

# 상관관계가 존재하는 두 개의 레일리 채널에 대한 페이딩 시뮬레이션

정희원 위정화\*, 박용진\*\*, 김동우\*\*\*

## A New Deterministic Simulation Model for Two Correlated Rayleigh Fading Channels

Jung-Hwa Wui\*, Yong-Jin Park\*\*, Dongwoo Kim\*\*\* *Regular Members*

### 요약

본 논문에서는 이동 통신에서 주로 쓰이는 하향/상향링크(downlink/uplink)처럼 상호 간의 상관관계가 존재하는 두 개의 채널에 대한 시뮬레이션 방법을 제안한다. 제안된 방법은 기존 방법의 문제점인 채널 간의 상관관계가 수학적 기준모델과 일치하지 않는 점을 개선한 방법이다. 레일리 페이딩 채널 시뮬레이션 모델은 유한개의 삼각함수의 합을 이용한 SOS(Sum-of-Sinusoids) 방법을 사용하였다. 이 방법은 페이딩 신호의 샘플들을 발생할 때 효율적인 방법으로 알려져 있으며 수학적 기준모델에 대한 정확한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있다. 제안된 모델은 기준모델의 이론적인 상관관계와 시뮬레이터로부터 얻은 채널 간의 상관관계의 오차를 줄이기 위해 MSE를 최소화하는 방식을 이용하면서 평균전력을 이론치와 같게 유지하는 방법이다. 실험결과를 통해 제안한 방법이 기존의 방법보다 기준모델의 수학적 상관관계를 더욱 정확히 모사하는 것을 확인하였다.

**Key Words** : Correlated Rayleigh Channels, Fading Simulator, Auto-correlation, Cross-correlation

### ABSTRACT

A Rayleigh fading channel simulator that realizes given correlation properties between two channels such as downlink/uplink is described. We propose an improved channel simulator that provides more accurate match between reference correlation and simulated one. The proposed channel simulator is based on a sum-of-sinusoids (SOS) method that handles finite sums of weighted sinusoid functions. SOS method is widely accepted in generating fading signals and obtain the exact match with the reference model if infinite number of weighted sinusoids are used. The proposed channel simulator minimizes mean-square-error (MSE) to obtain a close matched correlation properties.

### I. 서론

최근 무선 통신 시스템의 성능을 평가하기 위하여 무선 채널 구간의 페이딩(fading)에 대한 정확한 시뮬레이션(simulation)의 중요성이 점점 더 커지고 있다.

통신시스템의 발전이 최초 한 개의 채널을 사용하는 시스템에서 최근 MIMO(Multi-Input Multi-Output)나 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)과 같은 여러 개의 채널을 사용함에 따라 페이딩 채널 시뮬레이션 역시 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[1]</sup>.

※ 본 연구는 2009년 2단계 두뇌한국 21(BK21) 과제의 지원으로 수행되었습니다.

\* 한양대학교 전자전기제어계측공학과 이동통신망연구실 (jhwui@wnl.hanyang.ac.kr)

\*\* LG전자 단말연구소 (nowcika@lge.com), \*\*\* 한양대학교 전자통신공학과(dkim@hanyang.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-10-444, 접수일자 : 2010년 3월 23일, 최종논문접수일자 : 2010년 3월 24일

페이딩 채널 시뮬레이션의 연구분야는 가정된 페이딩 모형을 얼마나 잘 표현하는가에 대한 것이었다. 그리고 가장 많이 채택되어 왔던 가정 중의 하나가 바로 레일리(Rayleigh) 페이딩 채널 환경이다. 레일리 페이딩 채널 환경은 전파를 수신하는 사용자가 움직이면 도플러 현상과 주변의 전파를 반사시키는 물체의 위치 변화에 의해 페이딩이 발생하게 되는데, 이 때 기지국에서 사용자에게 직접적으로 들어오는 신호(LOS)는 없다고 가정하고 반사되어 들어오는 신호는 모두 같은 시간에 들어온다고 가정하는 것이다<sup>3,4)</sup>.

이러한 가정이 많이 사용되어 온 이유는 실제 환경과는 약간 다르지만 시스템을 분석하거나 시뮬레이션하는 것이 용이하기 때문이다. 채널 시뮬레이션의 중요한 요소들을 나열해 보면 자기 상관계수함수(Auto-correlation), LCR(Level Crossing Rate), ADF(Average Duration Fade) 등을 생각할 수 있다. 그래서 레일리 페이딩 채널 환경을 가정된 시뮬레이션을 할 때에는 어떻게 하면 이 3가지 요소를 이론적인 값과 비슷하게 시뮬레이션 하는가가 주요 연구 대상 중 하나였다. 그러나 최근 채널 수가 2개 이상인 되는 실제환경과 비슷한 채널환경을 고려하여 앞에서 말한 3가지 요소 외에 채널간의 상호상관관계(cross-correlation)가 시뮬레이션의 중요한 요소 중 하나가 되었다.

그러므로 기존에 제안되어 왔던 모델들은 단일 채널을 기본 모델로 하고 있거나 채널이 서로 독립임을 가정한 것이 대부분이기 때문에 실제 환경처럼 서로 연관 되어 있는 채널을 고려하지 못했다. 예를 들면 주파수 호핑(frequency hopping)을 할 경우 이전 채널과 이후 채널이 서로 연관이 되어있고, 상향링크(uplink)와 하향링크(downlink) 채널을 고려할 경우 역시 상호 간의 연관성이 있다. 이런 연관성을 고려하여 GSM 시스템의 FH 모델을 기반으로 한 레일리 채널 시뮬레이터가 제안되었다 [5]. 그러나 분산 경로(scattering component)의 개수가 적을 경우 기준모델과 차이를 보이고 있다. 또한 분산 경로의 개수가 무한대로 늘어난다고 해도 주파수 거리가 조금만 멀어지면 기준모델과 다른 모습을 보이게 된다.

본 논문에서 제안된 모델은 기존 시뮬레이터의 채널 간의 상관관계(correlation)와 기준모델의 이론적인 상관관계의 차를 줄이기 위해 MSE를 최소화 하는 방식을 이용한다. 이때 기준모델과 시뮬레이션 모델 간 평균전력(mean power)의 불일치가 발생한다. 이를 해결하기 위해 두 그룹으로 나누어진 각각의 도플러 계수에 가중치를 두어 평균전력을 기준모델과 같게 유

지하게 만드는 방법을 제안하고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 수학적인 모델로서 시뮬레이션 모델의 성능평가의 기준이 될 모델을 설명하고, III장에서는 하향/상향링크 채널 처럼 두 채널 간의 상관관계가 존재하는 시뮬레이션 모델에 대해 알아본다. 기존에 제안된 시뮬레이션 모델을 먼저 확인하고 이 모델을 기반으로 개선된 성능을 가지는 시뮬레이션 모델을 제안한다. IV장에서는 기존에 제안된 모델과 본 논문에서 제안한 모델을 기준모델과 비교 평가하여 본다. V장에서 이에 대한 결론을 맺고자 한다.

## II. 기준모델

레일리(Rayleigh) 페이딩 환경을 나타내는 시뮬레이션 모델링의 방법 중 하나인 SOS(Sum of Sinusoids)는 가우시안 랜덤 프로세스(Gaussian random process)로 표현되어진다. 상향링크와 하향링크로 고려하여 두 링크가 레일리 프로세스(Rayleigh process) 형식을 따른다고 가정을 한다면, 식 (1)과 (2) 같이 표현할 수 있다.

$$\zeta(t) = |\mu_1(t) + j\mu_2(t)|, \text{ at } F_{\text{up}} \quad (1)$$

$$\zeta'(t) = |\mu'_1(t) + j\mu'_2(t)|, \text{ at } F_{\text{down}} \quad (2)$$

여기에서  $\mu_i(t)$ 와  $\mu'_i(t)$  ( $i=1,2$ )는 모두 평균이 0(zero)이고, 분산(variance)은  $\sigma_0^2$ 이라고 가정된 가우시안 잡음 프로세스(Gaussian noise process)로 표현된다. 그리고 두 채널의 주파수 차이를 나타내는 변수로  $\chi$ 로 약속하고  $\chi = F_{\text{down}} - F_{\text{up}}$  로 정의한다. 일반적인  $\zeta(t)$ 와  $\zeta'(t)$ 는 확률적으로 독립적이지 않지만, 만약 두 채널의 차이인 변수  $|\chi|$ 가 커지면 커질수록 독립적인 특성을 갖는다. 따라서  $|\chi|$ 가 충분히 크다면,  $\zeta(t)$ 와  $\zeta'(t)$ 는 확률적으로 독립적이라고 간주될 수 있다.

레일리 프로세스인  $\zeta(t)$ 와  $\zeta'(t)$ 의 상관관계 특성은 다음과 같이 자기상관(autocorrelation) 함수와 상호상관(cross-correlation) 함수로 각각 정의된다.

$$r_{\mu_i\mu_j}(\tau) \equiv E\{\mu_i(t)\mu_j(t+\tau)\} \quad (3)$$

$$r_{\mu_i\mu'_j}(\tau, \chi) \equiv E\{\mu_i(t)\mu'_j(t+\tau)\} \quad (4)$$

이때 채널 간의 상관관계는 당연히  $\tau$ 뿐만 아니라

$\chi$ 의 변수이기도 하다. 만약, 무지향성 수신 안테나를 사용한다고 가정하면 전파지연(propagation delay)의 분포는 지수분포(exponential distribution)를 따르기 때문에 식 (5)와 같이 되고 이때  $\lambda$ 를 채널의 지연분포(delay spread)라고 부른다.

$$p(\tau') = \frac{1}{\lambda} e^{-\tau'/\lambda}, \tau' \geq 0 \quad (5)$$

이와 같은 가정으로 식 (3)과 (4)를 이용하여 상관관계를 구해보면 식 (6), (7), (8) 그리고 (9)와 같이 된다<sup>3)</sup>.

$$r_{\mu, \mu_1}(\tau) = r_{\mu, \mu_2}(\tau) = \sigma_0^2 J_0(2\pi f_{\max} \tau) \quad (6)$$

$$r_{\mu, \mu_2}(\tau) = r_{\mu', \mu_2'}(\tau) = 0 \quad (7)$$

$$r_{\mu, \mu_1'}(\tau, \chi) = r_{\mu', \mu_2'}(\tau, \chi) = \frac{\sigma_0^2 J_0(2\pi f_{\max} \tau)}{1 + (2\pi\lambda\chi)^2} \quad (8)$$

$$r_{\mu, \mu_2'}(\tau, \chi) = -r_{\mu', \mu_1'}(\tau, \chi) = -2\pi\lambda\chi r_{\mu, \mu_1'}(\tau, \chi) \quad (9)$$

여기서  $J_0(\cdot)$ 는 0차 제 1종 베셀함수(zero-order Bessel function of the first kind)이며,  $f_{\max}$ 는 최대 도플러 주파수를 나타낸다. 위의 식 (6)~(9)는 이후 언급하는 시뮬레이션 모델들의 성능평가의 기준이 되는 수학적 모델이 된다.

### III. 채널 간 상관관계가 존재하는 시뮬레이터 모델

#### 3.1 기준에 제안된 2-채널 시뮬레이터

기준에 제안된 모델을 확인해 보면 전통적인 결정적(deterministic) 모델을 사용하였다<sup>5)</sup>.  $\tilde{\mu}_i(t)$ 와  $\tilde{\mu}'_i(t)$  ( $i=1,2$ )는 평균 0을 가지고 가우시안 잡음 프로세스를 따른다고 가정을 하고 Rice's SOS (Sum-of-Sinusoids) 방식을 사용하여 표현을 하면 다음과 같이 식 (10), (11)과 같이 표현이 가능하다.

$$\tilde{\mu}_i(t) = \sum_{n=1}^{N_i} c_{i,n} \cos(2\pi f_{i,n} t + \theta_{i,n}), \text{ at } F_{\text{up}} \quad (10)$$

$$\tilde{\mu}'_i(t) = \sum_{n=1}^{N_i} c_{i,n} \cos(2\pi f_{i,n} t + \theta'_{i,n}), \text{ at } F_{\text{down}} \quad (11)$$

여기서  $N_i$ 는 SOS 방식에서 가우시안 불규칙 함수를 정현파(sinusoids)가 몇 개로 이루어져 있는지를 나타내는 파라미터이다. 이 변수가 커지면 좋은 성능을 가지게 되지만 계산량이 많아지게 되어 시뮬레이션 속도가 느려지게 되고, 적으면 시간은 빠르지만 성능이 나빠지기 때문에 시뮬레이션의 목적과 환경에 맞게 적절한  $N_i$ 를 선택하는 것이 좋으며 일반적으로 선택되는 범위는 7개 이상 50개 미만을 사용하고 있다. 또한  $\tilde{\mu}_1(t)$ 와  $\tilde{\mu}_2(t)$  ( $\tilde{\mu}'_1(t)$ 와  $\tilde{\mu}'_2(t)$ )의 상호간의 무관한(uncorrelated) 성질을 유지하기 위해  $N_2 = N_1 + 1$ 로 설정하였다.

도플러 계수라 불리는  $c_{i,n}$ 과 도플러 주파수  $f_{i,n}$ 는 MEDS(method of exact Doppler spread) 방법을 사용하여 다음과 같이 도출해낸다<sup>6)</sup>.

$$c_{i,n} = \sigma_0 \sqrt{\frac{2}{N_i}} \quad (12)$$

$$f_{i,n} = f_{\max} \sin\left[\frac{\pi}{2N_i}\left(n - \frac{1}{2}\right)\right] \quad (13)$$

그리고 [5]에 의해 도플러 위상은 다음과 같다.

$$\theta_{i,n} = 2\pi F_{\text{up}} \phi_{i,n}, \theta'_{i,n} = 2\pi(F_{\text{up}} + \chi) \phi_{i,n} \quad (14)$$

여기서,

$$\phi_{i,n} = \lambda \ln\left(\frac{1}{1 - (n-1/2)/N_i}\right) \quad (15)$$

으로 제안되었다.

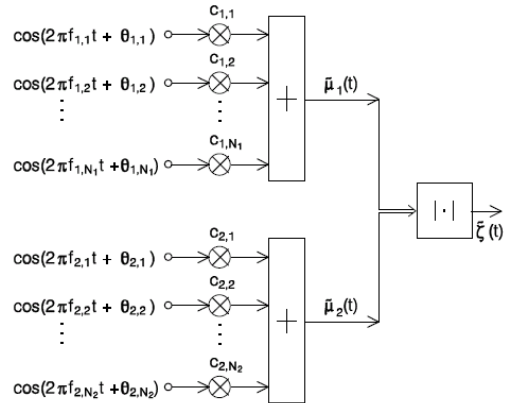


그림 1. 레일리 페이딩 채널 시뮬레이터

그림 1은 상향링크의 주파수  $F_{up}$ 에 해당되는 시물레이션 모델이다. 만약,  $\theta_{i,n}$ 을  $\theta'_{i,n}$ 으로 대체한다면  $F_{down}$ 에 해당하는  $\zeta'(t)$ 를 얻을 수 있다.

이 모델을 기준모델과 비교하기 위해 상관관계를 구해보면 모든  $i=1, 2$  와  $j=1, 2$ 에 대해서 다음과 같이 식 (16), (17)로 표현된다.

$$\tilde{r}_{\mu_i\mu_j}(\tau) \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \tilde{\mu}_i(t) \tilde{\mu}_j(t+\tau) dt \quad (16)$$

$$\tilde{r}_{\mu_i\mu'_j}(\tau, \chi) \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \tilde{\mu}_i(t) \tilde{\mu}'_j(t+\tau) dt \quad (17)$$

식 (10)~(15)를 식 (16), (17)에 적용하여 정리하여 보면 식 (18)~(21)과 같이 계산된다<sup>[5]</sup>.

$$\tilde{r}_{\mu_i\mu_i}(\tau) = \sum_{n=1}^{N_i} \frac{C_{i,n}^2}{2} \cos(2\pi f_{i,n}\tau) \quad (18)$$

$$\tilde{r}_{\mu_1\mu_2}(\tau) = \tilde{r}_{\mu'_1\mu'_2}(\tau) = 0 \quad (19)$$

$$\tilde{r}_{\mu_i\mu'_i}(\tau, \chi) = \sum_{n=1}^{N_i} \frac{C_{i,n}^2}{2} \cos(2\pi f_{i,n}\tau + 2\pi\phi_{i,n}\chi) \quad (20)$$

$$\tilde{r}_{\mu_1\mu'_2}(\tau, \chi) = \tilde{r}_{\mu_2\mu'_1}(\tau, \chi) = 0 \quad (21)$$

### 3.2 개선된 채널 시뮬레이터

식 (6)~(9)와 식 (18)~(21)을 비교해 보면  $\tilde{r}_{\mu_i\mu'_i}(\tau, \chi)$ 이 이론적인 자기상관관계 수식을 따라가지 않음을 볼 수 있다. 이것을 보정하기 위해 MSE(Mean Square Error)를 최소화하는 방법을 사용하면 식 (22)와 같이 정의할 수 있다.

$$\min \left\{ \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} |r_{\mu_i\mu'_i}(\tau, \chi) - \tilde{r}_{\mu_i\mu'_i}(\tau, \chi)|^2 d\tau \right\} \quad (22)$$

이 때 도플러 계수가 변수가 되므로  $N_i$ 개의 변수가 있게 된다. 본 논문에서는 (22)번 문제처럼  $N_i$ 개의 변수에 대한 최적화 문제를 2개의 변수에 대한 최적화 문제로 바꾸어 문제를 간단하게 한다. 이 방법은 최적해를 직접적인 수식으로 도출할 수 있게 하여, 다변수 비선형 최적화 과정에 필수적인 반복적 연산을 없애어 계산 시간과 복잡도를 줄일 수 있게 된다. 따라서

변수를 도플러 계수로 설정하고 계산의 간단화를 위해 구성 요소들의 구간을  $(1 \sim N_i - 1, N_i)$ 로 나누어 표현해 보면 식 (20)을 식 (23)과 같이 표현할 수 있다. 여기에서  $(1 \sim N_i - 1)$ 까지 범위에는 최적화시키기 위한  $\alpha$ 를,  $N_i$ 번째에는  $\beta$ 를 곱하여 준 것을 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{\mu_i\mu'_i}(\tau, \chi) &= \alpha \sum_{n=1}^{N_i-1} \frac{C_{i,n}^2}{2} \cos(2\pi f_{i,n}\tau + 2\pi\phi_{i,n}\chi) \\ &\quad + \beta \frac{C_{i,N_i}^2}{2} \cos(2\pi f_{i,N_i}\tau + 2\pi\phi_{i,N_i}\chi) \\ &= \alpha \frac{\sigma_0^2}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i-1} \cos(2\pi f_{i,n}\tau + 2\pi\phi_{i,n}\chi) \\ &\quad + \beta \frac{\sigma_0^2}{N_i} \cos(2\pi f_{i,N_i}\tau + 2\pi\phi_{i,N_i}\chi) \end{aligned} \quad (23)$$

이와 같이 나누어 도플러 계수를 조정하기 위해  $\alpha$ ,  $\beta$  값을 결정할 때 유의해야 할 점이 있다. 그것은 평균전력을 기준모델과 같게 유지시켜 주는 것인데 그것을 위해 식 (24)을 만족하는  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 찾아야 한다.

$$\tilde{\sigma}_0^2 = \sum_{n=1}^{N_i} \frac{C_{i,n}^2}{2} \quad (24)$$

$$\sum_{n=1}^{N_i} \frac{C_{i,n}^2}{2} = \alpha \frac{\sigma_0^2}{N_i} (N_i - 1) + \beta \frac{\sigma_0^2}{N_i} = \sigma_0^2 \quad (25)$$

식 (25)를  $\alpha$ 에 대하여 정리해 보면 식 (26)과 같이 나오게 된다.

$$\alpha = \frac{N_i - \beta}{N_i - 1}, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \quad (26)$$

식 (26)을 식 (23)에 대입하여 정리를 하면 식 (27)과 같이 정리된다. 이 식을 식 (22)에 대입하여 MSE를 최소화하는  $\beta$ 값을 찾아야한다.

$$\begin{aligned} A(\tau, \chi) &= r_{\mu_i\mu'_i}(\tau, \chi) \\ &\quad - \frac{N_i}{N_i - 1} \frac{\sigma_0^2}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i-1} \cos(2\pi f_{i,n}\tau + 2\pi\phi_{i,n}\chi) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{\mu\mu_i}(\tau, \chi) &= \left( \frac{N_i - \beta}{N_i - 1} \frac{\sigma_0^2}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i-1} \cos(2\pi f_{i,n}\tau + 2\pi\phi_{i,n}\chi) + \beta \frac{\sigma_0^2}{N_i} \cos(2\pi f_{i,N_i}\tau + 2\pi\phi_{i,N_i}\chi) \right) \\ &= \frac{N_i}{N_i - 1} \frac{\sigma_0^2}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i-1} \cos(2\pi f_{i,n}\tau + 2\pi\phi_{i,n}\chi) + \beta \frac{\sigma_0^2}{N_i} \left\{ \cos(2\pi f_{i,N_i}\tau + 2\pi\phi_{i,N_i}\chi) - \frac{1}{N_i - 1} \sum_{n=1}^{N_i-1} \cos(2\pi f_{i,n}\tau + 2\pi\phi_{i,n}\chi) \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \min \left\{ \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} |r_{\mu\mu_i}(\tau, \chi) - \tilde{r}_{\mu\mu_i}(\tau, \chi)|^2 d\tau \right\} &= \min \left\{ \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} |A(\tau, \chi) - \beta B(\tau, \chi)|^2 d\tau \right\} \\ &= \min \left\{ \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} (A^2(\tau, \chi) - 2\beta A(\tau, \chi)B(\tau, \chi) + \beta^2 B^2(\tau, \chi)) d\tau \right\} \\ &= \min \left\{ \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} A^2(\tau, \chi) d\tau - 2\beta \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} A(\tau, \chi)B(\tau, \chi) d\tau + \beta^2 \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} B^2(\tau, \chi) d\tau \right\} \\ &= \min \left\{ \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} B^2(\tau, \chi) d\tau \times \left( \left( \beta - \frac{\int_0^{\tau_{\max}} A(\tau, \chi)B(\tau, \chi) d\tau}{\int_0^{\tau_{\max}} B^2(\tau, \chi) d\tau} \right)^2 - \left( \frac{\int_0^{\tau_{\max}} A(\tau, \chi)B(\tau, \chi) d\tau}{\int_0^{\tau_{\max}} B^2(\tau, \chi) d\tau} \right)^2 + \frac{\int_0^{\tau_{\max}} A^2(\tau, \chi) d\tau}{\int_0^{\tau_{\max}} B^2(\tau, \chi) d\tau} \right) \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} B(\tau, \chi) &= \frac{\sigma_0^2}{N_i} [\cos(2\pi f_{i,N_i}\tau + 2\pi\phi_{i,N_i}\chi) \\ &\quad - \frac{1}{N_i - 1} \sum_{n=1}^{N_i-1} \cos(2\pi f_{i,n}\tau + 2\pi\phi_{i,n}\chi)] \end{aligned} \quad (29)$$

식 (28), (29)를 식 (22)에 넣어 정리를 하면 식 (30)과 같이 표현된다.

식 (30)에서 보면  $\beta$ 가 식 (31)과 같이 되었을 경우 최소값을 가지게 되고 그 값은 식 (32)와 같이 표현된다.

$$\beta = \frac{\int_0^{\tau_{\max}} A(\tau, \chi)B(\tau, \chi) d\tau}{\int_0^{\tau_{\max}} B^2(\tau, \chi) d\tau} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \min \left\{ \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} |A(\tau, \chi) - \beta B(\tau, \chi)|^2 d\tau \right\} \\ &= \min \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} B^2(\tau, \chi) d\tau \\ &\quad \times \left( \left( \frac{\int_0^{\tau_{\max}} A(\tau, \chi)B(\tau, \chi) d\tau}{\int_0^{\tau_{\max}} B^2(\tau, \chi) d\tau} \right)^2 - \frac{\int_0^{\tau_{\max}} A^2(\tau, \chi) d\tau}{\int_0^{\tau_{\max}} B^2(\tau, \chi) d\tau} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

#### IV. 성능분석

이 장에서는 기준모델과 시뮬레이터들 간의 성능을 모의실험을 통하여 비교하여 본다. 모의실험에 필요한

파라미터 값들은 지연분포인  $\lambda = 1$ ,  $f_{\max} = 91$  Hz,  $\sigma_0^2 = 1$ 로 선택하였다.

그림 2는 식 (8)을 이용하여 기준모델의 채널 간 상호상관관계를 구한 것이다. 식을 살펴보면  $r_{\mu\mu_i}(\tau)$ 에 비교하여 볼 때  $r_{\mu\mu_i}(\tau, \chi)$ 가  $1 + (2\pi\lambda\chi)^2$ 에 반비례하여 변화한다는 것을 알 수 있다. 그렇기 때문에  $\chi$ 가 0일 경우에는  $r_{\mu\mu_i}(\tau)$ 와 같은 상관관계를 나타내고 있다. 그리고 분포를 보면  $\chi$ 축에 평행한 굴곡을 띄고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 3은 기존의 모델의 상관관계를 그린 그림으로  $N_i = 21$ 인 그림이다. 기준모델의 그림에 비교하여 그림 3을 비교해 보면 많은 차이를 가지고 있다는 것을

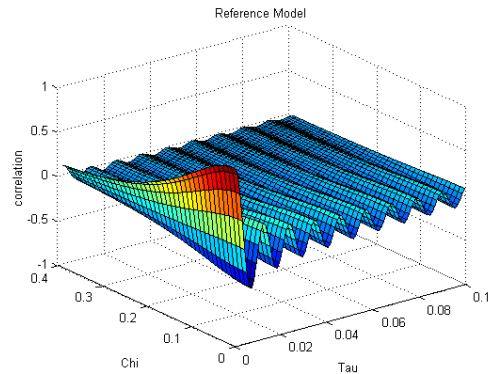


그림 2. 기준모델의 상관관계

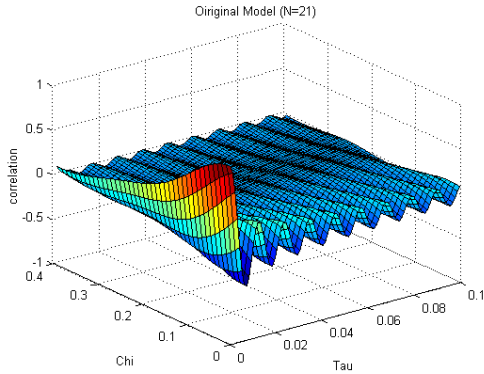


그림 3. 기존모델의 상관관계 ( $N_i = 21$ )

알 수 있다. 이 차이점은 식 (20)을 보면 알 수 있는데  $\chi$  항이  $\cos(2\pi f_{i,m}\tau + 2\pi\phi_{i,m}\chi)$  처럼 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 성질 때문에 기존모델의 그림과 달리  $\chi$  축과 평행하지 않고 많이 기울어진 모습을 보이고 있으며  $\chi$  값이 0.3 정도에서는 굴곡을 보이고 있기도 하다. 이러한 성질을 보완하기 위해 이 논문에서 제안한 방법이 앞에서 말한 것과 같이 도플러 계수에 적절한 가중치를 주는 방식을 사용하면 그림 4와 같은 모형을 띄게 된다.

그림 4는 새로이 이 리포트에서 제안된 모델의  $N_i = 21$ ,  $\tau_{max} = 0.1$  일 경우인 모델의 상관관계의 3차원 모형이다. 그림 3과 그림 4를 비교해 보면 기존의 모델에서 보이던 굴곡이 없어진 모습을 볼 수 있다. 또  $\chi$  축으로 기울어진 기울기 역시 약간 개선된 모습을 보이고 있다. 이는 기존모델과 기존모델의 MSE의 값을 최소화 하는 가중치를 찾아 적용한 결과이다.

그림 5는 기존 모델의 상관관계를 그린 그림으로  $N_i = 200$  인 그림이다. 이 그림 역시 기존모델의 그림

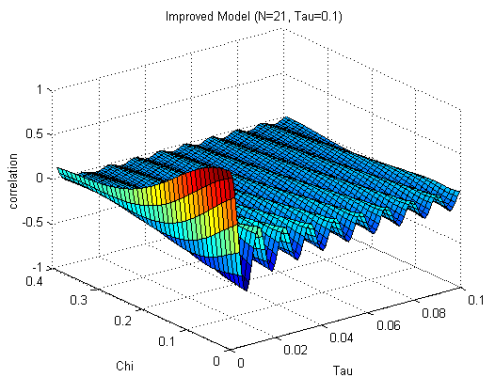


그림 4. 개선된 채널 시뮬레이터의 상관관계( $N_i = 21$ ,  $\tau_{max} = 0.1$ )

에 비교하여 그림 3을 비교해 보면 차이를 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 이는  $N_i$ 가 증가한다고 하여 정확히 기존모델과 일치하지 않는다는 것을 알 수 있다. 특히  $\chi$  축이 증가하면 증가할수록 그 오차가 커지게 되는 단점을 보이고 있다.

그림 6과 7은 기존 모델의 MSE와 새로운 모델의 MSE를  $N_i = 21$ 인 경우에 대하여 각각 그린 것이다. 그림 6과 7을 비교해 보면 새로운 모델의 MSE가 적음을 확인 할 수 있다.

그림 8은  $N_i$ 이 굉장히 큰 경우의 기존 모델의 MSE를 그린 그래프이다. 그림 6과 8을 비교를 한번 해보면 그림 8처럼  $N_i$ 가 클수록 적은 MSE를 가지는 것을 볼 수 있다. 그러나 기존 모델 또한  $N_i$ 가 크더라도 새로운 모델보다는 MSE가 더 많이 존재한다. 좀 더 자세히 비교해 보기 위해  $\tau_{max} = 0.1$  일 때 그린 그래프가 그림 9이다.

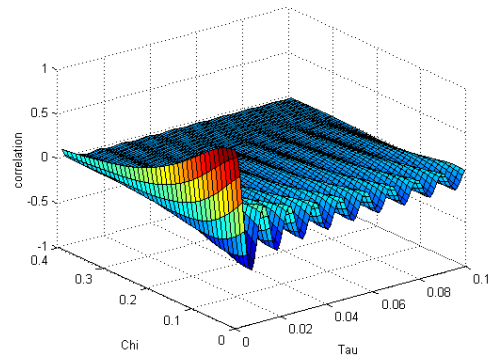


그림 5. 기존모델의 상관관계 ( $N_i = 200$ )

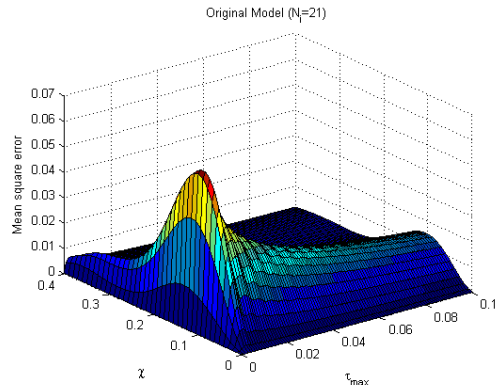


그림 6. 기존 모델의 MSE ( $N_i = 21$ )

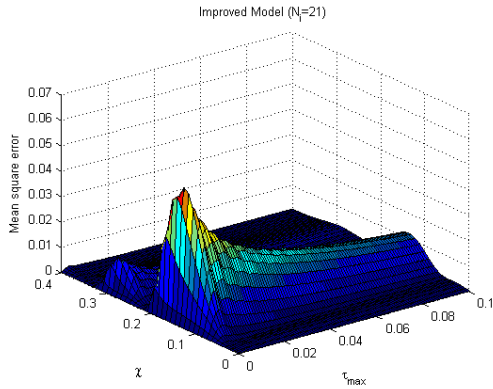


그림 7. 새로운 모델의 MSE( $N_i = 21$ )

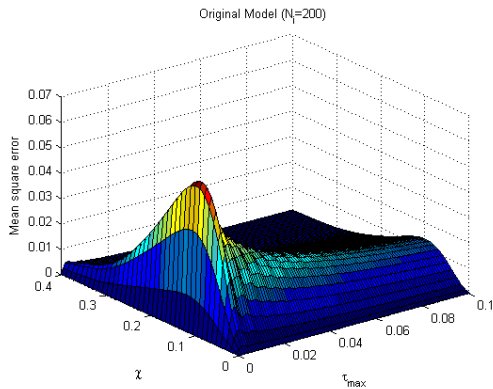


그림 8. 기존 모델의 MSE ( $N_i = 200$ )

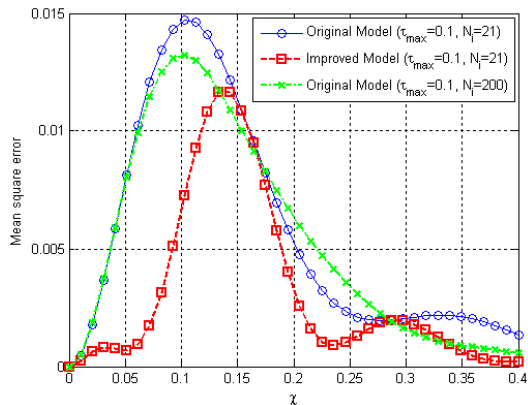


그림 9. MSE의 비교 ( $\tau_{max} = 0.1$ )

## V. 결론

기존의 2-채널을 고려한 모델들은 기존모델과 많은 차이가 있었다. 그러한 것을 보정하기 위해 MSE를

최소화하는 방법을 이용하여 상관관계를 개선할 수 있었다. 여기서는 계산의 간단화를 위하여가우시안 잡음 방식의 구성 요소들을 2개의 구간인 ( $1 \sim N_i - 1, N_i$ )으로 나누어 계산하였으나  $N_i$ 개의 구성 요소들을 각각 최적화시키는 것이 가장 효율적일 것이다. 이 부분은 앞으로 더 연구하여야 할 과제 중 하나이다. 또 이 논문에서는  $\tilde{\mu}_i(t)$ 와  $\tilde{\mu}'_i(t)$ 의 상관관계의 차이를 비교하였지만  $\tilde{\mu}_i(t)$ 와  $\tilde{\mu}'_j(t)$ 의 상관관계의 차이를 이용하여 구하는 것도 앞으로의 연구 과제이다.

## 참고 문헌

- [1] S. Sorooshiyari, D. G. Daut, "Generation of correlated rayleigh fading envelopes for accurate performance analysis of diversity systems" 2003. PIMRC 2003. 14th IEEE Proceedings on Vol.2 ept. 7-10, 2003 pp.1800-1804
- [2] J. P. Kermoal, L. Schumacher, K.I. Pedersen, P.E. Mogensen, F. Frederiksen, "A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation", IEEE Journal, Aug. 2002, Vol.20 pp.1211-1226
- [3] W. C. Jakes, Microwave Mobile Communications. New Jersey: IEEE Press, 1993, Chapter 1.
- [4] M. Patzold: Mobile Radio Channels - Modeling, analysis, and Simulation (in German). Wiesbaden: Vieweg, 1999.
- [5] M. Patzold, F. Laue, and U. Killat, "A frequency hopping Rayleigh fading channel simulator with given correlation properties," Proc. IEEE Int. Workshop on Intelligent Signal Processing and Communication System, ISACS '97, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 1997, pp.S8.1.1-S8.1.6
- [6] M. Patzold, U Killat, F. Laue, Li. Yingchun, "A new and optimal method for the derivation of deterministic simulation models for mobile radio channels", VTC1996, IEEE 46th, 28 April-1 May 1996 Vol.3 pp.1423-1427

위 정 화 (Jung-Hwa Wui)

정회원

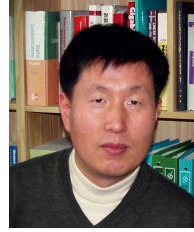


2001년 2월 명지대학교 제어계측공학과 석사  
2005년~2009년 Agilent Technologies Korea Ltd.  
2009년 9월~현재 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사과정

<관심분야> Wireless 통신, 채널 시뮬레이터

김 동 우 (Dongwoo Kim)

정회원



1994년~2000년 Shinsegi Telecom 선임과장  
2000년~현재 한양대학교 전자통신공학과 교수  
<관심분야> 이동통신채널 용량 증대 방법

박 용 진 (Yong-Jin Park)

정회원



2003년 2월 한양대학교 전자컴퓨터공학부  
2005년 2월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 석사  
2005년 3월~현재 : LG전자 단말연구소 선임연구원 재직  
<관심분야> Wireless 통신, 4G 이동통신