

충격성 잡음에서 최적 갈퀴수신기와 준최적 갈퀴수신기의 성능

준회원 김 병 수*, 최 상 원**, 권 형 문**, 종신회원 배 진 수***, 송 익 호**

Performance of Optimum and Suboptimum Rake Receivers in the Presence of Impulsive Noise

Byoung Soo Kim*, Sang Won Choi**, Hyoungmoon Kwon** *Associate Members*,
Jinsoo Bae***, Ickho Song** *Lifelong Members*

요 약

이 논문에서는 충격성 잡음 감쇄 채널에서 가장 비스듬함을 바탕으로 최적 갈퀴수신기를 이끌어 내고, 열개가 간단한 준최적 갈퀴수신기를 얻는다. 잡음이 충격성이면 충격성 환경을 고려한 갈퀴수신기가 정규 잡음에 최적화된 갈퀴수신기보다 성능이 좋다는 것을 모의실험으로 보인다. 또한, 갈퀴수신기의 가락 수가 늘어날수록, 충격성 환경에 알맞게 만든 갈퀴수신기는 성능이 나아지지만, 정규 잡음에 최적화된 갈퀴수신기는 충격성 환경에서 성능이 떨어짐을 보인다.

Key Words : optimum rake receiver, sub-optimum rake receiver, impulsive noise, ultra wideband multiple access system, fading channel.

ABSTRACT

In this paper, the optimum maximum-likelihood rake receiver for impulsive, fading channel is derived, and a sub-optimum rake receiver with reduced complexity is obtained for practical purposes. Numerical results show that, when the noise is impulsive, the rake receivers designed for impulsive noise offer performance improvement over those optimized for Gaussian environment. It is also observed that, as the number of fingers increases, the performance of the rake receivers designed for impulsive environment improves while the rake receiver optimized for Gaussian environment experiences performance degradation in impulsive environment.

I. 머리말

초광대역 다중접속 시스템은 근거리 다중접속 통신을 알맞게 구현할 수 있는 기술이라는 것이 알려졌다^[1]. 초광대역 다중접속 시스템은 주파수 대역이 넓은 매우 짧은 펄스를 보낸다. 한편, 초광대역 다

중접속 시스템에서는 한 펄스주기보다 긴 시간 지연을 거친 여러길 신호 성분을 나누어 분간할 수 있다^[2]. 갈퀴수신기는 이렇게 나눌 수 있는 여러길 성분을 써서 에너지를 많이 얻을 수 있고, 다양성 이득도 얻을 수 있다.

대부분의 갈퀴수신기는 정규 잡음에서 연구, 설계

* 한국과학기술원 테크노경영대학원 (tree9901@kgsn.kaist.ac.kr)

** 한국과학기술원 전자전산학과 ([swchoi, kwon]@Sejong.kaist.ac.kr, i.song@icce.org)

*** 세종대학교 전자정보통신공학부 (j.bae@ieee.org)

논문번호 : KICS2004-12-342, 접수일자 : 2004년 12월 29일

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

되었다³⁾. 정규 잡음은 수식을 전개하기 쉬워 매우 널리 쓰이고, 중심극한 정리를 쓸 수 있는 모든 상황에 물리적으로 알맞다. 그런데, 초광대역 다중접속 시스템에서는 다중접속 간섭과 채널 잡음의 합을 충격성 간섭으로 모형화하는 것이 더 알맞다⁴⁾. 이는 초광대역 펄스가 충격성을 띠고, 실제 주변 채널 잡음을 재보면 잡음이 충격성 간섭에 가깝기 때문이다⁵⁾.

충격성 잡음 모형은⁶⁻⁸⁾ 쓰는 이가 적고 중심극한 정리를 쓸 수 없을 때 알맞다. 더욱이 초광대역 다중접속 시스템에서 다중접속 간섭과 채널 잡음은 일반적으로 비정규 확률 과정이다. 그러므로, 정규 잡음에 최적화된 갈퀴수신기는 (정규최적 갈퀴수신기는) 초광대역 다중접속 시스템에서 성능이 떨어질 것이다. 이는 갈퀴수신기를 설계할 때 충격성 채널 잡음을 고려해야 함을 뜻한다.

이 논문에서는 충격성 잡음 환경에 알맞은 갈퀴수신기를 다룬다. 잡음이 충격성일 때, 가장 비슷함 기준에서 최적인 갈퀴수신기를 얻는다. 그뿐만 아니라 초광대역 다중접속 시스템에서는 전력 소비를 적게 하려고 세기가 매우 작은 신호를 보내므로, 효율적으로 약한 신호를 검파하는 수신기를 설계하는 것이 마땅하다. 이에, 신호 세기가 약할 때 성능이 최적이고 열개가 간단한 준최적 검파기를 얻는다. 충격성 잡음에서 설계한 최적, 준최적 갈퀴수신기의 성능을 정규 최적 갈퀴수신기의 성능과 견주어 본다.

II. 초광대역 다중 접속 시스템 모형

2.1 송신기 모형

초광대역 신호들을 이진 위상 변조하여 보낸다고 두고, 초광대역 펄스 $q(t)$ 의 너비 T_q 는 프레임 주기 (또는 펄스 반복 주기) T_f 보다 매우 작다고 두자. 이 논문에서는 충격성 잡음에서 갈퀴수신기에 초점을 맞춘 것이므로, 초광대역 펄스 모양에는 관심을 두지 않는다.

이제, k 째 쓰는 이 신호는 발생 확률이 같은 두 신호 $s_0^{(k)}(t)$ 와 $s_1^{(k)}(t)$ 가운데 하나이다. 여기서, $0 \leq t \leq N_s T_f$ 일 때, $s_i^{(k)}(t)$, $i=0,1$ 은 아래와 같다.

$$s_i^{(k)}(t) = \theta b_i^{(k)} \sum_{j=0}^{N_s-1} q(t-jT_f - c_j^{(k)}T_c). \quad (1)$$

식 (1)에서, N_s 는 변조된 초광대역 펄스의 수, $T_s = N_s T_f$ 는 심벌 너비, θ 는 보낸 신호 세기, $b_i^{(k)}$

는 +1과 -1이 같은 확률로 생기는 k 째 쓰는 이의 이진 신호, $\{c_j^{(k)}\}_{j=0}^{N_s-1}$ 는 크기가 N_h 보다 크지 않고 주기는 N_c 인 k 째 쓰는 이의 시간 텀 수열, T_c 는 칩 너비이다.

한편, 지연 퍼짐으로 일어나는 심벌사이 간섭과 심벌안 간섭을 줄이고자 프레임 시간 T_f 가 충분히 크다고 ($T_f \gg N_h T_c + T_c$) 두자. 이때, $T_f - (N_h + 1)T_c$ 를 보호 시간이라고 부르고, 위와 같은 초광대역 다중접속 시스템에서 이론적으로 동시에 N_c 명까지 같이 쓸 수 있다.

2.2 채널 모형

이 논문에서는 IEEE 802.15 연구위원회 3a에서 받아들인 채널 모형을 쓴다. 이 채널 모형은 2-8 GHz 주파수 대역에서 집안 채널을 측정하여 이를 바탕으로 만들었다⁹⁾. 이 모형은 감쇄 채널 상수에 대수 정규 확률변수를 쓴다. 여러길 성분과 그 무리들이 독립인 감쇄를 생각하면 채널의 충격응답은 아래와 같다.

$$h(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} U_{m,n} \delta(t - T_m - T_{m,n}). \quad (2)$$

여기서, M 은 무리의 수, N 은 여러길 성분의 수, $U_{m,n}$ 은 m 째 무리 가운데 n 째 여러길 성분의 여러길 채널 상수, T_m 은 m 째 무리의 도착시간, $T_{m,n}$ 은 m 째 무리 첫 여러길 성분에서 왔을 때 n 째 여러길 성분의 도착시간이다.

여러길 채널 상수 $U_{m,n}$ 은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$U_{m,n} = X_{m,n} V_m W_{m,n}. \quad (3)$$

여기서, $X_{m,n}$ 은 신호가 반사되면 위상이 바뀔 수 있음을 나타내는 확률변수이고 같은 확률로 +1과 -1이며, V_m 은 m 째 무리의 채널 감쇄 상수, $W_{m,n}$ 은 m 째 무리 가운데 n 째 여러길 성분의 채널 감쇄 상수이다. 채널 감쇄 상수의 곱 $V_m W_{m,n}$ 은 로그 정규분포를 따르고, 무리들의 도착시간 $\{T_m\}$ 과 여러길 성분들의 도착시간 $\{T_{m,n}\}$ 은 포아송 과정이다⁹⁾. 첫째무리의 도착시간 T_0 과 m 째 첫째 여러길 성분의 도착시간 $T_{m,0}$ 을 0이라 두면, 무리사이 도착시간 $S_m = T_m - T_{m-1}$ 의 확률

밀도함수는

$$f_{S_m}(t) = \alpha_c e^{-\alpha_c t}, \quad t \geq 0 \quad (4)$$

이고 여러길 성분사이 도착시간 $S_{m,n} = T_{m,n} - T_{m,n-1}$ 의 확률밀도함수는

$$f_{S_{m,n}}(t) = \alpha_r e^{-\alpha_r t}, \quad t \geq 0 \quad (5)$$

이다. 여기서, α_c 는 무리의 도착률이고, α_r 은 여러길 성분의 도착률이다.

2.3 수신기 모형

여러길 잡음 덧셈꼴 잡음에서 이진 위상 변조와 시간 뒹 수열을 쓴 초광대역 다중 접속 시스템을 생각하자. 초광대역 다중접속 시스템은 대역을 넓게 쓰므로 다른 시스템의 협대역, 광대역 간섭을 받을 수 있지만, 그런 간섭의 영향은 이 논문에서 고려하지 않는다.

바라는 쓰는 이를 첫째 쓰는 이라 두면, 받은 신호 $r(t)$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} r(t) &= s_i^{(1)}(t) * h(t) + w(t) + n(t), \\ &= \theta b_i^{(1)} \sum_{j=0}^{N_i-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} U_{m,n} \\ &\quad \cdot q(t - jT_f - c_j^{(1)}T_c - T_m - T_{m,n}) \\ &\quad + n'(t). \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, *은 곱셈 연산, $w(t)$ 는 다중접속 간섭, $n(t)$ 는 평균이 0인 채널 (흰빛) 잡음, $n'(t) = w(t) + n(t)$ 는 전체 간섭이다. (다중접속 간섭, $w(t)$ 를 평균이 0인 덧셈꼴 흰빛 잡음이라 두면, $w(t)$ 와 $n(t)$ 의 합 $n'(t)$ 도 평균이 0인 덧셈꼴 흰빛 잡음으로 모형화할 수 있다.)

받은 신호 $r(t)$ 는 나눌 수 있는 여러길 성분 MN 개로 이루어져있고, 모두갈퀴수신기를 (all rake receiver) 쓰면 이 여러길 성분을 이상적으로 결합할 수 있다. 그런데, 대역이 넓을수록 나눌 수 있는 여러길 성분이 늘어나는데 초광대역 다중접속 시스템은 대역을 넓게 쓰므로 모두갈퀴수신기에는 정합여파기가 매우 많이 필요하다. 뿐만 아니라, 실제로 갈퀴수신기를 만들 때에는 전력소비문제, 설계의 복잡성, 채널추정 때문에 여러길 성분을 모두 쓸 수 없다. 이런 까닭으로 나눌 수 있는 여러길 성분 가운데 일부만 쓰는 갈퀴수신기를 생각한다.

여러길 성분 가운데 일부만 쓰는 갈퀴수신기에는

고른갈퀴수신기와 (selective rake receiver) 부분갈퀴수신기가 (partial rake receiver) 있다³⁾. 고른갈퀴수신기는 여러길 성분 가운데 여러길 채널 상수 크기가 가장 큰 L 개를 골라 이를 결합한다. 이 갈퀴수신기는 가지 L 개를 좋게 쓰지만, 그 전에 여러길 성분을 모두 추정해야한다. 부분갈퀴수신기는 수신기에 먼저 다른 신호부터 차례로 L 개를 결합하므로 고른갈퀴수신기와 견주어 보았을 때 성능은 떨어지지만, 채널 크기를 고르는 장치가 없으므로 열개가 간단하다.

이 논문에서는 잡음이 충격성일 때 고른갈퀴수신기와 부분갈퀴수신기의 성능을 살펴 보고자 한다. 이제 [10]에서와 같이 모든 가지의 여러길 채널상수 $\{U_{m,n}\}$ 와 도착시간 $\{T_m\}$, $\{T_{m,n}\}$ 를 정확히 추정했다고 두면, j 째 프레임에서 l 째 가락 정합여파기를 거친 결과는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} R_{jl} &= \int_{jT_f}^{(j+1)T_f} r(t)q(t - c_j^{(1)}T_c - t_{jl})dt, \quad (7) \\ &= u_{jl}\theta b_i^{(1)} + N_{jl}. \end{aligned}$$

여기서, $N_{jl} = \int_{jT_f}^{(j+1)T_f} n'(t)q(t - c_j^{(1)}T_c - t_{jl})dt$ 는 정합여파기 출력의 잡음 성분이다. 식 (7)에서, 고른갈퀴수신기일 때에는, u_{jl} 은 j 째 프레임에서 $\{U_{m,n}\}$ 가운데 l 째 큰 순서통계량의^{[11], [12]} 추정 값이고 t_{jl} 은 $\{T_m + T_{m,n}\}$ 에서 그 도착시간의 추정 값이며, 부분갈퀴수신기일 때에는, t_{jl} 은 j 째 프레임에서 $\{T_m + T_{m,n}\}$ 가운데 l 째 작은 순서통계량의 추정 값이고 u_{jl} 은 $\{U_{m,n}\}$ 에서 그 여러길 채널 상수의 추정 값이다.

갈퀴수신기가 프레임마다 굳은 판정을 내린다면 j 째 프레임에서는 아래와 같은 가설검정문제를 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_0 : R_{jl} &= -u_{jl}\theta + N_{jl}, \\ H_1 : R_{jl} &= u_{jl}\theta + N_{jl}, \quad l=0, \dots, L-1. \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, H_i 는 $s_i^{(1)}(t)$, $i=0,1$ 을 보냈을 때의 가설이다.

III. 충격성 환경에서의 갈퀴수신기

3.1 결정 규칙

이 절에서는 잡음이 충격성일 때 갈퀴수신기의

일개를 얻는다. 가설 (8)에서 가장 비슷한 결정 기준을 쓰면, 아래와 같이 j 째 프레임에서 가설 H_i 의 결정 영역을 얻을 수 있다.

$$D_i^{ML} = \{x : p_{\mathcal{R}}(x|s_i^{(1)}, \theta) \geq p_{\mathcal{R}}(x|s_k^{(1)}, \theta), \forall i \neq k\}. \quad (9)$$

여기서, $p_{\mathcal{R}}(x|s_i^{(1)}, \theta)$ 는 j 째 프레임에서 $s_i^{(1)}(t)$ 를 보내고 그 신호 세기가 θ 일 때 $\mathcal{R} = (R_{j0}, R_{j1}, \dots, R_{j, L-1})$ 의 조건부 확률밀도함수이고, $x = (r_{j0}, r_{j1}, \dots, r_{j, L-1})$ 이다.

한편, [13]에서 제안한 준최적 가장 비슷한 결정 기준에서는 가설 H_i 의 결정 영역을 아래와 같이 두면, 신호 세기가 0에 가까울 때, 잘못확률을 가장 작게 한다.

$$D_i^{S-ML} = \left\{ x : \frac{d}{d\theta} p_{\mathcal{R}}(x|s_i^{(1)}, \theta) \Big|_{\theta=0} \geq \frac{d}{d\theta} p_{\mathcal{R}}(x|s_k^{(1)}, \theta) \Big|_{\theta=0}, \forall i \neq k \right\}. \quad (10)$$

여기서, 초광대역 다중 접속시스템은 저전력 시스템이므로 약한 신호에서 최적 성능을 보이는 준최적 갈퀴수신기가 매우 쓸모가 있다는 것을 새겨두자.

3.2 충격성 환경에서의 결정 규칙

식 (9)와 (10)을 바탕으로 잡음 분포가 정해졌을 때 갈퀴수신기의 결정 규칙을 얻어보자. 잡음 성분 $\{N_{ji}\}_{i=0}^{L-1}$ 이 서로 독립이고 분포가 같은 대칭 알파 안정분포를 따른다고 두자. 대칭 알파 안정분포는 여러 환경에서 충격성 잡음을 정확히 모형화한다고 알려져 있다⁶⁾. 평균이 0인 대칭 알파 안정분포의 확률밀도 함수는 아래와 같다.

$$f_{N_{ji}}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\gamma^{1/\alpha}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{k!} \Gamma(\alpha k + 1) \cdot \sin\left(\frac{k\alpha\pi}{2}\right) \left(\frac{|x|}{\gamma^{1/\alpha}}\right)^{-\alpha k - 1}, & 0 < \alpha \leq 1, \\ \frac{1}{\pi\alpha\gamma^{1/\alpha}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!} \Gamma\left(\frac{2k+1}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{x}{\gamma^{1/\alpha}}\right)^{2k}, & 1 \leq \alpha \leq 2. \end{cases} \quad (11)$$

여기서, $\gamma > 0$ 는 대칭 알파 안정분포의 퍼짐매개변수, $0 < \alpha \leq 2$ 는 대칭 알파 안정분포의 꼬리가 얼마나 무거운 지를 나타내는 특성지수이다. 특성지수 α 가 작은 값일수록 꼬리는 더 무겁다. 한편,

$\alpha = 1$ 일 때, (11)의 두 무한급수는 아래와 같은 코쉬 확률밀도함수를 나타낸다⁷⁾.

$$f_{N_{ji}}(x) = \frac{\gamma}{\pi(x^2 + \gamma^2)}. \quad (12)$$

그리고, $\alpha = 2$ 일 때 (11)의 둘째 무한급수는 아래와 같은 정규 확률밀도함수임을 보일 수 있다.

$$f_{N_{ji}}(x) = \frac{1}{2\sqrt{\gamma\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\gamma}\right). \quad (13)$$

정규잡음일 때에는 ($\alpha = 2$) (9) 또는 (10)을 쓰면 아래를 얻을 수 있다.

$$\sum_{j=0}^{L-1} u_{ji} r_{ji} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} 0. \quad (14)$$

H_1
 H_0

식 (14)를 바탕으로 하는 갈퀴수신기는 정합여파기 출력에 여러길 채널상수를 곱한 뒤 선형 결합을 하는데, 이는 최대비 결합이라고 (maximal ratio combining: MRC) 알려져 있다. 이 결합방법을 쓰면 정규잡음에서 신호대잡음비를 가장 높이 할 수 있다.

코쉬잡음일 때 ($\alpha = 1$) (9)를 써서 최적 결정 규칙을 얻으면

$$\sum_{j=0}^{L-1} \ln\left(\frac{(r_{ji} + u_{ji}\theta)^2 + \gamma^2}{(r_{ji} - u_{ji}\theta)^2 + \gamma^2}\right) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} 0 \quad (15)$$

H_1
 H_0

이고, (10)을 써서 준최적 결정 규칙을 얻으면

$$\sum_{j=0}^{L-1} \frac{u_{ji} r_{ji}}{r_{ji}^2 + \gamma^2} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} 0 \quad (16)$$

H_1
 H_0

이다. 식 (15)를 바탕으로 하는 갈퀴수신기는 (코쉬 최적 갈퀴수신기) 신호세기 θ 를 추정해야하지만, (16)을 바탕으로 하는 갈퀴수신기는 (코쉬준최적 갈퀴수신기) θ 를 추정하지 않아도 된다. 그 까닭으로 코쉬준최적 갈퀴수신기는 코쉬최적 갈퀴수신기와 견주어 열개가 더 간단하다. 뒤에서 코쉬최적 갈퀴수신기와 코쉬준최적 갈퀴수신기의 성능 차이가 무시할 수 있게 작다는 것을 보일 것이다.

정규최적 갈퀴수신기와는 달리 충격성 환경에 알맞게 만든 갈퀴수신기에서는 관측들이 비선형과정을

거친 뒤 더해진다. 코쉬최적 갈퀴수신기의 비선형과정은 (15)에서 볼 수 있듯이 $\ln\left(\frac{(r_{ji} + u_{ji}\theta)^2 + \gamma^2}{(r_{ji} - u_{ji}\theta)^2 + \gamma^2}\right)$ 이고, 코쉬준최적 갈퀴수신기의 비선형과정은 (16)에서 볼 수 있듯이 $\frac{u_{ji}r_{ji}}{r_{ji}^2 + \gamma^2}$ 이다. 이 비선형과정은 강인 신호 검파 이론에서 알려진 것처럼 충격성을 띠는 잡음의 영향을 줄여서 충격성 환경에서 검파기의 성능을 좋게 한다^[11]. 코쉬환경에 알맞게 만든 갈퀴수신기를 정규최적 갈퀴수신기와 견주었을 때 퍼짐 매개변수 γ 를 추정해야하는데, 이는 대칭 알파 안정분포의 표본 평균과 표본 분산을 써서 쉽게 추정할 수 있다^[14]. 코쉬환경에 알맞게 만든 검파기들은 여러 충격성 환경에서 쓸만한 성능 특성을 내므로 이 논문에서는 코쉬환경에 알맞게 만든 갈퀴수신기들을 다룬다.

일반화된 정규분포, 일반화된 코쉬분포, t -분포, 로지스틱 분포에서 최적 갈퀴수신기와 준최적 갈퀴수신기의 비선형과정을 표 1에 보였는데, 이 분포들의 확률밀도함수는 각각 아래와 같다^[7].

$$f_{GG}(x) = \frac{k}{2A_G(k)\Gamma(1/k)} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{|x|}{A_G(k)}\right)^k\right\}, \quad k > 0, \quad (17)$$

$$f_{CC}(x) = \frac{\bar{B}_c(k, v)}{\bar{D}_c^{v+1/k}(x)}, \quad k > 0, \quad v > 0, \quad (18)$$

$$f_T(x) = \frac{\Gamma((n+1)/2)}{\sqrt{\pi n}\Gamma(n/2)} \cdot \left(1 + \frac{x^2}{n}\right)^{-(n+1)/2}, \quad n > 0, \quad (19)$$

$$f_L(x) = \frac{\rho e^{-\rho x}}{(1 + e^{-\rho x})^2}, \quad \rho > 0. \quad (20)$$

식 (17)-(20)에서, $A_G(k) = \sqrt{\frac{\sigma_G^2 \Gamma(1/k)}{\Gamma(3/k)}}$, $\Gamma(a) = \int_0^\infty x^{a-1} e^{-x} dx$ 는 감마 함수, $\bar{B}_c(k, v) = \frac{kv^k \Gamma(v+1/k)}{2A_G(k)\Gamma(v)\Gamma(1/k)}$, $\bar{D}_c(x) = 1 + \frac{1}{v} \left\{\frac{|x|}{A_G(k)}\right\}^k$, σ_G^2 은 분산을 나타낸다. 일반화된 정규 확률밀도함수 (17)은 $k=1$ 일 때 아래와 같은 겹지수 (라플라스) 확률밀도함수이다.

$$f_D(x) = \frac{\lambda}{2} e^{-\lambda|x|}, \quad \lambda > 0. \quad (21)$$

IV. 모의 실험

대칭 알파 안정분포는 $\alpha < 2$ 일 때 분산이 무한하므로 이 잡음을 다룰 때에는 신호대잡음비는 쓸모가 없고 대신 기하학적 신호대잡음비를 (geometric SNR: G-SNR) 쓴다^[15]. 기하학적 신호대잡음비는 정보를 가진 신호와 대칭 알파 안정 잡음사이의 상대적인 크기를 나타내는데, 이때 대칭 알파안정 변수의 기하학적 전력 S_0 은 아래와 같이 뜻매김한다.

$$S_0 = \frac{(C_g \gamma)^{1/\alpha}}{C_g}. \quad (22)$$

여기서, $C_g = \exp\left\{\lim_{s \rightarrow \infty} \left(\sum_{z=1}^s \frac{1}{z} - \ln s\right)\right\} \approx 1.78$ 이다. 이를 바탕으로 기하학적 신호대잡음비는 아래와 같이 둔다.

$$G-SNR = \frac{1}{2C_g} \left(\frac{\theta}{S_0}\right)^2. \quad (23)$$

잡음이 정규 잡음이면 ($\alpha=2$), 기하학적 신호대잡음비가 표준 신호대잡음비와 같다는 것을 새겨두자. 감쇄는 충분히 느려 여러 데이터가 같은 채널을

표 1. 여러 분포에서 비선형과정 (sgn(·)는 부호함수).

확률분포	최적 갈퀴수신기	준최적 갈퀴수신기
일반화된 정규분포	$ r_{ji} + u_{ji}\theta ^k - r_{ji} - u_{ji}\theta ^k$	$u_{ji}r_{ji}^{k-1} \text{sgn}(r_{ji})$
일반화된 코쉬분포	$\ln\left(\frac{vA_G^k(k) + r_{ji} + u_{ji}\theta ^k}{vA_G^k(k) + r_{ji} - u_{ji}\theta ^k}\right)$	$\frac{u_{ji}r_{ji}^{k-1} \text{sgn}(r_{ji})}{vA_G^k(k) + r_{ji} ^k}$
t -분포	$\ln\left(\frac{(r_{ji} + u_{ji}\theta)^2 + n}{(r_{ji} - u_{ji}\theta)^2 + n}\right)$	$\frac{u_{ji}r_{ji}}{r_{ji}^2 + n}$
로지스틱 분포	$\ln\left(\frac{e^{\rho\theta u_{ji}} + e^{-\rho r_{ji}}}{1 + e^{-\rho(r_{ji} - u_{ji}\theta)}}\right)$	$u_{ji} \left(\frac{1 - e^{-\rho r_{ji}}}{1 + e^{-\rho r_{ji}}}\right)$

거친다고 두자. 고른갈퀴수신기와 부분갈퀴수신기의 성능을 몬테카를로 모의실험으로 견주어본다. 참고 문헌 [9]에 설명된 채널 모형 1을 바탕으로 비트 오류마다 2.5×10^6 번 거듭하는 모의실험을 거쳐 그 결과를 그렸다. 모의실험에서 대칭 알파 안정분포를 따르는 잡음 표본 $\{N_{ij}\}_{i=0}^{L-1}$ 은 아래와 같이 얻었다.

$$\gamma^{\frac{1}{\alpha}} \frac{\sin(\alpha)}{(\cos A)^{1/\alpha}} \left(\frac{\cos[(1-\alpha)A]}{B} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \quad (24)$$

여기서, A 는 $(-\pi/2, \pi/2)$ 에 고르게 퍼져 있는 확률변수, B 는 평균이 1인 지수 확률변수이고^[7], $\gamma=1$ 로 두었다.

4.1 충격성 환경에서 고른갈퀴수신기의 성능

대칭 알파 안정분포 잡음 환경에서 정규최적 고른갈퀴수신기, 코쉬최적 고른갈퀴수신기, 코쉬준최적 고른갈퀴수신기의 성능을 그림 1-3에 보였다. 기하학적 신호대잡음비가 작을 때, 코쉬최적 고른갈퀴수신기와 코쉬준최적 고른갈퀴수신기의 성능은 거의 같다. 정규잡음일 때를 ($\alpha=2$) 빼고는 코쉬환경에 알맞게 만든 고른갈퀴수신기들이 정규최적 고른갈퀴수신기보다 성능이 더 좋다. 잡음 환경의 충격성이 커지면 (α 가 작아지면) 코쉬환경에 알맞게 만든 고른갈퀴수신기들과 정규최적 고른갈퀴수신기의 성능 차이가 더 뚜렷해진다.

고른갈퀴수신기들은 심벌마다 보내는 펄스 수 N_s 가 늘어날수록 성능이 더 좋아지고 (그림 1과 2), 정규잡음일 때에는, 가락 수가 많을수록 성능이 더 좋다 (그림 1). 가락 수가 늘어날수록, 코쉬 환경에 알맞게 만든 고른갈퀴수신기들의 성능은 잡음 환경에 관계없이 성능이 나아지지만 (그림 1-3) 정규최적 고른갈퀴수신기는 잡음이 충격성이면 성능이 떨어진다 (그림 2와 3). 이는 충격성 환경에서 크기가 매우 큰 관측을 신호와 잡음이 섞여있다고 보는 것보다 잡음만 있다고 보는 것이 더 바른 것이기 때문이다^[11]. 곧, 코쉬환경에 알맞게 만든 고른갈퀴수신기들은 충격성 잡음이 들어왔을 때 그 영향을 줄여서, 성능이 좋다. 하지만, 정규최적 고른갈퀴수신기는 크기가 큰 관측들을 비선형 과정없이 받아들이므로 충격성 환경에서 성능이 떨어진다.

4.2 충격성 환경에서 부분갈퀴수신기의 성능

대칭 알파 안정분포 잡음 환경에서 정규최적 부분갈퀴수신기, 코쉬최적 부분갈퀴수신기, 코쉬준최적

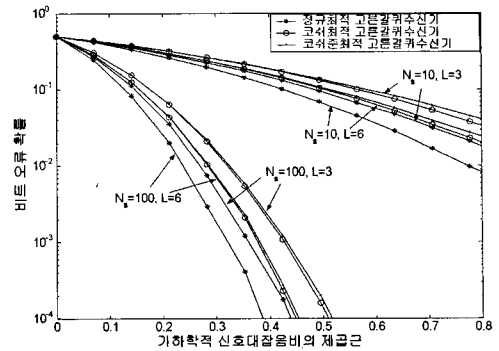


그림 1. 정규 환경에서 $L=3$ 과 6일 때, 정규최적 고른갈퀴수신기, 코쉬최적 고른갈퀴수신기, 코쉬준최적 고른갈퀴수신기의 성능.

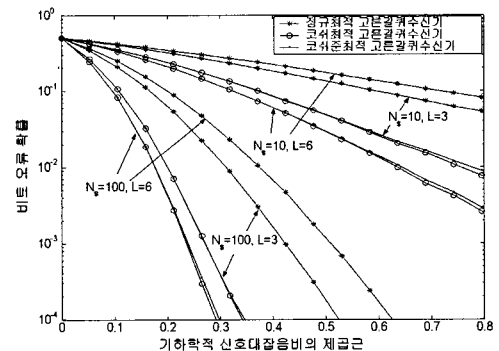


그림 2. 코쉬 환경에서 $L=3$ 과 6일 때, 정규최적 고른갈퀴수신기, 코쉬최적 고른갈퀴수신기, 코쉬준최적 고른갈퀴수신기의 성능.

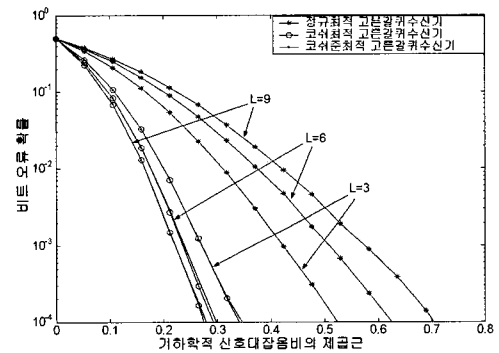


그림 3. 코쉬 환경에서 $N_s=100$ 일 때, $L=3, 6, 9$ 인 정규최적 고른갈퀴수신기, 코쉬최적 고른갈퀴수신기, 코쉬준최적 고른갈퀴수신기의 성능.

부분갈퀴수신기의 성능을 그림 4-6에 보였다. 부분갈퀴수신기들은 두가지 성능특성을 빼고는 그림 1-3에서 보인 고른갈퀴수신기들의 성능 특성과 거의 같다. 첫째로, 고른갈퀴수신기들에 견주어 부분갈퀴수신기들은 가락 수 영향을 적게 받는다 (그림 4-6). 둘째로, 코쉬환경에 알맞게 만든 고른갈퀴수신기들

과 다르게 코쉬환경에 알맞게 만든 부분갈퀴수신기들은 정규잡음에서 정규최적 부분갈퀴수신기와 성능이 거의 같다 (그림 4와 6). 이는 부분갈퀴수신기에서 정합여파기의 출력 $\{r_{ji}\}$ 이 고른갈퀴수신기의 출력보다 충분히 작아서 $\frac{r_{ji}u_{ji}}{r_{ji}^2+1} \approx r_{ji}u_{ji}$ 이라고 볼 수 있기 때문이다.

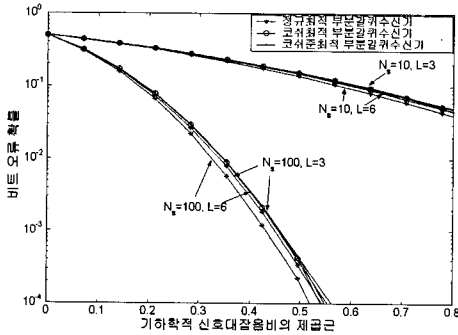


그림 4. 정규 환경에서 $L=3$ 과 6일 때, 정규최적 부분갈퀴수신기, 코쉬최적 부분갈퀴수신기, 코쉬준최적 부분갈퀴수신기의 성능.

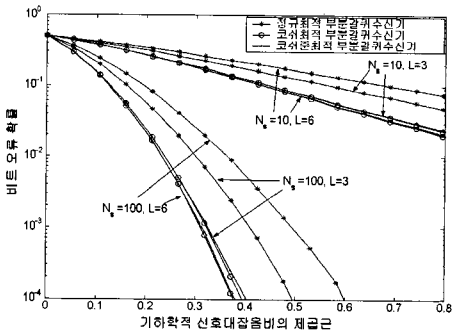


그림 5. 코쉬 환경에서 $L=3$ 과 6일 때, 정규최적 고른갈퀴수신기, 코쉬최적 고른갈퀴수신기, 코쉬준최적 고른갈퀴수신기의 성능.

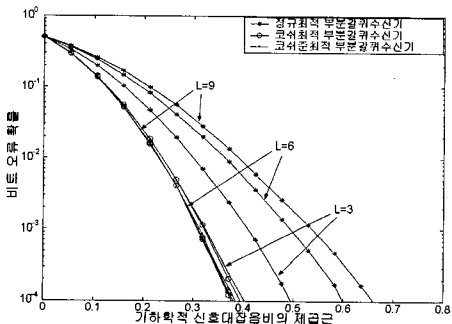


그림 6. 코쉬 환경에서 $N_s=100$ 일 때, $L=3, 6, 9$ 인 정규최적 부분갈퀴수신기, 코쉬최적 부분갈퀴수신기, 코쉬준최적 부분갈퀴수신기의 성능.

4.3 고른갈퀴수신기와 부분갈퀴수신기의 차이

정규환경에서 정규최적 고른갈퀴수신기가 정규최적 부분갈퀴수신기보다 성능이 좋다고 알려져 있다 [3]. 하지만, 잡음이 충격성일 때에는 정규최적 고른갈퀴수신기가 정규최적 부분갈퀴수신기보다 성능이 떨어진다. 정규최적 고른갈퀴수신기는 정규최적 부분갈퀴수신기보다 충격성 채널 잡음의 영향을 더 받은 관측들을 고르기 때문이다. 하지만 앞에서 말했듯이, 코쉬환경에 알맞게 만든 고른갈퀴수신기는 가락마다 있는 비선형과정이 충격성 채널 잡음의 영향을 줄여서 정규 환경에서 뿐만 아니라 충격성 환경에서도 부분갈퀴수신기보다 성능이 더 좋다.

V. 맺음말

잡음이 충격성일 때, 가장 비슷함을 바탕으로 최적 갈퀴수신기를 얻었고, 준최적 가장 비슷함을 써서 준최적 갈퀴수신기도 얻었다. 준최적 갈퀴수신기는 신호세기를 추정할 필요가 없으므로 최적 갈퀴수신기와 견주었을 때 열개가 더 간단하다. 모의실험으로 충격성 환경에 알맞게 만든 갈퀴수신기가 충격성 환경일 때 정규최적 갈퀴수신기보다 성능이 더 좋음을 보였고, 준최적 갈퀴수신기는 최적 갈퀴수신기와 견주어 열개가 간단함에도 성능이 거의 같다는 것을 보였다. 충격성 환경에서 가락 수가 늘어날수록 코쉬환경에 알맞게 만든 갈퀴수신기들은 성능이 좋아지지만 정규최적 갈퀴수신기는 성능이 떨어지는 것을 보였다. 코쉬환경에 알맞게 만든 고른갈퀴수신기들은 코쉬환경에 알맞게 만든 부분갈퀴수신기들보다 성능이 늘 좋지만, 정규최적 고른갈퀴수신기는 정규최적 부분갈퀴수신기보다 충격성 환경에서 성능이 뒤진다는 것도 함께 보였다.

참고 문헌

- [1] 양석철, 신요안, "실내 무선 환경에서 PN부호 기반 시간 도약 시퀀스를 이용하는 BPM UWB 다원 접속 시스템의 성능 분석," 한국통신학회논문지, 29권, 187-198쪽, 2004년 2월.
- [2] V. Lottici, A. Andrea, and U. Mengali, "Channel estimation for ultra-wideband communications," *IEEE J. Select. Area Comm.*, vol. 20, pp. 1638-1645, Dec. 2002.
- [3] A. F. Molisch, M. Z. Win, and J. H. Winters, "Reduced-complexity transmit/receive-diver-

city systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 51, pp. 2729-2738, Nov. 2003.

[4] B. Hu and N. C. Beaulieu, "Accurate evaluation of multiple-access performance in TH-PPM and TH-BPSK UWB systems," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 52, pp. 1758-1766, Oct. 2004.

[5] G. A. Tsihrintzis and C. L. Nikias, "Incoherent receiver in alpha-stable impulsive noise," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 43, pp. 2225-2229, Sep. 1995.

[6] C. L. Nikias and M. Shao, *Signal Processing with Alpha-Stable Distributions and Applications*, Wiley, 1995.

[7] 박철훈, 송익호, 남동경, 확률과정, 생능출판사, 2004.

[8] 김인중, 이주미, 최상원, 박소령, 송익호, "충격성 잡음의 이동 평균 모형에서 약신호 검파," 한국통신학회논문지, 30권, 523-531쪽, 2005년 6월.

[9] A. F. Molisch, J. R. Foerster, and M. Pendergrass, "Channel models for ultra-wideband personal area networks," *IEEE Wireless Comm.*, vol. 10, pp. 14-21, Dec. 2003.

[10] 김용석, 서성진, 황금찬, "비동기 DS-CDMA 시스템에서 RAKE 수신기를 채용한 적응형 CM 배열 안테나," 한국통신학회논문지, 29권, 601-610쪽, 2004년 5월.

[11] I. Song, J. Bae, and S. Y. Kim, *Advanced Theory of Signal Detection*, Springer-Verlag, 2002.

[12] 박소령, 권형문, 배진수, 최상원, 이주미, 송익호, "신호 검파 문제에 쓰는 모수와 비모수 검정 통계량 사이의 상관관계수," 한국통신학회논문지, 30권, 541-550쪽, 2005년 6월.

[13] 박소령, 구진규, 오종호, 권형문, 송익호, "약한 다진 신호에 알맞은 결정 기준: 1부. 결정 기준과 결정 영역," 한국통신학회논문지, 30권, 쪽, 2005년 9월.

[14] R. Kapoor, A. Banerjee, G. A. Tsihrintzis, and N. Nandhakumar, "UWB radar detection of targets in foliage using alpha-stable clutter models," *IEEE Trans. Aerosp., Electron. Systems*, vol. 35, pp. 819-834, July 1999.

[15] T. C. Chuah, B. S. Sharif, and O. R. Hinton, "Nonlinear decorrelator for multiuser detection in non-Gaussian impulsive environments," *Electron. Lett.*, vol. 36, pp. 920-922, May 2000.

김 병 수 (Byoung Soo Kim)

준회원



2003년 2월 고려대학교 전기 전자
전파공학부 공학사
2005년 2월 한국과학기술원 전
자전산학과 공학석사
2005년 3월~현재 한국과학기술
원 테크노경영대학원 박사과정
<관심분야> 이동통신, 통신정책

과 경영

최 상 원 (Sang Won Choi)

준회원



2002년 2월 고려대학교 전기 전
자 전파공학부 공학사
2004년 2월 한국과학기술원 전
자전산학과 공학석사
2004년 3월~현재 한국과학기술
원 전자전산학과 박사과정
<관심분야> 이동통신, 통계학적

신호처리, 검파와 추정

권 형 문 (Hyoungmoon Kwon)

준회원



2000년 2월 연세대학교 기계전
자공학부 전기전자전공 공학사
2002년 3월 한국과학기술원 전
자전산학과 공학석사
2002년 3월~현재 한국과학기술
원 전자전산학과 박사과정
<관심분야> 이동통신, 통계학적

신호처리, 검파와 추정

배 진 수 (Jinsoo Bae)

종신회원

한국통신학회 논문지 제30권 6C호 참조

송 익 호 (Ickho Song)

종신회원

한국통신학회 논문지 제30권 5C호 참조