

TDOA 위치추정기법에서의 단말기 Searcher의 영향

정회원 김정태*, 서덕영**

Effect of mobile terminal searcher on TDOA position location technique

Chong-tae Kim*, Doug-young Suh** *Regular Members*

요 약

본 논문은 CDMA 단말기의 위치추정방법으로 기지국 순방향 Pilot신호의 단말기 도착시간의 차(TDOA)를 이용하는 기법을 제안한다. 단말기 Searcher는 기지국의 Pilot신호를 획득하여 TDOA를 측정한다. 이를 위하여 Searcher의 Processing 이득은 매우 중요하다. 이득은 신호의 동기누적구간에 비례함을 이론적으로 유도하고 분석하였으며 이를 증가함으로써 미약한 Pilot신호의 획득과 안정적인 TDOA값의 측정이 가능함을 Field 시험하였다. 또한, 신호의 세기는 전송거리에 따라 지수적으로 감쇄한다. 그러므로, Searcher 이득의 향상은 기지국에서 멀리 떨어진 곳에서도 Pilot신호의 획득을 가능하게 한다. 셀 내 신호세기에 대하여 가능한 위치추정영역의 변화를 컴퓨터로 모의시험하였다. Shadow 영향을 무시하고도 90%이상의 영역을 포함하기 위하여 -35dB이하의 신호검출이 필요함을 제시하였다. 따라서, 미약한 Pilot신호 획득을 통한 위치추정영역의 확장과 안정적인 TDOA값의 측정을 위하여 Searcher 동기누적구간의 최대화가 요구된다.

ABSTRACT

This paper proposes method that uses Time-Difference-of-Arrival(TDOA) of Forward Pilot signals from base stations(BS) arriving at a mobile station(MS) as a position location method of CDMA MS. MS searcher does acquisition of BS Pilot signals and measurement of TDOAs. In order to do it, its processing gain is very important. Proportional relationship of the gain to the signal coherent integration interval is theoretically derived and analyzed and field test is performed to show acquisition of weak Pilot signals and stable measurements of TDOA values by increasing the gain. Also, signal strength decreases exponentially by the distance it travels. Therefore, improvement of the searcher gain makes possible to acquire Pilot signals at a location far away from BS. Variation of possible position estimation area relative to the signal strength within a cell is simulated with computer. Neglecting shadow effect it indicated necessity of detecting signals below -35dB in order to cover over 90% of cell area. Thus, efforts to maximize searcher coherent integration interval in order to acquire weak Pilot signals are required for expansion of position estimation area and measurement of stable TDOA values.

I. 서론

지난 96년 6월 미국 연방통신협회(Federal Com-

munication Committee)는 이동통신 발신자(caller)의 위치를 측정하는 E-911 기능을 2001년 10월부터 제공하도록 요구하였다.^[1] 이 기능은 응급상황시 발

* 삼성전자 통신연구소

** 경희대학교 전자정보학부

논문번호 : 99145-0413, 접수일자 : 1999년 4월 13일

신자의 위치를 파악하는 긴급구조체제로서 위치오차를 67%이상의 신뢰도로 125m이하로 규정하고 있다.

전파를 이용하는 무선측위방법은 측위신호를 송신하는 시스템의 위치에 따라 위성시스템과 지상시스템으로 구분된다. 위성시스템은 GPS나 Glonass와 같은 위성을 이용하는 시스템이고 지상시스템은 Loran, Radar, 이동통신시스템과 같은 지상에 설치된 시스템을 이용하는 시스템이다. 지상 이동통신망을 이용한 위치추정방법은 단말기에서 송신되는 신호의 도래각(Angle-of-Arrival)을 기지국(base station)에서 측정하여 단말기의 위치를 구하는 DF(Direction Finding) 방법과 단말기와 기지국사이의 전파 전달 시간을 측정하여 단말기의 위치를 구하는 Time-based 방법으로 분류된다.^(2,3) 본 논문은 CDMA 이동통신시스템의 순방향(forward link) Pilot신호를 이용한 Time-based방법에 대하여 제안하고 설명하고자 한다. CDMA 시스템은 기지국내에서 동작하고 있는 단말기의 시작동기 및 위상을 조정하기 위하여 순방향 Pilot신호를 항상 전송한다. 그러므로, 단말기는 주변기지국들의 Pilot신호를 항상 검출하게 된다. 만일, 단말기가 3개이상의 주변기지국 Pilot신호를 수신한다면 삼각측정법에 의하여 자신의 위치 측정이 가능하다. 전파전달시간의 측정법은 한점에서 여러 점으로 도달하는 신호의 절대 도착시간(TOA)과 상대적인 도착시간의 차(TDOA)를 측정하는 두 가지 방법으로 구분된다. 그러나, TOA보다 TDOA의 구현이 CDMA에서 더 용이한 구현의 편리성때문에 본 논문에서는 TDOA방법에 국한 설명하기로 한다. TDOA 방법은 두 기지국에서 단말기 까지의 거리 차에 비례하는 전파 전달시간의 차를 측정하여 단말기가 위치하고 있는 쌍곡선을 그리는 방법으로 3개의 기지국으로부터 2개의 쌍곡선을 그린다면 이곡선들의 교점이 단말기의 위치가 된다.

전파의 특성은 전송거리에 따라 증가하는 전송손실(path loss)을 갖는다. 이 때문에 기지국으로부터 멀리 떨어진 단말기에 도달되는 Pilot신호는 검출되기 어려운 문제점을 가지고 있다. 따라서, 이동통신망을 이용한 위치추정방법은 송신신호의 전송거리를 증가시키는 방안의 필요성이 대두된다. 즉, 단말기에 수신되는 Pilot신호의 에너지(energy)를 증가시키는 방안이 요구된다. 이 에는 크게 (1)Pilot신호의 송신전력(transmit power)을 증가시키는 방법, (2)단말기 안테나 이득(gain)을 증가시키는 방법, (3)단말기 Searcher의 누적구간(integration interval)을 증가

시키는 방법등으로 구분할 수 있으나 본 논문에서는 오직 Searcher 누적구간 증가에 따른 TDOA측위방법의 영향에 대하여 이론적으로 분석하고 Field 시험과 컴퓨터 모의시험을 통하여 연구에 대한 결론을 맺고자 한다.

II. 본론

1. 단말기 Searcher

IS-95 CDMA 단말기의 Searcher 구조가 아래 그림 1에 주어져 있다.⁽⁴⁾

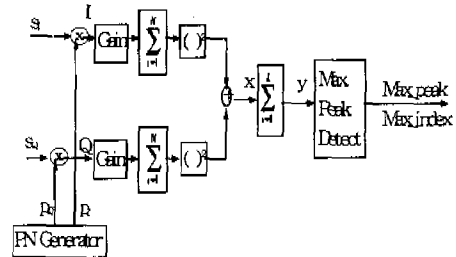


그림 1. 단말기 Searcher 구조

수신 Baseband 신호 s_1 와 s_0 는 PN 발생기(generator)에 의해 역확산(despreading)되어 데이터(data) I와 Q를 생성시킨다. 정해진 이득(gain)에 의해 증폭된 데이터는 N(chips)갓수 크기의 동기누적(coherent integration)과정을 거친 후 신호의 에너지 계산한다. 마지막으로 신호의 에너지를 크게 하기 위하여 동기누적된 신호를 L개 누적하는 비동기누적(non-coherent integration)과정을 수행한 후 Max. peak detector 블록(block)을 통하여 Max. 에너지 신호가 검출되어 이 신호의 Peak 에너지 값과 chip index가 출력된다. Chip index는 현재 Sweep되는 Search window의 시작점을 기준으로 표현된다.

신호 x와 y의 에너지 산출과정을 표현한 수식이 아래에 주어진다.

$$\begin{aligned}
 E_x &= \left(\sum_{i=1}^N G \cdot I_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N G \cdot Q_i \right)^2 \\
 &= G^2 \left[\left(\sum_{i=1}^N I_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N Q_i \right)^2 \right] \\
 &= G^2 \left[(N \cdot I_c)^2 + (N \cdot Q_c)^2 \right] \\
 &= G^2 N^2 V_c^2 \\
 &= E_c (G \cdot N)^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

where G: Gain

N: 동기누적 크기

$$I_c = Q_c = \frac{V_c}{\sqrt{2}}$$

$$E_c = V_c^2$$

V_c : chip voltage
 E_c : chip energy

$$E_y = \sum_{k=1}^L E_x$$

$$= L * E_c * (G * N)^2 \tag{2}$$

위 식 (2)는 Searcher로부터 계산되는 신호의 전체 누적에너지 E_y 는 동기누적구간 N 의 2승에 비례하고 비동기누적구간 L 에 비례한다는 것을 나타낸다.

다음, 신호 y 의 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 을 살펴보기로 하자. 통신이론에서 Noise의 누적에너지는 동기누적과 비동기누적을 수행하면서 각각 N 배와 L 배 증가한다. 그러므로, 입력신호의 SNR 향상은 동기누적구간 N 에 의해 결정된다. 즉, 결국 Searcher의 Processing 이득은 N 으로 표현된다. 예를들어, $N=512$ chips에서 신호의 검출 임계치(threshold)를 -18 dB로 설정하였다면 N 이 1024로 2배 증가할 때 3dB의 Processing 이득이 발생하므로 임계치를 -21 dB로 설정하여도 같은 신호를 검출할 수 있다. 그러나, 시간에 따라 증가하는 단말기 발진기(oscillator)의 위상천이(phase shift)에 의해 동기누적구간을 무한정 늘릴 수만은 없다. IS-95에서는 이를 최대 300Hz ^[5]로 규정하고 있으므로 최대 동기누적구간은 약 2048chips로 한정된다. 한편, 이론적으로 비동기누적은 SNR의 향상보다는 신호의 전체 누적에너지 크게 만든다. 하지만, Noise의 Random 특성으로 인하여 비동기누적 횟수가 많을 수록 약간의 SNR 향상은 기대할 수 있다. 그렇지만 일반적으로 누적횟수 L 에 의해 거의 같이 증가되는 Noise의 누적에너지로 인하여 신호검출임계치를 L 에 따라 재설정하지 않으면 오경보율을 증가시키는 문제를 야기하기 때문에 주의가 요구된다.

2. 순방향 Pilot의 전파환경

단말기에 수신되는 순방향 Pilot 신호의 세기는 아래 수식으로 표현된다.^[6]

$$\frac{E_c}{I_o} = \frac{\beta P_j L(d_j) G_c G_m}{I_o(d_j)W + I_{oc}(d_j)W + (N_oW)_M}$$

$$= \frac{\beta P_j L(d_j) G_c G_m}{P_j L(d_j) + \sum_{i \neq j} P_i L(d_i) + (N_oW)_M} \tag{3}$$

where β : 송신전력에 대한 Pilot 비율
 P_i, P_j : 기지국 i, j 의 송신전력
 where $i=1,2,\dots,k$
 $j=1,2,\dots,k$
 $L(d)$: 전송손실
 G_c, G_m : 기지국과 단말기 안테나 이득
 I_o, I_{oc} : 기지국 i, j 의 전력 밀도
 W : 채널 대역폭(bandwidth)
 $(N_oW)_M$: 단말기 thermal noise

식 (3)의 전송손실 $L(d)$ 는 random이고 log-normal분포를 가진다고 입증되어 있다.^[5] 즉, 기지국에서 거리 d 만큼 떨어진 곳에 위치한 단말기의 평균 수신 Pilot의 세기는 거리 d 에 대한 전송손실 지수(exponent)에 의하여 로그리즘(logarithm)적으로 감소한다는 것이다.

$$L(d) \propto d^n$$

$$L(d) \propto 10n \log(d) \text{ (dB)} \tag{4}$$

위 식 (4)의 지수 n 의 값은 주변 전파환경에 의해 결정된다. 다양한 전파환경에서의 일반적인 지수 n 에 대한 값이 아래 표에 주어져 있다.^[7]

표 1. 다른환경에 대한 전송손실 지수

전 파 환 경	전송손실 지수 n
Free space	2
도심지역	2.7~3.5
Shadowed 도심지역	3~5
빌딩내 LOS	1.6~1.8
빌딩 밀집지역	4~6
광장 밀집지역	2~3

만일 단말기가 빌딩에 가려 비 가시성(Non-LOS)을 가진다면 Pilot신호는 절대적인 전파경로가 없이 빌딩으로 인한 전파의 굴절 손실을 가진다. 이를 Shadow 영향(effect)이라 부른다. Shadowing에 의한 전력손실은 Log-normal 분포를 가지며 도심지역에서는 일반적으로 약 4dB ^[8]의 값을 가진다. 수신되는 전파는 Multipath fading에 의하여 수신 Power의 왜곡(fluctuation)현상을 겪게 된다. 전파의 왜곡정도는 정지된 단말기에 비해 이동하는 단말기가, 이동하는 속도가 빠를수록 심하다. 이 빠른 왜곡현상은 수신 Carrier의 Spectrum 분포가 Rayleigh 분포를 가짐으로서 Rayleigh fading으로 알려져 있

다. 하지만 본 논문에서는 이동 단말기에 대한 시험은 포함하지 않는다. 또한, 단말기가 한 기지국에 근접해 있는 경우 식 (3)의 분모가 크게 증가하므로 멀리 있는 기지국 Pilot신호의 수신이 어렵게 된다. 이 현상을 Near-Far 현상이라 한다.

3. TDOA의 계산

단말기는 기지국의 Handoff를 돕기 위하여 주변 기지국의 Pilot 세기와 Pilot PN phase를 포함하는 Pilot strength measurement message(PSMM)를 측정하여 서비스기지국에 보낸다.^[9] 이 message에 포함되는 Pilot PN phase는 아래 식 (5)로 표현된다.

$$PN_phase = (Pilot_arrival + (64 * Pilot_PN)) \pmod{2^{15}} \quad (5)$$

여기서 Pilot_PN은 기지국의 Pilot PN sequence offset index를 나타내며 Pilot_arrival은 단말기의 기준시간에 상대적으로 측정되는 각 기지국 Pilot의 단말기 도착시간을 나타낸다. 즉, 오직 서비스기지국에 단말기가 동기되어 있는 CDMA 시스템에서는 Pilot_arrival은 서비스기지국에 대한 주변기지국 Pilot 신호의 단말기 도착시간의 차이인 TDOA를 나타내므로 이를 위치추정을 위한 시간정보로 활용 할 수 있다.

III. 시험 및 분석

아파트가 비교적 밀집된 잠실지역에서 Field 시험을 수행하였다. 두 대의 셀룰러(cellular) 단말기에 동기누적구간을 각각 512와 1020chips, 비동기구간을 1로 설정하여 임의의 정지위치에서 기지국으로부터 전달되는 Pilot신호의 에너지 세기와 TDOA를 DM(Dignostic Monitor)을 이용하여 약 5분정도 수집하였다. 시험환경의 형상이 아래 그림 2에 주어졌다.

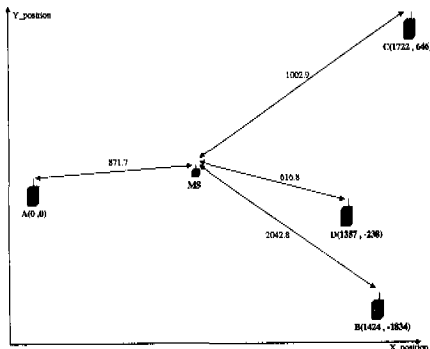
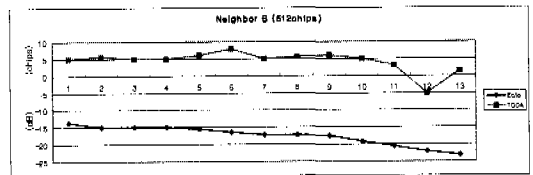


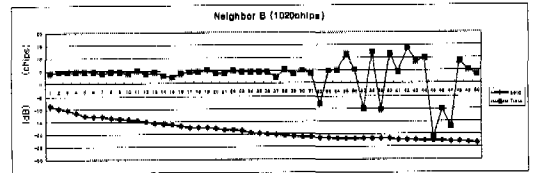
그림 2. 시험 환경

단말기와 기지국의 기준위치는 GPS로 일정시간 동안 반복적으로 측정된 다음 이들 값의 평균으로 산정하였다. GPS로 측정된 기지국과 단말기사이의 거리가 위 그림에 표시되어 있으며 단위는 미터(meter)이다. 기지국 B, C, D의 위치는 서비스기지국 A의 위치좌표를 (0,0)으로 했을때의 상대적인 좌표(x,y)를 나타낸다. 표시된 거리차를 Chip delay로 환산하여 기준 TDOA로 가정하였다. 그 결과 TDOA_{AB} ≃ 4.8(chips), TDOA_{AC} ≃ 0.5(chips)이 되었다

각각의 동기누적구간에서 DM으로 측정된 기지국 B와 C의 Pilot신호의 수신 에너지의 세기와 TDOA 값이 그림 3과 4의 그래프로 주어진다.

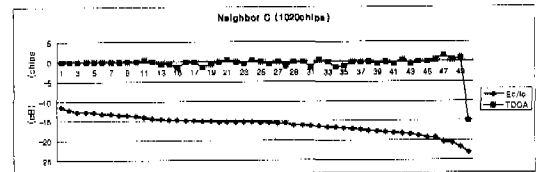


(a) 동기누적구간 = 512

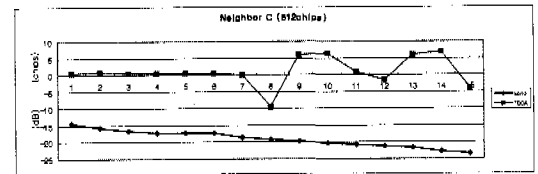


(b) 동기누적구간 = 1024

그림 3. B 기지국의 Pilot 신호세기에 대한 TDOA의 변화



(a) 동기누적구간 = 512



(b) 동기누적구간 = 1024

그림 4. C 기지국의 Pilot 신호세기에 대한 TDOA의 변화

그림에서 x축은 Sample number를, 각 Sample number에 일치하는 TDOA의 값과 수신 Pilot 신호의 세기가 chip과 dB 단위로 y축 상단과 하단에 각

각 표시되어 있다. 즉, Sample number 1에서 측정된 TDOA와 수신 Pilot 신호의 E_c/I_0 가 각각 5chips와 -13.77dB가 된다는 것을 나타내고 있다. 그림으로부터 다음의 결과를 도출하였다. 첫째, 기지국 B, C의 Pilot 세기가 -25dB를 넘는 횟수를 조사해 보았더니 1020chip의 동기누적구간이 512chip보다 약 3배정도 많았다. 둘째, 일관성있는 TDOA값을 제공하는 최소 에너지의 세기를 비교해 보았다. 512chip의 -18dB이하와 1020chip의 -21dB이하에서는 TDOA값이 random하게 변하여 신뢰성있는 신호라 판단하기 어려웠다. 이 결과는 동기누적구간이 2배로 증가할 때 Searcher의 이득이 약 3dB 증가한다는 이론과 일치할 뿐만 아니라 동기누적구간이 512chip인 기존의 셀룰러 단말기가 Handoff를 위하여 약 -17dB이상⁽⁴⁾의 Pilot 신호만 고려하는 것보다 거의 일치하였다. 셋째, 각 동기누적구간의 에너지의 세기가 -18dB와 -21dB 이상에서 측정된 TDOA값을 산출하여 기존 TDOA값과 비교하였다. 결과, 동기누적구간이 512chip과 1020chip에서 기지국 AB의 TDOA 측정값이 각각 5~6chips와 4~5chips로 나타났다. 같은 방법으로 기지국 AC의 값을 측정하였더니 각각 0.5~1chips과 0~0.5chips 정도로 나타났다. Searcher의 용해도가 0.5chip인 것을 감안하여 4.8chips와 0.5chips의 기준 TDOA와 비교할 때 이는 매우 의미있는 결과라 하겠다. 위의 결과로부터 동기누적구간이 증가됨으로서 위치추정이 가능한 신호를 수신하는 횟수가 증가될뿐만 아니라 약한 신호의 수신도 가능하게됨으로서 셀 내 위치추정영역이 확장되는 장점이 있었다. 또한, 측정 TDOA값의 정확도 역시 약간 향상되었다.

동기누적구간 1020chip의 측정 TDOA값을 사용하여 단말기의 위치를 추정하였다. 추정된 위치는 다중경로(multipath)와 비 가시성(NLOS)에 의한 오차와 기지국간 시차 비동기에 의한 오차의 보상이 없고 Searcher의 용해도가 0.5chip인 경우이다. 그럼에도 불구하고 반 이상의 측정위치가 기준위치 주변에 포진하고 있었다.

수신 Pilot 에너지의 세기에 대한 셀 내 위치추정 영역을 컴퓨터로 모의시험하였다. 이상적인(ideal) 6각형(hexagonal) 셀 구조의 셀간거리 2km인 환경을 가정하였다. 거리에 따른 전송손실 지수를 -4로 주었으며 송신 Pilot의 세기는 기지국 송신 Power의 20%로 가정하였다. 또한, Unity의 기지국과 단말기 안테나 이득을 주었으며 단말기 자체의 Thermal noise는 무시하였다. 오직 7개로 구성되는 1st tier

기지국만 고려하였으며 Multi-channel에 의한 interference는 제외하고 다만 기지국 Pilot 신호간의 interference만을 가정하였다. Shadow 영향에 의한 전력 손실은 고려되지 않았다. 모의시험한 결과가 그림 6에 주어져 있다.

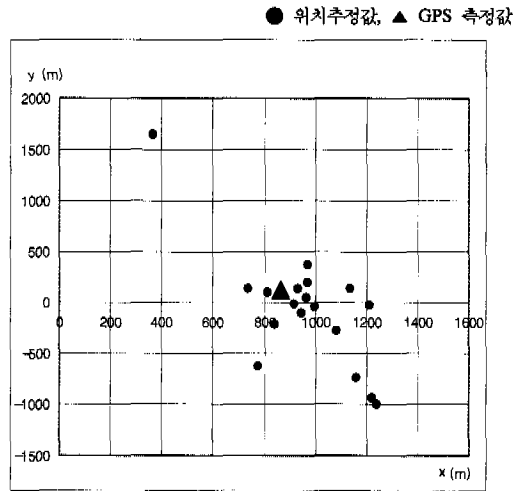


그림 5. 동기누적구간 1020chip의 위치추정 결과

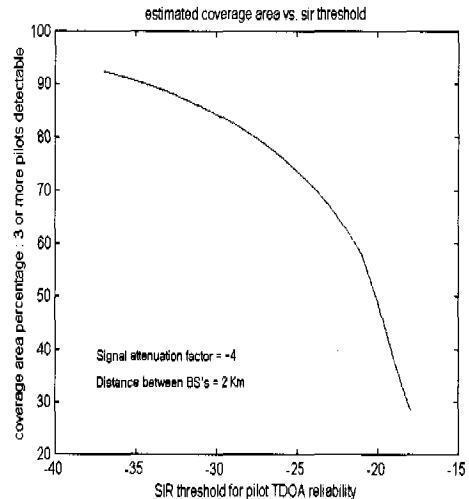


그림 6. SIR에 대한 측위가능영역

그림에서 수신 에너지의 세기가 -18dB일때 위치추정영역은 셀 내 약 25%, -21dB일때 약 55%, -35dB일때 약 90%가 됨을 볼 수 있다. 여기에 약 4dB의 도심에서의 Shadow 영향을 고려한다면 추정 영역은 이 보다 훨씬 낮아질 것이다. 그러나, 위의 결과는 셀 내 위치추정영역을 확장하기 위하여 약한 세기의 신호검출이 필요하다는 것을 보여주고

있다. 이의 해결방안은 단말기 Searcher의 동기누적 시간을 증가하는 방안이 될 수도 있으나 단말기는 자체 발진기의 위상천이 문제로 인하여 무한정 동기누적시간을 증가할 수 없는 결점을 가지고 있다. 그러므로, 이동통신망을 이용한 위치추정방법의 성공을 위하여 이의 보상방안에 대한 연구가 절실히 요구된다.

IV. 결론

기지국 Pilot신호가 단말기에 도달하는 시간의 차인 TDOA를 측정하여 삼각측정법을 이용한 이동 단말기의 위치추정방법을 제안하였다. 만일 3개이상의 기지국 Pilot을 단말기가 항상 수신한다면 위치 추정이 가능하다. 그러나, 거리에 따라 지속적으로 감쇄하는 신호의 세기와 Near-far 문제로 인하여 Pilot신호의 검출은 쉬운 문제가 아니다. Field 시험을 통하여 단말기 Searcher의 동기누적구간을 2배 증가함으로써 약 3dB의 Processing 이득을 얻을수 있어 위치추정영역이 확장될뿐만 아니라 신뢰성있는 TDOA값의 측정로 위치정확도에도 약간의 향상이 있음을 볼 수 있었다. 그러나, 단말기 자체 발진기의 위상천이 정도가 시간에 따라 증가하는 문제로 인하여 동기 누적구간을 무한정 늘릴수 없는 단점이 있다. 그러므로, 이동통신망을 이용한 위치추정 방법의 성공을 위하여 수신 Pilot신호의 에너지를 향상시키는 방안의 연구가 요구된다. 이와 더불어 추정위치의 정확도 향상을 위하여 전파환경의 오차와 기지국간 시각 비동기에 대한 보상 및 Searcher 용해도의 향상에 대한 연구도 수반이 되어야 한다.

참 고 문 헌

[1] CC Docket No.94-102, "Revision of the Commissions rules to ensure compatibility with Enhanced 911(E-911) emergency calling systems, RM-8143," FCC, Jul. 26 1996

[2] K. Krizman, T. Biedka, T. Rappaport, "Wireless position location: fundamentals, implementation, strategies, sources of error," *IEEE 47th Vehicular Technology Conference Proceedings Vol.2*, Pheonix, AZ., May. 1997

[3] J. Cafery and G. Stuber, "Subscriber location in CDMA cellular networks," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 47, pp.406-416,

May, 1997

[4] Qualcomm, Inc., *MSM2300 User Manual*, 1997

[5] Qualcomm, Inc., *CDMA Cellular Dual Mode Subscriber Station*, Ver. 1.2, Sep. 1995

[6] Qualcomm, Inc., *The CDMA Network Engineering Handbook*, Vol. 1, Mar. 1993

[7] T. Rappaport, *Wireless Communications*, IEEE Press, 1996

[8] E. Lee, D. Messerschmitt, *Digital Communications, 2nd Edition*, KAP, 1994

[9] Qualcomm, Inc., *Wideband Spread Spectrum Digital Cellular System Dual-Mode Mobile Station-Base Station Compatibility Standard*, Apr. 1992

김 정 태(Chong-tae Kim) 정회원
 한국통신학회 논문지 제 24권 제 3B호
 현재: 삼성전자 통신연구소 수석연구원
 <주관심 분야> 유도항법, 디지털신호처리, 이동통신

서 덕 영(Doug-young Suh) 정회원
 한국통신학회 논문지 제 24권 제 3B호
 현재: 경희대학교 전자정보학부 교수
 <주관심 분야> 멀티미디어 통신, ATM