

디지털 빔포밍을 위한 다차 샘플링 방법의 실험적 고찰

나병윤·정목근*·권성재**·안영복

건국대학교 전자공학과, *대진대학교 전자공학과, **대진대학교 전자공학과
(1997년 9월 23일 접수, 1998년 4월 2일 채택)

Experimental Consideration of Multi-order Sampling for Digital Beamforming

B.Y. Na, M.K. Jeong*, S.J. Kwon* and Y.B. Ahn

Department of Electronic Engineering, Konkuk University

*Department of Electronic Engineering, Daejin University

**Department of Radio Engineering, Daejin University

(Received September 23, 1997, Accepted April 2, 1998)

요약: 본 논문에서는 RF 초음파 신호의 포락선 검출을 위하여 제안된 다차 샘플링 방법의 성능을 실험데이터를 이용하여 Quadrature 샘플링 및 2차 샘플링 방법과 비교하였다. Quadrature 샘플링의 결과 영상과 비교해볼 때 2차 샘플링의 결과 영상은 많은 오차를 보이고 있다. 그러나 다차 샘플링 결과, 특히 5차 샘플링 결과는 매우 우수한 포락선 검출 결과를 보여주고 있다. 이러한 다차 샘플링 방법을 사용하면 보다 경제적이고 우수한 성능의 디지털 빔포밍 시스템의 구현이 가능하다.

Abstract: In this paper, several bandwidth sampling methods were compared using experimental result in which contains "multi-order sampling", which was proposed for envelope detections in RF ultrasonic signals. A "Quadrature sampling method" and "Second-order sampling method" were compared with it. The resultant image of second-order sampling method introduces too much error as compared with the result of quadrature sampling. But Multi-order sampling method, specially 5-th sampling method showed quite good envelope detection property. This means that more economical and quite good performance digital beamforming system can be built by adopting this multi-order sampling method.

Key words: Bandwidth sampling, Multi-order sampling, Digital beamforming

서론

초음파는 인체내를 통과하면서 매질의 임피던스 차에 의해 반사를 하므로 반사파들을 사용하여 체내의 정보를 알아낼 수 있다. 초음파를 이용하는 영상진단장치에서 가장 일반적으로 사용되는 영상은 인체의 횡단면을 2차원으로 표시해주는 B-모드 영상이다. 이러한 영상을 얻기 위해서 트랜스듀서(transducer)를 통하여 수신된 반사파는 빔포밍(beamforming)의 과정을 거쳐 영상으로 재구성된다. 출력되는 2차원 영상의 해상도 향상을 위해 빔포밍 과정에서 각 채널의 수신 신호가 한 점에서 상호 보

강될 수 있도록 시간지연을 주어 위상을 맞춰주는 집속화(focusing)를 하게된다. 몇년전까지는 집속화의 과정이 아날로그 시간지연 소자를 이용하여 수행되어 왔었다. 그러나 최근에는 수신된 반사신호를 샘플링하여 메모리에 저장한 뒤 저장된 데이터를 메모리로부터 읽어들이는 펄스의 시간차이를 지연 시간으로 사용하는 디지털 빔포밍이 주로 사용된다.

디지털 데이터는 처리가 쉽기 때문에 아날로그 형태로 수신된 반사신호는 A/D 변환기를 통하여 디지털로 바꾸어 사용한다. 그런데 초음파와 같은 펄스 신호를 샘플링하기 위해서는 지연 시간의 양자화 오차를 줄이기 위해 고속의 A/D변환기가 요구된다. 송신 신호 주파수의 16배로 샘플링하는 것이 일반적이며, 한 예로 10MHz의 중심주파수를 갖는 초음파 펄스를 사용하는 경우, 중심주파수의 16배로 샘플링하면 160MHz의 샘플링 속도

를 갖는 A/D변환기가 필요하게된다. 또한 높은 주파수대역의 펄스일수록 샘플링되는 데이터의 양이 많아지므로 메모리의 크기도 증가하게된다. 송신 주파수의 4배로 샘플링한 후에 interpolation으로 양자화 오차를 줄일 수 있지만, 이 경우에도 고속의 A/D 변환기와 복잡한 하드웨어 및 대용량의 메모리가 필요하다. 따라서 A/D 변환기의 속도를 낮추고 메모리의 용량을 줄이기 위해서 대역폭 샘플링이 사용된다[12].

대역폭 샘플링에는 quadrature 샘플링, analytic 샘플링, 그리고 2차(second-order) 샘플링등이 있다. 이 가운데 quadrature 샘플링의 성능이 가장 우수하지만, I(in-phase), Q(quad.-phase) 신호를 얻기 위하여 아날로그 형태의 정현파가 곱해져야 하므로 시스템이 복잡해진다는 단점이 있다. Analytic 샘플링 방법은 Hilbet 변환에 의해 수신 신호의 위상을 90° 이동시킨 후에 샘플링한다. 이 방법은 수신 신호가 광대역 신호일때는 Hilbet 변환에 의한 오차를 피하기 어렵다. 또한 2차 샘플링 방법은 단순히 2개의 스위치를 이용하여 약간의 시간차이를 두고 신호를 샘플링하므로 하드웨어가 디지털 형태이며, 간단하다는 장점이 있으나, quadrature에 비해 오차가 매우 크다는 단점이 있다. 이러한 2차 샘플링 방법의 오차를 크게 개선하면서 시스템의 간결성을 유지하는 방법으로 다차(multi-order) 샘플링방법이 제안된 바 있으며, 그 이론적 배경과 SNR의 향상에 대한 모의 실험 결과는 이미 발표되었다[11].

본 논문의 목적은 실험 데이터를 이용해서 다차 샘플링 방법의 성능을 기존의 2차 샘플링 방법과 비교하는데 있다. 결과를 분석하기 위하여 가장 성능이 우수한 것으로 알려진 quadrature 샘플링 방법으로 샘플링되어 재구성한 영상을 기준영상으로 잡았다. 그리고 다차 샘플링의 구체적인 예로 3차와 5차 샘플링 방법으로 신호를 샘플링하여 영상을 재구성하고 기존의 2차 샘플링 방법으로 재구성한 영상과 비교하였다.

대역폭 샘플링

일반적으로 아날로그 신호를 샘플링하여 원신호로 복원하기 위해서는 f_0 가 중심주파수일 때 적어도 $2f_0$ 이상의 샘플링이 필요하다. 그러나 초음파는 수신된 RF신호를 샘플링하여 집속할 때 양자화 오차를 줄이기 위해서는 $8f_0$, 보통 $16f_0$ 의 샘플링이 필요하다. 이것은 $f_0=10MHz$ 일 때 $160MHz$ 의 샘플링이 필요하게 되므로 시스템을 구성하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위한 한가지 방법으로 신호를 $4f_0$ 로 샘플링한 후에 4배의 interpolation으로 $16f_0$ 의 샘플링 효과를 낼 수 있지만, 이 역시 고속의 신호처리 시스템과 대용량의 메모리가 필요하다. 그런데, 이때 사용하는 RF 신호는 일정 대역의 신호이므로, 대역폭 샘플링을 하면 샘플링 주파수를 크게 낮출 수 있다. 알려진 대역폭 샘플링 방법에는 analytic 샘플링, quadrature 샘플링, 2차 샘플링, 그리고 [11]에서 저자가 제시한 바 있는 다차 샘플링 방법 등이 있다.

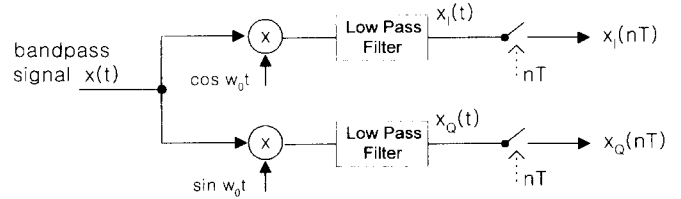


그림 1. Quadrature 샘플링의 구성도
Fig. 1. A configuration of quadrature sampling

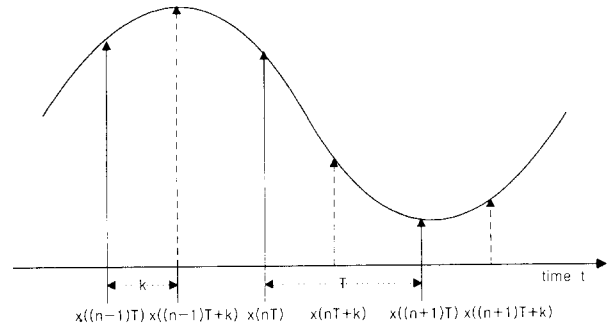


그림 2. 정현파의 2차 샘플링
Fig. 2. The second order sampling of sine wave

1. Quadrature 샘플링

대역폭 신호 $x(t)$ 는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$x(t) = x_I(t)\cos w_0t - x_Q(t)\sin w_0t \tag{1}$$

위식에서 $x_I(t)$ 는 신호 $x(t)$ 의 in-phase 성분, $x_Q(t)$ 는 quadrature-phase 성분을 의미한다. 만약 신호가 대역폭 W 를 가지면, $x_I(t)$ 와 $x_Q(t)$ 는 $W/2$ 의 대역폭을 갖는 기저 대역 신호가 된다. 이러한 RF신호를 90° 위상차의 두정현파를 반송파로 하여 I, Q 성분으로 나눈 후에 샘플링하는 방법을 quadrature 샘플링이라 하며, 그림 1과 같다. 그림에서 정현파를 곱함은 주파수영역에서 정현파 선 스펙트럼과 RF신호와의 중첩이므로 입력신호는 기저대역으로 변환되고 저역통과 필터를 통과하며 고주파가 제거된 순수한 저주파 신호를 상대적으로 낮은 속도로 샘플링할 수 있다. Quadrature 샘플링 방법은 우수한 검파 성능을 나타내는 편이지만, 정현파를 곱하는 과정이 아날로그로 처리되어야 하며, 이때 두 채널로 나눈 I, Q 성분의 불균형문제가 발생할 수 있다. 또한 2채널 처리 방법이므로 ADC도 2개를 필요로 하게 된다. 요컨대, quadrature 샘플링 방법의 단점은 이어 설명할 2차 샘플링 방법과 비교했을 때, 구현이 복잡하며, 더 고급사양이 필요하다는데 있다.

2. 2차 샘플링의 오차

일반적인 2차 샘플링 방법은 그림 2에서와 같이 단일 채널에서 k 시간 간격으로 두 개의 샘플을 취하게 되며, 협대역 신호를 샘플링하여 복조하는데 유용하게 쓰일 수 있다. 그림 3은 2

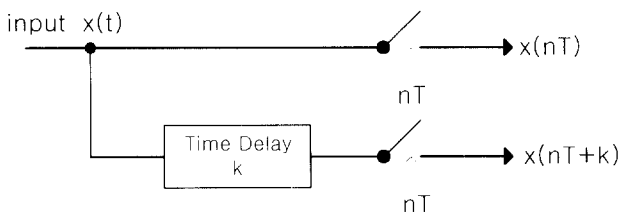


그림 3. 2차 샘플링의 구성도
Fig. 3. A configuration of the second order sampling

차 샘플링 방법에 대한 구성도이다.

다음은 2차 샘플링의 오차에 대한 수학적 전개이다[11]. 수신된 RF신호를 $x(t)$ 라 하면,

$$x(t) = g(t) \cos(\omega_0 t + \theta) \quad (2)$$

이고 여기서 $g(t)$ 는 가우시안 포락선, $\omega_0 = 2\pi f_0$ 이며 f_0 는 중심주파수이다. 그림 2에서 Q 성분을 구하기 위해 k 를 $1/4f_0$ 로 하여 샘플링 하면 샘플의 짝은 아래와 같다.

$$x(nT) = g(nT) \cos(\omega_0 nT + \theta) \quad (3)$$

$$x(nT + k) = -g(nT + k) \sin(\omega_0 nT + \theta) \quad (4)$$

수신신호가 협대역 신호라면

$$x_i(nT) = x(nT) \quad \text{In-phase 요소} \quad (5a)$$

$$x_q(nT) \cong x(nT + k) \quad \text{Quadrature-phase 요소} \quad (5b)$$

이고 포락선 $E(nT)$ 는 $\sqrt{I^2 + Q^2}$ 이므로

$$E(nT) \cong \sqrt{x^2(nT) + x^2(nT + k)} \quad (6)$$

그런데 식 (6)은 Q성분을 식 (5b)로 가정하고 있다. 따라서 2차 샘플링에서 오차를 줄이는 것은 식 (5b)의 양변의 차를 줄이는 것이다. 오차분석의 전개를 위하여 준식을 Taylor 급수 전개하여 2번째 항까지의 급수로 나타내면,

$$x(nT+k) = -[g(nT) + kg'(nT)] \sin(\omega_0 nT + \theta) \quad (7)$$

이다. 여기서 $kg'(nT)$ 가 2차 샘플링에서 구한 Q성분의 오차이다. 이 오차는 $t=nT$ 순간의 포락선의 변화의 정도에 따라 결정된다. 즉, 광대역 신호의 경우처럼 신호의 포락선이 순수한 중심주파수 정현파 포락선의 경우와 차이가 크면 오차가 커진다. 오차를 더 자세히 분석하기 위해서 식 (7)을 식 (6)에 대입하여 정리하면

$$E(nT) \cong \sqrt{g^2(nT) + 2g(nT)kg'(nT)\sin^2(\omega_0 nT + \theta) + k^2[g'(nT)]^2 \sin^2(\omega_0 nT + \theta)} \quad (8)$$

이고 $g'(t) = -2(\omega_0/\sigma)^2 tg(t)$ 이므로

$$E(nT) \cong g(nT) \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 f_0^2}{\sigma^2} \left(\frac{\pi^2 f_0}{\sigma^2} nT - 1 \right) \sin^2(\omega_0 nT + \theta)} \quad (9)$$

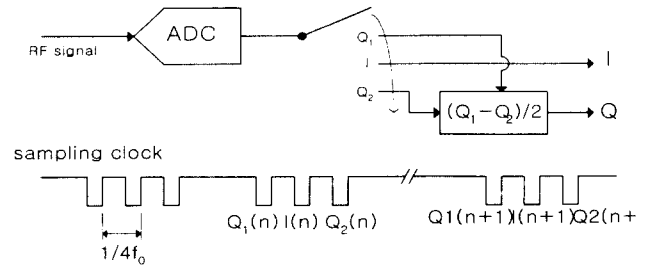


그림 4. 3차 샘플링 방법의 구성도와 샘플링 클락
Fig. 4. A configuration of the third order sampling method and sampling clock

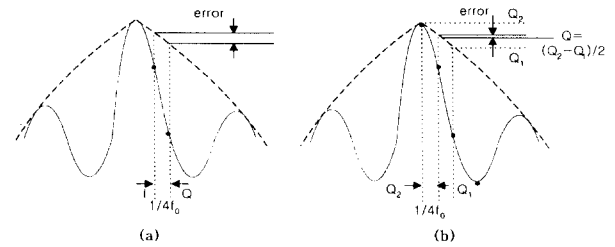


그림 5. (a) 2차, (b) 3차 샘플링 방법의 quadrature 성분 오차
Fig. 5. Quadrature component error of (a) the 2nd and (b) the 3rd order sampling method

이다. 위식에서 루트내의 2번째 항이 오차를 나타내며, 이는 sine 성분을 포함하고 있으므로 주기적인 파형을 갖는 에러로 나타난다. 그러므로 2차 샘플링에 의한 검파는 이상적인 검파신호에 정현파의 오차성분이 더해져 나타나게 된다. 이 sine파 오차는 광대역 신호의 경우 상당히 큰 오차를 발생시킨다.

3. 다차 샘플링

다차 샘플링 방법은 2차 샘플링의 일반화라고 볼 수 있으며, Q성분에서 나타나는 오차를 줄이기 위한 방법이다. 그림 4는 3차 샘플링인 경우의 구성도를 나타내고 있다. 즉, 그림에서처럼 단순히 스위칭 동작에 의하여 I성분의 $1/4f_0$ 전후에서 두 개의 샘플을 취하여, 두 샘플의 평균 값을 Q성분으로 보는 것이다. 이러한 Q성분을 식으로 나타내면 식 (10)과 같다[11].

$$x_q(nT) \cong \frac{1}{2} [x(nT+k) - x(nT-k)] \quad (10)$$

위식에서 $k=1/4f_0$ 이다.

그림 5는 3차 샘플링 방법에서 오차가 감소되는 이유를 보이고 있다. 그림에서 굵은 점선이 중심 주파수 f_0 인 대역폭 신호의 포락선, 실선이 RF 신호이다. 협대역 신호의 경우, I와 Q 성분을 얻기 위해서는 동일한 포락선 크기에서 $1/4f_0$ 의 시간차이를 두고 샘플링해야 하지만, 광대역 신호의 경우는 그림 5(a)에서처럼 I와 Q 샘플 사이에 포락선상의 큰 차이가 있게 되고 이 차이가 2차 샘플링 방법의 오차를 발생시킨다.

다차 샘플링의 구현은 2차와 마찬가지로 전 디지털화가 쉽고, quadrature, analytic 샘플링 방법에 비하여 훨씬 간단하여 경제적이다. 한편 차수가 증가할수록 Q성분의 오차는 줄어들게 되지만, 차수를 너무 크게 하면 시스템이 복잡해지므로 다차샘플링의 차수는 시스템의 간결성을 위해서는 샘플링 성능을 비교하여 되도록 작게 잡는 것이 좋다. 다음 식들은 각각 4차와 5차 샘플링으로 얻게 되는 Q성분을 나타내고 있다.

$$(4차) \quad x_q(nT) = \frac{1}{8} \{x(nT+3k) + 6x(nT+k) - 3x(nT-k)\} \quad (11)$$

$$(5차) \quad x_q(nT) = \frac{1}{16} \{x(nT+3k) + 9x(nT+k) - 9x(nT-k) - x(nT-3k)\} \quad (12)$$

실 험

1. 실험 사양 및 장치

초음파 영상시스템에서 사용하는 RF 초음파 신호는 광대역 펄스이다. 본 실험의 기본적인 사양은 아래의 표 1과 같으며, 실험 장비의 블록도는 그림 6에 나타내었다. 실험에서 어레이 소자간의 간격은 무시했으며, 송신 펄스형태는 가우시안 포락선을 갖는다. 표 1에서 샘플링 속도는 ADC(analog to digital converter)사양이 28MHz 이나, 범집속의 양자화 오차를 줄이기 위해 소프트웨어로 2배의 보간을 수행하였으므로, 실질적으로는 56MHz이다.

실험에 사용한 팬텀의 모양은 그림 7과 같다. 점모양 표적의 지름은 0.12mm이며 팬텀특성은 감쇠비가 0.5dB/cm/MHz, 내부의 음속이 1450m/s(at 23°C)로써, 인체 내부의 특성과 거의 동일하다.

2. 실험 데이터의 구성

본 실험에서는 1번 소자에서 송신한 신호를 1번부터 64번의 소자가 차례로 수신을 하고, 이어 2번 소자의 송신을 1~64번의 소자가 수신하는 식으로 하여 총 64×64=4096가지의 송·수신 신호를 순차적으로 샘플링(28MHz)하여 저장하였다. 채널당 RF 신호는 팬텀의 10cm 정도 깊이까지 수신하였으며, 획득된 데이터의 초기 일부 값은 필터링과 샘플링시 신뢰할 수 없는 값을 가지므로 대략 어레이로부터 4cm 까지의 데이터는 버리고, 그림 7에서 점선으로 표시된 부분과 같이 4~8cm 깊이의 정보만을 이용하였다. 영상의 화질을 높이기 위하여 우선 프로그램

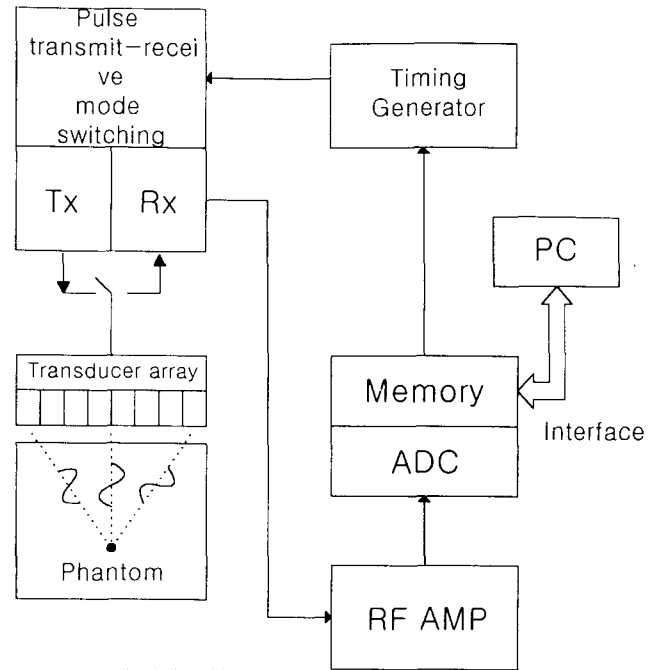


그림 6. 실험 장치의 블록도
Fig. 6. Block diagram of experiment set

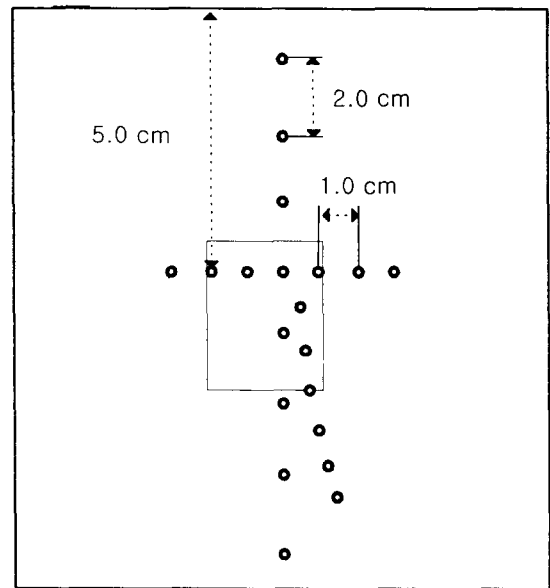


그림 7. 팬텀의 내부모양
Fig. 7. Inner pattern of phantom

상에서 28MHz 샘플링된 축방향 RF 데이터를 56MHz로 보간한

표 1. 실험 사양

Table 1. The setting for experiment

초음파 펄스의 중심 주파수	3.5 MHz	총 array element 길이	90 mm
샘플링 주파수	28 MHz	array element 수	64 개

데이터를 얻었다. 이후의 집속화, 스케닝, 포락선 검출등의 빔포밍과정과 영상의 구성 역시 PC상에서 프로그램으로 처리하였다. 최종적으로 얻어지는 영상은 측면방향으로도 보간하여 256×512 크기를 가진다. 그리고 각 영상은 256 그레이(gray) 레벨로 나타내었다.

결과 및 고찰

1. 비교의 기준

본 장에서는 quadrature 방법, 2차 샘플링 방법, 그리고 다차 샘플링의 경우 3차와 5차로 빔 집속을 하여 획득한 영상들을 비교, 분석하였다. 각 대역폭 샘플링 방법의 비교를 위해서는 기준이 필요한데, 본 실험에서는 quadrature 샘플링 방법으로 재구성한 영상을 비교 기준으로 잡았다. 본 실험에서 quadrature 샘플링 방법이 기준이 될 수 있는 이유는 아래와 같다.

첫째, quadrature 샘플링 역시 광대역신호 일수록 큰 오차를 유발하나, 그 오차는 다른 대역폭 샘플링 방법에 비하여 작은편이며, 본 실험에 사용된 펄스는 대역폭 샘플링을 위한 절대적 가정, $BW \ll f_0$ 를 만족하므로, 신호가 기저대역으로 변환되며 aliasing에 의한 오차는 무시할 수 있다. 본 실험에 사용된 펄스의 -6dB 대역폭은 1MHz 이하이며, 이론적인 완전한 복원을 위한 조건 중 중심 주파수가 $f_0=3.5\text{MHz}$ 로, 프로그램 상에서 보간된 샘플링율 $f_s=56\text{MHz}$ 의 부분 곱의 관계를 만족하므로 신호의 복원에 발생하는 오차는 실질적으로도 매우 작다.

둘째, quadrature 샘플링의 오차 요인중 하나는 정현파 반송파를 곱한 후 저역통과 필터를 통과하며 발생하는 오차인데, 본 실험에선 제로(zero)·폴(pole)을 이용한 실질적인 필터 설계로 구현하지 않고 프로그램 상에서 주파수 영역으로 넘겨 이상적 필터링을 수행하였으므로 이로 인한 오차는 거의 무시할 수 있다.

셋째, 기저대역 변환시 I와 Q의 불균형 문제 역시 프로그램상의 구현이므로 존재하지 않는다. 또한 quadrature 샘플링이 대역폭 샘플링 방법중 가장 널리 쓰이는 방법이며, 대체적으로 성능도 우수하기 때문이다.

2. 결과

그림 8은 quadrature와 2차, 3차, 그리고 5차의 샘플링 방법으로 구한 팬텀의 내부 영상이다. 그림에서 quadrature 샘플링 방법으로 획득한 영상을 기준으로 볼 때, 2차 샘플링 방법으로 합성한 영상은 전반적으로 물결모양의 오차가 발생하였다. 또한 밝은 점들의 모양이 거칠다는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 2차 샘플링 방법은 정확한 포락선 검출이 어렵다는 것을 보여주고 있다. 이에 비하여 3차 및 5차의 샘플링 방법으로 획득한 영상이 기준영상과 비슷한 모양의 점(point)들을 볼 수 있다. 따라서 영상의 전체 모양만을 볼 때, 3차 샘플링만 하더라도 그 결과는 기준 영상과 매우 흡사하다는 것을 알 수 있다.

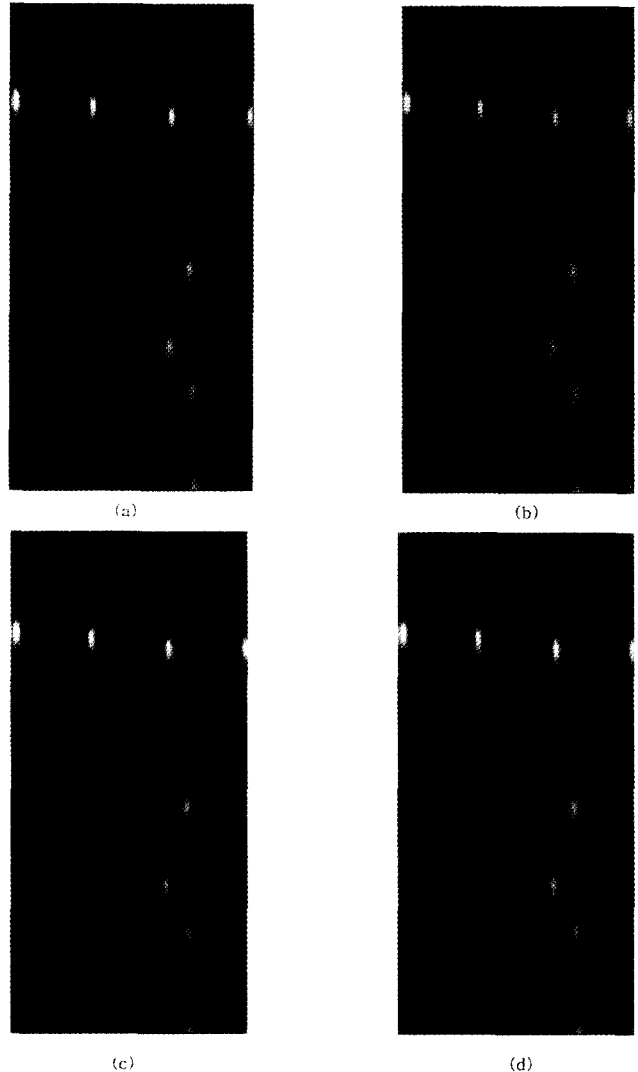


그림 8. (a) Quadrature, (b) 2차, (c) 3차 그리고 (d) 5차 샘플링 방법으로 구한 phantom 영상

Fig. 8. Phantom images made by (a) Quadrature, (b) 2nd order, (c) 3rd order, (d) 5th order sampling method

결과 영상을 보다 세밀하게 관찰하기 위하여 일부분을 확대한 영상을 그림 9에 나타내었다. 그림에서 2차 샘플링 방법으로 얻은 영상을 살펴보면 그림 8에서 나타났었던 물결 모양의 잡음이 영상 전반에 걸쳐 확실히 보이고 있다. 3차 샘플링으로 얻은 영상에서도 물결 모양의 잡음이 조금 남아있다. 그러나 5차 샘플링의 결과 영상에서는 이러한 잡음이 완전히 제거되었음을 볼 수 있다.

이러한 성능을 포락선의 형태로 비교하기 위하여 영상내에서 축방향 즉, 수직방향으로 일직선상에 놓인 2개의 점이 있는 부분에서의 단면을 그림 10에서 나타내었으며, 왼쪽 위에서부터 차례대로 quadrature, 2차, 3차, 5차 샘플링 방법으로 획득한 영상의 축방향 단면 포락선이다. 그림에서 수평축은 축방향으로 512 pixel을 나타내며, 수직 축은 256 gray레벨 값이다. 그리고

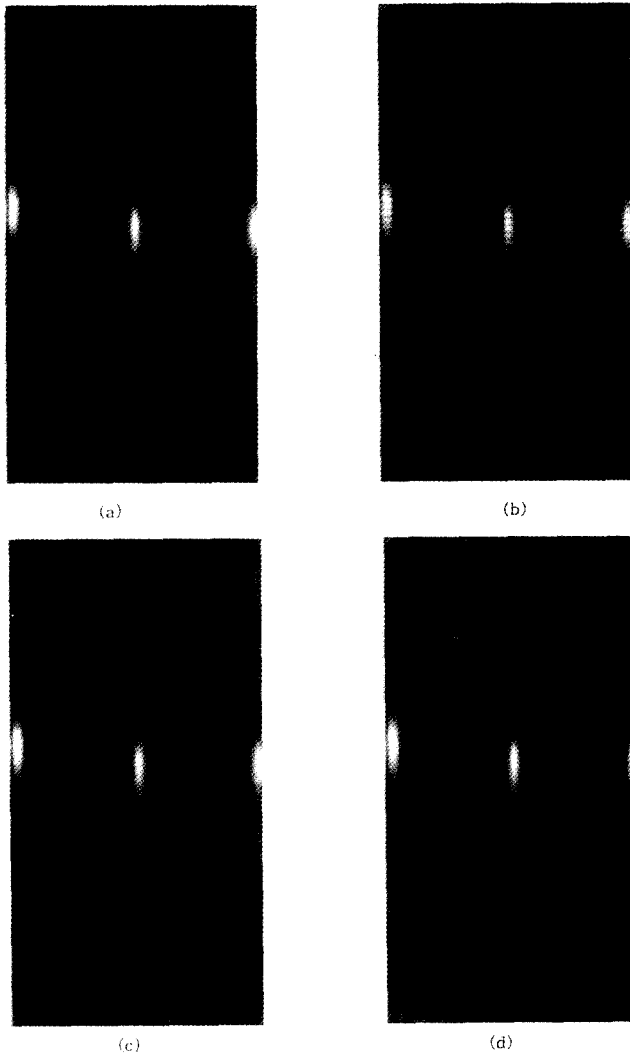


그림 9. (a) Quadrature, (b) 2차, (c) 3차, 그리고 (d) 5차 샘플링 방법으로 얻어서 부분 확대한 영상
 Fig. 9. Partial zoomed images that made by a) quadrature, b) 2nd, c) 3rd and d) 5th order sampling method

그림 11은 2차, 3차, 5차 샘플링 방법으로 얻은 영상의 축방향 단면 포락선을 quadrature 샘플링 방법과 비교하였을 때, 그 차이 값을 dB단위로 나타낸 것이다. 그림에서 -40dB의 값은 픽셀의 gray 레벨 값이 2정도의 차이가 나는 것이다.

그림 10에서 볼 수 있듯이, 2차 샘플링으로 얻은 데이터들은 포락선 검출이 정확히 되지 않아서 점들이 위치한 곳의 단면 포락선은 전반적으로 리플(ripple)이 심하게 나타나고 있다. Quadrature 샘플링 방법으로 얻은 영상과 비교하였을 때의 오차 값들이 그림 11에서 확실히 나타나고 있다. 그런데 3차 샘플링으로 얻은 데이터들은 그 포락선이 quadrature 샘플링 방법으로 얻은 영상의 포락선과 유사하며, 그 오차도 2차에 비하여 상당량 개선되었음을 알 수 있다. 다만 점들이 위치한 곳의 포락선이 기준포락선보다 조금 거칠게 나타나고 있다. 그림 11에서도

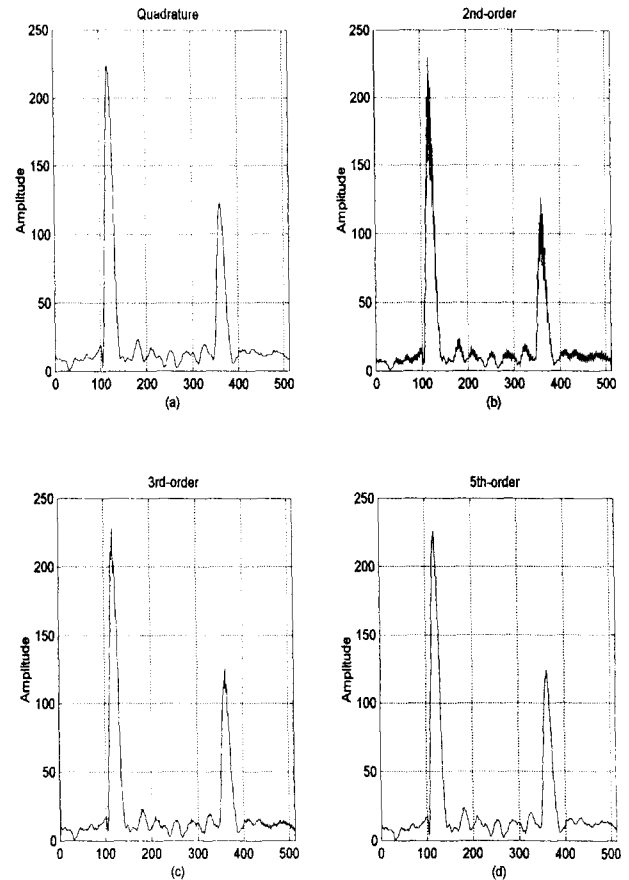


그림 10. (a) Quadrature, (b) 2차, (c) 3차, (d) 5차 샘플링 방법으로 얻은 영상의 축방향 단면 신호 비교
 Fig. 10. Comparison of axial section signal of images that made by (a) quadrature, (b) 2nd order, (c) 3rd order and (d) 5th order sampling method

3차 샘플링의 결과는 점들이 위치한 곳에서 오차가 많이 나타나고 있다. 그러나 5차 샘플링으로 얻은 영상의 경우, 이러한 오차 값은 현저하게 줄어서 기준 포락선과 거의 동일하게 나타남을 볼 수 있다. 점들이 위치한 곳에서의 오차 값도 3차에 비하여 상당량 개선되고 있다.

결론

본 논문에서는 기존에 알려진 대역폭 샘플링 방법들과 새로이 제안된 바 있는 다차 샘플링에 관한 간략한 이론적인 배경과 실험 결과들을 제시하였다. 실험 결과는 실제 실험 장치를 통해 얻은 RF 데이터를 빔포밍의 과정을 거쳐서 영상으로 재구성한 것이다. 그림 8부터 11까지는 이러한 결과 영상들이며, 그림들을 관찰해보면, 2차 샘플링 방법으로 얻은 영상은 영상 전반에

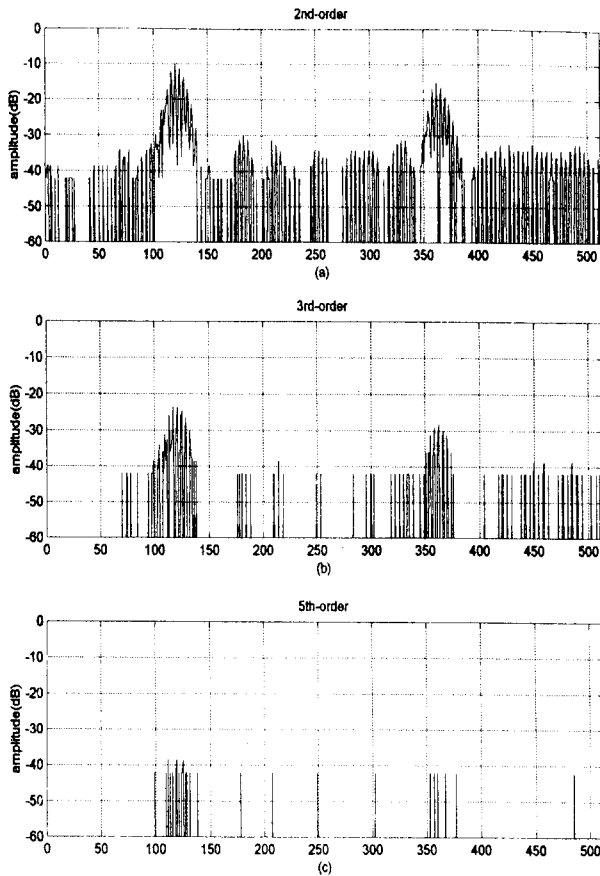


그림 11. Quadrature와 (a) 2차, (b) 3차, (c) 5차 샘플링 방법으로 얻은 영상들의 축방향 단면 신호의 차이값

Fig. 11. Difference between axial section signal of images that made by quadrature and (a) 2nd order, (b) 3rd order, (c) 5th order sampling method

걸쳐 물결모양의 잡음이 발생하고 있다. 이에 비하여 3차 샘플링 방법으로 얻은 영상은 2차 샘플링 방법에서 나타났던 물결모양의 잡음이 많이 없어졌으며, 5차 샘플링 방법으로 얻은 영상에서는 이러한 잡음이 완전히 사라졌음을 볼 수 있다. 이와같이 B-mode 영상만을 볼 때는 3차 샘플링만으로도 quadrature 샘플링 방법의 결과와 비슷한 성능을 볼 수 있다. 또한 영상의 단면에서 나타나는 포락선의 오차를 비교해 볼 때, 차수가 많아질수록 그 오차는 더욱 감소함을 알 수 있다. 이러한 성능은 다차 샘플링 방법이 기존의 quadrature 샘플링 방법의 성능에 필적하면서도 시스템을 디지털화하여, 경제적인 초음파 영상장치의 구

현이 가능함을 보여주고 있다.

본 연구에서 더욱 진행되어야 할 사항은 다차 샘플링 방법을 채택하여 실제 시스템을 구현하는 문제와 하드웨어적으로 발생할 수 있는 샘플링 위치의 오차가 샘플링 결과에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

참 고 문 헌

1. J. F. Havlice and J. C. Taenzer, "Medical Ultrasonic Imaging: An Overview of Principles and Instrumentation", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 67, April 1979.
2. A. Macovski, "Medical Imaging System", Prentice-Hall, INC., 1983.
3. B. G. Bardsley and D. A. Christensen, "Beam pattern from pulsed ultrasonic transducers using linear systems theory", *J. Acoustical Society of America.*, 69(1), Jan. 1981.
4. Carl F. Schueleir, Hua Lee, "Fundamentals of Digital Ultrasonic Imaging", *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, Vol. SU-31, No. 4, July 1984.
5. Alan V. Oppenheim and Ronald W. Schaffer, "Discrete-time Signal Processing", Prentice-Hall, Chapter 10.
6. J. H. Kim and T. K. Song and S. B. Park, "A pipelined sampled delay focusing in ultrasound imaging systems", *Ultrasonic Imaging*, Vol. 9, 1987.
7. O. D. Grace and S. P. Pitt, "Quadrature sampling of High-Frequency Waveforms", *J. Acoustical Society of America*, Vol. 44, 1968.
8. C. E. Persons, "Quadrature sampling error formular", *J. Acoustical Society of America*, Vol. 57, 1975.
9. D. A. Linden, "A Discussion of Sampling Theorems", *Proceedings of the IRE*, 1959.
10. J. L. Brown, "On Quadrature sampling of Bandpass Signals", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-15, No. 3, May 1979.
11. Weon-Hee Cho and Young-Bok Ahn, "Multi-order Sampling for Digital Beamforming of Wide-band Signals", *IEEE Trans. on Ultrasonics*, Vol. 43, No. 3, May 1996.
12. R. G. Pridham, R. A. Mucci, "Digital Interpolation Beamforming for Low-Pass and Band-Pass Signals", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 67, No. 6, June 1979. pp 904-919