

나카가미 페이딩과 임펄스 무선 통신로 채널에서 FH/CDMA 시스템의 성능분석

*나 기 현 *이 양 선 *강 희 조

*동신대학교

Performance Analysis of FH/CDMA Systems with Impulse and Nakagami Fading Radio Communication Channel

*Ki Hyun Na *Yang Sun Lee *Heau Jo Kang

*Dept. of Electrical & Electronic Eng., Dongshin Univ.

E-mail : satcom2000@korea.com

요 약

본 논문에서는 임펄스 잡음과 다중접속간섭(MUI) 및 나카가미 페이딩 환경으로 모델링되는 FH/CDMA 시스템을 제안하고 이의 성능을 분석하였다. 결과에 의하면, FH-CDMA 시스템은 잡음이나 페이딩의 영향보다는 여러명의 사용자가 같은 시간에 같은 주파수를 사용함으로써 인한 충돌과 임펄스 잡음에 의해 더 큰 영향을 받는다. 성능 개선기법으로 다이버시티 기법과 에러정정 부호화 기법을 사용함으로써 페이딩과 다중접속 간섭에 대하여 어느정도의 개선효과를 보이지만 임펄스 잡음의 영향으로 무선 데이터 통신을 만족하는 시스템 성능은 가질수 없었다. 따라서 한번의 재전송만을 고려한 Truncated Type-II Hybrid ARQ 기법을 동시에 채용함으로써 다중접속 간섭과 임펄스 잡음에 의한 전송에러를 감소시키고 고신뢰도의 무선 데이터 통신을 만족하는 시스템 성능을 보임을 알 수 있었다.

I. 서 론

최근 들어 사회생활이 복잡해지고 고도화됨에 따라 다수의 이용자들에게 고품질의 무선 통신서비스를 제공할 수 있는 무선 데이터 통신시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 멀티미디어 서비스의 급속한 성장으로 인하여 무선 LAN(Local Area Network)에 대한 관심이 고조되고 있고, 미국에서는 FCC가 5GHz 대역에 U-NII(Unlicensed National Information Infrastructure) 주파수대를 설정하고 무선 LAN과 무선 인터넷, 무선 데이터 서비스 등을 초고속 정보통신망에 수용할 기반을 마련하고 있다[1]. 따라서, 본 논문에서는 디지털 무선 통신계에서 존재하는 가우스 잡음을 포함하는 Middleton의 Λ 급 현대역 임펄스 잡음뿐만 아니라 단말기의 이동으로 인하여 발생하는 페이딩 환경에서 FH/CDMA 무선 통신시스템의 성능을 분석하였다.

성능 개선 기법으로는 수신단에서 다중경로 페이딩과 임펄스 잡음에 대한 보상으로 다이버시티 기법과 부호화 기법을 도입하여 성능의 개선 정도를 분석하였으며, 다중 사용자에 대한 충돌 발생에러를 억제하기 위하여 Truncated Type-II ARQ 기

법을 동시에 채용함으로써 무선 데이터 통신시스템의 성능 개선 정도를 비교 분석하였다.

II. 시스템 모델

2.1 FH/CDMA-NFSK 시스템

그림 1은 FH/CDMA-NFSK 시스템의 해석 모델을 나타낸다. FH-CDMA 시스템의 성능을 해석하기 위해서는 우선 '충돌' 발생확률을 구해야 한다. i 번째 신호의 l 번째 데이터 비트가 k 번째 신호에 의해 충돌되는 경우를 가정한다. 만약 다음 식을 만족하는 $t \in [lT_d, (l+1)T_d]$ 가 존재한다면

$$f_k(t - \tau_k) = f_i(t) \quad (1)$$

충돌이 발생하였다고 한다. FH 시퀀스가 상호 독립적이고 일정 주파수 도약 구간내에서 일양 분포한다고 가정하면 충돌 발생확률 $p_i^{(k)}$ 는 k 에 대해 독립적이며, 따라서 윗첨자 ' k '를 생략할 수 있다. 또한 FH시퀀스가 정상과정(stationary)이라 하면 p_i 은 l 에 대해 독립적이며 따라서 아래첨자 ' l '을 무시할 수 있다. 호핑수 q 가 충분히 크다면 충돌 발생확률 p 는 다음과 같이 주어진다.

$$p = \frac{1}{q} \left(1 + \frac{1}{N_b}\right) \quad (2)$$

단, N_b : 홉(hop)당 데이터 수.

다음으로 l 번째 데이터 비트 구간동안 $K-1$ 명의 사용자로부터의 충돌 발생 확률 \hat{p} 는 다음과 같이 주어진다[3].

$$\hat{p} = 1 - (1-p)^{(U-1)} \quad (3)$$

따라서 q 가 충분히 크다면 \hat{p} 는 다음과 같다.

$$\hat{p} = 1 - \left[1 - \frac{1}{q} \left(1 + \frac{1}{N_b}\right)\right]^{(U-1)} \quad (4)$$

AWGN과 MUI 채널에서의 SFH-CDMA 신호의 오율식은 참고문헌[3]에 의하면 다음과 같다.

$$P = Pe(1-\hat{p}) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + Pe\right) (K-1) p(1-p)^{(U-2)} \quad (5)$$

식(5)에서 Pe 는 충돌이 발생하지 않았을 때 송신 비트가 잘못 수신될 조건부 오율식으로서 비동기 FSK 신호의 Pe 는 다음식과 같다[4].

$$Pe = \frac{1}{2} \exp\left(-\alpha^2 \frac{\gamma}{2}\right) \quad (6)$$

여기서, γ : 평균 SNR.

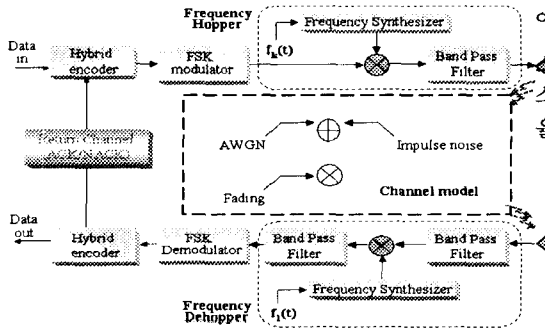


그림 1. 시스템 해석 모델

2.2 나카가미 페이딩 채널

나카가미 페이딩은 나카가미 교수에 의해 단파대에 있어서의 대규모 실험을 통하여 찾아낸 것으로 심도 지표라고 부르는 파라미터 m 의 값에 의해 중단파로부터 마이크로파에 이르는 무선통신에서 발생하는 여러 가지 형태의 포락선 변동을 기술할 수 있다. m -분포 페이딩을 받은 수신 신호의 순시 진폭 R 에 대한 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다[2].

$$p_R(R) = \frac{2m^m R^{2m-1}}{\Gamma(m) \Omega^m} \exp\left(-\frac{mR^2}{\Omega}\right) \quad (7)$$

단, $\Gamma(\cdot)$; 감마 함수, $\frac{\Omega}{2}$; 수신 평균 전력.

2.3 임펄스 잡음 채널

임펄스 잡음의 통계적 모델 중에서 Middleton의 A급 임펄스 잡음은 무선 통신 시스템의 성능 평가에 있어서 취급하기 쉽고, 거의 모든 종류의

실제 임펄스 잡음을 표현하는데 사용되는 정량화된 방법이다.

일반적으로 협대역 잡음 $n(t)$ 를 동상 성분과 직교 성분으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$n(t) = x(t) \cos w_c t - y(t) \sin w_c t \quad (8)$$

여기서 w_c 는 협대역 잡음의 중심 각 주파수이다. 잡음 $n(t)$ 를 A급 임펄스 잡음으로 가정할 때 이에 대한 결합확률밀도함수(p.d.f.)는 다음과 같다.

$$p_I(x, y) = e^{-A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m! 2\pi W \sigma_m^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2W \sigma_m^2}\right) \quad (9)$$

이때, Jacobian 정리를 사용하여 각각 직교성분과 동상 성분으로 나타내면 다음과 같다.

$$p_I(x) = e^{-A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m! \sqrt{2\pi W \sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2W \sigma_m^2}\right),$$

$$p_I(y) = e^{-A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m! \sqrt{2\pi W \sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2W \sigma_m^2}\right) \quad (10)$$

여기서, $\sigma_m^2 = \frac{m/A + \Gamma'}{1 + \Gamma'}$, $\Gamma' = \sigma_C^2 / \sigma_I^2$ 는 잡음 전력 대 임펄스 잡음 전력비, A 는 임펄스 지수(단위 시간당 임펄스 성분이 차지하는 비율), $W = \sigma_C^2 + \sigma_I^2$ 는 전체 잡음 전력을 나타낸다.

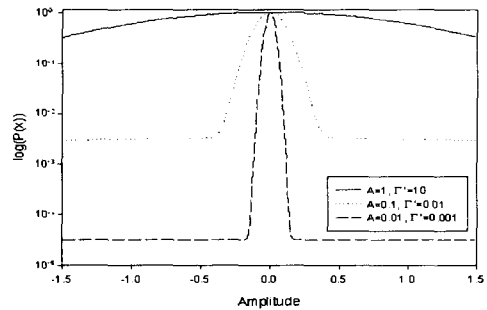


그림 2. 정규화된 임펄스성 잡음의 확률밀도함수

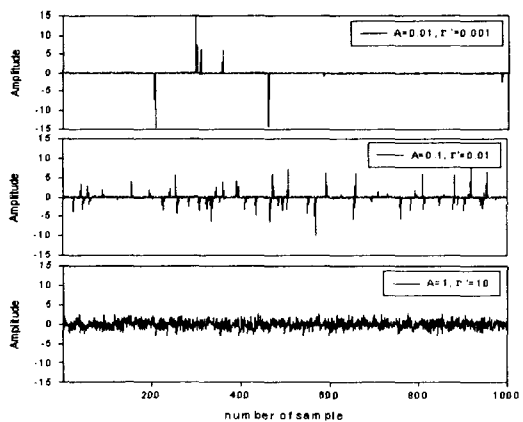


그림 3. 임펄스성 잡음의 시간 파형

식 (10)에서 정의한 임펄스성 잡음에 대하여 정규화된 ($W=1$) 확률밀도함수와 시간축에서의 파형을 그림 2, 그림 3에서 각각 나타내었다. 임펄스성이 약한 환경은 진폭이 큰 성분에 대한 확률 값이 서서히 감소하지만, 임펄스 성이 강한 환경에서는 0에 근접한 진폭 성분이 주를 이루며 진폭이 큰 성분에 대한 확률 값은 일정하게 나타난다. 그림 2와 그림 3에서 A 가 0.01, Γ 가 0.001인 환경은 임펄스성이 강한 환경을 나타내고, A 가 1이고, Γ 가 10인 환경은 가우스 잡음 환경에 근접하는 환경이다[5].

III. 시스템 성능 해석 및 검토

3.1 임펄스 잡음과 나카가미 페이딩에 의한 오율 성능

임펄스 잡음과 나카가미 페이딩 환경에서의 NFSK 방식의 오율식은 다음과 같이 구해진다.

$$p_{el} = \frac{1}{2} e^{-A} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A^j}{j!} \left(1 + \frac{Ri}{2m\sigma_m^2}\right)^{-m} \quad (11)$$

그림 4는 임펄스 잡음과 나카가미 페이딩 환경에서 앞에서 유도한 FH/CDMA-NFSK 신호의 오율식을 이용하여 시스템의 성능을 나타낸 그림이다.

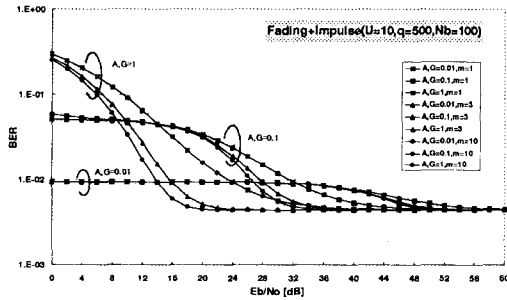


그림 4. 임펄스 잡음과 나카가미 페이딩 환경에서의 오율 성능 ($G=\Gamma$)

그림에서 보는바와 같이 30dB 이하에서는 임펄스 잡음지수의 크기에 따라 성능차이가 뚜렷이 나타나지만 그 이상에서는 전반적으로 $10^{-3}BER$ 을 넘지 못하는 열악한 환경을 보임을 알 수 있고, 페이딩 심도지수 m 의 변화에 따라서는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한, $E_b/N_0=32$ dB 이하에서는 임펄스성이 강한 $A=0.01$, $\Gamma=0.01$ 인 환경보다 임펄스 성이 비교적 약한 $A=0.1$, $\Gamma=0.1$ 인 환경에서 BER 성능이 더욱 나뉘

다. 이것은 그림 3에서 보는 바와 같이 $A=0.01$, $\Gamma=0.001$ 인 환경은 임펄스성 전력은 크지만 빈번하게 발생하지 않으나, $A=0.1$, $\Gamma=0.01$ 인 환경은 비록 임펄스성 전력은 상대적으로 작지만 훨씬 빈번하게 발생하므로 낮은 신호 전력에서 BER 성능에 더 큰 영향을 미치게 된다. 위의 결과로부터 페이딩의 영향보다는 여러명의 사용자가 같은 시간에 같은 주파수를 사용함으로써 발생하는 충돌과 임펄스성 잡음이 시스템의 열화요인으로 크게 작용하므로 이에대한 효과적인 성능개선 기법이 필요함을 알 수 있다.

3.2 다이버시티 수신기법과 에러정정 부호화기법을 채용한 경우

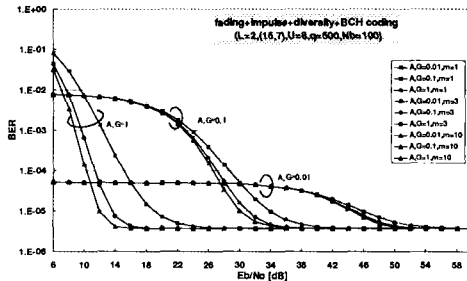


그림 5. MRC 다이버시티와 BCH 부호화 기법을 적용하였을때의 시스템 성능

그림 5는 다이버시티 수신기법과 $t=2$ 인 (15,7) BCH 부호화 기법을 채용하였을 때의 시스템 성능을 보여주고 있다. 결과에 의하면 부호화 기법을 사용하지 않았을 때보다 시스템의 성능개선은 이루어지나 임펄스 잡음의 영향으로 강한 임펄스 잡음 상태 ($A, \Gamma=0.01$)에서는 26dB 이상에서 페이딩 심도지수의 변화와 무관하게 4×10^{-6} 이하의 성능개선은 얻을 수 없음을 알 수 있다. 약한 임펄스 잡음 상태 ($A, \Gamma=0.1$)에서는 28dB 이하에서 임펄스 잡음이 빈번하게 발생하므로써 어려움이 높게 되어 강한 상태보다 훨씬 열악한 성능을 보임을 알 수 있다. 따라서, 무선 데이터 통신을 수행할만한 신뢰성 있는 통신을 만족하려면 다른 개선책이 요구됨을 알 수 있다.

3.3 Truncated Type-II Hybrid ARQ를 동시에 채용한 경우

본 논문에서는 데이터 전송 서비스를 만족하기 위하여 Truncated Type-II Hybrid ARQ 기법을 동시에 채용하는 방식을 제안하였다. 기존의 ARQ 기법은 정보 전송시 채널의 어려움이 높으면 전송지연이 증가하게 되는데 이와같은 단점을 보완한 방식이 Truncated Type-II Hybrid ARQ 방식이다. 이 방식은 실제 이동통신 시스템에서 요구하는 어려움이 데이터 통신인 경우라도 error free (1×10^{-10})가 아닌 1×10^{-6} 정도라는데 기본 개

념을 두고 있다[6].

Truncated Type-II Hybrid ARQ 기법 채용시 전송 효율 μ 를 고려한 FH/CDMA-NFSK방식의 오율식은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{eo} = \frac{1}{2} e^{-A} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A^j}{j!} (1 + \frac{\gamma_c}{2m} \sigma_m^2)^{-mL} \quad (12)$$

$$\text{단, } \gamma_c = \frac{1}{\mu} R .$$

전송효율 μ 는 다음 식으로 정의되며, 이의 역수는 throughput을 나타낸다.

$$\mu = \frac{n}{k} [P_c + 2(1 - P_c - P_b)P_t] \quad (13)$$

여기서, k/n : 부호율,

$P_c = (1 - P_{eo})^n$: 수신 신호에 오류가 없을 확률,

$P_b \leq [1 - (1 - P_{eo})^k] 2^{-(n-k)}$: C_0 부호를 수신한 후 검출 불가능한 오류를 가질 확률,

$P_t = P_c + (1 - P_c - P_b) \frac{q_0 - y}{1 - y}$: 패리티 비트를 수신한 후 변환 과정을 통해 원래의 신호로 복호 가능할 확률,

$$\text{단, } q_0 = \sum_{j=0}^n \binom{2n}{j} P_{eo}^j (1 - P_{eo})^{2n-j} ,$$

$$y = (1 - P_{eo})^n \left[2 \sum_{l=0}^n \binom{n}{l} P_{eo}^l (1 - P_{eo})^{n-l} - (1 - P_{eo})^n \right]$$

Truncated Type-II Hybrid ARQ 기법 채용시의 수신 오류 확률을 $P_r(E)$ 라 할 때, 본 논문에서는 재전송으로 인한 전송지연을 최소화 하기위해 한 번만 재전송 하는 경우를 고려하므로 오율식은 다음과 같이 된다.

$$P_r(E) = P_r(A_0^a) + P_r(A_0^d E_1^E) \quad (14)$$

$$= P_r(A_0^a) + P_r(A_0^d) P_r(E_1^E | A_0^d)$$

여기서, $P_r(A_0^a) = P_b$,

$$P_r(A_0^d) = P_d = 1 - P_c - P_b .$$

이다. 패리티 비트를 수신한 후 원래의 정보를 복호하지 못할 확률은 수신신호가 검출 불가능한 오류 패턴을 가질 확률과 정정 불가능한 오류 패턴을 가질 확률의 합이 되므로

$$P_r(E_1^E | A_0^d) = P_{eo} + P_d(1 - q_1) \quad (15)$$

이 된다. 그러므로 각각의 경우를 식 (14)에 대입하면 최종 오율식은 다음과 같이 구해진다[6].

$$P_r(E) = P_b + P_d \left(P_b + P_d \left(1 - \frac{q_0 - y}{1 - y} \right) \right) \quad (16)$$

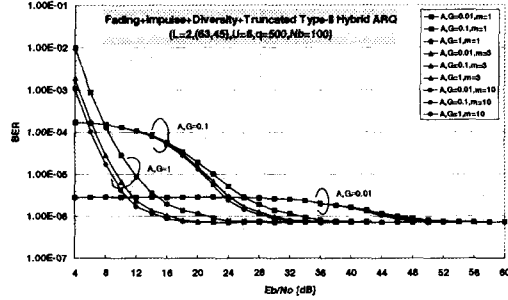


그림 6. Truncated Type-II Hybrid ARQ 기법을 동시에 채용하였을때의 시스템 성능

그림 6은 본 논문에서 제안한 Truncated Type-II Hybrid ARQ 기법을 동시에 채용하였을때의 시스템 성능을 보여주고 있다. 결과에 의하면, 빈번하게 발생하는 약한 임펄스 잡음보다 드물게 발생하는 전력이 큰 임펄스 잡음이 ($A, \Gamma=0.01$) 신호전력 24dB이하에서 사용자간 충돌 에러와 임펄스 잡음에러를 효과적으로 보상해 줌을 알 수 있다. 32dB 이상에서는 ARQ 기법에 의해 재전송을 하여도 에러정정 능력의 한계로 일정한 성능을 보이게 된다. 따라서 낮은 신호전력에서 다중 사용자에 의한 충돌과 빈번하게 발생하는 임펄스 잡음을 극복하고 신뢰성 있는 통신을 수행하기 위해서는 재전송시 에러를 복구할 수 있는 강력한 부호화 기법이 ARQ 기법과 조합되어야 함을 알 수 있다.

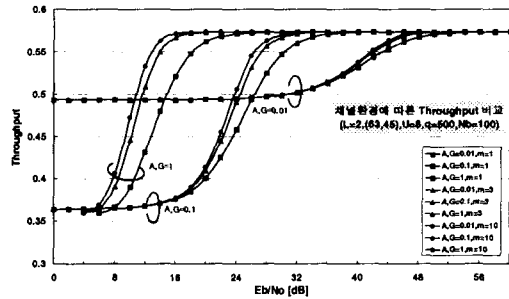


그림 7. 채널 환경에 따른 throughput 비교

그림 7은 페이딩과 임펄스 잡음에 따른 throughput 성능을 보여주고 있다. 강한 임펄스 잡음 상태에서는 30dB 이하에서 일정한 성능을 유지하다가 그 이상에서 전송효율이 좋아지고 임펄스 보다는 페이딩이 강한 상태와 약한 임펄스 잡음에서는 8dB와 20dB, 16dB와 30dB사이에서 급격한 시스템 향상을 보임을 알 수 있다. 열화요인중 페이딩은 시스템에 크게 영향을 주지 않지만 임펄스 잡음지수의 변화가 크게 시스템에 영향을 미침을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 임펄스 잡음과 다중접속간섭(MUI) 및 나카가미 페이딩 환경으로 모델링되는 FH/CDM

A 시스템을 제안하고 이의 성능을 구하였다. 성능 개선책으로 다이버시티 수신기법과 Truncated Type-II Hybrid ARQ 기법을 채용하여 시스템의 성능 개선정도를 비교 분석하였다. 페이딩과 임펄스 잡음으로 인하여 시스템에 심각한 영향을 미치게 되는데 특히, 페이딩 보다는 임펄스 잡음의 발생빈도와 크기에 따라 시스템 성능이 크게 좌우됨을 알 수 있었다. 또한, 신호전력의 일정구간(26dB) 내에서는 임펄스 크기 보다는 낮은 발생빈도에 의해 시스템 성능이 더욱 열화됨을 알 수 있었다. 이에대한 성능개선책으로 다이버시티 기법과 Truncated Type-II Hybrid ARQ 기법을 동시에 채용함으로써 낮은 신호전력에서도(24dB 이하) 어느정도의 향상된 성능개선을 얻을 수 있었고 신호전력의 일정구간(30dB) 이상에서는 임펄스 발생빈도에 따라 약간 차이는 있지만 무선 데이터 통신을 만족하는 시스템 성능(7×10^{-7} BER)을 얻을 수 있었다. 그러나, 낮은 신호전력에서는 여전히 임펄스에 의한 영향이 남아있어 이에따른 에러 복원에 대한 연구가 더욱 진행되어야 할 것으로 생각된다.

V. 참고 문헌

- [1] S. Hara, K. Fukui, M. Okada, and N. Morinaga, "Multicarrier modulation technique for broadband indoor wireless communication," *Proc. 4th Int. Symp. PIMRC*, Yokohama Japan, pp. E1.2.1-E1.2.5, 1993.
- [2] M. Nakagami, The m-distribution a General Formular of Intensity distribution of Rapid Fading, *Instatistical methods of Radio Wave Propagation*, W. C. Hoffman Ed., New York: Pergamon Press, pp. 3-36, 1960.
- [3] E. A. Geraniotis and M. B. Pursley, "Error probability for slow-frequency-hopped spread-spectrum communications in presence of partial-band interference," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-33, pp. 767-774, Aug. 1985.
- [4] 박상훈, "이동통신채널에서 ARQ 기법과 다이버시티 기법에 의한 SFH-CDMA/FSK 신호의 성능개선," 한국항공대학교 대학원 석사학위논문, 1995년 2월.
- [5] S. Unawang, S. Miyamoto, and N. Morinaga, "A novel receiver design for DS-CDMA systems under impulsive radio noise environments," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E82-B, no. 6, pp. 936-943, June 1999.

- [6] C. H. Oh, E. G. Kim, S. J. Cho, "Performance provement of SFH-CDMA/FSK Signal with Truncated Type-II Hybrid ARQ and MRC Diversity Technique in Mobile Communication Channels," *IEEE International Conference on Communications*, vol. 3, pp. 1715-1721, June 1995.