

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

요 약

본 논문은 위치를 측위하는 방식들에 대해 먼저 소개한다. 다음으로, 이 들 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 위해선 넓은 대역폭 (e.g., 10 cm 오차를 위한 3GHz 대역폭)이 필요하지만 Sub-THz 대역에서나 가능한 것이지 현재 전 세계적으로 사용되는 Sub-6GHz 대역에서는 불가능하다. Sub-6GHz 대역에서 정밀한 타이밍 동기를 위해선 대역폭은 넓히지 않으면서 Upsampling 개념을 이용하면 시간분해능을 더욱더 짧게 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 τ_1, τ_2, τ_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, 근본적으로는 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.

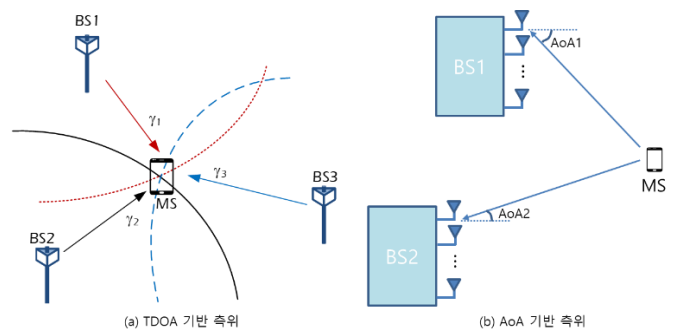


그림. 1 3GPP 위치측위 방식

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 BS와 MS는 20 MHz 대역폭, 15 kHz SCS (Sub-Carrier Spacing), 8 개 null 부반송파와 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 band로 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 MS에 전송하는 것과 같다. 또한, MS가 수신시 기저대역으로 64 개 부반송파를 가지는 PSS만 필터링하고 나머지 부반송파들은 이상적으로 nulling 한다 가정한다.

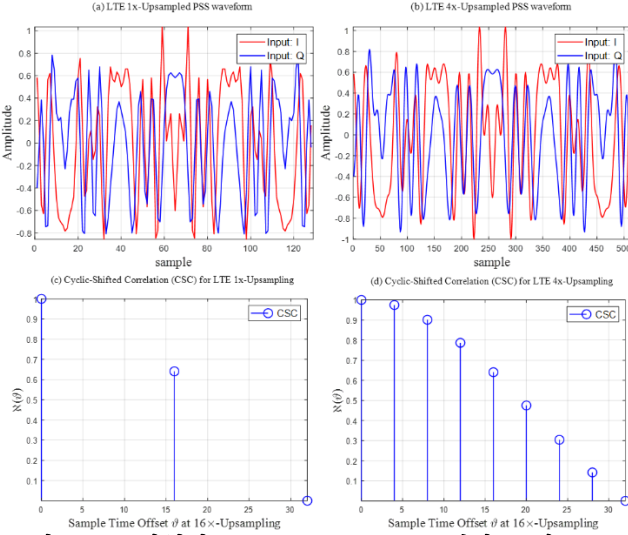


그림. 2 PSS 파형과 Correlation Property 결과 그래프

이 때, M1은 ADC (Analog-to-Digital Converter) 통과 샘플링율에 따라 K배 업샘플링된 PSS 신호를 이용해 수신 타이밍을 추정하는 시간영역 기반 방법론이다. 여기서 Kx-Upsampling은 (15kHz SCS \times 128 \times K) Hz로 샘플링된 PSS 신호를 이용한 타이밍 추정을 의미한다. 반면, M2는 시간영역에서 초기 동기를 잡은 후에 refined하게 수행되는 방법론으로, Kx-Upsampling은 먼저 (128xK)-point FFT를 수행한 후 PSS가 차지하는 64개 부반송파를 제외한 나머지 부반송파의 신호를 제로화하고, 다시 시간영역으로 전환해 수신 타이밍을 추정한다. 상기 가정과 함께 잡음이 없다면, M1과 M2 모두에 대해, 그림. 2(b)의 시간영역 4x-Upsampled PSS 신호는 그림. 2(a)의 1x-Upsampled PSS 신호의 Interpolated 버전으로 보이고, 그림. 2(d)의 4x-Upsampled PSS 신호에 대한 cyclic-shifted correlation도 그림. 2(c)의 1x-Upsampled PSS correlation의 Interpolated 버전처럼 보임을 알 수 있다. 다음으로, Upsampling에 따른 타이밍 정확도 성능 분석을 위해, 그림. 3과 같이 PSP는 16x-Upsampling된 신호 상에 존재하며 [0,8] SP 사이에서 일양하게 분포한다고 가정한다. 일례로, 그림상 PSP가 SP 4에 위치한다면 1x-Upsampling 방법론을 채용한다면 선천적으로 STO θ (i.e., 완전한 동기 SP와 추정된 SP 간 16x-Upsampling scaled 샘플 업셋) 4가 발생함을 의미한다.

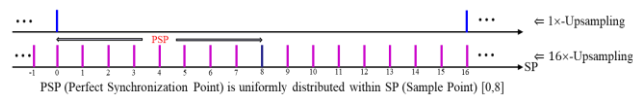


그림. 3 타이밍 오차 성능분석을 위한 동기점 가정

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

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

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

$$\Xi_K(\theta) = \begin{cases} 0, & \theta = 0 \\ |\theta|, & |\theta| \geq 1 \text{ and } |\kappa(0) - \kappa(|\theta|)| < |\kappa(\theta) - \kappa(A_K - 1)| \\ (A_K - 1) - |\theta|, & |\theta| \geq 1 \text{ and } |\kappa(0) - \kappa(|\theta|)| \leq |\kappa(\theta) - \kappa(A_K - 1)| \end{cases} \quad (2)$$

또한, $\kappa(\theta)$ 는 그림. 2(d)에 나타난 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. 4와 같다. 상기에서 PSS에 대한 기저대역 필터가 완벽하다 가정했기 때문에 성능 분석시, M1과 M2의 수신 SNR은 동일하게 놓을 수 있음을 참고한다.

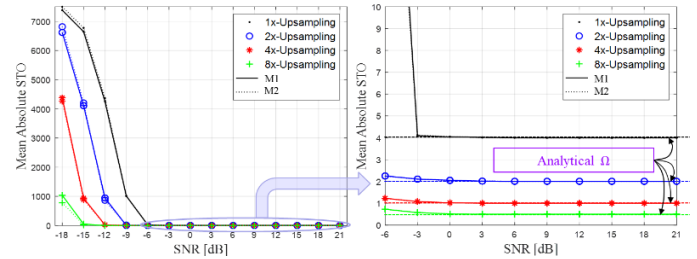


그림. 4 Upsampling에 따른 수신 타이밍 정확도 성능

그림. 4로부터 다음과 같은 결과들이 관찰된다.

- M1과 M2는 본 논문의 가정에 따르면 수신 SNR이 동일하기 때문에 거의 동일한 수신 타이밍 추정 성능을 갖는다.
- SNR이 높은 구간에서는 실험의 수신 타이밍 정확도 결과와 식 1에서 정의된 이론적 결과가 일치한다.
- 잡음만 존재하는 환경에서는 K배 Upsampling을 할 때마다 이에 비례해 K배만큼 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. 4에서 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.