

논문 2009-5-33

## 수중통신의 국내외 동향 및 채널환경특성

### Trends of Underwater Communications and Channel Environment Characteristics

김남리\*, 정재학\*\*

Nam-Ri Kim, Jea-Hak Chung

요 약 수중통신은 지상과는 다른 환경적 문제에 의해 고속 데이터 전송률을 얻기 위해서는 여러 가지 어려움이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 끊임없는 연구가 계속되어 왔다. 본 논문에서는 수중 채널의 특성을 살펴보고 현재 수중 통신을 위한 다양한 송, 수신 기법에 대한 설명과 국내 외 수중 통신 동향을 알아본다.

**Abstract** For obtaining high speed data rate, underwater acoustic communication has several problems by the different environmental problem compared to wireless communication. To overcome this problem, the research is going steadily. In this paper, the property of underwater acoustic channel is considered, and the explanation of recently various method of transmitting and receiving and the domestic and foreign trend of underwater acoustic communication are taken into account.

**Key Words** : Underwater Acoustic communication, TRM(Time Reversal Mirror)

#### I. 서 론

수중통신은 RF 통신보다 낮은 가청주파수나 그 이상의 주파수를 반송파로 사용하여 신호를 주고 받는 기술이다. 응용 분야로는 해저나 암초를 조사하거나 수심을 재는 등 산업상 분야에서도 사용될 뿐 아니라 해저 유전을 비롯한 광물 자원의 개발, 또는 해양 오염을 측정하고, 잠수함과 선박의 존재를 탐지하는 것에도 사용된다. 이와 같이 수중 통신은 해양 개발을 위한 중요한 기초 인프라 기술이다.

본 논문에서는 수중통신의 국내, 외 동향과 수중통신의 환경적 특징을 설명하고, 기존의 수중통신방법과 현재 수중통신 분야에서 널리 쓰이는 시역전 방식(TRM:Time Reversal Mirror), 다중 캐리어 변조 방식

(Multicarrier modulation), 공간적 변조 방식(Spatial modulation)과 등화기(Equalizer)에 대해 설명한다.

#### II. 수중통신 국내외 동향

수중통신 기술은 유인 잠수함의 발전과 함께 잠수함과 해상 통신의 필요성에 의해 2kHz에서 15kHz사이 가청 주파수를 이용한 아날로그 통신이 개발되었고 지금도 여러 나라의 잠수함에서 사용되고 있다. 그리고 디지털 수중 통신 기술도 가청 대역에서 작용하는 소나를 기본으로 하여 사용되고 있다.

1960년대에 들어서 시변 채널에서의 변조와 신호처리를 할 수 있게 됨에 따라 해양에서의 석유 시추와 자동무인 잠수정(AUV:Autonomous Underwater Vehicle)-모션 간 통신을 위하여 연구되기 시작했다[1].

1971년에는 로스 윌리엄(Ross Williams)과 헨리 버테

\*정회원, 인하대학교 전자공학과

\*\*정회원, 인하대학교 전자공학과

접수일자 2009.9.8, 수정일자 2009.10.3

스틴(Henry Batten)에 의해 해양의 다중경로(multipath)를 보상하는 방법이 제안되었고 채널의 확산(spread)현상을 줄일 수 있게 되었다. 1990년대 후반부터는, 일대일 통신을 넘어선 다자간(multiuser) 통신 시스템으로서, 연안 원격 감시를 위한 수중 통신망 개발을 위한 연구와 선박간의 1km에서 20km반경의 장거리 연구가 진행되어 왔다. 미국에서는 WHOI(Woods Hole Oceanographic Institution) 연구소 중심으로 100m에서 1km이내의 거리를 수년 동안 배터리의 교체 없이 저전력 통신이 가능한 근거리 수중통신 연구가 진행되고 있다. 최근 미국 국방부는 ORION(The Ocean Research Interactive Observatory Network)계획을 통해서 캐나다와 미국의 해안선에 광범위한 센서네트워크를 설치하고 영토를 방어, 감시하는 역할을 하고 있다.

우리나라의 수중 통신은 현재 동해안 및 남해안의 실험역 내의 실험에서 수 킬로미터의 거리에서 약 만 bps 정도의 데이터 전송 및 정지 영상에 대한 전송을 성공하였다. 그리고 지속적으로 수중 네트워크 구축을 위한 연구가 다방면에서 진행되고 있다.

### III. 수중 채널 환경

수중에서는 지상과 달리 전자파가 전달되지 못하므로 음파를 이용 한다. 수중통신에서 사용되는 음파는 속도가 1.5km/s로 느리고, 제한된 주파수 대역을 가지고 있으며, 시간에 따른 다중경로(time-varying multipath)와 해수면과 해저면에서의 반사가 일어나는 등 여러 문제점을 가지고 있다. 특히 바람에 의한 해수면 변화에 의해 음파가 다양하게 반사, 산란, 흡수되고, 매질의 특성상 송신 신호가 크게 왜곡되어 수신된다. 또한 온도, 염분, 수압, 해류와 해저지형 등에 의한 신호의 손실에 따른 문제점이 있다. 이러한 요소는 수중통신에서 적절한 신호처리를 위해 고려 해야 할 사항이다[2]. 수중 통신에서 신호는 크게 경로 손실, 다양한 잡음 그리고 다중경로에 의한 장애와 도플러 확산 현상으로 인해 손실이 생기게 된다.

우선 음파 경로손실(path loss)은 크게 전파되는 거리에 따른 지형적 확산(spreading)과, 매질에 의한 흡수(absorption)에 따라 발생한다. 전송경로가 직행하는 기본적인 전송방식에서 경로 손실은  $20\log(R)$ 로 거리  $R$ 에 대해 표현할수있다. 그러나 수중에서는 반사된 에너지로

인해 물의 온도가 높아지기 때문에 흡수로 인한 손실이 생긴다. 그러므로 전체 경로 손실( $TL$ )에 이러한 흡수로 인한 손실( $\alpha(f)$ )을 더해줘야 한다. 따라서 전체 경로 손실( $TL$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TL(f) = 20\log R + \alpha(f) \cdot R \tag{1}$$

여기서 흡수로 인한 손실은 시스템의 작용 주파수에 영향을 받게 되고 특정 범위의 밴드 안에 있게 된다. 따라서 흡수로 인한 손실은  $\alpha(f)R < 10dB$ 라는 특정한 영역 내에 존재하게 된다.

잡음은 사람에 의해 만들어지는 것과, 고래나 새우 등과 같은 물속 생물들에 의해서 또는 빙하의 분해나 비, 지진 등에 의한 지역적 특성에 의해 생성되기도 하고, 난류나 배의 이동, 수면의 변화 등에 의해서도 생성된다. 잡음은 데이터 전송 비율에 대한 신뢰성 문제와 관련이 있기 때문에 궁극적으로 신호 대 잡음 비(SNR : Signal-to-noise ratio)에 영향을 주게 된다.

음파의 다중경로는 지연확산(Delay spread)현상을 일으키기 때문에 ISI를 발생시켜 수중 통신에 많은 장애를 준다. 수면과 해저면 사이의 반사 에너지들이 수신기와 송신기 사이에 많은 경로(path)들을 생성하게 되고, 특히 전방향성 소스를 사용할 때에는 일정하지 않은 수면으로 인해 경로들이 더 다양하게 된다. 도플러 확산 현상은 수신기와 송신기 사이의 움직임이나 수중 채널의 움직임에 의해 주파수 변화를 일으킨다. 처음 주파수가  $f_0$  라면 도플러에 의해 이동된 주파수  $f_d$ 는 다음과 같이 식(2)로 나타낼 수 있다. 이때,  $v$ 는 이동 속력을 나타내고  $c$ 는 빛의 속도( $3 \times 10^8$  m/s)를 나타낸다.

$$f_d = -f_0(v/c) \tag{2}$$

만일 범선과 같이 이동이 느리고 이동 경로가 예측가능 하다면 도플러 현상을 보상할 수 있다. 그러나 예측할 수 없는 불규칙한 움직임이 계속적으로 빠르게 나타난다면 채널 보상에 어려움이 많다. 높은 데이터 전송률을 갖는 통신 시스템에서는 높은 중심 주파수를 갖는 넓은 주파수 대역을 필요로 하지만 경로 손실이 많다. 또한 높은 중심 주파수에 따라 도플러 확산도 커지게 된다. 하지만 채널에 대한 신호는 짧은 펄스를 사용함으로써 도플러 확산 현상을 막을 수 있다.

## IV. 수중 통신

### 4.1 기존의 전송 방식

초기의 수중 통신 시스템은 단순한 변조 방식을 사용했다. 그러나 이러한 방식은 깊은 물 속에서 수직 통신(vertical links)과 같은 적은 변이를 갖는 채널에 사용되는 시스템이었다. 수직 통신은 캐리어의 위상(Phase)이 거의 변화하지 않기 때문에 신호의 전송이 깨끗하고 시간의 지연(delay)을 거의 겪지 않거나 전혀 겪지 않게 된다.

수중통신의 변조 방식은 진폭(ASK)과 주파수(FSK)에 대한 변조 방식과 위상(PSK)에 대한 변조 방식이 있다. ASK는 깊은 바다에서 경로가 단순하고 반사가 적은 수중통신에 사용된다. 대부분의 ASK 방식은 ON/OFF 변조 방식을 사용하고 다중(multilevel) 신호에서는 사용하지 않는다. 다중 진폭 복조(demodulation)는 수중 채널 변화에 민감하게 변화하기 때문에 이런 경우에는 FSK를 사용한다. 그러므로 FSK는 진동이 많이 일어나는 육지와 가까운 바다나 높은 신뢰성을 필요로 하는 수중 채널에서 사용된다. 그러나 이 방법은 적은 전력을 가지고 많은 양을 동기화시켜야 하기 때문에 이에 따른 어려움이 많다.

1980년대 수신기에서 위상을 검출 하는 coherent 통신이 수심이 깊은 수직적 통신에 사용되었고 1990년대 초기 다중경로 채널의 coherent 통신이 주목 받게 되었다. 그 후 전송 효율이 약 0.5 bits/Hz의 시변수중 채널을 이용하여 많은 데이터를 전송하기 위한 다중경로 효과를 보완하는 적응적 등화기(adaptive equalization)들이 개발되었다.

### 4.2 시역전(Time Reversal Mirror) 기술

수중에서 송 수신 채널은 대칭적이기 때문에 한 곳에서 수신된 신호를 원래 신호를 보냈던 곳으로 재전송 할 때 신호를 역전 시키면 원신호 상태로 수신할 수 있다. 이것이 시역전(TRM : time reversal mirror)기술의 기본적인 원리이다. 그림 2 는 시역전 기술에 대한 개념도를 나타낸다. 알려진 신호  $x(t)$ 가 탐침음원으로부터 파동경로를 따라 전송될 때 시역전 배열의  $k$ 번째 트랜스듀서에서 수신되는 신호는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$y_k(t) = x(t) * g_k(t) \quad (3)$$

여기서  $*$ 는 곱셈연산을 의미하고  $g_k(t)$ 는 그린 함수로 표시되는 채널 임펄스 응답이며 각 트랜스듀서에 도달하는 다중경로의 수가  $L$ 이라 할 때 아래의 식과 같이 각 경로의 합으로 표현된다.

$$g_k(t) = \sum_{l=1}^L g_{k,l}(t) \quad (4)$$

시역전 기법은  $K$ 개의 트랜스듀서에 수신된 신호의 공액 복소값을 시간 반전 형태  $y_k^*(-t)$ 로 변환하여 각각의 트랜스듀서에서 재전송한다. 그러면 원래의 PS위치에서 수신되는 신호  $z(t)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$z(t) = x^*(-t) * \left| \sum_{k=1}^K g_k(t) * g_k^*(-t) \right| \quad (5)$$

시역전 효과를 쉽게 보기 위해 식(5)를 주파수 상의 표현으로 정리하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Z(w) = X^*(w) \sum_{k=1}^K |G_k(w)|^2 \quad (6)$$

주파수 상에서 수신된 신호  $Z(w)$ 는 시역전 채널의 전달함수로서 PS에서 전송한 신호  $X(w)$ 와 채널의 이득 성분인  $\sum_{k=1}^K |G_k(w)|^2$ 로 표시된다.  $\sum_{k=1}^K |G_k(w)|^2$ 는 각각의 다중경로에 의한 공간 다이버시티 채널 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 트랜스듀서로부터 재전송된 신호는 트랜스듀서가 채널의 응답특성을 모르고 있더라도 채널 상태 정보를 알고 보내는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.

### 4.3 다중 캐리어(Multi-carrier) 변조 기술

다중 캐리어 변조 방식은 광대역 단일 캐리어 통신이 어렵기 때문에 전체 대역을 좁은 대역으로 나누고 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 시스템을 적용하여 주파수 영역에서 간단한 등화기를 사용하는 방식이다. OFDM 변조 방식과 복조 방식은 FFT를 이용하면 쉽게 사용할 수 있다. OFDM 시스템은 OFDM 심볼 사이에 ISI를 제거하기 위해 보호 구간(guard

period)이 사용된다. 만일 채널의 확산이 길어지면 보호 구간의 길이가 더 길어져야 하기 때문에 주파수 효율에 영향을 준다. 만일 코딩된 신호를 OFDM에 사용할 때, 연속되는 OFDM심볼은 채널 페이딩에 의한 오류를 줄이기 위해 전체 부 캐리어에 걸쳐서 채널 코딩을 적용한다. OFDM시스템은 채널의 도플러 효과에 매우 민감하게 영향을 받는다. 수중 통신 시스템에서 반송 주파수는 일반적으로 도플러 주파수에 비해 크기 때문에 OFDM의 부 캐리어에서 도플러 효과를 처리해야 한다. 그 예로 [3]에서는 단일 적합 변수 추정으로 도플러 효과를 보상하는 OFDM시스템이 나와있고, [4]에서는 알고 있는 두 개의 신호 사이의 시간을 측정하여 도플러 이동을 측정하고, 효율적인 선형 삽입기(interpolator)를 이용하여 도플러 이동을 제거하는 방법이 기술되어 있다. 이 외에도 여러 변조기와 등화 기술이 사용되고 있다.

#### 4.4 공간(Spatial)적 변조 기술

다음과 같이 식(4)로 나타낼 수 있다. 채널용량(capacity)의 증가시키기 위해서는 다중 입력, 다중 출력(multiple input multiple output, MIMO) 기술과 시공간 코딩을 사용한다. 이때  $g(t)$ 는 식(3)과 다르게

$$g(t) = \sum h(t) \times h_i(-t) \tag{7}$$

수중 통신 시스템에서 MIMO의 장점은 지중해에서 STTC의 방법으로 2개의 신호를 전송하고 LSTC방법으로 4개의 신호를 전송한 실험을 통해 증명되었다 [5]. 이 실험에서는 주파수 대역의 전력 효율성이 단일 변조 방식보다 더 증가 된 것을 보였다. 즉 ISI가 제한된 채널에서 공간적 변조 방식을 적용하면 전송 전력의 증가 없이 데이터 전송률이 증가하게 된다는 것이다. MIMO-OFDM방식은 1.5km 떨어진 2개의 전송기와 4개의 수신기 사이에서 1/2의 비율로 채널 부호화를 하고, 12kbps의 데이터 속도를 사용 했을 때, 오류률이 낮은 성능을 보여준다[6]. 수신기와 송신기의 배열(arrays) 이득이 공간 간섭 크기보다 더 크다면 MIMO 시스템을 사용하여 시스템의 성능을 증가시킬 수 있다. 이 변조 기술은 앞으로 무인 잠수함 같이 움직이는 장치 에서의 송수신기의 위치가 변화하는 환경에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

#### 4.5 채널 등화(Equalization)

수심이 얇은 공간에서의 통신 채널은 긴 지연에 의한 확산과 높은 도플러 확산을 갖는다. 그리고 채널의 다중 경로 도달 시간이 길어지면 ISI가 발생한다. 이때 송신단에서 DFE(decision feedback equalizer)를 이용하면 효과적으로 ISI 문제를 해결할 수 있지만 연산량이 늘어난다. 만일 이전 채널 응답의 다중 경로를 줄이면 적은 수의 등화기를 사용할 수 있고 성능도 증가시킬 수 있게 된다. 즉 채널의 충격(impulse) 응답을 짧게 하여 수중 채널을 통해 전송한다면 수신기는 간편하게 ISI를 제거 할 수 있다[7].

DFE는 루프 내에서 오류가 발생하면 피드백으로 인해 오류가 계속해서 확산된다. 따라서 낮은 비트 대 오류률을 갖기 위해 선행 오류 수정(forward error correction, FEC) 작업이 부가적으로 필요하다. 이 작업을 하기 위해서는 터보복호기(Turbo decoders)를 이용해 등화기를 반복적으로 복호하면 좋은 수신성능을 얻을 수 있다.

1km범위의 얇은 수중에서 8개의 음파 탐지기를 가지고 실험한 결과 이 알고리즘의 성능이 DFE보다 조금 더 우수하게 나타났다. 그러나 터보등화기에서 채널의 길이에 따라 연산량이 지수승으로 복잡해지는 단점이 있다. 이를 위해 MAP(maximum a posteriori probability) 등화기와, PSP(per-survivor processing)를 사용하는 기술이 개발 되었다.

### V. 결 론

수중 통신은 해양 자원 개발과 선박, 잠수함의 통신 등에 이용되는 해양 개발을 위한 기초 인프라 기술로써 중요할 뿐 아니라 수중과 지상을 연결하는 네트워크 기반 구축을 위해서도 수중통신 연구가 지속적으로 필요하다.

### 참 고 문 헌

[1] M. Chitre, S. Shahabudeen, and M. Stojanovic, "Underwater Acoustic Communications & Networking: Recent Advances and Future Challenges," *Marine Technology Society Journal*, vol.Spring2008, pp.103-116,2008.

- [2] A. B. Baggeroer, "Acoustic Telemetry - An overview," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol.OE-9, no.4,1984.
- [3] M. Stojanovic, "Low Complexity OFDM Detector for Underwater Acoustic Channels," in *OCEANS2006*, pp.1-6,2006.
- [4] B. S. Sharif, J. Neasham, O. R. Hinton, and A. E. Adams, "A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communications," *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol.25, pp.52-61,2000.
- [5] S. Roy, T. Duman, L. Ghazikhanian, V. McDonald, J. Proakis, and J. Zeidler, "Enhanced underwater acoustic communication performance using space-time coding and processing," in *OCEANS '04 MTS/IEEE*, 2004, pp. 26-33 Vol.1.
- [6] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, L. Freitag, J. Huang, and P. Willett, "MIMO-OFDM Over An Underwater Acoustic Channel," in *OCEANS'07 Vancouver, Canada*, 2007.
- [7] S. Roy, T. M. Duman, and V. McDonald, "Error Rate Improvement in Underwater MIMO Communications Using Sparse Partial Response Equalization," in *OCEANS2006*pp.1-6,2006.

※ 본 논문은 인하대학교 연구비 지원으로 쓰여 졌습니다.

#### 저자 소개

##### 김 남 리(정회원)



- 2009년 02월; 인하대학교 전자공학사
  - 2009년 3월 - 현재; 인하대학교 전자공학과 석사과정
- <주관심분야 : 수중통신, 차세대 무선 이동통신 >

##### 정 재 학(정회원)



- 1988년. 02월: 연세대학교 전자공학과 공학사
  - 1990년 02월: 연세대학교 전자공학과 공학 석사
  - 2000년; University of Texas at Austin 전기전산학과공학박사
  - 1990년 - 1996년; 선임연구원, 신도리코
  - 2000년 - 2001년; Research Fellow, University of Texas at Austin
  - 2001년 - 2004년; 수석연구원, 삼성종합기술연구원
  - 2005년 - 현재; 부교수, 인하대학교
- <주관심분야 : cognitive radio, 차세대 무선 이동 통신, MIMO-OFDM, UWB,cross layer 설계>