

# 수신기 다양성과 일정 오경보 확률 방법을 쓴 부호획득: 2. 비균질 감쇄 환경

준회원 권형문\*, 강현구\*, 박주호\*, 안태훈\*,  
정회원 이성로\*\*, 종신회원 송익호\*

## Code Acquisition with Receive Diversity and Constant False Alarm Rate Schemes: 2. Nonhomogeneous Fading Circumstance

Hyoungmoon Kwon\*, Hyun Gu Kang\*, Juho Park\*, Taehoon Ahn\* *Associate Members*,  
Sung Ro Lee\*\* *Regular Member*, Iickho Song\* *Lifelong Member*

### 요 약

이 논문의 1부에 이어, 수신안테나 다양성을 쓰는 직접수열 부호분할 다중접속(direct-sequence code division multiple access: DS/CDMA) 시스템에서 의사잡음(pseudonoise: PN) 부호를 획득할 때 평균값(cell average: CA), 큰값(greatest of: GO), 작은값(smallest of: SO) 일정 오경보 확률(constant false alarm rate: CFAR) 처리기의 성능 특성을 비균질(nonhomogeneous) 잡음 환경에서 얻고 견주어 본다. 균질 잡음 환경에서와는 다르게, 비균질 잡음 환경에서는 큰값 일정 오경보 확률 처리기가 가장 성능이 좋고, 평균값 일정 오경보 확률 처리기가 그 다음으로 성능이 좋다는 것을 볼 수 있다.

**Key Words** : signal detection, code acquisition, constant false alarm rate processor, receive diversity, nonhomogeneous environment.

### ABSTRACT

As a sequel to Part 1, the performance characteristics of the cell averaging (CA), greatest of (GO), and smallest of (SO) constant false alarm rate (CFAR) processors in nonhomogeneous environment are obtained and compared when receiving antenna diversity is employed in the pseudonoise (PN) code acquisition of direct-sequence code division multiple access (DS/CDMA) systems. Unlike in homogeneous environment, the GO CFAR processor is observed to exhibit the best performance in nonhomogeneous environment, with the CA CFAR processor performing the second best.

### I. 머리말

수신안테나가 하나인 직접수열 부호분할 다중접속(direct-sequence code division multiple access: DS/CDMA) 시스템에서 부호획득에 필요한 잡음 분

산을 추정할 때 일정 오경보 확률(줄여서, 일오확) 처리기를 쓸 수 있다. 이때, 균질(homogeneous) 잡음 환경에서는, 평균값(cell average: CA) 일오확 처리기를 쓴 직접수열 부호분할 다중접속 시스템이 성능이 매우 좋으나, 분산이 갑자기 바뀌거나(보기

※ 이 논문은 과학기술부가 지원하고 한국과학재단이 주관하는 국가지정연구실 사업의 지원을 받아 연구한 것입니다.

\* 한국과학기술원 전자전산학과 ({kwon, khg, jpark, tahn}@Sejong.kaist.ac.kr, i.song@ieee.org)

\*\* 목포대학교 전자공학과 (srlee@mokpo.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-12-508, 접수일자 : 2005년 12월 27일, 최종논문접수일자 : 2006년 6월 2일

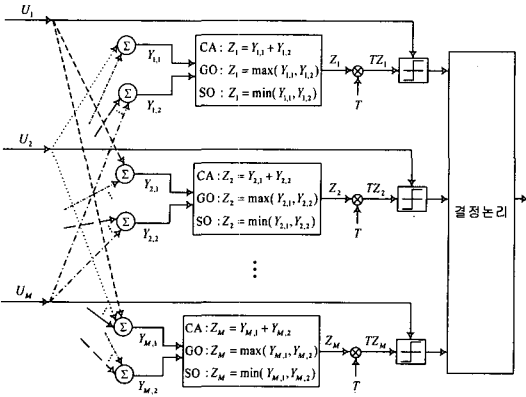


그림 1. 결정처리의 열개

로, 쓰는데 수가 갑자기 바뀔 때, 감쇄가 심하거나 그늘효과(shadowing) 일어나면 평균값 일오확 처리기의 성능이 꽤 떨어진다<sup>[1, 2]</sup>.

일오확 처리기 가운데 평균값 일오확 처리기는 참조 값이 독립이고 그 분포가 지수 분포인 균질 잡음 환경에서(검파 확률을 가장 크게 한다는 뜻으로) 최적이다. 그러나, 참조 값이 균질하지 않으면, 평균값 일오확 처리기는 성능이 크게 떨어진다. 비균질(nonhomogeneous) 잡음 환경에서 일어나는 이와 같은 평균값 일오확 처리기의 문제점을 풀고자 고친(modified) 평균값 일오확 방법과 같은 여러 방법이 제안되었다<sup>[3]</sup>.

한편, 신호대 잡음비를 높이고 무선 통신 시스템의 채널 용량을 늘리려면 직접수열 부호분할 다중접속 시스템에 안테나를 여러 쓰면 좋다는 것이 알려져 있다. 이에, 안테나가 여러일 때의 장점을 살리고자 여러 안테나를 쓴 방식이 제안되었고<sup>[4-7]</sup>, 여러 가지 공간 신호처리 방법이 개발, 분석되었다<sup>[8-10]</sup>. 그러나, 여러 안테나를 써서 시작 동기를 빠르게 하려는 연구는 거의 없다고 할 수 있다. 보기를 들어, [11]에서는 균질 잡음 환경에서 평균값 일오확 알고리즘과 안테나 다양성을 같이 함께 쓴 적응 섞음 부호획득 방법을 제안하였으나, 이 방법을 비균질 잡음 환경에서 다루지는 않았다.

이 논문의 1부에서는<sup>[12]</sup> 수신안테나 다양성을 쓰는 직접수열 부호분할 다중접속 시스템에서 의사잡음(pseudonoise: PN) 부호를 획득할 때 평균값, 큰값(greatest of: GO), 작은값(smallest of: SO) 일오확 처리기의 성능 특성을 균질 잡음 환경에서 얻고 견주어 보았다. 이제, 1부의 뒤를 이어 이 논문에서는 비균질 잡음 환경에서 비동위상 섞음 부호획득 방법을 다루고 그 성능을 분석한다.

## II. 시스템 모형

먼저, 안테나 수가  $L$ 인 섞음 부호획득 시스템을 생각하여, 안테나 하나하나에 비동위상 상관기가  $M$  개씩 나란히 있다고 하자. 여기서,  $M$ 은 2보다 큰 홀수이다. 한편, 길이가  $L_c$ 인 전체 불확실 영역(uncertainty region) 길이가  $L_p = \lceil L_c/M \rceil$ 인 부영역  $M$ 개로 나눈다고 두자. 여기서,  $\lceil x \rceil$ 는  $x$ 보다 작지 않은 가장 작은 정수를 뜻한다. 안테나마다  $m$ 째 상관기는  $m$ 째 부영역의 모든 셀을 직렬 탐색한다. 이제,  $l$ 째 상관기 문치에서  $m$ 째 상관기의 출력을 얻은 뒤, 이 값을 그림 1에 보인 결정처리의 입력으로 쓰자.

$$U_m = \sum_{i=1}^L X_{i,m}, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

결정처리기에서  $m$ 째 굳은 판정을 내릴 때  $\{U_j\}_{j=1, j \neq m}^M$ 을 모두 잡음으로 본다. 한편,  $m$ 째 가지에서 문턱값  $TZ_m$ 은 오정보 확률  $P_{FA}$ 를 만족시키도록 얻은 크기 매개변수  $T$ 와 일오확 출력  $Z_m$ 을 곱한 값이다. 이때, 일오확 출력  $Z_m$ 은 '위쪽' 참조 가지 출력  $Y_{m,1}$ 과 '아래쪽' 참조 가지 출력  $Y_{m,2}$ 를 바탕으로 얻는데, 어느 평균값 일오확 처리기를 쓰느냐에 따라 그 값이 다르다. 여기서,

$$m \leq \frac{M+1}{2} \text{ 이면 } Y_{m,1} = \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq m}}^{\frac{M+1}{2}} U_j, \quad Y_{m,2} = \sum_{j=\frac{M+1}{2}+1}^M U_j \quad (2)$$

이고

$$m > \frac{M+1}{2} \text{ 이면 } Y_{m,1} = \sum_{j=1}^{\frac{M+1}{2}-1} U_j, \quad Y_{m,2} = \sum_{\substack{j=\frac{M+1}{2}, \\ j \neq m}}^M U_j \quad (3)$$

이다.

검정 입력  $\{U_m\}$  가운데 하나만 문턱값보다 클 때 부호를 '획득'하고, 그렇지 않으면, 수신기에 있는 의사잡음 발생기의 위상을  $\Delta T_c$ 만큼 앞당긴 뒤 부호획득 과정을 되풀이한다. 여기서,  $T_c$ 는 칩 주기이고,  $\Delta$ 는 진행 단계 크기이다. 보통,  $\Delta$ 는 1 또는 1/2이라 두는데, 이는 수신기에서 만든 의사잡음 수열을 각각  $T_c$  또는  $T_c/2$ 만큼 왼쪽으로 움직이는 것을 뜻한다. 이 논문에서는  $\Delta$ 를 1로 둔다.

이제, 비균질 잡음 환경에서 상관기 출력  $X_{i,m}$ 의

확률밀도함수는

$$p_{X_l}(x) = \frac{1}{\lambda_l} e^{-\frac{x}{\lambda_l}} = \beta_l e^{-\beta_l x}, \quad x \geq 0, \quad l=1,2,\dots,L \quad (4)$$

이다. 여기서,  $\beta_l = 1/\lambda_l$ 이다. 한편, 귀무가설과 대립 가설은 각각 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$H_0 : \lambda_l = \mu_0(1 + C_l), \quad (5)$$

$$H_1 : \lambda_l = \mu_0(1 + C_l)(1 + S_l). \quad (6)$$

여기서,  $\mu_0$ 은 열잡음 분산,  $C_l$ 은 출력  $X_{l,m}$ 에서 간섭 대 열잡음비(interference-to-thermal-noise ratio),  $S_l$ 은 출력  $X_{l,m}$ 에서 신호대 간섭과 열잡음비이다(signal-to-interference-and-thermal-noise ratio: SINR).

### III. 결정처리기 분석

이제, 비균질 잡음 환경에서 평균값, 큰값, 작은 값 일오확 처리기의 성능을 닫힌꼴로 얻고 분석하자. 검파 확률, 놓침 확률, 오경보 확률을 얻을 때 아래와 같이 두었다.

- 표본 하나만이 바른 위상에( $H_1$  셀) 해당한다.
- 상관기 출력은 서로 독립이다.
- 부분 상관 길이  $N$ 은 충분히 커서 들어오는 의사잡음 부호와 수신기에서 만든 의사잡음 부호가 정렬되지 않았을 때( $H_0$  셀) 상관값은 0이다.
- 불확실 영역은 전체 부호 길이  $L_c$ 이다.

먼저, [12]에서 보인 바와 같이, 검파 확률  $P_D$ , 오경보 확률  $P_{FA}$ , 놓침 확률  $P_M$ 은 각각 아래와 같다.

$$P_D = P(U > TZ | H_1) \cdot \{P(U < TZ | H_0)\}^{M-1}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_{FA} &= \frac{1}{L_p} P_{FA|H_1} + \frac{L_p - 1}{L_p} P_{FA|H_0} \quad (8) \\ &= \frac{1}{L_p} [P(U > TZ | H_0) \cdot P(U < TZ | H_1) \\ &\quad \cdot \{P(U < TZ | H_0)\}^{M-2}] \\ &\quad + \frac{L_p - 1}{L_p} [P(U > TZ | H_0) \cdot \{P(U < TZ | H_0)\}^{M-1}], \end{aligned}$$

$$P_M = 1 - P_D - P_{FA|H_1} \quad (9)$$

여기서,  $P_{FA|H_1}$ 은 대립가설  $H_1$ 이 참일 때  $H_1$  신호

$U_k$ 가 문턱값보다 작고  $\{U_m\}_{m=1, m \neq k}^M$  가운데 하나가 문턱값보다 클 확률이고,  $P_{FA|H_0}$ 은 귀무가설  $H_0$ 이 참일 때  $\{U_m\}_{m=1}^M$  가운데 하나가 문턱값보다 클 확률이다. 위(7)-(9)에서,  $P(U > TZ | H_1)$ 을 얻으면  $P_D$ ,  $P_{FA|H_1}$ ,  $P_{FA|H_0}$ ,  $P_M$ 을 쉽게 얻을 수 있다. 따라서, 비균질 잡음 환경에서 일오확 방법마다  $P(U > TZ | H_1)$ 을 계산하자.

먼저, (4)를 바탕으로 확률변수  $X_{l,m}$ 의 적률생성 함수를(moment generating function: mgf) 얻으면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} M_{X_l}(t) &= \int_0^\infty p_{X_l}(x) e^{-tx} dx \\ &= \frac{\beta_l}{\beta_l + t}. \end{aligned} \quad (10)$$

이제,  $1 \leq \varphi_i < L$ ,  $2 \leq P \leq L$ ,  $L \geq 2$ 일 때  $\sum_{i=1}^P \varphi_i = L$ 을 만족시키는 정수 집합  $\{\varphi_i\}_{i=1}^P$ 를 생각하여, 안테나  $L$ 개의 잡음 분산 가운데  $\varphi_1$ 개,  $\varphi_2$ 개, ...,  $\varphi_P$ 개가 같다고 두면,  $X_{1,m}$ ,  $X_{2,m}$ , ...,  $X_{L,m}$ 은 서로 독립이고  $U_m = \sum_{i=1}^L X_{i,m}$ 이므로  $U_m$ 의 적률생성함수를 아래와 같이 쓸 수 있다<sup>[13]</sup>.

$$\begin{aligned} M_U(t) &= \{M_{X_1}(t)\}^{\varphi_1} \{M_{X_2}(t)\}^{\varphi_2} \dots \{M_{X_P}(t)\}^{\varphi_P} \\ &= \left( \frac{\beta_1}{\beta_1 + t} \right)^{\varphi_1} \left( \frac{\beta_2}{\beta_2 + t} \right)^{\varphi_2} \dots \left( \frac{\beta_P}{\beta_P + t} \right)^{\varphi_P}. \end{aligned} \quad (11)$$

위 적률생성함수 (11)을 부분분수로 풀어쓰면

$$\begin{aligned} M_U(t) &= \frac{R_{1,1}}{\beta_1 + t} + \frac{R_{1,2}}{(\beta_1 + t)^2} + \dots + \frac{R_{1,\varphi_1}}{(\beta_1 + t)^{\varphi_1}} \\ &\quad \vdots \\ &\quad + \frac{R_{P,1}}{\beta_P + t} + \frac{R_{P,2}}{(\beta_P + t)^2} + \dots + \frac{R_{P,\varphi_P}}{(\beta_P + t)^{\varphi_P}} \end{aligned} \quad (12)$$

인데,  $R_{i,j}$ 는 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{i,j} &= \frac{1}{(\varphi_i - j)!} \left. \frac{d^{\varphi_i - j}}{dt^{\varphi_i - j}} \{(\beta_i + t)^{\varphi_i} M_U(t)\} \right|_{t = -\beta_i} \\ &= \frac{\prod_{k=1}^P \beta_k^{\varphi_k}}{(\varphi_i - j)!} \frac{d^{\varphi_i - j}}{dt^{\varphi_i - j}} \left[ \sum_{l_1=0}^{\varphi_1} \dots \sum_{l_{i-1}=0}^{\varphi_{i-1}} \sum_{l_{i+1}=0}^{\varphi_{i+1}} \dots \sum_{l_P=0}^{\varphi_P} \right] \end{aligned}$$

$$\left\{ \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P \left( \frac{\varphi_k}{l_k} \right) \beta_k^{\varphi_k - l_k} \right\}_{t = \sum_{k=1}^P l_k}^{-1} \Bigg|_{t = -\beta_i} \quad (13)$$

이제,  $\sum_{(\eta)_1} \sum_{m=1}^n m \eta_m = j$ 와  $q = \sum_{m=1}^n \eta_m$ 를 만족시키는 음 아닌 정수 풀이  $\eta_m$ 에 대해서 모두 더하는 것을 나타낸다고 두면

$$\frac{d^j}{dy^j} F(y) = \sum_{(\eta)_1} \frac{j!}{\eta_1! \eta_2! \dots \eta_n!} \frac{d^j F(y)}{dy^j} \cdot \left( \frac{y^{(1)}}{1!} \right)^{\eta_1} \left( \frac{y^{(2)}}{2!} \right)^{\eta_2} \dots \left( \frac{y^{(n)}}{n!} \right)^{\eta_n} \quad (14)$$

이라 쓸 수 있다<sup>[14]</sup>. 이때, (13)에서

$$y = \sum_{l_i=0}^{\varphi_i} \dots \sum_{l_{i-1}=0}^{\varphi_{i-1}} \sum_{l_{i+1}=0}^{\varphi_{i+1}} \dots \sum_{l_p=0}^{\varphi_p} \left\{ \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P \left( \frac{\varphi_k}{l_k} \right) \beta_k^{\varphi_k - l_k} \right\}_{t = \sum_{k=1}^P l_k} \quad (15)$$

라 두면,  $F(y) = 1/y$ 과  $F^{(q)}(y) = \frac{(-1)^q q!}{y^{q+1}}$ 을 쉽게 얻는다. 따라서, (13)-(15)에서 아래를 얻는다.

$$R_{i,j} = \sum_{\eta_1} \frac{1}{\eta_1! \eta_2! \dots \eta_n!} \frac{(-1)^q q! \prod_{k=1}^P \beta_k^{\varphi_k}}{\prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P (\beta_k - \beta_i)^{\varphi_k(q+1)}} \cdot \prod_{h=1}^n \left( \frac{1}{h!} \right)^{\eta_h} \left[ \sum_{l_i=0}^{\varphi_i} \dots \sum_{l_{i-1}=0}^{\varphi_{i-1}} \sum_{l_{i+1}=0}^{\varphi_{i+1}} \dots \sum_{l_p=0}^{\varphi_p} \left\{ \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P \left( \frac{\varphi_k}{l_k} \right) \beta_k^{\varphi_k - l_k} \right\} \cdot \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right)! \left/ \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k - h \right)! \cdot (-\beta_i)^{\left( \sum_{k=1}^P l_k \right) - h} \right. \right] \quad (16)$$

식 (16)에서  $\sum_{(\eta)_2}$ 는  $\sum_{m=1}^n m \eta_m = \varphi_i - j$ 와  $q = \sum_{m=1}^n \eta_m$ 를 만족시키는 음 아닌 정수 풀이  $\{\eta_m\}$ 에 대해서 모두 더하는 것을 뜻한다.

이제, (12)를 역 라플라스 변환하여  $U_m$ 의 확률밀도함수를 얻으면 아래와 같다.

$$p_U(u) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{\varphi_i} \frac{R_{i,j}}{(j-1)!} u^{j-1} e^{-\beta_i u} \quad (17)$$

따라서,

$$P(U > TZ | H_1) = \int_0^\infty \int_{Tz}^\infty p_U(u | H_1) du \cdot p_Z(z) dz$$

$$= \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{\varphi_i} \sum_{m=0}^{j-1} \frac{R_{i,j} T^m}{m! \beta_i^{j-m}} E_Z \{ Z^m e^{-\beta_i TZ} \} \quad (18)$$

이다. 여기서,  $\beta_i$ 는  $H_1$ 에서  $\beta_i = 1/(\mu_0(1+C_i)(1+S_i))$ 이므로 일오확 방법마다  $E_Z \{ Z^m e^{-\beta_i TZ} \}$ 를 얻는데 초점을 맞춘다.

### 3.1 평균값 일정 오경보 확률 처리기

평균값 일오확 처리기에서 출력 통계량  $Z_m = \sum_{j=1, j \neq m}^M U_j$ ,  $m=1, 2, \dots, M$ 의 적률생성함수는 모두 아래와 같다.

$$M_Z(t) = \{M_U(t)\}^{M-1} = \left( \frac{\beta_1}{\beta_1 + t} \right)^{(M-1)\varphi_1} \dots \left( \frac{\beta_P}{\beta_P + t} \right)^{(M-1)\varphi_P} \quad (19)$$

부록에서 평균값 일오확 처리기의 검파 확률과 오경보 확률이 각각 아래와 같음을 보였다.

$$P_D = I_{N,CA}(S_P) \{1 - I_{N,CA}(0_P)\}^{M-1}, \quad (20)$$

$$P_{FA} = \frac{1}{L_p} \left[ I_{N,CA}(0_P) \{1 - I_{N,CA}(S_P)\} \cdot \{1 - I_{N,CA}(0_P)\}^{M-2} \right] + \frac{L_p - 1}{L_p} \left[ I_{N,CA}(0_P) \{1 - I_{N,CA}(0_P)\}^{M-1} \right] \approx I_{N,CA}(0_P) \{1 - I_{N,CA}(0_P)\}^{M-1} \quad (21)$$

여기서,  $S_P = (S_1, S_2, \dots, S_P)$ 는 신호대 간섭과 잡음비 벡터이고,  $0_P$ 는  $P$ 차원 영벡터이며,

$$I_{N,CA}(S_P) = \sum_{i_1=1}^P \sum_{j_1=1}^{\varphi_{i_1}} \sum_{m=0}^{j_1-1} \sum_{i_2=1}^P \sum_{j_2=1}^{(M-1)\varphi_{i_2}} \binom{j_2 + m - 1}{m} \cdot \left[ \frac{T}{T + \left\{ \frac{(1+C_{i_1})(1+S_{i_1})}{(1+C_{i_2})(1+S_{i_2})} \right\}} \right]^m \cdot \frac{\{(1+C_{i_1})(1+S_{i_1})\}^{j_1}}{\left\{ \frac{T}{(1+C_{i_1})(1+S_{i_1})} + \frac{1}{(1+C_{i_2})(1+S_{i_2})} \right\}^{j_2}} \cdot R_{i_1, j_1}(S_P) \cdot W_{i_2, j_2}(S_P) \cdot (\mu_0)^{j_1 + j_2} \quad (22)$$

이고,  $I_{N,CA}$ 에 있는 첨자  $N, CA$ 는 각각 ‘비균질 잡음 환경’과 ‘평균값 일오확 처리기’를 뜻하며,

$$R_{i,j}(\underline{S}_P) = \sum_{(\eta)_2} \prod_{k=1}^P \left\{ \frac{1}{(1+C_k)(1+S_k)} \right\}^{\varphi_k} \approx I_{N,GO}(\underline{0}_P) \{1 - I_{N,GO}(\underline{0}_P)\}^{M-1}. \quad (26)$$

여기서,

$$I_{N,GO}(\underline{S}_P) = 2 \sum_{i_1=1}^P \sum_{j_1=1}^{\varphi_{i_1}} \sum_{m=0}^{j_1-1} \sum_{o_2=1}^P \sum_{j_2=1}^{\varphi_{o_2}} \binom{j_2+m-1}{m} T^m \frac{(M-1)\varphi_{i_1}}{2} \left\{ (1+C_{i_1})(1+S_{i_1}) \right\}^{j_1-m} \cdot R_{i_1 j_1}(\underline{S}_P) \cdot V_{i_2 j_2}(\underline{S}_P) \cdot (\mu_0)^{j_1+j_2} \left\{ \frac{T}{(1+C_{i_1})(1+S_{i_1})} + \frac{1}{(1+C_{i_2})(1+S_{i_2})} \right\}^{j_2+m} - 2 \sum_{i_1=1}^P \sum_{j_1=1}^{\varphi_{i_1}} \sum_{m=0}^{j_1-1} \sum_{o_2=1}^P \sum_{i_3=1}^P \sum_{j_3=1}^{\varphi_{o_2}} \sum_{r=0}^{j_3-1} (\mu_0)^{j_1+j_2+j_3} \left\{ (1+C_{i_1})(1+S_{i_1}) \right\}^{j_1-m} \left\{ (1+C_{i_3})(1+S_{i_3}) \right\}^{j_3-r} \cdot \frac{T}{\left\{ (1+C_{i_1})(1+S_{i_1}) + (1+C_{i_2})(1+S_{i_2}) + (1+C_{i_3})(1+S_{i_3}) \right\}^{j_2+r+m}} \cdot \frac{(j_2+r+m-1)!}{(j_2-1)!r!m!} T^m \cdot R_{i_1 j_1}(\underline{S}_P) \cdot V_{i_2 j_2}(\underline{S}_P) \cdot V_{i_3 j_3}(\underline{S}_P) \quad (27)$$

이코

$$V_{i,j}(\underline{S}_P) = \sum_{(\eta)_4} \frac{(-1)^q q! \cdot (\mu_0)^{\frac{(M-1)}{2} \left\{ -L + (q+1) \sum_{k=1}^P \varphi_k \right\}}}{\eta_1! \eta_2! \dots \eta_n!} \cdot \frac{\prod_{k=1}^P \left\{ \frac{1}{(1+C_k)(1+S_k)} \right\}^{\frac{(M-1)\varphi_k}{2}}}{\prod_{k=1}^P \left\{ \frac{1}{(1+C_k)(1+S_k)} - \frac{1}{(1+C_i)(1+S_i)} \right\}^{\frac{(M-1)(q+1)\varphi_k}{2}}} \cdot \prod_{k=1}^P \left( \frac{1}{h!} \right)^{\eta_h} \left[ \sum_{l_1=0}^{(M-1)\varphi_1} \dots \sum_{l_{i-1}=0}^{(M-1)\varphi_{i-1}} \sum_{l_{i+1}=0}^{(M-1)\varphi_{i+1}} \dots \sum_{l_p=0}^{(M-1)\varphi_p} \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right)! \cdot \left\{ \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P \binom{(M-1)\varphi_k}{l_k} \right\} \left\{ \mu_0 (1+C_k)(1+S_k) \right\}^{l_k - \frac{(M-1)\varphi_k}{2}} \left| \left\{ \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right) - h \right\}! \cdot \left\{ -\mu_0 (1+C_i)(1+S_i) \right\}^{h - \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right)} \right]^{\eta_h} \quad (24)$$

이다.

### 3.3 작은값 일정 오경보 확률 처리기

큰값 일오확 방법에서 얻은 결과를 바탕으로 작은값 일오확 방법의 검과 확률과 오경보 확률을 쉽게 얻을 수 있으며, 아래와 같다.

$$P_D = I_{N,GO}(\underline{S}_P) \{1 - I_{N,GO}(\underline{0}_P)\}^{M-1}, \quad (25)$$

$$P_{FA} = \frac{1}{L_p} \left[ I_{N,GO}(\underline{0}_P) \{1 - I_{N,GO}(\underline{S}_P)\} \cdot \left\{ 1 - I_{N,GO}(\underline{0}_P) \right\}^{M-2} \right] + \frac{L_p - 1}{L_p} \left[ I_{N,GO}(\underline{0}_P) \{1 - I_{N,GO}(\underline{0}_P)\}^{M-1} \right]$$

이코

$$W_{i,j}(\underline{S}_P) = \sum_{(\eta)_3} \frac{(-1)^q q! \cdot (\mu_0)^{\frac{(M-1)}{2} \left\{ -L + (q+1) \sum_{k=1}^P \varphi_k \right\}}}{\eta_1! \eta_2! \dots \eta_n!} \cdot \frac{\prod_{k=1}^P \left\{ \frac{1}{(1+C_k)(1+S_k)} \right\}^{(M-1)\varphi_k}}{\prod_{k=1}^P \left\{ \frac{1}{(1+C_k)(1+S_k)} - \frac{1}{(1+C_i)(1+S_i)} \right\}^{(M-1)(q+1)\varphi_k}} \cdot \prod_{h=1}^n \left( \frac{1}{h!} \right)^{\eta_h} \left[ \sum_{l_1=0}^{(M-1)\varphi_1} \dots \sum_{l_{i-1}=0}^{(M-1)\varphi_{i-1}} \sum_{l_{i+1}=0}^{(M-1)\varphi_{i+1}} \dots \sum_{l_p=0}^{(M-1)\varphi_p} \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right)! \cdot \left\{ \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P \binom{(M-1)\varphi_k}{l_k} \right\} \left\{ \mu_0 (1+C_k)(1+S_k) \right\}^{l_k - (M-1)\varphi_k} \left| \left\{ \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right) - h \right\}! \cdot \left\{ -\mu_0 (1+C_i)(1+S_i) \right\}^{h - \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right)} \right]^{\eta_h} \quad (24)$$

이다.

### 3.2 큰값 일정 오경보 확률 처리기

부록에서 큰값 일오확 처리기의 검과 확률과 오경보 확률이 각각 아래와 같음을 보였다.

$$P_D = I_{N,SO}(S_P)\{1 - I_{N,SO}(0_P)\}^{M-1}, \quad (29)$$

$$P_{FA} = \frac{1}{L_p} \left[ I_{N,SO}(0_P)\{1 - I_{N,SO}(S_P)\} \cdot \{1 - I_{N,SO}(0_P)\}^{M-2} \right. \\ \left. + \frac{L_p - 1}{L_p} \left[ I_{N,SO}(0_P)\{1 - I_{N,SO}(0_P)\}^{M-1} \right] \right] \\ \approx I_{N,SO}(0_P)\{1 - I_{N,SO}(0_P)\}^{M-1}. \quad (30)$$

여기서,

$$I_{N,SO}(S_P) = 2 \sum_{i_1=1}^P \sum_{j_1=1}^{\varphi_{i_1}} \sum_{m=0}^{j_1-1} \sum_{i_2=1}^P \sum_{j_2=1}^{\frac{(M-1)\varphi_{i_2}}{2}} \sum_{i_3=1}^P \sum_{j_3=1}^{\frac{(M-1)\varphi_{i_3}}{2}} \sum_{r=0}^{j_3-1} \\ \frac{\{(1 + C_{i_1})(1 + S_{i_1})\}^{j_1-m} \{(1 + C_{i_2})(1 + S_{i_2})\}^{j_2-r}}{\left\{ \frac{T}{(1 + C_{i_1})(1 + S_{i_1})} + \frac{1}{(1 + C_{i_2})(1 + S_{i_2})} + \frac{1}{(1 + C_{i_3})(1 + S_{i_3})} \right\}^{j_2+r+m}} \\ \cdot \frac{(j_2+r+m-1)!}{(j_2-1)!r!m!} \cdot T^m \cdot (\mu_0)^{j_1+j_2+j_3} \\ \cdot R_{i_1,j_1}(S_P) \cdot V_{i_2,j_2}(S_P) \cdot V_{i_3,j_3}(S_P) \quad (31)$$

이다.

#### IV. 성능 해석

이 절에서는 비균질 잡음 환경에서 안테나가 여럿일 때 평균값, 큰값, 작은값 일오확 처리기의 성능을 분석하고 서로 견주어 본다. 일오확 방법의 흐름 모형을 써서 천이이득을 (transitional gain) 얻고 이를 바탕으로 섞음 부호획득 시스템의 평균 부호획득시간을 얻으면 아래와 같다<sup>[2]</sup>.

$$E\{T_{acq}\} = \frac{NT_c}{2P_D} [2 + (1 + KP_{FA|H_0})(L_p - 1) \\ \cdot \{2(P_M + P_{FA|H_1}) + P_D\} + 2KP_{FA|H_1}]. \quad (32)$$

여기서,  $K$ 는 벌점 시간 상수이다. 이 논문에서는 비균질 잡음 환경에서 평균 부호획득시간을 성능 척도로 삼아 일오확 처리기의 성능을 분석한다.

##### 4.1 해석 환경

이 논문의 모의 실험에서는 매개변수를 다음과 같이 두었다. 칩 주기  $T_c = 1\mu s$ , 부호 수열 길이  $L_c = 2047$ 칩, 진행 단계 크기  $\Delta = 1$ , 벌점 시간 상수  $K = 10^4$ , 바라는 오경보 확률  $P_{FA} = 10^{-3}$ . 한편, 분산이  $N_0/2$ 인 열잡음과 다중접속간섭이 (multiple access interference: MAI) 전체 잡음을 이룬다고 두

고, 칩 신호대 잡음비를 (signal to noise ratio per chip: SNR/chip) 아래와 같이 뜻매김하자.

$$\text{칩 신호대 잡음비} = \frac{E_0}{\frac{N_0}{2}}. \quad (33)$$

그러면, 다음을 얻는다.

$$C_1 = \frac{K_1 \cdot (\text{칩 신호대 잡음비})}{3}, \quad (34)$$

$$S_1 = \frac{\sigma^2 N \cdot (\text{칩 신호대 잡음비})}{1 + \frac{K_1}{3} \cdot (\text{칩 신호대 잡음비})}. \quad (35)$$

여기서,  $E_0$ 은 바라는 쓰느이의 칩 에너지,  $K_1$ 은  $l$ 째 수신안테나에서 다중접속간섭을 이루는 다른 쓰느이 수,  $\sigma^2$ 은 레일리 확률밀도함수  $p(\alpha) = \frac{2\alpha}{\sigma^2} e^{-\alpha^2/\sigma^2}$ 의 매개변수이다. 그림 2, 4-6에 보인 점들은 신호 세기의 척도로 칩 신호대 잡음비를 쓰고, 몬테카를로 (Monte-Carlo) 방법으로  $10^6$ 번 거듭 모의 실험하여 얻은 것이다. 파선, 실선, 점선은 각각 평균값, 큰값, 작은값 일오확 방법의 성능을 나타낸다.

##### 4.2 일반적인 성능

다른 쓰느이 수의 가장 큰 값을  $K_u = 32$ 라 두고 일오확 방법을 꾸민 뒤  $K_1 = 2$ ,  $K_2 = 62$ 일 때의 성능을 살펴보자. 이는 일반적인 부호분할 다중접속 기지국이 통화 품질을 (quality of service: QoS) 유지하려면 다른 쓰느이를 32명까지만 받을 수 있기 때문이다<sup>[15]</sup>. 이때,  $K_u = 32$ 인 균질 잡음 환경과  $K_1 = 2$ 이고  $K_2 = 62$ 인 비균질 잡음 환경은 둘다 다

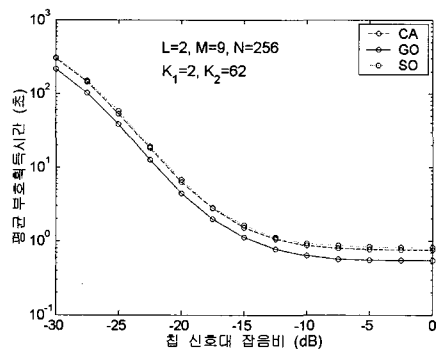


그림 2. 매개변수가  $L=2$ ,  $M=9$ ,  $N=256$ ,  $K_1=2$ ,  $K_2=62$ 일 때 평균 부호획득시간

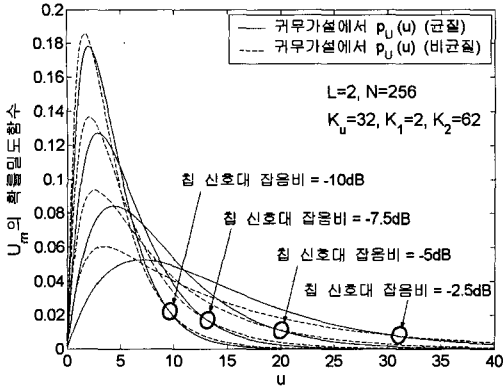


그림 3.  $L=2$ 이고  $N=256$ 일 때 쿼터가설에서  $U_m$ 의 확률밀도함수

중점속간섭 수가 64개로 같다는 것을 새겨두자. 그림 2는 안테나 수가 2 ( $L=2$ ), 상관기 수가 9 ( $M=9$ ), 부분 상관 길이가 256일 ( $N=256$ ) 때 평균 부호획득시간을 보여준다. 비균질 잡음 환경에서 큰 값 일오확 처리기는 다른 두 처리기 보다 성능이 좋고, 평균값 일오확 처리기는 작은 값 일오확 처리기보다 성능이 좋다는 것을 알 수 있다. 이는 다음과 같이 설명할 수 있다.

먼저,  $H_1$ 에서  $U_m$ 의 확률밀도함수는 환경이 바뀌어도 거의 바뀌지 않고, 또 불확실 위상이 대부분  $H_0$ 에 해당하므로 그다지 중요하지 않다. 둘째로,  $L=2$ 와  $N=256$ 일 때를 보기로 든 그림 3과 같이, 비균질 잡음 환경일 때  $H_0$ 에서  $U_m$ 의 확률밀도함수는 균질 잡음 환경일 때와 전주어 충격성이 (impulsiveness) 더 크다. 따라서, 앞 참조 창과 뒷 참조 창에서 관측들을 더한 뒤 가장 큰 값으로 잡음 전력을 추정하는 큰 값 일오확 처리기가 알맞은 처리 방식이 되어 가장 좋은 성능을 보인다. 한편, 평균값 일오확 처리기와 작은 값 일오확 처리기는 충격성 잡음의 전력을 그다지 효과적으로 추정하지 못하기 때문에 큰 값 일오확 처리기보다 성능이 떨어진다.

### 4.3 매개변수와 성능

그림 4는  $L=2, M=9, N=256$ 일 때 다른 쓰는이 수와 평균 부호획득시간을 보여준다. 다른 쓰는이 수가 한 안테나로 몰릴수록 평균 부호획득시간이 더 길어진다는 것을 알 수 있다. 더불어,  $K_1=31$ 이고  $K_2=33$ 일 때 큰 값 일오확 처리기와 평균값 일오확 처리기는 성능이 거의 같으나,  $K_1=0$ 이고  $K_2=64$ 일 때는 성능이 뚜렷이 다르다.

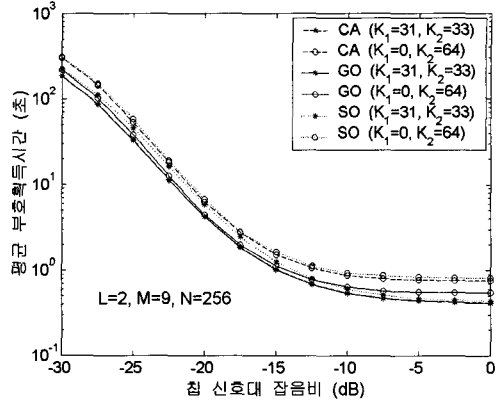


그림 4. 레일리 감쇄 덧셈꼴 정규 비균질 잡음에서 평균 부호획득시간 ( $L=2, M=9, N=256$ )

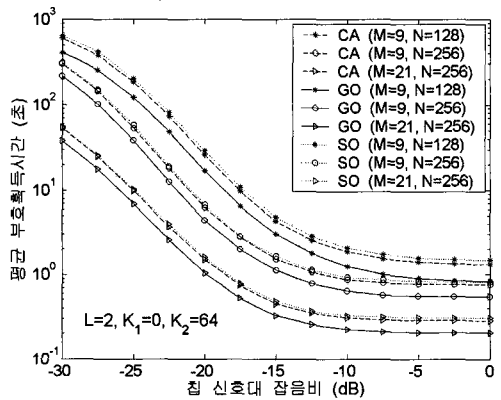


그림 5. 레일리 감쇄 덧셈꼴 정규 비균질 잡음에서 평균 부호획득시간 ( $L=2, K_1=0, K_2=64$ )

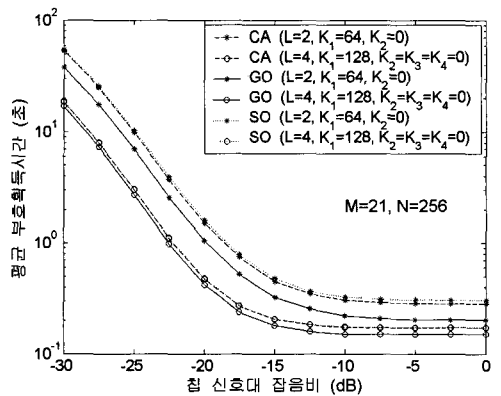


그림 6. 레일리 감쇄 덧셈꼴 정규 비균질 잡음에서 평균 부호획득시간 ( $M=21, N=256$ )

그림 5는  $L=2, K_1=0, K_2=64$ 일 때 ( $M, N$ )와 평균 부호획득시간을 보여준다. 매개변수  $M$ 과  $N$ 이 커질수록 일오확의 성능이 더 좋아진다는 것을 알

수 있다. 균질 잡음 환경에서 다중접속간섭이 없었던 때와는 달리<sup>[12]</sup>, 다중접속간섭이 있을 때는  $N$ 이 커질수록 칩 신호대 잡음비와 상관없이 부호획득 성능이 좋아진다. 이는 다중접속간섭이 있을 때 결정 변수의 신호대 잡음비가 넉넉하려면 오랫동안 상관해야하기 때문이다.

그림 6은  $M=21$ 이고  $N=256$ 일 때 안테나 수  $L$ 과 평균 부호획득시간을 보여주는데,  $L$ 이 커질수록 일오확 처리기의 성능이 나아진다. 이때, 안테나를 네 개보다 많이 써서 얻을 수 있는 성능 이득은 그리 높지 않은데, 그 까닭은 안테나를 네 개 쓸 때 이미 다양성 이득을 대부분 얻기 때문이다. 또한, 굳은모 (hardware) 값과 시스템 설계에는 제한 조건이 있으므로 실제로 쓸 수 있는  $L$ 의 값은 그리 크지 않다.

#### IV. 맺음말

이 논문에서는 비균질 잡음 환경에서 다중접속간섭이 있을 때 일오확 처리기와 안테나 다양성을 함께 쓴 적응 섞음 부호획득 방법을 다루었다. 평균값 일오확 처리기는 비균질 잡음 환경에서 성능이 떨어지므로, 열개가 조금 더 복잡한 큰값 일오확 처리기와 작은값 일오확 처리기를 써서 성능이 떨어짐을 줄이고자 하였다. 평균값, 큰값, 작은값 일오확 처리기의 성능을 닫힌꼴 식으로 얻어 분석하고 서로 견주어 보았다. 비균질 잡음 환경에서는 큰값 일오확 처리기가 성능이 가장 좋다는 것을 모의실험으로 알 수 있었다.

#### 부 록

##### 1. 평균값 일오확 결정처리기

식 (19)를 (11)과 견주어 보면  $Z_m$ 의 확률밀도함수를 아래와 같이 바로 얻을 수 있다.

$$p_Z(z) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{(M-1)\varphi_i} \frac{W_{i,j}}{(j-1)!} z^{j-1} e^{-\beta z} \quad (36)$$

여기서,  $i=1,2,\dots,P$ 이고  $j=1,2,\dots,(M-1)\varphi_i$ 일 때

$$W_{i,j} = \sum_{\{\eta\}_3} \frac{1}{\eta_1! \eta_2! \dots \eta_m!} \frac{(-1)^q q! \prod_{k=1}^P \beta_k^{(M-1)\varphi_k}}{\prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P (\beta_k - \beta_i)^{(M-1)(q+1)\varphi_k}}$$

$$\cdot \prod_{h=1}^n \left( \frac{1}{h!} \right)^{\eta_h} \left[ \sum_{l_1=0}^{(M-1)\varphi_1} \dots \sum_{l_{i-1}=0}^{(M-1)\varphi_{i-1}} \sum_{l_{i+1}=0}^{(M-1)\varphi_{i+1}} \dots \sum_{l_p=0}^{(M-1)\varphi_p} \left\{ \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P \binom{(M-1)\varphi_k}{l_k} \beta_k^{(M-1)\varphi_k - l_k} \right\} \cdot \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right)! \left| \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right) - h \right| \cdot (-\beta_i)^{\left( \sum_{k=1}^P l_k \right) - h} \right]^{\eta_h} \quad (37)$$

이다. 위 (37)에서,  $\sum_{\{\eta\}_3}$ 은  $\sum_{m=1}^n m \eta_m = (M-1)\varphi_i - j$ 와  $q = \sum_{m=1}^n \eta_m$ 을 만족시키는 음 아닌 정수 풀이  $\{\eta_m\}$ 에 대해서 모두 더하는 것을 뜻한다.

식 (18)과 (36)에서 아래를 얻는다.

$$P(U > TZ | H_1) = \sum_{i_1=1}^P \sum_{j_1=1}^{\varphi_{i_1}} \sum_{m=0}^{j_1-1} \sum_{i_2=1}^P \sum_{j_2=1}^{(M-1)\varphi_{i_2}} \binom{j_2+m-1}{m} T^m R_{i_1 j_1} W_{i_2 j_2} \frac{(T\beta_{i_1} + \beta_{i_2})^{-(j_2+m)}}{\beta_{i_1}^{j_1-m}} \quad (38)$$

이제,  $H_1$ 에서는  $\beta_i = 1/(\mu_0(1+C_i)(1+S_i))$ 이므로 (38)을 다시 쓰면 아래와 같다.

$$P(U > TZ | H_1) = \sum_{i_1=1}^P \sum_{j_1=1}^{\varphi_{i_1}} \sum_{m=0}^{j_1-1} \sum_{i_2=1}^P \sum_{j_2=1}^{(M-1)\varphi_{i_2}} \frac{\{(1+C_{i_1})(1+S_{i_1})\}^{j_1-m}}{\left\{ \frac{T}{(1+C_{i_1})(1+S_{i_1})} + \frac{1}{(1+C_{i_2})(1+S_{i_2})} \right\}^{j_2+m}} \cdot \binom{j_2+m-1}{m} T^m \cdot R_{i_1 j_1}(\underline{S}_P) \cdot W_{i_2 j_2}(\underline{S}_P) \cdot (\mu_0)^{j_1+j_2} \quad (39)$$

끝으로, (22)에 뜻때김한  $I_{N,CA}(\underline{S}_P)$ 를 새기면, 비균질 잡음 환경에서 평균값 일오확 방법의 검과 확률과 오경보 확률을 각각 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$P_D = I_{N,CA}(\underline{S}_P) \{1 - I_{N,CA}(\underline{0}_P)\}^{M-1}, \quad (40)$$

$$P_{FA} = \frac{1}{L_p} [I_{N,CA}(\underline{0}_P) \{1 - I_{N,CA}(\underline{S}_P)\} \cdot \{1 - I_{N,CA}(\underline{0}_P)\}^{M-2}] + \frac{L_p-1}{L_p} [I_{N,CA}(\underline{0}_P) \{1 - I_{N,CA}(\underline{0}_P)\}^{M-1}]. \quad (41)$$

##### 2. 큰값 일오확 결정처리기

먼저,  $Y_{m,i}$ 는 확률변수  $U_m$ 을  $(M-1)/2$ 개 더한 것



이므로,  $Y_{m,i}$ 의 적률생성함수는

$$M_Y(t) = \left( \frac{\beta_1}{\beta_1 + t} \right)^{\frac{(M-1)\varphi_1}{2}} \cdots \left( \frac{\beta_P}{\beta_P + t} \right)^{\frac{(M-1)\varphi_P}{2}} \quad (42)$$

이다. 이제, (11)과 (42)를 견주어 보면  $Y_{m,i}$ 의 확률 밀도함수는

$$p_Y(z) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^2 \frac{V_{i,j}}{(j-1)!} z^{j-1} e^{-\beta_P z} \quad (43)$$

임을 (17)에서 알 수 있고, 이를 바탕으로  $Y_{m,i}$ 의 누적분포함수

$$F_Y(z) = 1 - \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^2 \sum_{r=0}^{j-1} \frac{V_{i,j}}{r! \beta_i^{j-r}} z^r e^{-\beta_P z} \quad (44)$$

를 얻을 수 있다. 여기서,  $i = 1, 2, \dots, P$ 이고  $j = 1, 2, \dots, \frac{(M-1)\varphi_i}{2}$ 일 때

$$V_{i,j} = \frac{1}{(\eta_i)_4 \eta_1! \eta_2! \cdots \eta_n!} \frac{(-1)^q q! \prod_{k=1}^P \beta_k^{\frac{(M-1)\varphi_k}{2}}}{\prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P (\beta_k - \beta_i)^{\frac{(M-1)(q+1)\varphi_k}{2}}} \cdot \prod_{h=1}^n \left( \frac{1}{h!} \right)^{\eta_h} \left[ \sum_{l_1=0}^{\frac{(M-1)\varphi_1}{2}} \cdots \sum_{l_{i-1}=0}^{\frac{(M-1)\varphi_{i-1}}{2}} \sum_{l_{i+1}=0}^{\frac{(M-1)\varphi_{i+1}}{2}} \cdots \sum_{l_p=0}^{\frac{(M-1)\varphi_p}{2}} \left\{ \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P \binom{\frac{(M-1)\varphi_k}{2}}{l_k} \beta_k^{\frac{(M-1)\varphi_k}{2} - l_k} \right\} \cdot \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right)! \left\{ \left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right) - h \right\}! \cdot (-\beta_i)^{\left( \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^P l_k \right) - h} \right]^{\eta_h} \quad (45)$$

이다. 식 (45)에서,  $\sum_{(\eta)_4}^n$ 는  $\sum_{m=1}^n m \eta_m = \frac{(M-1)\varphi_i}{2} - j$ 와  $q = \sum_{m=1}^n \eta_m$ 을 만족시키는 음 아닌 정수 풀이  $\{\eta_m\}$ 에 대해서 모두 더하는 것을 뜻한다.

이제, 평균값 일오확 결정처리기에서 보인 것과 마찬가지로 (43)과 (44)를 써서  $E_Z\{Z^m e^{-\beta_i TZ}\}$ 를 계산하여  $P(U > TZ | H_1)$ 을 얻은 다음,  $H_1$ 에서  $\beta_i = 1/\{\mu_0(1 + C_i)(1 + S_i)\}$ 임을 쓰면, 비균질 잡음환

경에서 큰값 일오확 처리기의 검파 확률과 오경보 확률은 각각 아래와 같음을 알 수 있다.

$$P_D = I_{N,GO}(S_P) \{1 - I_{N,GO}(0_P)\}^{M-1}, \quad (46)$$

$$P_{FA} = \frac{1}{L_p} [I_{N,GO}(0_P) \{1 - I_{N,GO}(S_P)\} \cdot \{1 - I_{N,GO}(0_P)\}^{M-2}] + \frac{L_p - 1}{L_p} [I_{N,GO}(0_P) \{1 - I_{N,GO}(0_P)\}^{M-1}]. \quad (47)$$

### 참고 문헌

- [1] V.G. Hansen and J.H. Sawyers, "Detectability loss due to greatest of selection in a cell averaging CFAR", *IEEE Tr. Aerosp., Electr. Systems*, vol. 16, pp. 115-118, Jan. 1980.
- [2] H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations", *IEEE Tr. Aerosp., Electr. Systems*, vol. 19, pp. 608-621, July 1983.
- [3] 김재곤, 김응태, 송익호, 김형명, "MXTM-CFAR 처리기와 그 성능 분석", 한국통신학회 논문지, 17권, 719-729쪽, 1992년 7월.
- [4] 김광순, 박소령, 윤석호, 송익호, 이용엽, "기지국 안테나 배열을 쓰는 역상관 검파기의 성능", 한국통신학회 논문지, 24권, 620-627쪽, 1999년 5월.
- [5] 이승구, 양하영, 강창연, "다중 안테나와 다중 터보 코드를 결합한 DS/CDMA 시스템", 한국통신학회 논문지, 24권, 1611-1619쪽, 1999년 11월.
- [6] D. Chizhik, F. Rashid-Farrokh, J. Ling, and A. Lozano, "Effect of antenna separation on the capacity of BLAST in correlated channels", *IEEE Comm. Letters*, vol. 4, pp. 337-339, Nov. 2000.
- [7] 이준호, 이용엽, 서영준, 방성근, 김종대, "옥내와 옥외간 무선 통신에서 다중 안테나 알고리즘 적용을 통한 통신 성능 향상", 한국통신학회 논문지, 30C권, 355-363쪽, 2005년 5월.
- [8] E. Visotsky and U. Madhow, "Space-time transmit precoding with imperfect feedback", *IEEE Tr. Inform. Theory*, vol. 47, pp. 2632-2639, Sep. 2001.

