

하나의 그룹 FH/FDMA 시스템에서 동기를 잃은 사용자수와 겹치는 슬롯수에 따른 성능 분석

정회원 구 정 우*, 은 유 창*, 송 홍 엽*

Performance Analysis According to the Number of Asynchronous Users and Overlapping Slots in One Group FH/FDMA System

Jung-Woo Ku*, Yu-Chang Eun*, Hong-Yeop Song* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 위성체내에 탑재되어 있는 중계기의 출력단에 해당하는 한 개의 주파수 도약 시퀀스를 사용하는 하나의 그룹 FH/FDMA 시스템을 구성해 보고 중계기의 입력단에 도달하는 여러 사용자 신호들의 지연시간 때문에 순방향링크상의 원하는 사용자의 수신기에서 바라보았을 때 지연된 다른 사용자 신호들에 의한 hit 발생 가능성을 고려해서 첫째 겹치는 슬롯수를 도약 심볼수 q 에 따라 변화시켜가며 성능 저하에 큰 영향을 미치지 않는 최적의 q 를 찾아보았고, 둘째 q 를 고정시켰을 때 시스템의 주파수 도약 대역폭 변화에 따른 성능 변화를 관찰했으며, 셋째 그 이유에 대한 성능 분석을 하였다.

ABSTRACT

In this paper we composed one group FH/FDMA system using a frequency hopping sequence. Considering hit possibilities by delayed other users' signals in the desirous user's receiver of forward link we first searched the optimal number of hopping symbols, q not to influence on performance deterioration changing overlapping slots according to q , second observed performance variations according to system's frequency-hopping bandwidth on fixing q , and third analyzed the reasons.

I. 서 론

본 논문에서는 2-FSK 변조방식을 사용한 하나의 그룹 FH/FDMA 시스템을 구성한다. 이진 신호간의 직교성과 주파수 도약 심볼간의 직교성을 보장한다면 그룹내 동기를 잃은 사용자에 의한 hit가 발생할 수 없지만 한정된 시스템 대역폭 때문에 그런 조건을 만족하는 도약 심볼수는 불행히도 작다. 우수한 LPI(Low Probability of Intercept) 특성을 보장하는 도약 심볼수는 직교성을 보장했을 때의 심볼수보다 훨씬 많으므로 현실적으로 인접한 도약 심볼이 차

지하는 영역간에는 슬롯들의 겹침현상이 발생하는데 이때 동기를 잃은 사용자에 의한 hit가 발생한다. 이런 상황을 고려해서 동기를 잃은 사용자수와 겹치는 슬롯수를 변화시켜가며 비트 에러율을 살펴보고 LPI 측면에서 성능 저하에 큰 영향을 미치지 않는 최적의 도약 슬롯수를 제시하고 그 이유에 대한 성능 분석을 하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 본 논문에서 구성한 하나의 그룹 FH/FDMA 시스템에 대해서 설명한다. 3장은 hit에 따른 비트 에러율의 상한값을 계산해 본다. 4장과 5장에서는 실험을 통해 결과를 분석하고 결론을 맺는다.

* 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 부호 및 정보이론 연구실(hysong@yonsei.ac.kr)

논문번호: 00226-0621, 접수일자: 2000년 6월 21일

※ 본 논문은 국방과학연구소의 연구과제 지원에 의하여 수행되었습니다.

II. 하나의 그룹 FH/FDMA 시스템

통신위성체내 중계기(transponder)의 출력단은 주파수 도약제거와 하드리미터를 거친 여러 사용자들의 신호를 모아서 그룹별로 재도약(rehopping)을 해서 전송한다. 각 그룹은 각각 다른 주파수 도약패턴을 사용하며 그룹수는 중계기의 수량을 결정하는데 본 장에서는 하나의 중계기를 고려한 하나의 그룹 FH/FDMA 시스템을 구성하고 도약패턴 생성은 Lempel-Greenberger 방법을 사용한다.^[1]

1. 송신기

먼저 본 절에서 사용되는 용어들을 정의하자.

K : 그룹내 총 사용자수,

K' : 그룹내 동기를 잃은 사용자수,

K_h : 원하는 사용자의 칩(슬롯)을 hit하는 동기를 잃은 총 사용자수,

p_h : $K'=1$ 일 때 원하는 사용자의 칩을 hit할 확률,

q : 이용 가능한 주파수 도약패턴 심볼수.

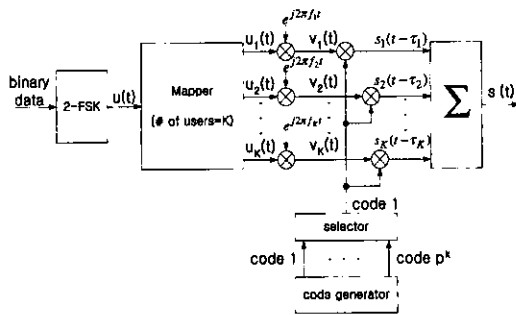


그림 1. 하나의 그룹 FH/FDMA 시스템의 송신기

그림 1은 K 명의 사용자들이 도약 패턴 code 1 을 사용하는 하나의 그룹 FH/FDMA 시스템의 송신기를 나타내며 전송되는 신호는 다음과 같다.

$$s(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t - \tau_k) = \sum_{k=1}^K p_T(t - \tau_k) \cdot \exp[j2\pi(m_k \Delta f + f_k)(t - \tau_k)] \quad (1)$$

where $p_T(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, T_k] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

식 (1)에서 m_k 는 집합 $\{+1, -1\}$ 의 원소인 k 번째 사용자의 전송 정보, FDMA를 의미하는 f_k 는 집합 $\{f_1, f_2, \dots, f_K\}$ 의 원소, FSK 신호들간의 주파수 간

격(frequency separation)은 $2\Delta f$ 와 같다. 또한 τ_k 는 k 번째 사용자의 지연시간이다. 이것은 $[-T_k, T_k)$ 범위에서 일정하고 사용자들간에 독립적으로 분포된다고 가정한다. 그리고 데이터 비트당 전송되는 칩의 개수는 하나라고 가정하자.

2. 수신기

그림 2는 첫 번째 사용자에서 바라본 수신기다. i 번째 칩 간격동안 수신되는 복소 저주파통과 등가 신호(complex low-pass equivalent signal)는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K+1} a_k p_T(t - iT_k - \tau_k) \cdot \exp[j2\pi(m_k \Delta f + f_k)(t - \tau_k) + \phi_k] + z(t) \quad (2)$$

여기서 a_k 는 k 번째 사용자의 신호 크기, ϕ_k 는 k 번째 사용자의 위상값으로써 이것은 사용자들간에서 독립적이고 $[0, 2\pi)$ 범위에서 일정하게 분포된 값을 갖는다. 또한 $z(t)$ 는 p.s.d (power spectral density)가 N_0 인 복소 저주파통과 등가 가우시안 잡음을 가리킨다. 그리고 수신기는 첫 번째 사용자 와 동기가 맞았다고 가정하자. 그러면 $\tau_1=0$ 이고 나머지 K_h 개는 $\tau_k \neq 0 (k \neq 1)$ 이다. 이때 decision에 대한 평균 에러률은 다음과 같이 표현된다.^[2]

$$P_e = \sum_{K_h=0}^K \binom{K}{K_h} p_h^{K_h} (1 - p_h)^{(K - K_h)} P_e(K_h) \quad (3)$$

식 (3)은 FH/CDMA 다중접속 시스템에서 사용자들이 동일한 전력을 가질 때 평균 에러률이다. 이 식은 본 시스템에서도 적용될 수 있는데 차이점은 p_h 에서 찾을 수 있다. 본 논문에서 칩간의 동기는 맞았다고 가정하는데 이는 원하는 사용자 칩에 hit가 발생했을 때 완전한 하나의 칩 시간(chip duration) 동안 지속됨을 의미한다. 그러한 상황에서 FH/CDMA 시스템에서는 $\tau_k=0$ 이고 p_h 는 간단히 $1/q$ 이지만, 본 논문에서 구성한 시스템에서 p_h 는 보다 복잡한 상황을 고려해서 계산되어야 한다.

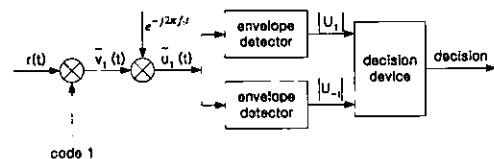


그림 2. 하나의 그룹 FH/FDMA 시스템의 수신기

III. 성능 분석

본 장에서는 식 (3)에서 소개했던 hit 발생시 평균 에러률에 대한 정확한 값 대신 [3]에서 소개한 상한값(upper bound)을 구하도록 한다. [3]에서 소개한 상한값은 다음과 같다.

$$P_e \leq P_{ue} \triangleq P_0(1 - p_h(K')) + P_{u,1} \cdot p_h(K') \quad (4)$$

여기서 P_{ue} 는 평균 에러률에 대한 상한값, P_0 는 hit가 발생하지 않을 때 조건적 에러률, $P_{u,1}$ 은 적어도 한 명 이상이 hit할 경우 조건적 에러률에 대한 상한값, $p_h(K')$ 은 그룹내 동기를 잃은 사용자수가 K' 명일 때 원하는 사용자 슬롯을 hit할 확률을 의미한다. 일반적으로 P_0 값은 잘 알려져 있기 때문에 본 장에서는 $p_h(K')$ 와 $P_{u,1}$ 값을 계산한다.

1. $p_h(K')$

본 절에서 사용되는 용어들은 다음과 같다.

N_{slot} : 인접한 주파수 도약 심볼이 차지하는 영역간의 겹치는 슬롯수,

N_{hit} : hit할 가능성이 있는 동기를 잃은 사용자의 데이터가 있는 최대 도약 심볼수,

N_{q_i} : 도약 심볼 q_i 가 차지하는 영역.

먼저 N_{hit} 는 2-FSK 시스템의 경우 그림 3을 참조해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{hit} = \lfloor \frac{2 \times K - 1}{2 \times K - N_{slot}} \rfloor \quad (5)$$

다음에 p_h 를 결정하자. p_h 는 $(N_{slot} \bmod 2) = 0$, $\neq 0$ 일 때를 구분해서 생각하자. 왜냐하면 전자의 경우 hit가 발생하면 2개의 슬롯 모두가 영향을 받는 전체 hit만 존재하는 반면 후자의 경우 전체 hit와 부분적인 hit가 모두 존재할 수 있기 때문이다.

위 사실을 구체적으로 먼저 $(N_{slot} \bmod 2) = 0$ 인 경우부터 살펴보자. 그림 3의 팔호 안에 표시된 값은 원하는 사용자의 도약 심볼이 q_i 라면 'not'은 hit가 발생할 수 없고 ' $f_{q_{i-1}}$ '와 ' $f_{q_{i+1}}$ '는 각각 동기를 잃은 사용자의 도약 심볼이 q_{i-1} , q_{i+1} 일 때 전체 hit가 발생할 수 있음을 뜻한다. 여기서 $K' = 1$ 일 때 동기를 잃은 사용자의 도약 심볼 영역이 원하는 사용자의 슬롯을 hit할 확률은 그림 3을 참조해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

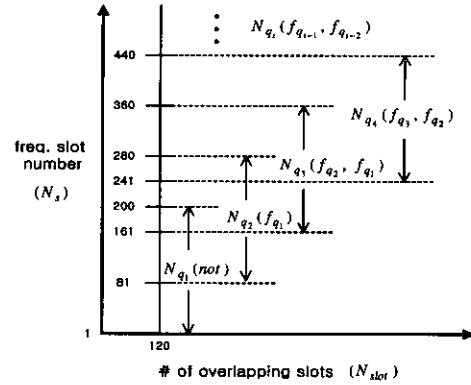


그림 3. $K=100$, $N_{slot}=120$ 일 때 원하는 사용자의 도약 심볼이 차지하는 영역에 따른 hit 발생에 대한 개념 ($(N_{slot} \bmod 2) = 0$)

$$P(\text{hit}|K'=1) = \frac{1}{q^2} \left[\sum_{n=1}^{N_{hit}-1} n + N_{hit}(q - N_{hit}) \right] \quad (6)$$

이때 동기를 잃은 도약 심볼 영역에서 hit할 가능성이 있는 사용자는 $K-1$ 명의 사용자중 한 명밖에 없으므로 p_h 는 다음과 같다.

$$p_h = \frac{1}{q^2} \left[\sum_{n=1}^{N_{hit}-1} n + N_{hit}(q - N_{hit}) \right] \times \frac{1}{K-1} \quad (7)$$

따라서 $p_h(K')$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_h(K') &= 1 - (1 - p_h)^K \quad ((N_{slot} \bmod 2) = 0) \\ &= 1 - \left[1 - \frac{1}{q^2} \left(\sum_{n=1}^{N_{hit}-1} n + N_{hit}(q - N_{hit}) \right) \times \frac{1}{K-1} \right]^K \end{aligned} \quad (8)$$

다음은 $(N_{slot} \bmod 2) \neq 0$ 인 경우를 살펴보자. 두 가지 종류의 hit 발생 가능성을 고려해서 식 (6)을 다음과 같이 구분하자.

$$\begin{aligned} P(\text{hit}|K'=1) &= P(\text{full hit}|K'=1) \\ &+ P(\text{partial hit}|K'=1) \quad ((N_{slot} \bmod 2) \neq 0) \end{aligned} \quad (9)$$

이때 hit할 가능성이 있는 사용자수는 전체 hit일 경우 $K-1$ 명의 사용자중 한 명, 부분적인 hit일 경우 두 명이 존재할 수 있으므로 p_h 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_h &= P(\text{full hit}|K'=1) \times \frac{1}{K-1} \\ &+ P(\text{partial hit}|K'=1) \times \frac{2}{K-1} \end{aligned} \quad (10)$$

그리고 이 경우는 N_{hit} 가 짝수와 홀수일 때 두 가

지 상황을 고려해야 하는데 각각 그림 4와 5를 관찰해서 식 (10)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_h = \frac{1}{q^2(K-1)} \left((N_{slot} \bmod 2) \neq 0, N_{hit}: even \right) \quad (11)$$

$$\times \left[6 \sum_{n=1}^{\lfloor \frac{N_{hit}}{2} \rfloor - 1} n + \frac{3}{2} N_{hit} \left(q - N_{hit} + \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$p_h = \frac{1}{q^2(K-1)} \left((N_{slot} \bmod 2) \neq 0, N_{hit}: odd \right)$$

$$\times \left[\left\{ \sum_{n=1}^{\lfloor \frac{N_{hit}}{2} \rfloor - 1} 2n + \lfloor \frac{N_{hit}}{2} \rfloor (q - N_{hit} + 1) \right\} \right.$$

$$\left. + 2 \times \left\{ \sum_{n=1}^{\lfloor \frac{N_{hit}}{2} \rfloor - 1} 2n + \lfloor \frac{N_{hit}}{2} \rfloor (q - N_{hit}) \right\} \right] \quad (12)$$

결국 $p_h(K')$ 는 식 (11)과 (12)를 이용해서 식 (8)과 같은 방법으로 구할 수 있다.

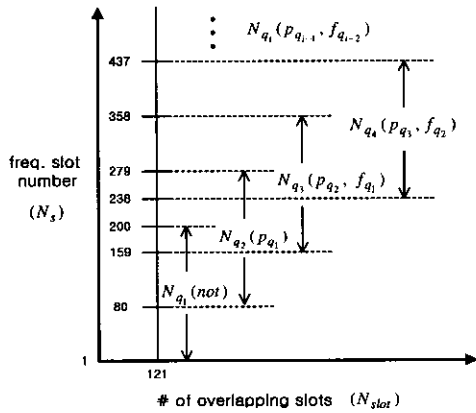


그림 4. $K=100$, $N_{slot}=121$ 일 때 원하는 사용자의 도약 심볼이 차지하는 영역에 따른 hit 발생에 대한 개념 ($(N_{slot} \bmod 2) \neq 0, N_{hit}: even$)

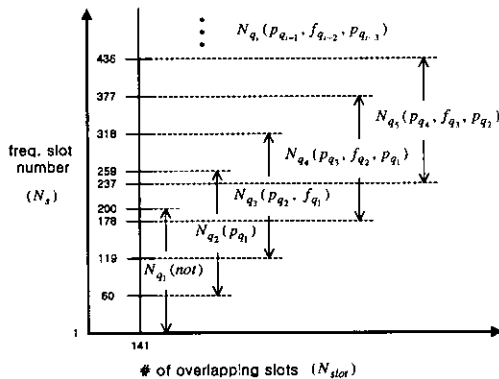


그림 5. $K=100$, $N_{slot}=141$ 일 때 원하는 사용자의 도약 심볼이 차지하는 영역에 따른 hit 발생에 대한 개념 ($(N_{slot} \bmod 2) \neq 0, N_{hit}: odd$)

2. $P_{u,1}$

먼저 $(N_{slot} \bmod 2) = 0$ 인 경우는 앞서 설명한 대로 전체 hit만 존재하며 $P_{u,1}$ 는 FH/CDMA 방식에서 사용하는 1/2라고 하자. 여기서 한 가지 주의할 점은 $P_{u,1}$ 는 $K'=1$ 일 때의 상한값이라고 볼 수 있는데 이는 동기를 잃은 사용자가 K' 명일지라도 원하는 사용자의 슬롯을 동시에 hit할 확률은 p_h 의 승수(power)로 표현되므로 매우 작기 때문이다.

다음 $(N_{slot} \bmod 2) \neq 0$ 인 경우는 전체 hit와 부분적인 hit가 모두 존재할 수 있으므로 각각에 대한 상한값을 고려해야 한다. 우선 식 (10)의 구성 성분을 다음과 같이 정의하자.

$$p_{full, h} \triangleq P(\text{full hit} | K' = 1) \times \frac{1}{K-1} \quad (13)$$

$$p_{partial, h} \triangleq P(\text{partial hit} | K' = 1) \times \frac{2}{K-1} \quad (14)$$

따라서 동기를 잃은 사용자가 K' 명이면 다음 식 (15)와 (16)을 얻을 수 있다.

$$p_{full, h}(K') = 1 - (1 - p_{full, h})^{K'} \quad (15)$$

$$p_{partial, h}(K') = 1 - (1 - p_{partial, h})^{K'} \quad (16)$$

또한 식 (15)와 (16)에 대한 조건적 어려움의 상한값을 각각 $P_{u,1}$, $P_{u,1}$ 라고 하면 식 (4)는 다음과 같이 변환된다.

$$P_{uc} \triangleq P_0(1 - p_h(K')) + P_{u,1} \cdot p_{full, h}(K') \quad (17)$$

$$+ P_{u,1} \cdot p_{partial, h}(K') \quad ((N_{slot} \bmod 2) \neq 0)$$

여기서 $P_{u,1}$ 는 전과 같이 1/2이다. $P_{u,1}$ 는 그림 6을 이용해서 설명할 수 있다. 그림 6은 원하는 사용자를 user1이라고 할 때 동기를 잃은 사용자의 슬롯이 user1의 데이터 '1'이 들어있는 슬롯을 hit한

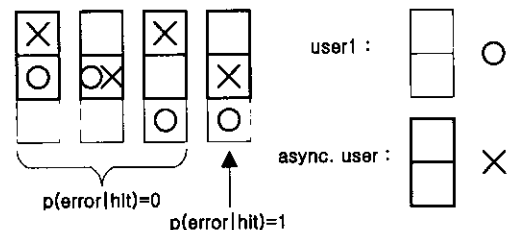


그림 6. 2-FSK, $(N_{slot} \bmod 2) \neq 1$ 일 때 hit 발생시 어려움의 상한값에 대한 개념

다고 가정한 경우이다. 또한 동일한 확률을 가지고 데이터 '0'이 들어있는 슬롯을 hit한다고 가정하면 결국 에러률에 대한 상한값은 다음과 같다.

$$P_{u,1} = \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{4}\right) \times 2 = \frac{1}{4} \quad ((N_{slot} \bmod 2) = 1) \quad (18)$$

IV. 실험 결과 및 고찰

1. 모의 실험에 적용된 파라미터들

$L=1$ 이고 $K=100$ 일때 시스템의 대역폭을 50~500MHz 범위에서 변화시켜가며 직교성을 보장하는 도약 심볼수를 구하면 표 1과 같다. 표 1에서 R_H 는 식 (19)에 의해서 계산된다.

$$R_H = LR_b / k\eta R, \quad k = \log_2 M \quad (19)$$

여기서 프레임 효율 $\eta=0.8$, 부호율 $R=1/2$ 이라고 하였다. 표 1에서 볼 수 있듯이 주어진 시스템 대역폭에 대해서 직교성을 만족하기 위해 필요한 도약 심볼수는 5~52개로써 매우 적다. 따라서 $p=2$, 차수 $n=9$ 인 원시 다항식을 사용해서 q 를 64, 128, 256, 512로 증가시키고자 한다. 2-FSK 변조방식을 사용할때 도약 대역폭과 도약 심볼수에 따른 인접한 도약 심볼이 차지하는 영역간의 겹치는 슬롯수

표 1. 시스템의 주파수 도약 대역폭에 따른 직교 주파수 도약 심볼들의 개수

구분	2 FSK	
data rate(R_b)	9.6 kbps	
hopping rate(R_H)	24 khops/s	
tone spacing(Δf_{ortho})	48 kHz	
total modulation bandwidth(w)	96 kHz	
total RF bandwidth(w_{RF})	9.6 MHz	
# of orthogonal frequency hopping symbols (q_{ortho})	frequency hopping bandwidth	50 5개
	100	10개
	200	20개
	500	52개

표 2. 2-FSK에서 주파수 도약 대역폭과 도약 심볼수에 따른 인접한 도약 심볼이 차지하는 영역간의 겹치는 슬롯수

주파수 도약 대역폭 (MHz)	# of overlapping slots N_{slot} (개)			
	$\alpha(64)$	$\alpha(128)$	$\alpha(256)$	$\alpha(512)$
50	188	194	197	199
100	172	186	193	197
200	140	171	186	193
500	39	120	160	181

는 표 2와 같다. 표 2에서 겹치는 슬롯수는 식 (20)에 의해서 계산된다.

$$N_{slot} = 2 \times K - \lfloor \frac{2 \times K(q_{ortho} - 1)}{q - 1} \rfloor \quad (20)$$

2. 결과 분석

그림 7은 시스템의 대역폭이 50MHz일때 동기를 잃은 사용자수와 겹치는 슬롯수에 따른 비트 에러률이다. 시스템의 대역폭을 고정시키고 겹치는 슬롯수를 q 에 따라 변화시켜 본 결과 N_{slot} 에 상관없이 성능에 거의 차이가 없었다. 그 이유는 $N_{slot}=197, 199$ 일때 p_h 는 전체 hit와 부분적인 hit로 구성되어 있으므로 hit가 발생한 슬롯에 대한 에러가 동일하게 발생할 것이고 식 (11)를 이용하면 각각 $p_h \approx 2.170 \times 10^{-3}, 2.374 \times 10^{-3}$ 로써 큰 차이가 없으며 $N_{slot}=188, 194$ 일때도 전체 hit만 존재하므로 hit가 발생한 슬롯에 대한 에러가 동일하게 발생할 것이고 식 (7)을 이용하면 각각 $p_h \approx 1.745 \times 10^{-3}, 1.752 \times 10^{-3}$ 로써 큰 차이가 없기 때문이다. 또한 $(N_{slot} \bmod 2) = 1$ 과 0일때 p_h 는 차이를 보이고 있지만 전체 hit만 발생하는 $(N_{slot} \bmod 2) = 0$ 일때가 전체 hit와 부분적인 hit가 모두 존재하는 $(N_{slot} \bmod 2) = 1$ 일때보다 hit가 발생한 슬롯에 대한 에러가 더 많이 발생하므로 결과적으로 성능에 큰 차이가 없어 보인다. 따라서 시스템의 대역폭이 주어졌을때 q 는 $N_{slot} < K \times 2 = 200$ 범위를 만족하는 최대값을 선택해도 성능 저하에 큰 영향을 미치지 않을 것이라고 생각된다.

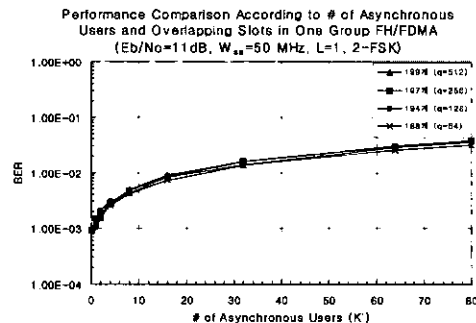


그림 7. 2-FSK, $w_{ss}=50$ MHz일때 동기를 잃은 사용자수와 겹치는 슬롯수에 따른 성능 분석

그림 8은 $q=64$ 로 고정시키고 시스템의 대역폭에 따라 겹치는 슬롯수를 변화시켰을때 $N_{slot}=39$ 일

때가 188일때보다 2-FSK 시스템의 비슷한 BER 범위를 고려했을때 대략 2 dB 정도 성능 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 그림 9는 전체 hit와 부분적인 hit가 모두 존재하는 경우에 hit 발생시 에러률에 대한 상한값과 실험 결과를 보여주고 있다.

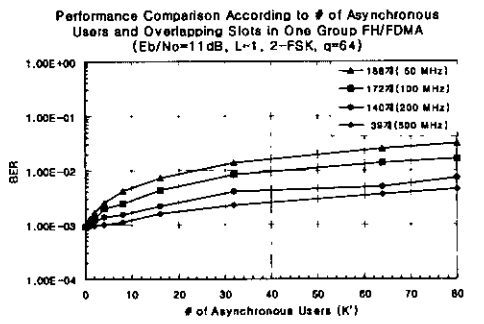


그림 8. 2-FSK, $q=64$ 일때 동기를 잃은 사용자와 겹치는 슬롯수에 따른 성능 분석

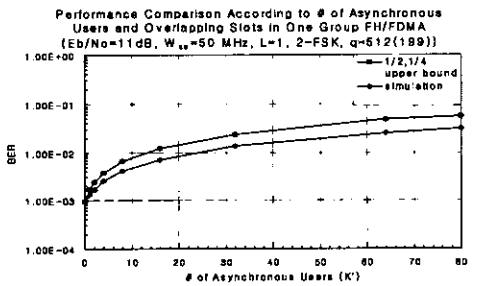


그림 9. 2-FSK, $w_{ss}=50 MHz$, $N_{slot}=199$ 일때 동기를 잃은 사용자수에 따른 에러률의 상한값과 시뮬레이션 결과

V. 결론

본 논문에서는 하나의 그룹 FH/FDMA 시스템에서 불가피하게 발생하는 인접한 도약 심볼 영역내 겹치는 슬롯수를 대역폭을 고정했을때 q 에 따라 변화시켜 보았다. 그 결과 겹치는 슬롯수 N_{slot} 에 상관없이 비슷한 비트 에러률을 보였다. 이것은 성능 변화에 있어서 q 는 큰 영향을 미치지 않음을 의미하며 따라서 LPI 측면을 고려해서 최적의 q 는 N_{slot} 을 최대로 하는 값이어야 함을 알 수 있었다. 그리고 동일한 결과를 4-FSK에서도 확인할 수 있었다. 또한 q 를 고정시키고 겹치는 슬롯수를 변화시키며 성능 변화를 관찰해 보았다.

참 고 문 헌

- [1] A. Lempel and H. Greenberger, "Families of Sequences with Optimal Hamming Correlation Properties," *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. IT-20, pp. 90-94, Jan. 1974.
- [2] K. Cheun and W. E. Stark, "Probability of error in frequency-hop spread-spectrum communication systems with noncoherent reception," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol. 39, pp. 1400-1410, Sept. 1991
- [3] E. A. Geraniotis and M. B. Pursley, "Error Probabilities for Slow-Frequency-Hopped Spread-Spectrum Multiple Access Communications Over Fading Channels," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol. 44, No. 11, pp. 1514-1526, Nov. 1996.

구 정 우(Jung-Woo Ku)

정회원



1998년 2월 : 광운대학교 컴퓨터 공학과 학사
 2000년 9월 : 연세대학교 전기·전자공학과 석사
 <주관심 분야> Error Correcting Codes, CDMA, Spread Spectrum Communication

은 유 창(Yu-Chang Eun)

정회원



1998년 2월 : 연세대학교 전자공학과 학사
 2000년 2월 : 연세대학교 전기·전자공학과 석사
 2000년 3월~현재 : 연세대학교 전기·전자 공학과 박사과정
 <주관심 분야> PN Sequences, 주파수 도약 시스템, 채널코딩

송 흥 엽(Hong-Yeop Song)

정회원



1984년 2월 : 연세대학교 전자공학과 학사
 1986년 5월 : USC 전자공학과 석사
 1991년 12월 : USC 전자공학과 박사
 1992년~1993년 : Post Doc, USC 전자공학과

1994년~1995년 : Qualcomm Inc., 선임연구원

1995년 9월~현재 : 연세대학교 전기·전자 공학과
교수

<주관심 분야> Error Correcting Codes, PN
Sequences, CDMA, Spread Spectrum
Communication