

6G 대규모 IoT 네트워크에서 활성 단말 탐지를 위한 Parallel Orthogonal Least Square 기법

이영석, 정방철

충남대학교

yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Parallel Orthogonal Least Square Technique to Detect Active Devices for 6G Massive IoT Networks

Young-Seok Lee and Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문은 산발적(sporadic)으로 데이터를 생성하는 다수의 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 단말이 존재하는 대규모 IoT 네트워크에서 효과적으로 기지국이 활성 단말을 탐지할 수 있는 병렬 직교 최소 제곱(parallel orthogonal least square: POLS)기법을 제안한다. 제안하는 기법은 첫 시행에서 다수의 초기값을 선택한 후 각각 병렬적인 OLS 알고리즘을 수행한다. 모의실험을 통해, 제안하는 POLS 알고리즘의 활성 단말 탐지 성능을 비교 및 검증한다.

I. 서론

차세대 대규모 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 네트워크에서 IoT 단말은 에너지 효율성을 위해 산발적(sporadic)으로 데이터를 전송하게 된다 [1]. 이와 같이 산발적으로 발생하는 단말을 효과적으로 탐지하기 위한 기법으로는 직교 매칭 퍼스uits(orthogonal matching pursuit: OMP [2])과 직교 최소 제곱(orthogonal least square: OLS [3]) 알고리즘이 있다. 두 알고리즘은 비슷한 동작 방식을 가지나 OMP는 상관(correlation)이 큰 후보를 선택하고 OLS는 잔차(residual)를 최소화하는 후보를 선택하는 과정에서 차이가 있다 [3]. 그러나, 두 알고리즘 모두 첫 번째 시행에서 선택된 결과가 성능에 큰 영향을 미친다. 이와 관련하여 [2]에서는 첫 번째 시행에서 여러 개의 후보를 선택하고 각 선택된 후보들에 대해 병렬적으로 OMP를 수행하는 병렬(parallel) OMP 기법이 제안되었다. 반면, OLS는 OMP보다 강인한 성능을 갖는 것으로 알려졌음에도, OLS의 성능 향상을 위한 알고리즘 개선 연구는 OMP에 비해 매우 미비한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 첫 번째 시행에서 다수의 초기값을 선택하고 선택된 초기값들로부터 각각 병렬적인 OLS를 수행하는 병렬 OLS(parallel OLS: POLS) 알고리즘을 제안한다.

II. 제안하는 Parallel Orthogonal Least Square (POLS) 알고리즘

본 논문에서는 N 개의 IoT 단말을 수용하는 대규모 IoT 네트워크를 고려한다. 이때, 각 IoT 단말은 길이가 $M(< N)$ 인 프리앰블(preamble)을 통해 기지국에 임의 접속(random access: RA)하는 환경을 가정한다. 산발적으로 데이터를 생성하는 IoT 네트워크의 트래픽 특성상 $K(< N)$ 개의 활성 IoT 단말이 존재할 때, 기지국이 측정할 수 있는 수신 신호는 다음과 같다:

$$\mathbf{y}(\in \mathbb{R}^M) = \mathbf{A}\mathbf{x},$$

여기서 $\mathbf{A}(\in \mathbb{R}^{M \times N})$ 는 $i(\in \{1, \dots, N\})$ 째 열(column)이 i 째 IoT 단말에 할당된 프리앰블을 나타내는 준 직교 센싱 행렬을 의미하며, $\mathbf{x}(\in \mathbb{R}^N)$ 는 활성 IoT 단말이 전송한 데이터를 나타내는 신호 벡터를 의미한다. 이때, $\mathbf{x}$ 는 K 개의 원소만 0이 아닌 값을 갖고 나머지 원소는 0인 희소 벡터이며 0이 아닌 값에 해당하는 인덱스를 모은 지지 집합(support set)을 S 로 정의한다.

제안하는 POLS 알고리즘은 첫 번째 시행에서 L 개의 초기값을 선택하고 각 선택된 초기값으로부터 병렬적인 OLS 분기(branch)를 형성한다. 따라서, POLS 알고리즘의 첫 번째 시행에서 $l(\in \{1, \dots, L\})$ 째 초기값은 다음과 같이 잔차를 최소화하도록 선택된다:

$$\hat{\mathbf{x}}_1^l = \arg \min_{\mathbf{x} \in \mathcal{A} \setminus \{\hat{\mathbf{x}}_1^{l-1}\}} \|\mathbf{P}_{\perp}^{\mathbf{A}} \mathbf{y}\|^2,$$

여기서 $\mathbf{P}_{\perp}^{\mathbf{A}}(\in \mathbb{R}^{M \times M})$ 은 $\mathbf{A}$ 에 포함된 인덱스에 대응되는 $\mathbf{A}$ 의 열들로 생성한 널사영 행렬을 나타내며 다음과 같다:

$$\mathbf{P}_{\perp}^{\mathbf{A}} = \mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T.$$

이후, 선택된 l 째 초기값은 $\hat{\mathbf{x}}_1^l$ 에 업데이트되며, l 째 분기에서의 $k(\in \{2, \dots, K\})$ 째 시행에서는 다음과 같이 인덱스를 선택한다:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^l = \arg \min_{\mathbf{x} \in \mathcal{A} \setminus \{\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^l\}} \|\mathbf{P}_{\perp}^{\mathbf{A}} \mathbf{y}\|^2.$$

이때, 각 분기에서 각각 독립적으로 OLS를 수행하므로 특정 시행에서 동일한 지지 집합을 갖는 분기들이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 특정 시행에서 동일한 지지 집합이 형성된 분기에 대해 다시 인덱스를 선택하도록 하여 최종적으로 모든 분기가 구분된 지지 집합을 갖도록 한다. 또한, POLS 알고리즘은 각 시행에서 구성한 지지 집합에 대해 신호 벡터를 계속 추정하고 잔차를 업데이트한다. 구체적으로, l 째 초기값에 대해 $t(\in \{1, \dots, K\})$ 째 시행에서의 신호 벡터를 다음과 같이 추정한다:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^l = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathcal{A} \setminus \{\hat{\mathbf{x}}_k^{l-1}\}} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{u}\|.$$

따라서, l 째 분기에 대한 t 째 시행에서의 잔차는 $\mathbf{r}_k^l = \mathbf{y} - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_k^l$ 와 같다. 마지막으로, 전체 K 시행 이후 모든 분기에 대해 잔차가 최소가 되는 분기의 지지 집합을 최종적인 추정 지지 집합으로 선택한다:

$$\hat{S} = \hat{S}_K^{l^*}, \quad l^* = \arg \min_{l \in \{1, \dots, L\}} \|\mathbf{r}_K^l\|^2.$$

III. 모의실험 결과 및 결론

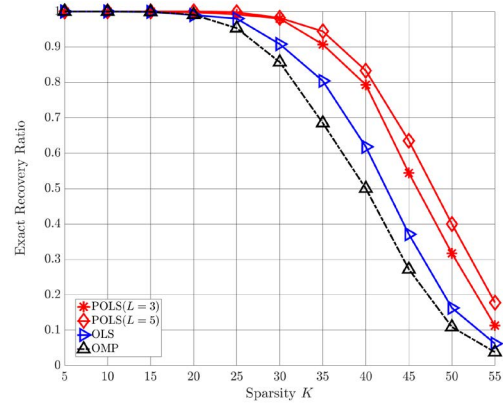


그림 1. 제안하는 POLS 알고리즘의 ERR 성능.

그림 1은 제안하는 POLS 알고리즘의 정확 복원율(exact recovery ratio: ERR) 성능을 활성 단말 수 K 에 따라 도시한 결과이다. 이때, 성능 평가 지표인 ERR는 정확히 $S = \hat{S}$ 일 때만 1을 갖도록 정의된다. 본 모의실험 환경은 $M=128$, $N=256$ 을 가정하였고, 센싱 행렬 $\mathbf{A}$ 의 모든 원소는 서로 독립인 $\mathcal{N}(0, 1/M)$ 분포를 따른다고 가정하였다 [3]. 또한, $\mathbf{x}$ 의 0이 아닌 값을 갖는 원소의 인덱스는 무작위로 추출되도록 하였으며, 이때 해당 원소의 값은 표준 정규 분포를 따르도록 설정하였다. 그림 1을 통해 제안하는 POLS 알고리즘이 종래의 OMP와 OLS 기법보다 더 큰 활성 단말의 수에서도 우수한 ERR 성능을 갖는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABC-MIMO: 중강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 및 한국연구재단의 지원(No. NRF-2022R111A3073740)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] Y. -S. Lee, K. -H. Lee, H. S. Jang, G. Jo, and B. C. Jung, "Performance analysis of resource hopping-based grant-free multiple access for massive IoT networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 2685-2689, Dec. 2022.
- [2] S. -W. Park, J. Park, and B. C. Jung, "On the sparse signal recovery with parallel orthogonal matching pursuit," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E96-A, no. 12, pp. 2728-2730, Dec. 2013.
- [3] J. Wang and P. Li, "Recovery of sparse signals using multiple orthogonal least squares," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 8, pp. 2049-2062, Apr. 2017.