

# PS-LTE 네트워크에서 신호원 방향탐지 알고리즘의 성능 분석

이영석\*, 이인기\*, 정방철<sup>o</sup>

## Performance Analysis of Signal Source Direction Finding Algorithms for PS-LTE Networks

Young-Seok Lee\*, InKi Lee\*,  
 Bang Chul Jung<sup>o</sup>

### 요약

본 논문에서는 최근 국내에서 상용화된 공공 재난 안전망(public-safety long term evolution networks: PS-LTE)에서 이중 망 간 주파수 공유로 인한 간섭 문제와 재난 상황으로 인한 긴급 중계 지원을 위해 다양한 신호원 방향탐지 알고리즘에 대해 조사한다. 이후, 각 방향탐지 알고리즘의 성능은 PS-LTE 기지국이 인접 기지국으로부터 수신할 수 있는 신호 모델에 대해 각각 비교 분석한다. 모의실험 결과를 통해, 추후 다양한 재난 환경에서 서비스에 따른 최적 PS-LTE망용 신호원 방향탐지 알고리즘을 선택하도록 각 방향탐지 알고리즘을 동작 원리 및 방식별로 분류하여 그 성능을 정성적으로 평가 및 분석한다.

**Key Words** : Public-safety long-term evolution (PS-LTE), Direction-finding, Interference Detection, Direction-of-arrival (DoA).

### ABSTRACT

In this paper, we investigate various signal source direction-finding algorithms for the interference problems caused by spectrum sharing between

heterogeneous networks and urgent relaying support due to disaster environment in the recently commercialized public-safety long-term evolution (PS-LTE) networks. Then, the performance of each direction-finding algorithm is compared and analyzed for each signal model that the PS-LTE base station can receive from the signal sources. Through extensive simulations, each direction-finding algorithm is classified by operation principle and method to select the optimal signal source direction-finding technique according to services for PS-LTE network in various disaster environments, and their performance is analyzed.

### 1. 서론

지난 2020년 국내에서는 공공안전과 재난 구조·방지를 위한 통합형 국가재난 안전통신망(public-safety long-term evolution: PS-LTE)을 세계 최초로 상용화하였다. 그러나, 현재 국내에서 상용화된 PS-LTE망 대역(700MHz대)은 철도 통합 무선통신망(LTE-Railway: LTE-R) 및 초고속 해상 무선통신망(LTE-Maritime: LTE-M)과 동일한 주파수 대역을 공유하여 주파수 간섭 문제를 야기할 수 있다. 또한, 재난 상황으로 인해 코어 망이 제 기능을 수행할 수 없을 때 PS-LTE 이동 기지국이 인접 기지국의 긴급 중계 시스템을 지원할 수 있다.

동일한 주파수 대역을 공유하는 이중 시스템 간 간섭 문제는 무선 접속 네트워크 공유 기술(radio access network sharing: RAN-Sharing)을 통해 일부 장비를 공유함으로써 해결할 수 있다<sup>1)</sup>. 또한, LTE-M과 PS-LTE망 상호 운용 시 실측 전계 강도를 이용한 랜덤 액세스 기술도 제안되었다<sup>2)</sup>. 그러나, 재난 상황을 고려할 때 PS-LTE 이동 기지국이 각 공유 네트워크 장비의 각 인터페이스 간 상호 연동을 지속적으로 지원하는 것은 큰 오버헤드 및 안정성 문제가 발생한다. 무인기를 활용한 재난 상황 내 이중 네트워크 간 간섭 완화 방안을 제시하였으나<sup>3)</sup>, GPS(global positioning system)의 주파수와 신호 구조가 알려져 있어 전쟁 및

※ 본 연구는 행정안전부 지능형 상황관리 기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(2022-MOIS37-005).

• First Author : (0000-0002-8552-1731) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, yslee@o.cnu.ac.kr, 학생(박사), 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : (0000-0002-4485-9592) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr, 정교수, 중신회원

\* Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), popularity1@etri.re.kr, 책임연구원

논문번호 : 202302-029-A-LU, Received February 15, 2023; Revised February 16, 2023; Accepted February 16, 2023

테러와 같은 재난 상황에서 재밍과 같은 의도적 간섭 공격으로 인해 무력화될 수 있다<sup>4)</sup>.

한편, PS-LTE 이동 기지국이 인접 신호원의 신호 방향을 실시간으로 탐지하여 빔포밍을 통해 주파수 공유로 인한 간섭을 완화할 수 있다. 또한, 인접 기지국의 긴급 중계 임무를 위해서도 이동 기지국의 인접 신호원 방향탐지는 필수적이다. 따라서, 본 논문에서는 이를 위한 기초적인 작업으로써 다양한 방향탐지 알고리즘을 조사하고 인접 기지국으로부터 수신할 수 있는 신호 모델에 대한 방향탐지 성능을 비교 및 분석한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 재난 환경에서 PS-LTE용 이동 기지국과  $K$ 개의 인접 기지국이 존재하는 네트워크를 고려한다. 이때 PS-LTE 이동 기지국과 달리 인접 기지국은 고정형으로 운용되고 그 위치가 알려져 있어 PS-LTE 이동 기지국이 인접 기지국과 가시선(line-of-sight: LoS) 경로를 확보할 수 있다고 가정하였다. 또한, PS-LTE 이동 기지국은 내장된  $N$ 소자 균일 선형 배열안테나(uniform linear array: ULA)를 이용하여 인접 기지국의 방향을 탐지한다고 가정한다. 이때, 인접 기지국으로부터, PS-LTE 이동 기지국은 다음과 같이 두 모델에 대한 신호를 수신할 수 있다.

$$\mathbf{y}(\in \mathbb{C}^N) = \begin{cases} \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \mathbf{a}_k + \mathbf{w}, & H_0 \\ \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} C_k \mathbf{a}_k + \mathbf{w}, & H_1 \end{cases}, \quad (1)$$

여기서  $P_k \in \mathbb{R}$ 는  $k \in \{1, \dots, K\}$  째 인접 기지국에 의해 수신한 신호의 전력을 의미하고  $\mathbf{a}_k \in \mathbb{C}^N$ 는  $k$  째 인

접 기지국 신호 조향 벡터(steering vector)를 의미하며, 도래각  $\phi_k$ 에 대해  $i \in \{1, \dots, N\}$  째 원소  $a_{k,i}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$a_{k,i} = e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (i-1) d \sin \phi_k}, \quad (2)$$

여기서  $d$ 는 안테나 이격거리를 의미하고  $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^N$ 은 수신 안테나에 발생하는 부가 잡음 벡터를 의미하며 모든 잡음 원소는 서로 통계적으로 독립이고 동일한  $\mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$  분포를 따른다고 가정하였다.

본 논문에서  $H_0$  신호는 인접 기지국으로부터 수신할 수 있는 신호 중 파일럿 신호를 비롯한 참조 신호(reference signal)와 데이터 신호를 모두 포함하고,  $H_1$  신호는 PSS(primary synchronization sequence)와 같이 채널 추정이나 프레임 동기를 위한 시퀀스 신호를 의미하며  $C_k \in \mathbb{C}$ 는  $k$  째 인접 기지국의 특정 시퀀스 심볼을 나타낸다. 본 논문에서는 각 신호 모델에 대해 multiple signal classification (MUSIC), root-MUSIC, estimation of signal parameter using rotational invariance technique (ESPRIT)<sup>5)</sup>, 상관형 위상 비교(correlative interferometer: CI) 기법, 압축 센싱 기반 simultaneous orthogonal matching pursuit (SOMP) 기법을 각각 적용하여 방향탐지 성능을 비교 분석한다. 여기서, MUSIC, Root-MUSIC 및 ESPRIT 기법은 수신 신호의 공분산 연산을 통해 신호의 공간적 특성을 이용하여 신호원 방향탐지를 수행하고, CI 기법은 수신 신호와 후보 위상을 서로 비교하여 위상차가 최소화되는 위상을 추정해 신호원 방향을 탐지한다. 압축 센싱 기반의 SOMP 기법은 수신 신호의 희소성(sparsity)을 이용하여 수신 신호와 후보 조향 벡터 간 상관값이 최대가 되는 조향 벡터로 신호원 방향을 추정하며 해당 방향 성분을 제거하면서 반복 탐지한다<sup>6)</sup>.

## III. 모의실험 결과

본 모의실험에서 중심 주파수는 700MHz로 가정하였고 도래각 정보가 각각  $-20^\circ$  와  $20^\circ$  인 두 신호원이 존재하는 네트워크를 가정하였다. 또한, 4소자 ULA를 수신 배열안테나로 가정하였으며 방향탐지를 위한 샘플 수는 100개로 설정하였다. 본 논문에서는  $H_1$  신호에 대해 시퀀스  $C_k$ 를 각각 통계적으로 독립인  $\mathcal{CN}(0,1)$  분포로 가정하였으며 방향탐지 성능은 추

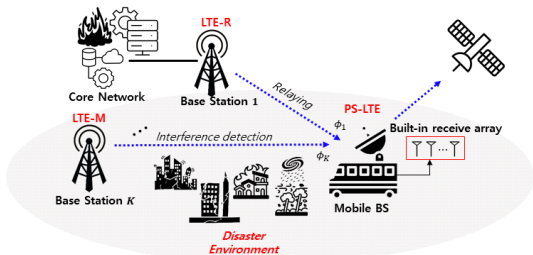


그림 1. 재난 환경에서 신호원 방향탐지를 위한 PS-LTE망 시스템 모델.  
Fig. 1. A system model of PS-LTE networks for signal source direction finding in disaster environment.

정확한 도래각( $\hat{\phi}$ )과 실제 도래각( $\phi$ )간의 평균 제곱근 편차(root-mean squared error: RMSE)를  $RMSE = \sqrt{\mathbb{E}[(\hat{\phi} - \phi)^2]}$  와 같이 정의하였다.

그림 2는 (1)에서  $H_0$  신호에 대한 방향탐지 알고리즘별 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio: SNR) 대비 RMSE 성능을 나타내고 그림 3은  $H_1$  신호에 대한 SNR 대비 RMSE 성능을 나타낸다. MUSIC, Root-MUSIC, ESPRIT 알고리즘은 공분산 연산을 이용한 방향탐지 알고리즘으로 신호 간 상관으로 인해 파일럿 신호에 대해 정밀한 방향탐지가 수행되지 않으나 CI 알고리즘은 효율적인 위상 추정이 가능하여 가장 우수한 성능을 갖는다. 한편, 시퀀스 신호에 대해선 신호 간 상관이 최소화된 공분산 연산이 수행될 수 있어 공분산 기반 방향탐지 알고리즘이 가장 우수한 성능을 보인다. 압축 센싱 기반의 SOMP 알고리즘은 희소성 기반 방향탐지 알고리즘이므로 신호 모델

과 관계없이 대체로 강인한 방향탐지 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 방향탐지 알고리즘의 성능 분석

##### 4.1 동작 원리별 방향탐지 알고리즘 분류

방향탐지 알고리즘은 동작 원리에 따라 상관 기반 알고리즘(CI, SOMP)과 부공간 기반 알고리즘(MUSIC, Root-MUSIC, ESPRIT)으로 분류할 수 있다. 상관 기반 알고리즘은 위상이나, 조향 벡터 간 상관을 통해 신호원 방향탐지를 수행하는 알고리즘으로 공분산이나 고유값 분해와 같은 복잡한 연산이 필요 없고 파일럿 신호에 대해 강인한 방향탐지 정확도 성능을 갖는다. 한편, 부공간 기반 알고리즘은 다수의 샘플을 수집하여 공분산 연산 후, 신호 부공간을 분리하여 방향탐지를 수행한다. 따라서, 샘플 수가 적을수록 정확한 공분산을 계산하지 못해 성능 열화가 발생할 수 있고, 시퀀스 신호를 이용하여 신호 간 상관을 줄일 때 우수한 방향탐지 성능을 갖는다.

##### 4.2 동작 방식별 방향탐지 알고리즘 분류

방향탐지 알고리즘은 동작 방식에 따라 휴리스틱 알고리즘(MUSIC, CI, SOMP)과 파라미터 추정 알고리즘(Root-MUSIC, ESPRIT)으로도 분류할 수 있다. 휴리스틱 알고리즘은 탐지하고자 하는 모든 후보 방향에 대한 조향 벡터 또는 위상을 생성하여 완전 탐색을 수행한다. 이는 각각의 탐색 결과를 저장해야 하는 추가 메모리가 필요할 수 있고, 각도 분해능이 방향탐지 성능에 영향을 미친다. 한편, 파라미터 추정 알고리즘은 신호원 방향을 수학적 연산을 통해 직접 추정하여 동작 소요 시간과 메모리 비용을 줄일 수 있고 낮은 SNR에서 우수한 방향탐지 성능을 가진다. 그러나, 파라미터 추정 알고리즘은 특정 배열안테나에서만 적용 가능하며 일례로 Root-MUSIC 알고리즘은 오직 ULA에서만 적용할 수 있다.

#### V. 결론

PS-LTE 이동 기지국은 인접 기지국과의 주파수 공유로 인해 발생할 수 있는 간섭 문제와 긴급 중계 지원 임무에 대해 인접 신호원 방향을 탐지하여 해결할 수 있다. 본 논문에서는 대표적인 방향탐지 알고리즘을 조사하고 인접 기지국으로 수신할 수 있는 신호 모델에 대한 방향탐지 성능을 정성적으로 분석하였다. 본 논문의 결과는 다양한 재난 환경을 고려할 때 방향

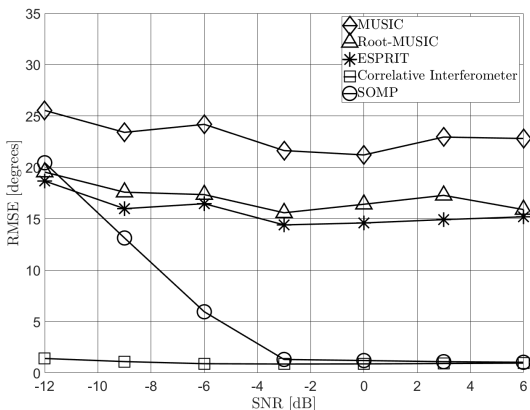


그림 2. 파일럿 신호에 대한 SNR 대비 RMSE 성능  
Fig. 2. RMSE performance versus SNR for pilot signal.

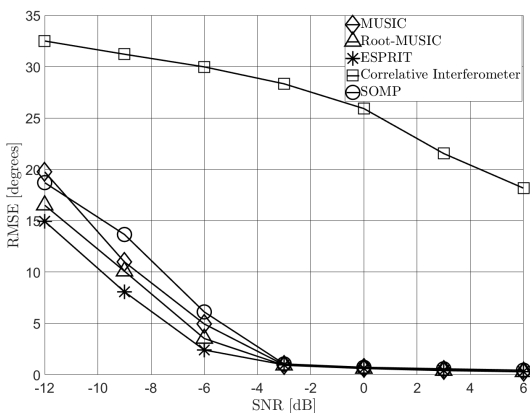


그림 3. 시퀀스 신호에 대한 SNR 대비 RMSE 성능.  
Fig. 3. RMSE performance versus SNR for sequence signal.

탐지 성능에 영향을 미치는 요소를 쉽게 파악하고 효율적인 신호원 방향탐지 설계를 위한 기초 작업으로 활용될 수 있다.

## References

- [1] H. Cho, H. Kim, and I. Sohn, "Research on co-channel interference analysis of jointly deployed LTE-based railway communication systems and public safety communication systems and their coexistence strategy," *J. KICS*, vol. 42, no. 6, pp. 1276-1284, Jun. 2017.  
(<https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.6.1276>)
- [2] I. Ahamad and K. Chang, "Mission critical user priority-based random access scheme for collision resolution in coexisting PS-LTE and LTE-M networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 115505-115517, Aug. 2019.  
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2934778>)
- [3] A. Carreras-Coch, J. Navarro, C. Sans, and A. Zaballos, "Communication technologies in emergency situations," *Electronics*, vol. 11, no. 7, pp. 1155, Apr. 2022.  
(<https://doi.org/10.3390/electronics11071155>)
- [4] Y. Hu, S. Bian, B. Li, and L. Zhou, "A novel array-based spoofing and jamming suppression method for GNSS receiver," *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 7, pp. 2952-2958, Apr. 2018.  
(<https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2797309>)
- [5] Z. Chen, G. Gokeda, and Y. Yu, *Introduction to Direction-of-arrival Estimation*, Artech House, 2010.
- [6] Y. -S. Lee, J. S. Yeom, J. H. Noh, S. J. Lee, and B. C. Jung, "A novel GNSS spoofing detection technique with array antenna-based multi-PRN diversity," *J. PNT*, vol. 10, no. 3, pp. 169-177, Sep. 2021.  
(<https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.3.169>)