

레이라이 페이딩하에서 FFH/BFSK 시스템의 diversity를 이용한 성능 분석

조용진^{*} · 이두석^{*} · 공관식^{**} · 조형래^{*}

^{*}한국해양대학교 · ^{**}서울지방중소기업청

A Performance Analysis of FFH/BFSK System Using Diversity Under Rayleigh Fading

Yong-jin Cho^{*} · Du-suck Lee^{*} · Gowan-sik Gong^{**} · Hyung-rae Cho^{*}

^{*}Korea Maritime University · ^{**}Seoul Regional Office Small & Medium Business Administration

E-mail : jcyj0793@hanmail.net

요 약

본 논문에서는 군용 통신의 목적과는 달리 의도적 또는 비의도적인 재밍(Jamming)현상 보다는 전파의 다경로 채널에서 수신 신호 포락선의 변동으로 인한 레이라이 페이딩이 있을 때 고속 주파수 도약(FFH) BFSK 시스템의 성능을 분석하였다. 다경로 페이딩 채널과 레이라이 페이딩을 이론적으로 정리하고 페이딩이 없을때와 있을 때 시스템의 성능을 알아보았다. 이 시스템에 경로 다이버시티를 적용하였을 때 약 20dB이상의 성능 개선이 이루어 짐을 알 수 있었다. 주파수 변조 방식이 DPSK일 때와 비교하였다.

ABSTRACT

In this paper, we have analyzed a performance of fast frequency hopping communication systems when a rayleigh fading caused by envelope variations of a signal received in multipath channel is, but it is not considered that intentional or unintentional jamming can be. The multipath fading channel and rayleigh fading are confirmed by theoretical analysis. In fading or non-fading, the performance of this system is studied. When the path diversity is applied to this system, the performance is shown to be superior to non-diversity systems about 20dB. For modulation methods, BFSK was compared with DPSK.

1. 서 론

통신에서의 디지털화는 세계적인 추세이며 높은 통화품질, 데이터 서비스, 기지국 및 단말기의 소형화, 주파수 이용 효율 등의 장점을 가지고 있다. 대역 확산(Spread Spectrum: SS) 방식을 이용한 디지털 이동 통신은 사용자 수용능력의 증가뿐만 아니라 보안성과 안정성 때문에 이미 상용 서비스가 되고 있으며 많은 연구가 이루어지고 있다. 대역확산 통신의 실질적인 장점은 다양한 다이버시티 조합 기술을 간단히 구현할 수 있다는 것이다.

전 세계적으로 볼 때 다중접속 방식인 TDMA와 CDMA의 사용비율은 90 대 10 이고, 유럽 지역의 많은 나라에서 GSM 통신 시스템에 주파수 도약(Frequency Hopping: FH) 방식으로 서비스를 하고 있으며, 아직도 군용 통신에서는 비확산과 비확산을 중시하기 때문에 주파수 도약 통신 방식을 사용한다.

현재 건물 내 고속 디지털 통신에서는 무선 네트

워크 구축 계획과 함께 실내 정보 기기 간의 고속 대용량 정보 시스템 개발에 대한 요구 증가로 인하여 무선 LAN의 대부분이 이미 주파수 도약 방식을 적용하고 있다. 또한, 현재 상용 서비스되고 있는 주파수 공유 통신(TRS) 역시 주파수 도약 방식을 사용하고 있다.

마이크로셀 단위를 기초로 하는 도시 지역의 통화 서비스에서 높은 건물이나, 광고탑, 빌딩 등의 현저한 돌출물에 의한 다경로 페이딩 현상과 시간 지연 특성, 경로 손실 등은 양질의 서비스를 구현하는데 있어 필수적으로 고려해야할 사항이다. 본 논문에서는 군용 통신에서의 목적과는 달리 의도적 또는 비의도적인 재밍(Jamming)현상 보다는 전파의 다경로 페이딩 채널에 의한 레이라이 페이딩에 하에서 FFH/BFSK시스템의 이론적 비트 에러율과 페이딩 채널에서의 에러확률을 구하였다. 페이딩 채널하의 시스템에 경로 다이버시티 기법을 적용하여 비트에

러울을 구하였다.

II. 페이딩 채널 및 레이라이 페이딩

현재 이동 통신은 여러 분야에 걸쳐 주로 음성 통신에 사용되고 있지만, 앞으로는 영상 통신, 고속 디지털 통신 등에 쓰일 것이므로 전송속도의 증가 또는 통신 품질의 향상이 요구되고 있다. 육상 페이딩 통신로의 경우 페이딩의 영향은 매우 심각하여 아날로그 통신에서는 신호 대 잡음 전력비를 크게 저하시키거나, 디지털 통신에서는 부호 오류율을 증가시킨다. 그림 1은 육상 이동 통신의 다경로 채널을 나타낸다.

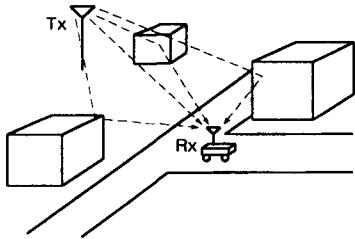


그림 1. 다경로 채널의 특성^[1]

도시에서의 이동 통신 환경은 이동국 주변의 빌딩 등 인공건축물 및 지형지물 때문에, 기지국과 이동국은 직접 마주보지 못한다. 이러한 조건에서 이동국에 수신된 파는, 이동국의 주변 건물 등에 의한 반사, 회절, 산란 등으로 각각의 다른 지연시간을 갖게 되며, 여러 방향으로부터 이동국에 수신된다. 특히 짧은 구간에서의 전계강도의 순간치는 레이레이 분포를 갖는 것이 실험으로 확인되었다.^[1]

페이딩 다경로 채널은 시간에 따라 채널의 구조가 변하는 채널의 지연팩터(delay factor) $\tau(t)$, 감쇄팩터(attenuation factor) $\alpha(t)$ 는 시간에 따라 변한다. 그러므로 페이딩 다경로 채널에 전송된 신호를

$$S(t) = \text{Re}\{u(t)e^{j2\pi f_c t}\} \quad (1)$$

이라 하면 채널을 통과한 후 수신된 신호는 다음과 같다.

$$X(t) = \text{Re}\left\{\left[\sum_n \alpha(t)e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} S(t - \tau_n(t))\right] \cdot e^{-j2\pi f_c t}\right\} \quad (2)$$

수신된 등가 저역통과 신호(equivalent low-pass received signal)는 식 (3)과 같다.

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha(\tau; t) e^{j2\pi f_c \tau} u(t - \tau) d\tau \quad (3)$$

식 (3)에서 $r(t)$ 는 등가 저역통과 신호 $u(t)$ 에 대한 채널 응답(channel response)이므로 등가 저역통과 채널의 특성을 시변 임펄스 응답 $c(\tau; t)$ 로 표시 할 수 있다.

$$\begin{aligned} c(\tau; t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \alpha(\tau; t) e^{-j2\pi f_c \tau} \delta(t - \tau) d\tau \\ &= \alpha(\tau; t) e^{-j2\pi f_c \tau} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3) 및 식 (4)는 채널 특성이 연속(continuous)적인 다경로 페이딩 채널에서 수신된 등가 저역통과 신호 및 등가 저역통과 임펄스 응답이며, 채널의 특성이 이산(discrete)적인 페이딩 멀티패스 채널에서는 식 (5) 및 식 (6) 처럼 쓸 수 있다.

$$r(t) = \sum_n \alpha_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} u[t - \tau_n(t)] \quad (5)$$

$$c(\tau; t) = \sum_n \alpha_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau} \delta[\tau - \tau_n(t)] \quad (6)$$

주파수 f_c 에서 변조되지 않은 반송파를 전송하는 경우를 생각하면 $u(t) = 1$ 일 때 식 (5)는 간단하게 표시된다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_n \alpha_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} \\ &= \sum_n \alpha_n(t) e^{-j\theta_n(t)} \end{aligned} \quad (7)$$

단, $\theta_n(t) = 2\pi f_c \tau_n(t)$ 이다.

만일 채널의 시변화가 매우 크면 $\alpha_n(t)$ 가 변하여 수신된 신호에 영향을 미친다.^[2]

레이라이 페이딩의 영향을 받는 신호의 포락선이나 위상의 통계적 성질에 대한 해석은 오래 전부터 연구되어 왔는데 현재 실험을 통하여 이론적으로 정립되어 있다. 페이딩 모델로는 레이라이 페이딩, 라이시안 페이딩 및 m-분포 페이딩 등이 있다.

레이라이 페이딩은 일반적으로 포락선의 크기가 비슷하고 위상이 넓은 범위에 걸쳐 랜덤하게 변화하며 여러 파가 합성된 심한 페이딩 현상은 레이라이 분포로써 나타내진다. 레이라이 분포는 그 적용범위가 매우 넓으며 대표적인 것으로 단파대의 원거리 전파, 마이크로파의 다중로 전파, 시가지에서의 육상 이동 통신에 있어서 짧은 주기 페이딩의 확률 분포로서 많이 이용되는데 그 확률밀도함수는 다음과 같이 나타낸다.^[3]

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_0^2}\right) \quad (8)$$

여기서 r 은 수신 신호의 진폭, $\sigma_0 = \frac{\sqrt{r^2}}{2}$ 로 평균 수신 신호 전력이다.

III. FFH/BFSK 시스템

FFH/BFSK 통신시스템에서 BFSK 복조기는 송신기에서 전송한 비트율, $R_b = 1/T_b$ (T_b 는 bit duration)의 데이터 시퀀스에 따라 두 개의 베이스 밴드 주파수 f_1 또는 f_2 중 하나를 선택하게 된다. f_1 과 f_2 사이의 주파수 간격은 도약을 $R_h = 1/T_h$ 와 같으며 T_h 는 hopping duration이다. L 개의 hop이 각 bit duration 동안 도약되기 때문에 $T_h = T_b/L$ 이다. 여기서, $f_1 = 1/T_h$, $f_2 = 2/T_h$ 가 될 수 있다. 송신된 신호는 다음 식으로 표현된다.

$$s(t) = \sqrt{2P} \sum_{n=-\infty}^{\infty} P(t-nT_c) \cdot \cos[2\pi f_n t + \phi_n + \theta_d(t)] \quad (9)$$

여기서 f_n 은 n 번째 도약 주파수이고, $P(t)$ 는 T_c 의 폭을 갖는 단위 펄스(unit pulse)이다. 또, ϕ_n 은 n 번째 랜덤한 도약 위상이고 $\theta_d(t)$ 는 FSK 신호이다. FFH/BFSK 시스템의 구성도는 그림 2와 같다.

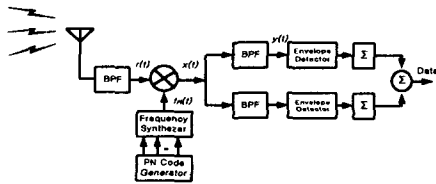


그림 2. FFH/BFSK 수신기의 구성도

수신된 신호는 W_s 의 대역폭을 갖는 BPF를 통과해서 PN코드에 의해 주파수 합성기에서 발생하는 랜덤한 도약 주파수와 mixer에서 합성된다.

역확산하기 위한 신호 $f_R(t)$ 는 다음 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$f_R(t) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} P(t-nT_c) \cos[2\pi f_n t + \phi_n] \quad (10)$$

수신기에서 mixer를 통과 신호 $x(t)$ 는 다음과 같다.

$$x(t) = \sqrt{2P} \sum_{n=-\infty}^{\infty} P(t-nT_c) \cos[2\pi f_n t + \phi_n + \theta_d(t)] + N(t) \cos(2\pi f_c t) \cdot 2 \sum_{n=0}^{\infty} P(t-nT_c) \cos[2\pi f_n t + \phi_n] \quad (11)$$

여기서 첫 번째 항은 BFSK신호이고, 두 번째 항은 주파수 도약시 생긴 신호이다.

Mixer를 통과한 신호가 BPF를 통과하면 다음 식과 같다.

$$y(t) = \sqrt{2P} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos[2\pi f_n t + \theta_d(t)] + N(t) \quad (12)$$

$N_n(t)$ 는 대역제한 가우시안 백색잡음이다.

신호는 Envelope Detector를 거쳐서 정보신호로 바뀐다. 여기서 주파수 합성기는 송신기의 주파수 합성기와 완전한 동기를 이룬다고 가정한다.^[4]

수신된 두 신호의 포락선을 r_1 과 r_2 라 할 때, 신호 A 를 포함하는 r_1 의 포락선 확률 분포 함수는 라이시안 함수로 다음 식과 같이 표현된다.

$$p(r_1) = \frac{r_1}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_1^2 + a^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{r_1 A}{\sigma^2}\right) \quad (13)$$

단, I_0 는 제로차 수정된 베셀함수이다. 동시에 r_2 의 확률 분포함수는

$$p(r_2) = \frac{r_2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_2^2}{2\sigma^2}\right) \quad (14)$$

이다. 여기서, AWGN 채널 하에서 주파수 도약 비동기 BFSK 시스템의 에러 확률은 다음 식과 같다.

$$P_e = \text{prob}(r_1 < r_2) = \int_{r_1=0}^{\infty} p(r_1) \int_{r_2=r_1}^{\infty} p(r_2) dr_2 dr_1 = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{A^2}{\sigma^2}\right) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma}{2}\right) \quad (15)$$

단, γ 는 수신된 신호 대 잡음전력비(SNR)이다.^[9]

III-1. 페이딩이 있을 때 시스템의 에러 확률

레이라이 페이딩 채널에서 수신된 신호는 위상과 포락선에서 광범위한 변화가 있다. 연속적인 수신 SNR γ 는 페이딩 포락선 변화에 따라 변하며, 그 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$p(\gamma) = \frac{1}{\Gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right) \quad (16)$$

단, Γ 는 평균 수신 SNR이다.

레이라이 페이딩 환경 하에서 주파수 도약 비

동기 BFSK 시스템의 평균 에러 확률은 식 (16)에서 주어진 확률 밀도함수 Γ 에 대해 위의 식 (15)를 평균함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.^[5]

$$P_b = \int_0^{\infty} P_e \cdot p_r(\gamma) d\gamma$$

$$= \int_0^{\infty} \frac{1}{\Gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right) \cdot \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma}{2}\right) d\gamma \quad (17)$$

$$= \frac{1}{2 + \Gamma}$$

식 (15)와 (17)을 사용하여 AWGN과 레이라이 페이딩에서의 성능곡선을 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

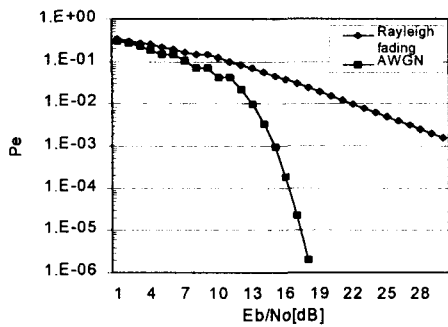


그림 3. AWGN과 레이라이 페이딩에서 에러 확률

IV. 경로 다이버시티를 이용한 FFH/BFSK 시스템의 성능평가

2경로 다이버시티 시스템의 구성도는 그림 5와 같다. 주파수 도약 시스템은 직접 신호 성분을 "오리지널(original)", 지연 성분을 "에코(eco)"라고 각각 부른다. 에코는 다경로 페이딩에서 나타나며, 1개의 chip delay와 같거나 다른 신호 성분이라고 가정한다

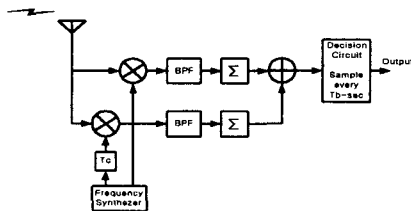


그림 4. 2경로 다이버시티 시스템의 구성도^[6]

수신된 정보신호는 주파수 합성기에 의해 역확산되고 그 다음 one-bit delay line으로 입력된다. 여기서, 오리지널과 에코의 독립적 변조가 이루어

진다. 이들 출력은 그 다음 더해지고, decod된다.

페이딩 채널에서 BER성능을 향상시키기 위해 수신 SNR γ 의 확률밀도함수 $p(\gamma)$ 를 이용한다. 고속 주파수 도약 시스템에서 비트 당 M 개의 chip이 전송될 때, 이것은 M branch MRC(Maximum Ratio Combining) 다이버시티 시스템과 동가이다.^[7] MRC 경로 다이버시티가 고속 주파수도약 시스템에 수신 SNR γ 의 확률밀도함수 $p(\gamma)$ 는

$$p(\gamma) = \frac{\Gamma'^M \gamma^{M-1}}{\Gamma'^M (M-1)!} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma'}\right) \quad (18)$$

와 같다. 단, Γ' 는 경로 다이버시티 실행후의 평균 수신 SNR이며, 식 (18)과 같다.

$$\Gamma' = \sum_{i=1}^n \Gamma'_i \quad (19)$$

단, n 은 경로수 이고 Γ'_i 는 i 번째 경로에 대한 평균 SNR이고, 식 (20)과 같다.

$$\Gamma'_i = \frac{1}{2} \frac{\langle |f_i(t)| \rangle^2}{N} \quad (20)$$

단, N 은 평균 잡음 전력이다. $f(t)$ 는 지연 시간 t 의 파라미터로서 지연된 power profile의 포락선이다.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_0} \exp\left(-\frac{t}{\sigma_0}\right) \quad (21)$$

단, σ_0 는 delay spread이다. 그러므로, BFSK 경로 다이버시티 조합 시스템에 대한 평균 BER 성능은 다음 식 (22)으로 나타낼 수 있다.^{[5][6][7][8]}

$$P_{r-d} = \int_0^{\infty} P_e \cdot p(\gamma) d\gamma$$

$$= \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma}{2}\right) \cdot \frac{\Gamma'^M \gamma^{M-1}}{\Gamma'^M (M-1)!} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma'}\right) d\gamma$$

$$= \frac{1}{2} \frac{\Gamma'^M}{\Gamma'^M (M-1)!} \int_0^{\infty} \gamma^{M-1} \exp\left[-\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\Gamma'}\right)\gamma\right] d\gamma$$

$$= \frac{1}{2} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2}\Gamma'\right)^M} \quad (22)$$

V. 결과 고찰

이 장에서는 4장에서 유도한 경로 다이버시티를 고속 주파수 도약 시스템에 적용했을 때의 결과를 살펴본다.

그림 5와 6에서는 hop의 수를 $L=5$ 로 하였을 때 경로 수의 변화에 따른 에러 확률을 나타냈다.

그림 5에서 10^{-3} 에서 2경로 일 때는 약 16dB, 3경로 일 때는 12dB, 4경로 일 때는 9.5dB, 5경로 일 때는 약 7.5dB의 에러 확률을 보였다.

그림 3과 그림 5에서 10^3 일 때를 비교하면, 고속 주파수 도약 시스템에 경로 다이버시티를 적용하고, 경로 수를 2로 했을 때 약 12dB 정도의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 그리고, 경로 수가 많아질수록 약 12~20dB 정도의 성능 향상을 가져올 수 있었다.

이 상의 결과로 볼 때 레이라이 페이딩 하에서 고속 주파수 도약 BFSK 시스템은 경로 다이버시티를 적용했을 때 경로의 수가 증가할수록 시스템 성능의 향상이 예상된다 하겠다.

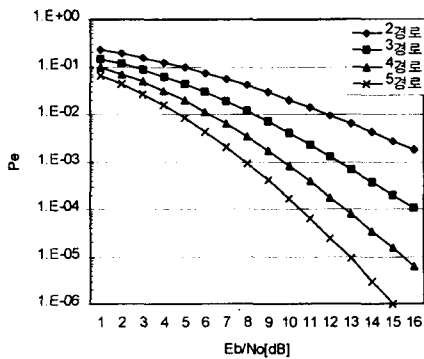


그림 5. 경로 다이버시티 적용 후의 에러율

그림 6은 고속 주파수 도약 시스템에서 변조방식이 BFSK와 DPSK일 경우를 비교하였다. 그림 6에서 10^{-4} 에서 경로수가 4일 때는 DPSK가 BFSK보다 약 3dB 정도의 성능향상을 보였다.^{[5][7]}

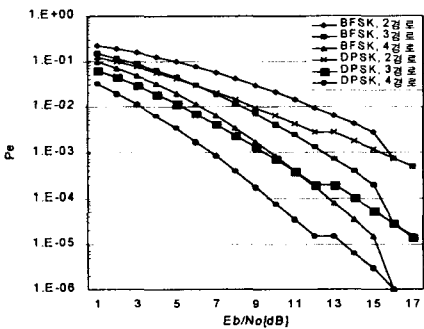


그림 6. FFH에서 BFSK와 DPSK의 에러 확률 비교

VI. 결론

현재의 Cellular, PCS와 같은 디지털 이동 통신 시스템은 직접 시퀀스 대역확산(DS/SS) 방식을

사용하고 있다. 그러나, 특정지역에서의 페이딩과 신호의 간섭 등의 문제는 직접 시퀀스 방식에서는 신호의 왜곡 현상으로 이어져 시스템의 성능 저하를 가져오기가 쉽다. 이러한 신호 왜곡현상으로 인한 경우에는 주파수 도약 시스템이 훨씬 효과적이다.^{[5][6]}

본 논문에서는 고속 주파수 도약방식에 있어서 BFSK시스템의 성능을 분석하고, 이때 경로 다이버시티 기법을 사용하여 비트에러율을 얼마나 감소시킬 수 있는지를 보이며 그에 따른 시스템 성능을 분석하였다.

1. 고속 주파수 도약 BFSK 시스템의 AWGN환경 하에서의 에러 확률과 레이라이 페이딩 하에서 에러확률을 유도하여 비트 에러율을 보였다. 10^{-4} 에서 AWGN환경과 레이라이 페이딩 하에서는 약 16dB의 차이가 남을 알 수 있었다.

2. 경로 다이버시티를 적용한 시스템의 성능은 hop의 수를 5로 하고, 경로수를 2로 했을때 약 12dB의 성능 차이가 나며 경로의 수가 많을수록 좋은 성능을 보였다.

3. BFSK와 DPSK 변조 방식의 비교에서는 경로수가 4일 때 DPSK가 약 3dB의 좋은 성능을 나타냈다.

이상의 분석 결과로 레이라이 페이딩하의 고속 주파수 도약 BFSK 시스템에서는 경로 다이버시티를 적용함으로써 시스템 성능 향상이 있었고, 페이딩의 영향을 극복하는 효율적인 수단임을 알 수 있었다.

앞으로는 라이시안 및 Nakagami 페이딩등 여러 가지 페이딩에 대한 다이버시티 기법 및 이를 적용한 고속 주파수 도약 시스템에 대한 연구가 필요하겠다.

참고문헌

- [1] 최명선, 위규진, 황인희, 이경희, 임재우, "1~3 GHz 대역에서의 전파지연특성 측정 및 분석 연구", pp. 16-32. 전자파기술, vol. 10, no 1, 1999. 3.
- [2] J. G. Proakis, Digital Communication - Third Edition. McGraw-Hill, 1995.
- [3] 고봉진, 황인수, 조성준, "페이딩 통신로의 통신 용량에 관한 연구," 한국통신학회논문지, '93-8 Vol. 18, no. 18, pp. 1136-1145. 1993.
- [4] R. L. Peterson, R. E. Ziemer, D. E. Borth, Introduction to Spread Spectrum Communications. Prentice Hall, 1995.
- [5] William C. Y. Lee, "Mobile Communications Engineering", McGraw-Hill, 1982.
- [6] Y. Murata, et al., "Path Diversity for FFH/PSK Spread-Spectrum Communication System,": in IEEE JASC, vol. 12, no. 5, pp. 970-975. JUNE 1994

[7] M. Schwartz, W. R. Bennett, and S. Stein, *Communication Systems and Techniques*. IEEE Press, 1996, chap. 10.

[8] Y. Murata, et al., "PDI receiver for fast frequency hopping spread spectrum system," in *Proc. IEEE Vehic. Technol. Conf. '93*, N. J., USA, pp. 380-383