

CDM 기반 MIMO 채널 사운더 구조에 적용 가능한 코드들의 성능 비교

*김민제, 김성현, 이혁재, **이현범, 유흥렬

*한국정보통신대학교, **KT

*{mj_kim, boofunky, hjlee}@icu.ac.kr, **{hlee,hryou}@kt.co.kr

Performance comparison of the codes applicable to CDM-based MIMO channel sounder

*Minjae Kim, Sunghyun Kim, Hyuckjae Lee, **Hyunbeom Lee, Heung-Ryeol You

*Information and Communications University, **KT

요 약

차세대 MIMO 무선통신 시스템의 검증 및 MIMO 채널 모델링에 필요한 채널의 실측을 위해서는 정교한 MIMO 채널 사운더가 필요하다. 기존의 MIMO 채널 사운더는 PN sequence 를 채널 측정 신호로 사용한 시분할 멀티플렉싱(이하, TDM) 기반 구조이다. 이 구조는 느린 채널 변화 환경에서 채널을 비교적 정확히 측정할 수 있으나 빠른 채널 변화 환경에서는 채널 측정의 정확도가 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 코드 분할 멀티플렉싱(이하, CDM) 구조가 제안되었고 그 송신 신호로서 LS, MLS, Kasami 코드가 제안이 되었다.[1] 또한 [2]에서는 CDM 구조에서 사용하는 코드로 Chaotic 시퀀스를 제안하였다. 본 논문에서는 [1]과 [2]에서 제안된 LS, MLS, Kasami, Chaotic 의 네 코드들을 사용한 채널 측정 성능을 모의실험을 통하여 RMS Delay Spread Error 를 구함으로써 CDM 기반 채널 사운더 구조에 적합한 코드들의 성능 비교를 제시하고자 한다.

I. 서론

정지 상태에서 1Gbps, 이동 중 100Mbps 의 높은 데이터 전송률을 제공할 4 세대 이동통신 서비스에서 MIMO 기술의 도입은 주파수 효율성과 링크 신뢰도를 높이는 데 큰 역할을 할 것으로 예상된다. 그리고 채널 사운더는 무선 통신 시스템의 설계, 시뮬레이션 및 성능 검증을 위하여 필수적으로 요구되는데, 특히 MIMO 무선 채널은 채널의 시간적 변화뿐만 아니라 공간적 방향성에도 의존하기 때문에 MIMO 시스템을 설계하고 검증하기 위한 MIMO 채널의 정밀한 필드 측정이 요구된다.

기존의 SIMO 채널 사운더와 MIMO 채널 사운더의 가장 큰 차이점은 MIMO 채널 사운더는 다수의 송신 안테나에서 보낸 신호들을 각 수신 안테나에서 구분하여 받기 위한 멀티플렉싱 기법이 필요하다는 것이다. 상용 제품에서 널리 사용하는 MIMO 채널 사운더는 TDM(Time Division Multiplexing)을 기반으로 한 송신 구조로 PN 시퀀스를 사용하여 채널을 측정한다[3,4]. 이 TDM 기반 채널 사운더는 각 송신안테나의 신호가 총 송신안테나 개수만큼 주기적으로 전송되는 특성으로 인해 느린 채널 변화 환경(slow fading channel)에서는 채널을 비교적 정확히 측정할 수 있으나, 채널이 시간에 대해 빠르게 변화하는 환경(fast fading channel)에서는 그 측정 정확도가 떨어지는 한계를 가진다. 특히 차세대 이동통신 시스템에서 고속의 이동성 지원이 요구됨에 따라 더욱 빠른 채널 변화 환경에서 MIMO 채널을 정확히 측정할 수 있는 채널 사운더가 요구되기에 기존의 TDM 기반 채널 사운더의 한계를 극복할 새로운 구조에 대한 필요성이 제기되고 있다.

그 결과로 최근 서로 상관도가 매우 낮은 코드셋을 송신 신호로 사용하여 각 송신 안테나로부터 측정 신호들을 동시에 보내는 CDM(Code Division Multiplexing)

기반 MIMO 채널 사운더 구조가 제안되었다.[1,2] 그리고 서로 상관도가 낮은 코드셋으로서 [1]에서는 LS, MLS, Kasami 코드가 제안되었고 [2]에서는 Chaotic 시퀀스가 측정 신호로서 제안되었다.

본 논문에서는 CDM 기반 MIMO 채널 사운더에서 사용될 코드를 선정하는 데 있어 [1]과 [2]에서 제안된 네 코드들의 특성과 채널 측정 성능을 비교하여 각 채널 측정 환경에 적합한 코드를 알아보하고자 한다. 코드 성능 비교의 척도로서 RMS Delay Spread 를 선정하고, 3GPP Spatial Channel Model Extended(SCME)를 사용한 모의실험을 통하여 추정된 RMS Delay Spread 와 실제 SCME 의 RMS Delay Spread 의 오차를 구하여 코드의 채널 측정 성능을 비교하였다. 그리고 Delay Spread 및 코드셋 개수의 증가에 따라 채널 측정 성능 변화가 어떻게 달라지는지도 파악하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 TDM 및 CDM 기반 MIMO 채널 사운더의 구조에 대해 소개한다. III 장에서는 네 코드들의 생성 및 상관도 특징을 제시하고, IV 장에서는 모의실험을 통하여 코드들의 성능을 비교하고자 한다. 마지막으로 V 장에서는 본 논문의 결론을 제시하였다.

II. TDM, CDM 기반 MIMO 채널 사운더

TDM 기반 MIMO 채널 사운더는 송신안테나의 신호들을 시간 영역에서 분할하여 각 신호 구간 동안 하나의 송신안테나 신호를 보내는 구조로 그림 1 에서 나타난 바와 같이 빠른 시변 채널에서 각 송신안테나의 신호가 겪는 채널이 같지 않다. 특정 순간의 MIMO 공간채널(MIMO temporal-spatial channel)을 정확하게 측정하기 위해서는 모든 송신안테나 신호들이 겪는 채널이 같아야 하므로 빠른 시변 채널에서의 TDM 기반 채널 사운더는 정확한 공간채널 측정에 한계를 가지게 된다.

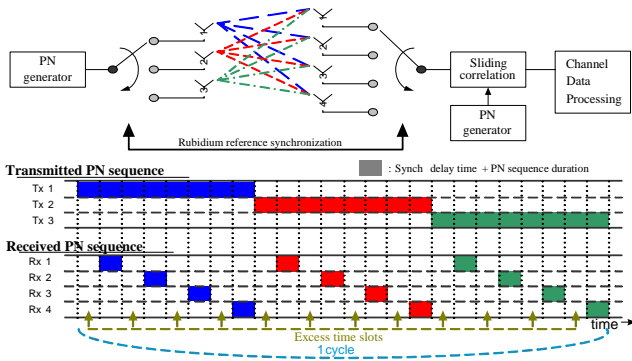


그림 1. TDM 기반 채널 사운더

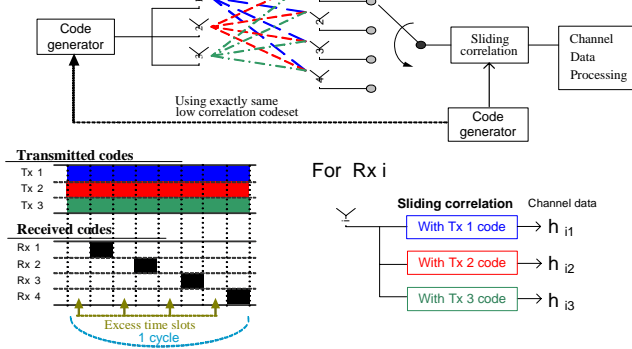


그림 2. CDM 기반 채널 사운더

CDM 기반 MIMO 채널 사운더는 각 송신 안테나에서 송신하는 신호들간의 직교성이 우수한 코드셋을 사용하여 동시에 모든 송신 안테나에서 채널 측정 신호를 보내는 구조이다. MIMO 채널 사운더에 이러한 구조를 적용함으로써 순간적인 채널을 측정하는 시간이 크게 줄어들게 되어 TDM 구조가 가지는 빠른 변화 채널 환경의 측정 한계를 극복할 수 있다. 그러나 CDM 구조에서 사용할 코드 선정에 있어서 자기 상관도 및 코드셋 간의 상호 상관도가 모두 완벽한 코드는 존재하지 않기 때문에 자기 상관도 및 코드셋들 간의 상관도가 최대한 낮은 코드를 찾는 것이 중요하다. 다음의 III 장에서는 이러한 코드로서 제안된 LS, MLS, Kasami, Chaotic 코드들의 특성을 알아보려고 한다.

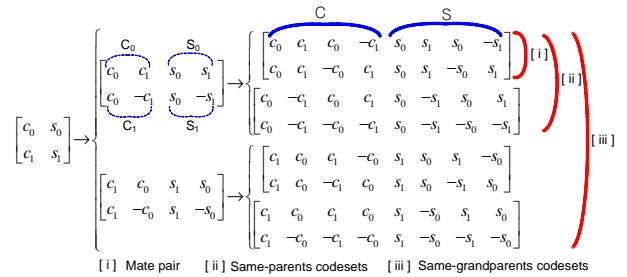
III. 코드의 설명

a) Loosely Synchronous (LS) 코드

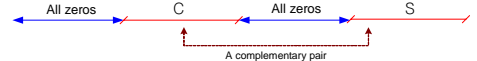
LS 코드는 Golay 코드에 기반하여 만들어진 코드로 생성 과정은 다음과 같다. 그림 3에서 나타난 바와 같이 $\{-1, 0, 1\}$ 의 ternary로 구성되어 C와 S의 -1과 1로 이루어진 Golay 상보쌍 사이에 일정 수의 0을 삽입함으로써 LS 코드를 생성할 수 있다. 이렇게 해서 생성된 LS 코드는 상관도 값이 IFW (Interference Free Window) 영역 안에서 완벽하게 0이 되는 특성을 나타내는데, 이러한 상관도 특성을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$R_{jk}(\tau) = \sum_{i=1}^{L-1} c_{j,i} c_{k,(i+\tau) \bmod L} = \begin{cases} L, & \text{for } \tau=0, j=k \\ 0, & \text{for } \tau=0, j \neq k \\ 0, & \text{for } 0 < |\tau| < \tau_{IFW} \end{cases} \quad (1)$$

코드 생성 시 삽입하는 0의 길이는 이 IFW 영역의 길이가 최대가 되도록 결정하게 되는데 일반적으로 C, S의 길이가 각각 L일 때 L-1개의 0을 삽입하는 것으



(a) Complement pair generation



(b) LS code generation



(c) Modified LS (MLS) code generation

그림 3. LS, MLS 코드 생성

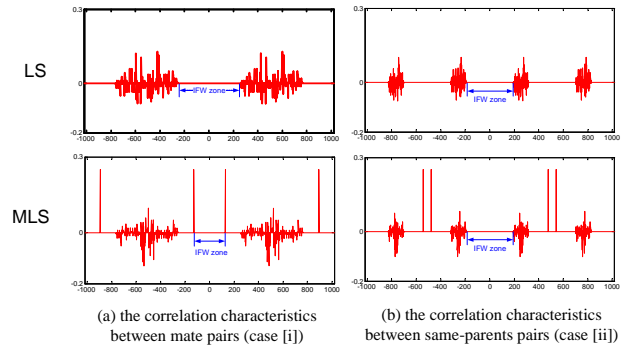


그림 4. LS, MLS 코드의 상관도 특성

로 알려져 있다.[5] 채널 측정을 위해 LS 코드를 사용할 때 IFW 영역 안에서 코드셋들이 완벽하게 직교하고 이 IFW 영역 밖에서는 코드셋 간의 간섭이 크기 때문에 IFW 영역의 구간이 채널의 최대 지연 시간이 보다 클 때 채널의 모든 멀티패스들을 정확히 측정할 수 있다. 그러므로 LS 코드를 이용한 MIMO 채널 측정에서는 이 IFW 영역의 길이가 측정의 정확도 여부를 결정하게 된다.

그런데 이 IFW 영역은 사용되는 코드셋의 수가 증가할수록 그 길이가 감소하는 특징을 나타낸다. 각 코드의 자기 상관도를 취할 경우 IFW 영역은 전체 코드 길이의 25%이다. 그런데 상호 상관도는 사용되는 코드셋의 개수에 따라 IFW 영역의 길이가 달라지는데, 그림 3(a)와 그림 4를 통해 알 수 있듯이 Mate pair 간 상호 상관도의 IFW 영역은 전체 코드 길이의 약 25%이고, 코드셋의 총 개수가 4개인 Same-parents 코드셋 간 상관도의 IFW 영역은 전체 길이의 약 12.5%로 절반 정도로 줄어들게 된다. 즉, IFW 영역은 코드셋의 최대 개수에 반비례하게 나타나게 된다. 그 결과 LS 코드는 채널의 지연 시간이 길거나 많은 수의 송신 안테나를 사용해야 하는 채널 측정에서 사용의 한계를 나타낸다.

b) Modified Loosely Synchronous (MLS) 코드

특정 코드셋 개수에서 일시적으로 IFW 영역의 전체 코드 길이 대비 비율을 높이기 위해 LS 코드를 변형한 코드이다[1]. 그림 3(a)에서 나타난 것처럼 LS 코드의 mate pair를 연결하여 하나의 MLS 코드를 만들 수 있는데, LS 코드에서 8개의 same-grandparents 코드셋들을 이용하여 만든 4개의 MLS는 IFW 영역의 길이가 모두

같고 그 길이는 전체 코드 길이의 약 19 % 이다. 즉 필요한 코드셋이 2 개인 경우는 LS 코드의 경우 IFW 가 전체 코드 길이의 25 %로 19 %인 MLS 에 비해 좋지만, 코드셋이 4 개일 경우에는 LS 코드의 IFW 는 12.5 %, MLS 코드는 19%로 IFW 영역의 비율이 증가하여 MLS 를 사용할 경우 채널의 지연 시간에 영향을 덜 받게 된다. 이는 또한 그림 4 의 LS, MLS 코드의 코드셋 개수가 2 개인 mate pair 경우(a)와 4 개인 same-parents pair(b)들 간의 상관도를 취한 결과 그래프의 IFW 영역의 길이를 비교함으로써 확인할 수 있다.

결국 채널 측정 시 송신 안테나의 개수가 4 개인 경우에는 MLS 코드를 사용하는 것이 채널 측정에 더 유리하다고 볼 수 있다.

c) Kasami 코드

Kasami 코드는 m-sequence를 이용한 코드로서 그림 5의 과정을 통해 생성할 수 있다. 생성된 Kasami 코드는 코드셋 간의 상관도 값이 오직 세 종류의 값들 중에 하나로 나타난다는 것이 특징인데 그 값은 코드의 길이가 $2^n - 1$ 일 때 $\{-1, -s(n), s(n)-2\}$ 이다. 그리고 이 때 n 은 짝수, $s(n) = 2^{n/2} + 1$ 이다. Kasami 코드는 코드셋의 개수 증가에 따라 특정 경계(IFW 영역 경계)를 기준으로 간섭의 크기가 급격하게 증가하는 LS 코드와는 달리 적은 값의 간섭들이 코드셋의 개수 증가에 비례하여 꾸준히 누적되는 것이 특징이다. 이러한 특징은 채널 측정 시 최대 지연 시간에 대한 고려를 특별히 할 필요가 없고 코드셋의 개수가 많이 요구되는 상황의 지원을 가능하게 한다. 또한 코드 길이가 증가할수록 상관도 특성이 좋아지므로 코드 길이의 적절한 선택으로 상관도 값들을 조절할 수 있다. 그러나 선택할 수 있는 코드 길이가 $\{3, 15, 63, 255, 1023, 4095, 16379, \dots\}$ 으로 4 배씩 급격하게 증가하여 코드 길이 선택의 제한이 큰 단점을 가지고 있다.

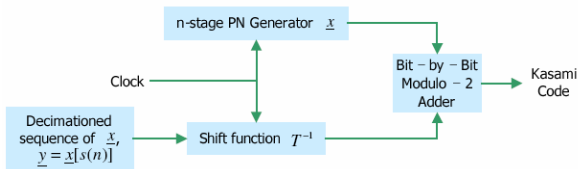


그림 5. Kasami 코드 생성

d) Chaotic 코드

Chaotic 코드는 $x_{n+1} = f(x_n)$ 형태의 특정 맵 함수와 초기값 x_0 를 사용하여 연속적으로 생성되며 그 분포는 백색 잡음과 같은 랜덤한 특징을 나타내는 코드이다. 주로 사용되는 맵으로는 Logistic 맵, Cubic 맵, Skew tent 맵, Henon 맵 등이 있는데 그 중 $x_{k+1} = \mu x_k(1-x_k)$ 형태인 Logistic 맵이 주로 사용된다. $3.5699456... \leq \mu \leq 4$ 의 μ 와 $-1 < x_0 < 1$ 의 x_0 를 선택함으로써, 비주기적이고 예측 불가능한 chaotic 코드가 생성된다. 코드 길이는 맵의 출력에서 얻은 값을 다시 입력으로 넣음으로써 하나씩 늘릴 수 있는 구조를 통하여 원하는 길이만큼 얻을 수 있다는 장점이 있다.

그림 6 은 Chaotic 코드의 자기 상관도 및 상호 상관도 특성을 나타내는 그래프이다. Chaotic 코드 역시 Kasami 코드의 경우처럼 코드의 길이가 증가할수록 상관도 특성이 좋아진다는 것을 확인할 수 있다.

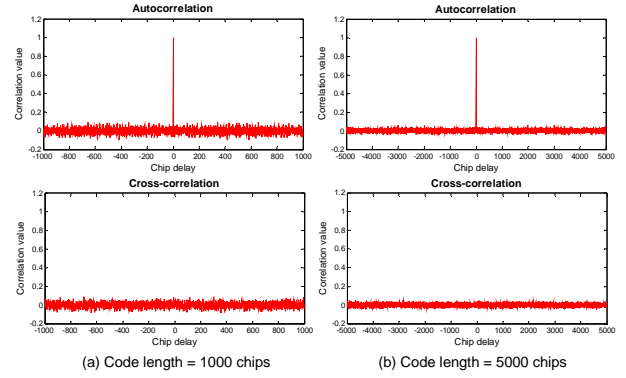


그림 6. Chaotic 코드의 상관도 특성

IV. 모의실험

a) 모의실험 환경 설계

CDM 기반 MIMO 채널 사운드에서 사용될 코드로서 앞의 III 장에서 제안된 네 코드들의 성능을 비교하기 위해 RMS Delay Spread Errors 를 성능 비교 척도로 선정하고 그림 7 에 나타난 과정으로 모의실험을 하고자 한다.

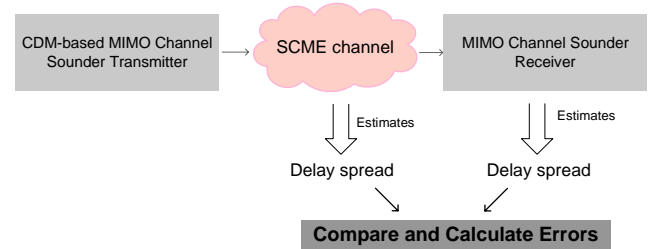


그림 7. 모의실험 개요

3GPP Spatial Channel Model Extended(SCME)를 실제 채널 환경으로 가정하고, 제안된 코드를 사용해 SCME 를 통과한 신호를 채널 추정을 통해 구한 Delay Spread 와 SCME 자체에서 제공하는 Delay Spread 의 차를 계산하여 코드 간의 RMS Delay Spread Errors 성능을 비교하는 과정이다.

모의실험 세부 환경으로는 다음과 같다. 코드의 길이를 LS 코드는 4094 chips, MLS 는 4092 chips, Kasami 는 4095 chips 그리고 Chaotic 은 4095 chips 으로 설정하고, chip 간격을 10ns(100 MHz 대역), E_c/N_0 를 40 dB, 시속 60 km/h 의 이동 환경을 가정하였다. 또한 SCME 는 6 개의 path 를 각 송수신 안테나 링크마다 생성하여 Wideband channel 로 제공한다.

이렇게 고정된 모의환경에서 채널의 Delay 와 송신 안테나 개수를 변화시켜가며 코드 간의 RMS Delay Spread Error 를 구하여 그 측정 결과를 비교하였다.

b) 모의실험 결과

그림 8 과 그림 9 의 모의실험 결과 그래프를 통해 채널의 Delay 와 송신 안테나 개수에 따른 각 코드 간의 성능을 비교할 수 있다. 그림 8 은 송신 안테나의 개수가 2 개, 그림 9 는 4 개일 때의 실험 결과이고, 각 그림에서 위쪽의 그래프는 SCME 에서 제공하는 채널의 Delay Spread 가 큰 Urban macro 환경, 아래쪽의 그래프는 채널 Delay Spread 가 작은 Suburban macro 환경의 그래프이다.

전체적으로 네 환경에서의 결과 모두 LS, MLS 코드

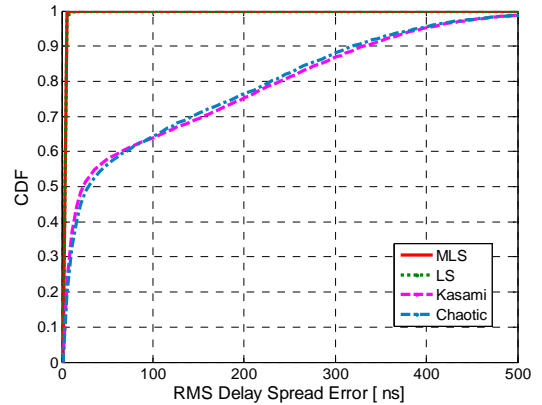
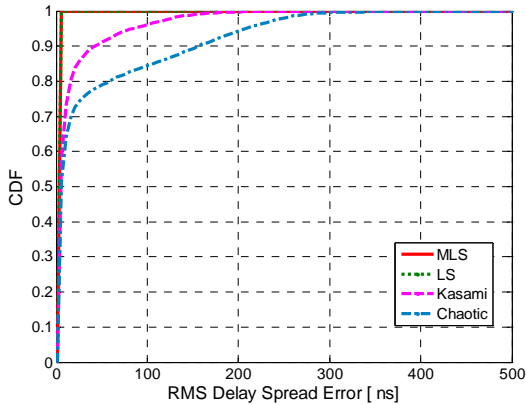
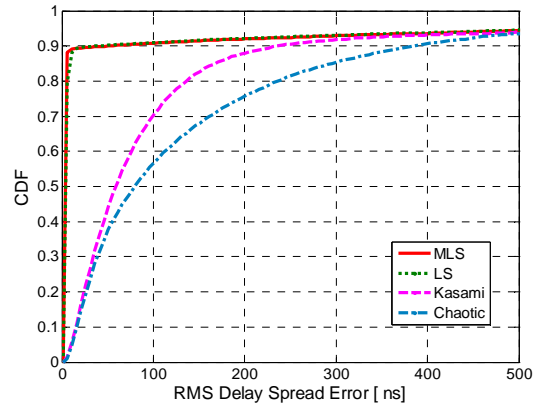
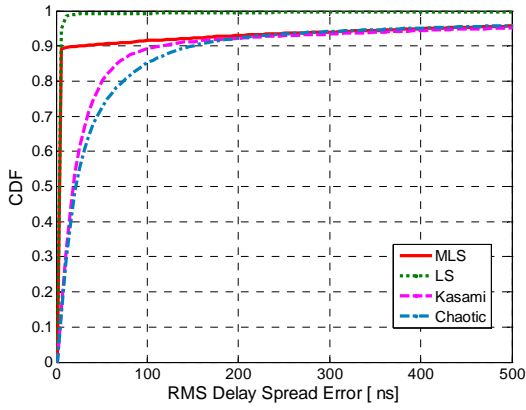


그림 8. 송신 안테나 2 개에서의 Urban(위) 및 Suburban(아래) macro 환경 측정 결과

그림 9. 송신 안테나 4 개에서의 Urban(위) 및 Suburban(아래) macro 환경 측정 결과

가 Kasami, Chaotic 코드보다 전체적으로 RMS Delay Spread Error 가 더 작음을 확인할 수 있다. 이는 LS, MLS 코드를 사용할 때 IFW 영역 안에서 코드셋들 간의 간섭이 완벽하게 제거되기 때문이다. 그러나 동시에 전송되는 코드셋의 개수가 증가할수록, 즉 송신 안테나의 개수가 증가할수록 IFW 영역의 길이는 그에 비례하여 줄어들게 되어 IFW 영역을 넘어서 지연되어 들어오는 멀티패스들 간의 간섭이 RMS Delay Spread Error 를 급격히 증가시킨다. 이는 그림 8 과 그림 9 의 안테나 개수 증가에 따른 LS, MLS 그래프의 변화를 통해서 혹은 각 그림의 위와 아래의 Delay Spread 의 변화에 따른 그래프의 비교를 통해서 확인할 수 있다. 본 논문에서는 모의실험의 복잡도로 인하여 송신 안테나의 개수가 2 개와 4 개일 때만 실험을 수행하였으나, 그 이상의 송신 안테나를 사용하는 환경에서는 IFW 영역을 넘어서 들어오는 멀티패스들로 인하여 LS, MLS 코드의 성능이 급격히 나빠질 것으로 예상되기 때문에 LS, MLS 코드가 Kasami, Chaotic 코드보다 항상 성능이 좋다고 결론을 내리기는 힘들다.

Kasami 코드와 Chaotic 코드를 비교하면 전체적으로 Kasami 코드가 Chaotic 코드보다 RMS Delay Spread 측정 오차가 더 작음을 확인할 수 있다. 이 두 코드는 LS 코드와는 달리 그 특성이 비슷하여 Kasami 코드가 선호될 수 있으나 코드의 길이 선택이 Kasami 코드는 매우 제한된 반면 Chaotic 코드는 원하는 길이로 생성할 수 있기 때문에 CDM 구조에서의 코드 선택 및 설계 시 이 두 점을 고려하여 선택할 수 있을 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 CDM 기반 MIMO 채널 사운드어에서

사용될 수 있는 코드들을 알아보고 그 성능을 비교하였다. [1]에서 제안된 LS, MLS, Kasami 코드와 [2]에서 제안된 Chaotic 코드를 3GPP SCME 를 적용한 모의실험을 통하여 RMS Delay Spread 의 측정 오차를 비교하였다. 모의실험 결과를 통해 전체적으로 LS, MLS 코드의 성능이 Kasami, Chaotic 코드의 성능에 비해 우수함을 확인하였다. 그러나 채널의 최대 지연 시간이 IFW 구간을 넘어갈 경우에는 LS, MLS 코드의 성능이 나빠지기 때문에 Kasami, Chaotic 코드가 대안으로 사용될 수 있다. Kasami 와 Chaotic 두 코드는 전체적으로 Kasami 코드의 성능이 조금 앞서지만 코드 길이의 선택에서 Kasami 코드가 매우 제한적인 반면 Chaotic 코드는 자유롭기 때문에 이러한 tradeoff 를 고려하여 코드 설계를 할 수 있을 것이다.

VI. References

- [1] Ji Hwan Choi, ... "Code-Division Multiplexing based MIMO channel sounder with Loosely Synchronous Codes and Kasami Codes", *IEEE Vehicular Transportation Conference 2006-fall*, Montreal, Canada, September, 2006
- [2] Minjae Kim, ... "Code Division Multiplexing based MIMO Channel Sounder Architecture utilizing Chaotic Sequence", *Proc. IEICE ITC-CSCC2007*, Pusan, Korea, September, 2007
- [3] MEDAV RUSK MIMO Channel Sounder Manual
- [4] Elektrobit PROPsound MIMO Channel Sounder Manual
- [5] Pingzhi Fan, "Spreading sequence design and theoretical limits for quasisynchronous CDMA systems," *EURASIP J. Wireless Commun. And Networking*, vol. 1, pp.19-31, 2004.