

부분 대역 재밍 하에서의 가산성 백색 가우시안 잡음 채널에서 고차 변조의 저속 주파수 도약 대역 확산 시스템

안 형 배*, 김 찬 기*, 노 종 선*, 박 진 수**, 송 홍 엽**, 한 성 우***

The Higher-Order-Modulated Slow-Frequency-Hopping Spread-Spectrum System over AWGN under Partial-Band Jamming

Hyoungbae Ahn*, Chanki Kim*, Jong-Seon No*,
Jinsoo Park**, Hong-Yeop Song**, Sung Woo Han***

요 약

본 논문은 부분 대역 재밍(partial-band jamming, PBJ)과 가산성 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)이 존재하는 채널에서 주파수 고표율 변조(higher order modulation, HOM)에 적용 가능한 평균 최소 잡음 전력 기반 소실 삽입 기법(erasure insertion method, EIM)을 제안한다. 제안한 기법을 적용한 저속 주파수 도약 대역 확산(slow-frequency-hopping spread-spectrum, SFH/SS) 통신 시스템을 설계하고 이 시스템의 패킷 오류율(packet error rate, PER) 계산식을 유도한다. 이를 바탕으로 주어진 시스템 사양에서 최적의 성능을 보이는 소실 삽입 판정의 잡음 임계값을 구하는 방법을 제시하고 설계한 16-QAM SFH/SS 시스템에서 이를 검증한다.

Key Words : partial-band jamming (PBJ), slow-frequency-hopping spread-spectrum (SFH/SS), higher-order-modulation (HOM), erase insertion method (EIM), RS concatenated code

ABSTRACT

In this paper, we propose a new EIM(erasure insertion method) based on the average-minimal-noise-power for HOM(higher order modulation) over AWGN(additive white Gaussian noise) under PBJ(partial-band jamming). Then we design SFH/SS(slow-frequency-hopping spread-spectrum) system by applying this method and formulate the PER(packet error rate) of the system. Based on this formula, we propose a new method to set the optimal threshold of the EIM and verify it at the designed 16-QAM SFH/SS system.

※ The authors gratefully acknowledge the support from Electronic Warfare Research Center at Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), originally funded by Defense Acquisition Program Administration (DAPA) and Agency for Defense Development (ADD).

• First Author : Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University, ahb0429@ccl.snu.ac.kr, 학생회원

* Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University, carisis@ccl.snu.ac.kr, 학생회원, jsno@snu.ac.kr, 종신회원

** School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, js.park09@yonsei.ac.kr, 학생회원, hysong@yonsei.ac.kr, 종신회원

*** Agency for Defence Development, hansw79@add.re.kr, 정회원

논문번호 : KICS2015-11-012, Received November 23, 2015; Revised January 9, 2017; Accepted January 9, 2017

I. 서론

부분 대역 재밍(partial band jamming, PBJ)은 전 대역 재밍(full band jamming, FBJ)과 달리 특정 주파수 대역에 전력스펙트럼밀도를 집중한다. 이 때, PBJ가 집중하는 주파수 대역의 비율을 대역 비(fractional bandwidth)라고 정의하고 ρ 로 표기한다. 즉, PBJ는 FBJ에 비해 ρ 의 비율의 대역에 $1/\rho$ 배 강한 재밍을 건다.

PBJ에 대응하기 위해 크게 세 가지의 기법이 사용된다. 첫째는 주파수 도약 기법으로 짧은 시간마다 주파수를 도약함으로써 재밍 신호를 인터리빙(interleaving)한다.^[1] 둘째는 연접 부호 기법으로 도약 홉 사이의 다이버시티(diversity)를 확보한다.^[2] 마지막은 소실 삽입 기법(erasure insertion method, EIM)으로 재밍에 의해 오류가 많이 발생할 홉을 미리 소실 시킴으로써 복호화 이득을 얻는다.^[3]

PBJ의 항재밍 성능은 주어진 목표 오류율을 달성하기 위해 필요한 비트 에너지 대 잡음 비(E_b/N_j)를 이용해서 분석 가능하다. 어떤 E_b/N_j 의 값 α 가 목표 오류율 P^* 을 달성한다 함은 α 보다 큰 임의의 E_b/N_j 에 대하여 오류율이 P^* 이하임을 말한다. 어떤 항재밍 시스템에서 주어진 목표 오류율을 달성하기 위해 필요한 E_b/N_j 의 최소값을 모든 ρ 에 따라서 도시한 그래프를 그 시스템의 항재밍 성능 그래프라고 정의한다.

비동기 BFSK(binary frequency shift keying)를 비롯한 비동기 FSK에서는 ratio threshold test^[4], Bayesian method^[5] 등과 같이 수신 신호의 포락선(envelope)을 분석하여 PBJ의 영향 여부를 판별한다. 이러한 변조 방식은 주파수 대역폭을 효율적으로 사용하지 못하므로 더 많은 데이터 전송을 위해서는 주파수 고효율의 변조(higher-order-modulation, HOM)가 필요하다. 여기서 HOM이란 변조 차수가 4 이상인 변조로 PSK(phase shift keying)나 QAM (quadrature amplitude modulation)이 대표적이다.

하지만 PSK나 QAM에서는 비동기 FSK와 달리 포락선의 개념이 존재하지 않기 때문에^[4,5]와 같은 방식으로 PBJ의 영향을 판별할 수 없다. II에서는 HOM에서의 PBJ의 영향 여부를 탐지하는 새로운 방법을 제안한다. 이는 수신된 홉에 존재하는 각 심볼의 최소 잡음 에너지의 평균을 어떤 잡음 임계값 D_{THR} 와 크기를 비교하는 방식이다. III에서는 제안한 방법을 기반으로 하는 EIM 및 RS 연접 부호를 적용한 SFH/SS 항재밍 시스템을 설계하였다. IV에서는 이러한 시스템의 이론적 패킷 오류율을 계산하는 방법을 유도하였다.

V에서는 IV의 계산식을 바탕으로 III에서 설계한 시스템이 최적으로 근접하는 항재밍 성능을 갖도록 하는 잡음 임계값인 \tilde{D}_{THR} 을 찾는 알고리즘을 제안한다. 최적의 잡음 임계값의 정의는 V에서 서술하였다. 특별히 정방 16-QAM을 사용하는 RS-길잡 연접 부호 시스템을 설계하고, 이 시스템에서 제안한 알고리즘을 적용 및 검증하였다. 마지막으로 VI에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 평균 최소 잡음 전력을 이용한 PBJ 판정

그림 1과 2는 $E_b/N_0 = 15$ dB의 AWGN과 $\rho = 0.1$, $E_b/N_j = 20$ dB의 PBJ가 존재하는 채널에서 홉 당 심볼 수가 140이고 부호율이 1/3인 부호를 사용하여 도약통신을 할 때, 홉 하나를 구성하는 심볼들의 예시를 성상도 위에 나타낸 것이다. 수신된 홉이 재밍의 영향을 받은 경우가 그림 1이고, 그렇지 않은 경우가 그림 2이다. 그림 2에 비해 그림 1의 수신 신호점들이 인접 송신 신호점으로부터 더 멀리 분포하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 재밍의 영향을 받는 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 가장 가까운 송신 신호점으로부터 수신 신호점의 산포도가 증가한다.

이러한 산포도를 대표하는 값으로써 수신된 홉의 평균 최소 잡음 전력 D 를 다음과 같이 정의한다.

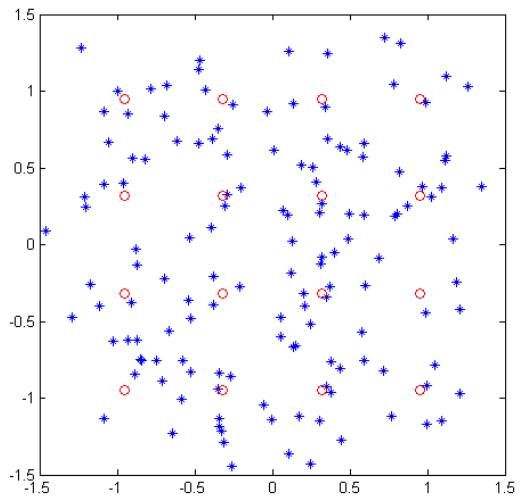


그림 1. 수신된 홉이 AWGN과 PBJ의 영향을 받을 때, 성상도 위에서 송신 신호점(o)과 수신 신호점(*)의 분포 예시
Fig. 1. Example of the transmitted(o) and received(*) signal constellations over AWGN under PBJ

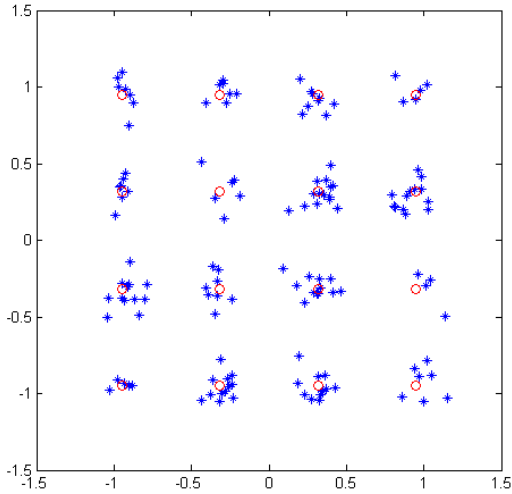


그림 2. 수신된 홉이 AWGN의 영향을 받을 때, 성상도 위에서 송신 신호점(o)과 수신 신호점(*)의 분포 예시
 Fig. 2. Example of the transmitted(o) and received(*) signal constellations over AWGN

$$D = \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \min_{1 \leq k \leq 2^m} \| \mathbf{s}_k - \mathbf{r}_l \|^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서 m 은 변복조 시스템의 변조 지수이다. 변조된 송신 신호의 평균 에너지는 정규화되었다고 가정한다. L 은 홉 당 심볼의 수이고 $\mathbf{s}_k (1 \leq k \leq 2^m)$ 는 성상도 위에서 송신 신호 벡터를 $\mathbf{r}_l (1 \leq l \leq L)$ 은 수신 신호 벡터이다. 이렇게 정의한 D 는 L 개의 랜덤한 수신 신호 벡터에 따른 함수로 특정한 분포를 갖는다. 이 때, D 의 평균은 E_b/N_j 에 따른 감소함수이고 분산은 L 에 반비례한다. 이러한 성질을 바탕으로 홉의 평균 최소 잡음 전력 D 를 특정 임계값과 비교하여 해당 홉이 재밍의 영향을 받는 지의 여부를 판정한다. 이 때의 임계값을 잡음 임계값이라 하고 D_{THR} 로 표기한다.

수신된 홉의 평균 최소 잡음 전력 D 가

$$D \geq D_{THR} \quad (2)$$

일 때, 해당 홉은 재밍의 영향을 받는다고 판정하고

$$D < D_{THR} \quad (3)$$

일 때, 해당 홉은 재밍의 영향을 받지 않는다고 판정한다.

실제로 수신된 홉이 재밍의 영향을 받는 사건을

$$H = 0 \quad (4)$$

영향을 받지 않는 사건을

$$H = 1 \quad (5)$$

이라고 정의하자. 이 때, 재밍 판정에 대한 거짓 음성 확률 P_0 와 거짓 양성 확률 P_1 은 다음과 같다.

$$\begin{cases} P_0 = \Pr\{D < D_{THR} | H = 0\} \\ P_1 = \Pr\{D \geq D_{THR} | H = 1\} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 P_0 는 $E_b/N_0, \rho, E_b/N_j, D_{THR}$ 의 함수이고 P_1 은 $E_b/N_0, D_{THR}$ 의 함수이다. 또한, E_b/N_0 가 일정할 때, P_1 은 D_{THR} 에 따른 감소함수이다. 실제로 수신된 홉이 재밍의 영향 아래 있을 때, 식 (2)의 판정이 성공할 확률을 P_D 라 하자. 즉,

$$P_D = 1 - P_0 \quad (7)$$

이다.

채널에 $E_b/N_0 = 15$ dB의 AWGN과 $\rho = 0.1$ 인 PBJ가 존재하고 $D_{THR} = 0.1767$ 로 설정할 때, P_1 과 E_b/N_j 에 따른 P_D 를 측정된 결과는 식 (8)과 그림 3과 같다.

$$P_1 |_{E_b/N_0 = 15\text{dB}, D_{THR} = 0.1767} = 10^{-4} \quad (8)$$

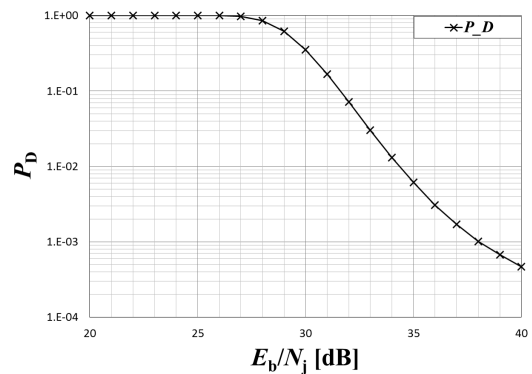


그림 3. 잡음 임계값 D_{THR} 가 0.1767일 때, E_b/N_j 에 따른 P_D 의 그래프

Fig. 3. P_D versus E_b/N_j with $D_{THR} = 0.1767$

III. HOM SFH/SS 시스템 모델

본 논문에서 제안하는 시스템은 그림 4와 같다. 시스템은 연결 부호화, 2^m -ary 변조, 주파수 도약, 확산, 소실 삽입기로 구성된다. 연결 부호는 GF(2^q)에서 정의된 (N_{out}, K_{out}) RS 부호와 GF(2)에서 정의된 (N_{in}, K_{in}) 내부 부호가 연결된 형태이며, K_{in} 은 q 의 배수 N_{in} 은 m 의 배수이다.

입력 메시지의 부호화, 변조 및 도약 과정은 다음과 같다. $K_{out}K_{in}$ 비트의 입력 메시지를 qK_{out} 비트 (= K_{out} 블록)씩 한 패킷으로 묶은 뒤, 각 패킷마다 RS 부호화를 한다. 이때 전체 패킷의 수, 다시 말해 필요한 RS 부호기의 수는 K_{in}/q 이고 부호화된 패킷의 길이는 qN_{out} 비트(= N_{out} 블록)이다.

RS 부호화된 패킷들은 $i(1 \leq i \leq K_{in}/q)$ 번째 RS 부호의 $j(1 \leq j \leq N_{out})$ 번째 블록을 j 번째 내부 부호기의 i 번째 입력 블록으로 인터리빙 한다. 인터리빙 결과 K_{in}/q 블록(= K_{in} 비트)씩 N_{out} 개의 비트열이 생성되며, 내부 부호화를 거쳐 길이 N_{in} 의 비트열이 N_{out} 개 생성된다.

각각의 비트열은 2^m -ary 변조기를 거쳐 N_{in}/m 심볼의 송신 신호가 되어 같은 주파수로 도약한다. 이렇게 도약한 N_{out} 개의 흐름이 하나의 연결 부호를 이룬다. 정리하면, 총 $K_{out}K_{in}$ 비트의 메시지를 입력받아 연결 부호화, 변조 및 주파수 도약을 거쳐 N_{in}/m 심볼로 이루어진 N_{out} 개의 도약 신호가 된다.

도약 송신 신호는 AWGN과 PBJ가 존재하는 채널을 거치며, 수신된 신호는 주파수 확산기 및 복조기를 통과한다. 복조 과정에서 II에서 제안한 방식을 이용하여 수신된 흐름이 재밍의 영향을 받았는지의 여부를

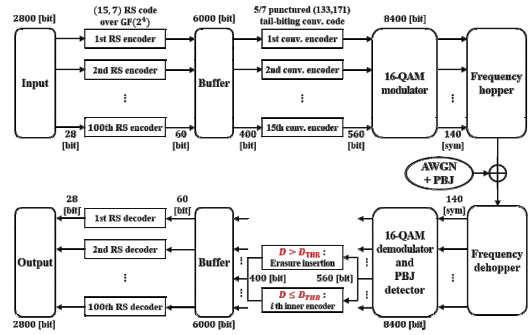


그림 5. 16-QAM SFH/SS 시스템의 예시
Fig. 5. Example of the 16-QAM SFH/SS system

판정한다. 해당 흐름의 평균 최소 잡음 전력 D 가 식 (2)를 만족하면 전체 흐름에 소실을 삽입하고, 식 (3)을 만족하면 내부 부호기를 통해 해당 흐름을 부호화한다. 수신된 N_{out} 개의 흐름은 각각 위 과정을 거쳐 길이 K_{in} 의 소실열 혹은 비트열이 된다.

이 N_{out} 개의 열들은 디인터리빙 하여 길이 N_{out} 의 K_{in}/q 개의 블록열로 정렬된다. $i(1 \leq i \leq K_{in}/q)$ 번째 블록열은 오류 및 소실 복호를 하는 RS 부호기를 거쳐 출력 메시지의 i 번째 패킷을 구성한다. 이 때, RS 부호기는 최대 거리 분리 가능(maximum distance separable, MDS)하게 복호 가능하다고 가정한다.

제안한 시스템을 실제의 부호에 적용한 예시는 그림 5와 같다. 사용하는 변조 방법은 정방 16-QAM으로 변조 지수(= m)는 4이다. RS 부호의 사양은 $N_{out} = 15, K_{out} = 7, q = 4$ 이고 내부 부호의 사양은 $N_{in} = 560, K_{in} = 400$ 으로 (133,171) 길쌈 부호를 부호율 5/7로 천공화(puncturing) 및 tail-biting한 것이다. 이 부호는 WAVA(wrap-around Viterbi algorithm)를 이용하여 복호한다.

IV. 제안한 시스템의 패킷 오류율

RS 부호의 MDS 성질을 이용하면, III에서 제안한 시스템의 패킷 오류율(packet error rate, PER) P 를 계산할 수 있다. 패킷이라 함은 그림 4에서 하나의 RS 부호기에 입력되는 길이 qK_{out} 의 비트열을 의미한다. PER을 계산하기 위해서는 총 7개의 파라미터를 알아야 한다. 이를 $\rho, N_{out}, K_{out}, P_0, P_1, P_{AWGN}, P_{PBJ}$ 라고 표기한다. 여기서 ρ 는 I, P_0 와 P_1 은 II, N_{out} 과 K_{out} 은 III에 정의되어 있다.

내부 부호의 입력 비트열을 q 비트씩 한 블록으로

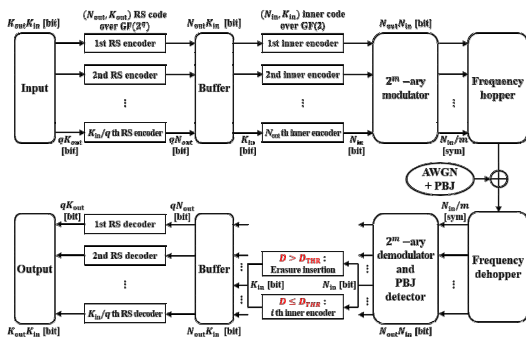


그림 4. 제안한 HOM SFH/SS 시스템 블록도
Fig. 4. Block diagram of the proposed HOM SFH/SS system

목에서 K_{in}/q 개의 블록열로 생각할 때, 내부 부호의 블록 오류율을 $BLER_{in}$ 으로 표기한다. 두 파라미터 P_{AWGN} 과 P_{PBJ} 은 내부 부호의 블록 오류율로

$$P_{AWGN} = BLER_{in}|_{H=1, D < D_{THR}} \quad (9)$$

이고

$$P_{PBJ} = BLER_{in}|_{H=0, D \geq D_{THR}} \quad (10)$$

이다. 부호의 스펙과 D_{THR} 의 값이 정해졌을 때, P_{AWGN} 은 E_b/N_0 의 함수이고 P_{PBJ} 는 E_b/N_0 및 E_b/N_j 의 함수이다. 두 파라미터의 값은 부호에 따라 계산을 통해 구하거나 측정을 통해 구할 수 있다.

정리 1. 제안한 시스템의 PER은 식 (11)와 같다.

$$P = \sum_{h=0}^{N_{out}} \sum_{i=0}^h \sum_{j=0}^{N_{out}-h} \sum_{s=0}^i \sum_{t=0}^{N_{out}-h-j} f(h, i, j, s, t) g(h, i, j, s, t) \quad (11)$$

여기서

$$\begin{aligned} f(h, i, j, s, t) = & \binom{N_{out}}{h} \rho^h (1-\rho)^{N_{out}-h} \binom{h}{i} P_0^i (1-P_0)^{h-i} \\ & \binom{N_{out}-h}{j} P_1^j (1-P_1)^{N_{out}-h-j} \binom{i}{s} P_{PBJ}^s \\ & (1-P_{PBJ})^{i-s} \binom{N_{out}-h-j}{t} P_{AWGN}^t \\ & (1-P_{AWGN})^{N_{out}-h-j-t} \end{aligned} \quad (12)$$

$$g(h, i, j, s, t) = \begin{cases} 0 & (h-i+j+2s+2t \leq N_{out}-K_{out}) \\ 1 & (h-i+j+2s+2t > N_{out}-K_{out}) \end{cases} \quad (13)$$

이다.

증명 $n(1 \leq n \leq K_{in}/q)$ 번째 입력 패킷이란 n 번째 RS 부호기에 입력되는 메시지의 비트열을 의미한다. 또한 n 번째 출력 패킷이란 n 번째 RS 복호기를 통해서 출력되는 메시지의 비트열을 의미한다. n 번째 패킷에서 오류가 발생했다 함은 n 번째 RS 부호기의 복호화가 실패했다는 것과 동치이다.

RS 부호기에는 N_{out} 개의 블록이 입력되는데, 이 중에서 오류인 블록의 수를 $\#_{err}$ 라 하고 소실된 블록의 수를 $\#_{ers}$ 라 하자. RS 부호의 MDS 성질에 의해,

표 1. RS 부호를 구성하는 블록의 여섯 가지 분류
Table 1. Six types of the blocks of the RS code

| H | | $D \geq D_{THR}$ | | Inner decoding result | |
|-----|-------------|------------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| 0 | h | T | i | normal | $i-s$ |
| | | F | $h-i$ | error | s |
| 1 | $N_{out}-h$ | T | $N_{out}-h-j$ | erasure | $h-i$ |
| | | F | j | normal | $N_{out}-h-j-t$ |
| | | | | error | t |
| | | | | erasure | j |

n 번째 패킷에서 오류가 발생할 필요충분조건은

$$2\#_{err} + \#_{ers} > N_{out} - K_{out} \quad (14)$$

이다.

이러한 N_{out} 개의 블록을 구성하는 사건은 표 1과 같이 세 가지 사건의 교사건으로 분할되며, 이러한 사건이 발생할 확률은 식 (12)과 같다. 또한,

$$\#_{err} = s + t \quad (15)$$

$$\#_{ers} = (h-i) + j \quad (16)$$

이므로 식 (14)의 필요충분조건은 식 (13)에서 $g(h, i, j, s, t) = 1$ 인 경우와 같다. PER은 식 (14)를 만족하는 모든 분할 사건이 발생할 확률의 합이므로 식 (11)이 성립한다. □

계산 혹은 측정을 통해 P_1, P_{AWGN} 및 E_b/N_j 에 따른 P_0, P_{PBJ} 를 구하여 7개의 파라미터를 알면 E_b/N_j 에 따른 시스템의 패킷 오류율을 계산할 수 있다.

V. 최적의 D_{THR} 설정

본 절에서는 III에서 제안한 시스템에서 변·복조 방식, 부호의 스펙 및 목표 PER이 주어지고 AWGN의 E_b/N_0 가 일정한 값을 가질 때, 최적의 잡음 임계값 D_{THR} 을 찾는 방법을 논하고자 한다.

정의 1. 주어진 목표 PER인 P^* 를 어떤 E_b/N_j 의 값 α 가 달성한다 함은

$$PER|_{E_b/N_j > \alpha} \leq P^*$$

을 의미한다. □

여기서 E_b/N_0 의 값이 커져 임의의 ρ 에 대하여 목표 PER인 P^* 를 달성하는 E_b/N_j 가 존재한다고 가정한다. 또한 모든 E_b/N_j 에 대하여 PER이 P^* 이하인 경우, $E_b/N_j = -\infty$ 에서 P^* 를 달성한다고 말한다.

정의 2. 주어진 목표 PER인 P^* 를 달성하는 항재밍 성능 그래프에서 ρ_{THR} 을 다음과 정의한다.

$$\rho_{\text{THR}} = \operatorname{argmax}_{0 \leq \rho \leq 1} \left\{ \left. \frac{E_b}{N_j} \right|_{\text{Achieving } P^*} = -\infty \right\} \quad \square$$

정의 3. 제안한 시스템에서 잡음 임계값 D_{THR} 가 최적이라 함은 ρ_{THR} 가 최대의 값을 가질 때를 말한다. D_{THR} 의 최적의 값을 D_{THR}^* 로 표기하고, 이때의 ρ_{THR} 과 $(E_b/N_j)_{\text{THR}}$ 의 값을 ρ_{THR}^* 와 $(E_b/N_j)_{\text{THR}}^*$ 로 표기한다. \square

정의 4. 주어진 목표 PER인 P^* 를 달성하는 항재밍 성능 그래프의 $(E_b/N_j)_{\text{THR}}$ 을 다음과 정의한다.

$$\left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{\text{THR}} = \left. \frac{E_b}{N_j} \right|_{\rho = \rho_{\text{THR}}, \text{achieving } P^*} \quad \square$$

제안한 시스템에서 P_0 는 E_b/N_j 에 따른 증가함수이다. 따라서 매우 작은 양수 값 ϵ 에 대하여 다음의 값을 정의할 수 있다. 여기서 P_0 가 매우 작다고 함은 PER 허용오차 $\delta (\ll P^*)$ 에 대하여

$$|\text{PER}|_{P_0 = \epsilon} - \text{PER}|_{P_0 = 0}| < \delta \quad (17)$$

를 만족하는 값을 의미한다.

정의 5. ρ 와 D_{THR} 가 주어졌을 때, 매우 작은 양수 ϵ 에 대하여 $(E_b/N_j)_{\text{THR1}}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{\text{THR1}} \Big|_{\rho, D_{\text{THR}}} = \operatorname{argmax}_{\frac{E_b}{N_j}} \{ P_0 < \epsilon \} \quad \square$$

EIM을 적용한 RS 연결 부호 시스템에서 ρ 와 D_{THR} 가 주어졌을 때, E_b/N_j 에 따른 PER의 그래프를 $(E_b/N_j)_{\text{THR1}}$ 를 기점으로 두 구간으로 분류한다.

$$E_b/N_j \leq (E_b/N_j)_{\text{THR1}} \quad (18)$$

인 구간에서는 $P_0 < \epsilon$ 이므로 P_0 값이 PER에 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 P_{PBJ} 도 PER에 영향을 주지 않는다. **정리 1**에서 P_0 와 P_{PBJ} 를 제외한 나머지 파라미터들은 E_b/N_j 의 영향을 받지 않고 E_b/N_0 는 고정된 값을 가진다고 가정하였으므로 이 구간에서 PER은 오차 범위 δ 내에서 일정하다.

정의 6. ρ 가 주어졌을 때, $P_{\text{PBJ, THR}}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$P_{\text{PBJ, THR}} = \max_{P_{\text{PBJ}}} \{ \operatorname{argmin}_{P_0} \text{PER} \geq \epsilon \}$$

$\operatorname{argmin}_{P_0} \text{PER}$ 은 P_{PBJ} 에 따른 감소함수이고 유계이므로 위 값은 잘 정의되어 있다. \square

정의 7. ρ 가 주어졌을 때, $(E_b/N_j)_{\text{THR2}}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{\text{THR2}} \Big|_{\rho} = \operatorname{arg}_{\frac{E_b}{N_j}} \{ P_{\text{PBJ}} = P_{\text{PBJ, THR}} \}$$

P_{PBJ} 는 E_b/N_j 에 따른 감소함수이므로 위 값은 유일하게 정의된다. \square

정리 2. 제안한 시스템에서 어떤 ρ^o 와 D_{THR}^o 가

$$\left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{\text{THR1}} \Big|_{\rho^o, D_{\text{THR}}^o} = \left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{\text{THR2}} \Big|_{\rho^o} \quad (19)$$

이고

$$\text{PER} \Big|_{E_b/N_j \leq (E_b/N_j)_{\text{THR1}} \Big|_{\rho^o, D_{\text{THR}}^o}} = P^* \quad (20)$$

을 만족할 때, $D_{\text{THR}}^o = D_{\text{THR}}^*$ 이고 $\rho^o = \rho_{\text{THR}}^*$ 이다.

보조정리 1. 제안한 시스템에서

$$D_{THR}^{(1)} > D_{THR}^{(2)} \Rightarrow \left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{THR1}^{(1)} < \left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{THR1}^{(2)} \quad (21)$$

이다.

증명) P_0 는 D_{THR} 에 따른 증가함수이므로

$$P_0 \left(D_{THR}^{(1)}, \left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{THR1}^{(2)} \right) > P_0 \left(D_{THR}^{(2)}, \left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{THR1}^{(2)} \right) = 0 \quad (22)$$

이 되어 식 (21)이 성립한다. \square

보조정리 2. 제안한 시스템의 PER이 E_b/N_j 에 따른 감소함수이기 위한 ρ 와 D_{THR} 의 충분조건은

$$\left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{THR1} \Big|_{\rho, D_{THR}} \geq \left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{THR2} \Big|_{\rho} \quad (23)$$

이다.

증명) 정의 5에 의해 E_b/N_j 가 식 (18)을 만족하는 구간에서 PER은 상수함수이다. E_b/N_j 가

$$E_b/N_j > (E_b/N_j)_{THR1} \quad (24)$$

를 만족하는 구간에서는 가정에 의해

$$E_b/N_j > (E_b/N_j)_{THR2} \quad (25)$$

이고 P_{PBJ} 는

$$P_{PBJ} < P_{PBJ, THR} \quad (26)$$

를 만족한다. 정의 7에 의해 이 구간에서는 PER을 최소화하는 P_0 의 값이 ϵ 이상이고, P_0 가 증가함에 따라 PER이 감소한다. P_0 는 E_b/N_j 에 따른 증가함수이므로, PER은 E_b/N_j 에 따른 감소함수이다. \square

증명) $\rho = \rho^o$ 이고 $D_{THR} = D_{THR}^o$ 일 때의 P_0, P_1 을 P_0^o, P_1^o 로 표기하자. **보조정리 2**에 의해, ρ^o 과 D_{THR}^o

이 식 (19)와 (20)을 만족할 때, 모든 E_b/N_j 에 대하여 P^* 을 달성한다.

$D_{THR} < D_{THR}^o$ 이고 모든 E_b/N_j 에 대하여 목표 PER인 P^* 를 만족하기 위해서는

$$PER \Big|_{E_b/N_j \leq (E_b/N_j)_{THR1} \Big|_{\rho, D_{THR}}} \leq P^* \quad (27)$$

이다. $E_b/N_j \leq (E_b/N_j)_{THR1}$ 을 만족하는 구간에서는 $P_0 < \epsilon$ 이므로 시스템의 PER은 ρ 와 P_1 에 의해 결정된다. 식 (5)에 의해

$$D_{THR} < D_{THR}^o \Rightarrow P_1 > P_1^o \quad (28)$$

이므로 식 (27)을 만족하려면 $\rho < \rho^o$ 이다. 즉, $D_{THR} < D_{THR}^o$ 일 때 모든 E_b/N_j 에 대하여 P^* 을 달성하기 위해서는 $\rho < \rho^o$ 이다.

$D_{THR} > D_{THR}^o$ 이고 $\rho = \rho^o$ 인 경우 P^* 을 달성할 수 없음을 보이자. **보조정리 1**과 식 (20)에 의해

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{THR1} \Big|_{\rho, D_{THR}} &< \left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{THR1} \Big|_{\rho^o, D_{THR}^o} \\ &= \left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{THR2} \Big|_{\rho^o} \end{aligned} \quad (29)$$

이다. 정의 7에 의해 $E_b/N_j = (E_b/N_j)_{THR2}$ 일 때 PER을 최소화하는 P_0 의 값은 0이다. 하지만, 식 (29)에 의해

$$P_0 \left(D_{THR}, \left(\frac{E_b}{N_j} \right)_{THR2} \right) \neq 0 \quad (30)$$

이다. 따라서

$$\begin{aligned} PER \Big|_{E_b/N_j = (E_b/N_j)_{THR2} \Big|_{\rho^o, D_{THR}^o}} &> PER \Big|_{P_0 = 0 \Big|_{\rho^o, D_{THR}^o}} \\ &= P^* \end{aligned} \quad (31)$$

이므로 $D_{THR} > D_{THR}^o$ 이고 $\rho = \rho^o$ 인 경우 P^* 을 달성할 수 없다.

그러므로 ρ^o 과 D_{THR}^o 이 식 (19)과 (20)을 만족할 때, $D_{THR} = D_{THR}^*$ 이고 $\rho^o = \rho_{THR}^*$ 이다. \square

정리 2의 식 (20)을 이용하면, P^* 를 달성하기 위한 ρ 와 P_1 의 순서쌍 및 ρ 의 최대값인 ρ_{\max} 을 구할 수 있다. E_b/N_0 가 고정된 값을 가질 때, P_1 은 D_{THR} 에 따른 감소함수로 일대일대응이 된다. 즉, P^* 를 달성하기 위한 필요조건을 이용하여 D_{THR} 을 ρ 에 관한 함수인 $D_{\text{THR}}(\rho)$ 로 나타낼 수 있다.

식 (19)를 만족하는 $\rho \in (0, \rho_{\max}]$ 를 구하기 위해 ρ 에 따른 $P_{\text{PBJ}}|_{E_b/N_j = (E_b/N_j)_{\text{THR}}|\rho, D_{\text{THR}}(\rho)}$ 의 그래프와 $P_{\text{PBJ,THR}}$ 의 그래프를 그린다. 두 그래프의 교점을 만드는 ρ 와 $D_{\text{THR}}(\rho)$ 가 식 (19)를 만족한다. 정리 2에 의해 이 지점에서 D_{THR} 가 최적이다.

원칙적으로 D_{THR}^* 을 구하기 위해서는 RS 연결 부호의 시뮬레이터를 구성하여 각각의 D_{THR} 마다 목표 PER을 달성하는 항재밍 성능그래프를 그려가면서 ρ_{THR} 을 찾은 뒤, 이를 최대화하는 D_{THR} 를 찾아야 한다. 정확한 ρ_{THR} 의 값을 찾기 위해서는 측정된 PER의 오차가 적어야 하는데 이는 높은 계산량을 필요로 한다. 그에 비해, 제시한 방법은 연결 부호에 비해 상대적으로 덜 복잡한 내부 부호의 시뮬레이터와 계산을 통해서 적은 계산량으로 D_{THR}^* 를 찾을 수 있다.

이 방법을 그림 5에서 예시로 사용한 시스템에 적용하고 검증하고자 한다. $E_b/N_0 = 15$ dB, $P^* = 10^{-4}$ 라고 가정하고, 측정과 계산을 통해 최적에 근접하는 잡음 임계값을 찾을 것이다. 그림 6은 이 시스템에서 식 (20)을 만족하는 ρ 와 P_1 의 관계를 나타낸 것이다. 각각의 ρ 에 따라, 이진 검색(binary searching)으로 P_1 을 찾았고 $\rho_{\max} = 0.153007$ 이다.

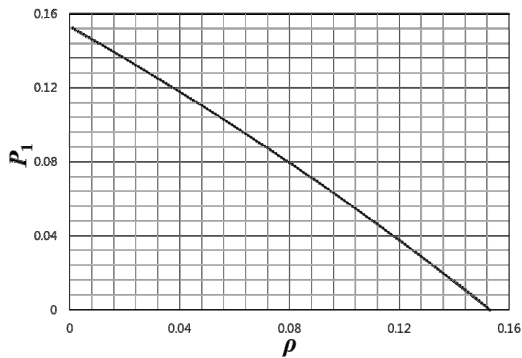


그림 6. 제안한 16-QAM SFH/SS 시스템에서 $P^* = 10^{-4}$ 을 달성하기 위한 ρ 와 P_1 의 필요조건
Fig. 6. The necessary condition of (ρ, P_1) to achieve $P^* = 10^{-4}$ for the proposed 16-QAM SFH/SS system

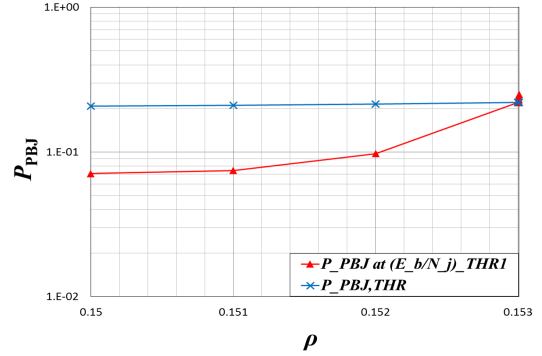


그림 7. ρ 에 따른 $P_{\text{PBJ}}|_{E_b/N_j = (E_b/N_j)_{\text{THR}}}$ 와 $P_{\text{PBJ,THR}}$
Fig. 7. $P_{\text{PBJ}}|_{E_b/N_j = (E_b/N_j)_{\text{THR}}}$ and $P_{\text{PBJ,THR}}$ versus ρ

그림 7은 식 (19)를 만족하는 $\rho \in (0, 0.153007]$ 를 찾기 위해 ρ 에 따른 $P_{\text{PBJ}}|_{E_b/N_j = (E_b/N_j)_{\text{THR}}}$ 의 그래프 (graph #1, 점선)와 $P_{\text{PBJ,THR}}$ 의 그래프(graph #2, 실선) 및 교점을 나타낸 것이다. $\rho = 0.153$ 일 때 두 그래프는 교점을 갖는다. $\rho = 0.153$ 일 때, 식 (20)을 만족하는 $P_1 = 9.42 \times 10^{-6}$ 이다. $E_b/N_0 = 15$ dB일 때, 이진 검색을 통해 찾은 $D_{\text{THR}} = 0.1804$ 이다. 따라서 제안한 방법을 통해 구한 D_{THR} 의 최적의 값은

$$\tilde{D}_{\text{THR}}^* = 0.1804 \quad (32)$$

이고, ρ_{THR} 의 값은

$$\tilde{\rho}_{\text{THR}}^* = 0.153 \quad (33)$$

이다.

계산 과정에서 사용한 이진 검색 방법이나 그래프의 교점을 찾는 과정에서 발생하는 오차에 의해, \tilde{D}_{THR}^* 는 최적이지 않을 수 있지만 이에 근접하는 값을 갖는다. 이를 검증하기 위해 두 값

$$\begin{cases} \tilde{D}_{\text{THR}}^{(+)} = \tilde{D}_{\text{THR}}^* \times (1 + 0.05) \\ \tilde{D}_{\text{THR}}^{(-)} = \tilde{D}_{\text{THR}}^* \times (1 - 0.05) \end{cases} \quad (34)$$

을 정의하여 D_{THR} 이 \tilde{D}_{THR}^* 보다 약간 크거나 작은 값을 가질 때의 항재밍 성능을 알아보하고자 한다. 그림 8은 D_{THR} 이 \tilde{D}_{THR}^* , $\tilde{D}_{\text{THR}}^{(+)}$, $\tilde{D}_{\text{THR}}^{(-)}$ 일 때의 항재밍 성능 그래프이다. 항재밍 성능 그래프는 정리 1의 식 (11)

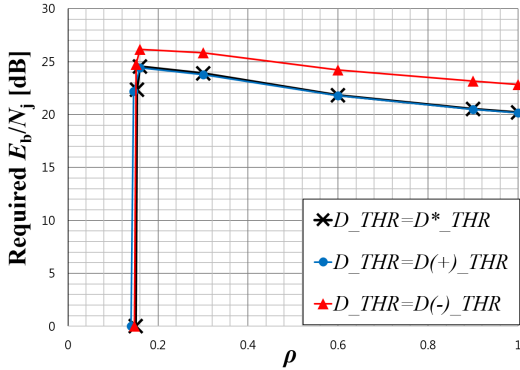


그림 8. D_{THR} 이 \tilde{D}_{THR}^* (x), $\tilde{D}_{THR}^{(+)}$ (●), $\tilde{D}_{THR}^{(-)}$ (▲)일 때의 항재밍 성능 그래프
 Fig. 8. The anti-jamming performance graph for $D_{THR} = \tilde{D}_{THR}^*$ (x), $\tilde{D}_{THR}^{(+)}$ (●), $\tilde{D}_{THR}^{(-)}$ (▲)

을 이용하여 각 ρ 와 D_{THR} 마다 E_b/N_j 에 따른 PER 그래프를 구하고, $P^* = 10^{-4}$ 을 달성하는 최소의 E_b/N_j 를 찾아 도기한 것이다.

$D_{THR} = \tilde{D}_{THR}^{(+)}$ 일 때 ρ_{THR} 의 값은

$$\tilde{\rho}_{THR}^{(+)} = 0.1453 \quad (35)$$

이고, $D_{THR} = \tilde{D}_{THR}^{(-)}$ 일 때 ρ_{THR} 의 값은

$$\tilde{\rho}_{THR}^{(-)} = 0.1513 \quad (36)$$

으로 두 값 모두 $\tilde{\rho}_{THR}^* = 0.153$ 보다 작다. 즉, $D_{THR} = \tilde{D}_{THR}^*$ 인 경우가 인접한 지점의 값을 가지는 경우 보

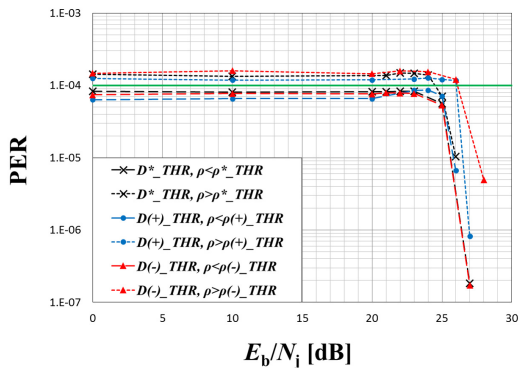


그림 9. D_{THR} 이 \tilde{D}_{THR}^* (x), $\tilde{D}_{THR}^{(+)}$ (●), $\tilde{D}_{THR}^{(-)}$ (▲)이고 ρ 가 ρ_{THR} 근방일 때의 E_b/N_j 에 따른 PER성능
 Fig. 9. PER versus E_b/N_j near ρ_{THR} for each D_{THR}

다 ρ_{THR} 이 크므로 \tilde{D}_{THR}^* 이 최적에 근접함을 확인할 수 있다.

그림 9는 그림 5의 시스템을 시뮬레이터로 구성하여 D_{THR} 가 \tilde{D}_{THR}^* , $\tilde{D}_{THR}^{(+)}$, $\tilde{D}_{THR}^{(-)}$ 일 때, 각각의 ρ_{THR} 근방에서 E_b/N_j 에 따른 PER 그래프를 그린 것이다. 각각의 D_{THR} 마다 $\rho < \rho_{THR}$ 일 때는 PER이 항상 10^{-4} 이하임을 확인하였고, $\rho > \rho_{THR}$ 일 때 10^{-4} 의 PER을 달성하기 위한 E_b/N_j 값을 확인하였다. 이를 통해, D_{THR} 가 제안한 방법으로 구한 \tilde{D}_{THR}^* 및 근방의 값을 가질 때의 항재밍 성능을 검증하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 AWGN과 PBJ가 존재하는 채널에서 HOM을 사용할 때의 EIM을 제시하였다. 이를 적용하여 RS 연결 부호를 사용하는 항재밍 시스템을 제안하고, 이 시스템의 PER을 구하는 공식을 유도하였다. 또한 이 공식을 바탕으로 E_b/N_0 가 일정하고 목표한 PER의 값이 주어질 때, 모든 E_b/N_j 에서 이를 달성하는 ρ 의 값을 최대화하는 잡음 임계값 D_{THR} 을 구하는 방법을 제안하였다. 이 방법을 이용하면 복잡한 연결 부호 시뮬레이터를 사용하지 않고도 D_{THR} 의 값을 최적화할 수 있다. 마지막으로 제시한 항재밍 시스템 설계 방법으로 RS-길쌈 연결 부호를 이용하여 16-QAM SFH/SS 시스템을 설계하였고, 제안한 방법으로 최적에 근접하는 잡음 임계값 \tilde{D}_{THR}^* 를 구했으며 연결 부호 시뮬레이터를 이용하여 검증하였다.

References

- [1] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B. K. Levitt, *Spread Spectrum Communications Handbook*, Revised Ed., McGraw-Hill, 1994.
- [2] G. M. Chiasson and M. B. Pursley, "Concatenated coding for frequency-hop packet radio," in *Proc. IEEE MILCOM*, pp. 1235-1239, Oct. 1991.
- [3] C. D. Frank and M. B. Pursley, "Concatenated coding for frequency-hop spread-spectrum with partial-band interference," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, pp. 377-387, Mar. 1996.
- [4] A. J. Viterbi, "A robust ratio-threshold

technique to mitigate tone and partial band jamming in coded MFSK systems,” in *Proc. IEEE MILCOM 1982*, vol. 1, Boston, USA, Oct. 1982.

- [5] C. W. Baum and M. B. Pursley, “Bayesian methods for erasure insertion in frequency-hop communication systems with partial-band interference,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, pp. 1231-1238, Jul. 1992.
- [6] J. S. Park, I. Kim, P. Yang, J.-S. No, H.-Y. Song, and S. W. Han, “Performance of LDPC coded non-coherent BFSK frequency hopping system with new erasure insertion over partial-band jamming channel,” in *Proc. Symp. KICS*, pp. 696-697, Nov. 2014.
- [7] J. Park, I. Kim, H.-Y. Song, C. Kim, J.-S. No, and S. W. Han, “Performance degradation of LDPC coded frequency-hopping system with SJNR mismatch over partial-band jamming channel,” in *Proc. Symp. KICS*, pp. 244-245, Nov. 2015.
- [8] K. Lee, H. Noh, J. Lee, and J. Lim, “Performance analysis of link-16 waveform considering frequency remapping under PBNJ,” *J. KICS*, vol. 38C, no. 11, pp. 955-965, Nov. 2013.

안 형 배 (Hyoungbae Ahn)



2014년 2월 : 서울대학교 전기·정보공학부 졸업
 2014년 3월~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 석박사 통합 과정
 <관심분야> 통신공학, 부호이론

김 찬 기 (Chanki Kim)



2013년 2월 : 서울대학교 전기·정보공학부 졸업
 2013년 3월~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 석박사 통합 과정
 <관심분야> 통신공학, 부호이론

노 종 선 (Jong-Seon No)



1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학사
 1984년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 공학석사
 1988년 5월 : University of Southern California 전기공학과 공학박사

1988년 2월~1990년 7월 : Hughes Network Systems, Senior MTS
 1990년 9월~1999년 7월 : 건국대학교 전자공학과 부교수
 1999년 8월~현재 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 교수
 <관심분야> 시퀀스, 협력통신, 시공간부호, 네트워크코딩, LDPC 부호, OFDM, 이동통신, 암호학

박 진 수 (Jinsoo Park)



2009년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 졸업
 2009년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합 과정
 <관심분야> 통신공학, 부호이론, 전자전 통신

송 홍 엽 (Hong-Yeop Song)



1984년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 졸업

1986년 5월 : University of
Southern California Dept.
of EE. Systems 석사

1991년 12월 : University of
Southern California Dept.

of EE. Systems 박사

1992년 1월~1993년 12월 : Post-Doc Research
Associate, University of Southern California
Dept. of EE. Systems

1994년 1월~1995년 8월 : Senior Engineer,
Qualcomm Inc., San Diego, California.

2002년 3월~2003년 2월: Visiting Professor,
University of Waterloo, Canada

1995년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수

<관심분야> 통신공학, 정보이론, 부호이론, 암호이론,
이산수학

한 성 우 (Sung Woo Han)



2000년 2월 : 충북대학교 컴퓨
터공학과 공학박사

2001년 8월~2002년 8월 : 미육
군무장연구소 교환연구원

1982년 10월~현재 : 국방과학연
구소 수석연구원

<관심분야> 통신공학, 대전자전 통신, 군위성통신,
Software Defined Radio, Cognitive Radio