

Side Information에 오경보와 미탐지가 존재할 때 저속 주파수 도약 시스템의 BER분석

학생회원 한 상 진*, 정회원 김 용 철*, 강경 원**, 윤 희 철**

Analysis of BER in Slow Frequency-Hopping System with False Alarm and Miss in Side Information

S. J. Han* *Student Members*, Y. C. Kim*, K. W. Kang**, H. C. Yun** *Regular Members*

요 약

SFH (저속 주파수 도약) 시스템에서는 주파수 슬롯의 히트에 대처하기 위하여, 보통 Reed-Solomon 부호와 인터리빙을 사용한다. SI (Side Information)를 이용하여 히트되는 심볼을 이레이저 처리하는 EE (Errors-and-Erasure) 복호 방식의 패킷 단위 오류 율에 대해서는 많은 분석이 이루어졌으나, 오경보와 미탐지가 발생하는 불완전한 SI를 이용할 때의 BER 성능에 대해서는 Monte Carlo 시뮬레이션에 의한 분석만이 행하여 졌을 뿐이다. 본 논문에서는 테스트 패턴을 사용하여 얻은 SI에 오경보와 미탐지가 존재하는 상황에서 SFH 시스템의 BER을 추정하는 수식을 제안한다. SI에 오류가 존재하지 않는다는 가정을 사용하지 않고, 심볼의 비트 오류의 수를 추정하여 SFH 시스템의 BER을 추정한 값과 시뮬레이션으로 얻어진 BER을 비교하여 두 결과가 일치함을 확인하였다. 또한 기존의 연구에서 얻은 수식들은 본 연구에서 제안하는 수식으로부터 유도할 수 있음을 보였다.

ABSTRACT

Reed-Solomon code, block interleaving and SI (side information) are frequently used in SFH (slow frequency hopping) system. Erasing those symbols in the hit frequency slot greatly increases the error correction capacity. Packet error rate has been the major performance measure for SFH system. The analysis of BER has been limited to the case of perfect SI, in which neither miss nor false alarm exists. BER with imperfect SI has been obtained only by Monte Carlo simulation. In this paper, we present a unified solution to estimate BER with imperfect SI. It is shown that previous formulae for packet error rate or BER with perfect SI are special cases in the proposed solution. The computed BER with false alarm and miss of frequency hit is verified by comparing with the simulation result.

I. 서론

저속 주파수 도약(SFH: Slow Frequency Hopping) 통신 시스템은 보안성이 높고 다중 접근성이 우수하여서 군사적, 상업적 목적으로 많이 사용된다^[1,2]. SFH 환경에서 재밍이나 간섭에 의해 주파수의 히트

(Hit)가 발생하면 여러 비트의 오류가 연접하여 발생하는데, 이러한 연접 오류는 보통의 오류 정정 부호의 정정 능력의 범위를 벗어난다. SFH 통신 시스템에서는 흔히 R-S (Reed-Solomon) 오류 정정 부호와 블록 인터리빙 기법을 함께 사용한다. 블록 인터리빙으로 비트열의 배열 순서를 바꾸어 연접 오류를 랜덤 오류의 형태로 바꾸면 R-S 부호의 정정 능력을 효과

* 서울시립대학교 전자전기컴퓨터 공학부(yckim@uos.ac.kr)
논문번호: 010006-0216, 접수일자: 2001년 2월 16일

** LG 이노텍 연구소 무선통신팀

※ 본 연구는 LG 이노텍 연구소의 지원으로 수행된 결과입니다.

적으로 사용할 수 있다^[2].

Pursley는 블록 인터리빙과 R-S 부호를 이용하여 저속 주파수 대역 시스템에서 다중 간섭과 재밍에 의한 영향을 억제하는 방식을 제안하였으며, SI (Side Information)를 이용하여 EE (Errors-and- Erasure) 복호화 방식을 SFH 시스템에 적용시키는 방법을 제안하였다^[2-7]. R-S 코드워드 내에서 오류 발생 위치를 알고 있는 심볼을 이레이저 처리하는 EE 복호 방식은, 오류의 위치를 모르는 상태에서의 Errors-only 복호 방식에 비해서 오류 정정 능력이 최대 두 배로 향상된다. 어떤 (n, k) R-S 코드에서 Errors-only 복호 방법을 사용하면 $\lfloor (n-k)/2 \rfloor$ 개까지 심볼 오류의 정정이 가능하지만, EE복호 방법을 사용하면 최대 $(n-k)$ 개의 심볼 오류를 정정할 수 있다.

1.1 연구의 배경

히트 여부의 판단에는 오경보(False Alarm)와 미탐지(Miss)가 존재한다. Pursley는 히트의 오경보와 미탐지가 발생하는 경우에 대하여 패킷 오류 율을 계산하는 식을 유도하였으며^[2,3], 계산 결과 오경보율이나 미탐지율이 어느 값 이상으로 커지면 패킷 오류 율은 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

통신 링크의 BER과 패킷 오류 율 사이에는 높은 상관성이 있지만, 반드시 일치하지는 않는다. 오류가 발생한 패킷 내부의 오류는 한 비트일 수도 있고 여러 비트일 수도 있기 때문이다. 따라서, 오경보와 미탐지가 발생할 때의 BER에 대한 분석은 패킷 오류 율과는 별도로 행해질 필요가 있다.

SFH 시스템의 BER 성능에 대한 연구는 제한적으로 이루어졌다. SI가 완전하다고 가정한 경우에 대해서만 성능이 수학적으로 분석되었으며^[4,5], SI가 완전하지 않아 히트가 오경보되거나 미탐지되는 경우에 대해서는 Mortazavi에 의해 Monte Carlo 시뮬레이션에 의한 성능 분석이 주로 행해졌다^[8]. BER의 분석은 패킷 오류 율의 분석에 비해 훨씬 복잡하며 본 논문은 이에 대해 상세히 서술한다.

1.2 연구의 내용

본 논문에서는 SI에서 얻어진 히트에 오경보와 미탐지가 존재하는 상황에서 SFH 시스템의 BER을 추정하는 수식을 제안한다. 제안하는 수식으로부터 계산한 BER과 Monte Carlo 시뮬레이션으로 얻어진 BER의 결과가 일치함을 보인다. 과거의 연구에서는^[4,5], SI에 오류가 발생하지 않는다고 가정하였으나 본 논문에서는 이같은 가정을 하지 않는다.

제안하는 추정식은 랜덤 잡음에 의한 오류와 간섭에 의한 히트로 인하여 발생할 수 있는 모든 경우의 오류를 고려한다. R-S 부호의 EE 복호화 과정에서 코드워드의 정정 기능 여부를 판별한 후, 정정이 이루어지지 않는 경우의 평균을 취하여 BER을 구한다.

본 논문에서는 Pursley가 제안하는 방식과 동일한 SFH 시스템을 사용하였다^[2,3]. R-S 코드와 함께 연립 오류에 대처하기 위해 인터리빙과 SI를 사용했다. SI는 테스트 패턴을 삽입하는 방법을 사용하였으며, 테스트 패턴의 오류 발생 여부 판단에서 발생하는 오정보 확률과 미탐지 확률에 따른 시스템의 BER 성능을 구하였다.

Section II에서는 SFH 환경에서의 오류 정정 시스템에 대해 기술한다. Section III에서는 오정보와 미탐지가 존재할 때 BER을 추정하는 수식을 제안한다. Section IV에서는 제안하는 방법에 의한 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였으며, 미탐지와 오경보가 시스템 성능에 미치는 영향을 서술하였다.

II. 연구에 사용한 SFH 시스템의 구성

2.1 SFH 통신 시스템

SFH 시스템은 채널 주파수를 랜덤하게 변경하는데, 채널은 랜덤 잡음과 주파수 의존적인 간섭 모두에 의해 영향을 받게 된다. 그림 1은 SFH 시스템에 발생하는 히트의 패턴을 나타낸다. 사용 가능한 주파수 슬롯이 $f_1 \sim f_{100}$ 일 때, A와 B가 f_{12} 의 주파수를 동시에 사용하면 히트가 발생한다. 또한 $f_{20} \sim f_{30}$ 사이에 재밍이 존재할 때, 재밍 대역 내의 주파수를 사용하면 히트가 발생한다^[9].

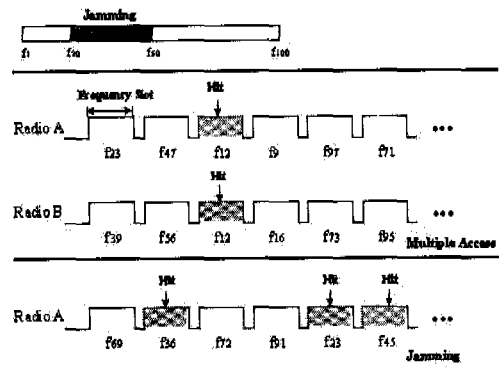


그림 1. 간섭 발생 패턴

2.2 R-S 부호와 인터리빙

그림 2에 나타난 바와 같이 하나의 패킷은 (n, k) R-S 부호의 코드워드 L 개로 구성되어 있고, 하나의 심볼은 m 비트로 이루어져 있다. 차례로 발생하는 L 개의 코드워드는 인터리빙에 의하여 열 방향으로 입력되어 행 방향으로 출력된다. 이 과정을 통해 각 R-S 코드워드는 주파수 슬롯 단위로 나뉘어지게 된다. 전송 과정에서 j 번째 주파수 슬롯이 히트되어 연결 오류가 발생하더라도, 원래의 순서로 복원된 후에는 각 코드워드의 j 번째 심볼들로 분산되므로 연결 오류는 랜덤 오류로 바뀐다.

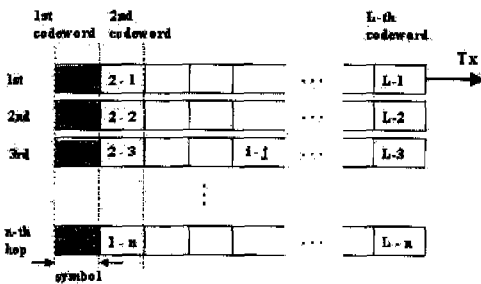


그림 2. 패킷이 인터리빙된 형태

2.3 SI의 사용

SI를 얻는 방법은 패러티를 이용하는 방법, 테스트 패턴을 삽입하는 방법 등 여러 가지가 있다^[2,3,7]. 본 논문에서는 테스트 패턴을 이용하는 방법을 사용하였다. 그림 3에 나타난 바와 같이, 데이터는 R-S 부호화 후 인터리빙된다. 각 주파수 슬롯의 시단과 종단에는 수 비트의 테스트 패턴을 삽입한다. SI는 수신된 테스트 패턴의 비트 오류를 분석함으로써 얻어진다. 비동기적 주파수 도약에서도 주파수 히트가 발생하면 양끝 중 한 부분 이상에서 오류가 발생하게 된다. 따라서 시단과 종단의 어느 한 부분이라도 테스트 패턴의 비트 오류 수가 임계값 이상이면 히트가 발생하였다고 판단한다.

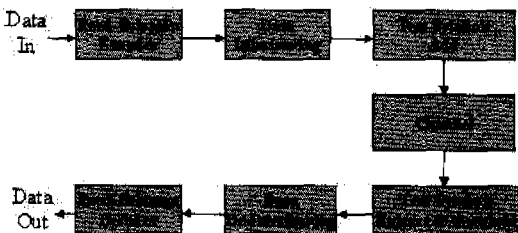


그림 3. 오류 정정 부호화 과정

SI로부터 얻어지는 히트 여부의 판단에는 오경보와 미탐지가 존재한다. 오경보된 히트의 수만큼 이레이저 심볼의 수가 불필요하게 늘어나게 되며, 반면에 실제로 발생한 히트를 미탐지하면 이레이저 심볼로 처리할 수 있었던 것을 오류 심볼로 처리하게 되므로, SI가 불완전할 경우의 성능은 완전한 SI일 때의 성능에 비해서 현저히 저하된다.

2.4 기존의 SFH 시스템의 성능 분석 결과

랜덤 잡음과 간섭에 대한 SFH 시스템의 성능 분석은 주로 Pursley에 의해 이루어졌다. Pursley는 SI와 EE 복호를 이용하는 오류 정정 시스템의 패킷 오류율을 추정하는 식을 제안하였다. 이러한 결과를 Errors-only 복호 때의 성능과 비교하였으며, SI의 오경보율과 미탐지율에 따른 시스템의 성능저하 정도를 분석하였다^[2].

식 (1-a)는 Pursley가 제안한 패킷 오류율을 구하는 식이다. P_C 는 복호된 하나의 코드워드에 오류가 발생하지 않을 확률로서, 히트에 의한 이레이저 심볼의 수와 랜덤 잡음에 의한 심볼 오류의 두 배의 합이 $(n-k)$ 이하가 될 확률과 같다^[2,3].

ρ 는 전체 주파수대역 중에서 재밍당하고 있는 대역의 비율이며, a 와 β 는 각각 SI의 미탐지율과 오경보율을 나타낸다. j 는 실제로 발생하는 히트의 수이며, r 은 실제로 발생한 히트 중에서 탐지된 수이며, s 는 실제로는 히트가 발생하지 않았으나 오경보에 의해 이레이저된 심볼의 수를 나타낸다. p_s^j 는 히트된 주파수 슬롯에 있는 심볼에 오류가 발생할 확률을 나타내며 p_s^N 는 주파수 슬롯은 히트되지 않았으나 랜덤 잡음에 의해 심볼 오류가 발생할 확률을 나타낸다. 하나의 패킷 안에는 L 개의 코드워드가 있으므로 P_C 를 L 거듭 제곱한다.

$$P_E = 1 - \sum_j B(\rho, n, j) B(a, n-j, s) (P_C(j, s, r))^L$$

$$P_C(j, r, s) = \sum_{t_1 \in \text{detected hit}} \sum_{t_2 \in \text{no hit}} B(p_s^j, j-r, t_1) \cdot B(p_s^N, n-j-s, t_2) \tag{1-a}$$

$$B(p, a, b) = \binom{a}{b} p^b (a-b)^{a-b} \text{ 이항분포}$$

Pursley는 페이딩 채널에서의 SFH 시스템의 BER을 계산하는 방법을 제시하였으나, 식의 유도 과정에서 SI의 오경보와 미탐지에 의한 영향은 고려하지 않았다. 오류와 이레이저는 심볼 단위로 이루어졌으며, 히트의 오경보와 미탐지가 발생하지 않는 완전한 SI

를 가정하였다. 상세한 과정은 [4,5,10]에서 찾아볼 수 있으며 간략히 설명하면 다음과 같다.

식 (1-b)에서 E 는 수신된 코드워드의 복호 오류를 나타내며, B_i 는 i 번째 심볼에 비트 오류가 발생하는 경우를 나타내며, H_i 는 i 번째 심볼에 히트가 발생하는 경우를 나타낸다. X 는 페이딩에 의한 채널 전달 특성을 나타내며, $p_e^{(i)}(X)$ 는 코드워드의 i 번째 심볼에서 비트 오류가 발생할 확률을 나타낸다. 페이딩 특성에 맞추어 X 를 랜덤하게 변화시키면서 $p_e^{(i)}(X)$ 를 구한 평균값이 최종 BER이 된다. 식 (1-b)에서는 히트가 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우를 나누어 계산한다. $P(B_i \cap H_i^c)$ 는 랜덤잡음에 의한 비트 오류 발생 확률로 주어지며, $P(E | B_i \cap H_i^c)$ 는 i 번째 주파수 슬롯은 히트되지 않은 상태에서 i 번째 심볼에 오류가 있을 때, 코드워드가 정확히 복호되지 못할 확률을 나타낸다.

$$p_e^{(i)}(X) = P(B_i \cap H_i^c)P(E | B_i \cap H_i^c)P(H_i^c) + P(B_i \cap H_i)P(E | B_i \cap H_i)P(H_i) \quad (1-b)$$

III. BER추정 알고리즘

SI로부터 얻어지는 히트 정보에 오경보와 미탐지가 존재할 때, SFH 시스템의 BER 성능의 유도는 다음과 같다. 오류정정 부호로는 (n, k) R-S코드를 사용하며 수신부에서는 EE 복호를 한다고 가정한다. ρ 는 전체 주파수 대역과 간섭에 의해 히트가 발생한 대역의 비율이며, 간섭에 의한 히트율을 나타낸다. 히트가 발생한 주파수 슬롯에서의 비트 오류율을 p_e^s 라 정의한다. 랜덤 잡음에 의해 발생하는 비트 오류의 발생확률을 p_e^r 라 할 때, 랜덤 잡음에 의해 m 비트

심볼에 오류가 발생할 확률 p_e^s 는 식 (2)로 주어진다.

$$p_e^s = 1 - (1 - p_e^r)^m \quad (2)$$

3.1 심볼 오류와 이레이저의 발생

채널에서의 히트에 의해 발생하는 이레이저 심볼의 수를 u 로, 랜덤 잡음에 의한 심볼 오류의 수를 v 라 할 때, SI가 정확하다면 u 와 v 는 식 (3)에 의해 구할 수 있다.

$$u = n \cdot \rho \quad (3)$$

$$v = (n - u) \cdot p_e^s$$

실제 상황에서는 히트가 미탐지된 주파수 슬롯의 심볼 오류와 오경보된 히트에 의한 이레이저가 존재하므로 실제 수신부에서 복호기에 입력되는 오류와 이레이저의 수는 이와는 다르게 된다. 오경보와 미탐지에 의한 u 와 v 의 값이 변하는 과정을 그림 4에 보였으며, 수식 (4-a)부터 (4-d)에 상호 관계를 나타내었다.

$$u_c = h - u_m \quad (4-a)$$

$$v_m = u_m(1 - (1 - p_e^h)^m) \quad (4-b)$$

$$g_r = n - h - u_{fa} \quad (4-c)$$

$$v_r = g_r \cdot p_e^s \quad (4-d)$$

채널에서 h 개의 히트가 발생할 때 일부는 미탐지되어 수신부에서는 식 (4-a)와 같이 u_c 개만 이레이저로 처리하며, 이 때 히트가 미탐지 심볼의 수를 u_m 이라 한다. 히트한 주파수 슬롯의 심볼에는 보통 오류가 발생하나, 심볼을 이루고 있는 m 개의 비트 중에서 우연히 단 하나의 오류도 발생하지 않는 경우도 있다. 따라서 히트가 미탐지된 주파수 슬롯에서 오류가 있는 심볼의 수 v_m 은 식 (4-b)로 주어진다. 오경보 심볼의 개수를 u_{fa} 라 하면, $(n - h)$ 의 심볼 중 히트가 발생하지 않았다고 판단하게 되는 심볼의 개수는 식 (4-c)와 같이 g_r 로 주어진다. 그러므로 오경보와 미탐지를 고려하였을 때 수신 단에서의 u 는 u_c 와 u_{fa} 의 합이 되며, v 는 v_m 과 v_r 의 합으로 주어진다.

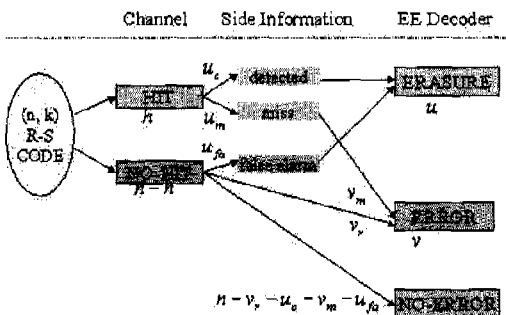


그림 4. 오경보와 미탐지의 발생에 의한 u 와 v

3.2 BER의 추정

수신 단에서 EE복호를 할 때 R-S코드워드의 이레이저와 오류의 합 d 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$d = u + 2v = u_c + u_{fa} + 2v_m + 2v_r \quad (5)$$

식 (6)에서 C 는 (n, k) R-S 코드워드의 EE정정 여부를 판별하는 식이다. C 의 값이 0일 경우에는 복호가 이루어지지 않으며, 코드워드의 비트 데이터를 아무런 정정 없이 사용한다고 가정하였다.

$$C = \begin{cases} 1 & \text{if } u_c + u_{fa} + 2v_m + 2v_r > n - k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

테스트 패턴을 사용하여 SI를 얻을 때 오경보와 미탐지 확률은 테스트 패턴의 임계값에 의해 결정된다. SI의 오경보율을 α , 미탐지율을 β 라 하기로 한다. 테스트 패턴의 길이가 S 비트이고 적용하는 임계값이 T 일 때, 테스트 패턴은 주파수 슬롯의 시단과 종단에 모두 삽입되므로 α 의 값은 식 (7-a)로 주어지며, 미탐지율 β 는 식 (7-b)로 주어진다.

$$\alpha = 1 - \left(\sum_{i=0}^{T-1} B(p_e^h, S, i) \right)^2 \quad (7-a)$$

$$\beta = \left(\sum_{i=0}^{T-1} B(p_e^h, S, i) \right)^2 \quad (7-b)$$

발생하는 모든 경우의 랜덤 오류와 히트를 고려하여 다음과 같은 순서로 경우를 나누었다.

- ① n 개의 심볼에 h 개의 히트가 발생
- ② h 개의 히트 중 u 개의 히트가 탐지
- ③ 히트가 발생하지 않은 $n-h$ 개의 심볼 중 u_{fa} 개의 오경보 이레이저 발생
- ④ $(h-u_c)$ 개의 탐지되지 못한 히트 중 v_m 개의 미탐지 오류 발생
- ⑤ 히트도 오경보도 발생하지 않은 심볼 중 v_r 개의 랜덤 오류 발생

$$BER = \sum_{h=0}^n \sum_{u_c=0}^h \sum_{u_{fa}=0}^{n-h-u_c} \sum_{v_m=0}^{n-h-u_c-u_{fa}} \sum_{v_r=0}^{n-h-u_c-u_{fa}-v_m} \frac{C \cdot Q \cdot A}{nm}$$

$$Q = B(\rho, n, h) B(1-\beta, h, u_c) B(\alpha, n-h, u_{fa}) B(1-(1-p_e^h)^m, h-u_c, v_m) B(p_e^s, n-h-u_{fa}, v_r) \quad (8)$$

$$A = u_c A_n^{u_c} + u_{fa} A_n^{u_{fa}} + v_m A_e^{v_m} + v_r A_e^{v_r}$$

$$A_n^{u_c} = \sum_{i=1}^m i \cdot B(p_e^h, m, i) = \text{히트가 발생할 때, 심볼의 평균 비트 오류 수}$$

$$A_n^{u_{fa}} = \sum_{i=1}^m i \cdot B(p_e^r, m, i) = \text{랜덤 잡음에 의한 심볼의 평균 비트 오류 수}$$

$$A_e^{v_m} = \sum_{i=1}^m i \cdot B(p_e^h, m, i) / (1 - (1-p_e^h)^m) = \text{히트에 의해 심볼이 하나 이상의 비트 오류를 가지고 있지만 히트 자체는 미탐지된 경우의 평균 비트 오류 수}$$

$$A_e^{v_r} = \sum_{i=1}^m i \cdot B(p_e^r, m, i) / (1 - (1-p_e^r)^m) \text{이다.} = \text{랜덤 잡음에 의해 심볼에 하나 이상의 비트 오류가 존재할 때 가지는 평균 비트 오류 수}$$

각각의 경우에 대하여 식 (6)의 조건을 적용하여 코드워드의 정정 가능 여부를 판단하게 된다. 정정 불가능인 경우 그 경우에 해당하는 비트 오류의 기대값의 합이 BER이 된다. Q 는 랜덤 오류와 히트의 발생확률을 나타내며 A 는 그 때의 평균 비트 오류 수이다.

3.3 기존의 추정식과의 비교

본 논문에서 제안한 BER 추정 알고리즘은 채널에서 히트, 랜덤잡음, 오경보와 미탐지 등이 발생할 수 있는 모든 경우의 발생확률을 고려하였으며, 그 때 발생할 비트오류의 기대치를 구하였다. 식 (8)에서는 $\alpha=0, \beta=0$ 를 가정한다면 완전한 SI에서의 BER을 구하는 식이 된다. 그리고 $u=0$ 를 가정하면 Errors-only 복호를 하였을 때의 시스템의 성능을 추정할 수 있게 된다. 또한 식 (8)에서 A 를 1로 하면 코드워드의 정정 가능 여부만을 나타내므로 패킷 오류 율을 유도해 낼 수 있다.

계산량은 주로 (n, k) 중의 n 값에 의해 결정된다. $\alpha=0, \beta=0$ 를 가정하면 식 (8-a)와 같이 완전한 SI를 가정하였을 때의 BER 추정식이 된다. 이 식의 계산량은 $O(n^2)$ 이며 Pursley가 제안한 BER 추정식 (1-b)와 같은 계산량을 갖게 된다.

$$\sum_{h=0}^n \sum_{v_r=0}^{n-h} C \cdot Q_p \cdot A_p / (n \cdot m) \quad (8-a)$$

$$Q_p = B(\rho, n, h) B(p_e^s, n-h, v_r)$$

$$A_p = h A_n^{u_c} + v_r A_e^{v_r}$$

식 (8)에서 비트 오류의 기대치 A 를 1로 하면 패킷 오류율 P_E 는 식 (8-b)와 같이 나타낼 수 있다. 이 식의 계산량은 $O(n^5)$ 이며 Pursley가 제안한 패킷 오류율의 식 (1-a)과 같은 계산량을 갖게 된다.

$$BER = \sum_{k=0}^L \sum_{u_c=0}^k \sum_{u_n=0}^{k-u_c} \sum_{v_n=0}^{k-u_c-u_n} \sum_{v_s=0}^{k-u_c-u_n-v_n} C \cdot Q \quad (8-b)$$

$$P_E = 1 - (1 - P)^L$$

IV. 결과

본 논문에서는 SFH 시스템의 BER을 오정보와 미탐지 확률을 고려하여 계산하였다. 먼저, 시뮬레이션에 의해 구한 BER과 식 (8)을 이용하여 계산한 BER이 일치함을 실험하였다. 이 때 α, β 는 식 (7-a)와 (7-b)를 이용하여 구하였다. 시뮬레이션은 MATLAB의 SIMULINK와 M-Script를 사용하였으며 실제 랜덤 데이터를 발생시켰다. 실험에서 사용한 R-S 코드의 종류는 (25, 18), (25, 9), (31, 24), (31, 12)이며, 테스트 패턴은 12 비트 길이의 0과 1이 반복하는 패턴을 사용하였다. 히트에 의한 비트 오류율 p 는 0.5이며, 랜덤 오류율과 히트의 발생 확률을 변화시키며 시스템의 BER을 측정하였다.

4.1 시뮬레이션과 추정 결과의 비교

4.1.1 완전한 SI를 사용할 때의 결과

SI 정보가 완전할 때, 본 논문에서 제안한 BER 추정 결과와 시뮬레이션 비교 결과를 그림 5, 6에 나타내었다. R-S 코드는 (25, 9), (31, 24)이며 ρ 가 0.02 간격으로 0~0.2로 변할 때의 BER을 구하였다. 그림 5의 (25, 18)코드에서 사용한 p 는 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001이며 그림 6의 (25, 9)코드에서는 오류 정정 능력이 상대적으로 높기 때문에 0.1, 0.05, 0.03, 0.01 일 때 구하였다. 제안한 추정 성능과 시뮬레이션 결과가 일치함을 볼 수 있다.

4.1.2 임계값에 따른 결과

그림 7, 8은 테스트 패턴의 임계값에 따른 BER의 값의 변화를 나타낸다. 그림 7은 (25, 18), 그림 8은 (25, 9) R-S 코드를 사용한 결과이며 p 는 각각 0.01, 0.03이다. 임계값에 따라 시스템의 평균 BER이 많은 차이를 보인다. 테스트 패턴을 이용하여 완전한 SI를 사용할 때와 근접한 성능을 얻을 수는 있지만,

p 와 ρ 를 충분히 고려하지 않으면 큰 성능 저하가

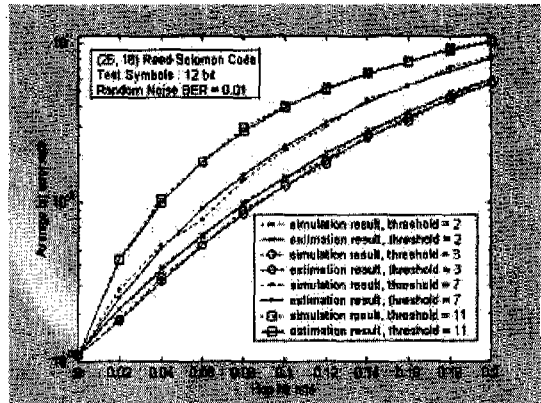


그림 5. (25, 18) R-S코드의 테스트 패턴의 임계값에 따른 모의 실험과 추정의 성능비교

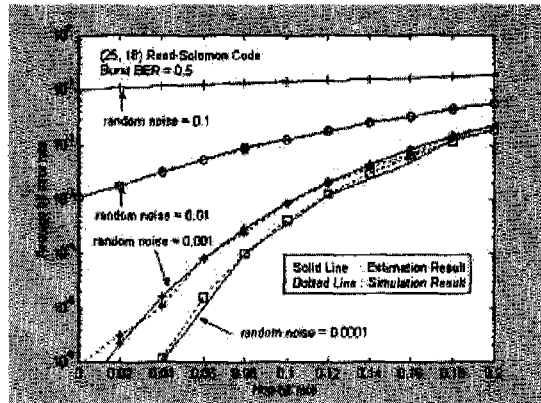


그림 6. (25, 18) R-S 코드의 완전한 SI를 사용하였을 때의 시뮬레이션과 추정의 성능비교

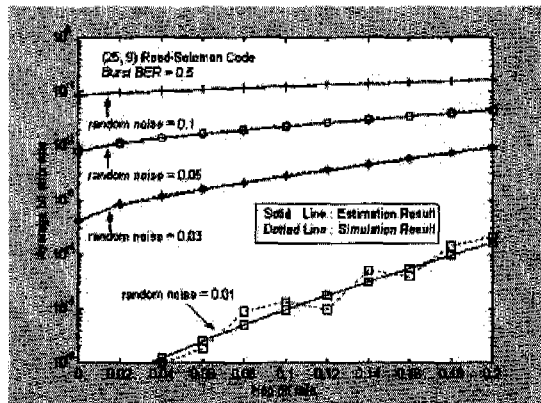


그림 7. (25, 9) R-S코드의 완전한 SI를 사용하였을 때의 시뮬레이션과 추정의 성능 비교

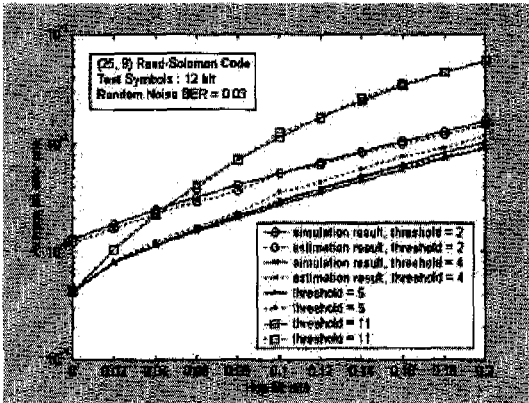


그림 8. (25, 9) R-S코드의 테스트 패턴의 임계값에 따른 모의 실험과 추정 성능비교

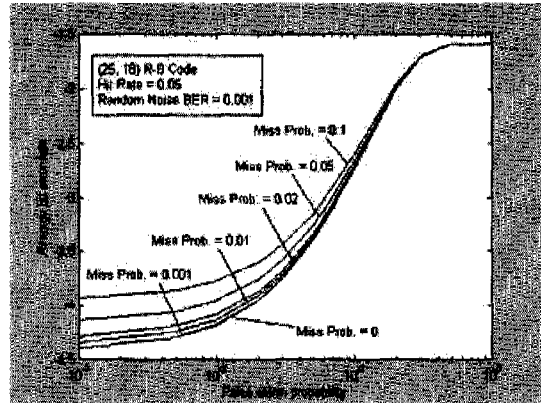


그림 10. (25,18) 코드의 오경보 율에 따른 BER

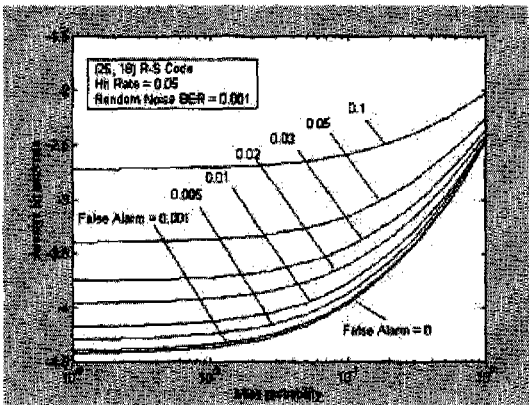


그림 9. (25, 18)코드의 미탐지 율에 따른 BER

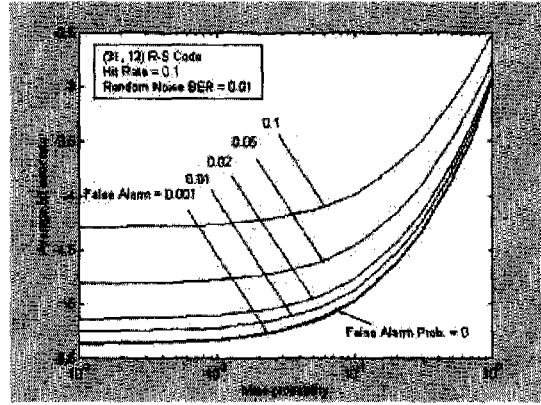


그림 11. (31,12) 코드의 미탐지 율에 따른 BER

일어날 수 있다. 그림 7에서 사용한 (25, 18)의 경우는 임계값이 3일 때 가장 좋은 BER 성능을 가지며 그림 8에서 사용한 (25, 9)의 경우는 임계값이 4일 때 가장 좋은 성능을 갖는다. 그림에서 알 수 있듯이 제한한 식에 의한 결과는 시뮬레이션과 일치한다.

4.2 오경보와 미탐지에 따른 성능

오경보와 미탐지 확률에 따른 BER을 구함으로써 원하는 성능을 얻기 위해서 허용되는 오경보와 미탐지의 범위를 알아볼 수 있다. 그림 9와 10은 (25, 18) R-S 코드를 사용하고 α 와 β 가 0.001 ~ 1.0의 범위에서 변할 때 p_1 가 0.001, p_2 가 0.05일 때의 시스템의 BER이다. 그림 11과 12는 (31, 12) R-S 코드를 사용하였을 때의 결과이며 오류 정정 능력이 (25, 18) 코드에 비해 상대적으로 높기 때문에 p_2 가 0.01일 때 비슷한 결과를 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

그림 9와 10에서 사용한 (25, 18) R-S 코드에서는 오경보 확률이 미탐지 확률보다 시스템에 더 큰 영향

을 미치는 것을 볼 수 있다. 시스템의 BER이 0.0001까지 허용된다면 미탐지 확률의 허용 범위가 0~0.1인 반면 오경보 확률의 허용 범위는 0~0.02가 된다. 이러한 오경보와 미탐지 확률의 허용 범위는 시스템 설계자와 응용 분야에 따라 달라질 것이다. 예를 들어 p_1 가 0.001이며 p_2 가 0.5일 때 12 비트의 테스트 패턴을 삽입하는 방법을 이용하여 SI를 얻는다면 미탐지 확률과 오경보 확률은 식 (7-a)와 (7-b)로써 구할 수 있다. 이 때 허용 가능한 임계값 값은 2~5가 됨을 알 수 있으며, 가장 낮은 BER은 임계값을 2로 하였을 때 구할 수 있음을 살펴볼 수 있다.

4.3 패킷 오류율 성능

그림 13과 14는 식 (8-2)의 패킷 오류 율을 추정하는 식을 이용한 결과이다. 그림 9와 10에서와 마찬가지로 (25, 18) R-S 코드, ρ 는 0.05, p_1 는 0.001일 때의 오경보 확률과 미탐지 확률에 따라 패킷 오류

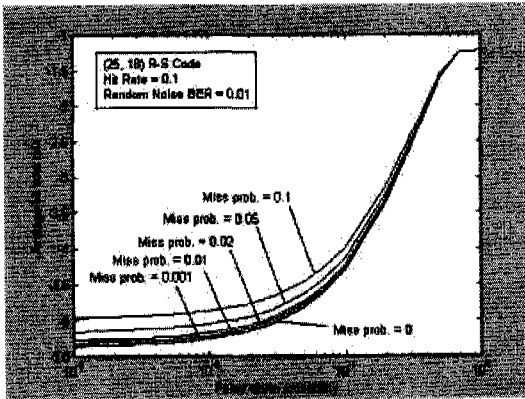


그림 12. (31,12)코드의 오경보 율에 따른 BER

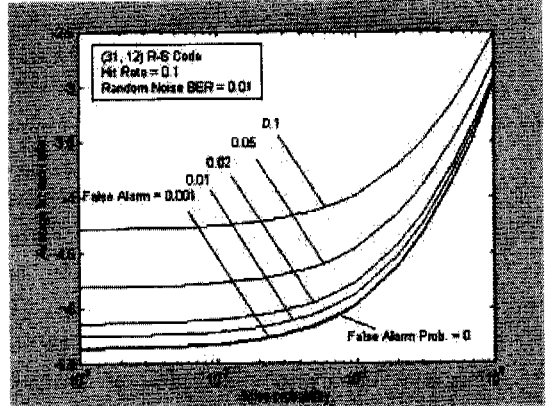


그림 13. (25,18)코드의 미탐지 율에 따른 PER

율을 구하였다.

실험 결과에서 분명히 알 수 있는 것은 패킷 오류 율과 BER은 유사한 성능 곡선의 형태를 가지나 반드시 일치하지는 않는다는 점이다. α 가 0.01이하, β 가 0.1이하의 작은 값을 가질 때에는, 패킷 오류 율과 BER 이 유사하나 α 와 β 가 커질 때의 시스템 성능의 저하 정도는 다르다. 패킷 오류 율의 성능 저하는 완만하게 이루어지는데 비해, BER의 성능 저하는 빠르다.

V. 결론

본 논문에서는 간섭과 랜덤 잡음이 존재하는 채널에서의 SFH시스템의 BER을 추정하였다. 테스트 패턴을 사용하는 SI에서 오경보와 미탐지가 발생하는 경우를 분석하여, Errors-and Erasure 복호화에서 정정 조건을 적용하여 BER을 구하였다. 제한한 추정 방법에 의한 결과와 실제 랜덤 데이터를 발생시켜서 수행한 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 둘이 일치함을 확인하였으며, 제한하는 방법에 의해 패킷 오류 율도 쉽게 구할 수 있음을 보였다. SI의 오경보와 미탐지는 시스템의 성능을 저하시키는데, 성능 저하의 정도는 패킷 오류 율과 BER에 있어 실험결과 서로 다르게 나타났다. 또한 패킷 오류 율과 BER의 성능 저하 정도가 달라질 수 있으므로 시스템의 용도에 따라서 패킷 오류 율과 BER의 분석이 필요에 따라 행해져야 한다.

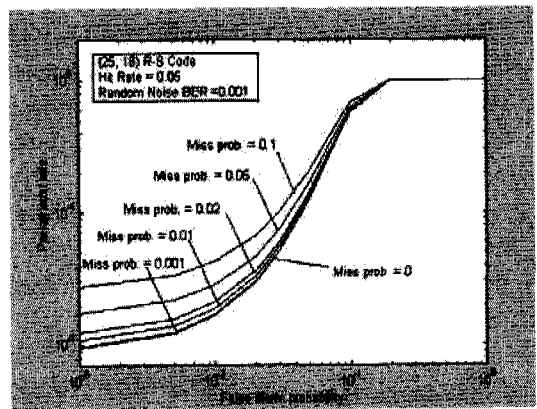


그림 14. (25,18)코드의 오경보 율에 따른 PER

References

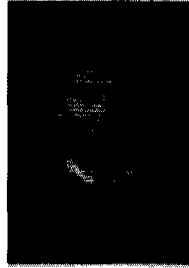
- [1] Hamilton B.J, "SIP SPECIFIC RADIO IMPROVEMENTS", *Tactical Communications Conference. IEEE*, 1996. Page 397-406.
- [2] Pursley, M., "New Approaches for Error Correction in Frequency Hop SS Receivers", *ISSTA 92. IEEE*, pp. 3-10.
- [3] Pursley, M., "Tradeoffs in concatenated coding for frequency hop packet radio with partial band interference", *MILCOM '92, IEEE*, pp. 125-129.
- [4] Pursley, M. "A comparison of slow frequency hop and direct sequence spread spectrum communications over frequency selective fading channels" *Communications, IEEE Trans*, May 1999, pp. 732 -741
- [5] Pursley, M.B, "Tradeoffs between frequency

hop and direct sequence signaling for frequency selective fading channels”, MILCOM '96, IEEE , Page 70 -74 vol.1

- [6] Pursley, M., “Investigation of Relationships between Side Information and Information Rate in Slow Frequency Hop Comms”, MILCOM 97, IEEE, pp. 545-549.
- [7] Pursley, M., “Use of Side Information in Frequency Hop Packet Radio Network Protocols, MILCOM 93, IEEE, pp. 551-545.
- [8] Mortazavi, “Bit Error Simulation of DQPSK for a Slow Frequency Hopping CDMA System in Mobile Radio Communications”, IEEE PIMRC 1995. pp. 183-187.
- [9] Georgiopoulos, M, “On the error probability of coded frequency hopped spread spectrum multiple access systems with more than one code symbol per dwell interval”, IEEE Comms, Sep. 1990, pp. 1321- 1324.
- [10] Wilkins C., “Erasure generation and interleaving for meteor burst communications with fixed-rate and variable-rate coding,” MILCOM95 pp. 274-278

강 경 원(Kyeongwon Kang)

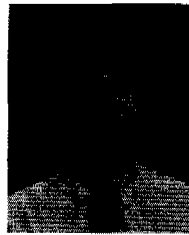
정회원



1984년 : 한양대학교 전자통신과 졸업(학사)
 1997년 : 한양대학교 대학원 전자통신과 졸업(석사)
 2001년~현재 : 한양대학교 전파공학과 박사과정 재학
 1984년~2001년 : LG이노텍 책임연구원

<주관심 분야> 안테나, 파워앰프, 이동통신 시스템

윤 희 철(Hee-Cheol Yun)



1981년 3월 : 서울대학교 전자공학과 졸업 (학사)
 1983년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 졸업 (석사)
 1996년 : 조지아 공대 ECE 졸업 (공학박사)
 1994년~2001년 : LG이노텍 연구소 전문팀장

<주관심 분야> 신호처리, 통신 시스템, 데이터 압축

한 상 진(Sang-Jin Han)

학생회원



2000년 2월 : 서울시립대학교 전자전기공학부 졸업
 2002년 2월 : 서울시립대학교 전자전기공학부 석사 졸업예정
 <주관심 분야> 통신이론, MPEG, 컴퓨터비전, 영상통신

김 용 철(Yong-cheol Kim)

정회원



1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업 (학사)
 1983년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 졸업 (석사)
 1983년~1986년 : 금성전기연구소 무선통신부
 1993년 : University of Southern California 졸업(Ph.D.)

1993년~1996년 : LG정밀연구소 전문팀장

1996년~현재 : 서울시립대 전자전기공학부 부교수

<주관심 분야> 컴퓨터비전, 이동통신 시스템, 워터마킹