

무선 통신로에서 Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA 시스템의 성능 개선에 관한 연구

A Study on the Performance Improvement of Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA System in Wireless Channel

이 문 승*

Moon Seung Lee*

요 약

본 논문에서는 주파수 선택성 레일리 페이딩 통신로에서 주파수 호핑 패턴의 히트를 고려한 Orthogonal MC/FH-CDMA 통신 방식의 BER 성능을 평가하였고, TCM 기법을 적용하여 성능 개선 정도를 도출하였다.

성능 해석 결과, 캐리어 슬롯 수가 증가하면 심볼 시간에 대해 지연 시간차가 적어지기 때문에 오율 특성이 개선됨을 알 수 있었다. 그리고 호핑 패턴의 히트 때문에 큰 에러가 발생하고, 이 때문에 사용 캐리어 수를 많게 할 수 없어 직교화의 효과가 낮아짐을 알 수 있었다. 한편, TCM 기법을 적용하면 BER 성능이 약 5×10^{-2} 정도 개선됨을 알 수 있었고, 음성 QoS 조건 ($BER = 10^{-3}$)을 만족시키기 위해서는 더욱 더 큰 S/N 비가 요구됨을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, we evaluated the performance of Orthogonal MC/FH-CDMA system considering the hit of frequency hopping patterns, and obtained the degree of the performance improvement by adopting TCM scheme under frequency selective Rayleigh fading channel.

From the performance analysis, it is known that the error performance is improved, since delay time relative to symbol time is reduced as the number of carrier is increased. On the other hand, it is found that BER performance is improved about 5×10^{-2} degree by adopting TCM scheme, and higher S/N is required if the QoS of voice ($BER = 10^{-3}$) must be achieved.

I. 서 론

오늘날 전자 기술 및 전기 통신의 급격한 발전에 따라 컴퓨터와 통신 회선이 결합된 데이터 통신 및 전화 서비스를 위한 통신망이 사회·경제활동에 많은 영향을 주면서 통신 방식 및 서비스의 다양화가

급속히 이루어지고 있다. 이를 뒷받침하기 위해 현대의 이동 통신은 많은 가입자를 수용할 수 있어야 하므로 이동 무선 채널에서 전송 신호의 전력 효율 및 대역 효율을 극대화하지 않으면 안된다. 다시 말해서 작은 신호 전력으로 복잡한 이동 무선 채널 환경을 극복하여 양질의 통신과 다양한 서비스를 제공

본 연구는 2000년도 인하공업전문대학 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

* 인하공업전문대학 정보통신과(Information & Communication Department, Inha Technical College)

· 논문번호 : 2001-1-2

· 접수일자 : 2001년 3월 3일

할 수 있어야 한다. 특히 FH/CDMA (Frequency Hopping/Code Division Multiple Access) 통신 방식은 변조된 신호의 반송파를 의사 잡음 계열의 호핑 패턴에 따라 주파수 합성기로 제어하여 발생하고, 일정한 주기로 절환함에 의해 스펙트럼을 광대역으로 확산하는 방식이다. 이로 인해 확산 이득이 얻어지고 간섭에 강한 특성을 갖게 되며, 이 특성을 활용하면 정보의 비화성과 다중 접속의 유연성을 얻을 수 있게 되어 양호한 효율의 통신 시스템을 구축할 수 있게 된다[1],[2]. 그러나 이 방식은 전송 신호의 전력 및 대역 효율을 극대화하기 어려울 뿐만 아니라 주파수 선택성 페이딩과 같은 다중 경로 전파에 의해 영향을 받기 때문에 오율 성능에 치명적인 영향을 준다[2]. 이러한 주파수 선택성 페이딩의 대책으로 멀티캐리어 (MC:Multi-Carrier)를 사용하는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식이 최근 대두되고 있는데, 이 방식은 1 채널당의 전송 속도를 주파수 선택성 페이딩이 발생하지 않을 정도로 제한하고, 또한 복수의 채널을 사용하여 전송함으로써 고속의 디지털 전송을 실현할 수 있는 방식이다[3],[4].

한편, 무선 통신에서는 전송 중에 발생하는 에러를 정정해야 하는 필요성 때문에 정보 비트에 잉여 비트를 추가하여 전력 효율을 증가시키는 에러 정정 부호 (FEC : Forward Error Correction)를 사용한다. 이와 같이 정보 비트에 용장 비트를 추가하면 전력 효율을 향상시킬 수 있으나, 정보 신호 주기 동안 보다 많은 데이터를 전송해야 하므로 부호화하기 전보다 높은 레벨을 갖는 변조기를 사용하거나 전송 대역폭을 늘려야만 한다. 그러나 최근의 무선 통신 시스템은 한정된 주파수 자원에서 대역 효율을 높여 보다 많은 가입자를 수용해야 하기 때문에, 에러 정정하기 전보다 더 높은 레벨을 갖는 변조 방식을 사용하여야 한다. 그러나 레벨이 높은 변조 방식을 사용하면 수신측에서 발생하는 오율을 일정한 값으로 유지하기 위해 보다 많은 신호 전력이 요구되는 이율 배반적인 현상이 나타난다[5]~[7]. 이에 대한 성능 개선책으로 다차 변조 방식과 컨벌루션 부호기가 결합된 TCM (Trellis Coded Modulation) 방식이 대두되고 있다.

이와 같은 통신 동향에 따라 본 논문에서는 열악한 무선 채널을 주파수 선택성 레일리 페이딩이 존재

하는 통신로 환경으로 모델링하고, 주파수 호핑 패턴의 히트를 고려한 Orthogonal MC/FH-CDMA 통신 방식의 BER 성능을 S/N 비와 캐리어 슬롯 수를 변수로 하여 평가하고자 한다. 또한 성능 개선책으로 TCM 기법을 채택하고, 도플러 주파수, 경로의 지연 시간 차, S/N 비, 그리고 캐리어 슬롯 수 등을 파라미터로 하여 성능 개선 정도를 연구하고자 한다.

II. Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA 모델

본 논문에서 제안하는 Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA 통신 시스템 구조는 그림 1과 같다.

송신 데이터는 부호율이 1/2인 TCM 부호기를 거쳐 부호화된 후, 사용 캐리어 수 n 개의 가지로 직렬/병렬 변환되며, 1 가지에 대해 1 캐리어 주파수가 사용된다. 캐리어 주파수는 주파수 호핑 패턴 발생기에 따라 주파수 합성기에서 생성되며, 각 송신 데이터에 변조한다. 이 때 클럭 타이밍과 주파수 등은 동기 제어부에 의해 완전히 제어되어 인접 주파수와의 직교 상태를 유지하도록 한다. 변조 방식으로는 주파수 이용 효율을 향상시키기 위해 M-ary FSK 변조 방식을 사용하고, 확산 부호의 칩 율을 데이터 율

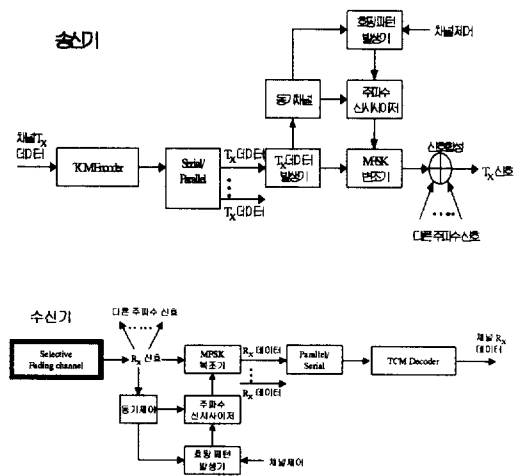


그림 1. 제안된 Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA 시스템 구조

Fig. 1. Scheme of the proposal Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA system.

보다 낮게 하는 느린 FH 방식으로 주파수 호핑한다.

이동국의 수신기는 한 채널의 캐리어 수만큼의 복조기 세트를 가져야 한다. 수신 신호는 한 채널의 캐리어 수 만큼의 가지로 분리되고, 그 한 가지가 호핑 패턴 발생기에 따라 주파수 합성기에서 생성한 캐리어로 복조된다. 변조의 경우와 마찬가지로 다 주파수 수신부와 연휴하여 완전히 동기 제어된다. 그 후 각각의 주파수 수신 데이터를 합성하여 희망 채널의 데이터를 구성한다.

III. 무선 통신로에서 Orthogonal MC/FH-CDMA 시스템의 성능 해석

본 논문에서는 전파 지연 시간 τ 를 가지며 도플러 주파수 f_d 로 주파수 시프트된 복합파 합성 모델과 진폭 변동이 레일리 분포를 따르는 주파수 선택성 레일리 페이딩 모델을 가정하고 해석한다.

3-1 전파 지연에 의한 Orthogonal Multi-Carrier 시스템의 성능

사용자 모두가 캐리어를 송신하고 있을 경우 Multi-Carrier 복소 송신 신호는 다음과 같이 정의된다[1]~[4].

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{K-1} R [C_{ki} e^{j2\pi f_k(t-iT_s)}] \cdot f(t-iT_s) \quad (1)$$

여기서 f_k 는 k 번째 반송파 주파수로서

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \quad (2)$$

가 되며, f_0 는 가장 낮은 반송파 주파수이고, $f(t)$ 는 펄스 파형으로서 다음과 같은 값을 갖는다.

$$f(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t \leq T_s) \\ 0 & (t < 0, t > T_s) \end{cases} \quad (3)$$

여기서 T_s 는 1 심볼 주기이다.

송신 신호 $s(t)$ 는 다중 경로 페이딩을 받고 부가성 백색 가우스 잡음 (AWGN) 에 의한 영향을 받게되므로 수신 신호 $r(t)$ 는 다음과 같이 나타내어진다[1]~[4].

$$r(t) = \int_0^{\infty} s(t-\tau) h(\tau; t) d\tau + n(t) \quad (4)$$

여기서, $h(\tau; t)$ 는 시간 t 에서의 채널의 임펄스 응답이며, $n(t)$ 는 협대역 가우스 잡음, τ 는 경로의 전파 지연 시간을 나타낸다.

식 (1)에서 $|C_{ki}| = |C_{k(i-1)}| = 1$ 로 하면 m 번째 캐리어의 i 번째 시점에서의 복조 신호 r_{mi} 를 이용한 수신 전력의 평균치 $E[r_{mi}r_{mi}^*]$ 는 다음 식과 같이 구해진다.

$$E[r_{mi}r_{mi}^*] = b_0 + \sigma_I^2 + \sigma_n^2 \quad (5)$$

여기서 b_0 는 희망 신호 전력, σ_I^2 은 간섭 전력, σ_n^2 은 잡음 전력을 나타내는데, 희망 신호 전력은 다음 식과 같이 구해지며, p_i 은 i 번째 수신 경로를 통해 들어온 신호 전력을 나타낸다.

$$b_0 = \sum_{l=1}^L \left(\frac{T_s - \tau_l}{T_s} \right)^2 p_i \quad (6)$$

마찬가지로 간섭 전력도 다음 식과 같이 구해진다.

$$\sigma_I^2 = \sum_{l=1}^L \left(\frac{\tau_l}{T_s} \right)^2 p_i \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} \sin^2 \left(\frac{\pi(k-m)\tau_l}{T_s} \right) - \frac{1}{2} \right\} \quad (7)$$

3-2 도플러 주파수에 의한 Orthogonal Multi-Carrier 시스템의 성능

이 경우도 1 절과 동일한 방법으로 유도하면 되는데, 수신 전력의 평균치는 다음과 같이 구해진다[1]~[4].

$$E[r_{mi}r_{mi}^*] = b_0 + \sigma_c^2 + \sigma_n^2 \quad (8)$$

$$b'_0 = 1 + \frac{(\pi f_d T_s)^2}{6} \quad (9)$$

$$\sigma_c^2 = \sum_{k=0}^{K-1} \frac{(f_d T_s)^2}{2(k-m)^2} \quad (10)$$

3. 전파 지연과 도플러 주파수를 동시에 고려한 경우 Orthogonal Multi-Carrier 시스템의 오율 성능

잡음 환경에서의 M-ary FSK 신호의 비트 오율식을 순시 신호 대 잡음비 γ 로 나타내면 다음과 같다[8].

$$P_{M\text{-ary FSK}} = \frac{1}{M} \exp\left(-\frac{\gamma}{2}\right) \quad (11)$$

다음으로 레일리 페이딩 통신로에서 순시 신호 대 잡음 비 γ 에 대한 확률 밀도 함수는 다음과 같이 나타내진다[8].

$$p(\gamma) = \frac{1}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{\sigma^2}\right) \quad (12)$$

최종적으로 주파수 선택성 레일리 페이딩 통신로에서 M-ary FSK 변조 방식을 적용하고, 전파 지연과 도플러 주파수를 동시에 고려한 Orthogonal Multi-Carrier 시스템의 비트 오율 식은 다음과 같이 구해진다.

$$P_e = \int_0^{\infty} P_{M\text{-ary FSK}} \cdot p(\gamma) d\gamma \quad (13)$$

$$= \frac{1}{M\left(1 + \frac{\sigma^2}{2}\right)}$$

여기서 σ^2 은 희망 신호 전력 대 비희망 신호 전력 비 (Desired to Undesired Signal Power Ratio)의 분산치로 다음 식과 같이 주어진다.

$$\sigma^2 = \left\{ \left(\frac{b_0}{\sigma_n^2}\right)^{-1} + \left(\frac{b_0}{\sigma_I^2}\right)^{-1} + \left(\frac{b_0}{\sigma_c^2}\right)^{-1} \right\}^{-1} \quad (14)$$

4. 주파수 호핑 패턴 비트의 영향

본 절에서는 주파수 호핑 패턴 비트의 영향을 고려하여 Orthogonal MC/FH-CDMA 통신 방식의 비트 오율 식을 유도한다.

주파수 호핑 패턴으로는 다른 호핑 패턴과 히트(주파수 일치)하지 않는 패턴이 바람직하다. 호핑 패턴이 완전히 동기되어 있는 경우에는 다른 패턴과 주파수 히트하지 않지만, 비동기로 상호 간섭하는 경우에는 히트가 발생한다. 호핑 패턴의 1 주기 칩 수 및 주파수 슬롯 수가 n 일 때 호핑 패턴의 히트 확률은 다음과 같이 주어진다[2].

$$P_h = 1 - \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{U-1} \quad (15)$$

여기서 u 는 캐리어 슬롯 수 n 중에서 사용되는 캐리어 슬롯 수이다.

본 논문에서는 1 칩 중에 다수 비트의 데이터가 포함된 느린 FH 방식을 고려하기 때문에 호핑 패턴이 히트한 경우의 칩 중의 데이터는 완전히 에러로 간주되어 오율 식은 다음과 같이 정의된다.

$$P_E = P_e + (P_h \times 0.5) \quad (16)$$

여기서 P_e 는 식 (13)이며, 주파수 선택성 레일리 페이딩 통신로에서 전파 지연과 도플러 주파수를 동시에 고려한 Orthogonal Multi-Carrier 시스템의 비트 오율 식이다.

IV. Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA 시스템의 성능 해석

일반적으로 송신단에서 부호화 기술을 행하기 위해서는 변조단과 부호단이 동시에 존재해야 하는데, TCM 기법을 사용하면 단지 하나의 단으로 구성할 수 있다는 장점이 대두된다. 그리고 부호기를 사용하는 경우에는 부호율에 따라 전송해야 하는 비트의 개수가 증가하게 되는데, 만약 1/2의 부호율을 가지고 있는 경우에는 1 비트를 부호화시킬 때 2 비트를 전송해야 한다. 이와 같이 부호화를 행하면 안전한 전송을 행할 수 있지만, 이에 비해 그만큼 대역폭이 증가한다는 문제점이 발생한다[5]~[7]. 이때 Ungerboeck[9]가 제

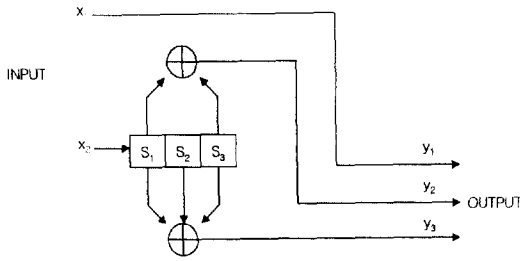


그림 2. TCM 구조
Fig. 2. Scheme of TCM.

안한 집합 분할 TCM 기법을 사용하게 되면 대역폭을 증가시키지 않고도 성능 개선을 도모할 수 있기 때문에, 본 논문에서는 이 기법을 채택한다. 그림 2는 대표적인 TCM 구조를 나타낸다.

그림에서 $k-1$ 개의 비트가 입력되면 가장 낮은 차수의 비트만이 부호화되고, 나머지 $k-2$ 개의 비트는 부호화되지 않는 상태로 입력된다. $k-1$ 이 2 비트이면 컨벌루션 부호기를 거친 y_2 와 y_3 비트는 그레이 부호의 매핑 (mapping) 방법에 따라 다음과 같은 4 개의 위상을 가질 수 있다.

- 00 → 0 [rad]
- 01 → $\pi/2^{k-2}$ [rad]
- 10 → $2\pi/2^{k-2}$ [rad]
- 11 → $3\pi/2^{k-2}$ [rad]

나머지 부호화되지 않은 비트는 적절한 배치를 통해 유클리디안 (Euclidean) 거리가 최대가 되도록 매핑된다.

최종적으로 주파수 선택성 레일리 페이딩 통신로에서 전파 지연, 도플러 주파수, 그리고 주파수 호핑 패턴의 히트를 고려한 Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA 통신 방식의 BER 성능은 다음과 같다.

$$P_e = \int_0^\infty P_{M\text{-ary FSK}} \cdot p(\gamma) d\gamma$$

$$= \frac{1}{ACG \cdot M \left(1 + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (17)$$

식 (17)에서 ACG (Asymptotic Coding Gain)와

σ^2 는 다음과 식과 같다.

$$ACG \leq 10 \log_{10} \left[\frac{\sin^2(4\pi/M)}{\sin^2(2\pi/M)} \right]$$

$$= 10 \log_{10} [4 \cos^2(2\pi/M)] \quad M \geq 8 \quad (18)$$

$$\sigma^2 = \left\{ \left(\frac{b_0}{\sigma_n^2} \right)^{-1} + \left(\frac{b_0}{\sigma_I^2} \right)^{-1} + \left(\frac{b_0}{\sigma_c^2} \right)^{-1} \right\}^{-1}$$

V. 수치 계산 및 검토

여기서는 주파수 호핑 패턴의 히트를 고려하여 Orthogonal MC/FH-CDMA 통신 방식의 BER 성능을 평가하고, TCM 기법을 적용하여 성능 개선 정도를 도출하고자 한다. 본 논문에서 이용한 각종 파라미터 값은 표 1과 같다.

표 1. 파라미터 값

Table. 1 Parameter value.

파라미터	이용값
최대 도플러 주파수	$f_d = 40$ Hz
2-path 다중 경로의 지연 시간차	$\tau_1 = 5$ μ s
1 캐리어 당 전송 속도	20/n (Mbit/s)
캐리어 슬롯 수	$n = 1000, 2000, 4000$
TCM 부호율	$R = 1/2$
변조 방식	8FSK, 16FSK

그림 3은 주파수 선택성 레일리 페이딩 통신로에서 히트를 고려한 경우, 캐리어 슬롯 수와 S/N 비에 따른 Orthogonal MC/FH-CDMA 통신 시스템의 BER 특성을 나타낸다. 그림에서 캐리어 슬롯 수가 증가하면 심볼 시간에 대해 지연 시간차가 적게 되기 때문에 오율 특성이 개선됨을 알 수 있다. 그리고 호핑 패턴의 히트 때문에 error floor가 큰 에러가 발생하고, 이 때문에 사용 캐리어 수를 많게 할 수 없어 직교화의 효과가 낮아짐을 알 수 있다.

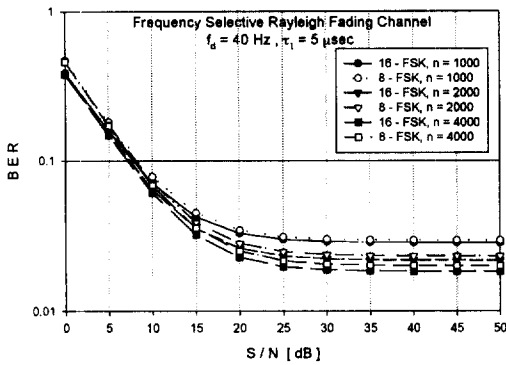


그림 3. 캐리어 슬롯 수와 S/N 비에 따른 Orthogonal MC/FH-CDMA 시스템의 BER 특성 (히트)
 Fig. 3. BER performance for carrier slot number and S/N ratio in Orthogonal MC/FH-CDMA system. (hit).

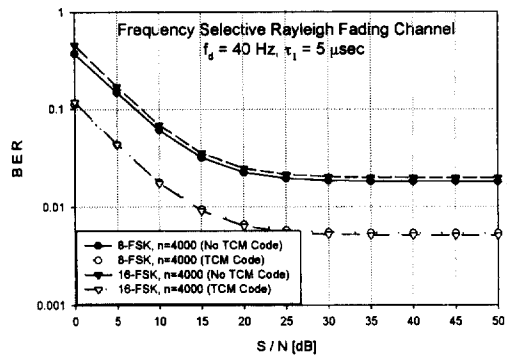


그림 5. S/N 비에 따른 Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA 시스템의 BER 특성 ($n=4000$, 히트)
 Fig. 5. BER performance for S/N ratio in Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA system. ($n=4000$, hit).

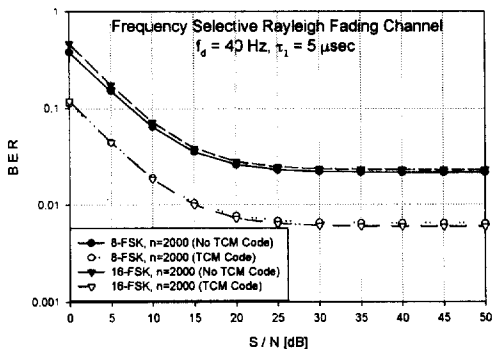


그림 4. S/N 비에 따른 Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA 시스템의 BER 특성 ($n=2000$, 히트)
 Fig. 4. BER performance for S/N ratio in Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA system. ($n=2000$, hit).

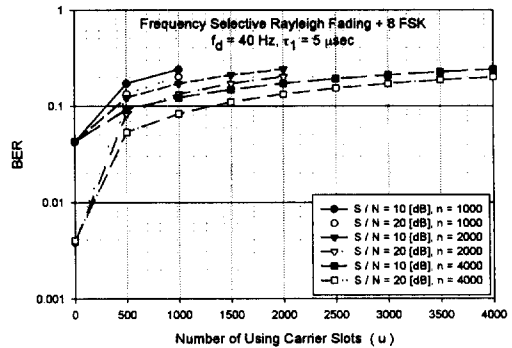


그림 6. 사용자 접속 캐리어 슬롯 수 u 에 따른 Orthogonal MC/FH-CDMA 시스템의 BER 특성(히트)
 Fig. 6. BER performance for user access carrier slot number u in Orthogonal MC/FH-CDMA system. (hit).

그림 4와 5는 위와 동일한 통신로 환경에서 캐리어 슬롯 수 n 을 각각 2000, 4000으로 고정할 경우, S/N 비에 따른 Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA 통신 시스템의 BER 특성을 나타낸다. 그림으로부터 TCM 기법을 적용함에 의해 BER 성능이 약 5×10^{-2} 정도 개선됨을 알 수 있고, M-ary 수가 증가할수록 TCM의 효과가 조금 더 나타남을 알 수 있다.

그림 6은 히트를 허용한 주파수 선택성 레일리 페이딩 통신로에서 S/N 비를 각각 10, 20 [dB], 그리고 캐리어 슬롯 수 n 을 각각 1000, 2000, 4000으로 고정할 경

우, 사용자 접속 캐리어 슬롯 수 u 에 따른 Orthogonal MC/FH-CDMA 통신 시스템의 BER 특성을 나타낸다.

그림에서 사용자 접속 캐리어 슬롯 수가 많을수록 오율 성능이 현격히 나빠짐을 알 수 있으며, 또한 접속 캐리어 슬롯 수가 500 이하일 때 S/N 비 증가 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 7은 위와 동일한 통신로 환경에서 S/N 비를 각각 10, 20 [dB], 그리고 캐리어 슬롯 수 n 을 4000으로 고정할 경우, 사용자 접속 캐리어 슬롯 수 u 에 따른 Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA 통

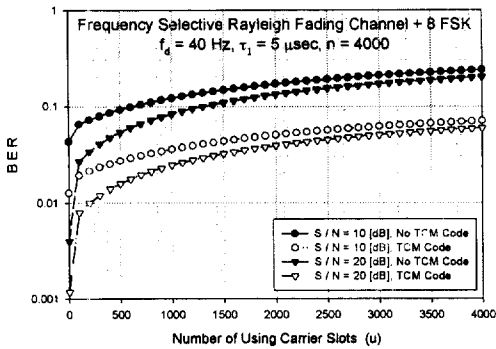


그림 7. 사용자 접속 캐리어 슬롯 수 u 에 따른 Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA 시스템의 BER 특성 (히트)

Fig. 7. BER performance for user access carrier slot number u in Trellis Coded Orthogonal MC/FH-CDMA system. (hit).

신 시스템의 BER 특성을 나타낸다.

그림으로부터 TCM 기법을 적용함에 의해 BER 성능이 약 5×10^{-2} 정도 개선됨을 알 수 있다. 그리고 음성 QoS (Quality of Service) 조건 ($BER = 10^{-3}$)을 만족시키기 위해서는 더욱 더 큰 S/N 비가 요구됨을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 열악한 무선 채널을 주파수 선택성 레일리 페이딩이 존재하는 통신로 환경으로 모델링하고, 주파수 호핑 패턴의 히트를 고려한 Orthogonal MC/FH-CDMA 통신 방식의 BER 성능을 S/N 비와 캐리어 슬롯 수를 변수로 하여 평가하였다. 또한 성능 개선책으로 TCM 기법을 채택하고, 도플러 주파수, 경로의 지연 시간 차, S/N 비, 그리고 캐리어 슬롯 수 등을 파라미터로 하여 성능 개선 정도를 평가하였다.

성능 해석 결과, 캐리어 슬롯 수가 증가하면 심볼 시간에 대해 지연 시간차가 적어지기 때문에 오류 특성이 개선됨을 알 수 있었다. 그리고 호핑 패턴의 히트 때문에 큰 에러가 발생하고, 이 때문에 사용 캐리어 수를 많게 할 수 없어 직교화의 효과가 낮아짐

을 알 수 있었다. 한편, TCM 기법을 적용하면 BER 성능이 약 5×10^{-2} 정도 개선됨을 알 수 있었고, M-ary 수가 증가할수록 TCM의 효과가 조금 더 나타남을 알 수 있었다. 또한 음성 QoS 조건 ($BER = 10^{-3}$)을 만족시키기 위해서는 더욱 더 큰 S/N 비가 요구됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. Okada, S. Hara, and N. Morinaga, "Bit error rate performance of orthogonal multi-carrier modulation radio transmission systems", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E76-B, no. 2, pp. 113-119, Feb., 1993.
- [2] M. Ohkawa, R. Kohno, and H. Imai, "Orthogonal multi-carrier FH-CDMA schemes for frequency selective fading", *電子情報通信學會論文誌 B-II*, vol. J77-B-II, no. 11, pp. 691-702, Nov., 1994.
- [3] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission : An idea whose time has come", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May, 1990.
- [4] S. B. Weinstein and P. M. Ebert, "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete fourier transform", *IEEE Trans. on Comm. Tech.*, vol. COM-19, no. 5, pp. 628-634, Oct., 1971.
- [5] Paul. Ho, and D. K. P. Furg, "Error performance of interleaved trellis-coded PSK modulations in correlated Rayleigh fading channels", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, pp. 1800-1809, Dec., 1992.
- [6] M. K., Simon and D. Divsalar, "Combined trellis coding with asymmetric MPSK modulation", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-35, pp. 130-141, Feb., 1987.
- [7] L. F. Wei, "Trellis-coded modulation with multidimensional constellations", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. IT-33, pp. 483-501,

July, 1987.

- [8] B. Sklar, *Digital Communications*, Prentice-Hall, ch. 5, 1988.

- [9] Gottfried Ungerboeck, "Channel coding with multilevel/phase signals", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. IT-28, no. 1, Jan., 1982.

이 문 승(李文承)



- 1965년 3월 : 한국항공대학교 통신공학과(공학사)
 1980년 3월 : 숭실대학교 통신공학과(공학석사)
 1988년 3월 : 숭실대학교 통신공학과(공학박사)
 1975년~현재 : 인하공업전문대학교수