

저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용하는 다중-입력 다중-출력 무선 통신시스템을 위한 희소중첩코드

남윤서, 노태엽, 신상목, 심병호
서울대학교

ysnam@islab.snu.ac.kr, tyroh@islab.snu.ac.kr,
smshin@islab.snu.ac.kr, bshim@islab.snu.ac.kr

Sparse Vector Codes for MIMO Systems using Low-resolution Analog-to-digital Converters

Yunseo Nam, Taeyup Roh, Sangmok Shin, Byonghyo Shim,
Seoul National Univ.

요 약

본 논문은 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용하는 다중-입력 다중-출력 무선 통신시스템을 위한 채널 부호로 희소중첩코드를 제안한다. 희소중첩코드는 공동 변조 및 코딩 기법 중 하나로써, 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용할 때 기존의 코드 변조 기술에 비해 낮은 프레임 오류율을 낮은 복잡도로 얻어낼 수 있다. 구체적으로, 본 논문에서는 아날로그-디지털 변환기 사용에 따른 비 선형 양자화 오류를 극복하기 위한 희소중첩코드의 사전행렬 생성 방법을 제안한다. 또한, 희소중첩코드를 낮은 복잡도로 복호할 수 있는 압축센싱 알고리즘을 제안한다.

I. 서 론

저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용하는 통신 시스템은 광대역 다중-입력 다중-출력 통신시스템의 높은 하드웨어 비용과 높은 전력 소모를 극복하기 위한 효과적인 기술로 많은 연구가 진행되었다 [1]. 하지만, 채널 부호를 사용하는 시스템의 경우, 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용하면 비 선형 양자화 오류로 인해 프레임 오류율이 증가하고, 복호 알고리즘의 복잡도가 높다는 문제점이 발생한다 [2]. 따라서, 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용하는 다중-입력 다중-출력 통신시스템에서 높은 복호 성능을 낮은 복잡도로 얻어낼 수 있는 채널 부호가 연구되어야 한다.

본 논문에서는 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용하는 통신시스템을 위한 희소중첩코드를 제안한다. 희소중첩코드는, 첫째, 코드율이 사전행렬의 차원 및 희소 벡터의 희소성에 의해 조절된다. 둘째, 사전행렬의 설계에 따라 복호 성능을 향상시킬 수 있다. 따라서, 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용할 때 높은 복호 성능을 보이는 채널 부호 설계가 가능하다. 뿐만 아니라 희소중첩코드는 공동 변조 및 부호화 기법으로써 복조와 복호가 동시에 이루어지기 때문에, 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용할 때 발생하는 채널 추정 오류로 인한 오류 전파를 방지할 수 있다. 구체적으로, 본 논문에서는 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용하는 다중-입력 다중-출력 시스템의 채널용량 달성 필요조건을 만족하는 희소중첩코드를 설계한다 [3]. 또한, 제안된 희소중첩코드를 낮은 복잡도로 복호하는 압축센싱 알고리즘을 제안한다.

II. 본론

본 논문에서는 N_t 개의 송신 안테나와 N_r 개의 수신 안테나를 사용하는 다중 입출력 통신 시스템을 고려한다. 각 수신 안테나는 입력 신호의 실수부와 허수부를 각각 양자화하는 두 개의 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용한다. 송신부와 수신부 사이의 주파수 선택 채널의 임펄스 응답이 $\{\bar{\mathbf{H}}[0], \bar{\mathbf{H}}[1], \dots, \bar{\mathbf{H}}[L-1]\} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 이고 시간 t 에서의 입력 벡터가 $\mathbf{x}[t] \in \mathbb{C}^{N_t}$ 수신 신호는 다음과 같다.

$$\bar{\mathbf{y}}[t] = \text{sign}_B \left(\sum_{\ell=0}^{L-1} \bar{\mathbf{H}}[\ell] \bar{\mathbf{x}}[t-\ell] + \bar{\mathbf{v}}[t] \right) \in \{\mathcal{Y} \times \mathcal{Y}\}^{N_r}, \quad (1)$$

위 식에서 $\bar{\mathbf{v}}[t] \in \mathbb{C}^{N_r}$ 는 가우스 분포를 따르는 잡음 신호이며, $\text{sign}_B(\cdot)$ 는 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 나타내는 양자화 함수이다.

위 시스템에서 송신 벡터를 시간 영역으로 확장하고 $\bar{\mathbf{x}} = [\bar{\mathbf{x}}^T[0], \bar{\mathbf{x}}^T[1], \dots, \bar{\mathbf{x}}^T[M-1]]^T \in \mathbb{C}^{MN_t}$ 채널 임펄스 응답을 수식 (2)와 같이 행렬화하면

$$\bar{\mathbf{H}} = \sum_{\ell=0}^{L-1} (\mathbf{I}_{(M+L-1) \times M}[\ell] \otimes \bar{\mathbf{H}}[\ell]) \quad (2)$$

수식 (3)의 입출력 관계식을 얻을 수 있다.

$$\bar{\mathbf{y}} = \text{sign}_B (\bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{v}}) \quad (3)$$

마지막으로, 수식 (3)의 복소수 영역 입출력 관계식을 실수 영역에서 수식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y} = \text{sign}_B (\mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{v}) \quad (4)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{\bar{\mathbf{x}}\} \\ \text{Im}\{\bar{\mathbf{x}}\} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2MN_t}, \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{\bar{\mathbf{y}}\} \\ \text{Im}\{\bar{\mathbf{y}}\} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2(M+L-1)N_r},$$

저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용하는 다중 입출력 무선통신 시스템에서 희소중첩코드는 사전행렬과 희소벡터의 곱으로 얻어진다. 구체적으로, N 개의 열을 가진 사전행렬을 $\mathbf{D} = [\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_N] \in \mathbb{R}^{2MN_t \times N}$ 라고 정의하고, $\|\mathbf{s}\|_0 = K$ 를 따르는 희소 벡터를 정의할 때, 희소중첩코드는 수식 (5)로 얻어진다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{D}\mathbf{s} = \sum_{n=1}^N \mathbf{d}_n 1_{\{s_n=1\}} \quad (5)$$

희소중첩코드에서는 사전행렬의 설계 및 희소 신호의 구조에 따라 복호 성능이 크게 좌우된다. 본 연구에서는 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용할 때 채널 용량 달성의 필요조건 [3]을 달성하기 위해, 사전행렬과 희소 신호를 수식 (6)에 따라 설계한다.

$$\mathbf{D} = [\hat{\mathbf{D}} \mathbf{R} \hat{\mathbf{D}} \mathbf{R}^2 \hat{\mathbf{D}} \mathbf{R}^3 \hat{\mathbf{D}}] \in \mathbb{R}^{2MN_t \times 4\hat{N}}, \quad \mathbf{s} = \left[\frac{|\hat{\mathbf{s}}^T| + \hat{\mathbf{s}}^T}{2}, \frac{|\hat{\mathbf{s}}^T| - \hat{\mathbf{s}}^T}{2} \right]^T, \quad \hat{\mathbf{s}} \in \{+1, -1\}^{2\hat{N}}, \quad \|\hat{\mathbf{s}}\|_0 = K, \quad (6)$$

위 식에서 행렬 \mathbf{R} 은 수식 (7)의 회전행렬을 나타낸다.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{MN_t} & -\mathbf{I}_{MN_t} \\ \mathbf{I}_{MN_t} & \mathbf{0}_{MN_t} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2MN_t \times 2MN_t} \quad (7)$$

또한, 수식 (6)에서 $\hat{\mathbf{D}} \in \mathbb{R}^{2MN_t \times \hat{N}}$ 는 희소중첩코드의 생성행렬이다. 일반적으로, 생성행렬은 통신시스템의 연구조건에 따라 적응형으로 설계될 수 있으나, 본 연구에서는 송신 전력을 상수에 가깝게 유지시키고, 수식 (8)의

$$d(p, q|\mathbf{H}) = \|\text{sign}_B(\mathbf{H}\mathbf{D}\mathbf{s}_p) - \text{sign}_B(\mathbf{H}\mathbf{D}\mathbf{s}_q)\|_0 \quad (8)$$

생성된 코드워드 간 해밍 거리를 증가시키기 위해 랜덤 직교행렬로 정의한다. 본 논문에서 제안하는 희소중첩코드 설계에 따르면, 코드를

$$R = \frac{\lceil \log_2 \left(\frac{4MN_t}{K} \right) \rceil + K}{2MN_t} \quad (9)$$

을 만족하는 희소중첩코드를 생성할 수 있다.

희소중첩코드로 생성된 코드워드를 송신하였을 때, 수신 벡터는 수식 (10)과 같이 해석될 수 있다.

$$\mathbf{y} = \text{sign}_B(\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v}) = \text{sign}_B(\mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{v}) \quad (10)$$

희소중첩코드 복호의 핵심은 송신 코드워드 \mathbf{x} 를 탐지하는 대신, 송신 코드워드에 대응되는 희소 벡터 \mathbf{s} 를 직접적으로 얻어내는 것이다. 구체적으로, 시간-공간 영역의 채널과 사전행렬의 효과가 중첩된 센싱행렬을 $\mathbf{A} = \mathbf{H}\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{N_{\text{dim}} \times N}$ 와 같이 정의하면, 본 논문에서 제안된 희소중첩코드를 양자화-압축센싱 알고리즘을 사용하여 복호할 수 있다. 특히, 본 연구에서는 탐욕 알고리즘으로 잘 알려진 Bayesian matching pursuit (BMP) 알고리즘을 사용한다 [4]. BMP 알고리즘은 희소 벡터가 이진 분포를 따를 때 매우 효과적인 압축센싱 알고리즘으로, 희소중첩코드의 구조에 매우 적합하다. 또한, BMP 알고리즘의 입력으로 사용될 센싱 행렬 \mathbf{A} 의 차원은 물리적 채널 임펄스 응답의 길이와 무관하게 결정된다. 따라서 희소중첩코드는 채널 임펄스 응답이 길어질 때 복잡도가 지수적으로 증가하는 기존의 코드 변조 방식과 다르게, 채널 임펄스 응답의 길이에 무관한 낮은 복잡도로 복호할 수 있다.

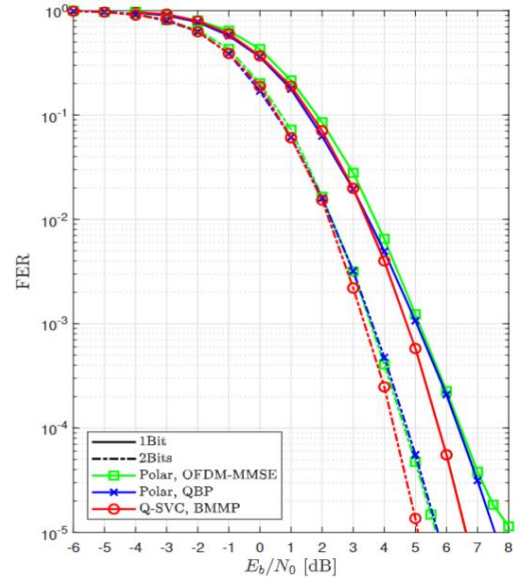


그림 1. 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용하는 다중 입출력 시스템에서 신호 대 잡음비에 따른 여러 채널 부호의 프레임 오류율.

그림 1 은 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용하는 다중 입출력 시스템에서 ($N_t = 2, N_r = 8$) 코드율 35/256 을 만족하는 여러 부호화 기법의 프레임 오류율을 비교한 것이다. 희소중첩코드가 기존의 시간-영역, 주파수-영역 코드 변조 기법에 비해 높은 신호 대 잡음비 하에서 더 낮은 프레임 오류율을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 특히, 아날로그-디지털 변환기의 해상도가 낮을수록 희소중첩코드가 더 높은 성능을 보임을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 저 해상도 아날로그-디지털 변환기를 사용하는 다중 입출력 시스템을 위한 희소중첩코드를 제안하였으며, 저 복잡도 압축센싱 복호 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해, 제안된 부호화 기법이 기존의 코드변조 기법에 비해 높은 복호화 성능을 낮은 복잡도만으로 얻어 낼 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. Singh, O. Dabeer, and U. Madhow, "On the limits of communication with low-precision analog-to-digital conversion at the receiver," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 12, pp. 3629-3639, Dec. 2009.
- [2] Y.-S. Jeon, H. Do, S.-N. Hong, and N. Lee, "Soft-output detection methods for sparse millimeter-wave MIMO systems with low-precision ADCs," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 4, pp. 2822-2836, Apr. 2019.
- [3] Y. Nam, H. Do, Y.-S. Jeon, and N. Lee, "On the capacity of MISO channels with one-bit ADCs and DACs," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 9, pp. 2132-2145, Sep. 2019.
- [4] Y. Nam and N. Lee, "Bayesian matching pursuit: A finite-alphabet sparse signal recovery algorithm for quantized compressive sensing," *IEEE Sig. Process. Lett.*, vol. 26, no. 9, pp. 1285-1289, Sep. 2019.