

군 저궤도 위성통신 시스템에 적합한 DCT-s-OFDM 기반 웨이브폼의
항재밍 기능 개선 및 PAPR 감소 기법 제안

류영빈, 문지훈, 홍근표, 송동호
한화시스템

{yeongbin94.ryu, jhmoon100 keunpyo.hong, dongho37.song}@hanwha.com

Anti-Jamming enhancement and PAPR Reduction Methods for DCT-s-OFDM
in Military LEO Satellite Communication Systems

Yeongbin Ryu, JiHun Moon, Keunpyo Hong, Dongho Song
Hanwha Systems

요약

최근, Starlink와 같은 저궤도 위성 통신 서비스가 상용화 되고 여기에 사용되는 통신 기법이 OFDM 기반의 통신 기법으로 추정 및 분석됨과 함께 저궤도 위성 통신을 활용한 5G NTN 표준 및 향후 6G를 위한 표준 제정 및 개발에도 기존 표준에서 사용되고 있던 OFDM 기반의 물리 계층 기술이 사용될 것으로 예상됨에 따라 기존 위성 통신 분야에서도 높은 PAPR로 사용이 적었던 OFDM 기반의 통신 기술을 적용하려는 분위기가 높아지고 있다. 따라서 본 논문에서는 군용 저궤도 위성 시스템에 적합한 OFDM 기반의 구조를 제안하고, 기존 위성 통신 시스템에 적용되기 힘든 이유 중 하나인 높은 PAPR을 감소하는 기법 및 군 통신에서 중요한 요소인 항재밍 성능을 개선하여 기존에 사용하던 일반적인 OFDM 기법과 비교 분석한다.

주제어 : 저궤도 위성 통신, DCT-s-OFDM, DFT-s-OFDM, PAPR 감소 기법

I. 서론

최근 저궤도 위성 통신 서비스를 상용화한 Starlink에서 사용되는 통신의 물리 계층 기술이 OFDM 기반의 기술일 것으로 추정 및 분석된 자료 [1]와 저궤도 위성 통신을 사용한 3GPP의 5G NTN 및 6G 표준에 대한 관심이 높아짐에 따라 기존 위성 통신에서 높은 PAPR(Peak to Average Power Ratio)로 사용이 적었던 OFDM 기반의 기술을 위성 통신에 사용하려는 연구가 진행되고 있다. 이에 따라 우리 군 역시 낮은 전송 지연 등의 장점을 가진 저궤도 위성 통신망에 사용되는 물리 계층으로 OFDM 기반의 기술을 적용하려는 연구를 진행하고 있다. 그러나 앞서 말한 기존 단일 반송파 기반 대비, OFDM 기반은 높은 PAPR로 인한 전력 증폭기의 부담 및 이로 인한 성능 열화에 대한 단점을 갖고 있고 이러한 문제는 생존성 및 보안이 최우선인 군 통신 특성상 사용되기 어려운 이유가 된다.

따라서, 본 논문에서는 기존 OFDM에서의 높은 PAPR을 감소시키기 위해 3GPP의 4G 및 5G의 상향링크에서 사용되는 DFT-s-OFDM(또는 SC-FDMA)를 응용한 DCT(Discrete Cosine Transform)-s-OFDM 기반의 기술이 기존 기술 대비 PAPR의 감소를 이룰 수 있음을 보이고, 군 통신에서 필수 조건인 재밍 환경에서의 성능 역시 개선을 이룰 수 있음을 보인다.

II. 기술 배경

3GPP 이동통신 표준은 4G 이후로 OFDM 기반의 통신 기술을 활용하고 있는데, 이는 주파수 효율 및 자원 할당의 이점을 갖는 반면 주파수 영역에서의 신호가 시간 영역으로 변환되는 과정에서 동위상이 합해짐에 따라 신호의 크기가 순간적으로 커져 PAPR이 증가하는 단점을 가지고 있다. PAPR이 증가하는 문제는 전력 증폭기의 동작 지점을 넘어감으로써 신호의 포화를 일으켜 성능 열화를 일으킬 수 있고, 이를 방지하기 위해 전력

증폭기의 동작 지점을 Back-off 시키면 증폭기의 효율이 떨어지는 문제가 발생한다. 앞선 문제는 특히 기지국에 비해 저가의 전력 증폭기를 사용하는 단말에 치명적이므로, 이러한 문제를 일부 해결하고자 4G 및 5G에서는 기존 OFDM 신호를 생성하는 과정에서 DFT를 추가하여 송신 신호를 마치 단일 반송파와 유사하게 변환하는 기법을 사용하여 PAPR을 줄이고 있다. 이러한 기술의 발전은 앞서 설명한 PAPR이 높은 단점으로 인해 잘 사용되지 않던, 위성 통신 분야에서도 OFDM 기반의 기술이 사용될 수 있는 가능성을 제시하였는데 특히, 최근 분석된 자료에 의하면 저궤도 위성 통신 서비스를 상용화한 Starlink와 Oneweb의 일부 링크에 사용된 물리 계층이 OFDM 기반의 기술로 밝혀지며, 우리 군에서도 저궤도 위성 통신망에 해당 기술을 접목 시키려는 연구를 진행하고 있다. 이 중 앞서 언급한 DFT-s-OFDM은 PAPR을 감소시키는 장점뿐만 아닌 군 통신에서 중요한 요구 사항인 적의 재밍 공격에 일반적인 OFDM에 비해 높은 내성을 보여준다. 구체적으로 가장 대표적인 재머인 톤 재머에 의한 재밍을 기존 OFDM 신호가 받을 경우 단일 서브캐리어가 톤 재머의 영향을 전부 받게 되면, 해당 서브캐리어는 복구가 어렵게 되고 이에 따라 수신 성능 열화에 영향을 크게 받게 된다. 그러나 DFT-s-OFDM은 전체 서브캐리어를 해당 대역 내에 일종의 확산을 시키는 기술이므로 단일 서브캐리어가 재머의 영향을 받아도 수신에서의 IDFT를 통한 역확산을 통해 일부 복구가 가능하게 되어 일반적인 OFDM에 비해 톤 재머에 보다 강건한 모습을 보인다. 이러한 장점으로 군 위성 통신에 OFDM 기반의 기술을 사용할 경우 DFT-s-OFDM 기법은 충분히 고려될 수 있다. 하지만 기존의 중계기 역할을 주로 수행하던 위성 통신과 달리 최근 위성 통신의 경우 망 관리 및 자원 할당 등의 기지국 역할을 위성이 일부 수행해야 하므로 DFT-s-OFDM 기술을 보다 효과적으로 사용하기 위해서는 증폭기의 효율을 높이기 위해 PAPR을 감소시킬 수 있는 추가적인 기법에 대한 연구

가 필요하다. 이에 따라 다음 절에서는 DFT-s-OFDM 기술을 응용한 DCT-s-OFDM을 활용하여 기존 DFT-s-OFDM에 비해 PAPR을 감소시키고 버스트 에러 특성을 갖는 톤 재머에 강건한 특성을 갖음을 보인다.

III. PAPR 감소 및 항재밍 기능 개선을 위한 DCT-s-OFDM 기법

기존의 이동통신 표준에서 사용되던 DFT-s-OFDM 기술은 일반적인 OFDM 기술에 비해 낮은 PAPR 특성을 보이는데, 이는 심볼 매핑을 수행한 신호를 DFT를 거침으로써 일종의 주파수 확산을 수행하면서 이후 IFFT를 통한 시간 영역으로의 변환 과정에서 신호가 동위상을 갖을 확률을 낮추기 때문이다.[2] 이러한 특성은 신호의 PAPR을 줄일 뿐만 아니라, 적의 재밍과 같은 방해 신호를 수신 시 IDFT를 거침으로써 역확산 효과를 얻어 재밍 신호를 분산시키는 효과를 지닌다. 그러나 군 위성 통신 특성상 재밍 신호의 대응 및 낮은 SNR에서의 안정적인 통신을 위한 개선된 구조가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 기존의 DFT-s-OFDM 구조에서 DFT와 IFFT 대신 DCT와 IDCT를 수행하고 Companding 과정을 수행하여 BER의 성능 개선 및 PAPR의 감소를 동시에 이루는 구조를 제안한다.

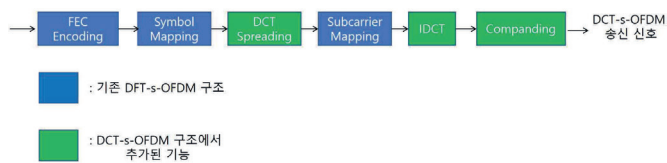


그림 1. 제안하는 DCT-s-OFDM 구조

그림1은 제안하는 DCT-s-OFDM의 구조이다. 기존의 DFT-s-OFDM 구조와의 차이점은 DFT, IFFT 대신 DCT, IDCT를 사용한점인데 이로 인해 신호의 전체 에너지가 저주파 영역에 분산되고 이는 잡음을 갖는 환경에 대해 보다 강건한 특성을 지니게 한다. 또한, 재밍 환경에서 IDFT를 통한 역확산시 재머의 영향을 끌고루 분산시키는 DFT-s-OFDM과 달리 특정 영역에 에너지를 분산시키는 DCT의 특성상 IDCT로인한 역확산 시 재밍 신호의 분산 영향이 상대적으로 작아져 톤 재머와 같은 재머에 보다 효과적인 항재밍 성능을 보인다. 이와 함께 Companding 기능이 추가로 사용되는데 이는 IDCT를 거친 신호의 진폭을 일정하게 조정하는 역할을 함으로써 기존 OFDM 기반의 신호의 단점인 PAPR을 감소시키는 특성을 보인다.

본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법과 기존 일반적인 OFDM 및 DFT-s-OFDM과의 재밍 환경에서의 BER 성능 및 PAPR을 비교하였다.

시뮬레이션 환경은 QPSK 변조 신호에 약 60개의 서브캐리어를 사용하고, 1024-point의 IFFT 및 IDCT를 사용하였으며, 시뮬레이션에 사용된 재머는 톤 재머를 사용하였다.

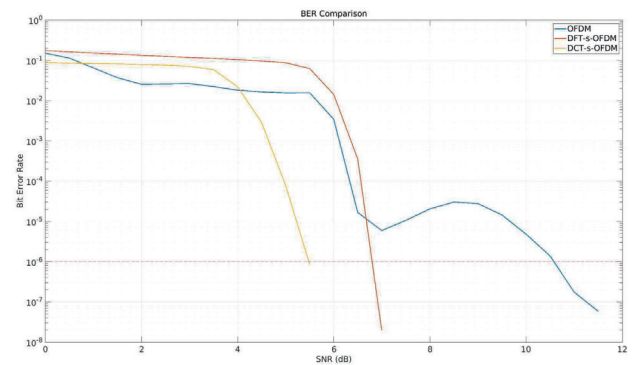


그림 2. OFDM, DFT-s-OFDM, DCT-s-OFDM의 재밍 환경에서의 BER 성능 비교

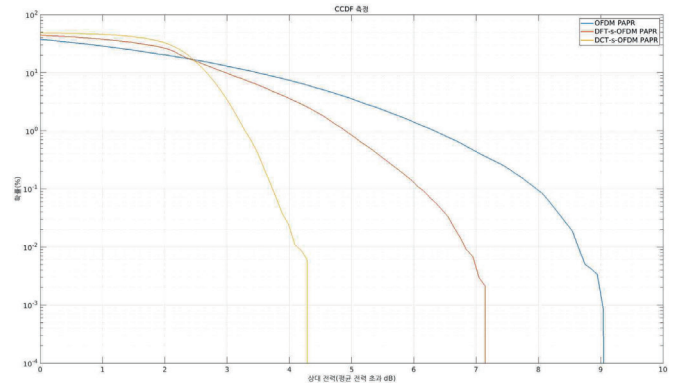


그림 3. OFDM, DFT-s-OFDM, DCT-s-OFDM의 PAPR 성능 비교

시뮬레이션 결과 재밍 환경에서 안정적인 통신이 가능한 BER이 10^{-6} 이라고 가정할 때 기존의 OFDM 신호의 경우 약 10.5dB, DFT-s-OFDM은 6.8dB, DCT-s-OFDM은 5.48dB로 항재밍 성능이 가장 뛰어남을 보였다. 또한, PAPR의 경우 DCT-s-OFDM의 경우 OFDM에 비해 약 4.8dB, DFT-s-OFDM에 비해 약 2.8dB정도의 이득을 얻을 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 군 위성 통신에 적합한 웨이브폼 기술로 기존 DFT-s-OFDM 기반의 기술을 응용한 DCT-s-OFDM의 구조를 제안하고 기존 OFDM과 DFT-s-OFDM에 비해 재밍 환경에서의 BER 성능 및 PAPR의 성능이 더 뛰어남을 보였다. 향후 DCT-s-OFDM 기반의 기술을 제대로 활용하기 위해서 저궤도 위성 통신 환경에서의 높은 도플러 극복 및 채널 추정 등의 추가적인 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-079)

참고 문헌

- [1] Todd E Humphreys, Peter A. Iannucci, (2023). "Signal Structure of the Starlink Ku-Band Downlink", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 59, issue. 5, pp. 6016-6030, 2023.
- [2] 3GPP TS 36.211 Release 16. pp. 82