

# CDMA 이동통신망을 이용한 무선측위 시스템

정회원 김정태\*, 서덕영\*\*

## Effect of the Log normal-Nakagami Faded Interferers on Imperfect power-controlled DS/CDMA cellular system

Chong-tae Kim\*, Doug Young Suh\*\* *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 대수정규 섀도잉(shadowing)과 나카가미(Nakagami) 페이딩을 함께 받은 타 시스템의 동일 채널 간섭파가 불완전 전력제어된 DS/CDMA 셀룰러 시스템의 용량에 미치는 영향을 분석하였다. 분석에는 먼저 간섭을 고려하지 않고 불완전 전력제어만을 해석한 Prasad와 Jansen의 결과와 비교하였으며, 대수정규-나카가미 페이딩을 받은 다중 간섭은 Schwartz와 Yeh가 제시한 방법을 적용하여 DS/CDMA 시스템의 미치는 영향을 오수신확률로 유도하였다. 유도한 오수신확률에 대해 불완전 전력제어, 페이딩 지수, 처리이득, 전력비, 간섭수, 음성화율 등을 파라미터로 하여 각각의 상황에서 DS/CDMA 시스템의 가입자 용량 감소를 분석하였다. 결과로부터 DS/CDMA 시스템의 용량은 전력제어 오차와 간섭파의 증가에 매우 민감하며 전력제어 오차가 클수록, 무선채널 환경의 페이딩이 심할수록, 또한 간섭파의 수가 증가할수록 감소하였다.

### ABSTRACT

This paper proposes a wireless positioning method using the CDMA mobile communication network. The proposed method is time-based positioning method that uses mobile-station arrival time of forward link signal from base-stations. In this method there are TDOA and TOA methods that use time-difference-of-arrival and time-of-arrival, respectively. Error characteristics and implementation simplicity of the two methods are compared and analyzed each other. As a results, it showed that TDOA has advantage of less sensitivity to the time error compared to TOA but has disadvantage of more sensitivity to the spatial error. Also, from architecture of the CDMA system that is time synchronized to only active base-station it is analyzed that adoption of TDOA method is more advantageous than TOA because time difference of signal arrival from the neighbor base-stations against the active base-station can be measured more easily. Therefore, conclusion is made that TDOA is best suit to the time-based positioning method for the present CDMA mobile communication network.

### I. 서 론

기존 셀룰러(Cellular)시스템의 발전과 차세대 이동통신시스템의 개발을 통하여 많은 부가서비스 기능의 창출이 기대된다. 이 중 하나로 지난 몇 년부터 많은 주목을 받고 있는 것이 무선위치추정(Wireless location)기능이다. 지난 96년 6월 미국

연방통신협회(Federal Communication Committee)는 응급상황을 통보하는 이동 통신 발신자(caller)의 위치정보를 소방서나 경찰서와 같은 공공기관으로 제공하도록 요구하였다. 이를 E-911 기능이라 부른다.<sup>[1]</sup> 2001년 10월부터 상용화될 E-911 서비스는 발신자의 위치정보의 정확도를 125m의 오차 이하로 67%이상의 확률을 만족하도록 요구하고 있다.

\* 삼성전자 통신연구소 수석연구원

\*\* 경희대학교 전자정보학부 교수

논문번호 : 99088-0305, 접수일자 : 1999년 3월 5일

더 나아가서 13m의 오차 이하로 확률 90%이상의 신뢰도도 추후의 개발사양으로 고려되고 있다.

무선위치추정의 응용은 E-911서비스에만 국한되지 않고 다양한 분야로 확장 가능하다. 예를 들면, 사용자의 위치에 따른 과금 방법, 불법사용자의 색출(Fraud detection), 이동통신망의 설계 및 지능교통신시스템(ITS)등이 응용 가능한 분야이다<sup>[2,3]</sup>.

현재에도 GPS(Global Positioning System) 위성을 이용한 무선측위 시스템이 존재하지만 이를 이용할 경우 GPS 신호의 수신과 처리에 필요한 부가 장치를 단말기 내부에 내장하여야 한다. 더구나, 위성으로부터 송신되는 GPS의 미약한 신호를 수신하기 위하여 가시성(Line-of-Sight)이 필수로 요구되므로 고층빌딩들이 즐비한 도심에서나 실내, 숲속등의 가시성 바깥영역의 측위는 막대한 제한을 받는다. 이런 이유로, 본 논문에서는 GPS를 내장하지 않고 지상 이동통신환경 자체를 이용하는 무선측위방법을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 먼저 무선측위방법에 대한 여러가지 방법을 소개한 다음 비교적 저비용으로 구현가능한 Time-based 측위방법의 원리에 대하여 설명하고 CDMA 시스템에 이 방법을 구현할 수 있는 방안과 시스템 성능을 저하하는 여러 오차요인에 대하여 본문에서 서술한다. 마지막으로 시간적인 오차와 공간적인 오차요인에 대한 Time-based 측위방법의 민감성(sensitivity)을 비교분석한 다음 결론을 맺는 순서로 되어 있다.

## II. 본 론

### 1. 무선 측위 방법

지상 이동통신망을 이용한 무선측위방법은 기지국과 단말기사이에 전송되는 통신신호를 이용하여 단말기의 위치를 추정하는 방법이다. 무선측위방법은 크게 DF(Direction Finding), TDOA(Time difference of arrival), TOA(Time of arrival) 기법의 3가지로 분류한다.

DF 기법은 배열(array) 안테나를 이용하여 기지국에 수신되는 신호의 도착시간과 도착 각도(angle-of-arrival)를 측정하는 방법으로 기지국간 동기가 필요치 않고 측위에 오직 2개의 기지국만 필요한 장점은 있으나 배열의 각 안테나는 각기 독립된 수신기를 필요로 하므로 비교적 크고 복잡한 Hardware가 요구될 뿐만 아니라 기지국으로부터 멀리 떨어진 단말기의 위치추정에 오차가 큰 단점을 가

진다. 이에 비해, TOA와 TDOA 방법은 Time-based 측위방법으로서 기지국과 단말기 통신신호의 도착 시간과 시간차를 이용하여 기하학적 삼각측정법으로 위치를 추정하는 방법이다. 이 방법은 기존 통신망을 그대로 활용하는 장점은 있으나 항상 3개 이상의 기지국이 포함하는 환경을 필요로 하는 문제점과 다중경로(multipath)등의 전파환경에 대한 오차가 민감한 단점을 가지고 있다. Caffery와 Stuber는 최근 발표된 논문에서 DF에 비하여 TDOA나 TOA와 같은 time-based 방법이 CDMA에서 더 나은 성능을 제공한다고 지적하고 있다.<sup>[4]</sup>

### 2. Time-based 측위 방법

Time-based 측위 방법은 TDOA와 TOA 로 분류된다. TDOA 방법은 2개의 기지국으로부터 단말기에 수신되는 신호의 도착시간의 차를 측정하여 단말기가 위치가능한 쌍곡선(hyperbola)을 그리는 방법으로 적어도 3개 이상의 기지국이 포함된다면 쌍곡선들의 교차점이 단말기의 위치가 된다. 식 (1)은 TDOA 방법의 원리를 쌍곡선의 수식으로 나타내고 있으며 측정된 TDOA에 오차가 없는 경우 식 (1)의 해(solution)를 공간적으로 표현한 그림이 그림 (1a)에 나타나 있다. 그림에서 원의 교점 'x'가 추정 위치가 된다.

$$\begin{aligned}
 R_{12} &= \sqrt{(x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2} \\
 &\quad - \sqrt{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2} \\
 R_{13} &= \sqrt{(x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2} \\
 &\quad - \sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2} \\
 R_{23} &= \sqrt{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2} \\
 &\quad - \sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

where

$R_{ij}$ : 단말기로부터 기지국  $BS_i$ 와  $BS_j$ 의 거리 차이,  $i \neq j$   
 $(=c * TDOA_{ij})$

$c$ : 빛의 속도  $(=3 \times 10^8 \text{ m/s})$

$x_i, y_i$ : 기지국  $BS_i$ 의  $(x, y)$  좌표,  $i=1, 2, 3$

$x_m, y_m$ : 단말기 MS의  $(x, y)$  좌표

TOA기법은 신호의 단말기도착 절대 지연시간을 측정하여 단말기가 위치가능한 원(circle) 또는 구(sphere)를 그리는 방법으로 3개 이상의 기지국이 포함된다면 원 또는 구들의 교차점이 단말기의 위치가 된다. 식 (2)는 TOA의 원리를 구의 수식으로

표현하고 있으며 TOA에 오차가 없는 이상적인 경우 식 (2)의 2차원 평면상의 해를 공간적으로 표현한 그림이 그림 1(b)에 나타나 있다. 마찬가지로 쌍곡선의 교점 'x'가 추정위치이다.

TDOA방법은 기지국들사이의 상대적인 시간차를 측정하기 때문에 기지국의 system wide 시각동기가 필수적으로 요구된다.

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \sqrt{(x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2 + (z_1 - z_m)^2} \\ \rho_2 &= \sqrt{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2 + (z_2 - z_m)^2} \\ \rho_3 &= \sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2 + (z_3 - z_m)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

where

$\rho_i$ : 단말기와 기지국  $BS_i$ 과의 거리,  $i=1,2,3$   
( $=c \cdot TOA_i$ )

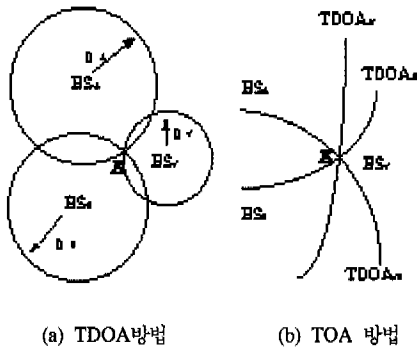
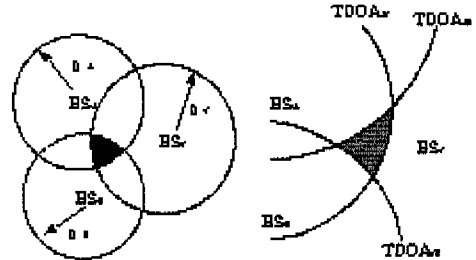


그림 1. 오차없는 Time-based 측위법의 해

이에 반하여 TOA방법은 system-wide 시각동기가 필요치 않는 장점은 있으나 절대 지연시간 TOA의 계산을 위하여 신호의 송신과 수신시간을 알아야 하는 단점이 있어 오직 active기지국에 동기되어 있는 CDMA시스템에서는 정확한 TOA의 측정을 위한 무선접속방법의 수정이 요구된다. 반일 측정된 TDOA나 TOA에 오차가 있다면 그림 2(a)과 2(b)의 점계 칠한 부분이 보여주는 바와 같이 단말기의 위치는 한점의 교차점이 아닌 존재가능 영역으로 표현되므로 Time-based 측위방법은 TDOA와 TOA의 정확한 측정을 필수로 한다.

식 (1), (2)로부터 해를 구하는 접근방식은 3개의 원이나 쌍곡선들의 방정식을 풀어 교차점을 찾아내는 기하학적 방식이나<sup>5)</sup> random한 전파환경에서 측정되는 TDOA나 TOA에는 항상 오차가 존재하기 때문에 원이나 쌍곡선들이 한 점에서 교차하는 경

우는 매우 희박하다. 그러므로, 일반적인 time-based 방법에서의 위치추정은 Least squares(LS)에 근거한 통계적인 방법이 주로사용되고 있다. 위에 설명한 TOA와 TDOA방법에 대한 비교표가 아래 표1에 주어져 있다.



(a) TDOA방법 (b) TOA 방법

그림 2. 오차있는 Time-based 측위법의 해

표 1. TOA와 TDOA 측위방법의 비교

측위방법	TOA	TDOA
Algorithm	TOA에 의한 원/구의 교점	TDOA에 의한 쌍곡선의 교점
기지국 수	$\geq 3$	$\geq 3$
BS간 동기	불필요	필요
위치추정 계산방법	2차원/3차원 선형방정식	2차원 선형방정식
위치추정	Least squares	Least squares
응용분야	위성측위시스템 (GPS, Glonass)	해상측위시스템 (LORAN)

### 3. CDMA System Position Location

IS-95 CDMA 시스템환경<sup>6)</sup>에서 구현가능한 TOA와 TDOA 측위방법에 대한 비교가 아래 표2에 주어져 있다.

Time-based 위치추정은 순방향(forward link) 신호를 단말기에서 측정함으로써 가능하다. 이 방법은 기지국에서 송신되는 신호를 이용하므로 단말기의 전지수명에 전혀 부담을 주지 않을뿐만 아니라 한 신호의 송신에 의해 그 기지국 영역안에 존재하는 모든 단말기의 측위가 가능하므로 E-911뿐만 아니라 위치추정을 필요로 하는 모든 서비스로의 활용이 가능한 장점을 가진다. 이에 비하여, 역방향(reverse link) 신호를 이용할 경우 단말기의 power를 송신시간동안 증가함으로써 단말기의 전지사용시

간의 감소를 야기할 뿐만 아니라 한번에 오직 하나의 단말기 위치추정이 가능하기 때문에 E-911과 같은 응급상황에 국한된다.

표 2. CDMA 시스템의 TOA와 TDOA 측위방법의 비교

측위방법	TOA	TDOA
측정신호	순방향 신호	순방향 신호
BS 비동기	$\leq 1\mu s$	$\leq 1\mu s$
시간측정	RTD, $\alpha_i$	$\alpha_i$
측정장비	BS <sub>i</sub> , MS	MS
용해도	3/8 PN chip	3/8 PN chip
주요오차 성분	용해도	용해도
	BS 비동기	BS 비동기
	다중경로	다중경로
	NLOS	NLOS
	Interference	Interference
	DOP	DOP
	MS지연시간 MS 비동기	

순방향 신호를 이용함으로써 지연시간측정 역시 쉽게 구현 가능하다. 단말기는 Idle handoff를 위하여 주변기지국의 Pilot search를 연속적으로 수행하여 Pilot strength를 측정한다. 따라서, Pilot strength에 첨가하여 각 Pilot의 도착시간 차를 측정한다면 이는 곧 active기지국에 대한 상대적인 시간차이  $\alpha_i$ , 즉 TDOA가 된다. Traffic상태에서는 기지국의 handoff를 돕기 위하여 단말기는 주변 기지국의 Pilot strength와 Pilot PN phase를 포함하는 PSMM (Pilot strength measurement message)을 기지국에 보내게 된다.<sup>[7]</sup> 이 message에 포함되는 Pilot PN phase는 아래 식 (3)으로 표현된다.

$$PN\_phase = (Pilot\_arrival + (64 * Pilot\_PN)) \text{ mod } 2^{15} \quad (3)$$

여기서 Pilot\_PN은 기지국의 Pilot PN sequence offset index를 나타내며 Pilot\_arrival은 단말기의 기준시간에 상대적으로 측정되는 각 Pilot의 도착시간을 나타낸다. 즉, Pilot\_arrival은 TDOA가 된다. 반면, TOA방법은  $\alpha_i$ 와 더불어 active기지국과 단말기사이의 왕복전송시간인 RTD(Round Time Delay)가 필요하며 이의 측정을 위한 구현이 단말기에 부가적으로 요구되는 단점이 있다.

CDMA 시스템의 시각표준은 GPS를 이용한 system-wide time을 기준으로 하고는 있으나 기지국들의 시각 tolerance는 GPS 시각대비 최대 1 $\mu s$ 으로 규정하고 있어<sup>[6]</sup> 오차요인으로 작용한다. 단말기 Searcher의 용해도(resolution) 또한 정확도를 저하하는 요인이 된다. 기존 CDMA 시스템의 searcher 용해도는 TOA나 TDOA 모두 3/8 PN chip을 가진다. 이는 약 92m의 거리 용해도를 가진다는 것으로서 고 정확도의 측위시스템을 위하여 searching 용해도를 높이는 방안이 요구된다.

기지국간 비동기와 단말기Searcher의 용해도등에 의한 Hardware적인 요인에 의한 오차외의 주요오차는 신호의 전파환경에 의한 오차를 들 수 있다. 전파환경 오차의 주요성분은 다중경로, 비 가시성(Non-LOS), interference의 3가지로 크게 분류할 수 있으나 interference에 의한 오차는 다중경로와 비 가시성으로 인한 오차에 비해 실험결과 큰 문제가 되지 않는 것으로 보고되었다.<sup>[8]</sup> TOA방법의 경우 이외에 RTD 측정을 위한 단말기 자체의 처리지연시간과  $\pm 1\mu s$ 이내로 규정되어 있는 active기지국에 대한 단말기의 시각 비동기<sup>[6]</sup>에 의한 오차가 추가로 발생한다.

더불어, TOA나 TDOA와 같이 3개의 기지국을 이용하는 삼각측정법은 DOP(Dilution of Precision)에 의한 공간적인 오차가 발생한다. DOP의 개념은 송신기와 수신기의 기하학적 형상에 따라 추정위치의 오차가 변화하는 지형적인 개념을 표현한 것으로서 세 기지국이 만드는 삼각형의 중앙에 단말기가 존재할 때 DOP 오차는 최소가 되고 이로부터 벗어날수록 DOP 오차가 증가한다는 것이다. 이 논문에서는 2차원적인 평면상의 위치추정을 가정한 Horizontal DOP(HDOP)의 영향만 고려하기로 한다. HDOP과 측위시스템의 총 거리오차의 관계는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\text{총 거리오차} = \text{HDOP} * \text{위치오차} \quad (4)$$

즉, 삼각측정법에 의한 추정위치의 거리오차는 기지국과 단말기가 만드는 지형학적 계수 HDOP에 의해 비례적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다.

### III. 실험 및 분석

시간적 및 공간적인 오차성분에 대한 TOA와 TDOA방법의 거리오차특성을 서로 비교분석하기

위한 실험을 수행하였다. 시간적인 오차성분은 TOA와 TDOA에 포함되는 시간오차들을 일컬으며 비교적 고정적인 Searcher의 용해도, 기지국간 비동기, 단말기 처리지연시간, 단말기 비동기동의 요소와 전파환경에 따라 변하는 다중경로, 비 가시성에 의한 시간오차로 구성된다.

그림 3은 active기지국과 2개의 주변기지국으로부터 수신되는 Pilots에 각각 1/2, 3/4, 1/2 PN chip의 고정적인 시간오차를 부여한 다음 2개의 주변기지국들에 동일하게 0~2PN chip의 전파환경에 의한 시간오차를 추가적으로 부가하였을때의 거리오차특성을 나타낸 것이다.

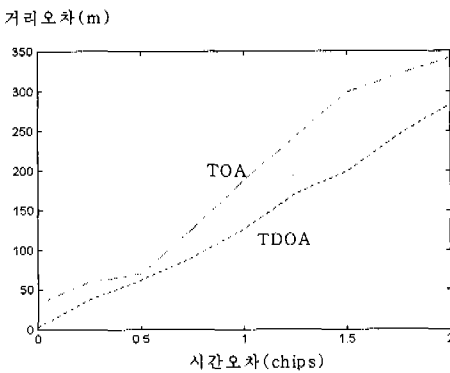


그림 3. Time오차에 대한 위치오차(I)

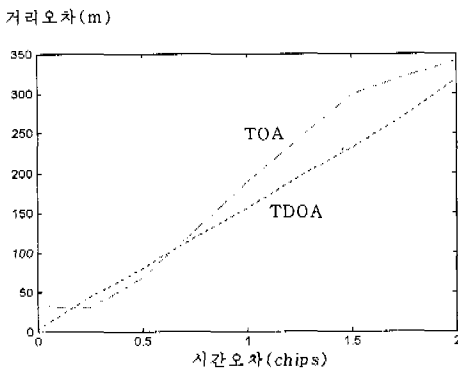
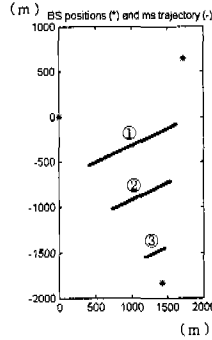


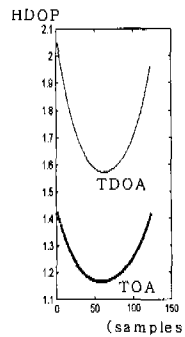
그림 4. Time오차에 대한 위치오차(II)

그림에서 각 기지국들로부터 수신되는 신호의 시간오차가 서로 다를때 Active와 주변기지국들사이의 시간오차 차이가 클수록TDOA의 성능이 TOA보다 우수하다는 것을 볼 수 있다.

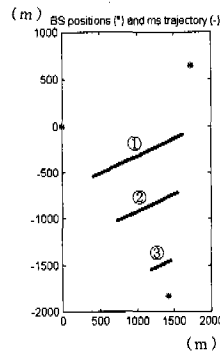
그림 4는 3개의 모든 기지국이 1/2 PN chip의



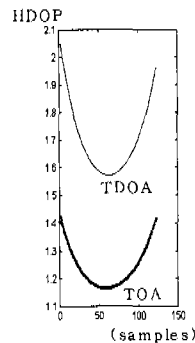
(a)단말기 이동경로



(b)경로 ①의 HDOP



(c)경로 ②의 HDOP



(d)경로 ③의 HDOP

그림 5. 단말기 위치에 대한 HDOP의 변화

