

MC-CDMA 기반 통신 시스템을 위한 주파수 영역 스크램블링 부호 할당

중신회원 임 형 수*

Frequency Domain Scrambling Code Allocation for MC-CDMA Based Communication Systems

Houngsoo Lim* *Lifelong Member*

요 약

일반적으로 MC-CDMA 시스템에서 동일한 부반송파 집합이 할당된 서로 다른 단말기에게 스크램블링 부호를 할당할 때에는 해당 셀에 주어진 스크램블링 부호 집합 중에서 서로 다른 스크램블링 부호를 임의로 선택하여 할당한다. 주파수 영역 스크램블링 부호로서 직교 부호가 사용되는 경우, 타이밍 및 주파수 동기가 완벽하고 채널 특성이 편평하다면 스크램블링 부호간의 직교성으로 인하여 스크램블링 부호의 선택에 따라 수신 성능이 영향을 받지 않지만, 실제 동작 환경에서는 스크램블링 부호간 직교성이 깨져서 부호간 간섭이 발생하는 경우가 많이 발생한다. 본 논문에서는 타이밍 오차가 존재하는 경우에 대해 MC-CDMA에서의 주파수 영역 직교 스크램블링 부호의 최적 할당순서를 도출한다.

Key Words : MC-CDMA; scrambling codes; timing offset; Walsh-Hadamard codes; inter-code interference

ABSTRACT

In typical MC-CDMA systems, different frequency-domain scrambling codes are randomly chosen from a given code set and then assigned to different subscriber stations using the same subcarrier set. When orthogonal codes are employed for the frequency-domain scrambling, the choice of the scrambling code does not affect the detection performance if the timing and frequency synchronizations are perfect and the channel characteristic is flat. However, in practical cases, inter-code interference often appears due to the broken code orthogonality. In this paper, the optimal order of allocating the orthogonal frequency-domain scrambling codes to new subscriber stations is derived under non-negligible timing offsets in MC-CDMA system.

I. 서 론

MC-CDMA (Multi-Carrier Code Division Multiple Access) 방식^{[1][2]}은 송신 신호 형성 구조에 따라 OFDM-CDMA(Orthogonal Frequency Division Multiplexing CDMA), MC-DS-CDMA(Multi-Carrier Direct-Sequence CDMA, MD-CDMA라 약칭하기도 함)^{[3][4]}, MT-CDMA (Multi-Tone CDMA)로 구분

된다^[5]. 이 중 OFDM-CDMA 방식은 그림 1과 같이 송신 데이터 심벌 신호를 주파수 영역에서 확산 부호와 곱한 후 OFDM 변조시 인접 부반송파들을 통해 전송하는 방식으로, 상기 세 방식 중 가장 대표적인 방식이다. 따라서, 일반적으로 MC-CDMA 방식이라 하면 많은 경우 OFDM-CDMA 방식을 의미하며, 본 논문에서도 OFDM-CDMA를 MC-CDMA로 간략히 칭하기로 한다.

* 한국전자통신연구원 전파방송연구단 방송시스템연구그룹 지상파전송기술연구팀(lim@etri.re.kr)

논문번호 : KICS2006-09-376, 접수일자 : 2006년 9월 6일, 최종논문접수일자 : 2006년 12월 2일

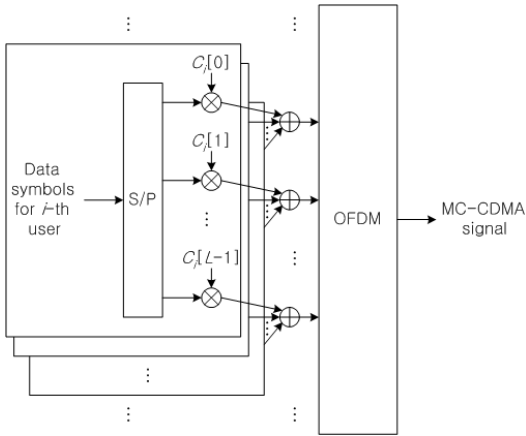


그림 1. MC-CDMA 송신부 구조

MC-CDMA 기반 통신 시스템에서는 동일한 부반송파 집합이 다수의 단말기에게 할당될 수 있으며, 이때 서로 다른 단말기들은 서로 다른 주파수 영역 스크램블링 부호로 구분된다. 주파수 영역 스크램블링 부호로는 직교 부호(orthogonal codes)와 준직교(quasi-orthogonal codes)^[6]가 사용될 수 있는데, 본 논문에서는 가장 널리 사용되는 직교 부호들 중 하나인 WH (Walsh-Hadamard) 부호를 고려하기로 한다. 일반적으로 새로운 단말기에게는 다른 단말기에게 이미 할당되지 않은 스크램블링 부호들 중 하나를 임의로 선택하여 할당하게 되는데, WH 부호와 같은 직교 부호를 주파수 영역 스크램블링 부호로 사용하는 경우, 주파수 비선형적 페이딩 채널이나 타이밍 및 주파수 동기 오차가 충분히 작을 때는 스크램블링 부호 할당 순서가 시스템 성능에 영향을 주지 않는다. 그러나, 실제 동작 환경에서는 송신기 HPA (High-Power Amplifier)에서의 비선형 특성이나 주파수 선택적 페이딩 채널, 또는 타이밍 또는 주파수 오차로 인한 주파수 차원 스크램블링 블록 내부 왜곡으로 인해 부호간 직교성이 쉽게 깨질 수 있다. 이 중 송신기에서의 HPA의 비선형 특성과 주파수 선택적 페이딩 채널의 영향은 기존의 연구 문헌에서 다루어졌으므로^{[7]-[9]}, 본 논문에서는 수신기에서의 동기 오차에 의한 영향을 고려하기로 한다.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반 시스템을 위한 수신기 설계에서는 부반송파간 주파수차가 작으므로 주파수 오차 보상부 설계에 많은 노력을 기울이는 것이 일반적인 반면, OFDM 신호 방식이 타이밍 오차에 대해

강인하기 때문에 타이밍 동기에 대한 요구 사항은 상대적으로 약하다. 본 논문에서는 타이밍 오차에 의한 스크램블링 부호간 간섭을 최소화하는 스크램블링 부호의 최적 할당 순서를 도출한다. 본 논문에서 제시하는 기본적인 접근 방식은 준직교 주파수 영역 스크램블링 부호를 사용하는 MC-CDMA 시스템의 경우에 대해서도 확장 적용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II 장에서는 타이밍 오차에 의한 부호간 간섭의 분석 결과가 기술되며, 제 III 장에서는 최적 부호 할당 순서를 도출한다. 마지막으로 제 IV 장에서 결론을 맺는다.

II. 타이밍 오차에 의한 부호간 간섭

본 논문에서는 주파수 영역 스크램블링 부호로서 이진(binary) WH 부호를 사용하는 OFDM 기반 MC-CDMA 시스템의 하향링크를 고려하기로 한다. 주파수 영역 스크램블링 부호는 인접한 부반송파에 변조되어 전송되는 경우를 가정한다.

스크램블링 부호 할당 순서를 설계하는 데는 두 가지 기준을 고려할 수 있다. 첫째는 이미 할당되어 사용되고 있는 부호로부터 새로이 할당되는 부호에 미치는 간섭이며, 둘째는 새로이 할당되는 부호가 이미 할당된 부호에 미치는 간섭이다. 본 논문에서는 전자를 기준 A, 후자를 기준 B라 칭하기로 한다.

1. 기준 A: 기할당 부호로부터 신규할당 부호로의 간섭

우선, 새로이 할당되는 부호가 이미 할당된 스크램블링 부호들로부터 받게 되는 간섭을 기준으로 한 부호할당 순서 설계를 고려한다.

주파수 영역 스크램블링 부호의 길이가 L 일 때, 새로 할당되는 부호 $c_i, i=0, 1, 2, \dots, L-1$ 에 미치는 총 간섭의 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|I_{A,i}| = \left| \sum_{c_j \in C_A} \sum_{k=0}^{L-1} c_i^*[k] c_j[k] e^{j2\pi \frac{k+k_0}{N} \tau_e} \right| \quad (1)$$

여기서 $c_i[k], k=0, 1, \dots, L-1$ 은 i 번째 WH 부호 c_i 의 k 번째 요소(element)며, C_A 는 동일한 OFDM 심벌 구간의 동일 부반송파 블록에 변조된 기할당 스크램블링 부호의 집합을 나타내고, $I_{A,i}$ 는 타이밍 오차 τ_e 에 대해 C_A 에 해당하는 기할당 스크램블링 부호들로부터 i 번째 부호 c_i 에 미치는 총 부호간 간섭을 가리킨다. 또한, N 은 OFDM 심벌의 FFT (Fast

Fourier Transform) 크기며, T_s 는 OFDM 심벌 길이를 나타낸다. 본 논문에서는 스크램블링 부호가 주파수 영역에서 인접 부반송파 블록에 변조된다고 가정하며, 해당 부반송파 블록에 속하는 가장 낮은 부반송파 번호를 k_0 로 나타내기로 한다. 즉, 스크램블링 부호의 요소들인 $c_i[0], c_i[1], \dots, c_i[L-1]$ 는 각각 $k_0, (k_0+1), \dots, (k_0+L-1)$ 번째 부반송파에 변조된다. 이때, 기할당 부호로부터의 부호간 간섭이 최소가 되는 스크램블링 부호 c_A^\dagger 는 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$c_A^\dagger = \arg \min_{c_m \in C_A} |I_{A,m}| \quad (2)$$

여기서 c_m 은 C_A 에 속하지 않는 부호를 나타내는 더미 변수(dummy variable)다.

2. 기준 B: 신규할당 부호로부터 기할당 부호로의 간섭

스크램블링 부호의 최적 할당을 위한 두 번째 기준으로 신규 부호로부터 기할당 부호로의 부호간 간섭을 고려할 때는 다시 다음의 두 가지 기준을 생각할 수 있다.

- 1) 기준 B₁: 신규 부호로부터 기할당 부호로의 최대 부호간 간섭
- 2) 기준 B₂: 신규 부호로부터 기할당 부호로의 평균 부호간 간섭

이 중 기준 B₁은 기준 단말기가 겪을 수 있는 최악의 성능 열화를 최소화하여 서로 다른 단말기들이 겪을 성능의 불균형을 최소화하기 위해 적용될 수 있는 반면, 기준 B₂는 평균 성능만을 고려한 것이다.

신규 할당 부호 c_i 로부터 C_A 에 속한 기할당 부호 c_j 가 겪는 부호간 간섭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{B,i,j} = \sum_{k=0}^{L-1} c_i^*[k]c_j[k]e^{j2\pi \frac{k+k_0}{N} \frac{\tau_e}{T_s}} \quad (3)$$

여기서 $I_{B,i,j}$ 는 타이밍 오차 τ_e 에 대해 c_j 가 c_i 로부터 겪는 부호간 간섭을 나타낸다. 기준 B₁과 B₂에 의한 최적 할당 부호 설계는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_{B_1}^\dagger = \arg \min_{c_i \in C_A} \left\{ \max_{c_j \in C_A} |I_{B,i,j}| \right\} \quad (4)$$

$$c_{B_2}^\dagger = \arg \min_{c_i \in C_A} \sum_{c_j \in C_A} |I_{B,i,j}|^2 \quad (5)$$

3. SIR 기반 부호 선택

수식 (2), (4), (5)에서는 부호간 간섭만 고려되었지만, 타이밍 오차가 있을 경우에는 부호간 간섭뿐만 아니라 자기상관(auto-correlation) 열화도 발생하므로 SIR (Signal-to-Interference Ratio)을 고려하는 것이 더 적절하다고 할 수 있다. 앞 장에서 기술된 세 가지 기준에 대응되는 SIR 기반 최적 부호 할당 방식은 각각 차례대로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_{A'}^\dagger = \arg \max_{c_i \in C_A} \frac{|I_{B,i,i}|}{|I_{A,i}|} \quad (6)$$

$$c_{B_1'}^\dagger = \arg \max_{c_i \in C_A} \left\{ \min_{c_j \in C_A} \frac{|I_{B,i,i}|}{|I_{B,i,j}|} \right\} \quad (7)$$

$$c_{B_2'}^\dagger = \arg \max_{c_i \in C_A} \sum_{c_j \in C_A} \frac{|I_{B,i,i}|^2}{|I_{B,i,j}|^2} \quad (8)$$

여기서 수식 (6), (7), (8)은 각각 앞 장의 수식 (2), (4), (5)에 대응되는데, $|I_{B,i,i}|$ 이 다음과 같이 i 와 무관한 값을 가지므로 결과적으로는 수식 (2), (4), (5)와 동일한 결과를 가지게 된다.

$$\begin{aligned} |I_{B,i,i}| &= K \left| \sum_{k=0}^{L-1} e^{j2\pi \frac{k+k_0}{N} \frac{\tau_e}{T_s}} \right| \quad (9) \\ &= K e^{\left| j2\pi \frac{k_0}{N} \frac{\tau_e}{T_s} - \frac{j2\pi \frac{L}{N} \frac{\tau_e}{T_s}}{1 - e^{j2\pi \frac{1}{N} \frac{\tau_e}{T_s}}} \right|} \\ &= K \left| \sin \left(\pi \frac{L}{N} \frac{\tau_e}{T_s} \right) / \sin \left(\pi \frac{1}{N} \frac{\tau_e}{T_s} \right) \right| \end{aligned}$$

여기서 주파수 영역 스크램블링 부호의 모든 요소들이 상수 포락선을 가지는 경우 $K = |c_i[k]|^2$ 는 i 와 무관한 상수 값이며, 이는 WH 부호의 경우도 포함된다.

이상에서 제안된 스크램블링 부호 선택 기준에 따라 (2), (4)-(8)의 방식 중 하나를 선택하여 다음과 같은 절차에 따라 최적 부호 할당을 수행한다. 우선, 처음으로 본 시스템에 접속하는 단말에 대해 총 L 개의 스크램블링 부호 중 임의의 하나를 할당한다. 그 후, 새로운 단말이 추가될 때마다 기할당되지 않은 스크램블링 부호들에 대해 앞서 선택된 (2), (4)-(8) 중 한 가지 방식에 따라 새로이 할당될

스크램블링 부호를 선택하는 과정을 최대 ($L-1$)회 반복한다. 단, 이때 각 단말의 타이밍 오차에 따라 최적 부호 선택이 달라질 수 있는데, 다음 장에서는 타이밍 오차에 따른 최적 부호 할당 순서를 도출한 결과를 분석하여 타이밍 오차에 대한 영향과 허용 가능한 타이밍 오차의 범위를 살펴보기로 한다.

III. 수치 분석 결과

시스템 전체의 수치적인 용량 측면에서는 기준 B의 두 가지 분류 중 기준 B₂가 유리하겠지만, 서비스 사용자 측면에서는 동일 조건 하에서의 수신 성능에 불균형을 최소화하는 기준 B₁이 더욱 바람직할 것이다. 따라서, 본 장에서는 기준 A와 기준 B₁만을 고려하여 최적 부호 할당 순서를 도출하기로 한다.

본 논문에서 고려하는 MC-CDMA 시스템에서는 L 개의 인접한 부반송파에 길이가 L 인 주파수 영역 확산 부호가 데이터 심벌과 함께 변조되는데, 이때 L 은 채널의 coherence bandwidth보다 충분히 작은 값으로 설정된다. 이 경우, 각 주파수 영역 확산 블록 내의 채널 이득은 거의 일정하므로 AWGN 채널로 근사화될 수 있다. 따라서, 페이딩 환경에 대한 성능 시뮬레이션은 시간 차원에서의 평균 성능을 관찰하는 것 외의 다른 의미가 없으며, 시간 차원에서의 평균 성능을 관찰하는 것마저도 확산 부호의 최적 할당 순서를 도출하는 데 있어서 아무런 영향을 주지 않는다. 이러한 이유로, 본 장에서 제시되는 시뮬레이션에서는 AWGN 환경을 가정하기로 한다.

그림 2는 $L=4$ 인 경우 1번 WH 부호와 그 외의 j 번째($j=2, 3, 4$) WH 부호 사이의 부호간 간섭의 크기 $|I_{B,1,j}|$ 를 1번 WH 부호의 자기상관의 크기와 함께 타이밍 오차에 대해 보인 것이며, 그림 3은 $L=4$ 에 대해 2번, 3번, 또는 4번 WH 부호가 새로운 단말기에게 할당되는 경우 1번 WH 부호를 할당 받은 기존 단말기가 겪는 SIR을 보인 것이다. 이 두 결과로부터 부호간 간섭이나 SIR을 최소화하는 최적의 부호 할당 순서가 존재함을 알 수 있다.

그림 4는 $L=4, N=2048$ 에 대한 최적 부호 할당 순서를 계산을 통해 도출한 결과를 보인 것이다. 여기서 N_{Codes} 는 신규 할당 부호를 포함하여 활성(active) 단말기들에게 할당된 WH 부호의 개수를 나타내며, OFDM 심벌의 CP (Cyclic Prefix) 길이는 228 샘플이고^[10] 1번 WH 부호가 첫 번째 단말

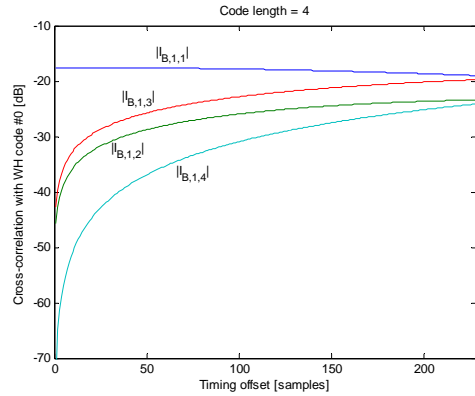


그림 2. 타이밍 오차에 대한 WH 부호의 자기 상관 및 교차 상관의 절대값 ($L=4$)

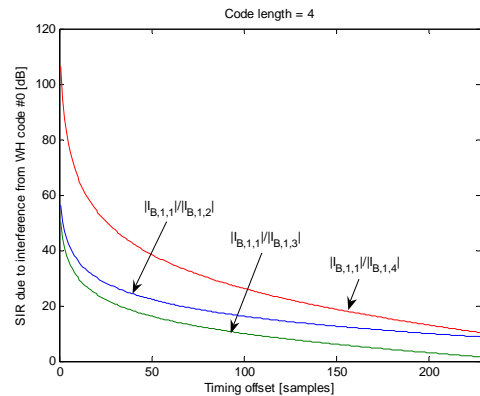


그림 3. 타이밍 오차에 대한 부호간 간섭에 의한 SIR ($L=4$)

기에게 할당된다고 가정하였다. 그림의 결과들에서 X축은 타이밍 오차를 샘플 단위로 표현한 것이며 Y축은 할당된 WH 부호 번호를 가리킨다. 그림에서 채색된 부분은 각 타이밍 오차와 할당 부호 개수에 대해 최적의 할당 부호 번호를 표시한다.

이 결과로부터 $L=4, N=2048$ 의 경우 1번 WH 부호가 첫 번째 단말기에 할당된 후 활성 단말기가 증가함에 따라 차례로 4번, 2번, 3번 WH 부호를 할당하는 것이 최적임을 알 수 있다. 이 부호 할당 순서는 CP 길이보다 짧은 모든 타이밍 오차에 대해 항상 최적인 것으로 관찰되었는데, 이는 $L=4$ 인 경우 주파수 영역 스크램블링 블록이 짧아서 타이밍 오차로 인한 성능 열화가 매우 작기 때문이다. 한편, 동일 조건에 대해 수식 (2), (4), (6), (7)에 의거하여 최적 할당 순서를 도출한 결과 역시 모두

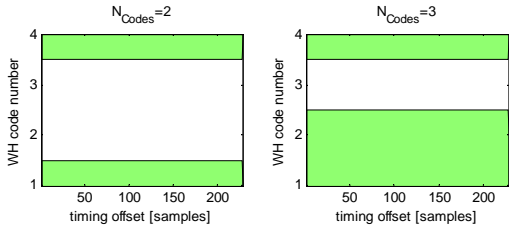


그림 4. $L=4$ 에 대한 WH 부호의 최적 할당 순서 도출 결과 동일한 결과를 얻었다.

그림 5와 그림 6은 $L=8$ 인 경우에 대해 각각 수식 (2) 또는 (6), 그리고 (4) 또는 (7)을 적용하여 최적 할당 순서를 도출한 결과를 보인 것이다. 이 결과로부터 $L=8$ 인 경우에 대해서는 타이밍 오차에 따라 최적 부호 할당 순서가 달라질 수 있음을 알 수 있다. 즉, 첫 번째 활성 단말기에 1번 WH 부호가 할당된 경우, 48 샘플 미만의 타이밍 오차에 대해서는 새로운 단말기가 추가로 활성화됨에 따라 1-8-4-6-7-2-3-5의 순서로 WH 부호를 할당하는 것이 최적이며, 48 샘플 이상 87 샘플 이하의 타이밍 오차에 대한 최적 부호 할당 순서는 1-8-4-6-2-7-3-5, 88 샘플 이상 128 샘플 이하의 타이밍 오차에 대해서는 1-8-4-2-6-3-7-5의 부호 할당 순서가 최적으로 관찰되었다. 타이밍 오차가 128 샘플보다 더 큰 경우에는 최적 부호 할당 순서를 도출하는 데 적용된 설계 기준에 따라 약간의 차이를 보이지만, 적절히 설계된 수신기라면 128 샘플 이상의 매우 큰 타이밍 오차가 발생할 확률이 극히 낮을 것이므로 최적 부호 할당 순서 설계 기준에 의한 영향은 무시될 수 있다고 할 수 있다.

최적 부호 할당 순서가 타이밍 오차에 따라 달라지는 이유는 타이밍 오차에 의해 나타나는 주파수 영역에서의 선형 위상 오차가 스크램블링 부호간 교차상관(cross-correlation)에 미치는 영향이 부호 패턴에 따라 달라지기 때문이다. 본 논문에서 가정한 이진 WH 부호의 경우에는 임의의 서로 다른 두 부호간의 요소별 켈레 곱셈(element-by-element conjugate product) 결과 부호의 요소 중 +1의 개수와 -1의 개수가 항상 동일하므로 타이밍 오차가 0인 경우의 교차상관은 항상 0이다. 그러나, 타이밍 오차가 0이 아닌 경우에는 두 부호간의 요소별 켈레 곱셈 결과에서 +1과 -1 사이의 거리가 멀수록 교차상관이 증가하여 부호간 간섭이 발생하게 된다.

실제 적용에 있어서는 새로운 부호를 할당할 때마다 기지국이 각 단말의 타이밍 오차를 측정하여

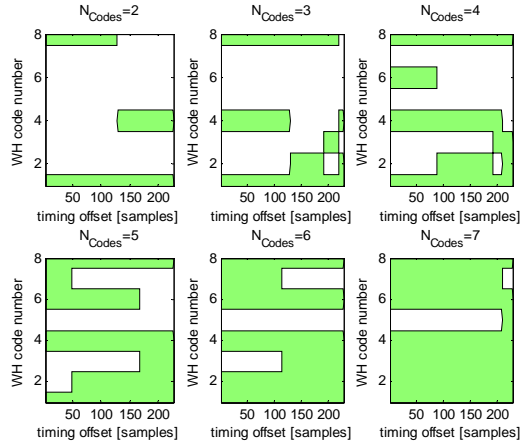


그림 5. $L=8$ 인 WH 부호에 대해 수식 (2) 또는 (6)에 의거 한 최적 할당 순서의 도출 결과

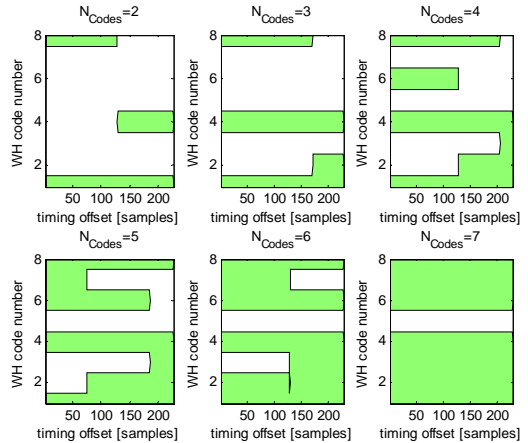


그림 6. $L=8$ 인 WH 부호에 대해 수식 (4) 또는 (7)에 의거 한 최적 할당 순서의 도출 결과

최적 부호를 선택하는 것은 어려우며, 더욱이 각 단말의 타이밍 오차가 시간에 따라 수시로 변동되므로 기지국이 이를 추적하여 반영하는 것은 불가능하다. 따라서, 기지국에서는 타이밍 오차가 0에 가까운 경우에 대한 최적 부호 할당 순서를 각 단말의 타이밍 오차와 무관하게 적용하고 각 단말은 타이밍 오차를 해당 부호 할당 순서가 최적 순서로 유지되는 범위 이내가 되도록 타이밍 동기를 수행하도록 하는 것이 적절하다. 본 장에서 도출된 결과들에 의하면 $L=4$ 인 경우에는 각 단말의 타이밍 오차 허용 범위는 CP 길이를 초과하며, $L=8$ 인 경우에는 각 단말의 타이밍 오차 허용 범위는 48 샘플로서 단말의 타이밍 동기 성능 목표로서 충분히 구

현 가능한 범위에 속한다.

한편, 첫 번째 단말기에 1번 WH 부호가 아닌 다른 WH 부호가 할당되는 경우의 최적 부호 할당 순서는 1번 WH 부호가 첫 번째 단말기에 할당되는 경우에 대한 최적 할당 순서로부터 쉽게 도출될 수 있다. 즉, 1번 WH 부호가 첫 번째 단말기에 할당되는 경우의 최적 할당 순서에 따른 총 L 개의 WH 부호들 각각에 대해 n 번 WH 부호를 차례로 요소별 곱셈(element-by-element product)함으로써 첫 번째 단말기에 n 번 WH 부호가 할당되는 경우에 대한 최적 부호 할당 순서를 얻을 수 있다. 예를 들어, $L=8$ 이고 1번 WH 부호를 첫 번째 단말기에 할당하였을 때 최적 부호 할당 순서는 타이밍 오차가 작은 경우 1-8-4-6-7-2-3-5인데, 2번 WH 부호를 첫 번째 단말기에 할당하였을 경우에는 2번 WH 부호를 1, 8, 4, 6, 7, 2, 3, 5번 WH 부호와 순서대로 요소별 곱셈하여 얻어지는 2-7-3-5-8-1-4-6이 최적 부호 할당 순서가 된다. 특히, 이처럼 초기 할당 부호가 달라지더라도 최적 부호 할당 순서 중 i 번째 할당 부호와 j 번째 할당 부호의 부호간 간섭 특성은 초기 할당 부호와 무관하게 동일하므로 추가적인 스크램블링 부호 할당이 발생함에 따른 전체 시스템 성능은 초기 할당 부호에 상관없이 동일하게 관찰된다.

표 1부터 표 3까지는 타이밍 오차가 작은 경우에 대해 각각 $L=4, 8, 16$ 에 대한 최적 WH 부호 할당 순서를 첫 번째 단말기에 할당되는 WH 부호에 따라 도출한 결과를 정리한 것이다.

IV. 결론

본 논문에서는 타이밍 오차를 고려한 MC-CDMA 시스템을 위한 WH 부호 할당의 최적 순서를 도출하였다. 부호 할당 순서 설계를 위한 기준치로서 본 논문에서는 이미 할당된 WH 부호들과 새로이 할당되는 부호간의 부호간 간섭과 SIR을 고려하였다. 이 두 가지 기준치에 대한 설계 결과로 도출된 할당 순서는 타이밍 오차가 매우 큰 경우를 제외하고는 동일하게 관찰되었다.

본 논문에서는 설명의 용이성을 위하여 주파수 영역 스크램블링 부호로서 WH 부호를 사용하는 MC-CDMA 시스템을 가정하였으나, 그 근본적인 설계 방법은 준직교 주파수 영역 스크램블링 부호를 사용하는 MC-CDMA로 확장 적용될 수 있다.

표 1. 타이밍 오차가 작을 때 $L=4$ 에 대한 주파수 영역 WH 부호의 최적 할당 순서

최초 할당 부호	최적 부호 할당 순서
1	1-4-2-3
2	2-3-1-4
3	3-2-4-1
4	4-1-3-2

표 2. 타이밍 오차가 작을 때 $L=8$ 에 대한 주파수 영역 WH 부호의 최적 할당 순서

최초 할당 부호	최적 부호 할당 순서
1	1-8-4-6-7-2-3-5
2	2-7-3-5-8-1-4-6
3	3-6-2-8-5-4-1-7
4	4-5-1-7-6-3-2-8
5	5-4-8-2-3-6-7-1
6	6-3-7-1-4-5-8-2
7	7-2-6-4-1-8-5-3
8	8-1-5-3-2-7-6-4

표 3. 타이밍 오차가 작을 때 $L=16$ 에 대한 주파수 영역 WH 부호의 최적 할당 순서

최초 할당 부호	최적 부호 할당 순서
1	1-16-8-12-14-15-4-6-7-10-11-13-2-3-5-9
2	2-15-7-11-13-16-3-5-8-9-12-14-1-4-6-10
3	3-14-6-10-16-13-2-8-5-12-9-15-4-1-7-11
4	4-13-5-9-15-14-1-7-6-11-10-16-3-2-8-12
5	5-12-4-16-10-11-8-2-3-14-15-9-6-7-1-13
6	6-11-3-15-9-12-7-1-4-13-16-10-5-8-2-14
7	7-10-2-14-12-9-6-4-1-16-13-11-8-5-3-15
8	8-9-1-13-11-10-5-3-2-15-14-12-7-6-4-16
9	9-8-16-4-6-7-12-14-15-2-3-5-10-11-13-1
10	10-7-15-3-5-8-11-13-16-1-4-6-9-12-14-2
11	11-6-14-2-8-5-10-16-13-4-1-7-12-9-15-3
12	12-5-13-1-7-6-9-15-14-3-2-8-11-10-16-4
13	13-4-12-8-2-3-16-10-11-6-7-1-14-15-9-5
14	14-3-11-7-1-4-15-9-12-5-8-2-13-16-10-6
15	15-2-10-6-4-1-14-12-9-8-5-3-16-13-11-7
16	16-1-9-5-3-2-13-11-10-7-6-4-15-14-12-8

참고 문헌

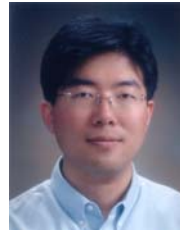
- [1] 김태영, 고균병, 이영조, 강창언, 홍대식, “부반송파간 상관 관계가 존재하는 페이딩 채널에서 주파수 천이를 고려한 MC-CDMA 시스템의 성능 분석”, 한국통신학회논문지, 26(3), pp. 481-487, 2001.
- [2] 임광재, 김수영, 이호진, “다중반송파 CDMA를

사용한 적응형 위성 하향링크 전송”, *한국통신학회논문지*, 29(10A), pp.1167-1176, 2004.

- [3] 김인겸, 안성준, “레이레이 페이딩 채널상에서 Jamming 환경을 고려한 DS/MC(Multicarrier)-CDMA 시스템의 성능분석에 관한 연구”, *한국통신학회논문지*, 25(10), pp. 1486-1491, 2000.
- [4] 김원섭, 박진수, “다중경로 페이딩 채널에서 Hybrid SC/MRC 기법이 적용된 MC/DS CDMA 시스템의 성능 분석”, *한국통신학회논문지*, 27(7A), pp. 748-755, 2004.
- [5] 김제우, “광대역 무선 전송기술”, *Telecommunications Review*, 10(1), pp. 144-157, 2000.
- [6] D. Mottier, D. Castelain, “A spreading sequence allocation procedure for MC-CDMA transmission systems,” *Proc. VTC*, pp. 1270-1275, Boston, MA, Sep. 2000.
- [7] Q. Shi, M. Latva-aho, “Simple spreading code allocation scheme for downlink MC-CDMA,” *Electronics Letters*, 38(15), pp. 807-809, July 2002.
- [8] N. Hathi, M. Rodrigues, I. Darwazeh, J. O'Reilly, “Analysis of the interference of Walsh-Hadamard code allocation strategies on the performance of multi-carrier CDMA systems in the presence of HPA non-linearities,” *Proc. PIMRC*, pp. 1305-1309, Lisbon, Portugal, Sep. 2002.
- [9] 김동주, 김주용, 정성순, 홍대식, 강창언, “Linearly constrained constant modulus algorithm을 이용한 MC-CDMA 시스템에서의 MAI 완화 기법”, *한국통신학회논문지*, 27(1A), pp. 73-79, 2002.
- [10] 3GPP TR25.892 V6.0.0, *Feasibility Study for OFDM for UTRAN Enhancement*, June 2004.

임 형 수 (Hyungssoo Lim)

중신회원



1992년 2월 포항공과대학교 전자
전기공학과 학사

1994년 2월 포항공과대학교 전자
전기공학과 석사

1999년 2월 포항공과대학교 전자
전기공학과 박사

1999년 3월~2000년 9월 한국전자

통신연구원 선임연구원

2000년 9월~2001년 12월 DXO텔레콤 선임연구원/과장

2002년 1월~현재 한국전자통신연구원 선임연구원

<관심분야> 디지털방송시스템, 무선통신, 신호처리