
이동통신 채널의 PDP에 따른 OFDM 통신 시스템의 성능 분석

이종길*

Performance Analysis of OFDM Communication Systems Considering PDP of Mobile Channels

Jong Gil Lee*

본 연구는 산업자원부, 한국산업기술평가원 지정 인천대학교 멀티미디어연구센터의 지원에 의한 것임

요 약

본 논문에서는 OFDM 방식의 이동 통신 시스템의 성능분석을 위하여 다양한 PDP (Power Delay Profile) 형태에 따른 BER (Bit Error Rate) 의 변화 정도를 고찰하였다. 모의실험은 16-QAM 변조방식의 OFDM 통신 시스템 및 Rayleigh 채널을 가정하였다. 채널상태에 따라 매우 다양한 모습을 보이는 PDP의 peak 형태, 기울기, 감쇠정도, echo group 등에 따른 BER의 변화를 자세히 분석하였다. 또한 기존의 제한적인 실측 데이터 모델을 확장하여 새로운 모델을 적용함으로써 좀 더 완전한 성능평가가 이루어질 수 있도록 하였다. 실측 데이터에 근거한 여러 가지 채널모델을 기준으로 모의구현 모델의 파라미터 값들을 도출하여 다양한 전파환경에서의 성능을 분석하였다. 이러한 결과들은 OFDM 시스템에서의 채널상태 변화에 따른 BER 정도를 파악할 수 있는 기준을 제시하고 있으므로 향후 시스템의 설계 및 제작, 성능시험 등의 목적으로 폭넓게 활용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

In this paper, various power delay profiles (PDP) are simulated to study the influence of the PDP shape on the bit error rate (BER) performance of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) communication systems. Assuming Rayleigh fading with 16-QAM modulation scheme, the simulation focuses on the investigation of the various shapes of the PDP which are often characterized by peaks, slope, attenuation and distance of an echo profile of waves. This yields information about the properties of the channel, and can be applied to decide the performance of the systems according to the channel.

키워드

power delay profile, OFDM, mobile channels, channel properties

I. 서 론

고속 데이터 전송을 위한 새로운 무선통신 시스템으로 OFDM 방식이 선호되고 있으나 지금까지 전송채널에 대한 세부적인 특성분석이 미흡하였다. 그러므로 OFDM 시스템에서의 다양한 채널특성에 따른 구체적인 시스템 성능정도에 대한 분석이 매우 중요한 문제이다. 모의실험을 통하여 사전에 실험실 연구단계에서 채널특성에 따른 시스템의 성능정도를 정확히 분류하고 체계적으로 분석할 수 있다면 실질적인 시스템 구현을 위한 설계 및 성능분석에 많은 도움이 될 수 있다. 채널특성에 따른 성능분석은 일반적으로 BER로 표시하고 있으며 FER(Frame Error Rate)도 페이딩 환경에서 이동 통신 시스템의 성능을 정의하는 지표로 사용되곤 하지만 본 논문에서는 디지털 통신 시스템에 대한 전반적인 성능을 표시하는 지표인 BER 만을 고려하였다.

이동 통신 채널이 다중 경로 전송, 페이딩, 그리고 도플러 천이의 영향을 받는 경우 BER에 대한 수학적 접근은 매우 어렵고 분석이 실질적이지 않으며 한정된 변조 구조에 국한되어있다. 이론적인 방법 외 다른 접근 방법으로는 하드웨어를 통한 모의 실험, 소프트웨어를 통한 모의 실험 그리고 소프트웨어와 하드웨어를 접목시킨 방법이 있다. 본 논문에서는 모의실험 및 분석을 위하여 소프트웨어적인 접근 방법을 적용하였다.

최근 이동 통신 채널 모의에 대한 많은 논문이 제안되었으며 이들 논문의 대부분은 이동 통신 채널을 실내(indoor)와 실외(outdoor)로 분류하고 실외의 경우 도시(urban), 시골(rural) 그리고 교외(suburban)의 통계적인 모델로 분류하고 있다[1][2]. 그러나 이러한 이동 통신 채널에 대한 개략적인 분류는 단지 채널 환경의 평균적인 전송 특성에 대한 정보만을 얻을 수 있다. 그래서 채널 환경에 따른 세부적인 전송 특성에 대한 정보를 얻기 위해서는 세부적인 전송 채널의 모의가 이루어져야만 한다[3]. 전송 채널에 대한 많은 측정 결과로부터 알 수 있는 것처럼 통신 채널은 채널 내의 건물의 크기, 밀도 그리고 다른 방해물에 의해 강하게 영향을 받는다. 전송 채널에서 특정 방해물의 영향은 수신 신호의 전력 대비 지연 시간을 의미하는 PDP(Power Delay Profile)로 인지 될 수 있으며 PDP는

Peak, Echo 그리고 다른 불규칙의 변화들을 포함하고 있고 PDP의 형태는 전송 채널을 반영하며 특정 지역의 채널 특성을 규정할 수 있다.

그러므로 본 논문에서는 PDP에서의 불규칙성 및 변화정도를 분석하여 이를 바탕으로 전송채널 모델에서의 각기 다른 PDP 형태에 따른 즉 전송채널의 특성에 따른 OFDM 통신 시스템의 BER 변화에 대한 고찰 및 분석을 수행하였다. 의미 있는 성능분석 결과를 얻기 위해서는 전송 채널 모델에서의 적절한 파라미터 값의 선정이 매우 중요하다. 즉, 이러한 파라미터 값들은 채널의 전형적인 특성을 나타낼 수 있어야 하므로 본 논문에서는 실측 데이터에 근거한 JTC(Joint Technical Committee) 채널 모델을 기준으로 하여 파라미터 값들을 설정하였다[4].

II. 전송채널 특성 모델링

1. 무선채널 특성

이동 통신 채널에서는 송신기와 수신기 사이에 많은 경로를 통하여 정보의 전송이 이루어진다. 만일 전송 채널의 직선경로(LOS: Line of Sight)가 있다면 직 접파 성분이 존재할 수 있으며 다른 많은 전파들은 자연적이거나 인위적인 방해물에 의해 산란, 반사 그리고 분산된다. 그러므로 이러한 전자파 신호들은 감쇠, 시간 지연, 입사각등에 따라서 달라지며 아울러 시간 분산, 페이딩 및 도플러 천이 등의 현상이 일어나게 된다.

모든 입사파들은 벡터적으로 수신단의 안테나에 결합된다. 이동 중인 이동체는 전자파의 전파환경이 시시각각 변하기 때문에, 즉 채널의 특성이 수시로 달라지므로 각각의 경로의 신호들의 위상과 크기도 변하게 된다. 만일 모든 신호들이 랜덤한 크기와 균일한 분포의 위상을 갖는다면 신호의 포락선의 확률 밀도 함수는 Rayleigh 분포로 근사화 될 수 있다. 그러나 만일 이동체가 건물 등의 주변 지형 지물의 음영 지역으로 이동한다고 할 때, 전체적인 신호의 경로손실은 건물이나 나무 등의 shadowing 효과에 따라 변하게 된다. 이 효과는 위에서 언급한 빠른 페이딩에 비해 천천히 발생하며 이런 수신 신호의 평균 레벨의 변동은 느린 페이딩이라 하며 신호의 포락선의 확률 밀도 함수는

lognormal 분포를 보인다.

또한 송신단과 수신단 사이에 움직임이 있다면 수신신호의 주파수는 도플러 효과 때문에 천이 된다. 도플러 천이는 수신신호의 입사 방향에 따른 속도에 따라 모든 입사파마다 다르다. 따라서 이동체의 속도가 매우 빠를 때에는 도플러 천이에 따른 시스템의 BER이 상당한 영향을 받을 수 있다[5].

2. 광대역 채널 특성

광대역 무선채널의 경우 다중경로에 의한 수신신호의 지연 시간 분산에 관하여 고려하여야 한다. 즉 지국의 송신안테나로부터 전송되는 전파는 수많은 다중 경로를 거쳐 이동국의 수신안테나에 도달된다. 따라서 각 경로를 통하여 도달하는 전파들의 시간적 지연에 의한 지연 확산이 발생하여 각 경로의 거리 및 전송 특성의 차이에 따라 수신기에 도달하는 시간과 진폭의 차이가 발생하게 되는데 그 신호의 임펄스 응답은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$h(\tau, t) = \sum_{i=1}^L a_i \delta(t - \tau_i) \quad (1)$$

여기서 L 은 경로의 수, τ_i 는 지연 시간, 그리고 $\delta(t)$ 는 단위 임펄스 함수(unit impulse function)이며 a_i 는 평균이 0인 i 번째 경로에서 수신된 신호를 표시 하는 복소 가우시안 랜덤변수이다. 식 (1)에서 알 수 있는 것처럼 PDP는 수신된 신호의 다중 경로 전송에 따른 시간 분산을 표현한다. PDP의 형태와 길이는 채널 환경, 특히 방해물들의 크기와 밀도에 영향을 받는다. 일반적으로 짧은 전송 경로가 긴 전송 경로보다 더 빈번히 발생하며 전체 수신 신호 에너지의 대부분을 차지한다. 또한 종종 특정 방해물이 직접적으로 PDP의 형태에 영향을 미치게 된다. 대부분의 채널 분류는 채널의 방해물의 밀도에 따라 도시(urban), 시골(rural) 그리고 교외(suburban)로 분류하고 있는데 이러한 전송 채널의 정량적인 분류는 채널 환경에 대한 또 다른 모호한 해석을 유발하고 채널의 강한 시변적인 특성 때문에 지리학적인 상황에 따른 명확한 분류는 불가능하다. 그러나 실측 데이터를 기준으로 제안된 JTC 모델은 무선 채널 환경에 따른 시간 지연 및 전력

값들을 비교적 상세하게 분류하고 있으므로 최근에는 실내와 실외 무선 환경의 광대역 채널 특성을 나타내기 위한 표준 모델로 자주 이용되고 있다.

그러므로 본 논문에서는 전형적인 무선 전송채널 환경을 몇 가지 종류로 분류하여 표시하고 있는 JTC 모델을 기준으로 하여 채널 특성에 따른 각 PDP 모델에서의 파라미터들을 적절히 선정하였다.

III. 시뮬레이션 모델

1. 모의실험 구조

OFDM 통신 시스템은 데이터를 여러 개의 부반송파(subcarrier)를 통하여 동시에 데이터를 전송하는 방식으로 부 채널 각각의 직교성을 이용하여 채널을 중첩시킴으로써 주파수 대역의 효율성을 높일 수 있다. 또한 여러 개의 부 채널을 사용하므로 광대역 채널에서의 주파수 선택적 페이딩 (frequency selective fading) 현상을 경감시키는 효과를 얻을 수 있기 때문에 정보 전송의 정확도를 증진시킬 수 있다[6]. 변조부를 통하여 발생된 데이터는 S/P(Serial to Parallel) 변환기와 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)과정을 통하여 전송 채널로 전송되며 채널을 통한 신호는 수신부에서 FFT(Fast Fourier Transform), P/S 변환기 그리고 복조부를 통하여 수신하게 된다. 본 논문에서 적용한 변·복조부는 16-QAM 방식을 적용하였으며 OFDM 통신 시스템의 변조부와 복조부는 동기 되었다는 가정 하에 반송파 위상 지터 및 도플러 효과는 고려하지 않았다. 또한 채널의 특성변화에 따른 심볼간의 간섭현상을 다각도로 분석하기 위하여 OFDM 심볼들 사이에 guard time을 삽입하지 않았다. 모의실험 모델에서 입력 데이터는 변·복조부, S/P converter 그리고 IFFT단을 거친 후 다중 경로 채널로 전송되며 채널을 통한 신호는 수신단에서 송신단의 역의 과정인 FFT, P/S converter 그리고 복조부를 통하여 최종 수신되게 되며 시스템의 BER은 입력 데이터와 최종 수신된 신호의 비교로 측정된다. 이때 변·복조부는 16-QAM, IFFT와 FFT는 512-point로 하여 전체 모의 프로그램을 코딩하였다.

2. 채널 모델

JTC에서 권고하고 있는 무선 채널 모델은 광대역

신호의 전송 특성을 모의 실험 하기 위해 실측 데이터를 기준으로 개발되었으며 주파수 선택적 채널을 광대역 지연 선로(WTDN: Wideband Tapped Delay Line) 모델로 표시하는 방법이다[7]. 이 모델은 무선 채널을 복소 가우시안이며, wide-sense stationary uncorrelated scattering channel 로 가정하였다. 환경에 따라서 채널 경로가 다르므로 수신기에 도달하는 신호 간에 서로 다른 시간 지연을 가지며 이들의 진폭 또한 각각 다르게 나타난다. 또한 각 환경마다 시간에 따라 변화하는 특성을 고려하여 3개의 전형적인 채널 즉, 채널 A, 채널 B, 채널 C로 구분하고 있다. 채널 A는 가장 빈번히 발생하며 지연 확산이 작은 채널이고, 채널 B는 자주 발생되며 중간 정도의 지연 확산 값을 갖는 채널이다. 그리고 채널 C는 매우 드물게 발생하며 지연 확산이 매우 큰 채널의 경우이다.

이러한 JTC 모델을 기준으로 채널의 상태에 따라 적절히 변화시킨 파라미터들은 다음과 같다.

- (1) Main profile의 길이
- (2) Peak의 위치
- (3) Echo profile의 감쇠
- (4) Echo profile의 지연시간

시스템의 BER은 입출력 데이터간의 비교로 측정된다. 따라서 본 모의실험에서는 100/BER 개 이상의 입력 데이터를 이용하여 BER 값을 구하였다. 또한 제시된 시스템의 최종적인 BER은 50번의 모의실험을 통한 평균값을 표시하였다.

IV. 모의실험 및 결과분석

1. Main profile의 길이

일반적으로 PDP에서의 지연시간과 수신된 신호전력사이의 관계는 negative exponential 함수로 표시할 수 있다. 채널 환경이 도시인 경우 송신단과 수신단 사이의 LOS경로는 주변의 건물 등 방해물에 의해서 차단되므로 거의 존재하지 않는다. 따라서 일반적으로 도시 환경보다는 시골 또는 교외에서의 PDP의 기울기가 더 가파르게 나타날 것이다. 일반적으로 지수 함수적으로 감소하는 다음과 같은 수식모델로 표현되어질 수

있다.

$$\overline{Q}(\tau) = e^{-\tau/\tau_d} \tag{2}$$

여기서 τ 는 지연 시간을 의미하며 τ_d 는 감쇠 상수이다. 제안된 모델의 설정은 실외 거주지 환경에서의 JTC 채널 모델을 기본으로 하여 감쇠 상수, τ_d 를 기준 값 60[ns]에서 200[ns], 500[ns]로 변화시킨 경우이다. 그림 1은 모의 실험한 결과로서 PDP에서의 main profile의 길이가 길어짐에 따라 시스템의 BER이 증가하고 있음을 보여준다. 즉 PDP의 감쇠 상수가 커질수록 시스템의 BER이 증가하며 이와 같은 현상은 E_b/N_0 값이 클수록 더욱 뚜렷한 차이를 보인다. 즉, 전송된 신호의 심볼간 간섭이 심해지기 때문에 BER이 커지게 됨을 알 수 있다.

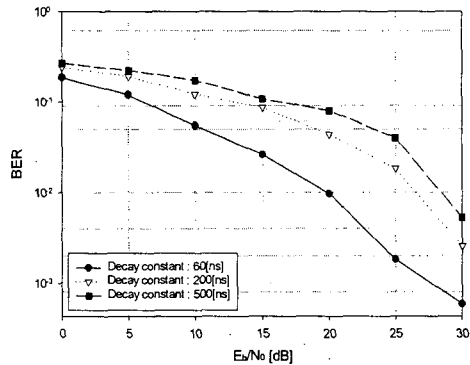


그림 1. Main profile의 길이에 따른 BER
Fig 1. BER according to the length of main profile

2. 첨두치의 위치

PDP에서의 main profile의 첨두치(peak) 위치는 정규화된 수신 전력의 값이 0dB가 되는 곳으로 표시하였다. 실험 모델은 main profile의 길이에 따른 시스템의 성능 평가에 적용된 모델과 동일한 감쇠 상수가 60[ns]인 실외 거주지 환경을 모델로 설정하였다. 첨두치 위치는 0[ns]부터 50[ns]씩 이동하는 것으로 가정하여 250[ns]까지 변화시키면서 모의실험을 하였다. 실험 결과는 첨두치 위치가 우측으로 옮겨감에 따라, 즉

첨두치 지연시간이 길어짐에 따라 전체적으로 미세한 BER의 증가가 있음을 알 수 있다. 그림 2는 E_b/N_0 를 5, 10, 15, 20, 30[dB]로 변화시키면서 얻은 결과를 표시한다.

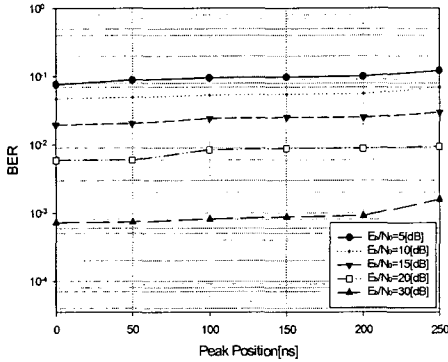


그림 2. 첨두치 위치에 따른 BER
Fig 2. BER according to the peak position

3. Echo profile의 감쇠

Echo profile은 전송단에서 송신되는 신호들이 전송 채널의 특성인 산란, 반사 그리고 분산 등에 의하여 서로 다른 시간 지연과 감쇠를 갖는 신호들이 수신됨으로써 생성된다. 이때 생성된 Echo profile은 시스템의 성능에 많은 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Echo profile의 강도에 따른 시스템의 성능을 분석하기 위한 모의실험을 수행하였다. 적용된 실험 모델은 PDP profile의 길이가 2000[ns] 정도를 갖는 실외 도시/교외 저층 지역(high antenna)의 JTC 모델을 기준으로 설정하였다. 그러므로 main profile 과 echo profile로 나누어 각각의 감쇠상수 및 크기를 적절히 조정하여 그림 3과 같이 표시되는 분석용 모델을 얻을 수 있다. 감쇠를 2[dB]부터 2.5[dB]간격으로 20[dB]까지 변경하면서 모의실험을 하였다. Echo profile의 감쇠와 BER의 관계를 표시하는 결과 그래프를 그림 4에 표시하였다. 그림 4에서 보는 것처럼 echo profile의 감쇠가 클수록 시스템의 BER은 점차 줄어든다는 것을 알 수 있다. 또한 이와 같은 현상은 E_b/N_0 값이 클수록 더욱 현저하게 차이를 보인다.

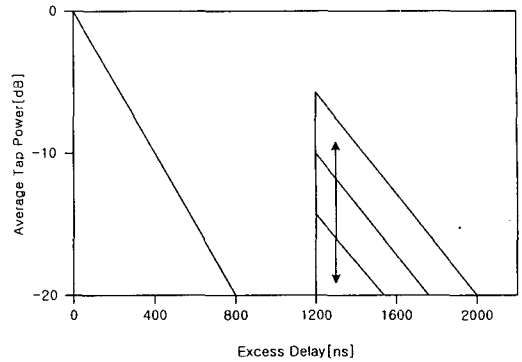


그림 3. Echo profile의 감쇠모델
Fig 3. The attenuation model of echo profile

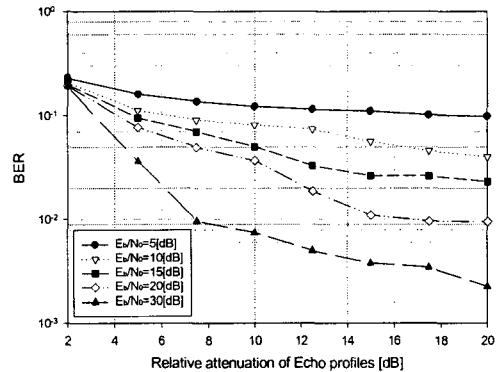


그림 4. Echo profile의 감쇠에 따른 BER
Fig 4. BER according to the attenuation of echo profile

4. Echo profile의 지연시간

이제 echo profile의 수신 지연시간이 증가함에 따라 시스템의 BER에 어떠한 영향을 미치는가를 분석하여 보자. 실험하고자 하는 채널 모델은 PDP profile의 길이가 2675[ns]를 갖는 실외 고층 도시 지역(high antenna)을 나타내는 JTC 모델을 기준으로 설정하였다. 따라서 모의실험을 위한 제안모델을 그림 5와 같이 표시하였다. 즉, 1000[ns]를 echo profile의 시작점으로 하여 지연시간을 0[ns]부터 200[ns]단위로 1400[ns]까지 변화시키면서 모의실험 결과를 구하였다. 그림 6의 결과에서 보는 것처럼 시스템의 BER은 200[ns] 이상의 지연시간을 갖는 경우 지연시간의 변화에 따라 주기적으로 변동하고 있음을 알 수 있다. 이러한 BER의 주기

적인 변화는 각 신호의 echo profile 과 main profile 간의 간섭 현상으로서 설명할 수 있다. 즉, 높은 BER 값을 갖는 경우는 연속되는 심볼의 echo profile 들과 main profile 들의 겹치는 부분이 많아 간섭 현상이 심한 경우이다. BER 값이 낮은 경우는 다행히 echo profile들과 main profile들의 겹치는 부분이 적어 간섭이 심하지 않을 때이다. 이러한 현상은 매 심볼 주기마다 발생하게 되므로 결과적으로 BER의 형태는 주기적으로 변동하는 형태로 표시되어진다.

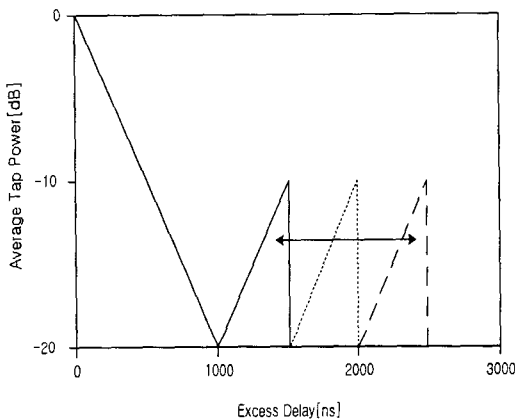


그림 5. Echo profile의 지연시간 모델
Fig 5. The delay time model of echo profile

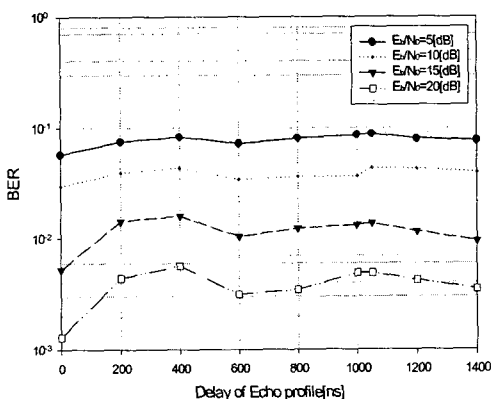


그림 6. Echo profile의 지연시간에 따른 BER
Fig 6. BER according to the delay time of echo profile

V. 결론

본 논문에서는 PDP profile의 변화에 따른 즉, 전송 채널의 특성에 따른 OFDM 시스템의 성능을 모의실험을 통하여 분석하고 평가하였다. 표준으로 널리 사용되는 JTC 모델을 기준으로 하여 시험하고자 하는 전송 채널을 모의 설정하였으며 main profile의 길이, peak의 위치, echo profile의 감쇠 그리고 echo 그룹의 지연시간을 채널 변수로 설정하였다. 이러한 각각의 변수들을 적절하게 변화시킴으로서 실질적인 채널상태의 변화를 충실히 표시하고자 하였다. 그러므로 이러한 변수들이 변함에 따라 즉 채널의 상태가 바뀔 때 따라 시스템의 BER이 어떠한 변화를 보이는지 사례별로 구체적으로 분석하였다. 본 논문에서의 모의실험에서 볼 수 있는 것처럼 PDP profile의 형태를 결정짓는 변수들을 변화시킴으로서 다양한 전송채널에 대한 세부적인 모델링이 가능하다. 따라서 이러한 PDP profile을 나타내는 세부적인 모델을 이용하여 채널의 상태에 따른 비교적 정확한 OFDM 통신시스템의 성능 평가가 가능하다. 그러므로 이러한 성능분석 방법 및 결과를 활용한다면 설계하고자 하는 OFDM 통신 시스템의 성능 정도를 미리 분석하는 것이 용이할 뿐만 아니라 채널의 상태변화에 따른 성능 열화를 보상하기 위한 기법의 선택에도 많은 도움이 될 것이다.

참고문헌

- [1] R. Davis, et al., "A comparison of indoor and urban propagation at 1.7, 29 and 60 GHz," Proc. 41st IEEE Vehicular Technology Conf., pp. 289-293, 1991
- [2] D. M. J. Devasirvatham, "Multi-frequency propagation measurement and models in a large metropolitan commercial buildings for personal communication," Proc. PIMRC'91, pp. 98-103, 1991
- [3] R. Ganesh and K. Pahlavan, "Statistics of short time and spatial variations measured in wideband indoor radio channels," IEE Proc. H: Microwave, Antennas and Propagation, 140, pp. 297-302, 1993
- [4] Joint Technical Committee of Committee T1 R1P1.4

and TIA TR 46.3.3/TR 45.4.4 on wireless access,
"Final report on RF channel characterization," paper
no. TTC(AIR)/ 94.01.17-238R4, 1994

- [5] C. C. Huang and R. E. Khayata, "Delay spreads and channel dynamics in the ISM bands," Proc. of the International Communications Conf. (ICC) 1992
- [6] R. V. Nee and R. Prasad, *OFDM Wireless Multimedia Communications*, Artech House, 2000.
- [7] COST 207 TD(86)51-Rev3(WG1): "Proposal on channel transfer functions to be used in GSM tests," 1986
- [8] G. L. Stuber, *Principles of Mobile Communication*, Kluwer Academy Publication, 1996

저자약력

이종길(Jong Gil Lee)



1982년 2월 연세대학교 전자 공학
과 (공학사)

1985년 1월 미국 Case Western
Reserve University, Electrical
Eng. (M.S.)

1990년 5월 미국 Clemson University,
Electrical Eng. (Ph.D.)

1991년 1월~1993년 2월 삼성전자 특수연구소

1993년 3월~현재 인천대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심 분야: 무선통신, 레이다신호처리, 통신시스템,
스펙트럼분석