

비지상네트워크의 요구사항을 고려한 OTFS 시스템 파형 설계

김시환, 최지환
한국과학기술원, 항공우주공학과

sihwankim@kaist.ac.kr, jhch@kaist.ac.kr

OTFS Waveform Design for the Requirements of Non-Terrestrial Networks

Sihwan Kim, Jihwan Choi
Department of Aerospace Engineering, KAIST

요약

본 논문에서는 비지상네트워크 서비스를 제공하기 위해 개선이 필요한 물리계층 요구사항을 고려하여, OTFS (Orthogonal Time-Frequency Space) 파형의 파라미터 구성 가이드라인을 제시한다. 송수신 신호의 분석을 통해, OTFS 신호의 시간영역 확산이 도플러 오프셋에 대한 강인성을 제공하지만 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) 성능의 열화를 발생시키는 트레이드 오프 관계에 있음을 보인다.

I. 서론

비지상네트워크가 3GPP (3rd Generation Partnership Project) 표준화 아이템에 포함됨과 함께, 비지상네트워크 서비스를 제공하기 위한 물리계층 연구 역시 활발히 이루어지고 있다 [1]. 3GPP TR 38.811에서는 기존 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 파형의 도플러 취약성과 이로 인해 야기되는 주파수 효율 저하로 인해, 빠른 이동 속도가 고려되는 비지상네트워크 시나리오에 적합한 파형이 요구됨을 언급하고 있다. 다중 반송파 변조 방식의 높은 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)의 저감 역시 가용 전력이 한정된 모빌리티의 전력증폭기 부하를 줄이기 위해 개선되어야 할 사항이다.

최근 도플러 확산에 강인한 OTFS (Orthogonal Time-Frequency Space) 파형이 제안되어 활발하게 연구되고 있다. 본 논문에서는 이러한 OTFS 파형의 파라미터 구성과 비지상네트워크의 기술적 고려사항 사이의 관계를 분석한다.

II. OTFS 시스템 모델

OTFS 시스템에서 지연-도플러 영역에 매핑된 송신 심볼은 ISFFT (Inverse Symplectic Finite Fourier Transform)를 통한 주파수-시간 영역으로의 스프레딩을 거친 뒤, 시간 영역으로의 다중 반송파 변조를 통해 전송된다 [2].

$$X[n, m] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} x[k, l] e^{j2\pi(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M})} \quad (1)$$

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} X[n, m] g(t - nT) e^{j2\pi m \Delta f (t - nT)} \quad (2)$$

여기서 M 은 부 반송파의 수, N 은 다중 반송파 심볼의 수이며, $g(t)$ 는 프로토타입 필터를 의미한다. 본 연구에서는 사각 펄스형태의 $g(t)$ 를 고려하며 심볼 길이

T 와 부 반송파 간격 Δf 사이에는 $T = \frac{1}{\Delta f}$ 의 관계가 성립한다.

변조된 OTFS 신호는 빠른 페이딩 채널을 통과하고, 샘플링한 후 수신된다. 본 연구에서는 상관 대역폭이 $M\Delta f$ 보다 작고 Δf 보다 큰, 상관 시간이 NT 보다 작고 T 보다 큰 시간-주파수 선택적 페이딩 채널 환경을 고려한다. P 개의 독립적인 경로로 이루어진 채널을 겪은 수신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^P h_i s(t - \tau_i) e^{j2\pi v_i(t - \tau_i)} + n(t) \quad (3)$$

여기서 h_i, τ_i, v_i 는 각각 i 번째 경로의 채널 이득, 지연 및 도플러 이동 값을 의미하며, $n(t)$ 는 잡음이다. 이후 수신 신호는 지연-도플러 영역에서 각각 $\frac{T}{M}, \frac{1}{NT}$ 의 간격으로 샘플링 된다.

III. OTFS 시스템의 도플러 오프셋 및 PAPR 도출

1) 도플러 오프셋에 의한 OTFS 시스템 성능 저하

송신 신호를 시간 영역에서 나타낸 $s(t)$ 는 ZAK 변환을 통해 아래와 같이 지연-도플러 영역에서 표현 가능하다.

$$Z_s(\tau, \nu) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} x[k, l] e^{j2\pi(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M} + \frac{\tau}{T} - \nu nT)} \quad (4)$$

도플러 오프셋에 의한 인접 심볼간 간섭에 집중하기 위해, 잡음이 없고 채널 이득이 1인 단일 경로 채널 환경을 가정한다. 샘플링된 지연-도플러 영역 수신 신호는

$$y[k', l'] = \sqrt{MN} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} x[k, l] R[k, l, k', l'] \quad (5)$$

로 표현할 수 있으며, 이때 $R[k, l, k', l']$ 의 크기는 다음과 같이 이차원 디리클레 커널의 형태로 표현할 수 있다.

$$|R[k, l, k', l']|^2 = \frac{\sin^2(\pi(k' - k - v_1 NT))}{\sin^2\left(\frac{\pi}{N}(k' - k - v_1 NT)\right)} \frac{\sin^2(\pi(l' - l - \tau_1 M \Delta f))}{\sin^2\left(\frac{\pi}{M}(l' - l - \tau_1 M \Delta f)\right)} \quad (6)$$

그림 1은 주어진 k', l' 에서 k, l 에 따른 $|R[k, l, k', l']|^2$ 의 크기를 나타낸다. 채널에 의한 신호의 지연 및 도플러 이동이 각각 OTFS 시스템의 지연-도플러 격자 해상도 $(\frac{T}{M}, \frac{1}{NT})$ 의 정수 배일 경우, 디리클레 커널의 측엽은 인접 반송파에 영향을 주지 않는다. 하지만 소수점 아래의 값이 존재할 경우, 디리클레 커널의 측엽은 인접 반송파에 영향을 주게 되며 특히 도플러 영역에서 도플러 오프셋의 존재는 부 반송파간 직교성을 파괴시켜 성능 저하를 유발한다. 그림 2는 도플러 오프셋에 의한 OTFS 시스템의 성능 저하를 나타낸다. 도플러 오프셋은 인접 부 반송파에 간섭 신호를 발생시킬 뿐 아니라, 원 신호의 파워 세기를 저하시킨다. 이러한 도플러 오프셋에 의한 성능 저하는 시간 영역 확산을 확대함으로써 해소할 수 있다 [3]. N 이 증가함에 따라 도플러 영역의 디리클레 커널 너비가 줄어들게 되고, 측엽에 의한 간섭 신호 영향을 상대적으로 저감할 수 있다.

2) OTFS 시스템의 PAPR

OTFS 시스템의 PAPR은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$PAPR = \frac{\max\{|s[m + nM]|^2\}}{E\{|s[m + nM]|^2\}} \quad (7)$$

여기서 $s[m + nM], m = 0, \dots, M-1, n = 0, \dots, N-1$ 은 이산시간 송신 신호를 벡터 형태로 나타낸 것이다. 송신 신호의 평균 전송 파워는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} E\{|s[m + nM]|^2\} &= E\left\{\frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{p'=0}^{N-1} x[m, p] x^*[m, p'] e^{\frac{j2\pi(p-p')n}{N}}\right\} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} E(|x[m, p]|^2) \end{aligned} \quad (8)$$

송신 신호의 평균 전송 파워가 N 에 반비례하므로, OTFS 시스템의 PAPR 성능은 시간 영역 확산이 증가할수록 열화된다. 이는 이전 장에서 논의된 성능 향상 방법과 반대되는 양상으로, OTFS 시스템의 도플러 오프셋 강인성과 PAPR 성능은 서로 트레이드 오프 관계가 있음을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 5G/6G 비지상네트워크의 기술적 고려사항을 파악하고, OTFS 파형의 파라미터 설정에 따른 도플러 오프셋 강인성과 PAPR 성능 변화를 분석하였다. 분석을 통해 도플러 오프셋 강인성과 PAPR 성능 향상 사이에는 트레이드 오프관계가 있음을 보였다. 이를 극복하기 위해서는 지연-도플러 영역 필터 및 프로토타입 필터 등이 추가 고려되어 종합적인 분석이 요구된다.

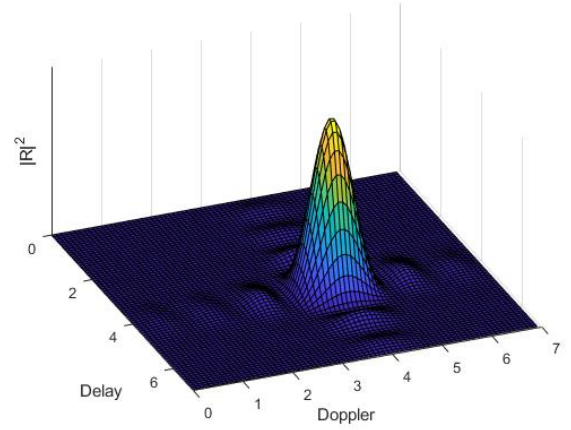


그림 1. $|R[k, l, k', l']|^2, (k' = 4, l' = 4, N = 8, M = 8)$

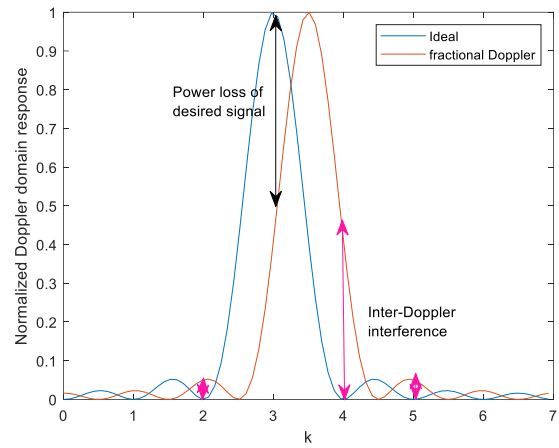


그림 2. 도플러 오프셋에 의한 성능 저하 ($k' = 3$)

ACKNOWLEDGMENT

"본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2021-0-02048)

참고 문헌

- [1] 3GPP TR 38.811 v15.1.0, "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)," June 2019.
- [2] Hong, Yi, Tharaj Thaj, and Emanuele Viterbo. Delay-Doppler Communications: Principles and Applications. Elsevier, 2022.
- [3] Mohammed, Saif Khan. "Derivation of OTFS modulation from first principles." IEEE transactions on vehicular technology 70.8 (2021): 7619-7636.