

CDMA 및 OFDM 기반 무선측위의 다중경로오차 특성 비교분석

A Comparison of the Multipath Error Property In Wireless Location of CDMA and OFDM

방혜정*, 이장규, 지규인, 김진원, 정희, 현문필
(HyeJung Bang, Jang Gyu Lee, Gyu-In Jee, Jinwon Kim, Hee Jung, and Moonpil Hyun)

Abstract : This paper shows that the OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex) system is robust to multipath than CDMA(Code Division Multiple Access) system and it has a strong possibility to be utilized as a supplementing wireless location system for the forthcoming portable internet network. The OFDM system based on IEEE 802.16e is a wireless TDD(Time Division Duplex) OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) system providing portable internet services in 2.3 GHz frequency band and is scheduled in service in Korea starting in 2006. In this paper, multipath error is calculated using a two-ray model and compared with that of a CDMA system which is following IS-95. The OFDM system shows a maximum multipath error of 3 m while a CDMA system shows a maximum multipath error of 61 m. For this simulation, an early-late technique is used. This technique is usually used to match synchronization of signal in DLL(Delay Lock Loop).

Keywords : wireless location, OFDM, CDMA, multipath

I. 서론

무선 측위란 무선 신호를 이용하여 사용자의 위치를 찾아내는 기술이다. 신호가 보내진 곳의 위치를 알고 있으면 그곳으로부터 사용자사이의 신호 전달 시간을 이용하여 사용자의 위치를 계산할 수 있다. 이론적으로, 삼각측위(triangulation)를 따르면 세 개의 측정치를 이용하여 삼각원의 위치해를 구할 수 있다. 그러나 정확한 신호전달 시간을 재는 것은 쉬운 일이 아니다. 시각동기오차와 전달경로상의 환경적 요인에 의해 생기는 오차가 전달시간 측정치에 더해지기 때문이다. 시각동기오차는 기지국 사이의 동기와 기지국과 단말기 사이의 동기나 나눌 수 있다. 본 논문에서 고려하는 CDMA 및 OFDMA 기반 통신방식의 경우 GPS시각을 이용하여 기지국들 사이의 동기가 이루어지고 있고 기지국 사이의 도달시각차(TDOA: Time Difference of Arrival)를 측정값으로 이용하기 때문에 정확한 측위를 방해하는 가장 큰 요소는 환경적 요인에서 비롯되는 오차들이다.

무선 신호는 전달과정에서 주변의 건물, 벽, 나무등에 의하여 회절이나 반사를 하게 되므로 여러 경로를 통해 단말기에 수신된다. 이렇게 복수의 경로를 통해 수신된 복합 신호는 이로부터 가시경로 성분 즉, 가장 먼저 도달한 신호를 분간해 내는 것을 어렵게 하며 이에 따라 TOA 혹은 TDOA 측정에 오차가 발생한다. 이것이 다중경로오차이다. 무선측위는 측정된 시간을 거리로 변환하는 과정에서 빛의 속도를 곱하기 때문에 시간오차에 매우 민감하다. 예를들어 1 μ s(micro-

second)의 시간오차는 300m의 거리오차를 발생시킨다. 그러므로 다중경로오차가 매우 작은 시각오차에 불과하더라도 측위 정확도에는 큰 영향을 미치게 된다[1,3].

이러한 다중경로문제는 측위 분야에서뿐만이 아니라 디지털 데이터 통신에서도 비트오류를 발생시켜 문제가 되어왔는데 이를 개선하여 데이터 수신 품질을 높이기 위하여 개발된 기술이 직교 주파수 분할 다중화(OFDM)이다. 이 기술은 대용량 전송데이터를 직교성을 갖는 여러 개의 부채널을 이용하여 동시에 보내는 방법으로 다중경로 존재로 인한 비트 오류율을 줄이고 고속의 대용량 전송을 가능하게 함으로써 차세대 무선통신기술로 각광받고 있다[2].

OFDM기술이 다중경로가 존재하는 무선통신 환경에서 우수한 성능을 보인다는 것은 다중경로 채널 환경하에서도 전송된 데이터를 잘 복원할 수 있다는 의미한다. 이러한 OFDMA의 다중경로 특성이 측위 측면에서는 아직 검토된 바 없다.

본 논문에서는 무선측위의 측면에서 OFDM기술의 성능을 CDMA와 비교 분석하여 봄으로써 다중경로 오차가 존재하는 상황에서의 OFDM 기반 무선측위의 성능을 분석하였다.

II. CDMA 와 OFDM 기반 무선 측위

무선 측위를 위하여 가장 많이 고려되고 있는 측정량은 절대적 또는 상대적 전파의 전달 시간이다. 시각 정보를 이용하여 위치를 구하는 대표적인 측위 방식에는 각 기지국으로부터 보내진 신호가 단말기에 도착할 때까지 걸린 시간정보로부터 위치를 구하는 TOA방식과 단말기에서 수신된 여러 기지국의 신호들간의 도착 시간 차이를 이용하는 TDOA방식이 있다[1].

1. TDOA(Time Difference Of Arrival)

TDOA 방식은 TOA 방식과 달리 각각의 기지국으로부터 단말기까지 신호가 전송된 시각 차이를 측정함으로써 이루어진다. 그림 1은 TDOA 방식을 보여 주고 있으며 그림에서 보는 바와 같이 이 측정치를 이용하면 두 개의 기지국을 초

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 4. 30., 채택확정 : 2006. 6. 10.

방혜정, 이장규 : 서울대학교 전기 컴퓨터공학부

(ilovely0@snu.ac.kr/jgl@snu.ac.kr)

지규인 : 건국대학교 전자공학부(gjee@konkuk.ac.kr)

김진원, 정희, 현문필 : 삼성전자

(Jinwon.kim@samsung.com/hj32@samsung.com/moonpil.hyun@samsung.com)

※ 본 연구는 삼성전자와 서울대학교 자동화시스템연구소의 지원에 의하여 연구되었음.

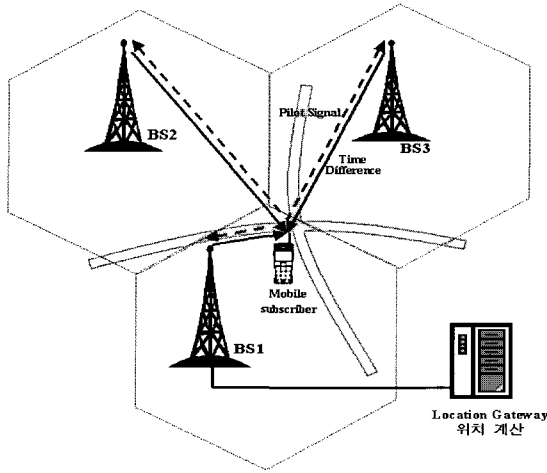


그림 1. TDMA 위치결정.
Fig. 1. Location determination by TDMA method.

점으로 하는 쌍곡선 위에 단말기가 위치하게 된다. 단말기의 위치는 이러한 쌍곡선들의 교점이 된다[4].

TDMA의 경우 TOA와 달리, 도달 시각의 차를 이용하기 때문에 단말기에서의 정확한 시계의 부재로 인해 생기는 시간 오프셋(time offset)이 계산과정에서 공통항으로 제거된다. 단지, 측위 신호를 전송하는 각 기지국사이의 동기화가 요구되는데 이는 각 기지국이 정밀한 시계를 이용하고, GPS를 이용하여 시각을 보정함으로써 가능해진다.

따라서 단말기에 수신된 신호 중에서 각 기지국이 보낸 신호를 구별하고 그로부터 TDMA를 측정함으로써 단말기의 위치를 구할 수 있다.

2. CDMA 기반의 무선측위

CDMA 방식의 기본 기술은 원래 군사용 목적을 위해 오래 전부터 개발이 되어온 대역확산(spread spectrum) 통신기술을 사용하여 같은 시간에 같은 주파수대를 다수의 사용자가 동시에 통신할 수 있게 해주는 기술이다.

CDMA 방식의 하나인 직접대역확산방식은 기본대역 정보 신호를 이보다 훨씬 높은 주파수의 랜덤시퀀스로 곱한 다음 변조, 송신하는 방식이다. 단말기에서는 송신시 대역확산을 위해 사용한 동일한 코드로써 정합필터링(matched filter)을 하여 확산된 신호를 역확산하여 정보신호를 복원하게 된다. 각각의 사용자에게 각기 다른 랜덤시퀀스를 할당하게 되면 같은 코드로 역확산하고자 하는 신호 외의 다른 신호는 잡음신호(간섭신호)에 불과하게 되어 사용자간의 분리가 가능하다.

본 논문에서 고려하는 CDMA 시스템은 IS-95 표준을 따른다. 현재 국내에 상용화되어 있는 IS-95방식은 IMT-2000의 표준의 하나인 CDMA2000의 모체가 되는 시스템으로 GPS를 이용하여 기지국 동기를 맞추고 직접대역확산방식으로 구현된다. IS-95에서 정보신호를 대역확산 시키기 위해서 사용하는 PN(Pseudo Noise)시퀀스는 그림 2처럼 32768 chips의 주기를 가지며 chip rate은 1.2288 MHz이다. 이에 따라 PN 코드 한 칩의 시간 간격은 0.81μs이고 이는 244m의 거리에 해당한다.

이 PN시퀀스는 모든 기지국에서 반복하여 사용하므로 기지국을 구별하기 위하여 64개의 chip 단위로 512개의 시간

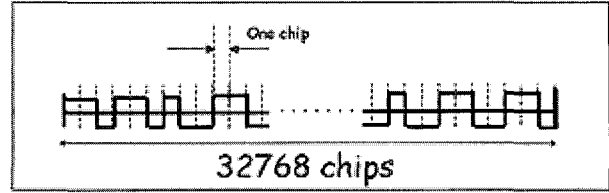


그림 2. IS-95 CDMA의 PN시퀀스.
Fig. 2. PN sequence of IS-95 CDMA.

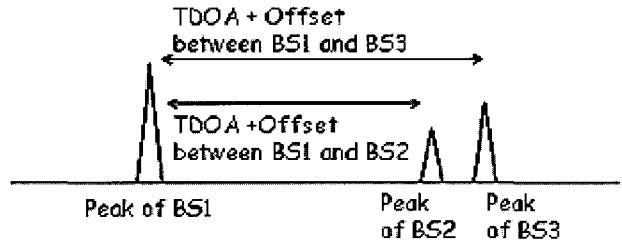


그림 3. CDMA에서의 TDMA 획득.
Fig. 3. TDMA acquisition in CDMA system.

오프셋(offset)을 사용한다. 다시 말하면, CDMA 시스템에서 모든 기지국은 같은 PN시퀀스를 가지고 있으며, 시퀀스의 시작시점, 즉 오프셋을 달리하여 각 기지국을 구별한다.

따라서 단말기에서 수신된 신호와 이 PN시퀀스를 상호상관(cross correlation)을 취하면 그림 3과 같은 그림을 얻을 수 있다. 수신신호와 PN코드가 정확히 일치할 때마다 상관값은 최대 피크(peak)값을 갖는다. 각 피크의 값은 상관 결과 얻어지는 것으로 각 피크의 높이는 수신신호의 세기에 비례한다. BS1은 서빙기지국을 의미하고 BS2와 BS3은 주변 기지국이다. 서빙기지국과 주변기지국의 피크간의 차이는 TDMA와 기지국간의 오프셋차이의 합이 되므로 이미 알고 있는 오프셋차이를 보정함으로써 측위를 위한 TDMA를 얻어낼 수 있다.

3. OFDM 기반의 무선측위

OFDM이란 디지털 방송에서 다중경로에 의한 비트 오류 발생률을 개선하여 음성과 영상의 수신 품질을 높이기 위해 유럽의 디지털 오디오 방송(DAB)용으로 개발되어 1996년부터 DAB상용 방송에 사용되고 있는 디지털 변조방식이다. 수백의 반송파를 사용하는 다반송파 변조 방식이라는 것과, 각 반송파가 직교 관계에 있다는 점이 특징으로 각 반송파의 주파수 성분은 상호 중첩되어도 상관없기 때문에 보통의 주파수 분할 다중 방식(FDM)에 비해 주파수 이용 효율이 높다. 또한 반송파가 많으면 대역폭당 전송 속도를 높일 수 있어 데이터의 대용량 전송도 가능하다.

여러 개의 반송파를 이용하여 대용량의 데이터를 동시에 병렬전송(parallel transmission)하는 것은 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)를 이용하여 구현하며 수신측에서는 이 신호에 다시 FFT를 취하여 데이터를 복원한다.

최근 이러한 OFDM기술이 새로운 통신시스템에 많이 적용되고 있는데 그 중 하나가 휴대인터넷 시스템(portable internet)이다. 휴대인터넷 서비스란, 대체로 60km/h 이상의 속도로 이동 중에도 1Mbps 이상의 속도로 무선 송수신이 가능한 통신기술을 말한다. 본 논문에서 고려하는 OFDM 시스템

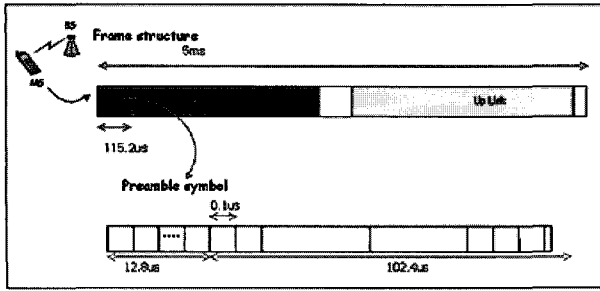


그림 4. IEEE 802.16e를 따르는 OFDM 시스템의 프레임 구성.
Fig. 4. Frame configuration of IEEE 802.16e OFDM system.

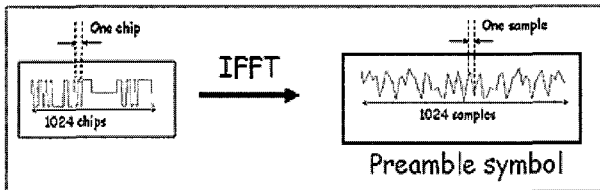


그림 5. OFDM 프리앰블 심볼의 생성.
Fig. 5. Generation of OFDM preamble symbol.

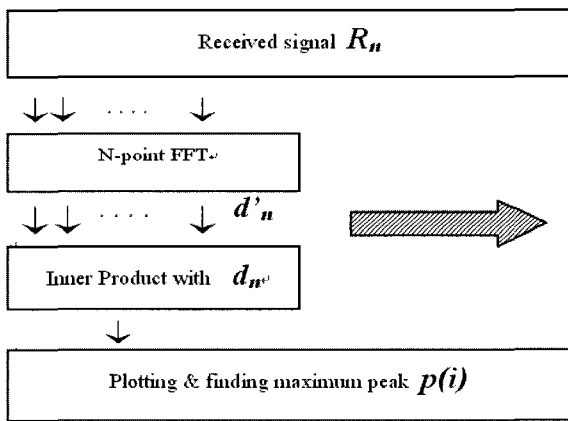


그림 6. OFDM에서 신호의 검출.
Fig. 6. Signal detection in OFDM system.

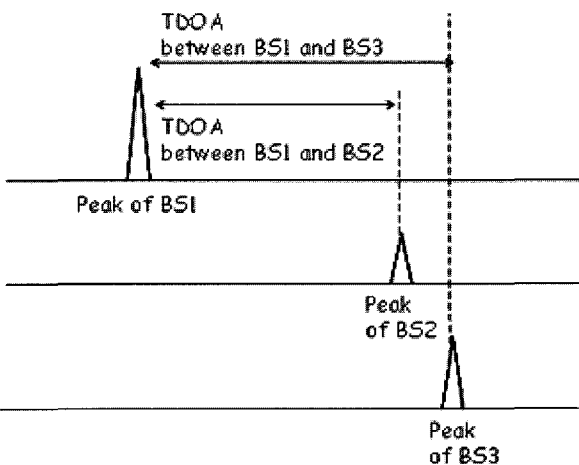


그림 7. OFDM에서의 TDOA 획득.
Fig. 7. TDOA acquisition in OFDM system.

은 IEEE 802.16e 시스템으로 현재 국내에서 상용화가 진행 중이다. 이 표준에 따르면 모든 기지국은 GPS를 이용하여 동기를 맞추고 있고 전송신호는 그림 4와 같은 프레임 구성을 갖는다. 한 프레임은 5ms의 주기를 가지고 전송되며 하향링크(down link) 전송시간과 상향링크(up link) 전송시간을 번갈아 가지는 TDD(Time Division Duplex) 방식을 취한다. 프레임은 115.2μs의 길이를 갖는 심볼이라 불리는 단위로 구성되며, 그림 4의 아래쪽에 나타난 프리앰블 심볼의 상세 그림에서 볼 수 있듯이 한 심볼은 0.1μs의 길이를 갖는 1152개의 샘플(sample)로 이루어져 있다. 각 심볼은 다중경로로 인해 부분반송파(sub-carrier)들의 직교성이 깨지는 것을 방지하기 위한 12.8μs의 보호구간을 가진다.

그림 4에서의 프리앰블(preamble) 심볼은 하향링크의 맨 앞 부분에는 위치하는 심볼로, 신호를 보낸 기지국을 구별하고 신호의 동기를 맞추기 위하여 사용된다. 각 기지국마다 다르게 가지는 PN시퀀스는 1024개의 칩(chip)으로 구성되며 그림 5에서처럼 IFFT를 이용하여 OFDM 변조되어 1024개의 샘플을 갖는 심볼이 생성된다. 이중 뒷부분의 128개의 샘플을 복사하여 만든 12.8μs의 보호구간이 앞부분에 삽입되어 위에서 설명한 115.2μs의 한 심볼의 형태를 갖추게 된다. 이에 따라 OFDM PN코드의 chip rate는 10MHz에 해당하며 한 칩의 시간 간격은 0.1μs이고 이는 30m의 거리에 해당한다.

OFDM에서 신호의 도달 시각을 검출하기 위해서는 그림 6과 같은 방법을 쓴다. 단말기에서 수신된 신호를 0.1μs 시간 간격으로 샘플링(sampling)하고 R_n 이 중 1024개씩 샘플을 취해 1024 point-FFT하여 $d'(n)$ 을 생성한다. 이를 1024개의 칩으로 이루어진 각 기지국의 PN시퀀스, $d(n)$ 와 내적을 취한 값, $p(i)$ 을 그래프에 나타내는 과정을 반복하면 그림 9와 같이 싱크함수 형태를 갖게되고 $d(n)$ 과 $d'(n)$ 이 일치할 때 최대값을 갖는다. 일련의 과정은 앞서 CDMA에서 살펴본 상관(correlation)과 유사한 방법으로 수식으로 나타내면 (1)과 같다. 이를 유사 상관이라 정의하며, $p(i)$ 는 그림 9에서 보여지는 유사 상관함수이다.

$$p(i) = \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \times \left(\sum_{k=0}^{N-1} R(k+i) e^{-j\frac{2\pi}{N} n k} \right) \tag{1}$$

$$= \sum_{n=0}^N d(n) \times d'(n) = \vec{d} \cdot \vec{d}'$$

각 기지국은 GPS를 이용하여 동기를 맞추고 있으므로 각각의 고유 PN시퀀스에 대하여 위의 과정을 거치면 그림 7과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 앞 절의 그림 3과 같이 BS1은 서빙 기지국을 의미하고 BS2와 BS3은 측위를 위해 사용될 주변 기지국이다. 단말기는 서빙기지국과 동기가 맞추어져 있으므로 다른 기지국의 피크와의 시각차이를 얻을 수 있고 그 값이 바로 측위를 위한 TDOA에 해당한다.

III. 무선측위에서의 CDMA 와 OFDM 의 다중경로오차특성

측위를 위한 신호의 도달시각을 측정하기 위해서는 수신된 신호 중에서 각 기지국이 보낸 신호를 구별하고 다중경로로 수신된 신호 중에 가장 먼저 도착한 신호 즉 가시경로 신호를 찾아내어야 한다. 이를 위하여 앞 장에서 살펴본 바와

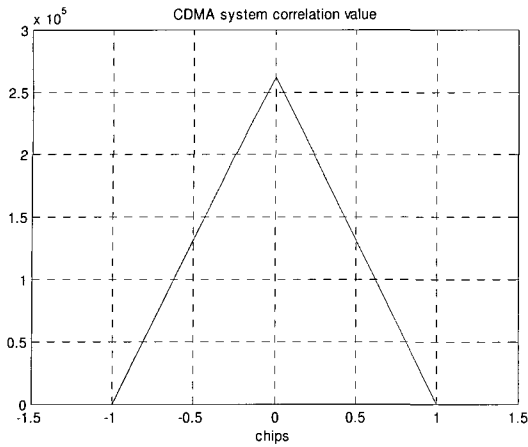


그림 8. IS-95 CDMA 파일롯의 자기상관함수.
Fig. 8. Autocorrelation function of the pilot of IS-95 CDMA.

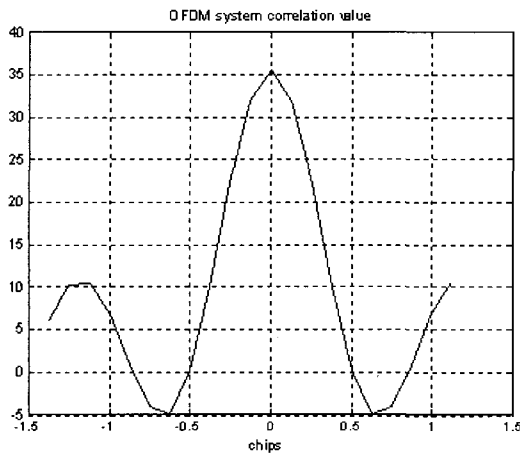


그림 9. IEEE 802.16e 프리앰블의 유사상관함수.
Fig. 9. Quasi-correlation function of the preamble of IEEE 802.16e.

같이 상관 또는 유사상관을 이용한다.

IS-95 CDMA 시스템과 IEEE 802.16e OFDM 시스템은 변조 방법의 차이 때문에 서로 다른 자기상관(auto correlation) 함수를 가진다. 그림 8과 9는 기지국과 단말기 사이에 오차가 전혀 없는 이상적인 채널에서 각각의 자기 상관함수와 유사 상관함수를 나타낸다[5].

그림에서 확인할 수 있듯이, CDMA시스템의 자기상관 함수는 정확히 좌우 대칭인 삼각형의 모양인데 반하여, OFDM 시스템의 유사상관함수는 싱크(sinc)함수 형태의 모양을 보인다. 이는 OFDM 시스템이 복조 과정에서 PN코드의 FFT를 거치는 것의 영향으로, 동기가 아직 정확히 맞추어지지 않은 OFDM 프리앰블의 FFT는 시간영역에서 동기가 맞지 않은 PN 코드와 일치하지 않기 때문에, CDMA에서의 상관법과 그 결과가 다르다. 그림 8, 9에서 보이는 최대 피크값의 차이는 각 시스템에서 사용하는 PN코드의 길이가 다르기 때문이다. 앞서 설명한 바와 같이 CDMA 시스템의 한 PN코드는 32768chips의 길이를 가지고 있고, OFDM 시스템의 한 PN 코드는 1024chips 이지만 이중에서 0이 아닌 값을 갖는 값은 284chips에 불과하다.

그림 8과 9로부터 CDMA의 경우 PN의 상관값이 ±1 칩의 폭을 가지고 있는데 반해 OFDMA의 경우 대략 ±0.5 칩의 폭을 가지고 있음을 알 수 있다. 즉 CDMA에 비해 OFDMA의 상관함수가 더 좁은 폭을 가지고 있음을 알 수 있고 이는 다중경로가 존재하는 경우 이를 분리할 수 있는 가능성이 더 높다는 것을 의미한다.

앞 절에서 살펴본 바와 같이 기지국과 단말기사이의 전송 경로상에 오차가 전혀 없다면 그림 8, 9와 같은 상관함수 그래프의 최대피크를 검출함으로써 신호의 도달 시각을 알아낼 수 있다. 하지만, 실제 환경에서는 전달경로상에 존재하는 많은 방해물들에 의해서 신호는 왜곡, 회절, 반사등을 거치게 된다. 그렇기 때문에 기지국에서 보내진 한 신호가 단말기에서는 여러 경로의 신호로 수신되게 되는데 이 영향으로 그림 8, 9의 자기 상관함수의 형태가 변하여 대칭성이 깨지게 된다. 자기상관 함수에서 최대피크점을 기준으로 같은 시간만큼 떨어진 두 점을 각각 EP(Early-Point)와 LP(Late-Point)로 정의하면, 대칭성이 유지될 때는 두 지점의 값이 같을 것이고 다중경로에 의해 대칭성이 깨어질수록 EP와 LP 두 값은 차이를 보일 것이다. 다음절에서 설명할 이중 경로 모델을 이용하여 다중경로에 의한 EP와 LP의 차이를 만들고 이 두 값의 차이로부터 상관오차를 정의함으로써 다중경로에 의한 두 시스템의 성능 차이를 측정해보았다.

1. 이중 경로 모델(two ray model)[1]

다중경로를 가장 간단하게 표현하는 방법은 그림 10처럼 이중 경로 신호(two ray)로 표현하는 것이다. 한 신호는 기지국과 단말기 사이의 직선경로를 따라 도착한 가시경로(line of sight)신호를 의미하고 다른 신호는 주변물체에 반사되어 τ만큼의 지연(delay)을 가지는 신호의 경로를 나타낸다. 이 이중 경로 모델을 표현하는 전달함수는 (2)와 같이 쓸 수 있다[7].

$$h(t) = \delta(t) + \alpha \exp(j\theta\pi/180)\delta(t - \tau) \quad (2)$$

여기서 α와 θ는 첫번째 경로에 대한 두번째 경로의 상대적 크기와 위상을 의미하는 것이고 τ는 첫번째 경로에 대한 두번째 경로의 상대적 지연 값을 의미한다.

그림 8, 9에서 볼 수 있었던듯이 다중경로의 영향이 없을 때 자기상관함수는 최대 피크값을 기준으로 좌우 대칭이지만 이중 경로 모델과 같은 다중경로의 영향을 받으면 수신된 신호의 상관함수는 비대칭적으로 일그러지게 된다.

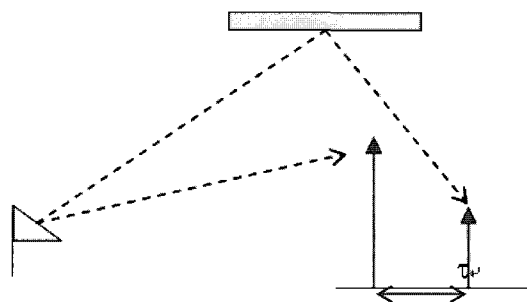


그림 10. 이중 경로 모델.
Fig. 10. Two ray model.

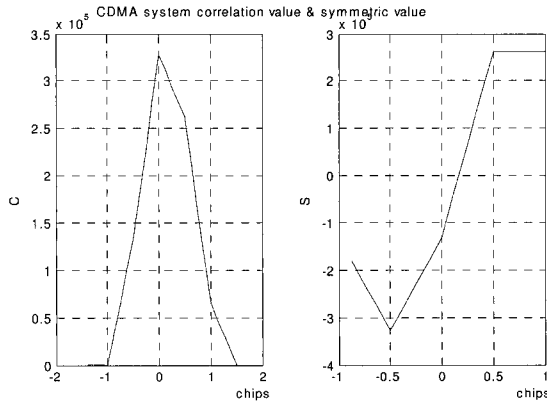


그림 11. CDMA 시스템에서 $\alpha=0.5, \theta=0, \tau=0.5\text{chip}$ 일 때 상관 함수와 EP-LP 함수.

Fig. 11. Correlation function and EP-LP function in CDMA system when $\alpha = 0.5, \theta = 0, \tau = 0.5\text{chip}$.

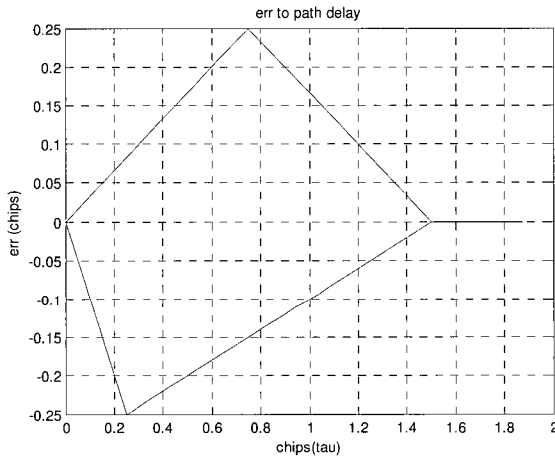


그림 12. CDMA 시스템의 두번째 경로의 지연 값에 따른 다중경로 상관오차.

Fig. 12. Multipath correlation-error by the second path-delay in CDMA system.

2. CDMA에서의 다중경로 오차 특성

먼저 CDMA의 PN시퀀스를 이용하여 다중경로 오차에 의한 측위 특성을 알아보았다. 그림 11은 수식 (2)에서 $\alpha=0.5, \theta=0, \tau=0.5\text{chip}$ 일 때 CDMA 시스템의 비대칭성을 보이는 상관 함수의 그래프이다.

그림 11의 왼쪽은 대칭성이 깨진 상관함수를 나타내고 오른쪽은 대칭성의 정도를 나타내기 위한 Early-late method에 의한 EP와 LP지점의 값의 차이로 (3)에 의해서 얻어졌다.

$$s(t') = c(t' - 0.5) - c(t' + 0.5) \tag{3}$$

여기서 $c(t')$ 는 그림 11의 왼쪽의 상관함수 그래프에서 t' 에서의 값이다. 따라서 $s(t')$ 는 최대 피크를 기준으로 0.5 칩만큼씩 차이가 나는 두 지점(EP와 LP)에서의 상관 값의 차이를 나타낸다. 그림 11의 오른쪽 그림은 t' 값을 -1에서부터 +1까지 변화시키면서 얻은 그림이다. 예를 들어 만약 $t' = -0.5$ 이면 왼쪽 그래프에서 $c(t' - 0.5) = c(-1) = 0, c(t' + 0.5)$

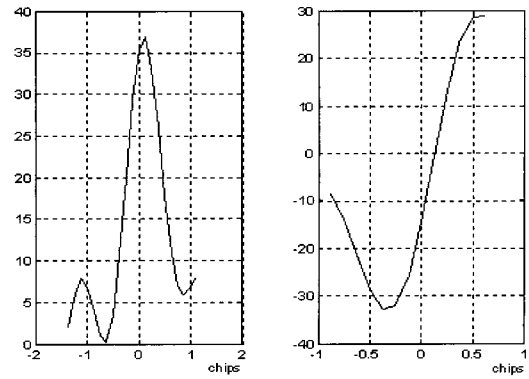


그림 13. OFDM 시스템에서 $\alpha=0.5, \theta=0, \tau=0.5\text{chip}$ 일 때 유사상관 함수와 EP-LP 함수.

Fig. 13. Quasi-correlation function and EP-LP function in OFDM system when $\alpha = 0.5, \theta = 0, \tau = 0.5\text{chip}$.

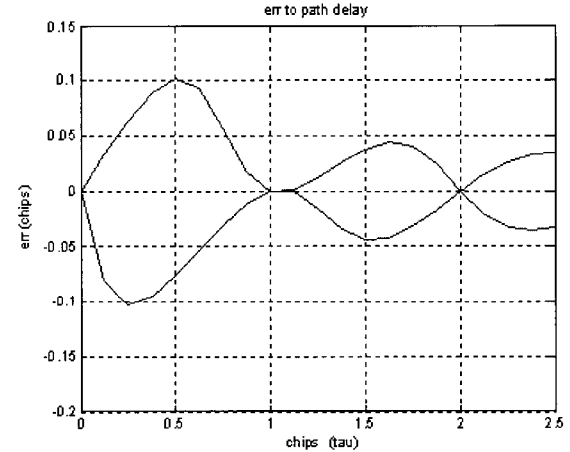


그림 14. OFDM 시스템의 두번째 경로의 딜레이 값에 따른 다중경로 상관오차.

Fig. 14. Multipath correlation-error by the second path-delay in OFDM system.

$= c(0) = 3.25 \times 10^5$ 이므로 $s(t') = -3.25 \times 10^5$ 이 된다. 이중 경로 모델에 의해 상관함수의 대칭성이 깨어지지 않았다면 $t' = 0$ 을 기준으로 EP와 LP 즉, $c(-0.5)$ 와 $c(0.5)$ 값이 같기 때문에 $s(0) = 0$ 을 만족해야한다. 따라서 오른쪽 그래프에서 $s(t') = 0$ 을 만족하는 t' 값을 다중경로에 의한 상관오차로 정의한다. 그림 11에서 $s(t') = 0$ 을 만족하는 상관오차, t' 의 값은 0.175chip으로 거리로 환산하면 한 chip의 길이는 244m 이므로 이는 약 43m에 해당한다. 즉, 0.5chip만큼의 지연을 가지고 첫번째 도착한 신호의 크기의 반에 해당하는 크기를 가진 두번째 패스의 존재로 인해 43m의 거리오차가 생기게 되는 것이다.

그림 12는 두 경로의 상대적 지연 τ 값을 변화시킬 때 상관오차값을 chip단위의 값으로 표시한 그래프 이다. 위쪽 그래프는 $\alpha=0.5, \theta=0$ 일 때의 그래프 이고 아래쪽 그래프는 $\alpha=0.5, \theta=180^\circ$ 일 때의 그래프이다. $\tau=0.75\text{ chip}$ 일 때와 $\tau=0.25\text{ chip}$ 일 때 각각 $\pm 0.25\text{chip}$ 의 상관오차를 나타내고 이는 61m의

거리오차에 해당한다. 또한 τ 가 1.5chip 이상의 값을 가질 때는 상관오차가 발생하지 않음을 관찰할 수 있다.

3. OFDM에서의 다중경로 오차 특성

OFDM 시스템에서도 같은 방법으로 이중 경로 모델을 이용한 상관오차를 살펴봄으로써 다중경로오차 특성을 살펴보았다. 그림 13은 (2)에서 $\alpha=0.5, \theta=0, \tau=0.5\text{chip}$ 으로 놓았을 상관함수 그래프와 (3)에 의한 $s(t')$ 의 값을 나타내는 그래프이다. 그림 9와 비교하여볼 때 CDMA의 경우와 마찬가지로 이중 경로 모델과 같은 다중경로에 의해 대칭성이 깨져있음을 확인할 수 있다.

그림 14는 CDMA와 마찬가지로 OFDM시스템에서 상대적 지연값 τ 를 변화시킬 때의 상관오차를 $\alpha=0.5, \theta=0$ 일 때와 $\alpha=0.5, \theta=180^\circ$ 두 가지 경우에 대하여 나타낸 것이다. $\tau=0.5$ chip 일 때와 $\tau=0.25$ chip 일 때 ± 0.1 chip의 최대 상관오차를 보였다. IEEE 802.16e OFDM에서는 한 chip의 길이가 30m인 것을 고려하면 이는 3m의 거리 오차에 해당한다. 또한 상대적 지연 경로가 커짐에 따라 상관오차를 보이는 물결(ripple)은 그 크기가 점차 줄어드는 것을 볼 수 있다.

4. 다중경로 오차 특성 비교분석

그림 12와 그림 14를 비교해보면 같은 이중 경로 모델에 대하여 CDMA는 최대 0.25chip의 다중경로 오차가 발생하고 OFDM에서는 0.1chip의 오차가 발생한다. 이를 수식적으로 살펴보면 다음과 같다. (4)는 전송 신호 $r(t)$ 가 이중 경로 모델에 의해 $R(t)$ 의 형태로 수신되는 것을 나타낸다. 앞 절의 모의테스트는 $\alpha=0.5, \theta=0, 180$ 일 경우에 대해 수행되었으므로 (4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} R(t) &= r(t) * h(t) \\ &= r(t) + \alpha \exp(j\theta\pi/180)r(t-\tau) \\ &= r(t) \pm 0.5r(t-\tau) \end{aligned} \tag{4}$$

CDMA의 경우 $r(t)$ 는 전송 PN시퀀스에 해당하므로 수신 신호 $R(t)$ 를 송신신호 $r(t)$ 와 상관을 취하여 (5)와 같은 상

관함수를 얻는다. 여기서 \otimes 는 상관을 나타내는 기호이다.

$$\begin{aligned} c(t) &= R(t) \otimes r(t) \\ &= [r(t) \pm 0.5r(t-\tau)] \otimes r(t) \\ &= [r(t) \otimes r(t)] \pm [0.5r(t-\tau) \otimes r(t)] \\ &= \Delta(t) \pm 0.5\Delta(t-\tau) \end{aligned} \tag{5}$$

$\Delta(t)$ 는 그림 8에서 보여진 삼각형 모양의 함수를 나타낸다. 따라서 이중 경로 모델에 의한 상관함수는 가시경로에 의한 삼각형 모양의 상관함수와 τ 만큼의 상대지연을 갖는 상관함수가 더해지게 되므로 대칭성이 깨어진 그림 11이 얻어지게 된다.

이에 반하여 OFDM의 경우 $r(t)$ 는 전송되는 OFDM의 심볼에 해당하므로 그림 6에서처럼 샘플링 후에 이를 FFT한 다음 PN시퀀스, $d(n)$ 와 내적을 취하는 유사상관을 하게 되므로 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} c(n) &= \text{FFT}[R(n)] \oplus d(n) \\ &= \text{FFT}[r(n) \pm 0.5r(n-\tau)] \oplus d(n) \\ &= \text{FFT}[r(n)] \oplus d(n) \pm \text{FFT}[0.5r(n-\tau)] \oplus d(n) \\ &= \text{FFT}[r(n)] \oplus d(n) \pm 0.5 \exp(j2\pi f\tau) \text{FFT}[r(n)] \oplus d(n) \\ &= \Theta(n) \pm 0.5 \exp(j2\pi f\tau) \Theta(n) \\ &= [1 \pm 0.5 \exp(j2\pi f\tau)] \Theta(n) \end{aligned} \tag{6}$$

편의상 \oplus 은 유사상관을 나타내는 기호라고 한다. $\Theta(n)$ 은 그림 9에서 보여진 sinc 함수 모양의 그래프를 나타낸다. 잘 알려진 바와 같이 시간지연은 FFT에서 주파수의 위상변화로 나타나기 때문에 OFDM에서는 τ 만큼의 지연을 갖는 다중경로에 의한 영향이 그림 9에서 보여진 그래프의 크기와 위상의 변화로 나타나게 된다. 즉, OFDM은 신호의 전송과정에서 IFFT/FFT를 사용하기 때문에 다중경로오차가 CDMA와 같이 τ 만큼의 시간지연으로 나타나지 않고 주파수위상변화로 나타나기 때문에 다중경로에 의한 영향이 보다 작게 나타난다.

무선 측위에서 다중경로오차에 대해 OFDM이 갖는 우수한 특성은 IS-95와 IEEE 802.16e의 신호 규격의 차이를 고려할 때 더욱 두드러지게 나타난다. 앞에서 설명한 바와 같이 OFDM의 한 chip의 길이는 $0.1\mu\text{s}$ 이고 CDMA의 한 chip의 길이는 $0.8\mu\text{s}$ 이므로 OFDM의 한 chip의 크기는 CDMA의 한 칩 길이의 1/8에 해당한다. 각 시스템의 chip의 길이를 고려하여 그림 12와 14를 거리로 표시한 다중경로 지연에 대해 함께 표시하면 그림 15와 같다. 점선은 그림 12에서의 CDMA에 해당하고, 실선은 그림 14의 OFDM에 해당한다. 칩 단위였던 상관오차는 m단위의 거리오차로 변환되었다.

이중 경로모델에서 CDMA 시스템은 366m 이내의 상대적 지연에 대해 최대 61m의 오차를 발생시키는데 반해 OFDM system은 30m 이내의 상대지연에 대해 최대 3m 정도의 오차를 보일 뿐이며 30m이상의 상대적 지연에 대해서도 물결모양의 진동형태를 보이고 있긴 하지만 점차 줄어드는 경향을 보인다. 또한 100m이상의 다중경로 상대지연에 대해서는 다중경로에 의한 거리측정오차가 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

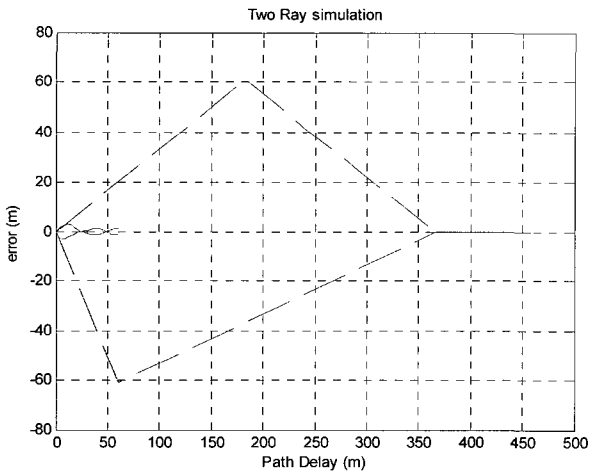


그림 15. CDMA와 OFDM system의 이중경로모델에서의 다중 경로 오차.

Fig. 15. Mutipath error of CDMA와 OFDM system by two ray model.

IV. 결론

다중경로에 대한 OFDM 시스템과 CDMA 시스템의 특성을 비교하여 봄으로써 무선측위에서의 OFDM의 성능을 검증하였다.

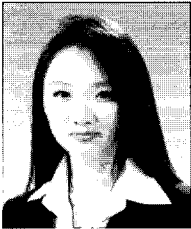
이중 경로 모델을 이용한 상대적 지연에 따른 상관오차 실험에서 CDMA 시스템은 최대 61m의 오차를 보인 반면 OFDM 시스템은 최대 3m에 불과한 오차를 보였다. 이는 IS-95에 기반한 기존 CDMA와 IEEE 802.16e 의 OFDM의 신호 규격의 차이와 변조방법의 차이 때문으로 생각할 수 있다. 다시 말해 OFDM의 칩 길이가 CDMA에 비하여 1/8로 매우 작고 OFDM 변조과정에서 프리앰블의 IFFT/FFT를 사용하므로 상관함수의 폭이 좁으며 다중경로 오차가 시간지연이 아닌 주파수의 위상변화로 나타나기 때문에 다중경로 오차가 도달시각 측정에 미치는 영향이 작아진다.

따라서 OFDM기반 시스템은 다중경로오차에 대하여 통신 시스템 측면에서만이 아니라 측위 측면에서도 우수한 성능을 가지고 있다고 말할 수 있다.

현재 국내에서 상용화하고 있는 IEEE 802.16e에 기반한 무선측위 시스템은 IS-95 CDMA망에 기반한 기존 무선측위 시스템에 비해 보다 우수한 측위 성능을 가질 것으로 예측됨에 따라 이에 기반한 새로운 무선측위 시스템의 개발이 기대된다.

참고문헌

- [1] B. W. Parkinson and J. J. Spilker, Jr., et al., *Global Positioning System: Theory and Applications*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, vol. 1, Washington, D.C., 1996.
- [2] I. F. Progi and W. R. Michalson, "An investigation of a DSSS-OFDM-CDMA-FDMA Indoor Geolocation System," *Proceedings of IEEE-PLANS*, Monterey, CA, U.S.A., April 26-29, pp. 662-670, 2004.
- [3] W. Kim, *Improved Mobile Station Location by Estimating Path-Delay Error*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, February 2003.
- [4] B. T. Fang, "Simple solutions for hyperbolic and related position fixes," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 26, pp. 748-753, September 1990.
- [5] C.-Y. Wei, Y. T. Su, and J. H. Yu, "Detection of synchronous OFDM-CDMA signals in multipath fading channels," *Proceedings of the 2002 National Symposium on Telecommunications*, 2002.
- [6] R. D. J. van Nee, *Multipath and Multi-Transmitter Interference in Spread - Spectrum Communication and Navigation Systems*, Delft University Press, p. 75, 1995.
- [7] P. Voltz and D. Hernandez, "Maximum likelihood time of arrival estimation for real time physical location tracking of 802.11a/g mobile stations in indoor environment," *Proceedings of IEEE-PLANS*, Monterey, CA, U.S.A., April 26-29, 2004.



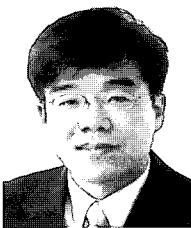
방혜정

2002년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2002년~현재 서울대학교 대학원 전기 컴퓨터공학부 박사과정 재학중. 관심분야는 무선측위, OFDM.



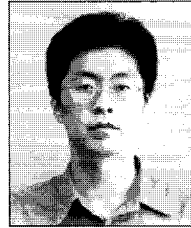
이장규

1971년 서울대학교 전기공학과(공학사). 1974년 University of Pittsburgh 전기공학과(공학석사). 1977년 University of Pittsburgh 전기공학과(공학박사). 1982년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 항법, 유도, 제어.



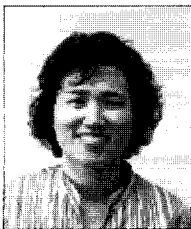
지규인

서울대학교 제어계측공학과(공학사). 서울대학교 제어계측공학과(공학석사). 미, Case Western Reserve대 시스템공학과(공학박사). 현재 건국대학교 전자 및 통신공학 전공 주임 교수. 관심분야는 GPS, 제어시스템.



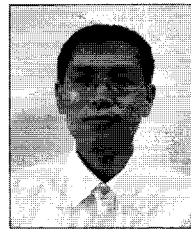
김진원

1998년 8월 서울대학교 공학박사. 1998년~2000년 고등기술연구원 선임연구원. 2001년~현재 삼성전자 통신연구소 책임연구원. 관심분야는 Telematics, LBS, Wireless Positioning.



정희

서울대학교 천문학과(이학사). Texas A&M 항공학과(공학석사). Cornell University 항공학과(공학박사). 현재 삼성전자 정보통신연구소 책임 연구원. 관심분야는 GNSS, 텔레메틱스, 무선측위.



현문필

건국대학교 전기 공학과(학사). 건국대학교 전자 공학과 제어시스템 연구실 GPS 전공(석사). 현재 삼성전자 정보통신 연구소 선임연구원. 관심분야는 GNSS, 무선측위.