

전자전 3실 전자보호 연구실



[EW 32]
전술통신에서 오류정정 부호화
기법 구현 및 성능분석 연구

연구책임자: 노종선 (서울대)
연구원 : 송홍엽 (연세대)

EP (Electronic Protection)



과제 개요

연구계획 및 연구수행 내용

3분기 연구 계획

연구 성과 및 발표 자료 요약

부록



과제 개요

연구 필요성

연구 목표

- 차세대 대전자전을 위한 **재밍에 강력한 오류정정부호** 기술 개발
- ✓ 재밍 공격에 취약하고 주파수 효율성이 낮은 현재 전술통신환경은 광역성과 기동성을 필요로 하는 미래의 네트워크 중심전(Network centric warfare)을 대비하기 위한 항재밍 능력을 갖춘 빠르고 효율적인 통신체계가 필요
- ✓ 재밍 환경에서도 고속의 정보전달이 가능하며 지상, 공지, 위성 통신 등 다양한 통신시나리오에서도 전송품질을 유지할 수 있는 항재밍 **오류정정부호 기법**에 대한 연구 필요

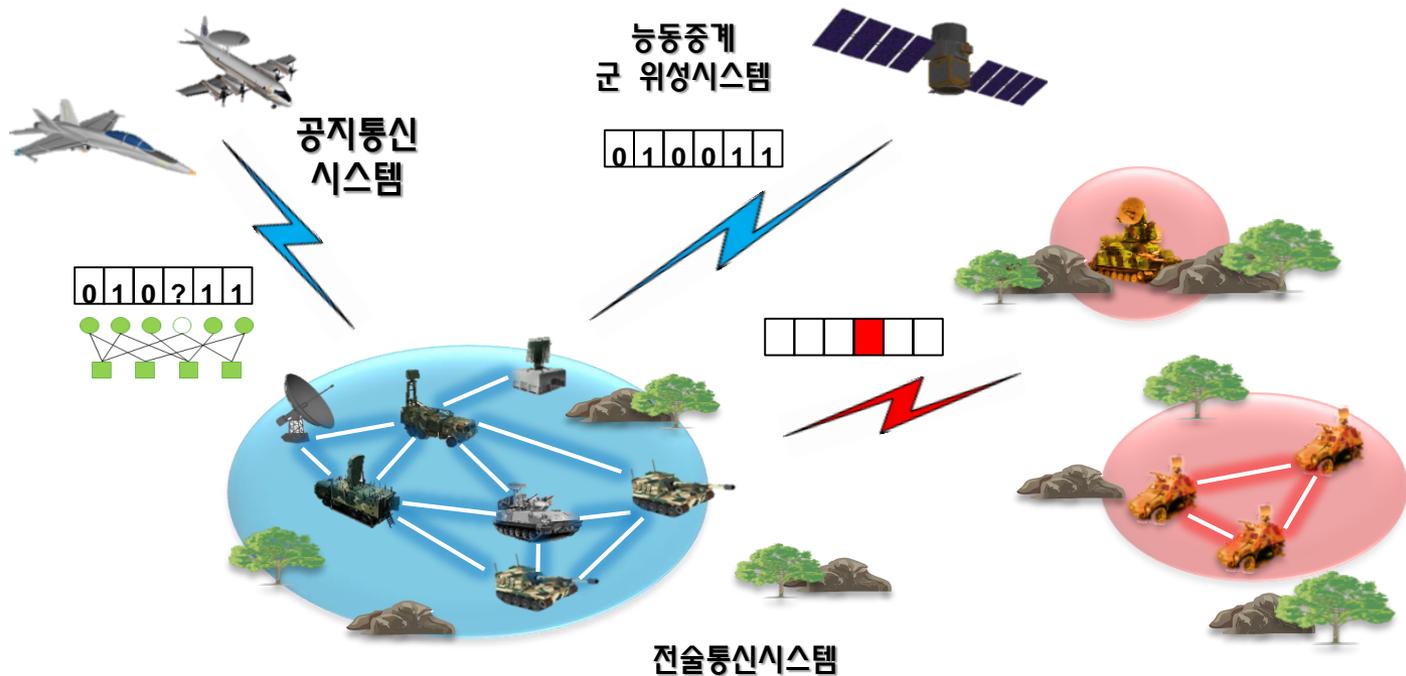
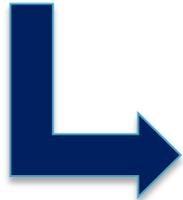


그림 1. 전술 통신 환경

1단계 : 재밍 하에서 전술통신 오류정정부호 기법 연구

- 1년차: 전술통신시스템 별 적용된 오류정정부호 기법 기술조사 및 성능분석
- 2년차: 고속 데이터 전송에 적합한 오류정정부호 기법 연구 및 성능분석
- 3년차: 주파수 고효율이 가능한 변조방식 혼합 오류정정부호 기법 연구 및 성능분석



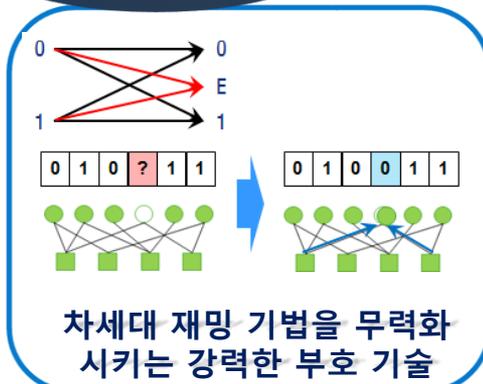
2단계 : 차세대 전술통신시스템에 적합한 오류정정부호 기법 제안 및 구현

- 1년차: 지상 전술이동통신시스템에서 오류정정부호 기법 구현
- 2년차: 공중통신에서 오류정정부호 기법 구현
- 3년차: FH-MF-TDMA기반 능동중계 위성통신시스템에서 오류정정부호 기법 구현

통합성



생존/보안성



효율성

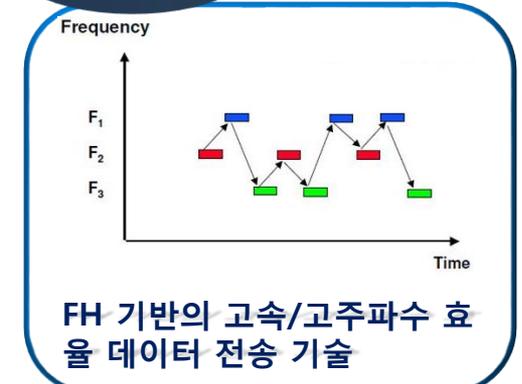


그림 2. 과제의 연구 목표



연구 계획 및 연구 수행 내용

연구 목표 총괄 달성도 및 연구 계획

ϕ 기반 주파수 고효율 전술통신시스템

오류정정부호 기반 혼합변조 시스템

❖ 1단계 3년차 연구 추진계획대비 총괄 달성도



연구 내용	세부 연구 내용	2013	2014	2015	목표달성도
전술통신시스템별 적용된 오류정정부호 기법 기술 조사 및 성능분석	• 문헌 조사 및 자료 확보				100%
	• 전술통신시스템 체계 검토 및 통신망 체계 확인				100%
	• 기존 전술통신시스템을 위한 오류정정부호 기법 조사				100%
고속 데이터 전송에 적합한 오류정정부호 기법 연구 및 성능분석	• 전술통신시스템에 적합한 고속 데이터 전송을 위한 오류정정부호 선정 및 시뮬레이터 구축				100%
	• 고속 데이터 전송이 가능한 오류정정부호 기법 제안 및 분석				100%
주파수 고효율이 가능한 변조방식 혼합 오류정정부호 기법 연구 및 성능분석	• 주파수 고효율이 가능한 오류정정부호 기법 연구 및 분석				75%
	• 오류정정부호 기반 혼합변조 시스템 연구 및 분석				50%

현재

그림 3. 연구목표 총괄 달성도

❖ 연구 계획

- 기존 전술통신 시스템의 구조 분석

비교	위성통신	VHF 채널	Link-16
대역 확산 시스템	SFH(동기, 제어) , FFH(음성)	SFH(데이터)	SFH
변복조 방식	QFSK(동기, 제어), 8FSK(음성)	QPSK, 16~64 QAM	32 MSK
홉 당 비트 수[bit/hop]	440(=220[sym/hop])	200~1500	17~70
전송 속도[Kbps]	2.4 (음성), 2.4~16(데이터)	16~128	26.88, 53.76, 107.52
사용 부호(부호율)	길쌈 부호(1/4 , 1/2)	길쌈 부호(1/4~7/8)	RS 부호

표 1. 기존 전술통신 시스템의 구조 분석

- 전술통신 시스템의 physical layer의 개선 방향

개선 방향	설명
변조 방식의 변경	주파수 고효율을 달성하기 위해 FSK 기반에서 PSK, QAM으로 변화 필요
홉당 비트 수 증가	FH 웨이브폼 유형이 LDR에서 MDR(XDR)로 변화하면서 FFH을 SFH으로 변화
다양한 패턴의 재밍 대처	부분 대역 재밍 외 멀티 톤 재밍과 같은 다양한 유형의 재밍에 대한 대처 필요
부호율 향상	채널 부호 자체의 효율 향상을 통한 데이터 전송 속도 향상

표 2. 전술통신 시스템의 physical layer 개선 방향

❖ 시스템 모델

- GF(2⁵)기반 (30, 14) RS 부호와 부호율을 5/7으로 천공한 (133, 171) 길쌈 부호를 연접
- 채널에는 AWGN과 PBJ이 존재하고, 한 홉은 140 개의 변조 심볼로 구성
- 앞서 설명한 기법으로 재밍 유무를 판정하여, 재밍에 걸린 홉은 erasure로 처리

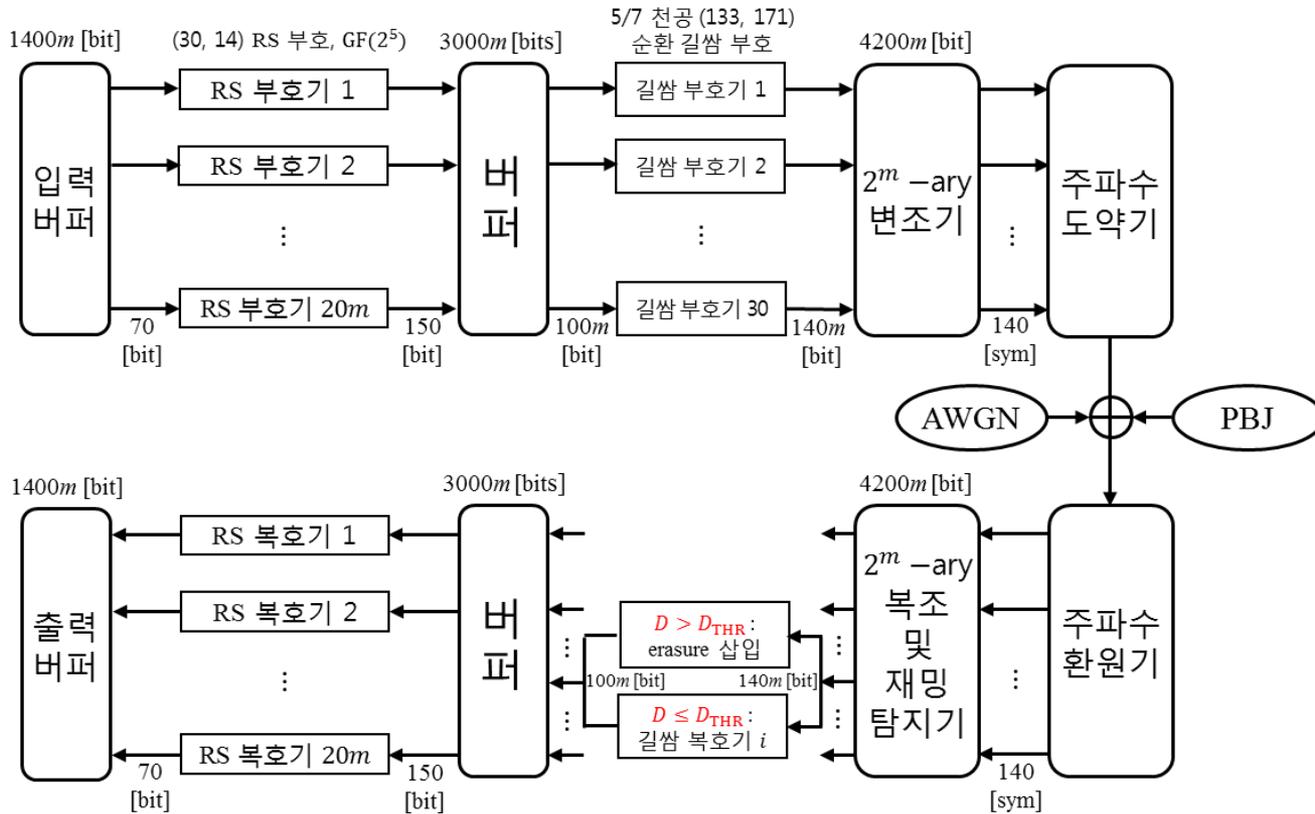


그림 7. 티 기반 주파수 도약 / 2^m-ary 변복조 전송통신시스템 모델

티 기반 주파수 고효율 전술통신시스템

❖ 주파수 고효율 시스템에서의 재밍 탐지 기법

- 15 [dB]의 E_b/N_0 의 AWGN 하의 주파수 도약 / 4,8-PSK, 16-QAM 시스템에서 부분 대역 재밍 탐지 기법 연구
- 재밍 유무에 따라, 성좌도 상에서 수신신호점의 분포가 달라진다는 점에서 착안

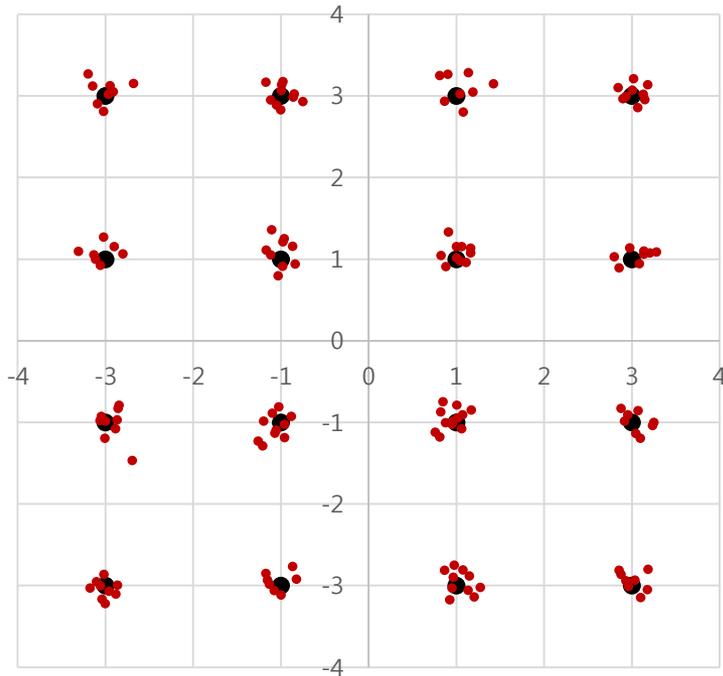


그림 4. 재밍이 없을 때의 성좌도 상의 수신신호점
(FH/16-QAM, 140 [sym/hop], $\rho = 0.1$,
 $\frac{E_b}{N_j} = \infty$ [dB] PBNJ, $\frac{E_b}{N_0} = 15$ [dB] AWGN)

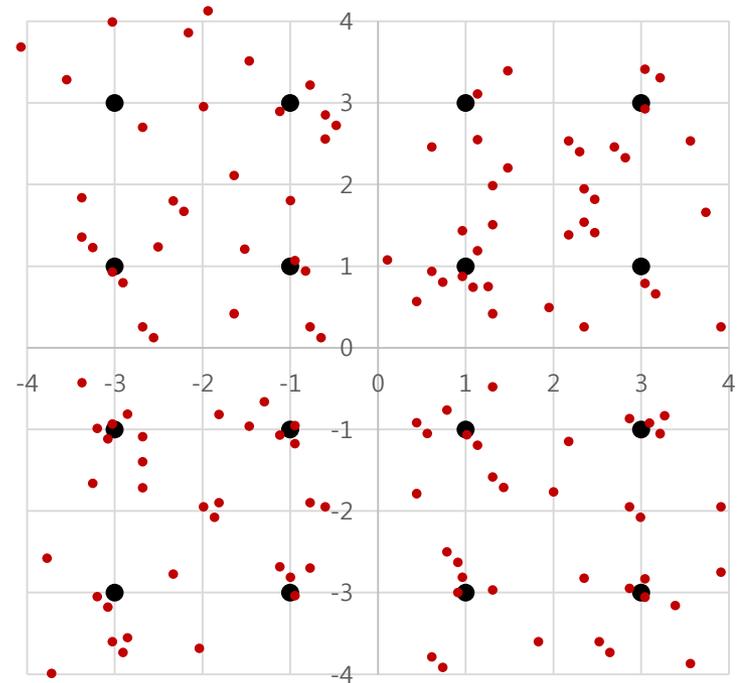


그림 5. 재밍이 있을 때의 성좌도 상의 수신신호점
(FH/16-QAM, 140 [sym/hop], $\rho = 0.1$,
 $\frac{E_b}{N_j} = 10$ [dB] PBNJ, $\frac{E_b}{N_0} = 15$ [dB] AWGN)

티 기반 주파수 고효율 전술통신시스템

❖ 주파수 고효율 시스템에서의 재밍 탐지 기법

- M -ary 변복조 시스템에서 홉 당 심볼의 수가 L 일 때, 홉의 평균 최소 잡음 에너지 D 는

$$D = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \min_{1 \leq n \leq M} \|r_l - s_n\|^2$$

(여기서 s_n ($1 \leq n \leq M$)과 r_l ($1 \leq l \leq L$)은 성좌도 상에서 송 · 수신신호점의 벡터를 의미)

- 해당 홉이 재밍에 걸린 경우, $\min_{1 \leq m \leq M} \|r_l - s_m\|^2$ 이 증가하여 D 의 분포의 평균이 증가
- 임계 값인 D_{THR} 을 적절히 설정하여, $D > D_{\text{THR}}$ 을 만족하면 재밍에 걸렸다고 판정

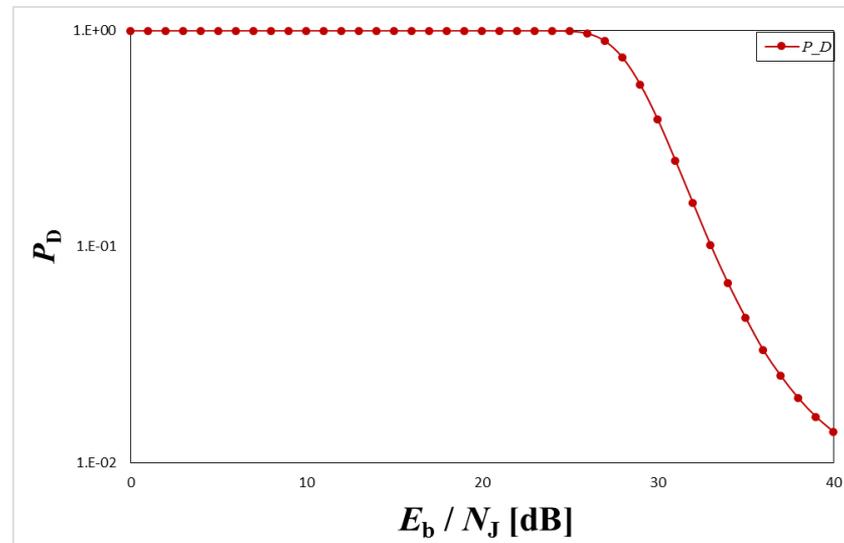


그림 6. FH/QPSK, 60 [sym/hop], $\frac{E_b}{N_0} = 15$ [dB] AWGN 하에서

$D_{\text{THR}} = 0.0313$ 일 때, $\frac{E_b}{N_J}$ 에 따른 재밍 탐지 성공 확률

티 기반 주파수 고효율 전술통신시스템

❖ RS-길쌈 연접 부호의 성능 분석

- RS 부호의 MDS 성질을 이용하여 연접부호의 BER 성능을 계산 가능
- 성능 계산을 위해 필요한 변수는 아래와 같음
 - N : RS 부호의 심볼 크기
 - K : RS 부호의 메시지 심볼 크기
 - ρ : 부분 대역 재밍의 대역 비
 - P_0 : 재밍이 있을 때, 재밍 판정에 실패할 확률 (miss-detection probability)
 - P_1 : 재밍이 없을 때, 재밍에 걸렸다고 잘못 판정할 확률 (false-alarm probability)
 - P_{Jam} : 재밍과 AWGN이 있을 때, q bit 당 outer 부호의 오류 정정 실패 확률 (q : RS 부호의 심볼 수)
 - P_{Noise} : 재밍이 없고 AWGN만 있을 때, q bit 당 outer 부호의 오류 정정 실패 확률 (q : RS 부호의 심볼 수)
- 하나의 RS 심볼 오류가 발생할 때, 평균 절반의 비트의 오류가 발생한다고 가정할 때, BER 성능은 아래와 같음

$$BER = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^{N-i} \sum_{m=0}^j \sum_{n=0}^{N-i-k} \binom{N}{i} \rho^i (1-\rho)^{N-i} \binom{i}{j} P_0^j (1-P_0)^{i-j} \binom{N-i}{k} P_1^k (1-P_1)^{N-i-k} \binom{j}{m} P_{Jam}^m (1-P_{Jam})^{j-m} \binom{N-i-k}{n} P_{Noise}^n (1-P_{Noise})^{N-i-k-n} f(i, j, k, m, n)$$

$$f(i, j, k, m, n) = \begin{cases} 0 & (i - j + k + 2m + 2n \leq N - K) \\ 0.5 & (i - j + k + 2m + 2n > N - K) \end{cases}$$

티 기반 주파수 고효율 전술통신시스템

❖ $P_{\text{Jam,THR}}$

- N, K, ρ, P_1 및 P_{Noise} 가 결정된 경우 BER을 최소로 만드는 P_0^* 가 P_{Jam} 에 따라서 존재

$$P_0^*(P_{\text{Jam}}) = \underset{0 \leq P_0 \leq 1}{\operatorname{argmin}} \operatorname{BER}(N, K, \rho, P_0, P_1, P_{\text{Jam}}, P_{\text{Noise}})$$

- $P_0^*(P_{\text{Jam}})$ 은 다음의 성질을 만족

- $P_0^*(P_{\text{Jam}})$ 은 P_{Jam} 에 따른 감소함수
- $0 \leq P_0^*(P_{\text{Jam}}) \leq 1$

- 위 성질을 바탕으로 다음과 같이 $P_{\text{Jam,THR}}$ 을 설정

$$P_{\text{Jam,THR}} = \min_{0 \leq P_{\text{Jam}} \leq 1} \{P_{\text{Jam}} | P_0^*(P_{\text{Jam}}) = 0\}$$

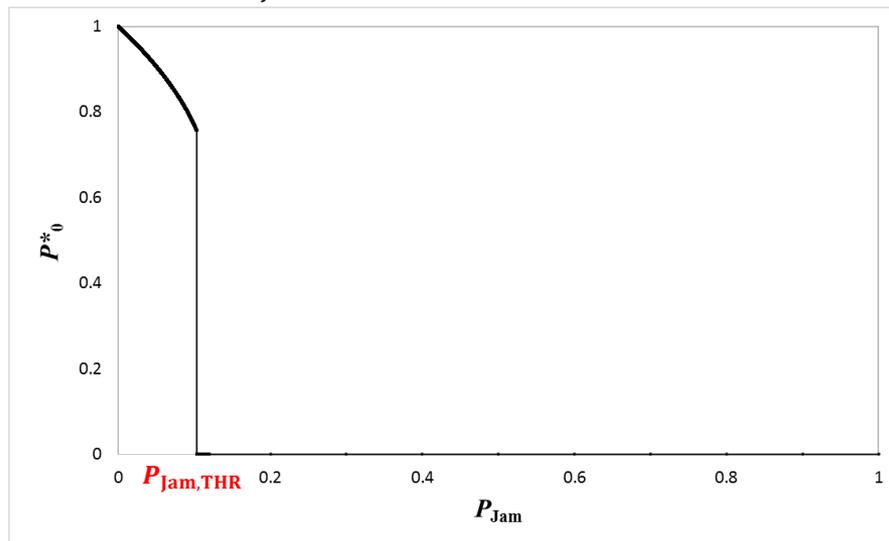


그림 8. $N = 30, K = 14, \rho = 0.1, P_1 = 0, P_{\text{Noise}} = 0$ 일 때 $P_0^*(P_{\text{Jam}})$ 곡

티 기반 주파수 고효율 전술통신시스템

❖ D_{THR} 설정

- D_{THR} 이 결정 $\Leftrightarrow P_1$ 및 E_b/N_j 에 따른 P_0 가 결정 \Leftrightarrow BER 성능이 결정
- D_{THR} 이 작을 경우 P_1 이 증가하여 전반적인 BER 성능이 악화
- D_{THR} 이 클 경우 BER이 E_b/N_j 에 따라 증가하는 구간이 발생하므로 성능이 열화
- 따라서 최적의 D_{THR} 은 다음의 조건을 만족하는 최대의 값으로 설정
 - $D_{THR} \geq D_{THR,min}$ ($D_{THR,min} = \arg \left\{ \lim_{D_{THR} \rightarrow 0} \frac{BER|_{P_1(D_{THR})}}{BER|_{P_1=0}} = 1.1 \right\}$ 로 false-alarm에 의한 BER 증가율이 10%가 되는 시점)
 - BER 성능 곡선은 E_b/N_j 에 따른 감소함수
- D_{THR} 을 구하는 알고리즘을 다음과 같이 제안

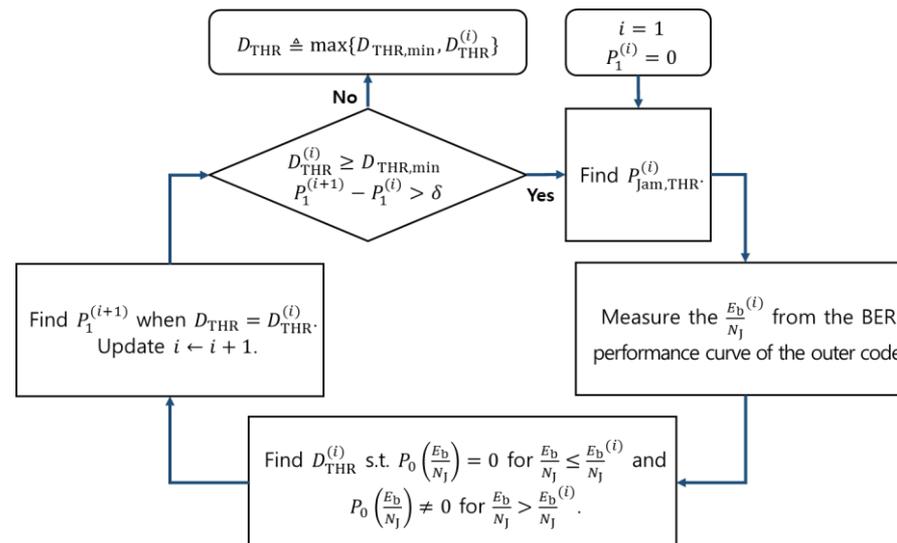


그림 9. 최적 D_{THR} 계측 알고리즘

❖ 성능 분석

- GF(2⁵) 기반 (30, 14) RS 부호와 부호율을 5/7으로 천공한 (133, 171) 길쌈 부호를 연접함
- E_b/N₀ = 15 [dB]의 AWGN 하에서 ρ별로 E_b/N_J에 따른 BER 성능 모의 실험 결과

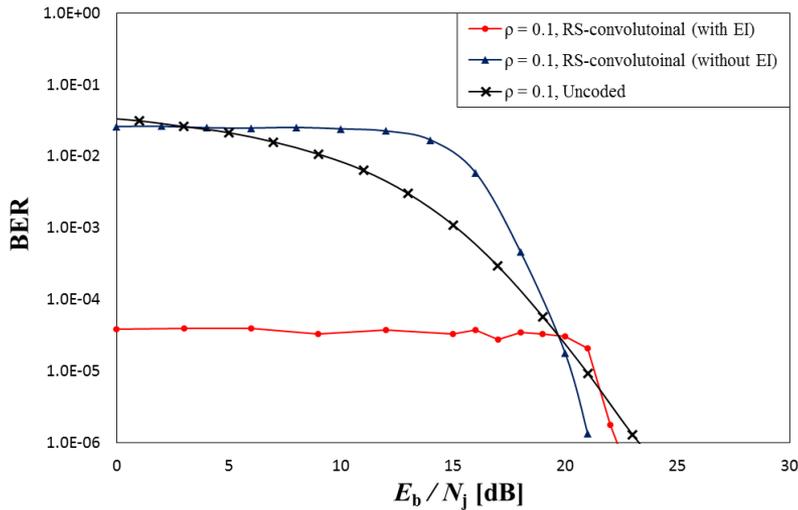


그림 11. FH / QPSK, ρ = 0.1 인 시스템의 BER 성능

RS-convolutoinal code (R _{Total} = 0.333, ρ = 0.1)			
Modulation	QPSK	8-PSK	16-QAM
Data rate [kbps]	16	24	32
BER at E _b /N _J = 0 [dB]	3.22 × 10 ⁻⁵	5.54 × 10 ⁻⁵	6.20 × 10 ⁻⁴
D _{THR}	0.1350	0.0500	0.0313

표 5. 변조기법별 ρ = 0.1일 때, E_b/N_J = 0 [dB]에서 BER 성능

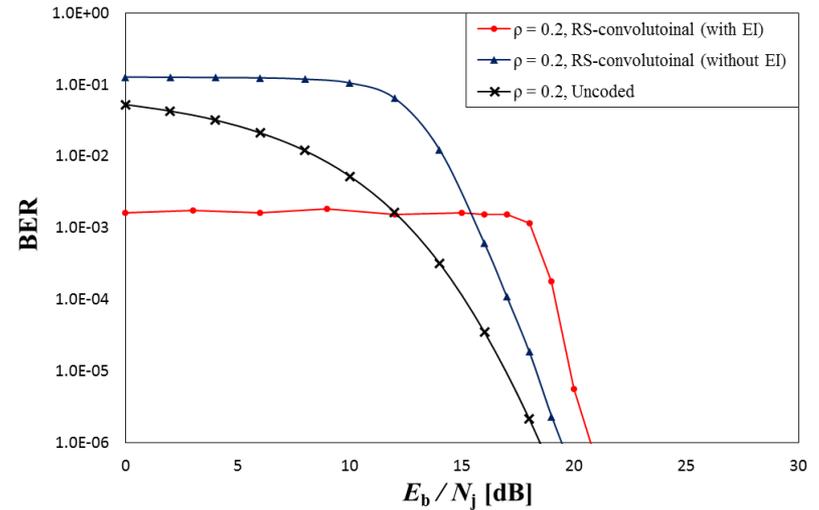


그림 12. FH / QPSK, ρ = 0.2 인 시스템의 BER 성능

RS-convolutoinal code (R _{Total} = 0.333, ρ = 0.2)			
Modulation	QPSK	8-PSK	16-QAM
Data rate [kbps]	16	24	32
BER at E _b /N _J = 0 [dB]	1.53 × 10 ⁻³	1.74 × 10 ⁻³	2.34 × 10 ⁻³
D _{THR}	0.1620	0.0550	0.0317

표 6. 변조기법별 ρ = 0.2일 때, E_b/N_J = 0 [dB]에서 BER 성능

❖ 시스템 모델

- 부호율 2/3인 길쌈 부호기와 8-PSK를 사용하는 Trellis Coded Modulation (TCM)

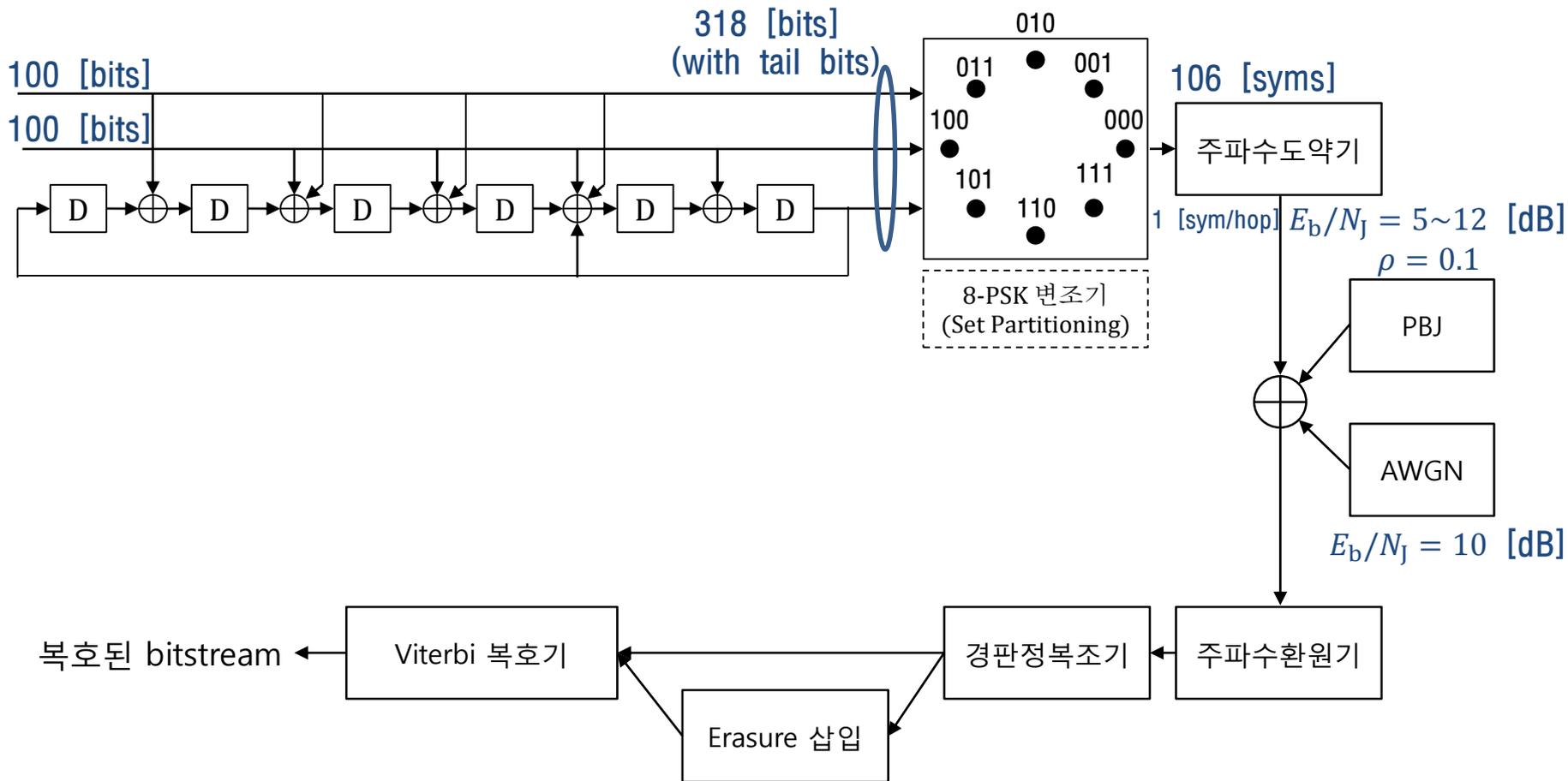


그림 14. 8-PSK를 사용하는 TCM의 송/수신 블록다이어그램

❖ 연구 내용

- PSK에 사용한 재밍 탐지 기법을 TCM에 응용하여 성능을 확인
- RS 부호와 다르게 대수적 분석이 쉽지 않음
- 연접 부호가 아니기 때문에 심볼단위로 재밍을 탐지하고 해당 심볼들을 삭제함
- 최종적으로 erasure-and-error Viterbi 복호를 수행
- 최적 D_{THR} 값은 각 E_b/N_J 에 대하여 변화하며, $E_s = 1$ 로 고정할 경우 시뮬레이션을 통해 구한 D_{THR} 값은 아래와 같음

E_b/N_J [dB]	-5	0	2	4	6	8	10	12
D_{THR}	0.06	0.06	0.05	0.06	2.55	9.5	5.6	3.2

표 7. 고려하는 주파수 도약 TCM 시스템에서 E_b/N_J [dB]에 따른 최적 D_{THR} 값

❖ 성능 분석

- 재밍에 영향을 받은 심볼을 삭제함으로써 전 영역에 걸쳐 성능 향상을 보임
- 기존 TCM 구성요소에 추가적인 erasure 삽입 기능만 추가하여 간단히 구현가능
- 단, 최적 D_{THR} 값을 사전에 구해야 하는 단점이 있음

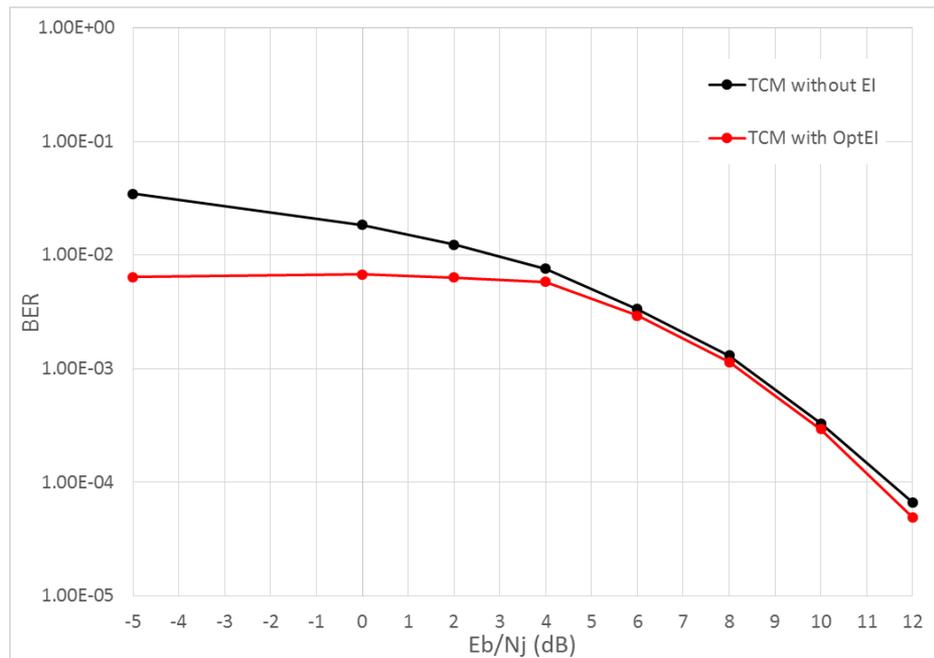


그림 15. 8-PSK를 사용하는 TCM에 대하여 소실 삽입 기법 유무에 따른 BER성능



3분기 연구 계획

TI을 이용한 RS 부호의 복호화 알고리즘 개선

수신 신호 오류의 정정 가능성 판정

다중 톤 재밍 환경 고려

Fading이 고려된 전술통신 환경 구현

❖ 문제점

- RS 부호는 항재밍 성능이 좋은 채널 부호이지만, 높은 복호화 복잡도가 실용화의 걸림돌이 됨

❖ 개선 방향

- EI(erasure insertion) 및 RS 부호가 가진 특징을 활용하여 RS 부호의 복호화 알고리즘을 개선하는 방법을 제시

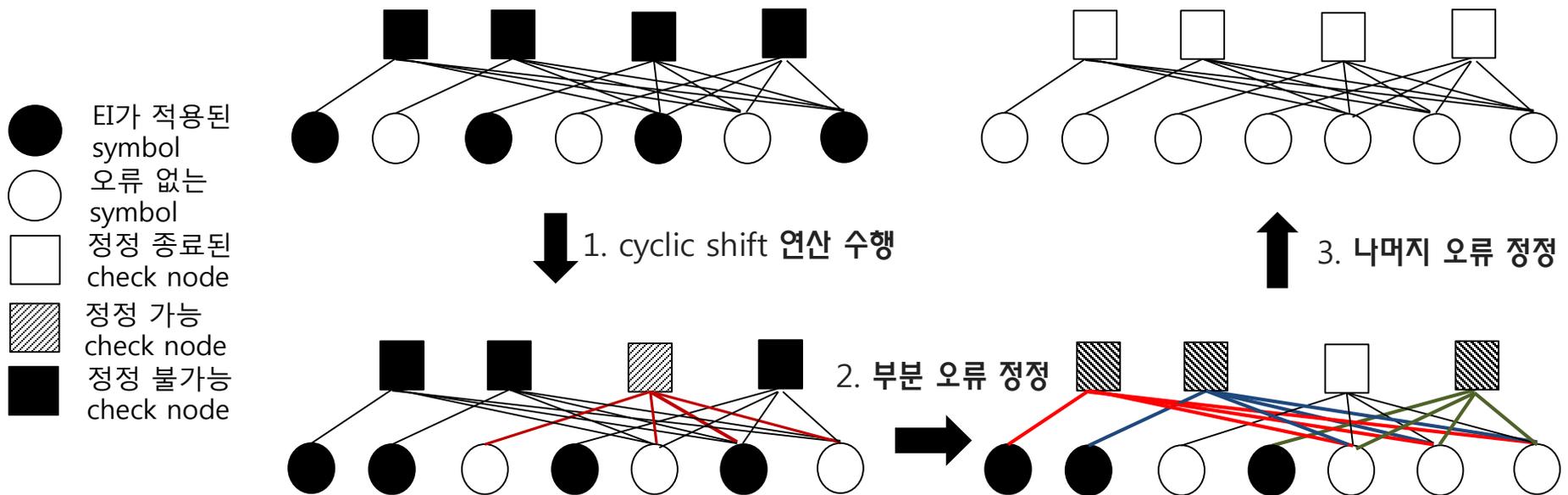


그림 16. (7.3) RS 부호의 개선된 복호화 알고리즘

❖ 연구 동기

- [1]의 RS-BCH 연접 부호의 복호 과정을 살펴보면, 수신된 홉의 오류가 BCH 부호의 오류정정성을 넘어서는 지의 여부를 판정함
- 이를 넘는 홉은 erasure로 처리하여 오류가 될 홉을 삭제하기 때문에 연접부호 성능이 향상

❖ 연구 방향

- 같은 방법을 RS-길쌈 연접부호에 적용하여 시스템의 성능 향상을 도모함

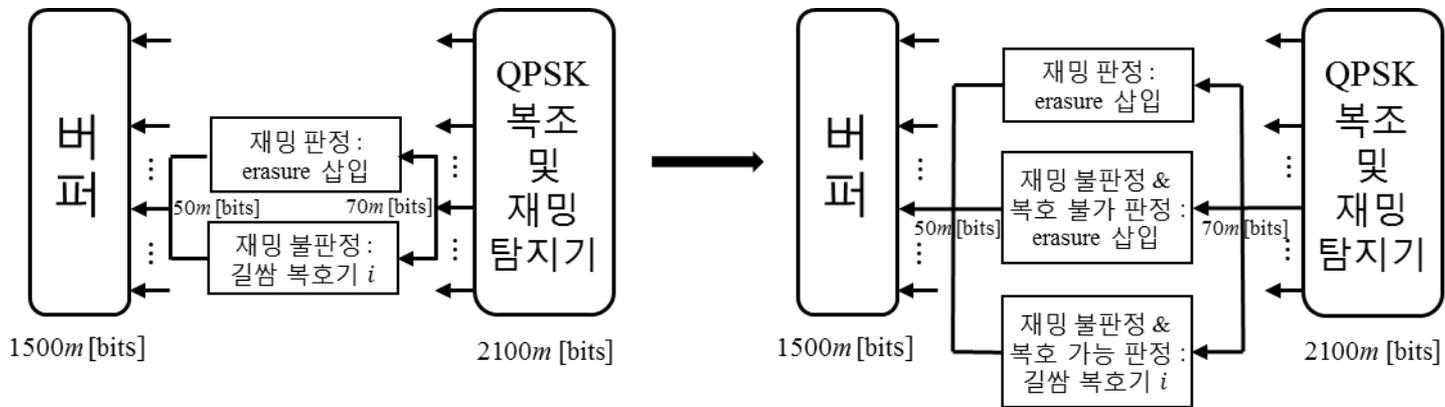


그림 17. 길쌈 부호에 오류 탐지 기법을 적용한 시스템 모델

다중 톤 재밍 환경 고려

❖ 다중 톤 재밍

- ▶ 대역 비가 ρ 인 부분 대역 재밍 환경에서는 주파수 도약 시스템에서 수신된 흡이 독립적으로 ρ 의 확률로 재밍의 영향을 받는다고 가정이 가능
- ▶ 다중 톤 재밍 환경에서는 이러한 가정이 불가능

❖ 접근 방법

- ▶ E_b/N_j 와 톤의 수에 따른 BER 성능을 구한 뒤, 각 E_b/N_j 에 대하여 톤의 수를 조절하여 최악의 BER을 구하여 성능을 도출함

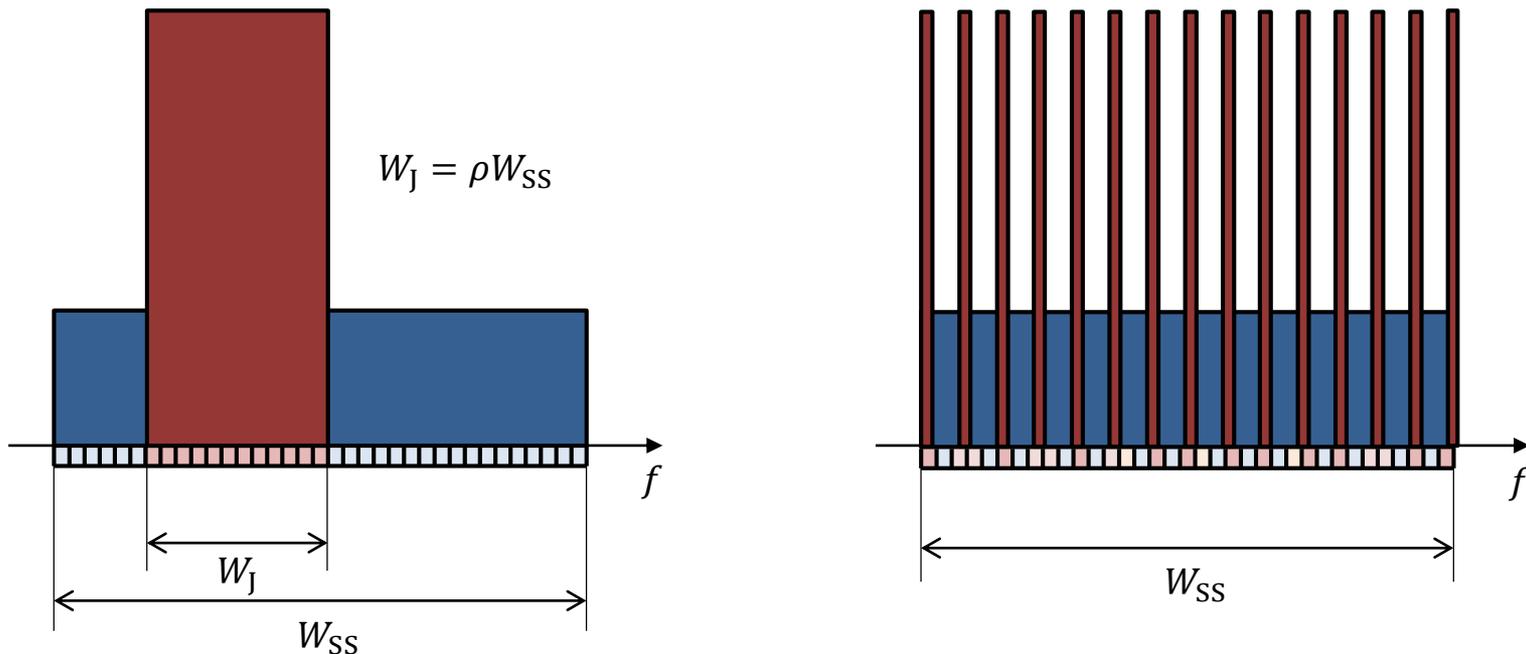


그림 18. 부분 대역 재밍 및 다중 톤 재밍

Fading이 고려된 전술통신 환경 구현

전자전 3실

❖ Fading 모델 선택

- 무선 전술통신 환경에서는 다중 경로로 인한 fading을 고려해야 한다.
- 2단계 1년차 목표가 '지상 전술이동통신 시스템에서 오류정정기법을 구현'인 만큼, 이동하는 송수신 환경에 의한 fast fading 환경을 고려



그림 19. 전술통신 환경에서 fading이 발생하는 상황



연구 성과 및 발표 자료 요약

연구 성과

발표 자료 요약

구분	국제학술지	국제학회	국내저널	국내학회	특허
목표	1				1
성과	1건 제출예정	1건 심사중	2건 게재/ 1건 제출예정	6건 발표	

구분	저자	제목	발표처	상태
국내 학회	김정현, 박진수, 송홍엽	Maximum Weight Clique Search for Instantly Decodable Network Coding-based Broadcast	2014 제 24회 통신정보 통합학술대회	발표
국내 저널	박진수, 김인선, 송홍엽, 한성우	LDPC 부호화된 멀티유저 상향링크 Massive-MIMO 시스템의 반복 검출 및 복호 수신기	한국통신학회 논문지 제 39A권, 제 9호, 2014년 9월	게재
국내 학회	박진수, 김인선, 양필웅, 노종선, 송홍엽, 한성우	부분대역재밍 환경에서 새로운 Erasure Insertion과 LDPC 부호가 적용된 Non-Coherent BFSK 주파수 도약시스템의 성능 연구	2014 한국통신학회 추 계종합학술발표회	발표
국내 학회	김찬기, 양필웅, 전보환, 노종선, 박진수, 송홍엽, 한성우	부분 대역 재밍 및 가산성 백색 가우시안 잡음 채널하의 SFH/NC-BFSK 시스 템에서 Erasure insertion 기법 및 RS-BCH 연결 부호를 이용한 항재밍 기법	2014 한국통신학회 추 계종합학술발표회	발표
국내 학회	박진수, 송홍엽, 양필웅, 노종선, 한성우	LDPC 부호가 적용된 Non-Coherent BFSK 주파수 도약시스템에서 부분 대역 재밍에 대한 Erasure Insertion 기법과 Clipping 기법의 항 재밍 성능 비교	2015 한국통신학회 동계학술대회	발표
국내 학회	김정현, 김인선, 박진수, 송민규, 송홍엽, 한성우	거대 다중 안테나 주파수 분할 하향링크 채널을 위한 년컨벡스 압축센싱 기 반 채널 상태 정보 피드백 기법	2015년 제 25회 통신 정보통합학술대회	발표
국내 저널	김정현, 김인선, 박진수, 송홍엽, 한성우	거대 다중 안테나 시스템을 위한 년컨벡스 압축센싱 기반 채널 정보 피드백 기법	한국통신학회 논문지 제 40권, 제 4호, 2015년 04월	게재
국내 저널	박진수, 김인선, 송홍엽, 양필웅, 노종선, 한성우	부분 대역 재밍 채널에서 LDPC 부호화된 주파수 도약 BFSK 시스템의 Erasure Insertion 및 Clipping 기법	한국통신학회논문지	제출예정
국제 학회	Jin Soo Park, Hong-Yeop Song, Pilwoong Yang, Jong- Seon No, Sung Woo Han	Comparison of Clipping and Erasure Insertion for LDPC Coded Frequency- Hopping Non-Coherent FSK over Partial-Band Jamming	MILCOM 2015	심사중
국제 저널		Advanced Erasure Insertion for RS Coded SFH/MFSK System with Partial- Band Jamming Channel		제출예정
국내 학회	안형배, 김찬기, 노종선, 박진수, 송홍엽, 한성우	부분 대역 재밍 및 가산성 백색 가우시안 잡음 채널에서 주파수 고효율 확산 대역 통신시스템 및 TCM에서의 새로운 재밍 탐지 기법 적용	2015 한국군사과학기술 학회 종합학술대회	발표예정

항목		요약
연구 계획 및 연구 수행 내용	연구 목표 총괄 달성도	3년 차 과제 계획의 절반 이상을 수행 중이며 주파수 고효율 시스템에서 오류정정부호에 대한 연구로 성과를 제출
	티기반 주파수 고효율 전술통신시스템	주파수 도약 / 주파수 고효율 시스템에서 평균 최소 잡음 에너지를 이용하여 부분 대역 재밍을 탐지하고, RS - 길쌈 연접 부호 및 티 기법을 이용한 전술통신시스템 설계 및 성능분석
	오류정정부호 기반 혼합변조 시스템	부분 대역 재밍 환경에서 TCM의 성능을 확인하고 티 기법을 이용하여 향상된 항 재밍 능력을 갖도록 설계
3분기 연구 계획	티를 이용한 RS 부호의 복호화 알고리즘 개선	EI(erasure insertion) 및 RS 부호가 가진 특징을 활용하여 RS 부호의 복호화 알고리즘을 개선하는 방법을 제시
	수신 신호 오류의 정정 가능성 판정	재밍이 걸리지 않았다고 판정된 홑의 오류 정정 가능 여부를 판별하여 정정이 불가능한 홑은 erasure로 처리함으로써 연접부호의 성능을 향상
	다중 톤 재밍 환경 고려	E_b/N_f 와 톤의 개수에 따른 BER을 구한 뒤, 톤의 개수에 따른 최악의 BER을 선택하여 성능을 도출
	Fading이 고려된 전술통신 환경 구현	전술통신환경에서는 다중경로 및 도플러 효과로 인한 fading이 발생 가능하므로 이를 고려한 모의실험 환경을 구현

표 8. 발표 자료 요약