

멀티 빔 위성 통신 시스템에서 사전 부호화기에 따른 시스템 성능 분석

손해수, 정민채*

세종대학교 정보통신공학과, 세종대학교 지능정보융합학과*

naecoeth@sju.ac.kr, mcjung@sejong.ac.kr*

Performance Analysis of Precoding Schemes in Multibeam Satellite Communication Systems

Haesoo Son and Minchae Jung*

Department of Information and Communications Engineering, Sejong University
Department of Artificial Intelligence and Information Technology, Sejong University*

요 약

본 논문에서는 멀티 빔 위성 통신 시스템에서 zero-forcing(ZF)과 matched-filter(MF) 방식의 사전부호화기 성능에 대한 분석을 진행하였다. ZF는 full frequency reuse(FFR) 환경으로 고정하고, MF는 주파수 재사용 계수를 변경하며 ergodic sum rate을 비교하는 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과 비교를 통해 주파수 분할 환경에서는 MF의 성능이 FFR 환경의 ZF보다 우수한 것을 확인하였다. 반면, FFR 환경에서는 저전력에서 MF가 우세하였으나, 송신 전력이 증가함에 따라 ZF의 성능이 MF보다 우수함을 확인하였고, 이로 인한 성능 교차 지점을 확인하였다. 이러한 결과는 멀티 빔 위성 통신 시스템에서 주파수 재사용 방법과 송신 전력에 따라 사전부호화기를 선택하여야 함을 시사한다.

I. 서론

멀티 빔 기반 위성 통신 시스템은 제한된 주파수 자원을 공간적으로 재사용함으로써 전체 시스템 용량을 증대시킬 수 있으며, 따라서 최근 차세대 위성 통신에서 중요한 기술로 주목받고 있다[1]. 하지만 이러한 주파수 재사용 방식은 인접 빔 간의 신호 누설로 인한 inter-beam interference(IBE) 발생시켜 통신 품질 저하를 초래한다는 한계를 가진다.

이러한 IBE를 효과적으로 완화하기 위해, 게이트웨이에서 channel state information(CSI)를 활용하여 채널을 추정하여, 선제적으로 제어하는 사전부호화 기법이 많이 활용되고 있다. Zero-forcing(ZF) 기반 사전부호화기는 IBE의 제거를 목표로 하는 반면, Matched-filter(MF) 기반 사전부호화기는 대상 사용자의 신호 전력 최대화에 중점을 둔다[2][3]. IBE를 효과적으로 제어할 수 있는 또 다른 방안으로는 주파수 재사용 계수를 활용하는 방법이 있다[3]. 모든 빔에서 동일 주파수를 사용하는 경우 전체 시스템 용량은 극대화되지만, 심각한 IBE가 발생할 수 있다[1]. 반면, 빔 별로 주파수를 구분하여 사용하는 경우 간섭은 완화되지만 주파수 효율이 저하되는 한계를 가진다[3]. 본 논문에서는 멀티 빔 위성 통신 시스템에서 사전부호화 기법과 주파수 재사용 방식에 따른 IBE 영향 및 시스템 성능을 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문은 그림 1과 같이 정지궤도 위성 기반 하향링크 통신 시스템을 고려한다. 위성은 게이트웨이로부터 받은 신호를 N 개의 빔을 생성하여 user link를 통해 N 개의 단일 안테나를 사용하는 user terminal(UT)에게 동시에 서비스를 제공한다. N 개의 UT가 수신하는 신호 벡터 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{T}\mathbf{s} + \mathbf{n}. \quad (1)$$

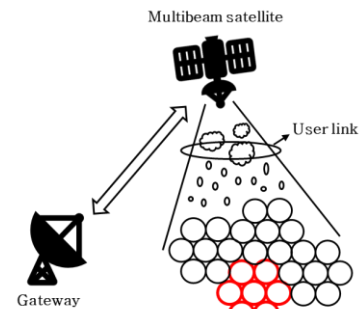


그림 1. 고려하는 멀티 빔 위성 통신 시스템.

여기서 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 은 채널 행렬, $\mathbf{T} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 은 사전부호화기 행렬, $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 송신 심볼 벡터를 의미한다. 또한, $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 은 평균이 0이고 분산이 1인 additive white Gaussian noise 벡터이다. 즉, 게이트웨이에서 얻은 채널 정보를 바탕으로 송신하는 신호에 사전부호화 기법을 적용한 후, UT에게 송신한다. 이때, 위성은 신호를 처리하지 않고 신호를 중계하는 역할을 한다. [1]에 따라, 채널 행렬 \mathbf{H} 는 다음과 같이 세 가지 요소로 분해된다.

$$\mathbf{H} = \mathbf{D}\Phi\mathbf{B}. \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 은 멀티 빔 안테나의 방사 패턴과 경로 손실을 모델링하는 행렬로, 위성고고도와 고정된 UT의 위치에 의해 결정되는 semi-static 채널 정보이다. 반면, $\Phi \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 와 $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 는 매우 빠르게 변화하는 채널 정보이다. $\Phi \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 는 신호 전파에 따른 위상 변화를 나타내는 대각 행렬이며, $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 는 강우 감쇠와 같은 대기 페이딩 효과를 표현하는 대각 행렬이다. 여기서 강우 감쇠는 [1]과 동일하게 로그-정규 분포를 따른다고 가정하였다.

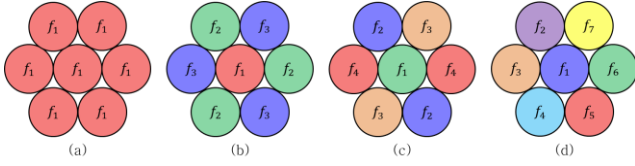


그림 2. 주파수 재사용 계수에 따른 위치의 멀티 빔 별 주파수 배치 방안:
(a) $q=1$, (b) $q=3$, (c) $q=4$, (d) $q=7$.

주파수 재사용 계수 q 는 멀티 빔의 주파수 사용 패턴을 결정하는 요소이며, 이를 통해 IBI의 크기가 결정될 수 있다. 그림 2는 주파수 재사용 방식에 따른 빔 배치와 주파수 할당을 시각적으로 보여준다[3]. $q=1$ 인 full frequency reuse (FFR) 환경에서는 모든 빔들이 동일한 주파수를 사용하여 IBI가 최대가 되는 반면, $q=7$ 인 주파수 분할 환경인 경우 인접 빔들이 서로 다른 주파수를 할당 받아 간섭이 제거된다. q 값에 따른 빔당 할당 대역폭 BW_{beam} 은 시스템에 할당된 전체 대역폭 BW_{total} 을 q 로 나눈 값이다. 이에 잡음 전력 P_{noise} 는 $\kappa_B T_{\text{temp}} BW_{\text{beam}}$ 으로 계산된다[1]. 여기서 κ_B 는 볼츠만 상수이며, T_{temp} 는 수신기 잡음 온도를 의미한다.

본 논문의 모든 멀티 빔 위성 통신에서의 사전부호화기는 full CSI를 가정한다. 신호를 송신할 때 심볼 벡터에 사전부호화 행렬을 곱하는 과정을 거친다. ZF 기법은 [1]의 정의를 따라 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{T}_{\text{ZF}} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}. \quad (3)$$

ZF 사전부호화 기법은 채널의 역을 취함으로써, 신호가 채널을 통과하면서 발생하는 왜곡과 간섭을 완전 제거하는 특성을 보여준다. 반면에 MF 사전부호화 기법은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{T}_{\text{MF}} = \mathbf{H}^H. \quad (4)$$

MF 사전부호화 기법은 (4)와 같이 대상 채널의 Hermitian을 사용하여, 타겟 채널에 정합되는 방향으로 신호 전력을 집중시키는 방식이다. 또한 사전부호화기는 위성의 제한된 전력 자원을 반영하여야 한다. 총 송신전력을 만족하기 위해 [2]에서 제시된 행렬 정규화를 사용하였다. 최종적으로 심볼 벡터에 곱해지는 ZF, MF 사전부호화기 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{T}_{\text{ZF}}^{(\text{mat})} = \frac{\sqrt{P}}{\|\mathbf{T}_{\text{ZF}}\|_F} \mathbf{T}_{\text{ZF}}, \quad (5)$$

$$\mathbf{T}_{\text{MF}}^{(\text{mat})} = \frac{\sqrt{P}}{\|\mathbf{T}_{\text{MF}}\|_F} \mathbf{T}_{\text{MF}}. \quad (6)$$

여기서 P 는 위성의 총 송신 전력이고, $\|\cdot\|_F$ 는 Frobenius norm을 의미한다. 행렬 정규화는 전체 사전부호화 행렬의 Frobenius norm을 기준으로 모든 사용자의 신호를 일괄적으로 정규화 하는 방식이다.

III. 실험 결과

본 절에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 ZF와 MF 사전부호화기의 sum rate(SR) 성능을 분석한다. 시뮬레이션은 7개의 빔으로 7개의 UT를 서비스하는 정지궤도 위성 통신 환경을 가정하였으며, Ka대역(20GHz) 주파수와 전체 대역폭은 50MHz로 가정하였다. 실험에 사용된 나머지 파라미터는 [1]을 바탕으로 설정하였다. 본 실험에서는 [1]에서 제시된 signal to interference-plus-noise ratio(SINR)을 산출하고, ergodic SR을 성능 지표로 활용하였다. SINR은 각 UT의 수신 신호 전력을 다른 UT로부터의 간섭 신호 전력과 잡음 전력의 합으로 나눈 값으로 정의되며, SINR 값은 Shannon-Hartley 이론에 따라 SR 계산에 작용한다[1]. SR은 모든 UT가 달성 가능한 데이터 전송률의 합을 나타내고, ergodic SR은 무선통신 환경의 무작위 채널 환경에서 얻을 수 있는 SR의 통계적 평균값을 의미한다.

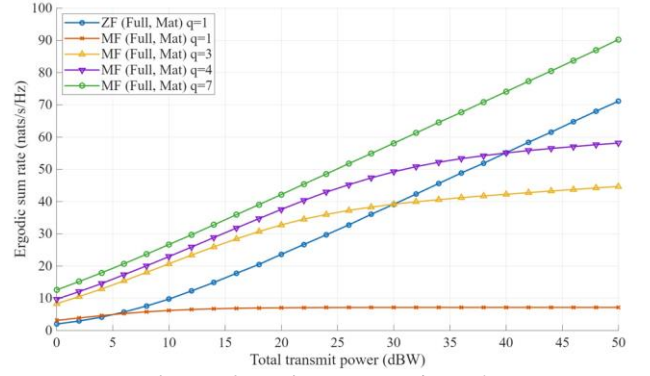


그림 3. ZF과 MF의 Ergodic SR 성능 그래프.

그림 3에서 MF의 성능은 주파수 재사용 계수 q 에 민감하게 반응하며, q 가 증가할수록 성능이 비약적으로 향상된다. 이는 q 가 증가함에 따라 동일한 주파수를 사용하는 빔 간 거리가 멀어져 감소하는 것이 주된 원인으로 분석된다. 특히 $q=7$ 환경에서는 IBI가 효과적으로 제거되어, 신호 전력을 극대화하는 MF가 ZF보다 우수한 SR을 달성함을 알 수 있다. $q=1$ 인 환경에서는 ZF와 MF의 성능 교차점이 관찰된다. 저전력 구간에서는 시스템이 잡음에 의해 지배되어, 간섭 신호가 잡음 대비 상대적으로 약하므로, MF가 ZF보다 우위를 점한다. 송신 전력 증가에 따라 간섭 영향력이 커지는 환경으로 전환되면서 간섭을 완전히 제거하는 ZF가 우수하였다. MF는 IBI 제어 능력이 없으므로 신호 세기가 강해져도 제거되지 않는 간섭으로 인해 SINR이 포화되는 것으로 분석되는 반면 ZF는 송신 전력이 증가할수록 간섭을 효과적으로 제거하는 능력이 부각되어 지속적으로 성능이 향상되는 특성을 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 멀티 빔 위성 통신 시스템에서 ZF와 MF 사전부호화기의 성능을 다양한 주파수 재사용 계수에 따라 실험을 통해 분석을 진행하였다. 실험 결과, 두 기법 간 송신 전력과 간섭 수준에 따른 성능 상충 관계가 존재함을 확인했다. 또한 ZF와 MF의 성능 곡선이 교차하는 지점을 확인하였으며, 이는 시스템이 잡음 지배적 환경에서 간섭 지배적 환경으로 전환되는 임계점을 나타낸다고 볼 수 있다. 향후 연구에서는 본 논문에서 확인된 성능 교차점을 수학적으로 모델링하고 예측하는 연구를 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2021R1C1C1012950)과 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. RS-2024-00359235, 3GPP 표준 기반 저궤도 군집 위성통신 지상국 핵심기술 개발)

참고 문헌

- [1] I. Ahmad, K. D. Nguyen, N. Letzepis, G. Lechner, and V. Joroghi, "Zero-forcing precoding with partial CSI in multibeam high throughput satellite systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 2, pp. 1410–1420, Feb. 2021.
- [2] Y. G. Lim, C. B. Chae, and G. Caire, "Performance analysis of massive MIMO for cell-boundary users," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 12, pp. 6827–6842, Dec. 2015.
- [3] C. Kim, M. Jung, and W. Saad, "Performance analysis of RIS-aided multibeam satellite communication systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 60, no. 6, pp. 9383–9393, Dec. 2024.