

# 미지 위성통신 OFDM 신호 제원 추정 연구

장민규\*, 최윤철\*, 유광현\*\*, 최지혁\*\*, 윤동원\*, 장연수\*\*

한양대학교 융합전자공학과\*

제주대학교 통신공학과\*\*

ysjang@jejunu.ac.kr

## A Study on blind estimation of unknown satellite communication OFDM parameters

Mingyu Jang\*, Yooncheol Choi\*, Kwanghyeon Yoo\*\*,

Jihyeok Choi\*\*, Dongweon Yoon\*, Yeonsoo Jang\*\*

\*Department of Electronic Engineering, Hanyang University

\*\*Department of Telecommunication Engineering, Jeju National University

### 요약

비협력 상황에서 고속 이동하는 위성의 Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) 신호를 수신하고 분석할 경우, 높은 도플러 편이(Doppler shift)가 발생할 수 있다. 도플러 편이로 인해 주파수 오프셋 추정 오차가 발생할 수 있으며 오차에 의해 생성된 잔류 주파수 오프셋은 신호 타이밍 보상 알고리즘에 영향을 주어 신호의 복조 성능을 저하시킬 수 있다. 그러므로 잔류 주파수 오프셋이 존재할 때 신호 타이밍 보상에 따른 복조 성능에 대한 분석이 요구된다. 본 논문에서는 OFDM 신호의 주파수 오프셋 영향을 측정할 수 있는 기준 파라미터를 제시한다. 그리고 모의실험을 통하여 M차 거듭제곱 시간 오프셋 보상 알고리즘의 잔류 주파수 오프셋에 따른 신호 복조 성능 변화를 분석하고 ML 추정 알고리즘과 비교하여 신뢰성 있는 통신을 위한 기준을 제시한다.

### I. 서론

수신기의 통신 제원에 대한 정보가 없는 비협력 상황에서 수신 신호의 정보를 복원하기 위해서는 수집된 신호만을 이용하여 수신기의 제원을 추정해야 한다. 고속 이동하는 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성의 신호를 수신하고 분석할 경우, 위성의 궤도 운동에 따라 발생하는 높은 도플러 편이(Doppler shift)의 분석과 그에 따른 주파수 오프셋 추정의 중요성이 높아지고 있다[1].

현대의 다양한 무선 통신 시스템에서 사용되고 있는 Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) 방식은 통신 영역의 확장 등을 목적으로 위성 통신 시스템에 적용되고 있다. OFDM 신호는 서로 직교하는 다수의 부반송파(subcarrier)로 이루어져 있기 때문에 직교성을 손상시키는 주파수 오프셋은 수신 정보의 복원에 치명적인 영향을 미칠 수 있으며 주파수 오프셋과 시간 오프셋의 추정은 상호보완적인 관계성을 가진다. 이러한 상황에서 OFDM 신호의 제원을 정확히 추정하기 위해 다양한 연구가 진행되었다 [2]-[5]. [4]에서는 신호의 전반부와 후반부에 동일한 파형이 반복되는 Cyclic Prefix(CP)의 특징을 이용하여 Maximum Likelihood(ML) 추정에 의한 시간과 주파수 오프셋 추정을 동시에 수행하였다. [5]에서는 신호의 거듭제곱 과정이 신호의 성상을 단일 사분면으로 통일시키는 특성과 시간 지연이 푸리에 변환에 의해 주파수 이동으로 나타나는 성질을 이용하여 [4]에 의한 시간 오프셋 추정을 더욱 고도화할 수 있었다. 하지만 ML 추정에 의한 정확한 주파수 오프셋 추정을 전제하였기에 잔류 주파수 오프셋에 대한 신호 복조 성능의 영향이 확인되지 않은 문제가 있다.

본 논문에서는 OFDM 신호의 주파수 오프셋 영향을 측정할 수 있는 기준 파라미터를 제시한다. 그리고 모의실험을 통하여 M차 거듭제곱 시간

오프셋 보상 알고리즘의 잔류 주파수 오프셋에 따른 신호 복조 성능 변화를 분석하고 ML 추정 알고리즘과 비교하여 신뢰성 있는 통신을 위한 기준을 제시한다.

### II. 주파수 오프셋이 있을 때 시간 오프셋 추정

본 논문에서는 잔류 주파수 오프셋에 의한 시간 오프셋 보상 알고리즘 이후 신호 복조 성능의 변화를 분석하기 위하여 ML 추정에 의한 동기화 과정 이후, 잔류 주파수 오프셋을 가정한다.

$$y_{res}[n] = y[n]e^{-j2\pi\epsilon_{res}fn} \quad (1)$$

식 (1)에서  $y[n]$ 과  $\epsilon_{res}$ 은 각각 ML 추정에 의한 시간 동기화 과정이 적용된 OFDM 데이터와 주파수 동기화 이후 잔류한 주파수 오프셋의 비율을 의미한다.  $\epsilon_{res}$ 는 다음과 같은 수식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{res} &= \frac{f_{off}}{F_s} N \\ &= \left( \frac{f_{off}}{N\Delta f} \right) N \\ &= \frac{f_{off}}{\Delta f} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서  $f_{off}$ ,  $F_s$ ,  $N$ ,  $\Delta f$ 는 각각 Hz 단위로 정의된 주파수 오프셋, 신호의 대역폭, 부반송파 개수, 부반송파 간격을 의미한다.

주파수 오프셋의 영향은 수신 데이터의 인덱스  $n$ 이 증가함에 따라 누적된다. 그러므로 주파수 오프셋에 의한 신호의 변동이 최대가 되는 인덱스  $n_{max}$ 에 대하여 신호를 분석하여 주파수 오프셋의 영향을 측정하는 기준 파라미터를 유도할 수 있다.  $n_{max}$ 의 값은 CP를 포함한 OFDM 신호의

전체 길이와 같고 식 (1)에서 주파수 오프셋의 영향을 의미하는 자연지수 항을 분리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & -i2\pi\epsilon_{res}fn_{\max} \\ & = -i2\pi\epsilon_{res}L_{sym}(L_{CP}+N)/N \quad (3) \\ & = -i2\pi\alpha(1+\beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha & = \epsilon_{res} \times L_{sym} \\ \beta & = \frac{L_{CP}}{N} \quad (4) \end{aligned}$$

식 (3)과 (4)에서  $\alpha$ 는  $\epsilon_{res}$ 와 OFDM 신호의 개수(number of OFDM symbol)  $L_{sym}$ 의 곱셈값이며  $\beta$ 는 OFDM 부반송파의 개수  $N$ 과 CP의 길이  $L_{CP}$  사이의 비율이다.  $\beta$ 는 ML 추정 단계 이전에 정확히 추정되었음을 가정하였으므로 상수로 정의한다. 식 (4)를 통해 OFDM 신호의 주파수 오프셋에 영향을 측정할 수 있는 기준 파라미터  $\alpha$ 를 제시한다.

### III. 모의 실험 및 성능 분석

본 논문에서는 분석의 편의를 위하여  $\beta$ 의 값을 1/4로 고정한다. 이후  $y_{res}[n]$ 의 CP를 제거하고 푸리에 변환을 적용한 OFDM 심볼 데이터  $x_{res}[n]$ 을 생성한 후, [5]의 M차 거듭제곱 시간 오프셋 보상 알고리즘에 의한 OFDM 심볼 데이터 복원 성능의 변화를 분석한다.

표 1에서는 다양한 변조 방식에 대하여 M차 거듭제곱 시간 오프셋 보상 알고리즘이 기존의 ML 추정 알고리즘에 비하여 성능향상을 기대할 수 있는 최대의  $\alpha$ 를 제시하였다.

표 1. 변조 방식별 성능향상을 기대할 수 있는  $\alpha$ 의 최댓값

Modulation	$\alpha$
4-PSK	0.097
8-PSK	0.045
16-QAM	0.032
64-QAM	0.016

그림 1과 2에서는 16-QAM 및 64-QAM으로 변조된 OFDM 신호에 대하여 기존 방식과 잔류 주파수 오프셋에 따른 M차 거듭제곱 시간 오프셋 보상 알고리즘의 성능을 Bit Error Rate(BER)로 나타내었다. 그림 1을 통해 16-QAM으로 변조된 OFDM 신호에 대한 M차 거듭제곱 시간 오프셋 보상 알고리즘이 기존의 ML 추정 알고리즘에 비교하여 성능향상을 기대할 수 있는  $\alpha$ 의 최댓값은 0.039임을 확인할 수 있다. 그림 2를 통해 64-QAM으로 변조된 OFDM 신호에 대한 M차 거듭제곱 시간 오프셋 보상 알고리즘이 기존의 ML 추정 알고리즘에 비교하여 성능향상을 기대할 수 있는  $\alpha$ 의 최댓값은 0.016임을 확인할 수 있다.

### IV. 결론

본 논문에서는 OFDM 신호의 주파수 오프셋 영향을 측정할 수 있는 기준 파라미터를 제시하였다. 그리고 모의실험을 통하여 M차 거듭제곱 시간 오프셋 보상 알고리즘의 잔류 주파수 오프셋에 따른 신호 복조 성능 변화를 분석하고 ML 추정 알고리즘과 비교하여 신뢰성 있는 통신을 위한 기준을 제시하였다. 향후에는 비협력 상황에서 고속 이동하는 위성의 OFDM 신호의 높은 도플러 편이에 따른 주파수 오프셋의 정밀한 추정과 주파수 오프셋에 강인한 신호 복조에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

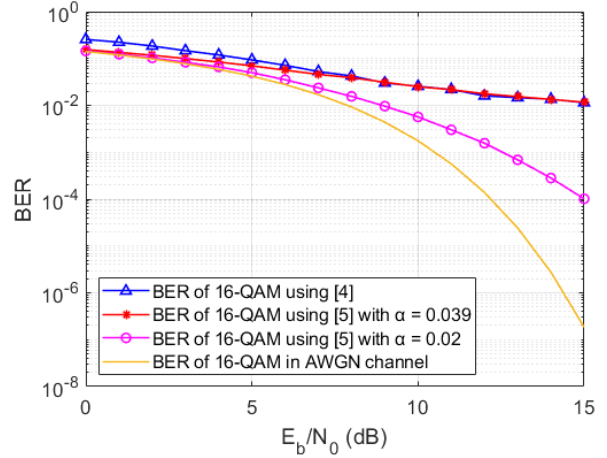


그림 1. 기존 알고리즘과 M차 거듭제곱 알고리즘의  $\alpha$ 에 대한 16-QAM 신호의 BER 성능

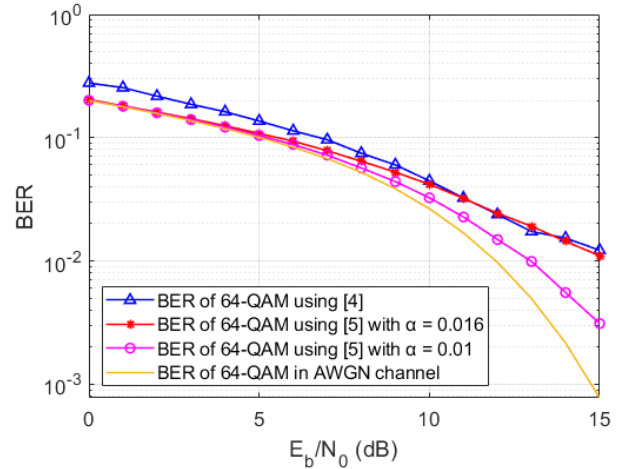


그림 2. 기존 알고리즘과 M차 거듭제곱 알고리즘의  $\alpha$ 에 대한 64-QAM 신호의 BER 성능

### 참고 문헌

- [1] M. Huang, J. Chen, and S. Feng, "Synchronization for OFDM-based satellite communication system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 6, pp. 5693-5702, Jun. 2021.
- [2] A. Punchihewa, V. K. Bhargava, and C. Despins, "Blind estimation of OFDM parameters in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 3, pp. 733-738, Mar. 2002.
- [3] G. Song, M. Jang, and D. Yoon, "CNN-based automatic modulation classification in OFDM systems," in *Proc. IEEE CITS*, Piraeus, Greece, Jul. 2022.
- [4] J. J. Beek, M. Sandell, and P. O. Borjesson, "ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 45, no. 7, pp. 1800-1805, Jul. 1997.
- [5] S. An, M. Jang, and D. Yoon, "OFDM Signal Timing Offset Compensation Algorithm using Mth-Power," in *Proc. KIIT Autumn Conference*, vol. 17, no. 2, pp. 187-188, Dec. 2022.