

# 주파수-효율적 물리계층 동기 기술에 관한 연구

장갑석, 고영조, 김일규  
미래이동통신연구본부, 통신미디어연구소, 한국전자통신연구원

{kschang,koyj,igkim}@etri.re.kr

## A Study on Frequency-Efficient Physical-Layer Synchronization

Kapseok Chang, Young Jo Ko, and Il Gyu Kim  
Electronics and Telecommunications Research Institute

### 요약

본 논문은 위치를 측위하는 방식들에 대해 먼저 소개한다. 다음으로, 이들 중 초정밀 위치측위를 달성할 수 있는 타이밍을 기반으로 하는 방식에서 대역폭의 증가 없이 타이밍 정확도를 개선할 수 있는 주파수 효율적인 물리계층 동기 획득 기술을 제시하고 이러한 기술을 사용하지 않는 경우와 그 성능을 비교해 기술의 우수성을 입증한다.

### I. 서론

최근 단말의 위치정보에 기반한 다양한 서비스가 창출되고 있으며 특히 공장자동화, 차량사물통신, 자율주행 및 치매환자 실종 방지 등 새로운 이동통신 융합 산업들은 이동 단말에 대한 위치의 높은 정확도(최대 10 cm) 및 실시간 위치 추적 기능을 요구한다[1],[2]. 이에 본 논문에서는 먼저 대표적인 3GPP 위치 측위 방식들에 대한 장단점을 분석해 구현·성능측면에서 측위 정확도를 높일 수 있는 타이밍 기반 측위 방식을 선택한다. 이 방식에서 측위 성능에 가장 영향을 미치는 요소는 시간분해능 향상을 통한 정밀 타이밍 동기 획득이다. 일반적으로 정밀 시간분해능 확보를 위해 선 넓은 대역폭 (e.g., 10 cm 오차를 위한 3GHz 대역폭)이 필요하지만 Sub-THz 대역에서나 가능한 것이지 현재 전세계적으로 사용되는 Sub-6GHz 대역에서는 불가능하다. Sub-6GHz 대역에서 정밀한 타이밍 동기를 위해 선 대역폭은 넓히지 않으면서 Upsampling 개념을 이용하면 시간분해능을 더욱 더 깊게 만들 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 Upsampling 개념을 도입해 결국 타이밍 정확도 개선을 할 수 있는 지에 대한 결론을 도출하기 위한 모의실험과 수학적 분석을 제시한다.

### II. 3GPP 위치측위 방식

그림. 1 과 같이 TDOA (Time Difference of Arrival) 기반 측위 방식과 AoA (Angle of Arrival) 기반 측위 방식에 대해 소개한다[3],[4]. TDOA 는 MS 가 공간적으로 분리된 3 개 이상의 BS 로부터 수신하는 신호의 수신 타이밍 (여기선  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  에 해당)을 추정하고 그 정보를 위치 서버에 보고한다. BS 들의 절대적인 시간이 서로 동일하다 가정하면 위치 서버에서 수신 타이밍 차이를 이용해 MS 의 위치를 측위할 수 있다. AoA 는 MS 가 공간적으로 분리된 2 개 이상의 BS 로부터 수신하는 신호의 AoA (여기선 AoA1, AoA2 에 해당)를 측정하고 그 정보를 위치 서버에 보고하면 위치 서버에서 상이한 AoA 를 이용해 MS 의 위치를 측위한다.

표. 1 에서 보는 바와 같이 AoA 기반 측위 방식은 고성능 하드웨어를 가지는 지향성 안테나와 이에 대한

보정이 필요하며 송수신기간 거리가 멀어지면 AoA 분해능 한계를 벗어나 더 큰 측위 오차가 발생한다. 반면 TDOA 기반 측위 방식에서 요구되는 BS 간 절대동기는 BS 들이 유선으로 연결되어 있고 IEEE 1588 표준에서 규정한 절대동기 기술을 적용하면 향후 정밀한 절대동기화가 가능하므로, 근복적으로는 수신 타이밍 정확도를 높이기 위해 넓은 대역폭이 필요하지만 Sub-6GHz 대역에서 비교적 좁은 대역폭으로 충분한 시간분해능을 가지도록 했을 때 타이밍 정확도를 개선할 수 있는 방법이 있다면 TDOA 기반 측위 방식이 효율적인 방식이 될 수 있다고 판단된다.

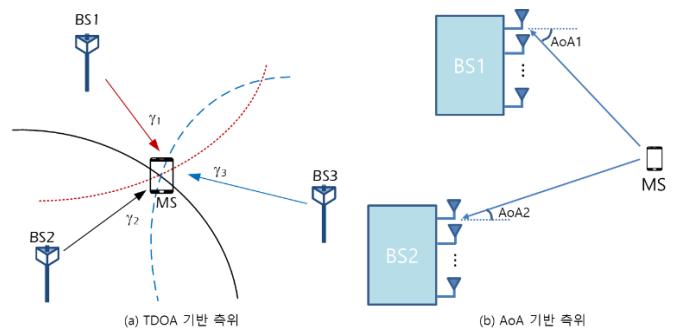


그림. 1 3GPP 위치측위 방식

표. 1 위치측위 방식별 장단점

방식	장점	단점
TDOA 기반	타이밍 기반 고정밀 측위 가능	BS 간 절대동기 필요 넓은 대역폭 필요
AoA 기반	방향 기반 고정밀 측위 가능	지향성 안테나 보정 필요 송수신 거리에 따른 오차

### III. Upsampling에 따른 타이밍 정확도 분석

본 논문의 Upsampling 은 대역폭의 증가 없이 시간분해능을 정밀하게 하는데 목적이 있으므로 수신단에서 수행되며, Upsampling 의 방법론은 영역을 기준으로 시간영역 기반 Upsampling (이하 M1 이라 명명)과 주파수영역 기반 Upsampling (이하 M2 라 명명)으로 나눌 수 있다.

일반성을 해치지 않는 범위 내에서, 그림. 1(a)의 BS 와 MS 는 20 MHz 대역폭, 15 kHz SCS (Sub-Carrier Spacing), 8 개 null 부반송파 포함 총 72 개 부반송파를 차지하는 가운데 PSS (Primary Synchronization Signal) 신호와 그 외 1272 개 부반송파를 차지하는 데이터/제어 채널 및 848 개 null 부반송파를 차지하는 guard band 로 구성되는 LTE 시스템을 따른다고 가정한다. 이렇게 가정하면 BS 들은 서로 다른 PSS 신호가 포함된 심볼을 30.72MHz (i.e., 15kHz SCS  $\times$  2048-point IFFT) 샘플링율로 MS 에 전송하는 것과 같다. 또한, MS 가 수신시 기저대역으로 64 개 부반송파를 가지는 PSS 만 필터링하고 나머지 부반송파들은 이상적으로 nulling 한다고 가정한다.

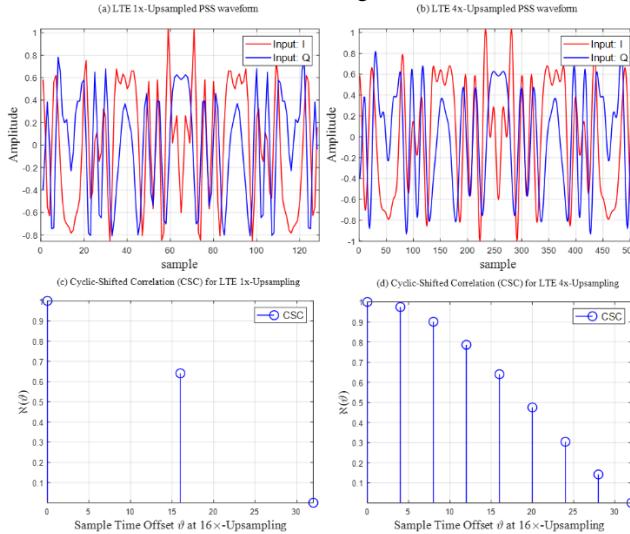


그림. 2 PSS 파형과 Correlation Property 결과 그래프

이 때, M1 은 ADC (Analog-to-Digital Converter) 통과 샘플링율에 따라 K 배 업샘플링된 PSS 신호를 이용해 수신 타이밍을 추정하는 시간영역 기반 방법론이다. 여기서  $K \times$ -Upsampling 은 ( $15\text{kHz SCS} \times 128 \times K$ ) Hz 로 샘플링된 PSS 신호를 이용한 타이밍 추정을 의미한다. 반면, M2 는 시간영역에서 초기 동기를 잡은 후에 refined 하게 수행되는 방법론으로,  $K \times$ -Upsampling 은 먼저 ( $128 \times K$ )-point FFT 를 수행한 후 PSS 가 차지하는 64 개 부반송파를 제외한 나머지 부반송파의 신호를 제로화하고, 다시 시간영역으로 전환해 수신 타이밍을 추정한다. 상기 가정과 함께 잡음이 없다면, M1 과 M2 모두에 대해, 그림. 2(b)의 시간영역  $4 \times$ -Upsampled PSS 신호는 그림. 2(a)의  $1 \times$ -Upsampled PSS 신호의 Interpolated 버전으로 보이고, 그림. 2(d)의  $4 \times$ -Upsampled PSS 신호에 대한 cyclic-shifted correlation 도 그림. 2(c)의  $1 \times$ -Upsampled PSS correlation 의 Interpolated 버전처럼 보임을 알 수 있다.

다음으로, Upsampling 에 따른 타이밍 정확도 성능 분석을 위해, 그림. 3 과 같이 PSP 는  $16 \times$ -Upsampling 된 신호 상에 존재하며 [0.8] SP 사이에서 일양하게 분포한다 가정한다. 일례로, 그림상 PSP 가 SP 4 에 위치한다면  $1 \times$ , Upsampling 방법론을 채용한다면 선천적으로 STO  $\vartheta$  (i.e., 완전한 동기 SP 와 추정된 SP 간  $16 \times$ -Upsampling scaled 샘플 읍셋) 4 가 발생함을 의미한다.

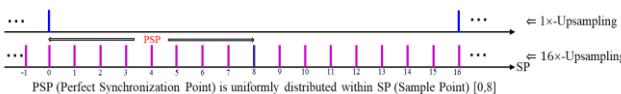


그림. 3 타이밍 오차 성능분석을 위한 동기점 가정

페이딩과 잡음이 없는 경우를 가정하고 이론적으로 수신 타이밍 오차  $\Omega$ 를 도출하면 다음 식과 같이 정의된다.

$$\Omega = \sum_{\vartheta=-0.5(A_K-1)}^{\vartheta=+0.5(A_K-1)} \frac{\Xi_K(\vartheta)}{A_K} \quad (1)$$

여기서,  $A_1 = 17$ ,  $A_2 = 9$ ,  $A_4 = 5$ ,  $A_8 = 3$  ° 고,  $\Xi_K(\vartheta)$  는 다음과 같이 정의된다.

$$\Xi_K(\vartheta) = \begin{cases} 0, & \vartheta = 0 \\ | \vartheta |, & |\vartheta| \geq 1 \text{ and } |\mathbf{x}(0) - \mathbf{x}(|\vartheta|)| < [\mathbf{x}(\vartheta) - \mathbf{x}(A_K - 1)] \\ (A_K - 1) - |\vartheta|, & |\vartheta| \geq 1 \text{ and } |\mathbf{x}(0) - \mathbf{x}(|\vartheta|)| \leq [\mathbf{x}(\vartheta) - \mathbf{x}(A_K - 1)] \end{cases} \quad (2)$$

또한,  $\mathbf{x}(\vartheta)$ 는 그림. 2(d)에 나타낸 CSC 결과값을 의미한다. 상기에서 언급한 수신 타이밍에 대한 동기 환경과 더불어, 일반성을 해치지 않는 범위 내에 페이딩없이 잡음만 존재한다고 가정했을 때, 수신 타이밍 정확도 성능은 그림. 4 와 같다. 상기에서 PSS 에 대한 기저대역 필터가 완벽하다 가정했기 때문에 성능 분석시, M1 과 M2 의 수신 SNR 은 동일하게 놓을 수 있음을 참고한다.

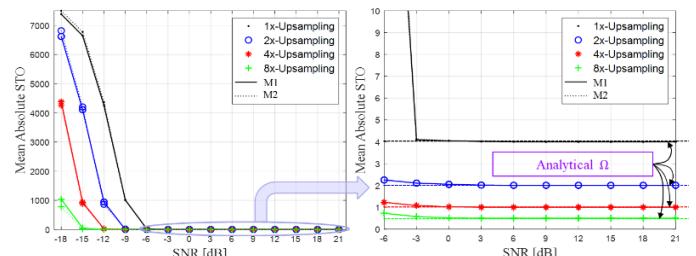


그림. 4 Upsampling에 따른 수신 타이밍 정확도 성능

그림. 4로부터 다음과 같은 결과들이 관찰된다.

- M1 과 M2 는 본 논문의 가정에 따르면 수신 SNR 이 동일하기 때문에 거의 동일한 수신 타이밍 추정 성능을 갖는다.
- SNR 이 높은 구간에서는 실험의 수신 타이밍 정확도 결과와 식 1에서 정의된 이론적 결과가 일치한다.
- 잡음만 존재하는 환경에서는 K 배 Upsampling 을 할 때마다 이에 비례해 K 배만큼 수신 타이밍 추정 성능이 개선됨이 관찰된다.
- 잡음만 존재하는 환경은 LoS (Line-of-Sight)가 강한 실제 페이딩 환경으로 간주될 수 있으므로 개활지와 같은 환경에서는 거의 그림. 4 에서 관찰된 성능과 유사할 것을 예상된다.

#### IV. 결론

제시하는 Upsampling 방법론을 채용하면 대역폭 증가 없이도 수신 타이밍 정확도를 개선할 수 있다. 그러나, NLoS (Non-Line-of-Sight)가 강하게 존재하는 페이딩 환경에서도 잡음만 존재하는 환경에서의 수신 타이밍 정확도를 달성하게 하는 기술 개발이 매우 중요하므로 이 부분에 대한 연구에 집중할 필요가 있다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2019-0-00002, [전문연구실]조정밀 서비스 실현을 위한 On-Time · On-Rate 무선 액세스 및 광에지 클라우드 네트워킹 핵심기술 개발)

#### 참고문헌

- [1] TS 22.261 (V17.3.0), "Service requirements for the 5G system," 3GPP TSG RAN, July 2020.
- [2] 미래창조과학부, "사회적 약자 실종 방지를 위한 위치추적 시스템 개발," 보도자료, 2015년 7월.
- [3] TR 38.855 (V16.0.0), "Study on NR positioning support (Release 16)," 3GPP TSG RAN, March 2019.
- [4] Qualcomm, "Positioning evaluation methodology and results," R1-1813451.