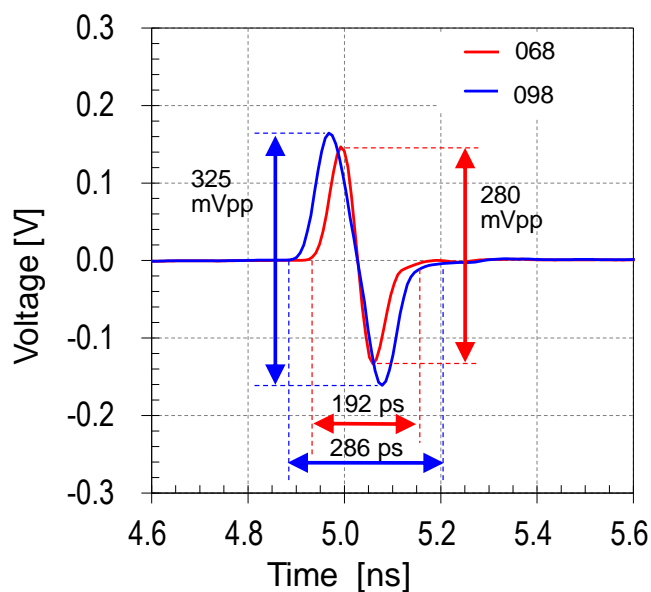
ポータブルマイクロ波インパルスレーダーの研究

Portable microwave impulse radar

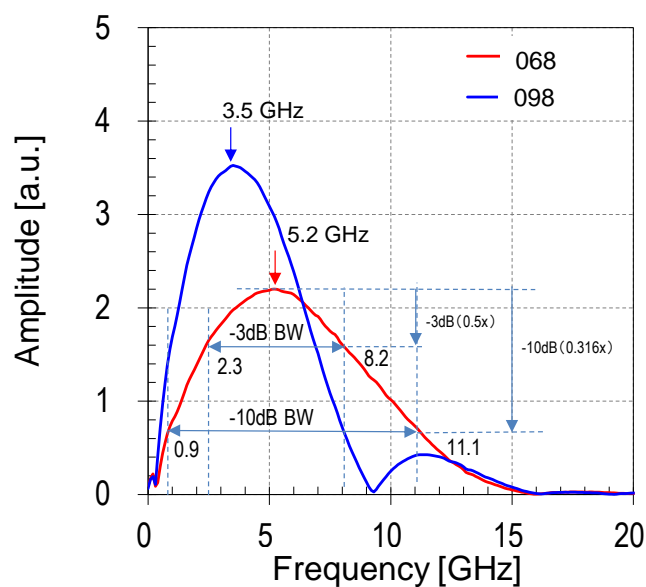
3. 3 測定結果

図 7 に CMOS-LSI で生成したタイムドメインのインパルス測定波形と高速フーリエ変換スペクトルの結果を示す。ガウシアンモノサイクルパルス生成回路において、100 MHz の矩形波クロックの立ち上がりとし下りの位相を調整してインパルスを論理合成する。位相は 4 bit と 3 bit の遅延回路を組み合わせ、インパルス幅を $2^7=128$ コードでデジタル制御する。図中 068/098 はデジタルコードを表す。コード 068 ではパルス幅 192 ps、中心周波数 5.2 GHz、-3 dB 帯域 5.9 GHz (2.3 - 8.2 GHz) の波形が生成できる。コード 098 ではパルス幅 286 ps、中心周波数 3.5 GHz、-3 dB 帯域 4.2 GHz (1.7 - 5.9 GHz) の波形が生成できる。

コード 0.98 で生成した図 7(a) のインパルス信号を送受信ボウタイアンテナ通過後に市販サンプリングオシロスコープ (Agilent 86100C+86112A) と開発した CMOS-LSI で測定した波形を比較し、図 8 (a)(b) にそれぞれ示す。CMOS-LSI のデジタル処理による波形再現性は高性能サンプリングオシロスコープとほぼ同等であることを示している。インパルス波形に双方とも振動が現れているのはボウタイアンテナ帯域を約 10 GHz 以下の UWB に制限していることによるものである (図 3)。インパルス信号の飛行時間と方位をピーク検知によって測定する場合にはこの振動は無視できる。



(a)



(b)

図 7 CMOS-LSI で生成したインパルスの測定波形

(a) タイムドメインインパルス波形 (b) 周波数ドメイン高速フーリエ変換スペクトル

ポータブルマイクロ波インパルスレーダーの研究

Portable microwave impulse radar

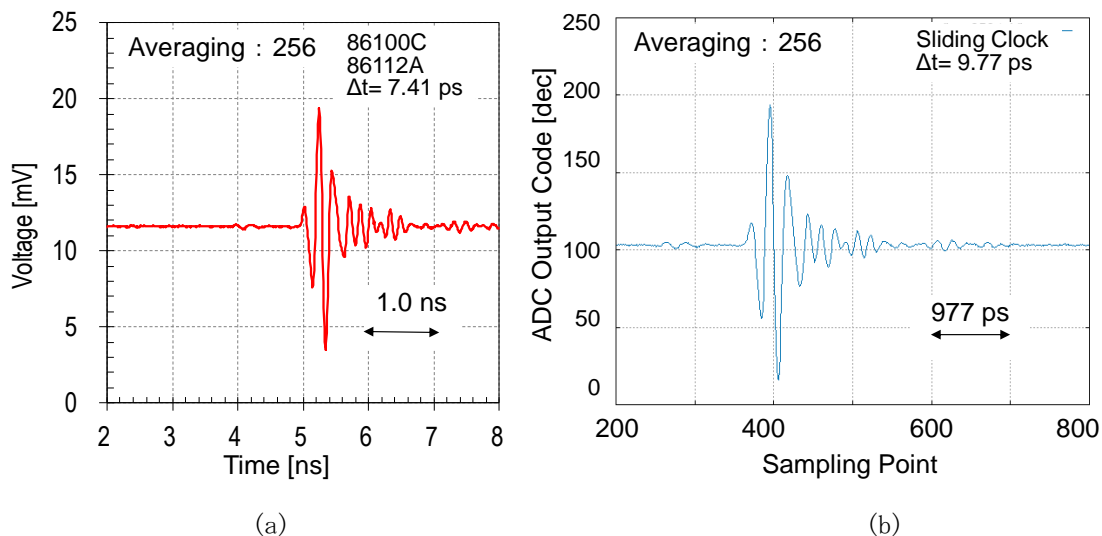


図8 ボウタイアンテナを通過したインパルスの測定波形

(a)市販のサンプリングオシロスコープによる測定波形 (b) CMOS-LSI による測定波形

開発したポータブルマイクロ波インパルスレーダーモジュールを用いて、乳房を模擬したゴム板に埋設された 10 mm 角の 2 個のターゲットを 10 mm 離して配置したファントムのレーダー共焦点画像を図 9 に示す。(a)は横断面断層図、(b)は冠状面断層図、(c)は 3 次元透過図を示す。ターゲットが埋設された位置に画

像が再構成され、マイクロ波の空間波長より短い約 10 mm の解像度が実現できることが分かる。本検討によりシングルチップ CMOS-LSI とバイスタティックボウタイアンテナを搭載した腫瘍組織検出用ポータブルマイクロ波インパルスレーダーの有効性が実証された。

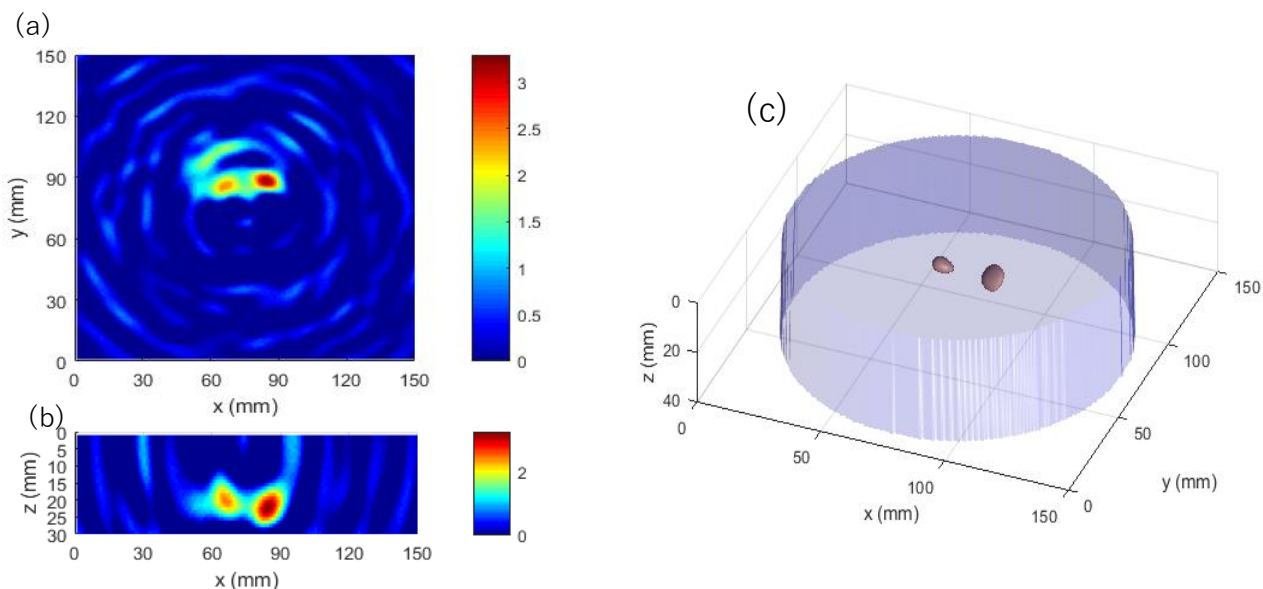


図9 10 mm 間隔で配置した 2 個の 10 mm 角ファントムのレーダー共焦点画像

(a)横断面断層図 (b)冠状面断層図 (c)3次元透過図

ポータブルマイクロ波インパルスレーダーの研究

Portable microwave impulse radar

4. 将来展望

本検討では超広帯域バイスタティックボウタイアンテナを送受信センサーとする CMOS-LSI を実装したマイクロ波インパルスレーダーモジュールの有効性を実証した。今後の課題は、人体内部からの微弱信号を抽出して高精度、高感度を実現するため、CMOS-LSI の雑音低減や回路方式の検討によるダイナミックレンジの拡大が必要となる。さらに、ハードウェア開発に加えて、腫瘍が無い場合のクラッターやアーチファクトによる雑音信号を抑制するため、高速・高精度イメージングアルゴリズムの開発も必要となる。

用語解説

- *1 Complementary Metal Oxide Semiconductor Large Scale Integrated Circuits
- *2 Ultra-Wide-Band
- *3 Successive-Approximation-Register Analog-to-Digital-Converter
- *4 Field-Programmable-Gate-Array

参考文献

- [1] M. Lazebnik, et al., "A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign and malignant breast tissues obtained from cancer surgeries," *Phys. Med. Biol.*, vol. 52, no. 20, pp. 6093–6115, 2007.
- [2] T. Sugitani et al., "Complex permittivities of breast tumor tissues obtained from cancer surgeries," *Applied Physics Letters*, vol. 104, pp. 253702-1-5, 2014.
- [3] E. C. Fear et al., "Confocal microwave imaging for breast cancer detection: Localization of tumors in three dimensions," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 49, no. 8, pp. 812-822, 2002.
- [4] P. M. Meaney et al., "A clinical prototype for active microwave imaging of the breast," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* vol. 48, no. 11, pp. 1841-1853, 2000.

おわりに

本研究では人体の悪性腫瘍組織検出のためのポータブルマイクロ波インパルスレーダー実用化を目指して、超広帯域バイスタティックボウタイアンテナおよび CMOS-LSI を実装したマイクロ波インパルスレーダーモジュールを開発し、その有効性を実証した。

- [5] X. Li et al., "An overview of ultrawideband microwave imaging via space-time beamforming for early-stage breast cancer detection," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 47, no. 1, pp. 19–34, 2005.
- [6] M. Klemm et al., "Radar-based breast cancer detection using a hemispherical antenna array—experimental results," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 6, pp. 1692–1704, 2009.
- [7] A. W. Preece et al, "MARIA M4: clinical evaluation of a prototype ultrawideband radar scanner for breast cancer detection," *J. Med. Imaging*, vol.3, no. 3, pp. 033502-1-7, 2016.
- [8] L. Sani et al., "Breast lesion detection through MammoWave device: Empirical detection capability assessment of microwave images' parameters," *PLoS One*, vol. 16, no. 4, pp. 1–17, Apr. 2021.
- [9] H. Song et al., "Detectability of breast tumor by a hand-held impulse-radar detector: Performance evaluation and pilot clinical study," *Scientific Reports*, vol. 7, pp. 16353-1-11, 2017.
- [10] H. Song et al., "A Two-Stage Rotational Surface Clutter Suppression Method for Microwave Breast Imaging with Multistatic Impulse-Radar Detector," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement* Vol. 69, Issue 12, pp. 9586 - 9598,

ポータブルマイクロ波インパルスレーダーの研究

Portable microwave impulse radar

2020.

- [11] S. Sasada et al., "Portable impulse-radar detector for breast cancer: a pilot study," J. Med. Imaging, vol. 5, no. 2, pp. 025502-1-5, 2018.
- [12] T. Kikkawa, et al., "CMOS Gaussian Monocycle Pulse Transceiver for Radar-Based Microwave Imaging," IEEE Trans. Biomedical Circuits and Systems, 14, 6, 1333 - 1345, 2020.

この研究は、令和元年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和2～4年度に実施されたものです。