

초음파 영상을 위한 직교 상보수열의 설계

김 배 형, 김 태 호, 송 태 경
서강대학교 전자공학과
전화 : 02-705-8907 / 핸드폰 : 016-350-8907

Design of Mutually Orthogonal Polyphase Complementary Sequences for Ultrasound Imaging

Bae-Hyung Kim, Tai-Ho Kim, Tai-Kyong Song
Dept. of Electronic Engineering, Sogang University
E-mail : tksong@ccs.sogang.ac.kr

Abstract

In this paper, we present a new method for generating a set of complementary sequences that can be simultaneously transmitted and yet compressed into a short pulse on receive, and its application to ultrasound imaging. This new complementary sequences can be designed based on a filter bank theory. The new complementary sequences can be used to improve the SNR of ultrasound imaging without sacrificing the spatial resolution and frame rate, compared to conventional pulse-echo imaging. Computer simulations are performed to verify the proposed method.

I. 서론

초음파 영상 장치에 사용되는 펄스 압축 신호의 이상적인 특성은 자기상관 결과가 임펄스 함수의 형태를 갖는 것이다. 이러한 펄스 압축 신호 중에 골레이 코드는 서로 상보적인 관계를 가지는 같은 길이의 두 개의 이진 수열(binary sequence)로 구성되어 있다[1]. 이 두 수열의 자기상관 함수들은 동일한 주엽을 가지고 축엽에서는 각각의 극성이 반대라는 특성을 갖는다. 따라서 두 번의 송·수신 과정을 거친 후 두 개의 자기상관 함수를 더하면 주엽의 크기는 두 배로 증가하고

축엽은 서로 상쇄되어 사라짐으로써 임펄스 신호를 송·수신한 효과를 얻을 수 있다. 또한 골레이 코드와 같은 상보수열은 상관기를 이용해 펄스 압축시킬 수 있으므로 신호 대 잡음비(SNR)를 최대로 할 수 있다 [2]. 그러나 일반적인 상보수열들은 직교성이 없으므로 각 수열에 대하여 별도의 송·수신 과정을 거쳐야 하기 때문에 프레임 율(frame rate)이 저하되는 단점이 있다.

본 논문에서는 필터 뱅크(filter bank)의 이론을 바탕으로 직교하는 상보수열을 설계하였다. 이렇게 설계된 수열은 이상적인 펄스 압축신호의 특성을 가지면서 기존의 상보수열을 이용한 초음파 영상 장치보다 프레임 율을 효과적으로 2배 향상시킬 수 있다. 또한 본 논문에서 설계된 수열을 초음파 영상 장치에서 펄스 압축 신호로 이용하는 방법을 제안하였으며 기존의 방법으로 얻은 영상과 비교 검증하기 위해 모사실험을 수행하였다.

II. 새로운 상보수열의 설계

2.1 QMF(Quadrature Mirror Filter) 뱅크 이론

서브밴드 코딩(sub-band coding)에 이용되는 필터 뱅크 중에 2채널로 되어 있는 것이 QMF 뱅크이다[3]. 그림 1은 이러한 QMF 뱅크의 구조를 나타낸다. QMF

뱅크에서 두 해석(analysis) 필터 $H_1(z), H_2(z)$ 는

$$H_2(z) = H_1(-z) \quad (1)$$

와 같은 관계를 가지며, 이러한 해석 필터의 주파수 특성을 그림 2에 나타냈다. QMF 뱅크의 출력신호는 입력신호의 위상 왜곡(phase distortion), 크기 왜곡(amplitude distortion) 성분과 에일리어싱(aliasing) 성분을 포함한다. 만일 그러한 성분들이 모두 제거된다면 출력신호로부터 입력신호가 완전 복원(Perfect Reconstruction, PR)될 수 있다.

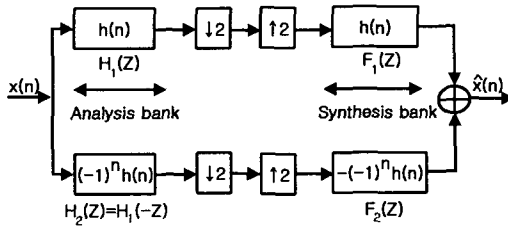


그림 1. QMF 뱅크의 구조

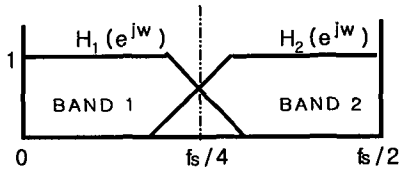


그림 2. Analysis 필터의 주파수 특성

에일리어싱 성분은 두 합성(synthesis) 필터 $F_1(z), F_2(z)$ 가 $F_1(z) = H_2(-z), F_2(z) = -H_1(-z)$ 와 같은 관계를 가지면 제거될 수 있다. 이렇게 에일리어싱 성분이 제거된 QMF 뱅크 시스템은 크기 왜곡 성분과 위상 왜곡 성분만 제거하면 완전 복원 시스템이 된다. 위상 왜곡을 없애기 위한 방법 중에 해석 필터 $H_1(z)$ 를 선형 위상 FIR 필터가 되도록 설계하는 방법이 있다. 이 경우 해석 필터 $H_1(z)$ 가 저역통과(lowpass) 필터이어야 하기 때문에 $h_1(n)$ 은 다음과 같이 우대칭(even symmetric) 특성을 갖는다.

$$h_1(n) = h_1(N-n) \quad (\text{단, } H_1(z) = \sum_{n=0}^N h_1(n) z^{-n}) \quad (2)$$

여기서 N 은 필터의 차수를 나타내며 홀수이어야 크기 왜곡을 없앨 수 있다. 또한 식(1)을 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있으므로 $h_2(n)$ 은 기대칭(odd symmetric) 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

$$h_2(n) = (-1)^n h_1(n) \quad (3)$$

이와 같은 조건을 모두 만족하는 경우 크기 왜곡 성분은 $|H_1(e^{jw})|^2 + |H_2(e^{jw})|^2$ 와 같이 된다. 따라서 이 성분이 다음과 같은 전력 상보적인(power complementary) 특성을 갖는다면 크기 왜곡이 사라지게 된다.

$$|H_1(e^{jw})|^2 + |H_2(e^{jw})|^2 = c \quad (\text{단, } c \text{는 양의 상수}) \quad (4)$$

$H_1(z)$ 가 FIR 필터인 경우 식(4)와 같은 전력 상보적인 특성은 근사적으로 밖에 성립할 수 없다. 따라서 식(4)를 근사적으로 만족시킬 수 있는 최적화 방법(optimization technique)에 의해 크기 왜곡은 최소화될 수 있다.

예를 들어, Johnston의 방법은 크기 왜곡을 최소화하기 위해 다음과 같은 목적 함수 ϕ 가 최소가 되도록 해석 필터 $H_1(z)$ 의 계수 $h_1(n)$ 를 최적화 한다[4].

$$\phi = \alpha \phi_1 + (1-\alpha) \phi_2 \quad (\text{단, } 0 < \alpha < 1) \quad (5)$$

식(5)에서 ϕ_1 은 $H_1(e^{jw})$ 의 정지대역(stopband)의 에너지이고 ϕ_2 는 식(4)를 어느 정도 만족하는지를 알 수 있는 에러 리플(error ripple) 에너지이며 각각은 다음과 같이 나타낸다.

$$\phi_1 = \int_{\pi}^{\pi/2} |H_1(e^{jw})|^2 dw \quad (\text{단, } w_s \text{는 정지 주파수})$$

$$\phi_2 = \int_0^{\pi/2} (1 - |H_1(e^{jw})|^2 - |H_1(e^{j(\pi-w)})|^2)^2 dw$$

2.2 직교하는 상보수열의 설계

일반적으로 상보수열들은 수열들의 자기상관 함수들이 동일한 주엽을 가지고 축엽에서는 각각의 극성이 반대인 특성을 갖는다. 따라서 두 실수 수열 $a_1(n)$ 과 $a_2(n)$ 이 상보수열들이라면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_1(n) * a_1(-n) + a_2(n) * a_2(-n) = \delta(n) \quad (6)$$

이러한 상보수열 $a_1(n)$ 과 $a_2(n)$ 이 다음 식과 같이

서로의 교차상관 함수의 합이 0이 되는 특성을 갖는다. 이는 서로 직교하는 상보수열이 된다는 것을 의미한다.

$$a_1(n) * a_2(-n) + a_2(n) * a_1(-n) = 0 \quad (7)$$

수열 $a_1(n)$ 과 $a_2(n)$ 을 이산시간 신호라 하고 각각의 푸리에 변환을 $A_1(w)$, $A_2(w)$ 라고 하면, 식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} A_1(w) A_2^*(w) + A_2(w) A_1^*(w) &= 0 \\ \Leftrightarrow 2\text{Re}[A_1(w) A_2^*(w)] &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$A_1(w)$ 가 실수이고 $A_2(w)$ 가 순 허수이거나 그 반대가 되면 식(8)을 만족한다. 일반적으로 시간영역에서 실수 값을 갖는 우대칭 함수는 주파수 영역에서 실수가 되고, 시간영역에서 실수 값을 갖는 기대칭 함수는 주파수 영역에서 순 허수가 된다. 따라서 $a_1(n)$ 이 우대칭이면 $A_1(w)$ 이 실수가 되고 $a_2(n)$ 이 기대칭이면 $A_2(w)$ 가 순 허수가 된다. 이와 같은 대칭 특성을 갖는 $a_1(n)$ 과 $a_2(n)$ 은 식(6)과 (7)을 동시에 만족시킬 수 있으므로 서로 직교하는 상보수열들이 된다.

앞서 살펴본 QMF बैं크 이론에서 해석 필터 계수인 $h_1(n)$ 과 $h_2(n)$ 은 각각 우대칭이고 기대칭인 특성을 가지고 있으므로 서로의 교차상관 함수의 합이 0이 된다는 것을 알 수 있다. 또한 최적화 방법을 이용하면 $h_1(n)$ 과 $h_2(n)$ 이 서로 상보적인 특성을 가질 수 있다. 그러므로 FIR QMF बैं크의 이론을 바탕으로 설계된 두 해석 필터 계수는 서로 직교하는 상보 수열들이 된다.

III. 직교하는 상보수열들을 이용한 초음파 영상 기법

플레이 코드와 같은 기존의 상보수열들을 송신코드로 사용하는 초음파 영상 시스템은 두 번의 송·수신 과정을 거친 후 각각의 자기상관 결과를 더하여 펄스 압축시킨다. 따라서 상관기를 이용한 펄스 압축 기법을 사용하므로 SNR을 최대로 할 수 있으나 두 번의 송·수신 과정을 거쳐야 하기 때문에 프레임 율이 저하되는 단점이 있다. 만약 상보수열로 이루어진 송신 코드를 동시에 송신하여 수신시 펄스 압축 기법을 이용해 짧은 펄스를 송신한 것과 같은 해상도를 얻을 수 있다면 프레임 율의 저하 없이도 향상된 SNR을 제공

할 수 있게 된다.

앞에서 설명한 것처럼 FIR QMF बैं크의 두 해석 필터의 계수는 상보수열이면서 서로 직교하는 특성을 갖도록 설계할 수 있다. 그림 3에 Johnston의 최적화 방법을 이용해 설계된 차수가 31인 두 필터 $H_1(z)$, $H_2(z)$ 의 계수 $h_1(n)$, $h_2(n)$ 을 도시하였다.

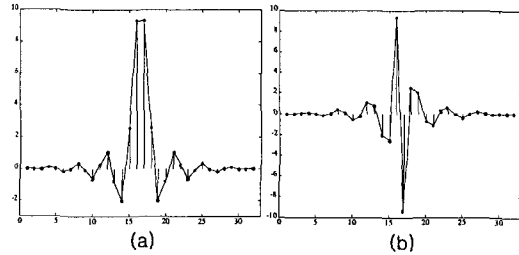


그림 5. 필터 계수
(a) $h_1(n)$, (b) $h_2(n)$

이 두 수열들을 더한 수열 $h_1(n) + h_2(n)$ 을 송신코드로 사용하면 수신시에 $h_1(n)$, $h_2(n)$ 과 각각 상관시킨 결과를 더하여 델타함수로 압축시킬 수 있다.

그런데 $h_1(n) + h_2(n)$ 은 주파수 확산 신호(Spectrum Spread Signal)이므로 제한된 대역폭을 가지는 변환자를 통과하게 되면 송신 전력 효율(Transmit Power Efficiency)이 작게 된다. 따라서 송신 신호의 주파수 성분들을 변환자의 대역폭에 정합하도록 변조하여 송신 전력 효율을 높일 수 있다. $g(t) = h_1(t) + h_2(t)$ 라고 하면 이를 변조 함수 $m(t)$ 와 컨볼루션하여 변조시킨 신호를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_m(t) = g(t) * m(t) \quad (9)$$

이 신호를 송신하여 거리 r 만큼 떨어진 반사체에서 돌아오는 수신신호를 상관기를 이용해 펄스 압축을 수행하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} y(t) &= g_m(t - \tau_r) * g_m(-t) \\ &= g(t - \tau_r) * m(t - \tau_r) * g(-t) * m(-t) \\ &= g(t - \tau_r) * g(-t) * m(t - \tau_r) * m(-t) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 τ_r 은 반사체까지 초음파가 진행하고 돌아오는 데 걸리는 시간을 나타낸다. 따라서 이 식은 $g(t - \tau_r) * g(-t)$ 이 델타함수가 되면 변조 함수 $m(t)$ 의 자기상관함수가 된다.

따라서 그림 3의 필터계수 $h_1(n)$, $h_2(n)$ 를 더한

것을 변환자의 임펄스 응답과 컨볼루션하여 변조시킨 신호를 송신신호로 사용하고 수신시에 상관기를 이용해 펄스 압축을 하면 반사체의 특성함수를 구할 수 있다.

IV. 모사 실험 및 결과 고찰

모사 실험을 수행하기 위해서 중심주파수가 7.5MHz 이고 -6dB 대역폭이 60%이며, 소자간의 간격이 0.2mm인 192배열 소자를 갖는 선형 변환자를 사용했고, 64채널 시스템을 가정하였다. 그림 3의 $h_1(n)$, $h_2(n)$ 을 더한 결과와 변환자의 임펄스 응답을 컨볼루션한 것을 송신신호로 사용하였다. 영상은 8개의 점 반사체(point target)를 구성하였으며, 각 영상들은 동적 범위(dynamic range)를 60dB로 하여 표시하였다.

그림 4는 시스템 별 영상을 비교한 것이다. 그림 4(a)는 기존의 펄스 시스템에서 얻은 영상을 나타내고, 그림 4(b)는 본 논문에서 제안한 서로 직교하는 상보수열을 이용하여 얻은 영상을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 각 시스템들은 동일한 해상도를 가짐을 확인할 수 있다.

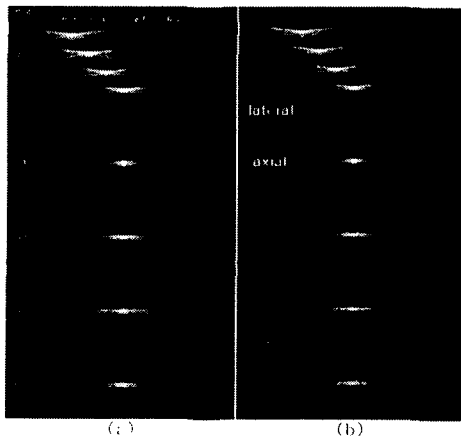


그림 4. 각 시스템의 영상 비교
(a) 기존의 펄스 시스템
(b) 제안된 시스템

그림 5는 SNR의 향상도를 살펴보기 위하여, 그림 4의 축방향 0mm에서 기존의 방식과 제안한 방식의 축방향 빔패턴을 비교해서 로그 스케일(dB)로 나타낸 것이다. 점선은 제안된 시스템을, 실선은 제안된 방식의 빔패턴으로 정규화된 펄스 시스템의 빔패턴을 나타낸다. 그림에서 SNR은 본 논문에서 설계된 상보수열을 이용한 시스템이 기존의 펄스를 이용한 시스템 보다

24.4dB 향상되는 것을 확인할 수 있다. 제안된 방식은 상관기를 기반으로 하는 펄스 압축 기법을 사용하기 때문에 향상된 SNR을 제공한다.

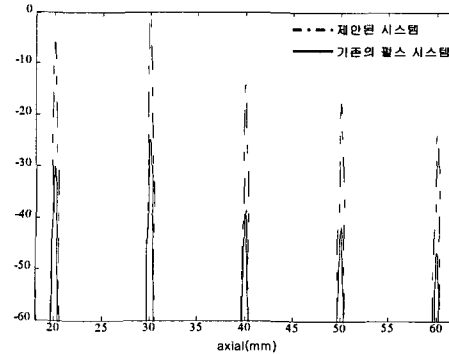


그림 5. 축방향 빔패턴 비교

V. 결론

본 논문에서는 FIR QMF 뱅크 이론을 바탕으로 서로 직교하는 상보수열을 설계할 수 있으며 이를 초음파 영상에 이용할 수 있다는 것을 확인하였다. 서로 직교하는 상보수열은 동시에 송신한 다음 수신시 상관기를 이용해 펄스 압축시킬 수 있다. 따라서 기존의 상보수열을 이용한 초음파 영상 장치보다 프레임 율을 효과적으로 2배 향상시킬 수 있으며 펄스 압축 기법을 사용하므로 향상된 SNR을 제공한다. SNR의 증가로 인해 초음파 영상에서 관찰 가능한 영역이 확장될 수 있다.

송신 전력 효율을 높이기 위해 서로 직교하는 상보수열을 변조시켜 송신 신호로 사용하는 초음파 영상 기법을 제안하였다. 모사 실험 결과 제안한 기법은 기존의 펄스 시스템과 같은 해상도를 가지면서도 프레임 율의 저하 없이 24.4dB 증가된 SNR을 제공하는 것을 확인하였다.

참고문헌(Reference)

- [1] C.-C. TSENG, C. L. LIU, "Complementary Sets of Sequences", IEEE Trans. on Infor. Theo. Vol IT-18, no5, pp. 644-652, 1972.
- [2] M. O'Donnell, "Coded excitation system for improving the penetration of real-time phased-array imaging", IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol 39, no.3, May 1992.
- [3] P.P. Vaidyanathan, "Multirate Systems and Filter Banks", Prentice-Hall, 1993
- [4] J. D. Johnston, "A Filter Family Designed for Use in Quadrature Mirror Filter Banks", Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech and Signal Proc., pp.291-294, April 1980.