

도플러 확산 채널에서의 직교 처프 분할 다중화 방식 성능 연구

김경표, 신우람, 장갑석, 고영조
한국전자통신연구원

{kpkim, w.shin, kschang, koyj}@etri.re.kr

Performance Analysis of Orthogonal Chirp Division Multiplexing in Doppler Spread Channel

Kyeongpyo Kim, Wooram Shin, Kapseok Chang, Young-Jo Ko
Electronics and Telecommunications Research Institute

요 약

처프 기반의 직교 처프 분할 다중화 방식을 소개하고, 도플러 확산으로 인해 성능 열화가 심한 환경에서의 직교 처프 분할 다중화 방식의 성능을 직교 주파수 분할 다중화 방식과 비교하였다. 채널의 도플러 확산이 심한 경우에도 직교 처프 분할 다중화 방식은 도플러 확산이 심한 채널에서 직교 주파수 분할 다중화 방식과 비교하여 블록오율 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

I. 서 론

처프(Compressed High Intensity Radar Pulse, CHIRP)는 시간에 따라 주파수가 연속적으로 변하는 신호의 형태로, 자기 상관 시 아주 짧은 펄스를 얻을 수 있어 주로 레이더에 사용된다. 또한 '0' 또는 '1'의 정보 비트를 각각 시간에 따라 주파수가 증가 또는 감소하는 처프에 할당하여 채널 잡음에 강인하도록 변조하는 확산 스펙트럼 시스템에도 처프가 사용된다.

처프 변조 확산 스펙트럼 시스템의 경우, 스펙트럼 효율을 높이기 위해 처프를 전송 대역폭에서 중첩해서 전송하는 방식이 제안되었으며[1], 처프의 위상을 신호 변조에 사용하여 전송 대역폭 내에서 직교적으로 중첩하여 전송하는 직교 처프 분할 다중화(Orthogonal Chirp Division Multiplexing, OCDM) 방식이 제안되었다[2]. OCDM은 주파수 영역에서 중첩하나 처프 영역에서는 서로 직교하는 처프들을 각각 직교 진폭 변조(Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 등의 방식을 통해 변조 후 중첩시켜 전송하는 방식으로, 직교 주파수 분할 다중화(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 방식의 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT)에 대응하는 이산 프레넬 변환(Discrete Fresnel Transform, DFNT)을 이용하여 이산 영역에서 구현이 가능하다.

이 논문에서는 처프 기반의 OCDM 방식을 소개하고, 도플러 확산과 같은 채널 왜곡 환경에서의 성능 열화를 OFDM 시스템과의 비교를 통해 살펴보고자 한다.

II. 본 론

OCDM 시스템의 송신 신호 변조는 다음과 같다.

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)\psi_k(t), \quad 0 \leq t < T$$

위의 식에서, $s(t)$ 는 OCDM 변조가 된 송신 신호이고, $x(k)$ 는 N 개의 QAM 심볼 중 k 번째 송신 심볼이다. 그리고 T 는 한 OCDM 심볼 주기, N 은 한 OCDM 심볼에 중첩된 처프 및 QAM 심볼의 수, $\psi_k(t)$ 는 루트 처프 파형(root chirp waveform) 으로부터 생성된 N 개의 처프 파형 집합(root chirp waveform) 중 k 번째 처프 파형을 나타낸다. 다음은 $\psi_k(t)$ 를 정의한 식이다.

$$\psi_k(t) = e^{j\frac{\pi}{4}t} e^{-j\frac{\pi N}{T^2}(t - \frac{kT}{N})^2}, \quad 0 \leq t < T$$

위의 식에서 $k=0$ 인 경우에 해당하는 $\psi_0(t)$ 를 루트 처프 파형이라고 하고, 처프 파형 집합 내의 N 개의 각 처프 파형은 다음과 같이 서로 직교한다.

$$\begin{aligned} \int \psi_m^*(t)\psi_n(t)dt &= \int_{t=0}^T e^{-j\frac{\pi}{4}t} e^{j\frac{\pi N}{T^2}(t - \frac{mT}{N})^2} e^{j\frac{\pi}{4}t} e^{-j\frac{\pi N}{T^2}(t - \frac{nT}{N})^2} dt \\ &= e^{j\pi\frac{(m^2-n^2)}{N}} \int_{t=0}^T e^{-j2\pi\frac{(m-n)}{T}t} dt \\ &= \delta(m-n) \end{aligned}$$

위의 처프 파형 집합은 OFDM의 부반송파 집합에 대응하는 기저 파형 집합이며, 처프 파형 집합은 연속 신호 영역에서 정의되어 있으므로, 이를 다음과 같이 이산 영역에서 정의할 수 있다.

$$\Phi^H(n, k) = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j\frac{\pi}{4}n} \times \begin{cases} e^{j\frac{\pi}{N}(n-k)^2}, & N: \text{even} \\ e^{j\frac{\pi}{N}(n+\frac{1}{2}-k)^2}, & N: \text{odd} \end{cases}$$

위의 식에서, $\Phi(n, k)$ 는 N 개의 이산 처프 파형 집합 중 k 번째 이산 처프 파형의 n 번째 시간 영역 샘플 값으로,

$\Phi(n, k)$ 를 (n, k) 행렬 성분으로 하는 행렬 Φ 를 정의하고 이를 이산 프레넬 변환 행렬이라 한다. Φ 를 이용하면, 송신 QAM 심볼 $x(k)$ 를 k 번째 성분으로 하는 행벡터 \mathbf{x} 를 OCDM 변조한 송신 행벡터 신호 \mathbf{s} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{x} = [x(0) \ x(1) \ \dots \ x(N-1)]^T$$

$$\mathbf{s} = \Phi^H \mathbf{x}$$

OCDM의 이산 프레넬 변환은 이산 푸리에 변환으로 표현이 가능하여 OCDM 역시 고속 푸리에 변환의 구현 용이성을 활용할 수 있다. 이산 푸리에 변환 $\mathbf{W}(n, k)$ 를 이용하여 $\Phi(n, k)$ 를 표현하면 다음과 같다.

$$\Phi^H(n, k)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j\frac{\pi}{4}} \times \begin{cases} e^{-j2\pi\frac{nk}{N}} e^{j\frac{\pi}{N}n^2} e^{j\frac{\pi}{N}k^2}, & N: \text{even} \\ e^{-j2\pi\frac{nk}{N}} e^{j\frac{\pi}{4N}} e^{j\frac{\pi}{N}(n^2+n)} e^{j\frac{\pi}{N}(k^2-k)}, & N: \text{odd} \end{cases}$$

$$= \mathbf{W}(n, k)^H \Theta_1^H(n) \Theta_2^H(k)$$

$$\mathbf{W}(n, k) = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j2\pi\frac{nk}{N}}$$

$$\Theta_1(n) = \begin{cases} e^{-j\frac{\pi}{N}n^2}, & N: \text{even} \\ e^{j\frac{\pi}{4N}} e^{-j\frac{\pi}{N}(n^2+n)}, & N: \text{odd} \end{cases}$$

$$\Theta_2(k) = \begin{cases} e^{j\frac{\pi}{4}} e^{-j\frac{\pi}{N}k^2}, & N: \text{even} \\ e^{j\frac{\pi}{4}} e^{-j\frac{\pi}{4N}} e^{-j\frac{\pi}{N}(k^2-k)}, & N: \text{odd} \end{cases}$$

위의 식에서 보는 바와 같이, 이산 프레넬 변환 행렬은 이산 푸리에 변환 행렬과 Θ_1 및 Θ_2 행렬의 곱으로 표현되며, Θ_1 및 Θ_2 행렬은 각각 n 및 k 에만 의존적인 대각 행렬임을 알 수 있다. 위의 식으로부터 이산 프레넬 변환 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \Theta_1 \mathbf{W} \Theta_2$$

위와 같이 이산 프레넬 변환은 이산 푸리에 변환과 두 대각 행렬의 곱과 같으므로, OCDM 시스템의 송신기는 그림 1과 같은 구조로 구현할 수 있다.

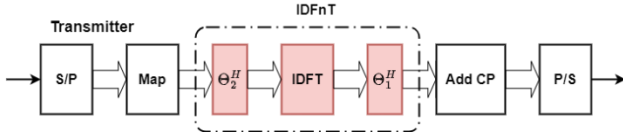


그림 1. OCDM 시스템의 송신기 구조

수신기에서 채널을 거친 OCDM 변조 신호를 수신하는 경우, 수신 신호 \mathbf{r} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} = \mathbf{H}\Phi^H \mathbf{x} + \mathbf{n}$$

순환 전치(cyclic prefix, CP) 및 OCDM 심볼 주기보다 충분히 큰 채널 상관을 가정하면 채널 행렬 \mathbf{H} 는 순환 행렬로 간주되며, 주파수 영역 채널 행렬 Λ 는 대각 행렬이 된다. 이 경우, 수신기는 다음과 같이 주파수 영역에서 채널 추정 및 보상을 먼저 수행할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}\mathbf{r} = (\mathbf{F}\mathbf{H}\mathbf{F}^H)(\mathbf{F}\Phi^H\mathbf{F}^H)\mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{n} = \Lambda\Gamma^H\mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{n}$$

이산 프레넬 변환 행렬 Φ 도 순환 행렬이므로 주파수 영역 프레넬 변환 행렬 Γ 도 대각 행렬이 된다. 위의 식에서 주파수 영역 채널 보상 및 주파수 영역 프레넬 변환 보상을 하면 다음과 같이 주파수 영역 송신 신호 추정 및 처프 영역 송신 신호 추정을 할 수 있다.

$$\mathbf{y}' = \Gamma\Lambda^{-1}\mathbf{y} = \mathbf{F}\mathbf{x} + \Gamma\Lambda^{-1}\mathbf{F}\mathbf{n}$$

$$\mathbf{x}' = \mathbf{F}^H\mathbf{y}' = \mathbf{x} + \mathbf{F}^H\Lambda^{-1}\Gamma\mathbf{F}\mathbf{n}$$

그림 2는 도플러 확산 채널에서 OCDM 및 OFDM 시스템의 블록오율 성능 비교 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션은 16-QAM, 부호화율 3/4 터보 코드를

사용하였고, 대역폭 및 부반송파 간격은 각각 100 MHz 및 60 kHz로 설정하였다. 도플러 채널 환경은 100 GHz 대역에서 0 km/h, 30 km/h, 120 km/h 및 300 km/h의 속도로 이동하는 이동체의 채널 환경을 가정하였다. 채널 모델은 LOS(Line-of-Sight) 채널 모델인 TDL-E(K factor 22 dB)를 사용하였다.

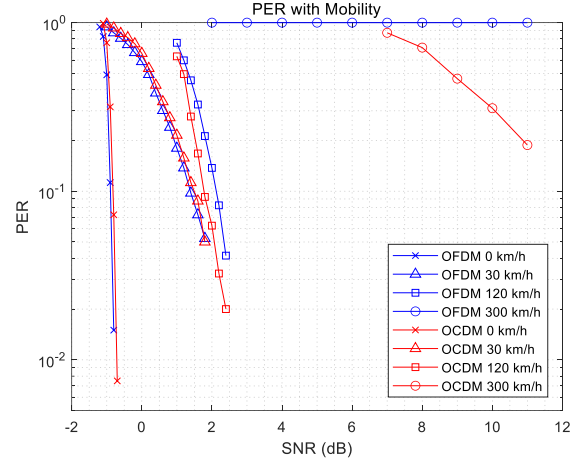


그림 2. OCDM 및 OFDM 시스템의 블록오율 성능 비교

그림 2에서 보는 바와 같이, OFDM 시스템은 도플러 확산이 증가하면 부반송파 간의 간섭 증가로 인한 채널 추정 오류로 블록오율 성능이 나빠지며, 이동 속도 300 km/h 환경에서는 신호 복호가 전혀 되지 않는 반면, OCDM 시스템은 도플러 확산이 심한 채널 환경에서도 수신기가 송신 신호를 복호할 수 있음을 확인할 수 있다.

III. 결론

이 논문에서는 처프 기반의 OCDM 변복조 방식을 소개하고, 고주파 대역의 고속 이동체 시나리오와 같이 도플러 확산으로 인해 성능 열화가 심한 채널에서 OCDM 방식의 블록오율 성능을 OFDM과 비교하였다. OCDM 변조 방식은 서로 독립인 다수의 처프를 QAM 변조한 후 중첩 전송하는 방식으로, 확산 스펙트럼 시스템의 스펙트럼 효율을 개선한 방식 중의 하나이다. OCDM 시스템은 도플러 확산이 심한 채널 환경에서도 OFDM 시스템과 달리 수신기에서 송신 신호 복호가 가능하다는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2018-0-00218, 초고주파 이동통신 무선백홀 전문연구실)

참고 문헌

- [1] H. Liu, "Multicode ultra-wideband scheme using chirp waveforms," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 24, no. 4, pp. 885-891, April 2006.
- [2] X. Ouyang and J. Zhao, "Orthogonal Chirp Division Multiplexing," in IEEE Transactions on Communications, vol. 64, no. 9, pp. 3946-3957, Sept. 2016.