

OFDM 시스템에서 채널 추정을 위한 파일럿 패턴의 성능 분석

정희원 최 광 돈*,***, 현 덕 수**, 박 상 규***

Performance Analysis of Pilot Patterns for Channel Estimation in OFDM Systems

Kwang don Choe*^{***}, Deok soo Hyun**, Sang kyu Park*** *Regular Members*

요 약

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송방식은 효율적인 주파수 사용 및 고속의 데이터 전송이 가능한 장점으로 인해 페이딩 환경에서 우수한 성능을 보이지만, 실질적으로는 다중 경로 페이딩 채널의 시간에 따른 변화에 대해 성능 저하가 발생한다. 이러한 채널의 시간적 변화에 대한 영향을 극복하고, 시스템의 성능을 개선하기 위한 여러 가지 채널 추정 기법들이 제안되어 왔다. 그러나 채널 추정을 위한 기존의 파일럿 패턴들은 이동체의 속도에 대해 강인한 특성을 지니지 못한다. 본 논문에서는 보편적으로 사용되는 파일럿 패턴들의 이동성에 대한 단점을 극복하고, 도플러 확산으로 비롯된 시변 채널 환경에서 타 기법들에 대하여 우수한 성능을 달성하기 위해 기존 패턴에 변형을 가한 파일럿 패턴을 제안한다. 모의실험 결과를 통해 시변 채널 환경에서 변형된 파일럿 패턴의 성능이 기존의 패턴보다 우수함을 보였다.

Key Words : Channel estimation, OFDM, Pilot pattern

ABSTRACT

OFDM is a very attractive technique for achieving high-bit-rate data transmission and high spectrum efficiency in fading environment. However, the reliable detection of an OFDM signal in time-varying multipath fading channels is a challenging problem. Accordingly, various channel estimation methods have been proposed for performance improvement. But, conventional pilot patterns for channel estimation in OFDM systems have not robust characteristics relating to various mobile speed. To solve this drawback in conventional patterns, we propose the pilot patterns modified from conventional patterns to have a good error performance in time-varying fading channel. Simulation results show that the performance of the proposed pilot patterns is better than conventional patterns in fast time-varying channel.

I. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송방식은 전체 전송대역을 다수의 협대역 직교 부채널(sub-channel)로 분할하여 각 부채널

로 동시에 데이터를 전송하는 방식으로 변조와 복조를 각각 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)와 FFT를 사용하여 고속으로 구현할 수 있다. 또한, cyclic prefix를 연속된 두 OFDM 심볼 사이의 보호구간(guard interval)에 삽입하여 인접 심볼 간 간

* 안양과학기술대학교 전자통신정보공학부(kdc5590@ianyang.ac.kr), ** (주)팬텍(dshyun@pantech.co.kr)

*** 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부(skpark@hanyang.ac.kr)

논문번호 : KICS2004-11-277, 접수일자 : 2004년 11월 12일

섭(Inter Symbol Interference: ISI) 및 인접 채널 간섭(Inter Channel Interference: ICI)을 효율적으로 제거할 수 있다^{[11][12]}.

그러나 실질적인 통신 환경에서 채널을 통하여 신호를 수신할 때에는 전파경로의 길이가 다른 다중 경로 전파 현상이 발생한다. 따라서 적절한 신호 검출을 위해서는 채널에 의한 송신신호의 진폭 및 위상 변화를 수신단에서 추정하고 보상해 주어야 하며, 일반적으로 OFDM 시스템에서의 채널 추정은 파일럿 심볼을 송신 신호에 삽입함으로써 수행된다^[3]. 이와 같이 파일럿을 기반으로 하는 채널 추정 방식은 전송하는 데이터 스트림(파일럿 포함)의 전체적인 전력을 가급적 낮추면서(작은 파일럿을 사용하면서), 시스템의 비트 오류율(Bit Error Rate: BER) 성능이나 데이터 처리량(data throughput)을 높여야 한다. 즉, 시스템 성능은 파일럿 심볼의 위치와 배열 형태, 그리고 데이터 및 파일럿 심볼 간의 비율 등에 종속적이다. 이로부터 시스템 성능 향상을 위한 효율적인 파일럿 패턴 방식에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다^[4].

대표적인 파일럿 패턴의 예로서 데이터 심볼에 대해 적은 파일럿 심볼로도 우수한 성능을 가지는 가장 간단한 형태의 rectangular 파일럿 패턴과 페이딩 환경에 강한 hexagonal 파일럿 패턴을 들 수 있고, 특히 주파수 축에서 선형적으로 증가하는 rectangular 파일럿 패턴은 DVB(Digital Video Broadcasting)의 표준으로 채택되어 사용되고 있다^[5].

Bai는 주파수 선택적 레일리 페이딩 채널(frequency-selective Rayleigh fading channel) 환경에서 2차원 샘플링에 기반을 둔 최적의 파일럿 패턴을 컴퓨터 모의실험을 통해 비교, 분석하였다^[6]. 그러나 이동체의 움직임을 고려한 이동통신 채널을 통해 신호가 수신되는 경우, 전파 경로의 입사각이 각기 다른 신호가 수신단에 도달된다. 이로 인해 발생하는 도플러 효과 및 지연 확산에 의한 채널의 변화는 송수신 전력에 직접적인 영향을 미치고, 결국 Bai가 제시한 파일럿 패턴은 이동통신 환경에서 급격한 수신 성능 저하를 야기한다.

OFDM 시스템의 경우, 원래보다 심볼 길이를 늘려 전송하는 신호화(signaling) 특성과 최대 지연 확산(maximum delay spread)보다 더 큰 cyclic prefix를 삽입함으로써 채널의 주파수 선택적 특성을 어느 정도 극복할 수 있다^[7]. 반면, 도플러 효과와 그에 따른 채널 환경의 변화에 대해서 기존의 파일럿 패턴은 강한 특성을 보여주지 못하며, OFDM 시

스템 성능 저하의 원인이 된다.

이에, 본 논문에서는 OFDM 시스템에서의 채널 추정을 위한 파일럿 패턴을 이동성에 강인하도록 개선하고, 도플러 효과가 존재하는 채널 환경에서 컴퓨터 모의실험을 통해 기존 파일럿 패턴과의 성능을 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 파일럿 톤 기반의 OFDM 시스템 모델과 채널 추정을 위한 기존의 파일럿 패턴을 소개하고, 파일럿 톤 기반 채널 추정시의 고려사항에 대해 설명한다. III장에서 기존의 파일럿 패턴을 이동성에 보다 강인하도록 변형시킨 파일럿 패턴을 제안하고, IV장에서는 시변 채널 환경에서의 모의실험을 통하여 기존의 패턴과 제안된 패턴의 성능을 비교한다. 마지막으로, V장에서 간단한 요약과 함께 결론을 맺는다.

II. OFDM 시스템에서의 채널 추정

그림 1은 파일럿 심볼들의 선형 조합을 통해 채널의 변화를 추정하는 방식 즉, PSAM(Pilot Symbol Assisted Modulation)에 기반한 채널 추정기를 가진 OFDM 시스템의 블록도이다^[8]. 입력 데이터는 파일럿 심볼과 멀티플렉싱되어 IFFT 블록을 거친 후, 시간영역 신호 $x(n)$ 이 된다. AWGN(Additive White Gaussian Noise) 및 시변 페이딩 채널을 거친 후 수신단의 채널 추정 블록에서 파일럿 신호가 추출되고, 추출된 파일럿 심볼로부터 추정된 채널 혹은 채널의 주파수 응답 $H_c(k)$ 를 다음과 같이 얻는다.

$$H_c(k) = \frac{Y_p(k)}{X_p(k)}, \quad k = 0, 1, \dots, N_p - 1 \quad (1)$$

여기서 N_p 는 파일럿 부채널의 개수이고, $x_p(k)$ 와 $y_p(k)$ 는 각각 k 번째 파일럿 부채널의 입력 및 출력이다. LS(Least Square) 채널 추정기 [9]에 기반한 파일럿 부채널에서의 채널 추정치 $H_c(k)$ 를 사용하여 전송된 데이터의 추정치는 다음과 같다.

$$X_c = \frac{Y(k)}{H_c(k)}, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2)$$

여기서 N 은 하나의 OFDM 심볼내의 부채널의 개수이다.

LS 채널 추정기로부터 파일럿 부채널에서의 채널 추정치는 보간(interpolation)을 통해 데이터 심볼에 보상된다. 가장 간단한 방식의 보간 기법인 선형 보

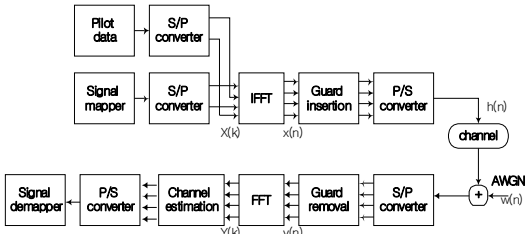


그림 1. 파일럿 톤 기반의 채널 추정기를 가진 OFDM 시스템 블록도

간법 (linear interpolation)은 낮은 복잡도로 만족할 만한 성능을 가지는 대표적인 보간 기법으로서 널리 사용되고 있다. 선형 보간법은 낮은 복잡도로 간단하게 구현할 수 있는 반면 채널 추정 정확도의 손실이 발생하기 때문에 실제적인 구현 시 나이퀴스트 샘플링 (Nyquist sampling)보다 높은 샘플링 주파수를 적용하여 성능 저하를 최소화 하여야 한다⁹⁾.

OFDM과 같은 다수의 부반송파를 사용하는 시스템에서 파일럿 심볼의 비율을 높이면 좋은 채널 추정 성능을 얻을 수 있지만 복잡도가 증가하고, 데이터 전송 속도는 저하된다. 따라서 성능과 데이터율 사이를 적절하게 조화시켜야 하며, 채널 환경에 적합한 파일럿 패턴을 사용해야 한다¹⁰⁾.

그림 2는 채널 환경 및 적용 분야에 따라 조금씩 변형되어 사용되는 rectangular 파일럿 패턴으로 시간과 주파수의 2차원 격자 평면 (2-dimensional time-frequency grid)에 나타난 경우이다. 흑색의 파일럿 심볼은 일정 간격의 부반송파 및 심볼에 규칙적으로 삽입된다. 수신단에서는 OFDM 블록 속에 삽입된 파일럿 위치에서의 채널 감쇄 (channel attenuation)를 추정하여 흰색으로 표현된 나머지의 데이터 심볼에 보상한다.

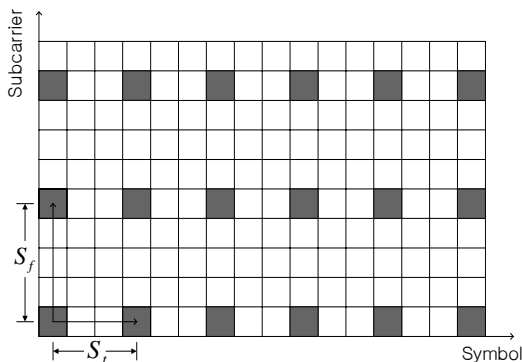


그림 2. Rectangular 파일럿 패턴

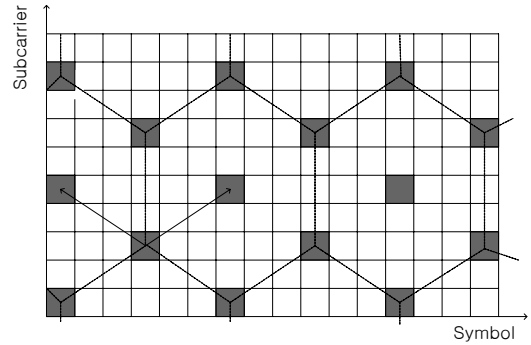


그림 3. Hexagonal 파일럿 패턴

시간 축 (그림 2의 symbol 축)에서 파일럿의 간격을 S_t 라 하고, 주파수 축 (그림 2의 subcarrier 축)에서 파일럿 간격을 S_f 라 하면 파일럿 톤에 관한 나이퀴스트 샘플링 이론을 만족하는 최소의 파일럿 간격은 각각 시간 축과 주파수 축 상에서 채널 변화의 대역폭과 최대 지연 값에 관계하며 식 (3)과 같이 결정된다¹¹⁾.

$$S_t < \frac{1}{B_d}, \quad S_f < \frac{1}{\tau_{max}} \quad (3)$$

식 (3)에서 B_d 와 τ_{max} 는 각각 시간 축에서의 도플러 확산 (Doppler spread)과 주파수 축에서의 최대 지연 확산이다. 이러한 최소 파일럿 간격의 제약 하에서 파일럿 밀도를 높이면 복잡도가 다소 증가하고, 데이터 전송 속도가 느려지지만 우수한 성능을 유지할 수 있다.

그림 3의 hexagonal 파일럿 패턴은 페이딩 환경에서 rectangular 파일럿 패턴보다 적은 파일럿 심볼의 사용으로 우수한 성능을 얻을 수 있는 패턴으로, 시간 축과 주파수 축 상의 2차원 격자에서 가장 우수한 효율을 갖는 파일럿 패턴이다¹⁴⁾. 특히, [11]에서는 순환성 대역 제한된 신호 (circularly band-limited signal)의 경우에 hexagonal 샘플링이 가장 효율적인 샘플링 방법임을 보였다. 이러한 샘플링 전략에 따라 다중 경로 레일레이 페이딩 환경에서 hexagonal 파일럿 패턴은 BER 성능과 샘플링의 효율 측면에서 rectangular 파일럿 패턴보다 우수한 성능을 보이는 파일럿 패턴이다.

III. 채널의 시간적 변화에 강인한 파일럿 패턴

본 장에서는 rectangular 파일럿 패턴에 대해 페이딩 채널에서 보다 강건한 hexagonal 파일럿 패턴

의 응용 범위를 확장하여 시변 채널 환경에 적합하도록 기존의 hexagonal 파일럿 패턴을 개선한 두 가지의 파일럿 패턴을 제안한다.

심볼 구간을 원래의 길이보다 늘려 전송하는 신호화 특성과 채널의 임펄스 응답(impulse response)보다 긴 보호구간의 삽입으로부터 OFDM 시스템은 주파수 선택적 채널에 대해 보다 강건한 특성을 나타낼 수 있다⁷⁾. 그러나, 다중 경로 전파 환경에서 이동통신 채널을 통하여 신호를 수신할 때는 수신 신호의 주파수가 변하는 도플러 확산이 발생한다. 이러한 채널의 시간적 변화는 OFDM 시스템의 부분송파 간 직교성(orthogonality)을 무너뜨려 인접 채널 간 간섭을 야기한다.

기존 hexagonal 파일럿 패턴은 파일럿 심볼을 포함하지 않은 OFDM 심볼로 인해 빠르게 변화하는 채널 환경에서 파일럿 심볼로부터 정확한 채널 추정치를 얻을 수 없다. 이러한 사실로부터 hexagonal 파일럿 패턴의 사용은 시변 채널 환경에서 채널 추정 오차를 야기하고, 결국 오차를 내포한 파일럿 심볼로부터의 채널 추정치가 데이터 심볼에 보간되어 성능 저하가 발생한다. 이렇듯 보편적으로 사용되는 파일럿 패턴들이 이동체의 움직임으로 인한 시간 축에서의 채널 변화를 쫓아가지 못해 오차가 발생하는 점에 착안하여, 페이딩에 강건한 특성을 나타내는 hexagonal 파일럿 패턴을 시간 축에서 보다 빨리 대체할 수 있도록 두 가지 형태로 개선하였다.

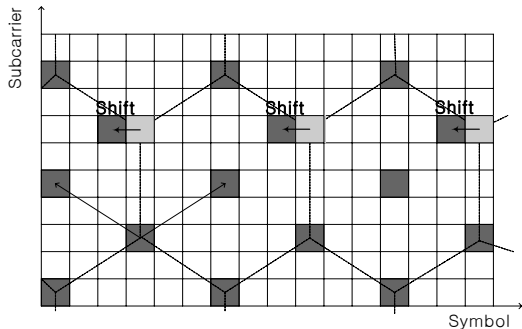


그림 4. 전이된 hexagonal 파일럿 패턴 1

그림 4는 hexagonal 파일럿 패턴에서 채널의 시간적 변화에 대해 보다 강인하도록 하나의 파일럿 심볼을 전이시킴으로써 기존의 패턴보다 시간 축(그림 4의 symbol 축)으로 더 촘촘한 파일럿 배열 형태를 나타낸다. 즉, 하나의 파일럿 심볼을 파일럿이 없는 데이터 심볼로 전이시키고 매번 그 패턴이 반복 될 때마다 수행한다.

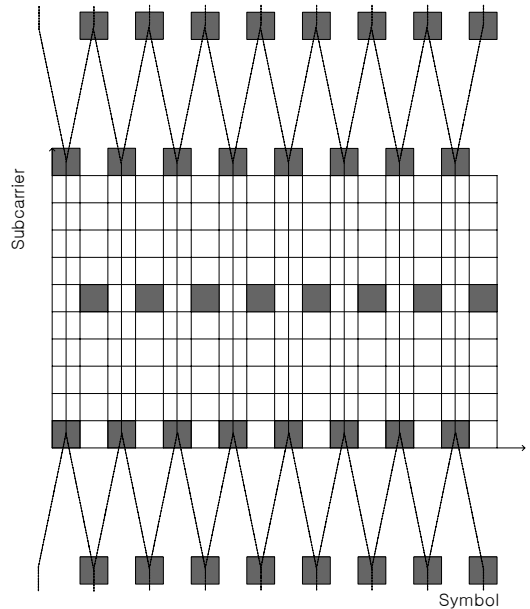


그림 5. 전이된 hexagonal 파일럿 패턴 2

그림 5는 기존 hexagonal 파일럿 패턴에서 파일럿이 없는 심볼에 파일럿을 삽입하여 시간 축으로 촘촘하게 파일럿 심볼을 할당하는 반면, 동일한 파일럿 밀도를 유지하기 위하여 주파수 축으로 넓게 분산시킨 파일럿 패턴이다. 하나의 파일럿 심볼을 이용하여 얻은 채널 정보를 다수의 시간 축 상의 데이터 심볼에 보상하는 기존의 기법에서는 시간 축 상에서 변화가 심하면 정확한 채널 추정을 할 수 없다. 따라서, 파일럿이 없는 심볼에 파일럿을 전이시켜 채널 정보를 추정하여 각 데이터 심볼에 보간을 수행하는 것은 시변 채널 환경에서 보다 정확한 성능 개선 효과를 볼 수 있다. 제안된 두 패턴은 기존의 hexagonal 파일럿 패턴과 동일한 수의 파일럿 심볼을 사용하여 데이터 전송율에 영향을 미치지 않으며, 시간상으로 빠르게 움직이는 이동체에 대하여 기존의 hexagonal 파일럿 패턴보다 우수한 성능을 유지할 수 있다.

IV. 모의실험 결과 및 분석

본 장에서는 채널 추정 기법에 사용되는 파일럿 패턴의 종류에 따른 BER 성능을 비교한다. 기본적으로 모의실험은 rectangular 파일럿 패턴 및 hexagonal 파일럿 패턴을 이용한 채널 추정 기법에 적용하며, hexagonal 파일럿 패턴에 대해 시변 채널 환경에 보다 적합하도록 전이된 두 파일럿 패턴과

표 1. 모의실험 파라미터

파일럿 심볼의 변조방식	BPSK
데이터 심볼의 변조방식	QPSK
부반송파의 수	64
IFFT 크기	64
보호구간	심볼주기의 1/4 (16 points)
파일럿 밀도	14%, 모든 패턴에서 동일
채널	AWGN, 레일레이 페이딩 채널
채널 추정 알고리즘	LS (Least Square)
보간 기법	Linear interpolation
심볼 속도	0.25 Mbps
normalized Doppler frequency	0.0016

비교한다. 모의실험에서 고려된 환경을 다음의 표 1에 나타내었다. 모의실험 시 송신단에서 전송되는 파일럿 정보는 수신단에서 완벽하게 알고 있다고 가정하였다.

BER 성능은 명백히 사용된 파일럿 심볼의 수와 보간 기법에 의존한다. 본 논문에서는 주파수 영역 채널 전달함수 추정에 기반한 PSAM과 PSAM에 대해 가장 간단한 방식의 보간 기법인 선형 보간법을 사용하였다. 또한, 선형 보간법의 사용으로 인한 채널 추정 정확도의 손실을 보완하기 위해 나이퀴스트 샘플링보다 높은 샘플링 주파수를 적용하여 성능 저하를 최소화 하였다.

그림 6은 그림 2에서 보인 rectangular 파일럿 패턴과 그림 3의 hexagonal 파일럿 패턴을 사용한 채널 추정 기법의 모의실험 결과로, 정규화된(normalized)

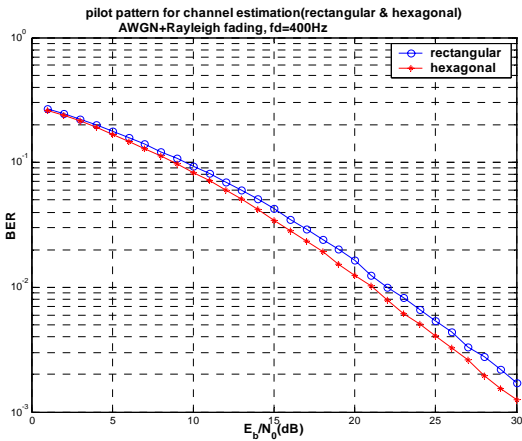


그림 6. Rectangular 파일럿 패턴과 hexagonal 파일럿 패턴을 이용한 채널 추정 기법의 BER 성능 (AWGN+레일레이 페이딩, fd=400Hz)

도플러 주파수가 0.0016인 레일레이 페이딩과 AWGN 모두를 고려하였을 때를 비교한 것이다. Hexagonal 파일럿 패턴을 사용한 채널 추정 기법의 성능은 rectangular 파일럿 패턴을 사용한 채널 추정 기법의 성능보다 시간 및 주파수 축 상으로 파일럿 심볼이 촘촘히 위치하고 있기 때문에 정규화된 도플러 주파수가 0.0016인 레일레이 페이딩 채널 상황에서 BER 성능이 10^{-3} 을 기준으로 했을 때 1dB 정도 우수하다.

그림 7은 III장의 전이된 hexagonal 파일럿 패턴에 대한 오류 성능 분석 모의실험 결과이다. 전이된 hexagonal 파일럿 패턴 1은 시간적으로 빠르게 변화하는 무선 채널에서 hexagonal 파일럿 패턴 중 하나의 파일럿 심볼을 전이시켜 얻을 수 있는 효과를 고려한 것이고, 전이된 hexagonal 파일럿 패턴 2는 시간과 주파수의 2차원 격자 평면의 시간 축에서 파일럿 심볼이 없는 위치에 파일럿 심볼을 삽입하고 동일한 데이터 전송율을 유지하기 위하여 주파수 축으로 넓게 분산시킨 것으로 OFDM 시스템의 채널 추정에 있어 더욱 빠른 업데이트 효과를 얻을 수 있을 뿐 아니라, 기존의 패턴보다 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

이는 기존 패턴의 경우 시변 채널 환경에서 오차를 내포한 파일럿 심볼로부터 보간을 수행하여 빠르게 변화하는 채널의 상태를 따라가지 못하는 반면, 변형된 패턴들은 채널의 변화에 대해 보다 능동적인 채널 추정을 수행하여 보간시 발생하는 오차를 최소화 할 수 있기 때문이다.

특히, 전이된 패턴 2는 파일럿이 없는 심볼에 파

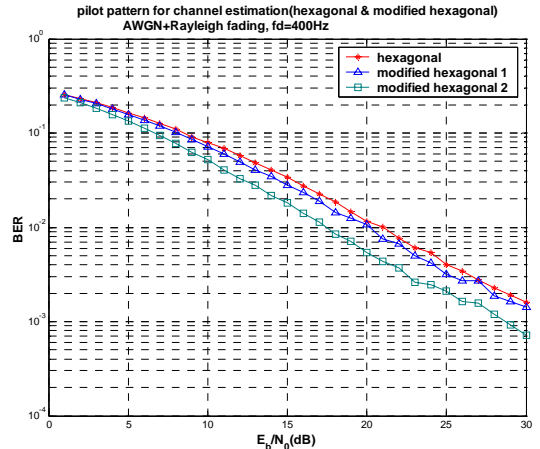


그림 7. Hexagonal 파일럿 패턴과 전이된 hexagonal 파일럿 패턴을 이용한 채널 추정 기법의 BER 성능 (AWGN+레일레이 페이딩, fd=400Hz)

일릿 심볼을 삽입하는 과정을 통해 시간 축에서의 변화에 대해 보다 향상된 성능을 나타낸다. BER 성능이 10^{-3} 을 기준으로 하였을 때 전이된 패턴 1은 기존의 hexagonal 패턴보다 약 0.5dB 우수하며, 전이된 패턴 2는 약 2.5dB 정도 우수한 성능을 나타낸다.

V. 결론

본 논문에서는 OFDM 시스템에서 채널 추정을 위한 파일럿 패턴에 대해 도플러 확산이 있는 페이딩 환경에 강인한 기법을 제안하였다.

시간-주파수 축의 OFDM 심볼 격자에서 기존의 파일럿 패턴과 동일한 파일럿 비율을 유지하면서, 시간 축으로 보다 많은 파일럿을 할당하여 시변 채널에서의 채널 추정 성능을 개선시켰다.

본 논문에서 제안한 채널추정을 위한 파일럿 패턴은 데이터율의 손실 없이, 이동성에 강인하도록 설계되어 고속으로 이동하는 통신이나 빠른 처리를 요구하는 용량이 큰 이미지 신호 처리 등에 기여할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Richard Van Nee and Ramjee Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House Publishers, 2000.

[2] 남기호, 오성근, 선우명훈, “시변 주파수 선택적 채널에서 OFDM 시스템의 채널추정을 위한 Curve-Fitting 방법”, *통신 정보 합동 학술대회*, Vol. 14, pp. III-A-2. 1~5, Apr 2004.

[3] 김영주, 남도원, 박상규, “OFDM통신 시스템에서 개선된 최대우도 채널 추정 기법”, *한국통신학회 하계 종합 학술 발표회 논문초록집*, Vol. 29, pp. 1A1-7.1~7.4, July 2004.

[4] M. J. Fernandez-Getino Garcia, S. Zazo, J. M. Paez-Borrillo, “Pilot patterns for channel estimation in OFDM,” *IEE Electronics Letters*, Vol. 36, No. 12, pp. 1049~1050, June 2000.

[5] Ulrich Reimers, “Digital video broadcasting,” *IEEE Communications Magazine*, Vol. 36, Issue. 6, pp. 104-110, June 1998.

[6] Binfeng Bai, Xin Xu, Yueming Cai, Zi Li, “Optimal pilot patterns for OFDM system based on two-dimension sampling theory,” in Proc. *IEEE Neural Networks and Signal Processing*,

Vol. 1, 14-17, pp. 663-666, Dec 2003.

[7] Rohit Negi, John Cioffi, “Pilot tone selection for channel estimation in a mobile OFDM system,” *IEEE Trans. Consumer Electronics*, Vol. 44, pp. 1122-1128, Aug 1998.

[8] Cavers, J. K., “An analysis of pilot symbol assisted modulation for Rayleigh fading channels,” *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 40, issue:4, pp. 686-693, Nov. 1991.

[9] L. Hanzo, M. Munster, B. J. Choi and T. Keller, *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting*, WILEY, 2003.

[10] Tufvesson, F., Maseng, T., “Pilot assisted channel estimation for OFDM in mobile cellular systems,” *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 3, pp. 1639-1643, May 1997.

[11] D. P. Petersen and D. Middleton, “Sampling and reconstruction of wave-number limited functions in N-dimensional Euclidean spaces,” *Information and Control*, 5 (1962), 279-323.

최 광 돈 (Kwang don Choe)

정회원



1979년 2월 한양대학교 전자공학
학과(공학사)

1985년 8월 캘리포니아 주립
대학교 전기전자공학과(공학
석사)

1993년 3월~현재 안양과학대학
전자통신 정보학부 교수

2001년 3월~현재 한양대학교 전자통신전공학과
박사과정

<관심분야> OFDM, ADM, MIMO-OFDM

현 덕 수 (Deok soo Hyun)

정회원



2002년 2월 경희대학교 전자전
산전공과(공학사)

2004년 2월 한양대학교 전자통
신전공과(공학석사)

2004년 1월~현재 (주)팬택 S/W
연구원

<관심분야> MIMO-OFDM sys
tem

박 상 규 (Sang kyu Park)

정회원



1974년 2월 서울대학교 전기공
학과 공학사

1980년 5월 듀크대학교 전기공
학과 공학석사

1987년 1월 미시건대학교 전기
공학과 공학박사

1987년 3월~현재 한양대학교

전자통신컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 디지털 통신, 확산대역통신, MIMO