

Sampled Delay Focusing (SDF)을 이용한 디지털 빔포밍 방법에 대한 성능 평가

이용호 안영복

건국대학교 공과대학 전자공학과

Performance evaluation of Digital Beamforming Method Using Sampled - Delay Focusing(SDF)

Y.H.Lee, Y.B.Ahn

Department of electronics, Konkuk University

ABSTRACT

In a conventional digital beamformer received signal were sampled at least Nyquist rate of its maximum frequency. But it is wide band signal and its coherent sum must be obtained, the sampling clock of about $8f_0$ and $16f_0$ is necessary for high quality images. This paper described how image qualities are varied according to sampling clock. Mainly, we compared the SDF(Sampled Delay Focusing) that had maximum precision of $8f_0$ with $16f_0$ sampling system and analyze its characteristics

서론

최근 VLSI 기술의 급속한 발전으로 인해 보다 정밀하고 빠른 디바이스의 이용이 가능해짐에 따라, 실시간 초음파 영상 시스템도 이전의 아날로그 방식에서 고성능의 디지털 시스템으로 전환되는 추세이다.

디지털 초음파 영상 시스템은 해상도를 높이기 위해서 빔포밍 기법을 사용하고 있으며, 디지털 빔포밍은 아날로그 빔포밍 방법에 비해 보다 정밀하고, 안정적이며 다양한 기능을 제공 할 수 있다. 이러한 장점을 가진 디지털 빔포머의 구현은 수신되는 신호를 빠르게 샘플링 하여 채널마다 각각의 시간지연을 고려하여 더함으로써 가능해진다. 그러나 디지털 빔포머는 좋은 성능의 빔 패턴과 이미지를 산출하기 위해서는 Nyquist rate 보다 훨씬 높은 $8f_0$ 이상 $16f_0$ 정도의 샘플링 비율을 요구한다. 본 논문에서는 샘플링 비율에 따른 해상도 변화를 실험적으로 고찰하여 적절한 비율을 제시한다. 특히 메모리의 용량을 줄일 수 있고 메모리 어드레스부도 제거 할 수 있지만 최대 $8f_0$ 정도의 성능을 갖는 SDF(Sampled Delay Focusing)의 실험 결과도 함께 분석한다.

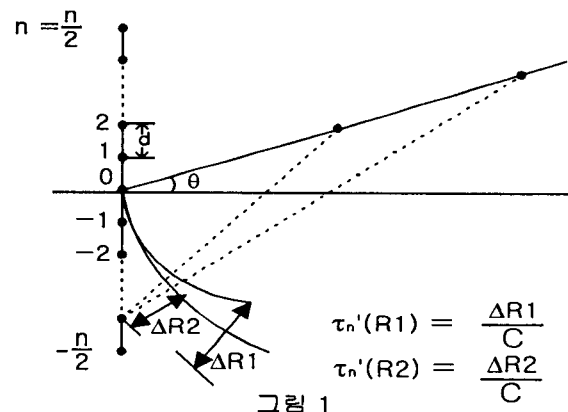
디지털 빔포밍

일반적으로 초음파 영상 시스템에서의 디지털 빔포밍 과정은 트랜스듀서 각 채널에 수신된 반사 신호를 디지털화 한 뒤, 집속화를 위한 시간지연을 고려하여 데이터를 합성하는 과정이다. 여기서 시간지연 된 신호 $f(t)$ 는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$f(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} X_n(t-\tau_n),$$

$$\tau_n = \tau_n(R) = \frac{R}{c} \left[\left\{ 1 + \left(\frac{nd}{R} \right)^2 - 2 \left(\frac{nd}{R} \right) \sin \theta \right\}^{1/2} - 1 \right] + t_0 \quad (1)$$

위에서 X_n 은 n 번째 트랜스듀서 소자에 수신 된 신호이고, 전체 어레이 소자의 개수는 $N+1$ 이다. 아래의 그림 (1)에서 c 는 초음파의 속도이며, d 는 소자와 소자사이의 간격, θ 는 스티어링 각도, t_0 는 시간 지연 상수가 음의 값이 되지 않도록 하기 위한 시상수이다.



R 은 빔이 집속 되는 점의 깊이이고, $\tau_n = \tau_n(R)$ 은 깊이 R 에서 n 번째 트랜스듀서 소자의 스티어링 각

을 포함한 시간지연 상수이다. 따라서 그림(1)에서와 같이 시간지연 상수는 각 채널에 따라 그리고 거리에 따라 바뀌게 된다.

디지털 빖포머에서 시간지연은 세밀한 아날로그 값이 아닌 샘플링 간격의 정수배로 적용 되므로 세밀한 지연시간을 위해서는 샘플링 간격이 매우 좁아야 한다. 집속을 위한 시간지연을 갖는 수신신호를 샘플링 한 결과는 다음과 같다.

$$f(kT) = \left[\sum_{n=-N/2}^{N/2} X_n(t - \tau_n) \right] \cdot \delta(t - kT), k \text{는 정수} \quad (2)$$

식(2)에서 T는 샘플링 간격이고, 다음과 같이 바뀔 수 있다.

$$f(kT) = \sum_{n=N/2}^{N/2} X_n(t) \cdot \delta[t - (kT - \tau_n)] \quad (3)$$

일반적인 개념으로 샘플링 간격은 Nyquist rate 만을 고려하여 최대 주파수의 2 배로 샘플링 하던 된다. 따라서 일정한 밴드를 갖는 펄스인 초음파 신호는 중심주파수의 4 배(4f_c)정도만 샘플링 하면 Nyquist rate 을 만족할 수 있지만 그림 (2)에서와 같은 문제점이 있기 때문에 고해상도의 빖패턴을 얻기는 힘들다.

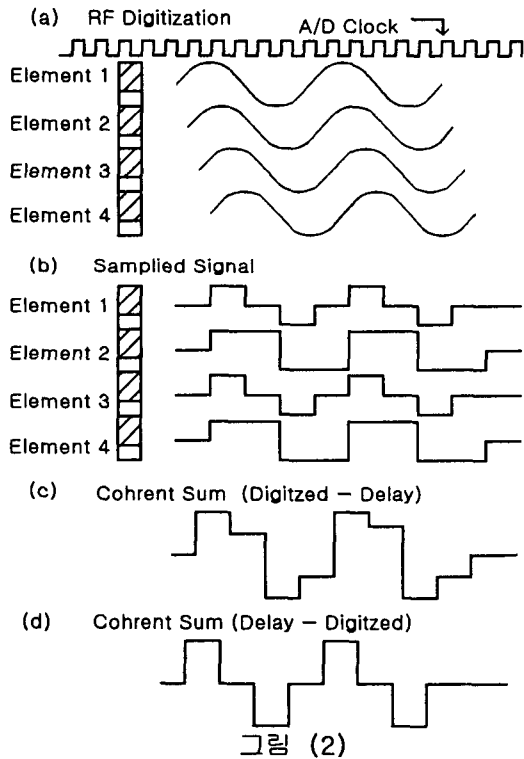


그림 (2)

그림(2)에서 4 개의 각 채널에 수신된 평행파는 한 채널과 다음 채널까지의 시간 지연이 λ/8 만큼 씩 이라고 가정하자. 그림 2-(b)에서와 같이 수신된 신호는 초음파 신호의 캐리어 주파수보다 4 배(4f_c) 빠른 클럭을 가진 A/D 컨버터를 거쳐 디지털화 되

었다. 이 샘플링 된 신호를 적절한 시간지연을 해서 더하면 그림 2-(c)와 같은 결과를 얻게 된다. 그림 2-(d)는 이상적인 아날로그 빖포머로 신호들을 적절한 시간 지연을 고려해서 합성한 다음 4f_c로 샘플링 한 결과이다. 이와 비교하여 볼 때, 디지털화 한 후 합성한 신호는 좋지 못한 효과를 보인다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 단순히 Nyquist rate 정도로 샘플링 하여 시간지연 만을 고려한 데이터 합성으로는 적은 사이드로브를 갖는 고해상도의 영상을 얻기 힘들다는 것을 보여준다.

Interpolation Beamformer

위와 같은 문제에 대한 해결책으로는 샘플링 비율을 더욱 높여 정확한 지연시간에서의 데이터를 산출해 내는 것이다. 그러나 이것은 매우 높은 클럭을 갖는 A/D 변환기와 고용량의 메모리를 필요로 하기 때문에 하드웨어의 부담이 크다. 그러므로 A/D 변환기의 클럭이 Nyquist rate 정도의 샘플링 비율을 가지면서 빖포밍의 정확도를 높이는 방법에 대한 많은 연구와 고찰이 필요하다.

그 한가지 예로 Nyquist rate 정도로 A/D 변환된 초음파 신호를 내부적으로 보간을 시키는 방법이다.

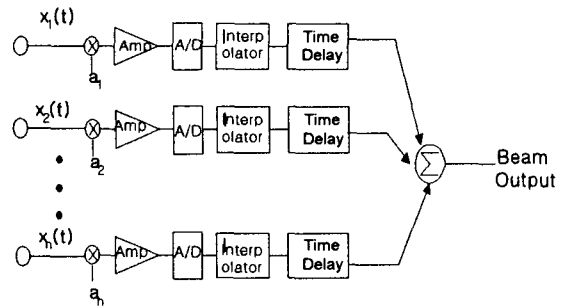


그림 (3)

위의 그림(3)에서 보이는 것과 같이 수신된 신호 X_n(t)를 각 채널마다 Nyquist rate 정도의 클럭 주파수로 A/D 변환 한 다음 샘플링 된 데이터를 보간 시킨 후 적절한 시간지연을 고려하여 더하는 방식이다. 이러한 방법은 A/D 클럭을 낮출 수 있고, 원하는 해상도의 빖을 얻어 낼 수 있는 장점이 있다.

SDF(Sampled Delay Focusing)

SDF는 샘플링 시점을 각 채널마다 시간지연 패턴에 맞도록 정확하게 조절 하여, 적은 메모리와 저속의 A/D 변환기로도 정밀한 빖포밍 과정을 수행 할 수 있다.

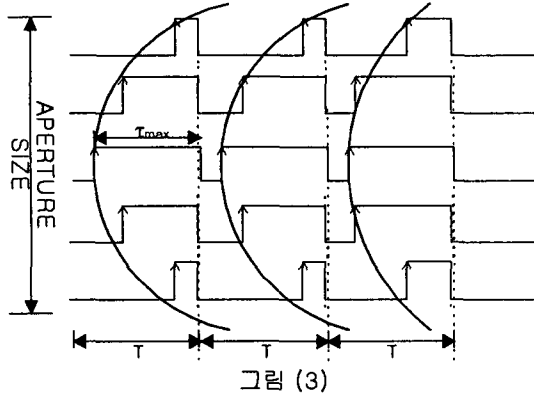


그림 (3)

그림(3)에서 보는 것과 같이 샘플링 간격을 일정하게 유지하면서 A/D에 인가되는 클럭을 조절하여 원하는 시간의 신호를 검출 할 수 있게 된다. 그러나 이러한 방식은 하나의 제한이 따르는데, 그림(3)에서 나타나 있듯 최대 지연 시간 τ_{max} 는 초음파 신호의 샘플링 간격 보다 클 수 없다는 것이다.

$$f_s \cdot \tau_{max} < 1$$

$$f_s = 1/T, \tau_{max} = \max[\tau_{max}] \quad (4)$$

이를 해결하기 위해서는 A/D 변환기 다음 단계 FIFO(First Input First Out)를 추가 해야만 한다. 또한 SDF는 클럭을 정확히 원하는 시간대에 발생시키기 어렵고, 클럭 펄스 발생시 클럭의 폭을 정해주는 과정에서의 양자화 에러를 피할 수 없기 때문에 SDF의 성능은 최대 $8f_0$ 이상의 샘플링 효과를 얻기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 $8f_0$ 의 양자화 오차를 가정하였다.

결과

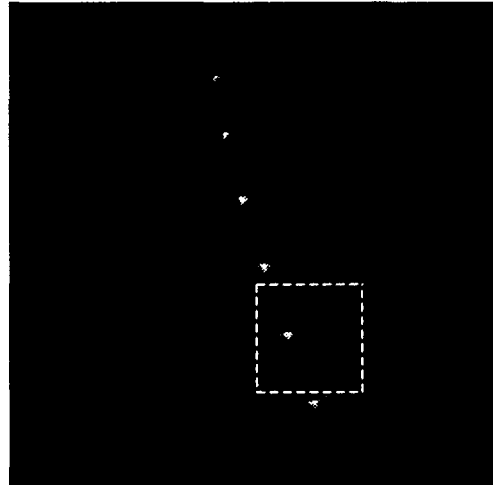
실험결과에 사용된 대상체는 6개의 와이어로 구성된 팬텀이고 사양은 다음 표 (1)과 같다.

초음파의 속도	1.48 mm/μsec
중심주파수	3.5 MHz
소자간의 간격	0.22 mm
time offset	29.448 μsec
샘플링 비율	13.8889 MHz
채널 수	128 개

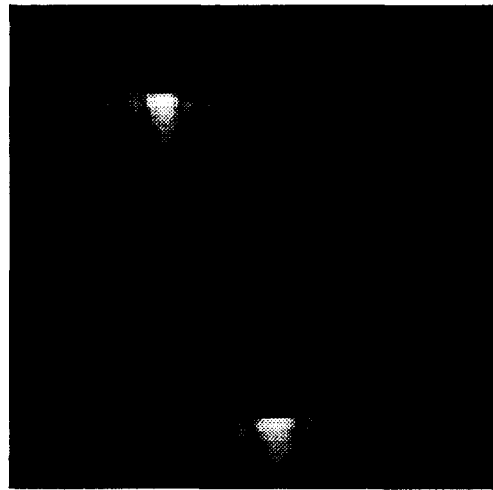
표 (1)

팬텀의 모양은 그림 (5)와 같고 그림(6)부터 그림(10)까지의 결과는 세밀한 관찰을 위하여 부분 확대한 영상이다.

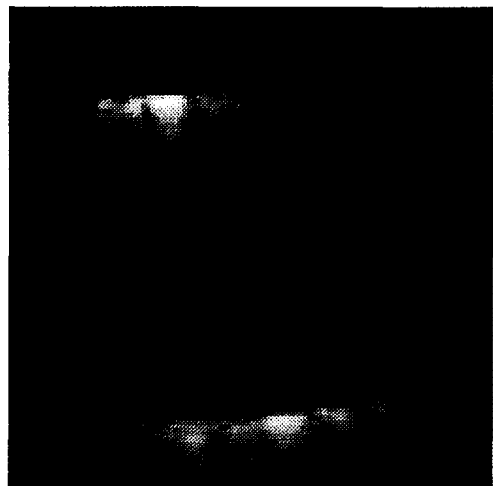
그림 (5) 팬텀의 전체 GS(Gold-Standard) 영상



그림(5) 팬텀의 전체 GS (Gold-Standard)영상



(6) GS의 일부를 확대한 영상

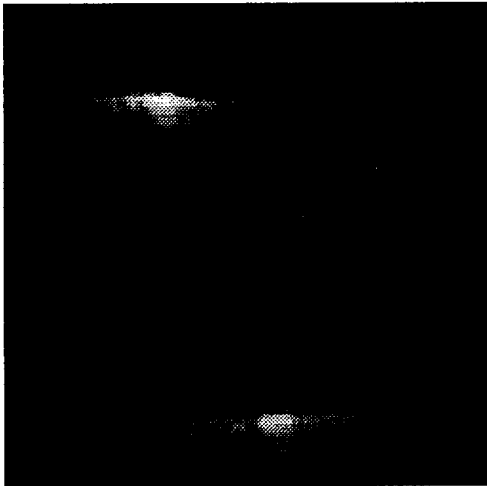


그림(7) 4f₀ 샘플링으로 얻어서 보간을 하지 않고 얻은 영상

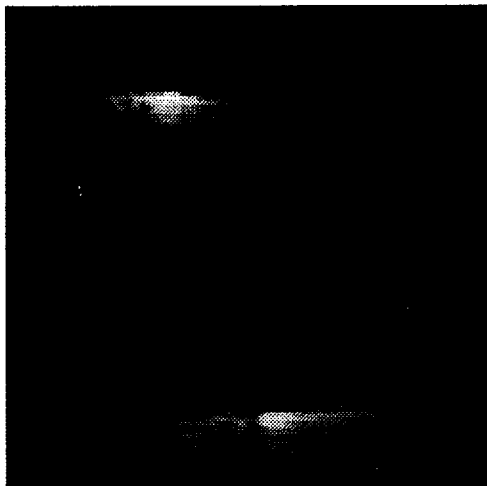
그림(8) SDF (8f₀ 샘플링 효과)



그림(8) SDF(8f_s 샘플링 효과)



그림(9) 4f_s A/D 변환해서 4 배로 보간한 영상



그림(9) 4f_s A/D 변환해서 8 배로 보간한 영상

고, 그림(8)은 SDF 빔포밍한 결과 이며, 그림(9) 부터 그림(10)까지는 4f_s로 샘플링 한 후 순서대로 4 배, 8 배 보간을 하여 얻은 결과이다

결론

앞에서 고찰 한 바와 같이 Nyquist rate 정도의 샘플링을 한 결과는 사이드로브가 매우 큰 좋지 못한 결과를 나타내었다. SDF 는 보간을 하지않은 방법에 비해 해상도가 크게 개선 되었다. 그리고 SDF 와 4 배 보간 방법의 해상도 차이는 그리 크지 않으나, 영상을 확대하면 그차이를 알 수 있다. 최대 8f_s 의 샘플링 성능을 갖는 SDF 의 경우 GS 영상에 비교하면 충분한 해상도를 가진다고 볼 수 없다. 그러나 Nyquist rate 에 4 배(16f_s), 8 배(32f_s)의 보간을 사용한 결과는 GS 와 유사한 해상도의 결과를 나타낸 것으로 보아 적어도 중심주파수의 16 배 이상으로 데이터를 샘플링 하여야 비교적 우수한 해상도를 갖는 영상을 얻을 수 있다.

참고문헌

1. J. H. Kim, T. K. Song and S. B. Park, "Pipelined Sampled-Delay Focusing In Ultrasonic Image System", Ultrasonic Imaging 9, 75-91, 1987
2. M. O'Donnell, W. E. Engeler, J. T. Pedicone, A. M. Itani, S. E. Noujaim, R. J. Dunki-Jacobs, "Real-Time Phase Array Imaging Using Digital Beam Focusing and Autonomous Channel Control", Ultrasonics Symposium IEEE, 1449-1503, 1990
3. Bernard D. Stenberg, "Digital Beamforming in Ultrasound", IEEE Tran. On UFFC, Vol 39, No 6, 716-721, 1992
4. Ronald A. Mucci "Comparison of Efficient Beamforming Algorithms" IEEE Tran. On ASSP, vol. ASSP.-32, NO.3, 548-558, 1984