수중 무선 광 통신을 위한 변조 기술 분석

허준, 남해운
한양대학교
{inas2056, hnam}@hanyang.ac.kr

An Analysis into modulation technology for underwater optical wireless communication

Jun Hur, Haewoon Nam
Hanyang Univ.

요 약

본 논문은 추후에 군사, 산업 및 과학 분야에서 큰 관심을 받고 있는 수중 무선 광 통신의 변조 방식에 대해 조사하고, 각 변조 방식의 대한 설명과 장점 및 한계에 대해 설명하고 있다. 많은 관심을 받고 있는 수중 무선 통신은 국방 해양 시스템의 구현을 가능하게 하고 있다. 최근에는 무선 주파수 및 음향의 대역폭과 데이터 전송에 대한 요구가 증가함에 따라 수중 무선 광 통신을 위한 변조 기술들을 각 상황에 맞게 분류하였다.

Ⅰ. 서 론

지난 몇 년 동안 지상, 우주에서 무선 주파수 및 음향의 대역폭과 데이터 전송 속도를 높이는 방향으로 연구가 진행되고 있으며 수중 무선 광 통신 기술에 대한 다양한 발전이 이루어졌다.

본 논문에서는 수중 무선 광 통신에서 사용하는 다양한 변조 기술의 성능을 비교하여 설명한다. 구체적으로 온-오프 키잉(OOK), 펄스 위치 변조(PPM), 펄스 폭 변조(PWM), 디지털 펄스 간격 변조(DPIM), 위상 편이 변조(PSK), 직교 진폭 변조(QAM), 편광 편이 키잉(PolSK), 서브캐리어 강도 변조(SIM)의 변조 방식을 비교하여 살펴본다.

Ⅱ. 수중 무선 광 통신

무선 광 통신 변조 방식은 직접변조와 외부 변조 방식으로 구분된다. 가장 쉬운 방식인 직접 변조는 광원을 동작하는 전류를 직접 변조 되는 위치를 파악하는 방법이다. 외부 변조에서는 일정한 전력을 내는 레이저의 빛이 외부 변조기의 출력 단을 통과시키는 것으로 외부 변조기의 출력에서 변조된 광 전력을 얻지만 상대적으로 높은 구동 전류를 필요로 한다.

수중 무선 광 통신의 변조는 크게 두 가지인 강도 변조와 코히어런트 변조로 분류된다. 가장 많이 사용되는 변조는 강도 변조로서 소스 데이터가 광 캐리어 강도의 변화에 따라 변조되는 방식으로, 메시지 신호가 전송되는 것과 직접적/외부장치를 이용하여 구동 전류를 바꿔 얻을 수 있는 변조이다. 또한 강도 변조는 저렴한 비용과 함께 비교적 복잡하지 않기 때문에 수중 무선 광 통신 시스템에서 일반적으로 사용된다. 다른 방법인 코히어런트 변조는 로컬 발진기를 이용하여 호모 다인 검출 또는 헤테로 다인 검출로 다운 변환하는 변조이다. 여기서 코히어런트 변조는 큰 전력을 소비하며 복잡성과 높은 비용으로 인해 수중 무선 광 통신 시스템에는 비교적 덜 사용된다.

다양한 시스템 성능에 많은 영향을 주는 기능으로 인해 수중 무선 광 통신 채널 변조 기술은 최근에 많은 연구 주제가 되었다. 변조 기술의 선택 기준은 응용 분야와 함께 설계 분잡도가 주요하다. 수중 무선 광 통신은

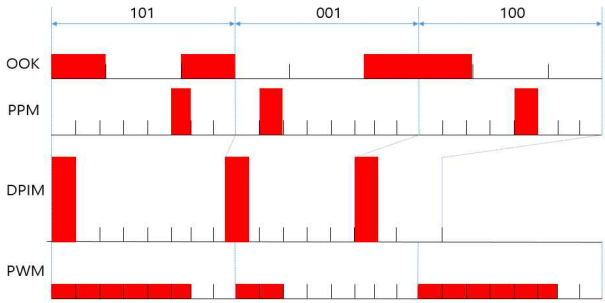

그림 1. 변조 방식에 대한 비트 기호 매핑 그림

크게 영향을 받는 심각한 흡수와 산란 효과와 같은 수중 환경만의 특수한 영향을 받기 때문에 변조 방식에 따라 송수신 성능이 크게 차이가 난다.

강도 변조 기술로서는 온-오프 키잉(OOK)와 펄스 위치 변조(PPM)이 있으며, 위상 편이 키잉 기술(BPSK, QPSK, QAM 등)에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[1].

Ⅲ. 수중 무선 광 통신의 변조 기술

구현이 간단한 온-오프 키잉(OOK)는 자유 공간 광 통신에 사용된다. 온-오프 키잉(OOK)변조는 이진 레벨 변조 방식으로서 수중 환경에서 흡수 및 산란 효과로 인해 전송 된 신호는 채널 페이딩으로 인해 상당히 어려움을 느낀다. 이러한 채널 페이딩을 줄이기 위해 대부분 수중 무선 광 통신 온-오프 키잉 수신기에 동적 임계값을 적용 시킨다. 또한, 페이딩 추정치를 기반으로 동적 임계값이 결정된다. 이러한 온-오프 키잉 변조의 장점은 구현이 비교적 간단하며, 단점은 대역폭의 효율이 낮다.

동적 임계 값이 필요로 하지 않는 장점이 있는 펄스 위치 변조(PPM)는 온-오프 키잉(OOK)보다 전력 효율이 우수하여 장거리 통신 또는 수중 센서 중 배터리 작업에 적당하다[2]. 하지만 펄스 위치 변조 방식은 대역폭 사용률이 낮고 트랜시버가 더 복잡한 단점을 가지고 있다. 특히, 타이밍 동기화에 있어서 타이밍 지터 또는 비 동기화는 시스템의 비트 에러율

(BER) 성능을 심각하게 저하시키는 요소이다.

펄스 폭 변조(PWM)는 스펙트럼 효율을 가지며 심볼 간 간섭(ISI)에 저항력이 크다는 장점이 있지만, 펄스 폭 변조는 높은 전력 요구 사항이 필요하다는 단점이 존재한다. 펄스 위치 변조(PPM) 및 펄스 폭 변조(PWM)은 두 방식 모두 슬롯 및 심볼 단위의 동기화가 필요로 한다. 심볼 길이 시간 변조 방식 및 심볼 동기화를 필요로 하지 않는다는 장점을 가지는 디지털 펄스 간격 변조(DPIM)에는 심볼을 전송하기 전 고정된 심볼 끝을 기다리지 않아야하기에 대역폭 효율성이 높은 장점이 있어 널리 구현된다. 디지털 펄스 간격 변조(DPIM)은 수신기에서 신호를 복조 할 때 오류 전파가 단점이다. 디지털 펄스 간격 변조(DPIM)에서 'ON' 광 펄스 슬롯이 전송이 된 후에 여러 'OFF' 슬롯이 전송되며, 슬롯의 수는 전송 된 심볼의 10진수 값에 따라 달라진다. 또한 연속적인 'ON' 펄스 전송에 대비하기 위해 통상적으로 가드 슬롯이 추가 된다. 그림 1은 온-오프 키잉, 펄스 위치 변조, 펄스 폭 변조, 디지털 펄스 간격 변조에 상대적 위치를 활용한 데이터 심볼이다.

광 주파수에서 코히어런트 변조를 수중 무선 광 통신에 사용하기 위해서는 해수면의 높은 분산 효과를 극복하여야 한다. 그러기 위해서는 사전에 변조 된 신호에 강도 변조를 적용해야한다. 이러한 코히어런트 변조에는 직교 진폭 변조(QAM), 위상 편이 변조(PSK) 그리고 편광 편이 키잉(PolSK)가 있다. 직교 진폭 변조(QAM)은 높은 시스템 스펙트럼 효율과 함께 노이즈 제거에 좋은 장점이 있으나, 높은 구현 복잡성 및 높은 비용이 있다. Sui[3]는 온-오프 키잉, 펄스 위치 변조와 코히어런트 변조인 위상 편이 변조, 주파수 편이 변조를 비교하였다. 결과는 위상 편이 변조가 비트 에러율(BER)측면이나 데이터 속도 면에서는 최상의 성능을 보여주었지만, 전력 효율성이 떨어지는 단점이 있다.

수중 무선 광 통신에 있어 전력 효율성에 대한 단점을 극복하기 위해 편광 편이 키잉(PolSK)이 도입되었다[4]. 편광 편이 키잉에서 신호는 빛의 편광을 변경해 변조 되는데, 광학 신호의 진폭과 위상 또는 강도보다 민감하지 않기 때문에 기타 채널 간섭에 대한 내성이 높게 나타난다. 이러한 편광 편이 키잉은 낮은 신호 대 잡음(SNR) 환경에서 수중 무선 광 통신에 적합하며, 송신기의 후방 산란을 억제하거나 레이저의 위상 노이즈에 대한 내성이 더 좋은 장점들을 가지고 있다. 그러나 편광 편이 키잉은 수중 무선 광 통신에 적합하지만 데이터 속도가 낮고 전송거리가 짧은 단점을 가지고 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 Dong[5]은 새로운 편광 펄스 위치 변조(P-PPM)를 발표 하였고, 이 변조 방식은 서로 다른 편광 방향으로 일련의 펄스 위치 변조 심볼을 전송해 기존 펄스 위치 변조와 편광 편이 키잉을 결합한 변조 방식이다. 편광 펄스 위치 변조는 수중 무선 광 통신의 전송 대역폭과 거리를 늘릴 수 있는 장점이 있다.

마지막으로, 수중 무선 광 통신에 또 다른 변조 방식이 있는데 높은 스펙트럼 효율성을 가진 서브캐리어 강도 변조(SIM)가 있다[6]. 서브캐리어 강도 변조를 이용하게 되면 직교 주파수 분할 다중화(OFDM)도 사용가능하다는 장점이 있으나, 복잡한 변조 및 복조 장치가 필요하며 평균 전력 효율이 매우 낮다는 단점이 존재한다. 본 논문에서는 온-오프 키잉, 펄스 위치 변조, 디지털 펄스 간격 변조, 위상 편이 변조, 직교 진폭 변조, 편광 편이 키잉, 서브캐리어 강도 변조에 대해 분석하였으며, 이에 대한 장점과 단점을 표 1에 나타내었다.

표 1. 수중 광 무선 통신 변조 방식

수중 광 무선 통신 변조	장점	단점
온-오프 키잉(OOK)	간단하고 값이 싸다	에너지 효율 낮음
펄스 위치 변조(PPM)	높은 전력 효율	시간이 많이 필요
디지털 펄스 간격 변조 (DPIM)	높은 대역폭 효율	복조 장치가 복잡
위상 편이 변조 (PSK)	수신 감도가 높음	높은 구현 복잡성 및 높은 비용
직교 진폭 변조 (QAM)	높은 시스템 스펙트럼 효율성 및 노이즈 제거 향상	높은 구현 복잡성 및 높은 비용
편광 편이 키잉 (PolSK)	수중 난류에 대한 더 높은 내성	짧은 전송 거리 및 낮은 데이터 속도
서브캐리어 강도 변조 (SIM)	시스템 용량 및 저비용 증가	복잡한 변조/복조 장치 및 낮은 평균 전력 효율로 어려움을 겪음

Ⅳ. 결론

본 연구에서는 최근 수중 무선 광 통신을 위한 변조 기술에 대한 조사를 진행하였다. 각 상황에 알맞은 변조 기술을 분류하여 비트 에러율(BER) 측면에서는 위상 편이 변조(PSK)가 최상의 성능을 가지고, 낮은 신호 대 잡음(SNR)환경에서는 편광 편이 키잉(PolSK)가 적합하다. 최근 몇 년 동안 수중 무선 광 통신의 다양한 변조 방식에 대한 연구가 이루어졌다. 원활한 수중 무선 광 통신 시스템은 배터리 내장이 필수 요소이기 때문에 에너지 효율이 중요하다. 수중 무선 광 통신은 세계적으로 아직 그 연구가 초기 단계에 머물고 있지만, 특정분야 특히 군수 산업에 있어 효용성 있는 경제적 파급효과를 불러일으킬 수 있는 분야이기 때문에 지속적인 연구가 필요할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019R1A2C109009612).

참 고 문 헌

[1] M. Sui, X. Yu and F. Zhang, "The Evaluation of Modulation Techniques for Underwater Wireless Optical Communications," International Conference on Communication Software and Networks, 2009, pp. 138-142.

[2] Y. Fan and R. J. Green, "Comparison of pulse position modulation and pulse width modulation for application in optical communications," Opt. Eng., vol. 46, no. 6, 2007, Art. no. 065001.

[3] M. Sui and Z. Zhou, "The Modified PPM Modulation for underwater Wireless Optical Communication," International conference on Communication Software and Networks, 2009, pp. 173-177.

[4] W. C. Cox, B. L. Hughes and J. F. Muth, "A polarization shift-keying system for underwater optical communications," OCEANS, 2009, pp. 1-4.

[5] Y. Dong, T. Zhang and X. Zhang, "Polarized pulse position modulation for wireless optical communications," Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), 2013, pp. 1-5.

[6] C. Gabriel, M. Khalighi, S. Bourennane, P. Léon, and V. Rigaud, "Investigation of suitable modulation techniques for underwater wireless optical communication," in Proc. Int. Workshop Opt. Wireless Commun. (IWOW), Pisa, Italy, Oct. 2012, pp. 1 - 3.