

협대역 사물인터넷 네트워크에서 오버샘플링을 이용한 관측 도착 차등 시간 기반 사물인터넷 단말 측위 성능 향상기법

정민수*, 나지현*, 문정보*, 김선우^o

Performance Enhancement of Observed TDOA Based IoT Terminal Localization Using Oversampling in Narrow-Band-IoT Networks

Minsoo Jeong*, Jeehyeon Na*, Jungmo Moon*, Sunwoo Kim^o

요약

위치정보를 이용한 다양한 기술이 연구됨에 따라 그 중요성이 점점 높아지고 있다. 이러한 현상은 다가오는 5G 상용화에 따라 NB-IoT 같은 IoT를 위한 LPWA 통신에도 마찬가지로 적용된다. 그러나 일반적인 NB-IoT 신호는 협대역과 Nyquist의 샘플링 이론에 따른 낮은 샘플링 주파수로 인해 OTDOA 기반 측위에서 넓은 샘플간격이라는 근본적인 한계를 보인다. 이에 따라 본 논문에서는 NB-IoT 신호를 이용한 OTDOA 기반 측위 알고리즘을 구현하였고, 측위성능 한계를 극복하기 위하여 오버샘플링을 통하여 샘플 간격을 줄이는 방법을 제안하였다. MATLAB 시뮬레이션을 통해 샘플링 주파수에 따른 기지국에서 단말까지의 거리추정 성능 분석과 다수의 기지국에서의 OTDOA 기반 측위성능을 분석하여, 적절한 측위 성능과 소모 전력감소를 동시에 만족할 수 있는 샘플링 주파수 수치를 제안한다.

Key Words : IoT localization, NB-IoT, PRS, Oversampling, Sample interval

ABSTRACT

As various technologies using location information are studied, their importance is increasing. This phenomenon applies equally to LPWA communications for IoT, such as NB-IoT, as the upcoming 5G commercialization. However, the typical NB-IoT signal has a fundamental limit of wide sample interval in OTDOA based localization due to narrowband and low sampling rate according to Nyquist's sampling theory. In this paper, we implemented an OTDOA based localization algorithm using NB-IoT signal and proposed a method to reduce sample interval by oversampling to overcome localization performance limit. In this paper, we propose a sampling rate which can satisfy both the localization performance and the power consumption reduction by analyzing the distance estimation performance from the base station to the terminal and the OTDOA - based localization performance in the multiple base stations through MATLAB simulation.

※ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT연구센터 육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 [IITP-2018-0-01637]

• First Author : (ORCID:0000-0003-0327-275X)Hanyang University Department of Electronics and Computer Engineering, qwjms@hanyang.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-7055-6587)Hanyang University Department of Electronic Engineering, remero@hanyang.ac.kr, 종신회원

* (ORCID:0000-0002-4129-977X)Electronic and Telecommunications Research Institute:ETRI, jhna@etri.re.kr, jmmoon@etri.re.kr, 정회원
논문번호 : 201806-A-148-RE, Received March 25, 2018; Revised August 25, 2018; Accepted August, 27, 2018

I. 서 론

위치정보는 이전에는 응급전화와 같은 때 송신자의 위치파악을 위해 사용되었으며, 최근에는 위치정보를 기반으로 한 채널용량, 전송전력 최적화 등 통신기술 성능 향상 연구에 사용되고 있다¹⁻³⁾. 다양한 방법에 사용될 수 있는 위치정보는 전통적으로 GPS(global positioning system)와 같은 인공위성을 이용하여 추정되었다. 그러나 인공위성을 이용하는 방법은 위성시계오차, 위성궤도정보 오차, 전리층/대류권 오차, 다중경로 등으로 인하여 수m에서 수십m 까지 오차 발생한다. 이러한 오차는 특히 고층건물이 많은 도심 지역에서 크게 나타나기에 이를 극복하기 위하여 DGPS, RTK GNSS, A-GNSS와 같은 방법이 제안되었다. 이와 별개로, LIDAR, RADAR와 같은 센서를 이용하는 방법^{4,5)}, Wi-Fi, Bluetooth 등의 근거리 통신을 이용한 방법, 지상에 설치되어 있는 4G LTE(long-term evolution) 등의 이동통신 네트워크 망을 이용하는 방법도 사용되고 있다^{6,7)}.

또한, 5G 상용화가 다가오면서 차세대 이동통신을 통하여 제공될 주요 서비스 중 하나로 거론되고 있는 IoT(internet of things) 단말의 사용량도 증가하고 있다. 하지만 산업 전반에 사용될 많은 기기들은 광범위한 지역에 퍼져 있고, 수많은 기기를 적은 전력을 이용하여 연결할 수 있도록 요구받고 있는 상황이다. 이런 상황에서 근거리 통신의 좁은 통신 범위는 요구조건을 모두 충족하지 못하고 있으며, LTE는 요구사항을 처리하기엔 주파수, 전력 자원 낭비가 심하다. 이에 저전력 광범위 통신이 가능한 NB-IoT(narrowband IoT), LoRa(long range) 와 같은 LPWA(low power wide area)네트워크가 대안으로 제시되고 있다⁸⁾. LPWA 네트워크 중 NB-IoT는 국제 표준화 단체인 3GPP(third generation project partnership)에서 표준화되었으며 기존 LTE 기지국에서 소프트웨어 변형을 통해서 신호를 송신 할 수 있는 장점을 갖고 있기에 LoRa보다 높은 범용성을 갖는다.

그러나 여러 연구진들은 NB-IoT 네트워크가 다수의 단말을 연결할 수 있고, 소비전력이 낮은 장점을 가지고 있지만, 180kHz라는 좁은 전송대역폭을 사용하기에 근본적인 측위 성능 한계를 보인다고 결론 내렸다⁹⁾. 이에 낮은 측위 성능을 극복하기 위하여 FH, 오버샘플링을 이용한 방법들이 제안되었으며 NB-IoT를 표준화 했던 3GPP RAN 1 회의에서도 다루지고 있다¹⁰⁻¹³⁾.

제안된 방법 중 FH(frequency hopping)을 이용한

NB-IoT 측위는 일차적으로 하나의 RB로 구성된 NB-IoT 네트워크를 그룹화 PRS(positioning reference signal) 심볼로 만든 후 이차적으로 여러 주파수 홉에서 만들어진 그룹 PRS 심볼을 다시 그룹화 해서 신호의 전송 대역폭을 넓게 변화시켜주는 방법으로 그룹화 하는 주파수 홉의 개수에 따라 측위 성능이 증가한다. 다만 주파수 홉의 개수가 늘어날수록 그룹 지연과 주파수 오프셋 차이로 인하여 성능 감소가 발생 할 수 있다¹⁰⁾.

오버샘플링을 이용하는 NB-IoT 측위는 송수신기간의 거리를 측정하는 기본적인 샘플 간격에 변화를 주는 방법으로, 수신기의 ADC(analog to digital converter)에서 n배 높은 샘플링 주파수를 사용할 경우 이론적으로 n배 높은 거리 추정을 할 수 있다는 점을 이용한다¹²⁾.

본 논문에서는 저전력 광대역을 지원하는 사물인터넷용 네트워크 중 하나인 NB-IoT 네트워크의 측위를 OTDOA(observed time difference of arrival) 방식으로 구현하고, 근본적인 측위 성능의 한계를 분석하고 오버샘플링을 통한 개선 방안을 제시한다. II장에서는 NB-IoT 신호 및 채널 모델, OTDOA 기반 측위 알고리즘, 협대역으로 인한 NB-IoT 측위의 한계, 측위 성능 한계 극복을 위한 오버샘플링에 대하여 설명한다. III장에서는 MATLAB 시뮬레이션을 통한 측위 성능 비교분석하며 마지막으로 IV장에서는 MATLAB 시뮬레이션 결과를 바탕으로 NB-IoT 네트워크에서 측위 성능을 극복하기 위한 방안을 제시한다.

II. NB-IoT 신호 및 채널 모델

NB-IoT는 LTE를 기반으로 하는 기술로서, 신호는 15kHz 간격의 부반송파, 66.67μs의 OFDM 심볼 주기를 갖는 하나의 RB(resource block)로 구성되며, 180kHz의 대역폭을 갖는다^{14,15)}. NB-IoT 단말 측위에 사용되는 OTDOA 기반 측위 알고리즘은 여러 기지국에서 단말로 송신된 위치 기준 신호(PRS, positioning reference signal)를 단말에서 TDOA 방식을 이용하여 위치를 결정한다^{7,16)}. 위치를 결정하기 위해서는 3개 이상의 기지국으로부터 송신된 신호가 필요하며 위치 결정에 사용되는 PRS는 다운링크 보조신호로서, 식 (1), (2)를 통해 만들어진 랜덤 시퀀스(random sequence) $c[m]$ 을 이용하여 QPSK 형식으로 변조되어 그림 1과 같이 RB에 배치되며, $n_s, l, m, N_{RB}^{max, DL}, N_c$ 는 각각 OFDM 프레임을 구

성하는 슬롯 번호, OFDM 심볼 번호, m 번째 랜덤 시퀀스, 다운링크 프레임을 구성하는 최대 RB의 수, 고정된 수치 1600을 의미한다. 랜덤 시퀀스는 GNSS에서 쓰이는 length-31 의사 랜덤 시퀀스(pseudo-random sequence)를 이용하여 생성되며 우수한 상관 특성을 가지고 있다. 이에 따라 의사 랜덤 시퀀스로 구성되는 PRS도 송, 수신 신호의 상호상관을 이용한 시간 지연 기반 측위가 가능하다.

$$r_{l,n_s}[m] = \frac{1}{\sqrt{2}}((1 - 2c[2m])) + j((1 - 2c[2m + 1])), (m = 0, 1, \dots, 2N_{RB}^{max, DL} - 1) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} c[m] &= (x_1[m + N_c] + x_2[m + N_c]) \bmod 2 \\ x_1[m + 31] &= (x_1[m + 3] + x_1[m]) \bmod 2 \\ x_2[m + 31] &= (x_2[m + 3] + x_2[m + 2] + x_2[m + 1] + x_2[m]) \bmod 2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$R_{l,n_s}[k] = r_{l,n_s}[m], \quad \text{if there is an } m \text{ mapped to } k \quad (3)$$

PRS가 전송되는 상황에선 데이터가 전송되지 않기에, OFDM의 RB에는 PRS 혹은 '0'값이 맵핑된다. 송신 신호 $x(t)$ 는 식 (1-3)의 정의로 구성된 PRS를 OFDM 변조하여 생성하며 이 때 N : OFDM 서브캐리어의 수, T : OFDM 심볼 시간간격을 의미한다.

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} R_{l,n_s}[k] \exp(j \frac{2\pi kt}{T}), 0 \leq t \leq T \quad (4)$$

일반적인 채널모델은 TDL(tapped delay line)로 구성된 다중 경로 채널 임펄스 응답(CIR, channel impulse response)은 식 (5)와 같이 정의되며, L 은 다중 경로의 수, $\delta(t)$, a_l , τ_l 은 각각 디랙 델타 함수, 각 경로의 진폭크기, 지연시간을 뜻한다.

$$h(t) = \sum_{l=1}^L a_l \delta(t - \tau_l) \quad (5)$$

단말기에 수신되는 신호는 채널과 송신 신호의 컨벌루션 합에, 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 백색 가우시안 잡음 $n(t)$ 가 더해진 형태로 식 (6)과 같이 표현된다.

$$y(t) = h(t) * x(t) + n(t) \quad (6)$$

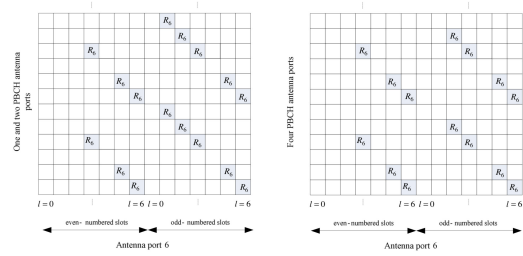


그림 1. 하나의 subframe에서의 PRS 맵핑
Fig. 1. PRS mapping within one subframe

수신 신호는 시간 축으로 연속된 신호인데, 수신기에서 데이터 처리를 위하여 샘플링 주기 T_S 에 따라 수신기의 ADC에서 샘플링되어 식 (7)의 N 개의 이산 신호로 구성된다.

$$\begin{aligned} y[n] &= y(nT_S), n = 0, 1, \dots, N-1 \\ y[n] &= [y[0], y[1], \dots, y[N-1]] \end{aligned} \quad (7)$$

수신 신호에서 채널추정모델은 시간 지연 추정에 대한 채널의 효과를 나타내기 위해 사용되며, 단일 탭 추정모델, 임의 탭 추정모델, 주기 탭 추정 모델 등을 사용할 수 있으나 가장 정확하고 복잡한 임의 탭 추정 모델을 많이 사용한다. 따라서 식 (5)에 정의된 CIR 모델을 사용하지 않고, 식 (8)과 같이 정의된 임의 탭 추정모델(arbitrary-tap estimation model)을 사용한다^[7]. 임의 탭 추정모델은 기존 CIR 채널과 다르게 채널의 임펄스 응답과 Sinc 함수를 곱해 보간(interpolation)한 형태로 표현되며, Sinc함수로 인해 연속된 형태로 나타난다.

$$h_{AT}(t) = \sum_{l=1}^L a_l \text{sinc}(t - \tau_l) \quad (8)$$

수신기에서는 연속신호를 이산신호로 변환해서 추정에 사용하기에 새롭게 만들어진 채널 추정모델은 식 (9)의 수신기에서 샘플링 주기 T_S 로 샘플링되어 N 개의 임펄스 응답으로 구성된다.

$$\begin{aligned} h_{AT}[n] &= h_{AT}(nT_S), n = 0, 1, \dots, N-1 \\ h_{AT}[n] &= [h_{AT}[0], h_{AT}[1], \dots, h_{AT}[N-1]] \end{aligned} \quad (9)$$

III. OTDoA 기반 측위 알고리즘

OTDOA 기반 측위에서 사용되는 신호의 도착시간

은 송신 신호와 수신 신호의 상호상관 $R[\tau]$ 을 이용하여 계산하며 N 샘플의 송신신호와 수신신호를 sliding correlation하여 지연시간 τ 을 구하는데, PRS를 구성하는 gold sequence는 신호간의 상호상관이 좋기 때문에 계산된 첫 번째 피크시간을 신호의 도착 시간으로 결정한다⁷⁾.

$$R[\tau] = \sum_{n=0}^{N-1} y[n]x^*[n-\tau] \quad (10)$$

신호의 도착시간을 이용하는 TOA(time of arrival) 측위 알고리즘은 서로 다른 i 개의 기지국들로부터 송신된 신호가 단말에 들어오는 시간을 추정 하는 것이다. 무선 신호의 전파 속도는 빛의 속도 ($c \approx 2.997 \times 10^8 m/s$)와 동일하므로, 각 기지국 i 에서 단말 사이의 거리 r_i 는 기지국에서 단말 사이의 TOA t_i , 단말이 송신하는 시간 t^0 와 빛의 속도의 관계식으로 표현된다.

$$r_i = (t_i - t^0)c \quad [m] \quad (11)$$

식 (11)을 통해 확인할 수 있듯이 TOA 추정 과정은 기지국과 단말 사이의 정확한 동기화가 필요하다. TDOA를 통한 단말의 위치 추정은 앞서 언급한 TOA를 통해 식 (12)의 서로 다른 두 기지국에서 단말까지의 거리차 r_{i1} 를 구하고, 쌍곡선으로 이루어진 수식을 아래의 최소-제곱법(Least-square)을 이용하여 계산한다.

$$r_{i1} = r_i - r_1 = (t_i - t^0)c - (t_1 - t^0)c = (t_i - t_1)c \quad (12)$$

각 기지국의 위치를 $(0, 0)$, (x_i, y_i) , 단말의 위치를 (x_m, y_m) 이라 할 때 기지국과 단말의 거리는 아래와 같이 표현할 수 있으며,

$$\begin{aligned} r_1^2 &= x_m^2 + y_m^2 \\ r_i^2 &= (x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$K_i^2 = x_i^2 + y_i^2$ 이라 할 때, 기지국간 거리는 식 (14)로 표현가능하며 이를 전개하고 정리하여 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i^2 = (r_{i1} + r_1)^2 = K_i^2 - 2x_i x_m - 2y_i y_m + r_1^2 \quad (14)$$

$$-x_i x_m - y_i y_m = r_{i1} r_1 + \frac{1}{2}(r_{i1}^2 - K_i^2) \quad (15)$$

식 (15)을 나열하여 식 (16)의 행렬식으로 표현할 수 있으며, 행렬식을 구성하는 각 행렬 \mathbf{H} , \mathbf{c} , \mathbf{d} , 는 식 (17) 과 같이 구성된다.

$$\mathbf{H}\hat{\mathbf{x}} = r_1 \mathbf{c} + \mathbf{d} \quad (16)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \mathbf{c} = \begin{bmatrix} -r_{21} \\ -r_{31} \\ -r_{41} \\ \vdots \end{bmatrix}, \mathbf{d} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K_2^2 - r_{21}^2 \\ K_3^2 - r_{31}^2 \\ K_4^2 - r_{41}^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T (r_1 \mathbf{c} + \mathbf{d}) \quad (18)$$

식 (18)을 통해 얻어진 위치 정보는 좌표 평면상에서 단말의 위치를 추정한다. 상호상관 과정에서 신호에 포함된 노이즈는 측위 성능에 직접적인 영향을 미친다.

IV. 협대역 NB-IoT 신호의 측위 한계

IoT 단말을 위한 저전력 광대역 네트워크 기술 중 하나인 NB-IoT는 LTE를 기반 기술이므로 LTE 표준과 같은 방법을 통해 위치를 추정한다. OTDOA방식을 사용하여 단말의 위치를 추정할 때 측위 정확도에 영향을 주는 가장 큰 요인은 수신기의 샘플링 주파수이다. 낮은 샘플링 주파수를 사용으로 인해 샘플 간격이 크다면 실제 위치가 샘플 사이에 위치 할 때 측위 정확도가 낮아지게 된다. 높은 측위 정확도를 얻기 위해서는 높은 샘플링 주파수를 사용하여 샘플 간 간격을 줄여야 한다. 샘플링 주파수가 측위 오차에 어떻게 영향을 주는지 그림 2를 통해 확인할 수 있다. T_S 시간 간격으로 위치하는 샘플들 사이에 실제 신호 수신 시간 τ_1 가 위치할 때 수신기에서는 τ_1 과 τ_2 를 구분하지 못하고 Sample #2에서 수신했다고 판단한다. τ_2 와 τ_3 은 각각 sample #2, #3에 수신되는 것으로 구분되지 만 최악의 상황에선 τ_3 과 τ_4 와 같이 최대 거리만큼 차이 나는 신호를 구분하지 못해 큰 측위 오차가 생긴다. 일반적으로 샘플링 주파수는 Nyquist의 샘플링 이론에 따라 신호의 전송대역폭의 2배보다 같거나 커야 한다. NB-IoT 네트워크 시스템에서 신호는 180kHz의 낮은 전송대역폭을 사용하여 전송되기에 240kHz의

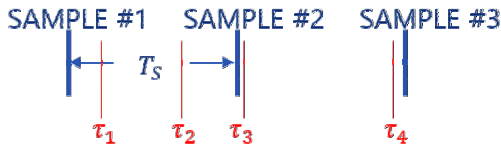


그림 2. 신호 샘플 간격과 측위 정확도 관계
Fig. 2. Relation between sample interval and positioning accuracy

샘플링 주파수를 사용하는데, 이를 이용하여 구한 샘플간격의 최소길이는 1250m이다. 소형셀의 경우 기지국을 중심으로 한 서비스 커버리지가 100m가 안되는 경우도 생기는데 1250m의 오차는 E-CID 방법을 사용한 경우보다 낮은 성능을 보인다.

V. 협대역 신호의 측위 성능 향상을 위한 오버 샘플링

앞서 IV절에서 소개했던 NB-IoT 네트워크 측위에서 최소 샘플간격은 1250m이다. OTDOA 방법을 이용하여 위치를 추정할 때 기지국의 수가 늘어날수록 측위 성능이 좋아지는데, 이를 적용하여도 근본적인 한계로 인하여 일정수준 이상의 측위 성능을 확보하기 힘들다. 3GPP RAN 1 미팅에서는 NB-IoT 네트워크에서의 위치 추정 성능 향상을 위하여 많은 기고문이 제출되고 있으며, 그 중 가장 빈번히 언급되는 기법은 FH(frequency hopping)을 이용한 방법과 오버샘플링을 이용한 방법이다^[10-13,18]. 샘플링 주파수가 n배로 증가하면, 동일 시간에 수신되는 신호의 샘플수가 n배로 증가하게 되며, 1/n배의 샘플 간격을 갖게 된다. NB-IoT 네트워크의 기본 샘플링 주파수인 240kHz를 LTE 신호 기준의 다른 샘플링 주파수만큼 상승시키면 표 1과 같은 결과를 확인할 수 있다.

NB-IoT 단말은 한번 설치 후 오랜 시간 작동하여야 하므로 저전력을 소모해야한다. 하지만 샘플링 주파수가 높아진다면 수신 단말에서 고성능의 ADC를 사용하여야 하며, 샘플 수가 증가하는 만큼 계산량도

표 1. 샘플링 주파수에 따른 샘플 간격
Table 1. Sample interval according to sampling rate

Sampling rate	Sample interval
240kHz	1250m
1.92MHz	156.25m
7.68MHz	39.06m
15.36MHz	19.53m
30.72MHz	9.76m

증가할 것이다. 이에 따라 사용되는 전력도 높아져 배터리 사용시간이 감소할 것으로 예측되기에 일정 수준의 위치 정확도가 확보된다면 샘플링 주파수와 배터리 사용시간의 균형을 조절해야할 것으로 전망된다.

VI. MATLAB 시뮬레이션 및 성능 분석

NB-IoT 네트워크에서 제안하는 오버샘플링을 통한 측위 성능 향상을 확인하기 위하여, MATLAB 시뮬레이션을 통하여 측위 오차에 대한 CDF(cumulative distribution function) 성능 분석을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 그림 3과 같이 정사각형 형태의 1500m 간격의 4개의 기지국으로부터 송신된 신호가 정사각형 내부에 임의의 위치에 존재하는 하나의 NB-IoT 단말에 수신되는 상황을 가정하였으며 송신 신호의 구성은 표 2와 같다.

표 2. 시뮬레이션 변수
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
Bandwidth / Subcarrier spacing	180kHz / 15kHz
System Sampling rate	240 kHz 1.92 MHz 7.68 MHz 15.36 MHz 30.72 MHz
Number of subframe	10
Inter-site distance	1500 m
Number of eNB / UE antenna	1 / 1
eNB transmitter power	46 dBm
Path loss model (d in m)	8.1 + 37.6log d
Thermal noise density	-174 dBm/Hz
Number of PRB / PRS occasion	1 / 1

표 3. 다중경로 페이딩 채널 특성
Table 3. Multipath fading channel profile.

EPA		ETU	
Excess tap delay (ns)	Relative power (dB)	Excess tap delay (ns)	Relative power (dB)
0	0	0	0
30	-1	50	-1
70	-2	120	-1
90	-3	200	0
110	-8	230	0
190	-17.2	500	0
410	-20.8	1600	-3
-	-	2300	-5
-	-	5000	-7

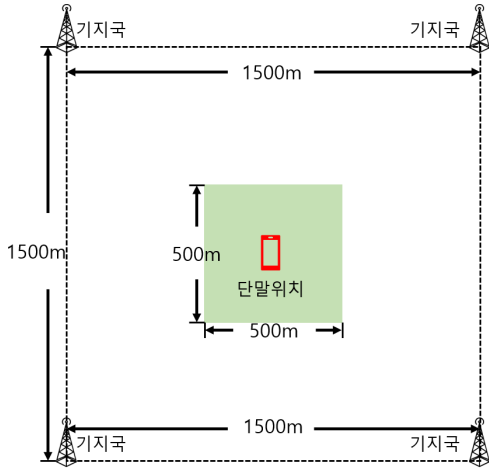


그림 3. 기지국 및 단말 배치도
Fig. 3. eNB and UE location

신되는데 시뮬레이션에서는 3GPP TS 36.101 v14.3.0 Release 14 표준 문서에서 정의하는 TDL(tapped delay line)을 이용한 multipath fading propagation condition을 사용한다^[19]. 이러한 전파지연 프로파일의 종류에는 EPA(extended pedestrian A model)과 ETU(extended typical urban model)가 있으며 각각의 프로파일은 낮은 지연 확산 환경과 높은 지연 확산 환경을 나타낸다. 각 채널의 프로파일은 표 3과 같이 구성되며, 그림 4, 5는 각 채널을 임의의 탭 방식으로 표현한 것이다. 또한 EPA, ETU 채널 모델은 classical doppler spectrum을 지니고 있다. 하지만 본 시뮬레이션에서는 모빌리티가 없이 특정 위치에 설치되어 있는 IoT 단말에 대하여 시뮬레이션을 진행하였으므로 도플러 주파수는 0Hz로 정의한다^[19,20]. 또한 측위에 사용되는 신호에 작용하는 FO(frequency offset), SI(successive interference) 등의 간섭은 존재하지 않는다고 가정한다.

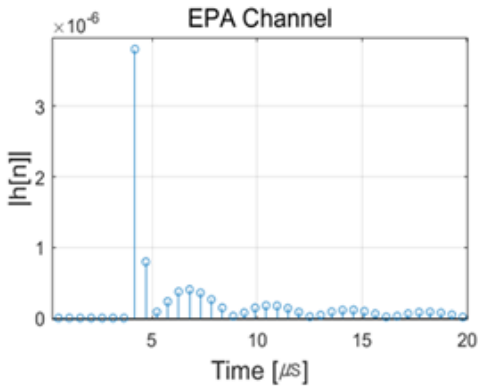


그림 4. EPA 채널 모델
Fig. 4. EPA channel model

그림 6은 180kHz 협대역을 사용하는 NB-IoT 송신 신호의 자기상관 시뮬레이션 결과로, PRS를 구성하는 gold sequence의 높은 자기상관 특성을 확인할 수 있다. 그림 7는 하나의 기지국에서 단말기까지의 거리에 따른 측위 평균 제공근 오차 시뮬레이션으로 거리가 멀어질수록 측위 성능이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 기본적으로 샘플 간격에 따른 측위 성능과 연관이 크며, 거리증가에 따라 경로 감쇄가 커지기에 수신 신호 대 잡음비(SNR, signal to noise ratio)이 감소하며, 그에 따라 측위 성능 또한 감소한다.

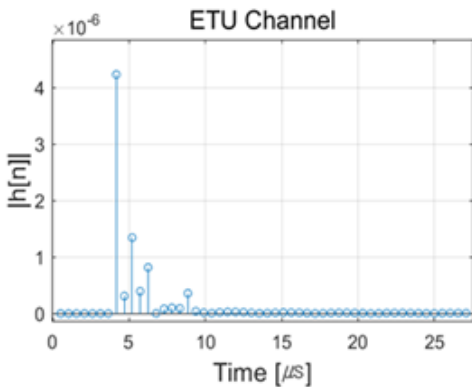


그림 5. ETU 채널 모델
Fig. 5. ETU channel model

그림 9는 EPA 채널 환경에서 샘플링 주파수에 따른 TDOA 측위 시뮬레이션 결과로 샘플링 주파수가 높을수록 낮은 측위 오차가 발생한다. 0.24MHz, 1.92MHz의 낮은 샘플링 주파수를 사용한 경우

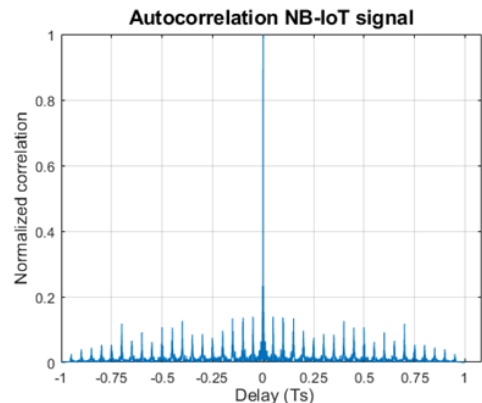


그림 6. NB-IoT 신호의 자기상관
Fig. 6. Autocorrelation of NB-IoT signal

기지국에서 송신된 신호는 채널을 지나 단말에 수

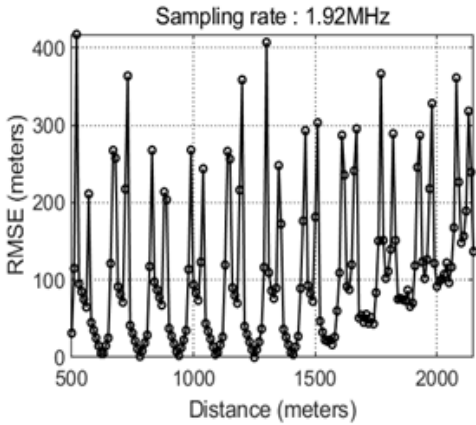


그림 7. 거리에 따른 측위 평균 제곱근 오차($f_s=1.92MHz$)
 Fig. 7. RMSE of localization with distance($f_s=1.92MHz$)

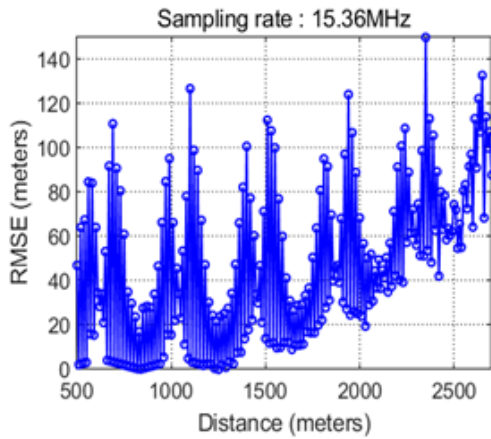


그림 8. 거리에 따른 측위 평균 제곱근 오차($f_s=15.36MHz$)
 Fig. 8. RMSE of localization with distance($f_s=15.36MHz$)

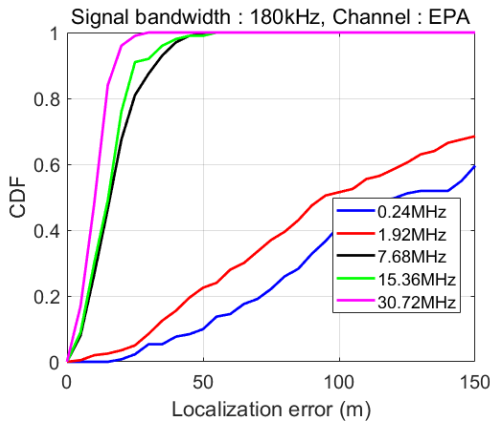


그림 9. EPA 채널모델에서 샘플링 주파수에 따른 측위 오차누적분포
 Fig. 9. CDF of localization errors with sampling rate at EPA channel model

7.68MHz이상을 사용한 경우와 위치 정확도 차이가 크다. 높은 샘플링 주파수에서의 성능분석 해본 결과, 세 경우 모두 67% 확률로 20m 이하의 측위 오차를 확인할 수 있다.

그림 10은 다른 조건을 고정한 채 채널을 ETU 채널모델로 변경한 시뮬레이션 결과로 위치 정확도에는 차이를 확인할 수 있으나 높은 샘플링 주파수 일수록 좋은 측위 성능을 보인다. EPA 채널모델의 경우와 다르게 7.68MHz, 15.36MHz 샘플링 주파수를 사용했을 때의 성능 오차가 크다. 두 채널 모델의 시뮬레이션 결과를 비교해 보았을 때 낮은 지연 특성을 지닌 EPA 채널 모델에서 더 높은 측위 성능을 갖는다.

그림 11은 EPA 채널 환경에서 기지국 간 거리에 따른 TDOA 측위 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션에는 0.24MHz의 샘플링 주파수를 사용하였다. NB-IoT 네트워크의 이론적인 최대 통신 범위가 10km 이상으로 알려져 있기에 시뮬레이션을 통해 성능분석을 한 결과, 기지국 간 거리 멀어질수록 측위 성능이 좋아지는 것을 확인할 수 있으나 이미 측위 오차가 수 km 이상이기에 현실성이 없음을 확인할 수 있었다.

표 4는 샘플링 주파수를 상승시킨 경우 채널 모델 별 측위 정확도 변화를 분석한 결과이다. 각 채널 모델에서 오차누적분포 67%, 90% 결과를 확인하였을 때, EPA 채널모델에서 67%의 확률로 154m의 오차를 갖던 시뮬레이션 결과는 샘플링 주파수를 32배 증가시켰을 때, 20m, 64배 증가시켰을 때 19m, 그리고 128배 증가시켰을 때 16m 오차를 갖는다. 수치에 차이는 있지만 ETU 채널 모델에서도 측위 정확도가 상

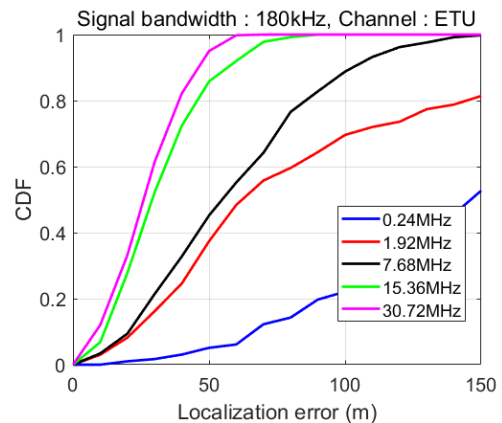


그림 10. ETU 채널모델에서 샘플링 주파수에 따른 측위 오차누적분포
 Fig. 10. CDF of localization errors with sampling rate at ETU channel model

승하는 것을 확인할 수 있으며, 측위오차가 표 1의 샘플링 주파수에 따른 샘플 간격같이 정비례하게 줄어들지는 않지만 오버 샘플링 할 경우 측위 성능 상승을 확인할 수 있다. 일정 샘플링 주파수 이후로는 급격한 성능 상승을 확인할 수 없었으며, 이는 실제 환경에서 FO, SI를 고려한다면 더욱 줄어들 것으로 보인다.

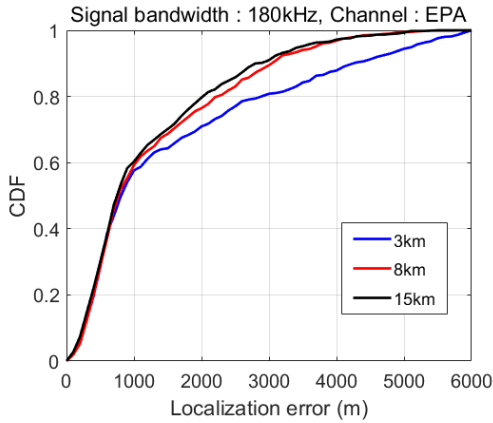


그림 11. 네트워크 크기에 따른 측위 오차누적분포
Fig. 11. CDF of localization errors with network size

표 4. 샘플링 주파수에 따른 측위 오차누적분포 비교
Table 4. Comparison for CDF of localization errors with sampling rate

Channel model	CDF	240 kHz	1.92 MHz	7.68 MHz	15.36 MHz	30.72 MHz
EPA	67%	154m	138m	20m	19m	16m
	90%	-	-	31m	25m	18m
ETU	67%	177m	92m	72m	37m	31m
	90%	-	184m	101m	53m	47m

VII. 결 론

본 연구에서는 IoT 단말을 위한 저전력 광대역 네트워크의 하나인 NB-IoT에서 위치 추정 알고리즘에 대하여 연구하였다. eNB라 불리는 이동통신 기지국들은 위치 기준 신호를 송신하고 단말은 수신 받은 신호를 OTDOA 기법을 통하여 위치를 추정한다. 일반 NB-IoT 네트워크를 이용한 측위의 경우 작은 대역폭과 낮은 샘플링 주파수로 인해 측위 오차가 수백m 이상이기에 위치정보로 사용하기에 적합하지 않다. 이에 오버샘플링을 통하여 성능개선을 시도해본 결과, EPA 채널에서는 7.68MHz 이상으로 샘플링 주파수를 사용하면 67%이상이 20m이내의 측위오차를 보였으며, ETU 채널에서는 15.36MHz 이상으로 샘플링 주파수

를 사용하면 67%이상이 40m이내의 측위오차를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 샘플링 주파수와 측위성능 상승의 관계가 선형적이지는 않으나 샘플링 주파수가 높을수록 좋은 측위성능을 갖는다. 따라서 저전력의 특성이 강조되는 네트워크에서 무한정 샘플링 주파수를 높일 수 없기에 NB-IoT 모듈을 제작하는 제조사는 상황에 맞는 샘플링 주파수 설정이 필요할 것으로 보인다.

References

- [1] R. D. Taranto, S. Muppirisetty, R. Raulefs, D. Slock, T. Svensson, and H. Wymeersch, "Location-aware communications for 5G networks: How location information can improve scalability, latency, and robustness of 5G," *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 31, no. 6, pp. 102-112, Nov. 2014.
- [2] D. Slock, "Location aided wireless communications," *IEEE ISCCSP 2012*, pp. 1-6, May 2012.
- [3] S. Jayaprakasam, K. Kang, and S. Kim, "On the opportunistic location-aware transmission power adaptation in mm-wave communications," *IEEE SPAWC 2017*, pp. 1-5, Jul. 2017.
- [4] F. Vanhaverbeke, Y. L. Guan, and M. Moeneclaey, "Optimal channel and time-of-arrival estimation for IR-UWB in the presence of pulse overlap," *IEEE ICC 2010*, Cape Town, South Africa, May 2010.
- [5] V. U. Prabhu and D. Jaliyal, "An improved ESPRIT based time-of-arrival estimation algorithm for vehicular OFDM systems," *IEEE VTC Spring 2009*, Barcelona, Spain, Apr. 2009.
- [6] M. Park, J. Jeon, and S. Kim, "The positioning systems with 3GPP PRS in Macro-cell and small-cell," in *Proc. KICS Fall Conf.*, Yongpyoung, Korea, Nov. 2013.
- [7] S. Fischer, *Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE*, White paper, Qualcomm Technologies, Inc., Jun. 2014.
- [8] Y. D. Beyene, R. Jantti, K. Ruttik, and S.

Iraji, "On the performance of narrow-band internet of things(NB-IoT)," *IEEE WCNC 2017*, San Francisco, USA, Mar. 2017.

[9] T. Manabe and H. Takai, "Superresolution of multipath delay profiles measured by PN correlation method," *IEEE Trans. Ant. and Propag.*, vol. 40, no. 5, pp. 500-509, May 1992.

[10] J. A. del Peral-Rosado, J. A. López-Salcedo, and G. Seco-Granados, "Impact of frequency-hopping NB-IoT positioning in 4G and future 5G networks," *IEEE ICC Workshops 2017*, Paris, France, May 2017.

[11] 3GPP R1-1703126, *Considerations on OTDOA for NB-IoT*, Feb. 2017.

[12] S. Hu, A. Berg, X. Li, and F. Rusek, "Improving the performance of OTDOA based positioning in NB-IoT systems," in *Proc. IEEE GlobeCom 2017*, Singapore, Singapore, Nov. 2017.

[13] 3GPP R1-1608620, *Evaluation of downlink positioning accuracy for NB-IoT*, Oct. 2016.

[14] 3GPP TS 36.211, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation*, V14.1.0, Jan. 2017.

[15] S. Haykin, and M. Moher, *Communication Systems*, 5th Ed, Wiley, 2008.

[16] X. Lin, J. Bergman, and F. Gunnarsson, "Positioning for the internet of things: A 3GPP perspective," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 12, pp. 179-185, Sep. 2017.

[17] J. A. del Peral-Rosado, J. A. López-Salcedo, and G. Seco-Granados, F. Zanier, and M. Crisci, "Joint maximum likelihood time-delay estimation for LTE positioning in multipath channels," *EURASIP J. Advanced in Sign. Process.*, vol. 2014, no. 33, Dec. 2014.

[18] 3GPP R1-1703121, *Increasing Accuracy of OTDOA in feMTC*, Feb. 2017.

[19] 3GPP TS 36.101, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment(UE) radio transmission and reception*, V14.3.0, Apr. 2017.

[20] 3GPP TS 36.104, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base*

Station(BS) radio transmission and reception, V14.3.0, Apr. 2017.

정 민 수 (Minsoo Jeong)



2017년 2월 : 한양대학교 융합
전자공학부 학사
2017년 3월~현재 : 한양대학교
전자컴퓨터공학과 석박사 통
합과정
<관심분야> 무선 측위, 무선
통신, LTE, NR

나 지 현 (Jeehyeon Na)



1989년 2월 : 전남대학교 전산
통계학과 학사
2000년 8월 : 충남대학교 컴퓨
터공학과 석사
2008년 8월 : 충남대학교 컴퓨
터공학과 박사
1989년 2월~현재 : 한국전자통

신연구원 책임연구원
<관심분야> 이동통신 시스템 제어, 이동성 관리, 모
바일 방송, Paging 및 위치 관리, 클라우드 기지
국 자원 제어

문 정 모 (Jungmo Moon)



1992년 2월 : 홍익대학교 전자
계산학과 학사
1994년 : 홍익대학교 전자계산
학과 석사
2004년 : 충남대학교 컴퓨터과
학과 박사
1994년~현재 : 한국전자통신연

구원 책임연구원
<관심분야> Mobile IP, 이동 QoS, 와이브로