

RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES USANDO TOMOGRAFÍA FOTOACÚSTICA

Irving Caballero^a, Alejandro Díaz, Leopoldo Altamirano-Robles^a

^aInstituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Pue. Puebla, pirving01@inaoep.mx,
robles@inaoep.mx

RESUMEN.

La tomografía fotoacústica (PAT) es una técnica no invasiva y no ionizante para la adquisición y reconstrucción de objetos. Dicha reconstrucción, se basa en la detección de ondas de presión acústicas en el rango del ultrasonido, que pueden generarse tanto en tejidos, como en materiales no biológicos que fueron previamente excitados por pulsos láser cortos del orden de unos nanosegundos.

Una de las ventajas de la técnica PAT es que permite reconstruir imágenes de estructuras pequeñas, i.e. unas cuantas micras, hasta objetos que midan algunos centímetros; además procesa imágenes a profundidades de hasta 7cm en tejidos. En la actualidad, aún no está resuelto el problema de cómo obtener imágenes de mayor resolución y reducir el porcentaje de ruido en el proceso de reconstrucción. Para resolver el problema, se propone un algoritmo de reconstrucción iterativo a partir de una función de costo, que incluya el análisis de la relación resolución-ruido-número de iteraciones.

En el desarrollo del algoritmo se emplean métodos estadísticos y matemáticos para obtener imágenes con mayor resolución, menor ruido y proponiendo un número de iteraciones óptimo. Se presentan las bases de la PAT, junto con la comparación de dos de los algoritmos más utilizados en el área: el FFT y el iterativo. Los resultados preliminares muestran que el algoritmo iterativo tiene buena resolución, pero es muy tardado. Por otro lado, el FFT es rápido pero su resolución no es tan buena como la del iterativo.

El objetivo final del trabajo es combinar las ventajas de ambos algoritmos, manteniendo la velocidad del algoritmo FFT y la resolución del iterativo.

1. INTRODUCCIÓN.

La tomografía fotoacústica (PAT) es una técnica no invasiva utilizada principalmente para la obtención de imágenes médicas dada su característica única de poder combinar un **alto contraste** óptico y una **alta resolución** ultrasónica en una sola modalidad, y es evidente su gran potencial en muchas aplicaciones importantes incluyendo la detección de cáncer de seno, cáncer de piel, enfermedades vasculares y tumores cerebrales en animales pequeños [1-5], entre otros.

En la PAT, el tejido es excitado con un pequeño pulso láser (normalmente de unos cuantos nanosegundos). Esto origina ondas fotoacústicas transitorias en el rango de 1-100 MHz, debido a la expansión termoelástica transitoria de los componentes del tejido que absorben la luz y, dichas ondas, son detectadas por un transductor en movimiento o un conjunto de transductores que pueden ser enfocados o desenfocados los cuales reconstruyen la densidad de energía absorbida. Depende del tipo de material irradiado, pero normalmente el esparcimiento ultrasónico es más débil

que el esparcimiento óptico, por lo que la PAT rompe el límite de 2 a 4 mm de resolución espacial asociado a la tomografía óptica pura como la tomografía óptica difusa (DOT) para imágenes de mayor profundidad del tejido; o el límite de espesor de aproximadamente 1 mm asociado a la tomografía confocal, multifotónica o de óptica coherente (OCT). Finalmente, la PAT puede ser portable para otras aplicaciones, es económica y utiliza radiación no ionizante [6], por lo que no representa un riesgo a la salud.

De acuerdo a la geometría de la radiación electromagnética y a la adquisición de la señal fotoacústica, la PAT se puede dividir en 3 modos de imágenes [7]: el modo frontal [8], el modo trasero [9] y el modo lateral [10]. En el modo frontal, el transductor ultrasónico y la fuente de radiación se encuentran en lados opuestos del objeto, mientras que en el modo trasero están en el mismo lado. En el modo lateral, el transductor es perpendicular a la dirección de la radiación electromagnética. Tanto en el modo frontal como en el trasero, las regiones cercanas a los transductores se reconstruyen de mejor manera, pero son más sensibles al ruido. El modo lateral tiene mayor precisión, pero menor velocidad de reconstrucción comparado con los dos primeros [11].

En los últimos años, las técnicas para la obtención de imágenes fotoacústicas (PAI) han llegado a ser un área de investigación muy importante y han mostrado resultados prometedores en varias aplicaciones biomédicas [12]. Sin embargo, su uso no ha sido extendido hacia la inspección de materiales [13] por ejemplo, en procesos de control de calidad en una línea de producción o en pruebas no destructivas (NDT).

Dentro de los algoritmos de reconstrucción, existen 4 aproximaciones principales para obtener la imagen [14]: ecuaciones lineales simultáneas, algoritmos iterativos, retroproyección filtrada y reconstrucción por Fourier. Las ecuaciones simultáneas es un método impráctico dado los tiempos altos de procesamiento, pero provee un mejor entendimiento del problema. Los algoritmos iterativos proveen una imagen de alta calidad, pero están sujetos a un umbral de iteraciones después del cual la imagen presentará ruido que no permitirá distinguir los objetos dentro de la misma y el tiempo de procesamiento puede ser bastante largo, por otra parte, si las iteraciones son pocas, los objetos no se alcanzarán a reconstruir en su totalidad o con la calidad deseada. El método de retroproyección filtrada soluciona el problema donde la imagen recuperada es muy borrosa, de hecho, la imagen obtenida podría ser idéntica a la imagen original si se tuviese un número de vistas infinito y un número de puntos por vista infinito, lo que, computacionalmente hablando, es imposible de tener. Finalmente, la reconstrucción por Fourier provee los tiempos de procesamiento menores, pero, de igual forma, la calidad de la imagen recuperada es menor con respecto a los demás métodos.

Motivado por lo anterior, en este trabajo se presenta la comparación de los algoritmos iterativo y del dominio de la frecuencia por separado para, posteriormente, proponer la implementación de un algoritmo iterativo en el dominio de la frecuencia que establezca el número de iteraciones óptimo considerando la relación resolución-ruido que permita obtener las imágenes con mayor calidad y tiempos de procesamiento bajos. Lo anterior para que esta técnica pueda ser utilizada en la inspección de discontinuidades en los objetos de examinación en pruebas no destructivas como lo son las aleaciones de aluminio.

Este trabajo se ha organizado de la siguiente manera: el estado del arte se presenta en la sección 2; la problemática es descrita en la sección 3; la metodología es presentada y discutida en la sección 4; los resultados esperados se muestran en la sección 5; y, finalmente, las conclusiones se desglosan en la sección 6.

2. ESTADO DEL ARTE.

El concepto de tomografía fotoacústica (PAT) surgió a mediados de los 90's encontrando su mayor potencial en aplicaciones clínicas [6]. En imágenes obtenidas de los senos, la PAT ofrece la habilidad de obtener imágenes con resolución submilimétrica y un alto contraste óptico generada con la presencia de sangre, agua y lípidos los cuales son las transformaciones predominantes asociados con lesiones. De esta manera, algunos estudios llevados a cabo en diversas institucio-

nes y países, sugieren que la PAT tiene el potencial de detectar cáncer de mama en etapas tempranas [6].

Otras aplicaciones de la PAT recientemente exploradas, ofrecen una oportunidad para la detección temprana y monitoreo de enfermedades progresivas entre las cuales se encuentran la osteoartritis y la artritis reumatoide. En estos casos, el contraste óptico es producido por la degradación articular del cartilago y el incremento de la acumulación de agua en la cavidad sinovial [6].

También en [6] se muestra el modelo de una rata con epilepsia aguda en el cual la PAT puede, de manera no-invasiva, realizar un seguimiento de la dinámica de las convulsiones cerebrales con una alta resolución espacio-temporal y a una profundidad que es clínicamente relevante.

[15] presenta una revisión detallada sobre varios agentes de contraste exógenos utilizados para la creación de imágenes con la PAT, debido a que estos agentes tienen la capacidad de mejorar aún más el contraste de la imagen y sobrepasar el límite de profundidad que esta técnica llega a presentar.

En [16] se demuestra, a través de experimentación con la PAT, la reconstrucción de imágenes a partir del coeficiente de absorción óptico en medios heterogéneos.

En cuanto al trabajo para la inspección de materiales se refiere, en [13] dicen reportar por primera vez, una técnica PAT remota y sin contacto para la inspección de materiales sólidos utilizando un interferómetro de mezcla de dos ondas utilizando una muestra de polímero semitransparente, mostrando que las imágenes fotoacústicas no sólo son valiosas para aplicaciones médicas o biológicas, sino que también tienen un gran potencial para inspección de materiales sólidos y, en este caso, semitransparentes. Este trabajo se publicó en diciembre de 2010, sin embargo, en cuanto a la inspección de metales y más específicamente, inspección de aleaciones de aluminio, no hay trabajos reportados en la literatura.

Con respecto a los diferentes algoritmos utilizados para la obtención de imágenes fotoacústicas, en [17] se presenta un algoritmo rápido de contracción-umbralización iterativa (FISTA) que preserva la simplicidad del algoritmo iterativo, pero con una relación global de convergencia y que probó ser mejor significativamente tanto en la teoría como en la práctica.

En [18] se propone el algoritmo de reconstrucción por deconvolución (DR) para las imágenes fotoacústicas desde el punto de vista total, y el punto de vista limitado. Este algoritmo es comparado con dos de los algoritmos más populares para la obtención de imágenes fotoacústicas: el algoritmo de reconstrucción en el dominio del tiempo (TDR) y la retroproyección filtrada (FBP); mostrando mayor precisión y robustez al ruido en la vista limitada y siendo diez veces más rápido en la vista total.

A modo de comparativa, en [11] se hace un estudio sobre 4 de los algoritmos más utilizados para la obtención de imágenes fotoacústicas: algoritmo de reconstrucción esférica en el dominio del tiempo (STDTR), algoritmo de reconstrucción por deconvolución (DR) en el dominio de la frecuencia, algoritmo de reconstrucción plana en el dominio del tiempo (PTDR) y algoritmo de proyección con base en Fourier (FP) en el dominio de la frecuencia. Se obtienen 6 imágenes de los 4 algoritmos establecidos: 2 para el Modo Frontal, 2 para el Modo Trasero y 2 para el Modo Lateral; de las cuales, 1 corresponde al dominio del tiempo y la otra al dominio de la frecuencia respectivamente. Las imágenes muestran que el Modo Lateral tiene mejor resolución de la imagen obtenida. En general, los algoritmos ejecutados en el dominio de la frecuencia muestran tener menor tiempo de desempeño que sus contrapartes en el dominio del tiempo, pero menor resolución de imagen.

3. PROBLEMÁTICA.

Como definición general de una prueba no destructiva (NDT), es una examinación, prueba o evaluación llevada a cabo en cualquier tipo de objeto sin cambiar o alterarlo de ninguna manera, con el objetivo de determinar la ausencia o presencia de condiciones o "discontinuidades" que puedan tener un efecto sobre el uso o utilidad del mismo [19]. La NDT, como tecnología, ha tenido un crecimiento significativo e innovador los últimos 25 años e, inclusive, se considera que, actual-

mente, hace más para satisfacer la seguridad de las personas que cualquier otra tecnología, incluyendo aquellas de las profesiones médicas. Se ha vuelto una parte integral de, prácticamente, cualquier proceso industrial, donde la falla de un producto podría resultar en accidentes o heridas en el cuerpo humano.

En la industria, las NDT's pueden ser utilizadas para examinar materiales en crudo antes de su procesamiento, evaluar materiales durante su procesamiento como medios de control de procesos, examinar productos terminados y evaluar productos o estructuras una vez que éstos hayan sido puestos en servicio.

Sin embargo, cualquier prueba no destructiva tiene sus limitantes y, en muchos casos, una inspección exhaustiva requerirá de al menos el uso de dos métodos: uno para las condiciones internas del objeto y otro que sea más sensible a las condiciones que puedan existir en la superficie del mismo. Si bien, existen estándares y códigos que describen el tipo y tamaño de las discontinuidades que son consideradas como aceptables o no, si el método de examinación no es capaz de identificar estas condiciones, los códigos y estándares básicamente pierden su sentido.

Dos de las pruebas no destructivas con mayor uso en la industria son la prueba de ultrasonido y la radiografía (rayos X y rayos gamma). Sin embargo, estas pruebas tienen sus propias limitaciones: por un lado, el ultrasonido requiere de un alto nivel de habilidades y entrenamiento para poder interpretar las señales y, normalmente, no se guardan los resultados de las evaluaciones, es decir, los registros están limitados a documentación física en lugar de una reproducción de la prueba como, por ejemplo, mediante una radiografía o imagen.

Por otro lado, los rayos X y rayos gamma presentan riesgos de seguridad por el uso de dispositivos de radiación ionizada e invasiva. También tiene limitantes con los espesores, basadas en la densidad del material y la energía utilizada, puede consumir mucho tiempo, es muy costosa y requiere una extensa experiencia y entrenamiento del personal durante la toma de la radiografía y durante su interpretación [20].

La tomografía fotoacústica (PAT) es una técnica utilizada en el área médica para la obtención de imágenes del cuerpo humano debido a que combina el alto contraste y la especificidad basada en espectroscopía óptica con la alta resolución espacial del ultrasonido en una sola modalidad. Mientras que, en el área de inspección de materiales, los trabajos relacionados con pruebas no destructivas son escasos.

Por otra parte, los algoritmos propuestos hasta hoy en día para las imágenes fotoacústicas, no han logrado combinar dos de las características más importantes para la obtención y análisis de las mismas: velocidad de procesamiento y calidad de imagen.

Como se aprecia en [11], hay algoritmos que proporcionan una excelente velocidad de obtención de la imagen, siendo principalmente aquellos algoritmos que se procesan en el dominio de la frecuencia, pero la calidad de la imagen obtenida es baja, principalmente con arreglos frontales los cuales son los de mayor uso debido a la facilidad de su implementación. Por otro lado, aquellos algoritmos que reflejan mejor calidad en la imagen obtenida son, principalmente, los algoritmos iterativos, pero éstos pueden tener tiempos de procesamiento prohibitivos si se pensara en una línea de producción dentro de la industria, sobre todo porque hoy en día no existe un algoritmo de este tipo que establezca el número único de iteraciones para cada proceso. Es decir, un número bajo de iteraciones no proporcionará la información suficiente para recuperar la imagen lo más parecido a la original, mientras que un número muy grande de iteraciones introducirá ruido y disminuirá la calidad de la imagen.

4. METODOLOGÍA.

Para poder llevar a cabo el trabajo propuesto, es necesario, como primer paso, definir la base matemática que comprende el problema de la tomografía fotoacústica, así como el método iterativo propuesto en la literatura, para poder comprender el fenómeno y establecer cómo se podrá determinar el número de iteraciones óptimo para cualquier caso y lograr el objetivo planteado.

Acto seguido, es importante realizar simulaciones del método iterativo y el método en el dominio de la frecuencia y, de esta manera, poder establecer parámetros para comparar los resultados esperados y verificar si se ha llegado a cumplir los requerimientos y si los resultados son los deseados o no.

Como tercer punto para lograr los objetivos, se tiene que realizar la modificación planteada al algoritmo iterativo y que éste logre obtener imágenes fotoacústicas de alta resolución teniendo en cuenta la relación resolución-ruido-número de iteraciones para que, por un lado, siga manteniendo las altas velocidades de procesamiento que proporcionan los algoritmos en el dominio de la frecuencia y, por el otro, otorgue una alta resolución de imagen como lo hacen los algoritmos iterativos sin que sea un usuario el que tenga que estar definiendo de manera manual el número de iteraciones comprometiendo los resultados y los tiempos de ejecución ya que un número bajo no proporcionará la calidad deseada, mientras que un número alto podrá causar que la imagen resultante tenga ruido indeseable.

Teniendo la implementación de dicha modificación al algoritmo, se debe evaluar comparándolo con su contraparte que no tiene modificación y medir los resultados, principalmente en dos sentidos: velocidades de procesamiento y calidad de las imágenes obtenidas. Este proceso también se hará mediante la simulación del efecto fotoacústico en computadora.

De manera paralela a las simulaciones, se obtendrán datos experimentales de la densidad de energía absorbida de una muestra de aleación de aluminio obtenida con un arreglo fotoacústico que incluirá un láser generador de pulsos cortos para irradiarla y transductores para captar y procesar las ondas acústicas y poder generar las imágenes correspondientes con el algoritmo propuesto para observar las posibles discontinuidades que el objeto de prueba presente en su interior y, de esta manera, se podrán tener resultados experimentales para, en un momento dado, poder llevar la implementación de manera práctica a la industria, si los resultados son los esperados.

5. RESULTADOS.

Para llevar a cabo la comparación de los algoritmos en el dominio de la frecuencia (FFT) y el método iterativo, se utiliza el toolbox para Matlab k-Wave [20] en una laptop con procesador AMD A-10 con 1.90 GHz de velocidad y 12 GB en RAM para llevar a cabo algunas simulaciones.

Los resultados se muestran en la tabla 1, en la cual se pueden apreciar las dos características que se han mencionado en los capítulos previos y que hacen referencia a la velocidad de procesamiento de los algoritmos y a la calidad de la imagen fotoacústica obtenida. Para este último parámetro, se considera el PSNR entre la imagen de salida de los algoritmos y la imagen original mostrada en la figura 1. En cuanto al tiempo, éste es medido en segundos desde que se ejecuta el algoritmo hasta que se obtiene la imagen final.

| Prueba | Algoritmo | Tiempo (seg) | PSNR (dB) | Iteraciones |
|--------|-----------|--------------|-----------------|-------------|
| 1 | FFT | 12.82 | 13.10 ± 1.16 | N.A. |
| 2 | FFT | 12.53 | 13.08 ± 0.90 | N.A. |
| 3 | FFT | 12.31 | 12.80 ± 0.77 | N.A. |
| 4 | Iterativo | 102.14 | 43.56 ± 0.001 | 3 |
| 5 | Iterativo | 301.46 | 53.19 ± 1.19e-4 | 7 |
| 6 | Iterativo | 486.46 | 53.86 ± 1.02e-4 | 15 |

Tabla 1. Resultados obtenidos de las simulaciones de los algoritmos FFT e iterativo.

Los datos y las imágenes corresponden a un tejido homogéneo para llevar a cabo una primera aproximación sobre los resultados que se podrían adquirir al tratar con metales y, en especial, con aleaciones de aluminio. La reconstrucción de la onda fotoacústica bi-dimensional se hace a través de un arreglo lineal de elementos de sensado que se aprecia como una línea más gruesa sobre la parte superior de las imágenes.

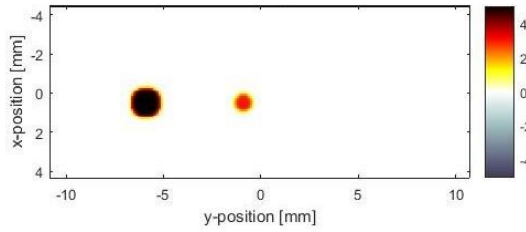


Figura 1. Presiones originales a reconstruir.

Los resultados obtenidos en cuanto a las velocidades y al PSNR concuerdan con lo planteado en la literatura, pues se puede observar que el algoritmo FFT efectivamente es mucho más rápido que el iterativo, pues mientras el primero se ejecuta entre 12 y 13 segundos, al segundo le toma más de un minuto y medio tan sólo efectuar 3 iteraciones. Sin embargo, en cuanto a la resolución de las imágenes, el iterativo tiene mejores resultados pues su PSNR se encuentra por encima de los 40 dB mientras en tanto que el FFT no supera los 14 dB. Esto también se puede observar en las figuras 2 a 5 que corresponden a las imágenes fotoacústicas obtenidas de los 6 ejercicios mostrados en la tabla 1.

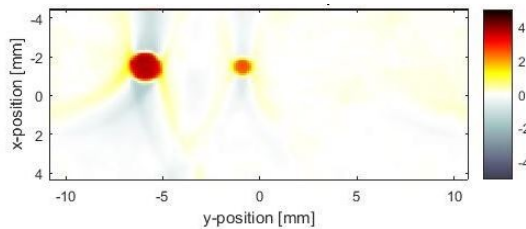


Figura 2. Imagen PAT con algoritmo FFT. Prueba 1.

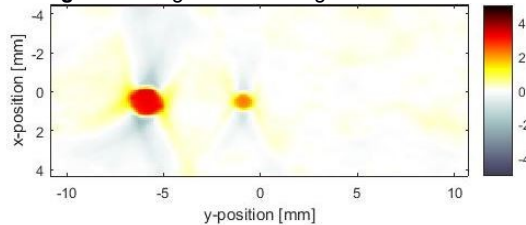


Figura 3. Imagen PAT con algoritmo FFT. Prueba 2.

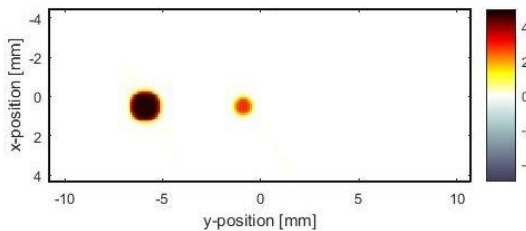


Figura 4. Imagen PAT con algoritmo Iterativo. Prueba 4.

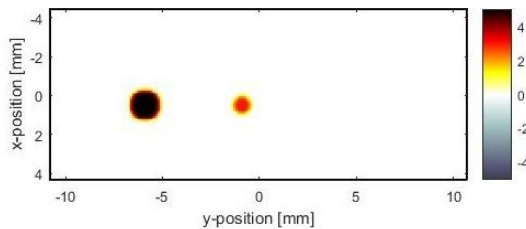


Figura 5. Imagen PAT con algoritmo Iterativo. Prueba 5.

4. CONCLUSIONES

Dados los resultados mostrados en la sección anterior y a lo reportado en la literatura, se propone la implementación de un algoritmo iterativo en el dominio de la frecuencia que pueda aproximarse a

los tiempos de procesamiento que reflejan estos algoritmos, pero que pueda hallar el número adecuado de iteraciones que permita la mayor calidad de la imagen obtenida sin la introducción de ruido a la misma y que permita distinguir las discontinuidades que llegase a presentar un material de aleación de aluminio con un arreglo experimental trasero.

De igual forma, se propone el uso de esta técnica en pruebas no destructivas de aleaciones de aluminio las cuales son altamente empleadas en la industria entre las cuales destacan la aeronáutica y la automotriz entre muchas otras. Esto con la intención de contar con una técnica que llegue a proporcionar imágenes de las discontinuidades que puedan presentar los objetos de prueba que no requiera de una alta especialización para su interpretación al tiempo que sea más económica y no represente un riesgo de seguridad.

Si el tiempo lo permite, se buscará mejorar el algoritmo para obtener imágenes con una mayor calidad a través de técnicas de segmentación y detección de objetos para distinguir con mayor claridad las discontinuidades que llegase a presentar el material e, inclusive, en un futuro poder llegar a clasificarlas.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Kruger, Robert A., Daniel R. Reinecke, and Gabe A. Kruger. "Thermoacoustic computed tomography—technical considerations." *Medical physics* 26.9 (1999): 1832-1837. *physics*, 26(9), 1832-1837.
2. Hoelen, C. G. A., et al. "Three-dimensional photoacoustic imaging of blood vessels in tissue." *Optics letters* 23.8 (1998): 648-650.
3. Wang, Xueding, et al. "Photoacoustic tomography of biological tissues with high cross-section resolution: reconstruction and experiment." *Medical physics* 29.12 (2002): 2799-2805.
4. Yang, Diwu, et al. "Fast multielement phase-controlled photoacoustic imaging based on limited-field-filtered back-projection algorithm." *Applied Physics Letters* 87.19 (2005): 194101.
5. J. J. Niederhauser, M. Jaeger, and M. Frenz. "Real-time three-dimensional optoacoustic imaging using an acoustic lens system." *Applied Physics Letters* 85.5 (2004): 846-848.
6. Huabei Jiang. "Photoacoustic Tomography". CRC Press (2015).
7. D. Huang, C. Liao, C. Wei et al. "Simulations of optoacoustic wave propagation in light-absorbing media using a finite-difference time-domain method". *J Acoust Soc Am* 117 (2005): 2795–2801.
8. K. P. Kostli, P. C. Beard. "Two-dimensional photoacoustic imaging by use of Fourier-transform image reconstruction and a detector with an anisotropic response". *Appl Opt* 42 (2003): 1899–1908.
9. J. J. Niederhauser, M. Jaeger, R. Lemor et al. "Combined ultrasound and optoacoustic system for real-time high-contrast vascular imaging in vivo". *IEEE Trans Med Imaging* 24 (2005): 436–440.
10. R. A. Kruger, P. Liu, Y. Fang et al. "Photoacoustic ultrasound (PAUS)-reconstruction tomography". *Med Phys* 22 (1995): 1605–1609.
11. Zhang, Chi, and Yuanyuan Wang. "Comparison of Various Imaging Modes for Photoacoustic Tomography." 13th International Conference on Biomedical Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
12. Wang, Lihong V. "Multiscale photoacoustic microscopy and computed tomography." *Nature photonics* 3.9 (2009): 503-509.
13. Berer, Thomas, et al. "Remote photoacoustic imaging on solid material using a two-wave mixing interferometer." *Optics letters* 35.24 (2010): 4151-4153.
14. Smith, Steven W. "The scientist and engineer's guide to digital signal processing." (1997).
15. Wu, Dan, et al. "Contrast agents for photoacoustic and thermoacoustic imaging: a review." *International journal of molecular sciences* 15.12 (2014): 23616-23639.
16. Yuan, Zhen, and Huabei Jiang. "Quantitative photoacoustic tomography: Recovery of optical absorption coefficient maps of heterogeneous media." *Applied physics letters* 88.23 (2006): 231101.

17. Beck, Amir, and Marc Teboulle. "A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems." *SIAM journal on imaging sciences* 2.1 (2009): 183-202.
18. Zhang, Chi, and Yuanyuan Wang. "Deconvolution reconstruction of full-view and limited-view photoacoustic tomography: a simulation study." *JOSA A* 25.10 (2008): 2436-2443.
19. Charles Hellier. "Handbook of nondestructive evaluation." McGraw-Hill, Second Edition.
20. Bradley Treeby and Ben Cox. "k-Wave A MATLAB toolbox for the time-domain simulation of acoustic wave fields." 2009-2014.