

오프셋 위상변조 방식을 이용한 수중에서의 파라메트릭 음향 무선통신

김갑수* · 임용곤**

*과학기술 연합대학원 대학교, 수중음향통신공학과

**한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Underwater Acoustic wireless Communication using offset PSK

Kap-su Kim* · Yong-kon Lim**

*Korea University of Science and Technology

**Maritime and Ocean Engineering Research Institute(MOERI)/KORDI

E-mail : enemyinside@naver.com

요 약

본 논문에서는 음향의 비선형 채널에 적합한 새로운 수중 무선 통신 시스템을 제안하였다. 일반적으로 음향의 비선형 채널에서의 통신은 두 음파의 차의 주파수를 가지는 음파에 대한 파라메트릭 효과를 이용한 통신을 한다. 이러한 통신기법에서는 위상변조를 이용한 통신의 구현은 쉽지 않았다. 본 논문에서 제안된 시스템에서는 위상변조 후 오프셋을 주어 통신하는 비선형 채널에 적합한 통신 방식을 제안하였고 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

ABSTRACT

The paper proposed the new underwater wireless communication system fitted to non-linear acoustic channel. Generally, in non-linear acoustic channel, one used to do acoustic communication using parametric effect that is some effect caused from acoustic wave having frequency different of two primary acoustic wave frequency. In the paper, Offset PSK communication method fitted to non-linear acoustic channel was proposed, and it was demonstrated through simulations.

키워드

Underwater Acoustic Communication, parametric effect, PSK(phase shift key), non-linear underwater acoustic channel

1. 서 론

매질의 압축과 팽창에 의해 발생하는 음향 현상에 대한 해석은 오랜 기간 약한 음압을 가지는 음향에 대한 연구에 집중되어 왔고 선형 음향 이론을 통해 성공적으로 해석되어졌다. 하지만 강한 음압을 가지는 음향 현상의 경우 그 비선형적 특성으로 인해 전혀 다른 현상을 보이게 된다. 특히 주파수가 비슷한 두 성분의 음향을 함께 발생시킬 경우 두 주파수의 합과 차에 해당하는 주파수를 가지는 음향이 발생하는데 이러한 비선형 특성으로 인해 발생하는 새로운 이차 주파수를 가지는 음향은 빔의 폭이 매우 좁

아 감쇠가 적어 상당히 먼 거리까지 음향을 도달하게 하거나 정보를 전달해 줄 수 있다. 이러한 음향특성은 매우 넓은 응용분야를 가질 수 있는데 공사현장이나 전시장 등에서 목표한 사람들에게만 음향을 전달해 주는 지향성 스피커에도 사용되고 음향신호에 민감한 수중 전투체계에서 적군의 레이더에 걸리지 않고 원하는 노드에 정확히 정보를 전달해 줄 수 있는 통신 방식의 개발도 가능하게 해 준다.

본 논문에서는 이러한 파라메트릭 효과를 해석한 초기의 중요한 연구결과들을 찾아보고 여러 가지 응용 방식 중에서도 차에 해당하는 주파수를 가지는 음향 성분을 이용한 수중에서의

새로운 통신 기법을 제안하고자 한다.

두 주파수를 발생시켰을 때 합과 차의 주파수에 해당하는 신호가 발생하는 현상은 파라메트릭 음향 배열의 가장 대표적이며 간단한 현상이다. 이러한 음향 배열 신호의 분석에 대한 최초의 이론적 접근은 1962년 브라운 대학의 물리학과 교수 Peter Westervelt 에 의해 이루어졌다. 몇 가지 가정을 통해 만들어진 이 논문은 현재는 정확한 이론으로 인정받고 있지는 않다. 특히 x 축방향의 발산을 0으로 계산하여 삼차원 공간에서의 정확한 해를 주기에는 무리가 있었다.

이러한 점을 보완하여 1965년 H. O. Berkta y 는 좀 더 정확하고 완성도 높은 파라메트릭 효과에 대한 이론적 설명을 하였다. 그는 두 개의 파를 이용한 파라메트릭 효과에 대한 접근보다는 발생된 음향의 포락선을 이용한 접근을 통해 좀 더 정확한 음압에 대한 일반해를 구할 수 있었다. 본 논문에서도 이 해를 이용하여 비선형 음향 채널 모델링하였다. 논의에 의하면 비선형 음향채널을 통해 전달되는 음파는 그 음파의 포락선의 제곱을 두 번 미분한 값에 비례하는 음파를 생성한다는 것이고 장거리에서는 높은 주파수 성분을 가진 일차적인 음파들이 감쇠에 의해 모두 사라지고 포락선에 해당하는 음파만 남는 다는 것이다. 이렇게 하여 나온 해가 다음과 같은 Berkta y 의 원 거리에서의 일반해이다.

$$p(t) \propto \frac{\partial(enu(t))^2}{\partial t} \quad (1)$$

이 해는 아직까지도 공기 중이나 수중에서의 파라메트릭 효과를 이용한 여러 가지 응용에 널리 사용되고 있고 본 논문에서도 이 해를 이용하여 수중 채널의 모델을 설정하였다.

2. 오프셋 BPSK 방식

본 논문에서는 BPSK 방식의 송신신호를 서론에서 언급한 Berkta y 의 원 거리에서의 일반해를 만족하는 비선형 음향 채널에서 포락선을 이용한 통신 방식을 제안하고 있다.

기본적인 BPSK 송신방식은 180도의 위상차를 가지는 두 신호의 조합에 적당한 파형을 발생시켜 반송파를 씌워 보내는 형식을 가지고 있다. 그리고 수신단에서는 동일한 주파수의 반송파를 씌우고 저역 통과 필터를 통해 원 파형을 복원하는 방식을 취하고 있고 이상적인 채널에서 이러한 방식은 효과적으로 파형을 복원해 준다. 하지만 제안된 시스템에서는 이러한 복조장이 공기 또는 수중과 같은 채널에서 이루어지고 실제로 남는 파형은 송신한 파형의 포락선의 제곱을 두 번 미분한 값만 남게 되기 때문에 수신단에서의 이러한 과정은 필요가 없다. 또한 수신되는 파형이 포락선의 함수이기 때문에 단순히 BPSK 방식으로 전송을 할 경우 원하는 파

형을 복원할 수 없는 문제가 있다. 이러한 이유로 위상변조를 사용한 파라메트릭 효과를 이용한 무선통신을 구현하는 것은 불가능해 보였다. 그러나 채널이 포락선의 함수를 출력한다는 것은 포락선의 형태를 원하는 파형으로 만든다면 충분히 변조와 복조가 가능할 것이다. 이러한 점을 착안하여 위상이 180도인 BPSK 신호에 오프셋 값을 더한 후 변조하는 방식을 본 논문에서는 제안하고 있다. 제안된 방식에서 적당한 오프셋 값을 넣어 준다면 그로 인하여 포락선의 형태가 원하는 파형이 될 것이고 수신단에서 받아지는 신호의 형태도 원하는 파형의 함수가 될 것을 예상할 수 있다. 다음 그림은 일반적인 BPSK 를 이용한 송신신호와 오프셋을 준 BPSK 신호에 대한 송신신호의 비교이다. 데이터는 [1, -1, 1, -1, 1, 1] 이었다.

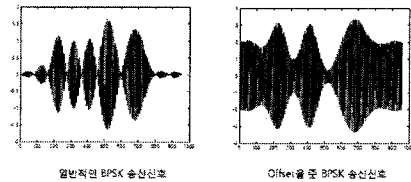


그림 1. 일반적인 위상변조방식과 제안된 방식간의 송신신호 비교

그리고 제안된 방식에서는 채널의 포락선 제곱특성을 보상하기 위해서 송신단에서 미리 제곱근을 씌워 보내는 형식을 취하고 있다. 미리 제곱근을 씌우는 경우 대역이 늘어난다는 단점은 있지만 비선형 채널에서 포락선의 제곱에 해당하는 파형을 만들어 주기 때문에 이러한 사전 변조는 수신단에서의 복조를 가능하게 만들어 준다. 이것은 BPSK 신호에 적당한 오프셋을 주어야 하는 또 하나의 이유이다. 만약 충분히 큰 오프셋을 더해 주지 않는 경우 음수의 제곱근을 연산하게 되어 복조수 값이 진폭으로 출력이 될 것이다. 그러므로 최대 진폭값의 1배 이상의 오프셋을 주어야 원하는 파형을 만들 수 있고 실수의 진폭이 출력될 수 있을 것이다. 그러나 너무 큰 값의 오프셋은 출력의 효율을 떨어뜨릴 수 있으므로 상황에 따라 적당한 오프셋을 선택해서 사용하여야 할 것이다. 이렇게 구성된 송신단의 블록도는 다음과 같다.

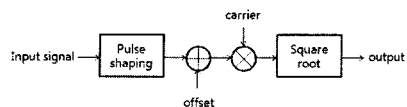


그림 2. 제안된 시스템에서의 송신부

이렇게 보내진 신호는 비선형 채널을 통과하

여 충분히 긴 거리를 진행한다면 반송파는 거의 사라질 것이고 Barkay의 일반해와 같이 포락선의 제곱에 두 번 미분한 형태의 신호가 수신단에 들어올 것이다. 다음 그림은 Barkay의 파라메트릭 효과에 의한 음향의 원거리 일반해에 따른 음향채널모델의 블록도이다.

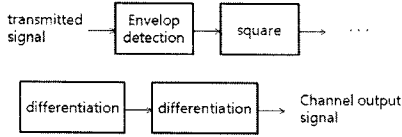


그림 3. 가정된 비선형 수중 음향 채널

이렇게 수신단에 들어온 신호는 원하는 파형의 두 번 미분한 형태가 될 것이다. 제안된 시스템에서는 일반적인 수신기에서와 같이 신호의 주파수 영역을 기저대역으로 낮추고 저역필터를 통한 파형 복원이 불필요하다. 대신에 채널모델에서의 두 번의 미분을 보상하기 위해 받아진 신호에 먼저 두 번의 적분을 시행하여야 할 것이다. 미분과 적분 연산자는 선형연산자이므로 다중경로 등이 있다 하여도 독립적으로 신호는 복원될 것이다. 이렇게 복원된 신호는 채널에 따른 왜곡을 보상하기 위해 등화기를 이용하여 원하는 신호를 복원한 후 최종적으로 정보를 추출한다.

다음의 그림은 수신단에서의 블록도를 보여 준다.



그림 4. 제안된 시스템에서의 수신부

만약 채널이 Barkay의 일반해를 만족한다면 이상적인 채널환경에서 위의 수신기는 성공적으로 신호를 복원할 수 있을 것이다.

하지만 이것은 매우 이상적인 채널을 가정한 경우이다. 실제의 경우는 이것보다 훨씬 복잡한 채널의 특성을 보일 것이다.

가장 중요한 것은 아마도 채널에서 나타나는 제곱 특성 이외의 채널의 특성이 선형 응답을 주는가일 것이다. 만약 선형 응답을 주지 않을 경우 제안된 구조에 좀 더 보완이 필요할 것이다.

3. 제안된 시스템의 수학적 신호모델

논의를 간단히 하기 위해 여기서는 다중경로가 없는 이상적인 비선형 수중 백색잡음 채널에서 $m(n)$ 의 신호를 BPSK 형식으로 전송하는 경우를 가정한다. 이러한 경우 기저대역신호는 다음과 같을 것이다.

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(n)h(t-nT) + offset \quad (2)$$

여기서 $h(t)$ 는 펄스 성형 필터의 순간 응답이고 $offset$ 은 더해진 오프셋의 크기로서 상수이다.

그리고 이 신호를 측파대역으로 올리기 전에 우선 제곱근을 취한다.

$$s_{sq}(t) = \sqrt{\sum_{n=-\infty}^{\infty} m(n)h(t-nT) + offset} \quad (3)$$

다음에 반송파를 곱하여 신호를 측파대역으로 올린다.

$$s_c(t) = \sqrt{\sum_{n=-\infty}^{\infty} m(n)h(t-nT) + offset} \left(\cos \frac{2\pi n}{T} \right) \quad (4)$$

송신신호가 가정된 채널을 지나가게 되면 신호는 채널의 특성에 의해 자동으로 복조가 되고 다음과 같은 신호만이 남게 된다.

$$env_{da}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\partial^2(m(n)h(t-nT))}{\partial t^2} + w(t) \quad (5)$$

여기서 $w(t)$ 는 백색잡음이다. 수신기에서는 먼저 이 신호의 미분을 없애기 위해 시간으로 두 번 적분한다.

$$env(t) = \iint_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{\partial^2(m(n)h(t-nT))}{\partial t^2} + w(t) \right) dt^2 \quad (6)$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(m(n)h(t-nT) + \iint_{-\infty}^{\infty} w(t) dt^2 \right)$$

이제 복원된 기저대역신호를 주기로 샘플링하면 우리가 원하는 정보를 얻을 수 있을 것이다.

$$\hat{m}(n) = m(n) + \hat{w}(n) \quad (7)$$

여기서 $\hat{m}(n)$ 은 최종적으로 복원된 정보신호이고 $\hat{w}(n)$ 은 두 번 적분된 백색잡음을 샘플링한 값이다.

4. 제안된 시스템의 시뮬레이션 결과

위의 신호모델을 사용하여 간단히 시뮬레이션을 시행해 보았고 결과는 가정된 채널에서 매우 정확히 신호를 복원할 수 있음을 알 수 있었다.

시뮬레이션에서는 BPSK 송신신호를 5000 bps로 전송하고 50 kHz의 반송파를 사용하였고 오

프셋은 송신신호 크기의 2배를 주었다. 펄스 성형 필터의 지연길이는 $3T$ 이었으며 롤오프 팩터는 0.25였다. 100개의 신호를 사용하여 복원된 신호의 채널의 잡음의 정도에 따른 평균 제공근 오차를 보였다.

먼저 제공근을 씌우기 이전의 기저대역 신호의 파워 스펙트럼과 제공근을 씌운 이후의 기저대역 신호의 파워 스펙트럼을 비교해 보았다.

아래의 그림 중 첫 번째 그림은 제공근을 씌우기 이전의 기저대역 신호의 파워 스펙트럼을 보여주고 있고 두 번째 그림은 제공근을 씌운 이후의 파워 스펙트럼을 보여주고 있다.

이 두 그림은 예상과는 다른 특성을 보이고 있다. 처음 예상은 제공근을 씌웠을 경우 신호의 대역이 늘어날 것을 예상하였고 이는 일반적으로 타당하다. 하지만 실제 나타난 결과는 그렇지 않았고 제공근을 씌운 이후에 더욱 좁은 대역을 나타내 보였다. 이는 펄스 성형필터의 특성으로 인한 결과로 예상된다.

마지막 그림은 15dB의 백색잡음이 있는 경우 적응 등화기를 통과한 신호의 평균 자승 제공근 오차를 보여주고 있다. 가정된 채널에서 매우 좋은 성능을 보여주고 있음을 확인할 수 있다.

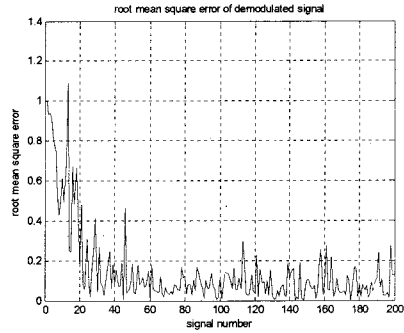


그림 7. 등화기 출력의 RMSE

IV. 결 론

본 논문에서는 오프셋 BPSK 방식을 사용한 수중 채널에서의 파라메트릭 무선통신 방식을 제안하였고 가정된 수중환경에서의 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 입증하였다. 그러나 가정된 환경과 실제 환경이 얼마나 큰 차이를 보이는지는 아직 알 수 없으므로 실제 실험을 통하여 제안된 구조의 타당성을 입증하여야 할 것이다.

후 기

본 연구결과는 한국해양연구원의 “수중 무선 통신 시스템” 과제에서 수행된 연구결과 중 일 부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] P. J. Westervelt, "Parametric acoustic array," The Journal of the Acoustical Society America, vol. 35 no. 4, pp. 535-537, April 1963
- [2] H. O. Barktay, "Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications, " Journal of Sound and Vibration, vol. 2, Issue 4, pp. 435-461, October 1965

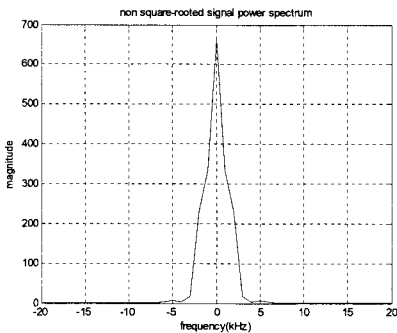


그림 5. 제공근을 씌우기 이전의 스펙트럼

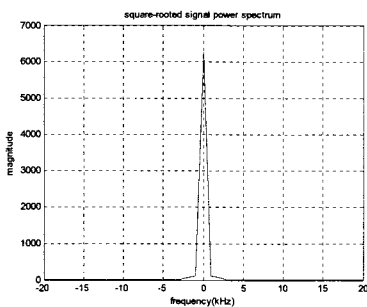


그림 6. 제공근을 씌운 후의 스펙트럼