

전송형 초음파 영상 시스템의 모델링

A Modeling of an Ultrasonic Transmission Imaging System

권 영 빈*

(Y. B. Kwon)

요 약

본 논문에서는 crossed-array의 형태를 갖는 전송형 초음파 영상시스템의 모델링 방법을 소개한다. 12MHz에서 동작하는 crossed-array 시스템은 angular spectrum을 사용하여 simulation을 수행하였다. 또한 이론적인 연구를 통하여 시스템의 전달함수인 1M 매트릭스를 구하였다. 1M을 통하여 시스템의 degradation에 대한 model을 얻었으며, 그 특성이 이중구조를 갖는 Toeplitz 매트릭스가 됨을 알 수 있었다. 매트릭스 1M의 역을 구함으로써 초음파 영상의 spatial degradation을 제거시켰다.

ABSTRACT

In this paper, the concept of ultrasonic transmission imaging system with crossed-arrays is introduced. The crossed-array system is simulated by angular spectrum method in the operating frequency of 12MHz. A theoretical development of a system transfer function matrix 1M is presented. Using this matrix, a priori knowledge on the physical properties of the system is understood.

It proves to be a block Toeplitz matrix with Toeplitz entries. Using the inversion procedure, the spatial degradations of the measured image can be removed.

I. 서 론

초음파 영상은 일반적으로 pulse-echo 또는 Doppler 방식에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 전송형의 초음파 영상도 화질 개선이라는 측면에서 Green의 Camera⁽¹⁾나 Alais의 매트릭스 인⁽²⁾과 같이 중요한 방법중의 하나가 될수 있다. 그런

데 전송형 초음파 영상 시스템을 구현하기 위하여는 모자이크 형태의 transducer가 필수적이므로, 동일한 특성을 갖는 많은 숫자의 전자회로가 필요하다. 이는 신뢰도나 유지관리, tuning 등에서 많은 문제점을 야기시키게 된다. 이와같은 문제점을 해결하기 위해서는 시스템의 성능은 저하시키지 않으면서 전자회로의 숫자를 감소해야만 하는데, 2차원 array를 사용하면 가능하다.

*중앙대학교 전자계산학과 교수

2차원 array중에서도 Crossed-array에 대한 첫서도는 Curtis³⁾에 의하여 시도되었다. 직사각형의 transducer 들을 차곡차곡 쌓아서 정사각형의 형태가 되도록 하였으며, 마주보는 정사각형의 transducer 들은 서로 직각이 되도록 하였다. 이때 한쪽은 초음파 필스를 전송하는 장치로 사용하였으며, 다른 쪽은 수신기로 사용하였다. 이들의 시도는 두가지의 기술적인 어려움이 있었다. 우선 재료면에서 polymeric foil을 사용하였으므로 성능에 제한을 받았으며, 사용 주파수가 낮아서 diffraction의 영향이 매우 컸다. 이와같은 문제점을 극복하기 위한 시도가 Bernard⁴⁾에 의해 수행되었다. 12MHz상에서 센서 array의 최적크기를 angular spectrum을 사용하여 smulation으로부터 구하였다.

이와같은 전송형 초음파 시스템의 resolution을 개선하기 위해서는 시스템의 전달함수를 알아야 한다. 그러면 이를 이용하여 deconvolution을 수행함으로써 degrade된 영상의 복원(restoration)이 가능해진다. 많은 연구가 pulse-echo 방식에 대하여 수행되었으며 시스템의 point spread function을 구하였다.⁵⁾ 본 연구와 같은 2차원 array형태에는 쉽게 적용이 되지 않으며, 기존의 결과를 확장시켜 inverse filtering 과 Wiener filtering을 수행하여 보았다. 그결과 영상의 질에 대한 개선이 별로 없었으므로 수학적 전달함수를 구할 필요성이 발생하였다. 본 논문에서는 2차원 array형태의 전송형 초음파 시스템의 수학적 모델을 구하여 영상의 질을 개선하는 방법을 제시하고자 한다.

2절에서는 crossed-array방식의 개념을 소개한후, 3절에서 수학적 모델링과 복원에 관하여 고찰하며, 4장에서 smulation결과를 보이도록 한다.

II. Crossed-Array Transducer

Crossed-array transducer의 구성형태가 그림1에 나타나 있다.

이 시스템은 수직으로 놓인 마주보는 송신 바(bar)와 수신바 사이를 진행하는 초음파의 attenuation을 측정하게 된다. 만약 N개의 송신바와 N개의 수신

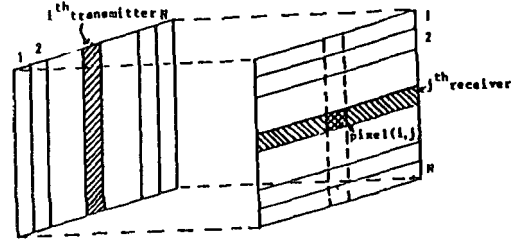


그림 1. Crossed-array transducer의 형태

바가 존재하면 총 2N개의 전자회로가 필요하게 되어 일반적인 2차원 array에서 필요한 N²의 전자회로수에 비해 많은 숫자의 회로를 감소할 수가 있게 된다.

이 회로를 사용하지 않으면 N²화소(pixel)의 영상을 얻을수가 있다. 화소(i,j)의 값을 i번째 송신기의 신호를 j번째 수신기에서 받아 측정함으로써 얻을수 있으며 이는 그림1에 표시한 것과 같다. 이와같은 crossed-array를 i,j값을 스위칭시킴으로써 전자회로의 감소와 함께 비슷한 resolution을 갖는 N²화소의 영상 시스템을 구성하게 된다.

III. 시스템의 모델링

III-1 Angular Spectrum

전송하는 음향 field의 분포를 구하고자하면, angular spectrum P(f_x, f_y)는 Fourier 변환으로 부터 얻게되며, 평면파의 전송 field와 같게 된다.

만약 α, β와 γ가 평면파의 전송방향 성분이라고 하면

$$\alpha = \lambda \cdot f_x, \quad \beta = \lambda \cdot f_y, \quad \gamma = \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)}$$

이 된다. 이때 f_x와 f_y는 spatial frequency이고, λ는 파장이다.

이제 2만큼 떨어진 두평면사이의 전송특성은 전송 전달함수 H_z(f_x, f_y)에 의해 모델화 된다.⁶⁾

$$\begin{cases} H_z(f_x, f_y) = e^{2\lambda^2 \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)}}, & f_x^2 + f_y^2 < 1/\lambda^2 \\ H_z(f_x, f_y) = 0 & \text{, 기타.} \end{cases}$$

simulation을 위하여 전송array와 수신 array사이에

transparent한 물체가 존재한다고 하자. 그러면 전송면에서는 다음과 같은 특성을 갖는다.

$$p(x,y) = A \cdot \text{rect}_L(x-il) \cdot \text{rect}_L(y-il)$$

이때, 그림2에 표시된 것과 같이 l 은 array의 폭을 나타내며, L 은 array의 길이가 된다.

이것을 angular spectrum으로 나타내면

$$P(f_x, f_y) = A \cdot l \cdot L \cdot \text{sinc}(lf_x) \cdot \text{sinc}(lf_y)$$

가 된다. 그러므로 이식으로부터 그림2의 시스템은 다음의 블록도와 같은 과정을 거쳐 영상을 얻게 된다.

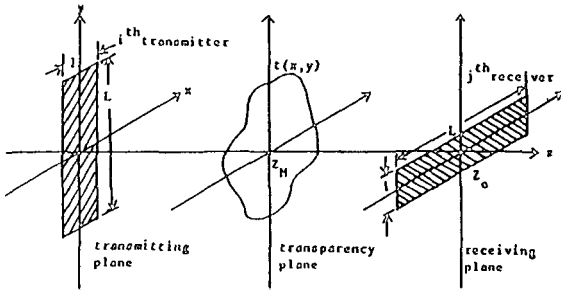
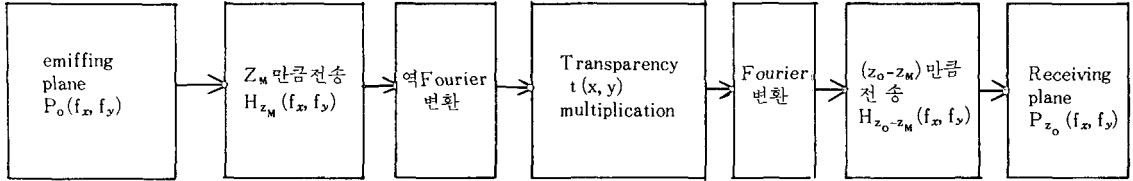


그림 2. 모델링을 위한 시스템

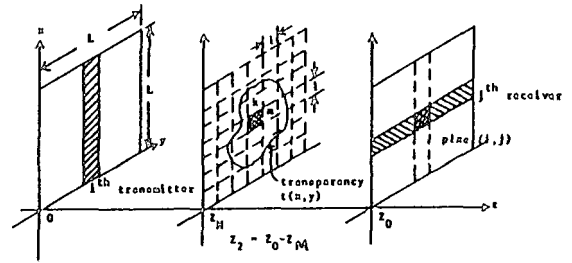


그림 3. 시스템의 수학적 모델링

III-2. 시스템의 수학적 모델링 및 복원

앞의 simulation 과정을 이용하면 영상의 습득이 가능해진다. 시스템의 degradation을 제거하기 위한 수학적 모델을 구해본다. 그림3을 고려하면서 전송 전달함수를 $H_z(f_x, f_y)$ 라 하자. $x-y$ 평면상에서의 등가 전달함수를 $h_z(x, y)$ 라고 하면, i 번째 송신기와 j 번째 수신기에 의해 얻어지는 영상 $I(i, j)$ 는 다음과 같은 식으로 표현이 된다.

$$I(i, j) = \iint_{\Sigma_i} [I(p_i \otimes h_{z_M}(x, y)) \cdot t(x, y) \{ \otimes h_{z_0}(x, y) \}] d\Sigma_j \quad (1)$$

여기서, p_i 는 전송 field의 크기이며, $t(x, y)$ 는 transparency 물체의 함수이고, \otimes 는 convolution을 나타낸다.

이식을 살펴보면 spatial degradation은 diffraction과 transducer의 위치에 따라 발생하는 것을 알 수 있다. 그러므로 우리가 transparency 함수 $t(x, y)$ 의 특성을 알게되면 $I(i, j)$ 의 계산이 가능하게 된다.

물체를 나타내는 transparency 함수는 그림3을 살펴보면 정사각형의 위치함수와 attenuation 계수들의 조합으로 구성된 것을 알 수가 있다. 정사각형 위치함수는 정사각형의 위치를 k 와 m 번째라 하면 $\text{rect}_L(x-kl)$ 과 $\text{rect}_L(y-ml)$ 의 곱으로 구해진다. 이제, attenuation 계수를 A_{km} 으로 정의하면, transparency 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$t(x, y) = \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N A_{km} \cdot \text{rect}_L(x-kl) \cdot \text{rect}_L(y-ml) \quad (2)$$

(2)식을 (1)식에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 I(i, j) &= \iint_{\Sigma} \left[| (p_i \otimes h_{z_m}(x, y)) \cdot \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N A_{km} \cdot \right. \\
 &\quad \left. \text{rect}_i(x-kl) \cdot \text{rect}_i(y-ml) \otimes h_{z_s}(x, y) \right] d\Sigma_j \\
 &= \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N A_{km} \iint_{\Sigma} \left[| (p_i \otimes h_{z_m}(x, y)) \cdot \text{rect}_i(x-kl) \right. \\
 &\quad \left. \cdot \text{rect}_i(y-ml) \otimes h_{z_s}(x, y) \right] d\Sigma_j \quad (3)
 \end{aligned}$$

M(i, j, k, m)을 다음과 같이 정의하면,

$$\begin{aligned}
 M(i, j, k, m) &= \iint_{\Sigma} \left[| (p_i \otimes h_{z_m}(x, y)) \cdot \text{rect}_i(x-kl) \right. \\
 &\quad \left. \cdot \text{rect}_i(y-ml) \otimes h_{z_s}(x, y) \right] d\Sigma_j
 \end{aligned}$$

(3)식은 다음과 같이 된다.

$$I(i, j) = \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N A_{km} \cdot M(i, j, k, m) \quad (4)$$

이식을 보면, i번째 송신기의 위치와 k번째 transparency가 y축에 고정되어 있고, j번째 수신기와 m번째 transparency가 x축을 따라 변화하면, m=j와 i=k인 경우에 가장 큰 attenuation이 발생하게 된다. 그러므로 diffraction에 의한 attenuation은 m=j와 i=k인 화소의 위치차이 값의 크기에 따라 같은값을 갖게된다. 그러므로 이와같은 값을 매트릭스의 형태로 표시하여 $M_{m,j}$ 라하면 이 매트릭스의 요소값은 위치에 관계되는 (m-j)에 따라 같은 값을 갖게되므로 Toeplitz 매트릭스가 된다. 같은 방법으로 i번째 송신기와 k번째 transparency를 x축을 따라 변화시키게 되면 block매트릭스 IM 을 얻게 되는데 이것은 $M_{m,j}$ 를 요소로 하게된다. 그러므로 IM 자체도 위치(i-k)의 함수가 된다. 이런 형태를 이중구조를 갖는 Toeplitz(Toeplitz로 구성된 block Toeplitz) 매트릭스라 부른다.

이제, 우리가 (4)식을 벡터를 사용하여 표시하면

$$\underline{l} = IM \cdot \underline{a}$$

가 된다. 여기서 \underline{l} 는 측정된 영상 column벡터로 $N^2 \times 1$ 의 요소를 갖는다. \underline{a} 는 $N^2 \times 1$ 의 요소를 갖는 복원된 영상 column 벡터이며, IM 은 $N^2 \times N^2$ 의 요소를 갖는 이중구조 Toeplitz 매트릭스이다.

송신기와 수신기가 각각 50개씩의 요소를 갖는다

면 IM 은 2500×2500 크기의 매트릭스가 되므로 효율적인 역을 구하는 알고리즘을 구해야만 한다. 이중구조 Toeplitz 매트릭스의 효율적인 inversion을 위하여 Wax와 Kailath⁽⁹⁾가 persymmetry 특성을 사용한 recursive 알고리즘을 제안하였으므로 이를 사용하여 $O(N^6)$ 의 operation을 $O(N^4)$ 으로 가능하도록 하였다.

IV. Simulation 결과

앞에서 설명한 순서에 따라 12MHz에서 동작하는 전송형 초음파 영상 시스템의 Simulation을 수행하였다. 그림4와 5는 송신기와 수신기가 각각 $l=2\text{mm}$ 의 폭을 갖고 50개의 array로 구성된 경우의 영상을 보여준다. 그림 4는 영상의 중심에 위치한 한 화소 크기의 물체를 보여주며, 그림 5는 한 화소의 간격을 둔 4점의 영상을 나타낸다. 이 그림들에서 물체근처에 발생한 diffraction 현상을 볼수가 있다. 그림 6과 7은 시스템의 모델링에 따른 그림4와 5의 inversion의 결과를 각각 나타내고 있다. 이 그림을 통하여 diffraction 현상이 모델링에 의해 제거된 것을 알수가 있다.

그림 4. 한 화소 크기의 물체

그림 5. 4점으로 구성된 물체

그림 6. 그림4의 복원

그림 7. 그림5의 복원

V. 결 론

본 논문에서는 crossed-array로 구성된 전송형 초음파 영상의 이론적 모델링방법을 제시하였다. 수학적 방법으로 시스템의 전달함수를 구하여 degradation에 대한 물리적인 특성을 알수가 있었으며, 또한 전달함수가 이중구조 Toeplitz 매트릭스가 됨을 알수 있었다. 복원을 위하여 효율적인 inversion을 채택하여 제시한 모델이 diffraction 효과를 제거하는 것을 보였다.

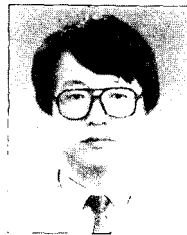
차후의 연구로는 하드웨어의 구성에 따른 영상에 대한 실제적인 적용과 본 논문에서 제시하지 않은 noise 모델링 등이 고려되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. P.S.Green et al., "A New High Performance Ultrasonic Camera," Acoustical Holography, Vol. 5, pp493-503, Plenum Press, 1973.
2. P.Alais, "Real-Time Acoustical Imaging with 256x256 Matrix of Electrostatic Transducers,"

- Acoustical Holography, Vol.5, pp671-684, Plenum Press, 1973.
3. G.Curtis and A.Joinson, "POLYSCAN-a Rapid, Ultrasonic Through Transmission C-Scanning System," Ultrasonic International, pp156-181, IPC, 1975.
4. M.Bernard, "Apport du Traitement du Signal a la Modelisation d'un Systeme d'Imagerie Ultrasonore," Traitement du Signal, Vol. 2, No. 1, pp3-9,1985.
5. H.Schomberg et al., "Lateral Inverse Filtering of Ultrasonic B-Scan Images," Ultrasonic Imaging, Vol.5, pp38-54. 1983.
6. E.Hundt and E.Trantenberg, "Digital Processing of Ultrasonic Data by Deconvolution," IEEE Trans. on SU, Vol.SU-27, pp249-252, 1980.
7. Y.Kwon et al., "Improvement and Restoration of a Transmission Ultrasonic Imaging system," First Image Symposium GRETSI-CESTA, pp. 367-372, 1984.
8. J.Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill, 1968.
9. M.Wax and T.Kailath, "Efficient Inversion of Toeplitz-block Toeplitz Matrix," IEEE Trans. on ASSP, Vol.ASSP-31, pp1218-1221, 1983.

△권 영 빈



1955년 10월 24일생
 1978년 2월 아주대학교전자공학과졸업(공학사)
 1981년 2월 한국과학기술원 전기및 전자공학과 졸업(공학석사)
 1986년 1월 프랑스 파리ENST 졸업(공학박사)
 1981년 3월~1982년 7월 아주대학교 조교

1986년 3월~현재 중앙대학교 전자계산학과 조교수