論文2002-39TC-2-2

주파수선택적 감쇄 채널에서 부호순위 통계량을 쓴 부호 획득 방법

(A code acquisition method using signed-rank statistics in frequency-selective channels)

金 洪 吉 *, 鄭 昌 溶 **, 宋 翊 鎬 **, 權 炯 文 **, 金 容 晳 *

(Hong Gil Kim, Chang Yong Jung, Iickho Song, Hyoungmoon Kwon, and Yong Serk Kim)

요 약

이 논문에서는 주파수선택적 라이시안 감쇄 채널에서 부호순위를 바탕으로 한 비모수 검파기를 쓰는 직접수열 부호분할다중접속시스템의 의사잡음 부호획득 방법을 다룬다. 먼저 국소 최적 순위 검파기를 얻고, 근사점수함수를 쓴 국소 준최적 순위 검파기와 k차 고친 부호순위 검파기를 제안한다. 직렬 두 우물기법과 혼합 병렬 두 우물기법에 평균 일정오경보확률 추정기를 쓴 제곱합 검파기, 고친 부호 검파기, 국소 준최적 순위 검파기, k차 고친 부호순위 검파기를 쓴 것을 견주어 본다. 국소 준최적 순위 검파기와 k차 고친 부호순위 검파기가 평균 일정오경보확률 추정기를 쓴 제곱합 검파기보다 성능이 더 낫다는 것을 모의 실험으로 보인다.

Abstract

In this paper, signed-rank based nonparametric detectors are used for direct sequence code division multiple access pseudo-noise code acquisition systems in frequency-selective Rician fading channels. We first derive the locally optimum rank detector, and then propose the locally suboptimum rank (LSR) and k-th order modified signed-rank (MSR_k) detectors using approximate score functions. We compare the serial and hybrid parallel double-dwell schemes using the LSR and MSR_k detectors with those using the conventional squared-sum (SS) using the cell averaging constant false alarm rate processor and modified sign detectors. From the simulation results, it is shown that the LSR and MSR_k detectors perform better than the SS detector using the cell averaging constant false alarm rate processor.

I. 머 릿 말

직접수열 부호분할다중접속 시스템에서 근본적인 한 계 하나는 동기화 시간, 곧 확산 의사잡음 (pseudo-noise) 수열과 받은 의사잡음 수열을 정렬할 때까지 걸리는 시간이다. 일반적으로 동기화 과정은 둘로 나눌 수 있는데, 그 둘은 부호획득과 (code acquisition: 대략적으로 정렬하는 것) 추적이다 (tracking: 정확하게 정렬하는 것). 이 논문에서는 부호획득문제를 생각한다 [1,2].

부호획득방법은 직렬, 혼합 병렬, 병렬 방법으로 나눌 수 있다. 직렬탐색방법은 굳은모가 (hardware) 간단하지만 의사잡음 수열의 주기가 길 때는 획득시간이 많이 걸린다. 직렬탐색방법은 다시 곧은줄(straight-line), 확장 창문 (expanding window), Z탐색 방법으로 나눌 수 있다[3]. 병렬탐색방법은 획득시간이 가장 적게 걸리

* 正會員, 三星電子 通信研究所
(Telecommunication R&D Center Samsung Electronics Co., Ltd.)
** 正會員, 韓國科學技術院 電子電算學科
(Department of Electrical Engineering and Computer Science Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))
接受日字:2001年1月31日, 수정완료일:2002年1月10日

지만 수열 주기에 비례하여 굳은모가 복잡해진다[4]. 혼합 병렬탐색방법은 이 둘 사이의 성능을 보인다[5].

모든 부호획득 수신기의 기본이 되는 장치는 결정을 내리는 장치 곧, 검파기이다. 이 논문에서는 위상이 알려져 있지 않을 때 네이만-피어슨 검파기를 생각한다. 이제까지의 모수 (parametric) 검파기에서는 검파기의 문턱값을 (threshold) 정할 때 시간을 따라 바뀌는 간섭의 분산을 추정해야만 한다. 그러나, 실제값과 그 추정값이 다르면 모수 검파기의 성능은 떨어질 수 있다[6]. 한편, [7]에서 제안한 비모수 (nonparametric) 검파기는 다중접속간섭아래에서의 의사잡음 부호획득 문제에 쓰일 수 있고 추정 과정 없이 문턱값을 정할 수 있다는 장점을 지니고 있지만, 부호 (sign) 통계량만을 썼기 때문에 최적 검파기보다 성능이 많이 떨어진다. 이 논문에서는 부호뿐만 아니라 순위 (rank) 통계량을 함께 쓴 비모수 검파기를 주파수 선택적 라이시안 감쇄 채널에서 직접수열 부호분할 다중접속 의사잡음 부호획득 시스템에 쓰는 것을 제안하고, 그 성능을 살펴본다.

Ⅱ. 시스템

먼저 주파수 선택적 라이시안 감쇄 채널 모형을 설명하고, 제안한 검파기의 검정통계량을 얻을 때 필요한 동상 (inphase) 성분과 직교상 (quadrature) 성분의 분포를 얻는다.

직접수열 부호분할다중접속방식에서 윗 이음에 (reverse link) 셀 마다 K_u사람이 있고, 반송파 위상과 시간 지연이 각각 독립이라고 둔다. 감쇄와 잡음이 없을 때, i째 쓰는이의 (user) 복소 수신 신호 $r_i(t)$는 다음과 같다.

$$r_i(t)=\sqrt{2E_i}c_i(t-\tau_i T_c)\exp\{j(\omega_o t+\phi_i)\}. \quad (1)$$

식 (1)에서, E_i는 i째 쓰는이의 칩 에너지이고,

$$c_i(t)=\frac{1}{\sqrt{T_c}}\sum_{n=-\infty}^{\infty}a_i(n)[U(t-nT_c)-U(t-(n+1)T_c)] \quad (2)$$

는 i째 쓰는이의 의사잡음 부호수열 파형이며, T_c는 칩시간이고, τ_i는 i째 쓰는이 의사잡음 부호수열의 시간 지연을 T_c로 나눈 값이며, ω_o는 반송파 각주파수이고, ϕ_i는 $[0,2\pi)$에 고르게 퍼진 i째 쓰는이의 위상이다. 식 (2)에서, $a_i(n)\in\{-1,+1\}$은 n째 칩시간에서 i째 쓰는이의 의사잡음 수열값이고, $U(t)$는 $t\geq 0$일 때 $+1$이고 그렇지 않으면 0인 단위계단함수이다. 첫째 쓰는이를 바라는 쓰는이라 (desired user) 둔다.

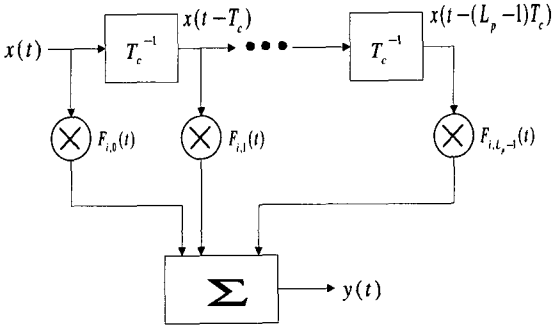

그림 1. 주파수 선택적 라이시안 감쇄 채널 모형
Fig. 1. A model of the frequency-selective Rician fading channel

이 논문에서, 채널은 주파수 선택적 라이시안 감쇄 채널로 두었다[4]. 여러길 감쇄 (multipath fading) 채널에 널리 쓰이는 모형은 그림 1에 나와있는 것처럼 한 칩만큼 씩 사이를 둔 지연모형이다. 여러 길은 L_p개로 나눌 수 있다고 두고, 길의 전력은 비율 μ로 지수적으로 줄어든다고 둔다.

이제, p째 길에서 i째 쓰는이의 감쇄 (fading) 과정 $F_{i,p}$는 다음과 같다.

$$F_{i,p}(t)=x_{i,p}(t)+jy_{i,p}(t). \quad (3)$$

여기서, $x_{i,p}(t)$와 $y_{i,p}(t)$는 각각 실수부와 허수부이고, 그 기대값은 다음과 같으며,

$$E\{x_{i,p}(t)\}=\begin{cases}A_s, & p=0,\\ 0, & p\neq 0,\end{cases} \quad (4)$$

$$E\{y_{i,p}(t)\}=0, \quad (5)$$

분산은 다음과 같다.

$$Var\{x_{i,p}(t)\}=Var\{y_{i,p}(t)\}=\sigma_f^2\exp\{-p\mu\}. \quad (6)$$

모든 길의 총 감쇄 전력을 1로 정규화하고, 퍼진 전력에 대한 퍼지지 않은 전력의 비율을 K_{sdr}로 쓰면, 퍼지지 않은 전력과 퍼진 전력은 각각 다음과 같다.

$$A_s^2=\frac{K_{sdr}}{1+K_{sdr}}, \tag{7}$$

$$2\sigma_I^2=\frac{C}{1+K_{sdr}}. \tag{8}$$

여기서, C는 다음과 같은 상수이다.

$$C=\frac{1-e^{-\mu}}{1-e^{-\mu L_p}}. \tag{9}$$

이때, $L_p=1$은 주파수 비선택적 감쇄채널을 뜻하고, $A_s=0$은 레일리 감쇄 채널을 뜻한다.

주파수 선택적 라이시안 감쇄 채널에서 수신 신호 $r(t)$는 다음과 같다.

$$r(t)=S(t)+I(t)+O(t)+N(t). \tag{10}$$

여기서, $S(t)$는 바라는 신호이고, $I(t)$는 같은 셀에 있는 다른 쓰는이의 간섭이며, $O(t)$는 다른 셀에 있는 쓰는이의 간섭이고, $N(t)$는 두 방향 전력밀도가 (two-sided power spectral density) $\sigma_N^2/2$인 덧셈꼴 정규잡음이다. 바라는 신호 $S(t)$는 다음과 같다.

$$S(t)=\sum_{p=0}^{L_k-1} Re\{F_{1,p}(t)\,r_1(t-pT_c)\}. \tag{11}$$

여기서, $Re\{x\}$는 x의 실수부이다. 셀 안 간섭 $I(t)$는 다음과 같다.

$$I(t)=\sum_{i=2}^{K_u}\sum_{p=0}^{L_k-1} Re\{F_{i,p}(t)\,r_i(t-pT_c)\}. \tag{12}$$

셀 사이 간섭을 생각할 때, 바라는 쓰는이의 기지국과 간섭자의 기지국에서 받은 에너지 차이를 생각해야 한다. 셀은 여섯모 모양이라 두고, 다른 셀 간섭은 간섭 셀의 첫째 계층에서만 (first layer) 일어난다고 둔다: 그러면, 다른 셀 간섭 $O(t)$는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$O(t)=\sum_{i=K_u+1}^{7K_u}\left(\frac{r_{m,i}}{r_{o,i}}\right)^{\frac{x}{2}}\sum_{p=0}^{L_k-1} Re\{F_{i,p}(t)\,r_i(t-pT_c)\}. \tag{13}$$

여기서, $r_{m,i}$는 i째 다른 셀 간섭자와 기지국 사이의 거리이고, $r_{o,i}$는 i째 다른 셀 간섭자와 바라는 기지국 사이의 거리이다. 이 거리는 관찰기간동안 바뀌지 않고, 전력 손실은 거리의 네제곱에 비례한다고 둔다 ($x=4$).

이제, j째 표본의 동상성분과 직교상 성분은 각각 다음과 같다.

$$X_j^I=\int_{t_j-T_c}^{t_j} r(t)c_1(t-\hat{\tau}_1T_c)\sqrt{2}\cos\omega_o t dt, \tag{14}$$

$$X_j^Q=\int_{t_j-T_c}^{t_j} r(t)c_1(t-\hat{\tau}_1T_c)\sqrt{2}\sin\omega_o t dt. \tag{15}$$

여기서, $\hat{\tau}_1$은 수신기에서 만든 역확산 의사잡음 수열의 시간지연을 T_c로 나눈 값이고, $t_j=t_0+jT_c$이다. 또, t_0는 처음시간이고 (initial time) j는 정수이다. 그러면, 검정통계량 X_j^I와 X_j^Q의 분포는 (부록 1)

$$X_j^I\sim\begin{cases}N(\sqrt{E_1}\{\cos\phi_1 x_{1,r}(t_j)-\sin\phi_1 y_{1,r}(t_j)\},\sigma_T^2), & r=0,1,\cdots,L_p-1\text{일 때},\\ N(0,\sigma_T^2), & \text{그밖}.\end{cases} \tag{16}$$

$$X_j^Q\sim\begin{cases}N(\sqrt{E_1}\{-\sin\phi_1 x_{1,r}(t_j)-\cos\phi_1 y_{1,r}(t_j)\},\sigma_T^2), & r=0,1,\cdots,L_p-1\text{일 때},\\ N(0,\sigma_T^2), & \text{그밖}.\end{cases} \tag{17}$$

여기서, $\sigma_T^2=\sigma_I^2+\sigma_O^2+\sigma_N^2$이고 $r=\hat{\tau}_1-\tau_1$이다. 또 σ_I^2은 같은 셀 간섭의 분산이고, σ_O^2은 다른 셀 간섭의 분산이며, $N(a,b)$는 평균이 0이고 분산이 b인 정규분포를 나타낸다.

이제 의사잡음 부호획득문제를 생각한다. 곧은 줄 직렬 의사잡음 부호획득기법을 생각해보자. 수신기에서 만든 의사잡음 부호수열을 써서, 동상 성분과 직교상 성분 X_j^I와 $X_j^Q, j=1,2,\cdots,N$을 얻고, 검정통계량을 (test statistic) 계산하여 그 값을 문턱값과 견주어 본다. 여기서, N은 부분상관주기이다 (partial correlation period). 검정통계량이 문턱값보다 크면, 수신기에서 만든 의사잡음 수열이 받은 의사잡음 부호수열과 gT_c시간안에 동기가 맞추어졌다고 보고 획득을 끝내고 추적을 한다. 그렇지 않으면, 의사잡음 부호수열을 ΔT_c만큼 왼쪽으로 움직인 뒤, 검정통계량과 문턱값을 견주어 보는 과정을 되풀이한다. 여기서, Δ는 칩 양자화 계수라 (quantization factor) 부른다 ($\Delta\le g$). 이 탐색과정은 검정통계량이 문턱값보다 클 때까지 계속한다. 부호추적을 실패하면 탐색과정을 다시 시작한다. 이 논문에서는 $g=\Delta=1$라 둔다.

의사잡음 부호획득문제는 이진 가설 검정 문제로 생각할 수 있다: 곧, 관측 자료 $X^I=(X_1^I,X_2^I,\cdots,X_N^I)$와 $X^Q=(X_1^Q,X_2^Q,\cdots,X_N^Q)$를 써서 아래와 같은 귀무 (null) 가설 H와 대립 (alternative) 가설 K 가운데 하나를 고르게 된다.

$$H:\ |\tau_1-\hat{\tau}_1|\ge 1, \tag{18}$$

$$K:\ |\tau_1-\hat{\tau}_1|<1. \tag{19}$$

Ⅲ. 국소 최적 검파기의 검정통계량

앞에서 얻은 j째 표본의 동상 성분과 직교상 성분의 분포를 써서 국소 최적 (locally optimum) 검파기의 검정통계량을 얻는다.

먼저, X_j^I와 X_j^Q를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$X_j^I = \theta\{x_{1,r}(t_j)\cos\phi - y_{1,r}(t_j)\sin\phi\} + W_j^I, \quad (20)$$

$$X_j^Q = \theta\{-x_{1,r}(t_j)\sin\phi - y_{1,r}(t_j)\cos\phi\} + W_j^Q. \quad (21)$$

여기서, $\theta=\sqrt{E_1}$, $\phi=\phi_1$, W_j^I와 W_j^Q는 상관이 없는 (uncorrelated) 동상 잡음성분과 직교상 잡음성분이고 그 공통 확률분포는 평균이 0이고 분산이 σ_T^2인 정규분포이다.

이제, X_j^I와 X_j^Q의 결합확률밀도함수를 $f(\theta,j)$라 하자. 그러면,

$$f(\theta,j) = f_W(x_j^I - \theta s_j a^T) f_W(x_j^Q - \theta s_j b^T). \quad (22)$$

여기서, $s_j=(x_{1,r}(t_j), y_{1,r}(t_j))$, $a=(\cos\phi, -\sin\phi)$, $b=(-\sin\phi, -\cos\phi)$이고 x^T는 x의 전치행렬이다 (transpose). 한편, $\{(X_j^I, X_j^Q)\}_{j=1}^N$의 원소들이 서로 독립이라고 두면, 동상과 직교상 관측자료 $2N$개 $\{X_i^I, X_i^Q\}$, $i=1,\cdots,N$의 결합확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f_{X^I,X^Q}(x^I, x^Q) = E\left\{\prod_{j=1}^N f(\theta,j)\right\}. \quad (23)$$

그런데, 귀무가설은 대립가설에서 $\theta=0$일 때이므로, 아래와 같은 가설 검정 문제로 생각할 수 있다.

$$H: \quad \theta = 0, \quad (24)$$

$$K: \quad \theta > 0. \quad (25)$$

이 장에서는 국소 최적 검파기를 생각한다[8]. 국소 최적 검파기 검정통계량은 일반적으로 다음과 같이 얻는다.

$$T_{LO}(x^I, x^Q) = \frac{\left.\frac{d^\nu f_{X^I,X^Q}(x^I, x^Q)}{d\theta^\nu}\right|_{\theta=0}}{f_{X^I,X^Q}(x^I, x^Q)|_{\theta=0}}. \quad (26)$$

여기서, ν는 $\theta=0$일 때 $f_{X^I,X^Q}(x^I, x^Q)$의 도함수 가운데에서 처음으로 0이 아닌 것이 나오는 차수이다. 위를 계산하면 아래 국소 최적 검파기 검정통계량을 얻는다 (부록 2).

$$T_{LO}(x^I, x^Q) = \sum_{i=1}^N \{h(x_i^I) + h(x_i^Q)\} + \sum_{i=1}^N \sum_{j\neq i}^N J_0(w_m|i-j|T_c) \times \{g(x_i^I)g(x_j^I) + g(x_i^Q)g(x_j^Q)\}. \quad (27)$$

여기서, $h(x) = f_W''(x)/f_W(x)$, $g(x) = -f_W'(x)/f_W(x)$, $J_0(x)$는 1종 0차 베셀함수이고, $\omega_m = \omega_o v/c$이다. 또 v는 바라는 쓰는이의 이동속도이고 c는 빛의 속도이다. 이제, $h(x) = (x^2-\sigma_T^2)/\sigma_T^4$과 $g(x) = x/\sigma_T^2$를 (27)에 넣은 뒤 정리하면, 다음을 얻는다.

$$T_{LO}(X^I, X^Q) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N J_0(w_m|i-j|T_c)(X_i^I X_j^I + X_i^Q X_j^Q). \quad (28)$$

그런데, $v=0$일 때 (관찰 주기 NT_c동안 일정한 감쇄), (28)은 이제까지 쓰인 제곱합 검파기의 검정통계량이 된다:

$$T_{SS}(X^I, X^Q) = \left(\sum_{i=1}^N X_i^I\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N X_i^Q\right)^2. \quad (29)$$

국소 최적 검파기 (28)은 모수 검파기이므로 문턱값을 얻으려면 추정과정이 필요하다. 이 추정이 잘못되었을 때 성능이 나빠질 수 있다. 따라서, 다음 장에서는 추정과정없이 문턱값을 얻을 수 있는 비모수 검파기를 제안한다.

Ⅳ. 국소 최적 순위 검파기의 검정통계량

앞에서 얻은 동상 성분과 직교상 성분의 분포를 써서 국소 최적 순위 (locally optimum rank) 검파기를 유도한다. 또한, 국소 최적 순위 검파기를 점근 근사한 (asymptotic approximation) 국소 준최적 (suboptimum) 순위 검파기를 유도한다. 다음으로 k조각 선형근사를 한 k차 고친 부호 순위 (k-th order modified signed-rank) 검파기를 유도한다. 이 검파기는 성능이 앞의 두 검파기와 거의 같으면서도 계산량이 매우 작다는 장점이 있다.

먼저, 부호 $Z_j^I = sgn(X_j^I)$들의 벡터를 부호벡터 $Z^I=(Z_1^I, Z_2^I, \cdots, Z_N^I)$로, 집합 $|X^I| = \{|X_1^I|, |X_2^I|, \cdots, |X_M^I|\}$의 원소들을 크기 순으로 늘어놓을 때 $|X_j^I|$의 순위값 (크

기순위) Q_j^I로 크기순위벡터를 (magnitude rank vector) $Q^I=(Q_1^I, Q_2^I, \cdots, Q_N^I)$라 두자. 여기서, $sgn(x)$는 부호함수이고 $x\geq 0$일 때 $+1$이고, 그렇지 않으면 -1이다. 그리고, $|X^I|_{[j]}$는 집합 $|X^I|$의 j째 작은 원소를 나타내고, 같은 방식으로 Z^Q, $Q^Q, |X^Q|_{[j]}$를 정의한다.

이제, 귀무가설과 대립가설에서 Q^I, Q^Q, Z^I, Z^Q의 이산 결합확률질량함수를 $p(q^I, q^Q, z^I, z^Q|H)$와 $p(q^I, q^Q, z^I, z^Q|K)$라 하면 이 들은 각각 다음과 같다.

$$H: p(q^I, q^Q, z^I, z^Q|H) = \Pr\{Q^I=q^I, Q^Q=q^Q, Z^I=z^I, Z^Q=z^Q|H\} = \frac{1}{(2^N N!)^2}, \tag{30}$$

$$K: p(q^I, q^Q, z^I, z^Q|K) = \int_B f_{X^I,X^Q}(x^I, x^Q)dx^I dx^Q. \tag{31}$$

여기서, $B=\{(x^I, x^Q)|Q^I=q^I, Q^Q=q^Q, Z^I=z^I, Z^Q=z^Q\}$이다. 일반화된 네이만-피어슨 정리를[8] 써서, 아래와 같이 국소 최적 순위 검파기의 검정통계량을 얻을 수 있다.

$$T_{LOR}(X^I, X^Q)=\frac{1}{p(q^I, q^Q, z^I, z^Q|H)}\lim_{\theta\to 0}\frac{d^v p(q^I, q^Q, z^I, z^Q|K)}{d\theta^v}. \tag{32}$$

이제,

$$\lim_{\theta\to 0}\frac{dp(q^I, q^Q, z^I, z^Q|K)}{d\theta} = \int_B \lim_{\theta\to 0}\frac{df_{X^I,X^Q}(x^I, x^Q)}{d\theta}dx^I dx^Q = 0. \tag{33}$$

이므로, $\theta=0$일 때 $p(q^I, q^Q, z^I, z^Q|K)$의 둘째 도함수를 아래와 같이 얻는다.

$$\lim_{\theta\to 0}\frac{d^2 p(q^I, q^Q, z^I, z^Q|K)}{d\theta^2} = \int_B \lim_{\theta\to 0}\frac{d^2 f_{X^I,X^Q}(x^I, x^Q)}{d\theta^2}dx^I dx^Q. \tag{34}$$

국소 최적 검파기의 검정통계량을 얻은 부록 2의 식 (75), (79), (84)와 σ_f^2과 A_s^2을 나타낸 식 (7), (8), 그리고 $g(x)=sgn(x)g(|x|)$, $h(|x|)=h(x)$를 써서, 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned}
\lim_{\theta\to 0}\frac{d^2 p(q^I, q^Q, z^I, z^Q|K)}{d\theta^2} &= \frac{2\sigma_f^2+A_s^2}{2}\sum_{i=1}^N\int_B\{h(x_i^I)+h(x_i^Q)\}\prod_{j=1}^N f(0;j)dx^I dx^Q \\
&+ \frac{2\sigma_f^2+A_s^2}{2}\sum_{i=1}^N\sum_{j\neq i}^N J_o(w_m|i-j|T_c) \\
&\int_B g(x_i^I)g(x_j^I)\prod_{k=1}^N f(0;k)dx^I dx^Q \\
&+ \frac{2\sigma_f^2+A_s^2}{2}\sum_{i=1}^N\sum_{j\neq i}^N J_o(w_m|i-j|T_c) \\
&\int_B g(x_i^Q)g(x_j^Q)\prod_{k=1}^N f(0;k)dx^I dx^Q \\
&= \frac{2\sigma_f^2+A_s^2}{2}\sum_{i=1}^N\int_B\{h(|x_i^I|)+h(|x_i^Q|)\}\prod_{j=1}^N f(0;j)dx^I dx^Q \\
&+ \frac{2\sigma_f^2+A_s^2}{2}\sum_{i=1}^N\sum_{j\neq i}^N J_o(w_m|i-j|T_c) \\
&\int_B Z_i^I Z_j^I g(|x_i^I|)g(|x_j^I|)\prod_{k=1}^N f(0;k)dx^I dx^Q \\
&+ \frac{2\sigma_f^2+A_s^2}{2}\sum_{i=1}^N\sum_{j\neq i}^N J_o(w_m|i-j|T_c) \\
&\int_B Z_i^Q Z_j^Q g(|x_i^Q|)g(|x_j^Q|)\prod_{k=1}^N f(0;k)dx^I dx^Q \\
&= \frac{2\sigma_f^2+A_s^2}{2(2^N N!)^2}\sum_{i=1}^N\{d(Q_i^I)+d(Q_i^Q)\}+\frac{2\sigma_f^2+A_s^2}{2(2^N N!)^2}\sum_{i=1}^N\sum_{j\neq i}^N \\
&\times J_o(w_m|i-j|T_c)\{Z_i^I Z_j^I c(Q_i^I, Q_j^I)+Z_i^Q Z_j^Q c(Q_i^Q, Q_j^Q)\}.
\end{aligned} \tag{35}$$

여기서, $c(i,j)=E_H\{g(|X|_{[i]})g(|X|_{[j]})\}$이고 $d(i)=E_H\{h(|X|_{[i]})\}$이다. $E_H\{\}$는 귀무가설에서의 평균을 뜻한다.

식 (35)를 $p(q^I, q^Q, z^I, z^Q|H)=(2^N N!)^{-2}$로 나누고 정리하면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned}
T_{LOR}(X^I, X^Q) &= \sum_{i=1}^N\{d(Q_i^I)+d(Q_i^Q)\} \\
&+ \sum_{i=1}^N\sum_{j\neq i}^N J_o(w_m|i-j|T_c) \\
&\times\{Z_i^I Z_j^I c(Q_i^I, Q_j^I)+Z_i^Q Z_j^Q c(Q_i^Q, Q_j^Q)\}.
\end{aligned} \tag{36}$$

그런데, $v=0$일 때 (관찰주기 NT_c 동안 일정한 감쇄), (36)은 다음과 같은 국소 최적 순위 검파기의 검정통계량이 된다.

$$\begin{aligned}
T_{LOR}(X^I, X^Q) &= \sum_{i=1}^N\{d(Q_i^I)+d(Q_i^Q)\} \\
&+ \sum_{i=1}^N\sum_{j\neq i}^N\{Z_i^I Z_j^I c(Q_i^I, Q_j^I) \\
&+ Z_i^Q Z_j^Q c(Q_i^Q, Q_j^Q)\}.
\end{aligned} \tag{37}$$

일반적으로 점수함수 (score function) $c(i,j)$와 $d(i)$의 값을 정확히 얻을 수 없으므로, 여기서는 f_W가 정규확률밀도함수일 때의 점수함수를 점근 근사한 것을

쓰기로 한다. 그러면, 근사점수함수 $\tilde{c}(i,j)$와 $\tilde{d}(i)$는 아래와 같다.

$$\tilde{c}(i,j)\approx \Phi^{-1}\left(\frac{N+i+1}{2N+2}\right)\Phi^{-1}\left(\frac{N+j+1}{2N+2}\right), \quad (38)$$

$$\tilde{d}(i)\approx\left\{\Phi^{-1}\left(\frac{N+i+1}{2N+2}\right)\right\}^2-1. \quad (39)$$

여기서, Φ^{-1}는 역표준정규누적분포함수이다 (inverse standard normal cumulative distribution function). 근사점수함수 $\tilde{c}(i,j)$와 $\tilde{d}(i)$를 쓰는 국소 준최적 순위 검파기의 검정통계량은 다음과 같다.

$$T_{LSR}(X^I,X^Q) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}J_o(w_{m|i-j|}T_c) \times\left\{Z_i^IZ_j^I\Phi^{-1}\left(\frac{N+Q_i^I+1}{2N+2}\right)\Phi^{-1}\left(\frac{N+Q_j^I+1}{2N+2}\right)\right. + \left. Z_i^QZ_j^Q\Phi^{-1}\left(\frac{N+Q_i^Q+1}{2N+2}\right)\Phi^{-1}\left(\frac{N+Q_j^Q+1}{2N+2}\right)\right\}. \quad (40)$$

한편, 비선형함수 Φ^{-1}대신 k조각 (k piece) 선형근사를 쓰는 k차 고친 부호순위 검파기 검정통계량은 다음과 같다.

$$T_{MSR_k}(X^I,X^Q) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}J_o(w_{m|i-j|}T_c) \times\{Z_i^IZ_j^If(Q_i^I)f(Q_j^I)+Z_i^QZ_j^Qf(Q_i^Q)f(Q_j^Q)\}. \quad (41)$$

여기서,

$$f(i)=a_i\times i+b_i, \quad (42)$$

$$(a_i,b_i)=\begin{cases}(a_1,b_1), & 0\le i\le c_1\text{일 때},\\ (a_2,b_2), & c_1<i\le c_2\text{일 때},\\ \vdots & \vdots\\ (a_k,b_k), & c_{k-1}<i\le N\text{일 때}\end{cases} \quad (43)$$

이고, $1\le k\le N$은 자연수, c_i들은 끝점들이고, $0<c_1<c_2<\cdots<c_{k-1}<N$이다. 특히, $k=1$일 때 (41)은 다음과 같은 1차 고친 부호순위 검파기의 검정통계량이 된다.

$$T_{MSR_1}(X^I,X^Q) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}J_o(w_{m|i-j|}T_c) \{Z_i^IZ_j^IQ_i^IQ_j^I+Z_i^QZ_j^QQ_i^QQ_j^Q\}. \quad (44)$$

그림 2는 $N=128$일 때 k조각선형근사와 ($k=1,4$) 비선형함수 Φ^{-1}를 나타낸다.

이제, { $T_m(X^I,X^Q), m=$국소 최적 검파기, 국소 최적 순위 검파기, 국소 준최적 순위 검파기, 그리고 k차 고친 부호순위 검파기}를 얻으면, 아래 식을 만족시키는 문턱값 λ_m과 확률화매개변수 (randomization parameter) γ_m을 정할 수 있다.

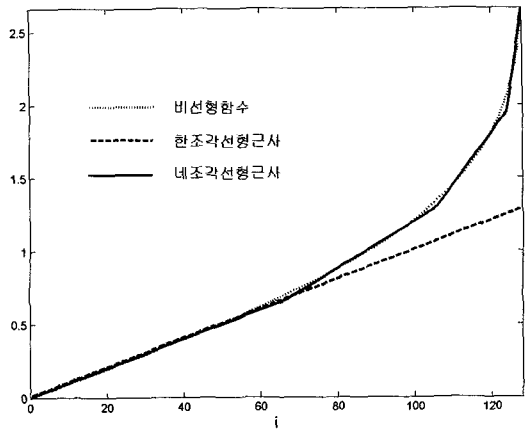

그림 2. $N=128$일 때 비선형함수 Φ^{-1}와 조각선형근사 ($k=1,4$)

Fig. 2. The nonlinearity function Φ^{-1} and piece-wise linear approximations ($k=1,4$), when $N=128$.

$$\Pr\{T_m(X^I,X^Q)>\lambda_m|H\}\le P_{FA}, \quad (45)$$

$$\gamma_m=\frac{P_{FA}-\Pr\{T_m(X^I,X^Q)>\lambda_m|H\}}{\Pr\{T_m(X^I,X^Q)=\lambda_m|H\}}. \quad (46)$$

여기서, $\lambda_m\ge 0$, $0\le\gamma_m<1$, P_{FA}는 오경보 (false alarm) 확률이다. 식 (45)와 (46)을 쓰면, 검파확률은 다음과 같다.

$$P_{D,m}=\Pr\{T_m(X^I,X^Q)>\lambda_m|K\} + \gamma_m\Pr\{T_m(X^I,X^Q)=\lambda_m|K\}. \quad (47)$$

V. 모의실험결과

직렬 또는 혼합 병렬 두 우물기법에 (double dwell) 이제까지의 검파기를 쓴 것과 제안한 검파기를 쓴 것을 몬테카를로 실험으로 견주어 본다. 획득까지 걸리는 시간, 곧 부호획득시간 T_{acq}를 측도로 써서 성능을 살펴보자.

1. 직렬 두 우물

이제까지의 검파기를 쓴 직렬 두 우물 기법과 제안한 검파기를 쓴 것을 견주어 본다. $v+2$상태 가운데에

는 귀무가설에 속하는 시간오차에 해당하는 상태가 $v-1$개 있고, 대립가설에 해당하는 상태, 그리고 획득상태와 오경보상태가 있다고 두자.

시간오차 $|\tau_1-\hat{\tau}_1|$가 고르게 퍼져있을 때, 평균부호획득시간 $E\{T_{acq}\}$는 다음과 같다[9].

$$E\{T_{acq}\}=[H'_D(1)+H'_M(1)+(v-1)H'_O(1)(1-\frac{H_D(1)}{2})]/H_D(1). \quad (48)$$

여기서, $H_D(z)$는 v상태에서 획득상태까지 가는 가지의 (branch) 이득이고, $H_M(z)$는 첫째 상태와 v째 상태 사이에 있는 가지의 이득이고, $H_O(z)$는 두 연속적인 상태 i와 $i+1, i=1,2,\cdots,v-1$사이에 있는 가지의 이득이다.

두 우물기법은 두 가지로 나뉜다. 그 첫째는 $A\times N_1$ 부분상관주기의 출력값을 가지고 한번에 결정하는 것이다. 여기서, N_1는 첫째 우물의 부분상관주기이다. 둘째는 연속적인 N_1 부분상관주기동안 A번 결정하는 것인데, A 가운데에서 검사값 B개가 문턱값을 넘으면 H_1을 고른다. 첫째기법은 성능이 더 낫고, 둘째기법은 더 간단하다[6]. 이 논문에서는 $A=4$, $B=2$이라고 둔다. 다음은 모의실험의 조건이다.

- 칩 길이 T_c: $1\mu s$
- 첫째 우물시간 t_d: $1\mu s$
- 부호수열길이 L: 32767 칩
- 첫째 우물의 부분상관길이 N_1: 64 칩
- 칩 양자화 계수 Δ: 1 ($g=1$이라 둠)
- 시간 오차 $|\tau_1-\hat{\tau}_1|$: (0, 32767)구간에서 고르게 퍼짐
- 벌점 시간 요소 (penalty time factor) K: 10^4
- 정규화된 나머지 이동 (residual shift) δ_1: 0

주파수 비선택적 레일리 감쇄채널을 ($L_p=1, A_s=0$) 생각하고 $E_i=0$ dB, $i=2,3,\cdots,K_u$라 둔다. 레일리 감쇄채널은 라이시안 감쇄채널의 특별한 때이므로, 첫째 모의실험 환경으로 레일리 감쇄채널을 선택하였다. 이제까지의 모수 검파기로는 제곱합 검파기를, 이제까지의 비모수 검파기로는 고친 부호 검파기를, 그리고 제안한 비모수 검파기로는 국소 준최적 순위 검파기와 1차 고친 부호순위 검파기를 쓴다. 이 논문에서는 제곱합 검파기의 두가지 상태를 생각한다. 첫째 상태는 간섭의 분산을 미리 알고 있는 것이고, 둘째는 제곱합 검파기가 간섭의 분산을 셀 평균 (cell averaging) 일정오경보확률 추정기로 추정하는 것이다. 평균 일정오경보확률 추정기는 주파수 비선택적 레일리 감쇄 채널과 주파수 선택적 라이시안 감쇄 채널에서 일정오경보확률 추정기들 가운데 가장 좋은 성능을 나타낸다고 알려져 있다[6]. 제곱합 검파기와 고친 부호 검파기의 검정통계량은 다음과 같다.

$$T_{SS}(X^I,X^Q)=(\sum_{i=1}^{N}X_i^I)^2+(\sum_{i=1}^{N}X_i^Q)^2, \quad (49)$$

$$T_{MS}(X^I,X^Q)=(\sum_{i=1}^{N}Z_i^I)^2+(\sum_{i=1}^{N}Z_i^Q)^2. \quad (50)$$

제곱합 검파기의 문턱값은 $\lambda_{ss}=-V_{ss}\ln P_{FA}$와 같이 간단한 형태로 얻을 수 있고, 고친 부호 검파기의 문턱값은 (45)와 (46)에서 얻을 수 있다. 여기서, $V_{ss}=N(N_o+\frac{2}{3}K_uE_o)$이다.

그림 3은 $P_{f_1}=10^{-2}, K_u=10, f_o=2GHz, v=60km/h$일 때 주파수 비선택적 레일리 감쇄채널에서 직렬 두 우물기법의 평균 부호획득시간을 나타낸다. 이 그림에서 한 점을 얻을 때마다 몬테카를로실험을 10,000번 거듭하였다. 이 그림에서 네모, 마름모, 동그라미, 별, 세

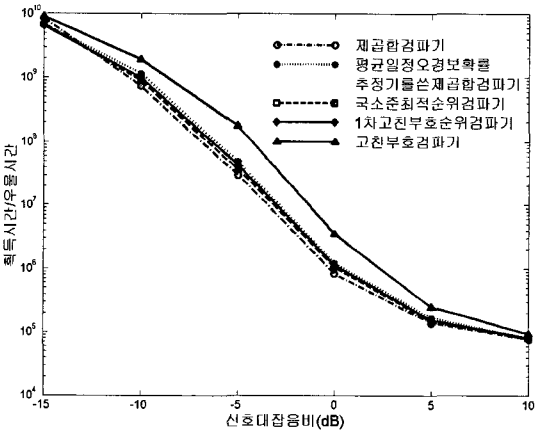

그림 3. 주파수 비선택적 레일리 감쇄채널에서 $P_{f_1}=10^{-2}, K_u=10, f_o=2GHz, v=60km/h$일 때 직렬 두 우물기법을 쓴 평균부호획득시간

Fig. 3. The mean code acquisition time of the serial double-dwell scheme in frequency-nonselective Rayleigh fading channels when $P_{f_1}=10^{-2}$, $K_u=10$, $f_o=2GHz$, and $v=60km/h$.

모는 각각 국소 준최적 순위 검파기, 1차 고친 부호순위 검파기, 최적 제곱합 검파기, 평균 일정오경보확률 추정기를 ($M=16$) 쓴 제곱합 검파기, 고친 부호 검파기를 나타낸다. 추정이 정확할 때 제곱합 검파기가 검파기들 가운데에서 가장 나은 성능을 보였다. 이는 다음과 같은 까닭에서이다. 주어진 조건에서는 (이동 속도가 그리 빠르지 않고, 부분 상관 주기의 길이가 그리 크지 않을 때) NT_c 동안 감쇄가 거의 일어나지 않으므로 제곱합 검파기는 국소 최적 검파기의 근사라고 볼 수 있다. 따라서, 분포를 안다고 둔 제곱합 검파기는 견주어 본 검파기 가운데 가장 성능이 좋다. 따라서 이 검파기는 성능의 위쪽 끝 (upper bound)을 보이고자 견주는 대상에 넣었다. 제안한 국소 준최적 순위 검파기와 1차 고친 부호순위 검파기는 고친 부호 검파기보다 2-3dB쯤 나은 성능을 보였고 평균 일정오경보확률 추정기를 쓴 제곱합 검파기보다 조금 더 나은 성능을 보였다.

2. 혼합 병렬 두 우물

혼합 병렬 두 우물기법의 평균 부호 획득시간을 얻으면 다음과 같다[5].

$$E\{T_{acq}\}=\frac{t_d}{P_D}\{1+AN_1(1-P_{m1})+KP_{F1}+(N_2-1)(1+KP_{F0}+ANP_{f10})\}. \quad (51)$$

여기서, P_{d1}은 첫째 우물에서 (first dwell) 검파확률이고, P_{d2}는 둘째 우물에서 (second dwell) 검파확률이며, $P_D=P_{d1}P_{d2}$이고, P_{m1}은 탐색방식에서 오류확률, 곧 올바른 부호 위상에 대응하는 결정 변수 가운데 하나가 주어진 상태에서 $(N_3N_1)/\Delta$ 결정 변수가 모두 λ_1보다 작을 조건부 확률이다. P_{f11}은 대립가설 상태에 해당하는 오경보확률이고 ($P_{f11}=1-P_{d1}-P_{m1}$), P_{f10}은 귀무가설 상태에 해당하는 오경보확률이며, P_{f2}는 둘째 우물에서 오경보확률이다. 그리고 $P_{F1}=P_{f11}P_{f2}$, $P_{F0}=P_{f10}P_{f2}$, K는 벌점시간을 (penalty time) T로 나눈 값이며, A는 결정횟수이고, N_2는 의사잡음 부호수열의 길이를 병렬검파기의 수로 나눈 값이다.

위를 바탕으로 아래 조건에서 모의실험한 결과를 살펴보자.

- 칩 길이 T_c: $1\mu s$
- 첫째 우물시간 t_d: $1\mu s$
- 부호수열길이 L: 32767 칩
- 첫째 우물 부분상관길이 N_1: 64 칩
- 병렬검파기수 $\frac{L}{N_2}$: 4
- 칩 양자화 계수. Δ: 1 ($g=1$이라 둠)
- 시간 오차 $|\tau_1-\hat{\tau}_1|$: (0, 32767)구간에서 고르게 퍼짐
- 벌점 시간 요소 K: 10^4
- 정규화된 나머지 이동 δ_1: 0

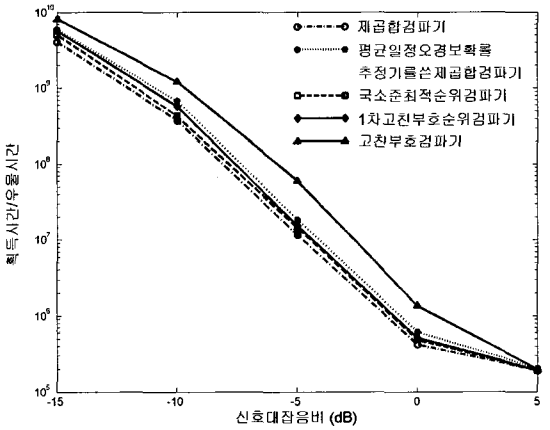

그림 4. 주파수 선택적 라이시안 감쇄채널에서 $P_{f_1}=10^{-2}$, $K_u=10$, $f_o=2GHz$, $L_p=3$, $v=60km/h$, $K_{sdr}=0dB$, $\mu=1$일 때 혼합 병렬 두 우물기법을 쓴 평균 부호획득시간

Fig. 4. The mean code acquisition time of the hybrid parallel double-dwell scheme in frequency-selective Rician fading channels when $P_{f_1}=10^{-2}$, $K_u=10$, $f_o=2GHz$, $L_p=3$, $v=60km/h$, $K_{sdr}=0dB$, and $\mu=1$

주파수 선택적 라이시안 감쇄채널을 생각하고, $L_p=3$, $K_{sdr}=0dB$, $\mu=1$이고, $E_i=0$ dB, $i=2,3,\cdots$, K_u라 둔다. 그림 4는 $P_{f_1}=10^{-2}$, $K_u=10$, $f_o=2GHz$, $v=60km/h$, $L_p=3$, $K_{sdr}=0dB$, $\mu=1$일 때, 주파수 선택적 라이시안 감쇄채널에서 혼합 병렬 두 우물기법의 평균 부호 획득 시간을 나타낸다. 이 그림에서 한점을 얻을 때마다 몬테 카를로실험을 10,000번 거듭하였다. 이 그림에서 네모, 마름모, 동그라미, 별, 세모는 각각 국소 준최적 순위 검파기, 1차 고친 부호순위 검파기, 최적 제곱합 검파기, 평균 일정오경보확률 추정기를

($M=16$) 쓴 제곱합 검파기, 고친 부호 검파기를 나타낸다.

그림 4에서 제안한 국소 준최적 검파기와 1차 고친 부호순위 검파기가 고친 부호 검파기보다 성능이 2-3dB쯤 더 낫고, 평균 일정오경보확률 추정기를 쓴 제곱합 검파기보다 성능이 더 낫다는 것을 알 수 있다.

Ⅵ. 맺 음 말

이 논문에서는 주파수 선택적 라이시안 감쇄 채널에서 부호순위 바탕 비모수 검파기를 직접수열 확산 대역 부호획득 시스템에 썼다. 먼저 국소 최적 순위 검파기를 얻고 근사점수함수를 쓴 국소 준최적 순위 검파기와 k차 고친 부호순위 검파기를 제안했다. 그리고 국소 최적 검파기를 얻었다. 이제까지의 평균 일정오경보확률 추정기를 쓴 제곱합 검파기와 고친 부호 검파기를 쓴 직렬, 혼합 병렬 두 우물기법과 제안한 국소 준최적 순위 검파기와 1차 고친 부호순위 검파기를 쓴 것을 견주어 보았다. 모의실험결과 제안한 국소 준최적 순위 검파기와 k차 고친 부호순위 검파기가 평균 일정오경보확률 추정기를 쓴 제곱합 검파기보다 더 나은 성능을 보인다는 것을 알 수 있었다.

부록 1. 주파수 선택적 라이시안 감쇄채널에서 통계량 X_j^I과 X_j^Q 유도

먼저, 다음과 같이 두자. 1) 감쇄는 한 칩시간동안 일정하고, 2) 받는이는 바라는 쓰는이와 칩동기가 맞추어져 있으며, 3) $K_u \gg 1$, 4) 전력조절이 가능하다. 이제, j 째 표본의 동상성분 X_j^I는 다음과 같다.

$$X_j^I = S_j + I_j + O_j + N_j. \tag{52}$$

여기서,

$$S_j = \int_{t_{j-T_c}}^{t_j} S(t) c_1(t-\widehat{\tau}_1 T_c)\sqrt{2}\cos\omega_o t dt \tag{53}$$

는 바라는 신호성분이고,

$$I_j = \int_{t_{j-T_c}}^{t_j} I(t) c_1(t-\widehat{\tau}_1 T_c)\sqrt{2}\cos\omega_o t dt \tag{54}$$

는 셀 안 (같은 셀) 간섭성분이고,

$$O_j = \int_{t_{j-T_c}}^{t_j} O(t) c_1(t-\widehat{\tau}_1 T_c)\sqrt{2}\cos\omega_o t dt \tag{55}$$

는 셀 밖 (다른 셀) 간섭성분이고,

$$N_j = \int_{t_{j-T_c}}^{t_j} N(t) c_1(t-\widehat{\tau}_1 T_c)\sqrt{2}\cos\omega_o t dt \tag{56}$$

는 덧셈꼴 흰빛정규잡음성분이다.

$$\begin{aligned} Re\{F_{i,p}(t) r_i(t-pT_c)\} &= \sqrt{2E_i} c_i(t-pT_c-\tau_i T_c) \\ &\times \{\cos(\omega_o t+\phi_i) x_{i,p}(t) \\ &- \sin(\omega_o t+\phi_i) y_{i,p}(t)\} \end{aligned} \tag{57}$$

이고, 바라는 신호성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_j = \sqrt{E_1} \sum_{p=0}^{L_p-1} \Big\{ &\cos\phi_1 \int_{t_{j-T_c}}^{t_j} x_{1,p}(t) c_1(t-pT_c-\tau_1 T_c) \\ &c_1(t-\widehat{\tau}_1 T_c) dt - \sin\phi_1 \int_{t_{j-T_c}}^{t_j} y_{1,p}(t) \\ &c_1(t-pT_c-\tau_1 T_c) c_1(t-\widehat{\tau}_1 T_c) dt \Big\}. \end{aligned} \tag{58}$$

대부분의 실제 응용에서, 감쇄는 칩 파형을 무시할 수 없는 영역에서 대략적으로 일정하게 고정된다. 그러므로, 감쇄는 한 칩시간동안 일정하다고 둘 수 있다. 그러면, S_j를 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_j = \sqrt{E_1} \sum_{p=0}^{L_p-1} &\int_{t_{j-T_c}}^{t_j} c_1(t-pT_c-\tau_1 T_c) c_1(t-\widehat{\tau}_1 T_c) dt \\ &\times \{\cos\phi_1 x_{1,p}(t_j) - \sin\phi_1 y_{1,p}(t_j)\}. \end{aligned} \tag{59}$$

받는이는 바라는 쓰는이와 칩동기를 맞추었다고 둔다. 식 (59)와 위 가정을 써서 S_j의 평균을 얻는다.

$$E\{S_j|\phi_1\} = \begin{cases} \sqrt{E_1}(\cos\phi_1 x_{1,r}(t_j) - \sin\phi_1 y_{1,r}(t_j)), & r=0,1,\cdots,L_p-1\text{일 때,} \\ 0, & \text{그밖.} \end{cases} \tag{60}$$

여기서, $r=\widehat{\tau}_1-\tau_1$이다.

셀 안 간섭성분은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} I_j = \sum_{i=2}^{K} \sqrt{E_i} \sum_{p=0}^{L_p-1} &\int_{t_{j-T_c}}^{t_j} c_i(t-pT_c-\tau_i T_c) c_1(t-\widehat{\tau}_1 T_c) dt \\ &\times \{\cos\phi_i x_{i,p}(t_j) - \sin\phi_i y_{i,p}(t_j)\}. \end{aligned} \tag{61}$$

여기서, $K_u \gg 1$일 때, I_j의 확률분포는 $N(0,\sigma_I^2)$라 할 수 있다.

$$\sum_{p=0}^{L_p-1} E\{x_{i,p}^2(t_j) + y_{i,p}^2(t_j)\} = 1, \tag{62}$$

$$E\left\{\left(\int_{t_{j-T_c}}^{t_j} c_i(t-pT_c-\tau_i T_c) c_1(t-\widehat{\tau}_1 T_c) dt\right)^2\right\} = \frac{2}{3} \tag{63}$$

이고, 셀 안 간섭성분의 분산은 다음과 같다.

$$\sigma_I^2=\frac{1}{3}\sum_{i=2}^{K_u}E_i. \tag{64}$$

전력제어를 하면 분산은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\sigma_I^2=\frac{1}{3}(K_u-1)E_o. \tag{65}$$

여기서, E_o는 다른 쓰는이의 전력이다.

셀 밖 간섭성분은 다음과 같다.

$$O_j=\sum_{i=K_u+1}^{7K_u}\left(\frac{r_{m,i}}{r_{o,i}}\right)^2\sqrt{E_i}\sum_{p=0}^{L_p-1}\int_{t_j-\tau_i}^{t_j}c_i(t-pT_c-\tau_iT_c)\,c_1(t-\hat{\tau}_1T_c)\,dt\times\{\cos\phi_i x_{i,p}(t_j)-\sin\phi_i y_{i,p}(t_j)\}. \tag{66}$$

$6K_u\gg 1$일 때, O_j의 확률분포는 $N(0,\sigma_O^2)$라 할 수 있다. 식 (62)와 (63)을 쓰면, 셀 밖 간섭성분의 분산은 다음과 같다.

$$\sigma_O^2=\frac{1}{3}\sum_{i=K_u+1}^{7K_u}E_iE\left\{\left(\frac{r_{m,i}}{r_{o,i}}\right)^4\right\}. \tag{67}$$

거리손실의 기대값 $E\left\{\left(\frac{r_{m,i}}{r_{o,i}}\right)^{\mu}\right\}$는 [11]에 나와 있다.

$$E\left\{\left(\frac{r_{m,i}}{r_{o,i}}\right)^{\mu}\right\}=\frac{1}{2\sqrt{3}}\int_{-1}^{1}\int_{-\frac{2}{\sqrt{3}}(1-\frac{|u|}{2})}^{\frac{2}{\sqrt{3}}(1-\frac{|u|}{2})}\left\{\frac{u^2+v^2}{(2+u)^2+v^2}\right\}^{\frac{\mu}{2}}dvdu. \tag{68}$$

여기서, $\mu=4$일 때 $E\{(r_{m,i}/r_{o,i})^4\}=0.0636$이다. 전력제어를 하면 분산은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\sigma_O^2=0.1272K_uE_o. \tag{69}$$

덧셈꼴 흰빛정규잡음성분의 분산은 쉽게 다음과 같이 얻는다.

$$\sigma_N^2=\frac{N_o}{2}. \tag{70}$$

식 (60), (65), (69), (70)을 쓰면 X_j^I의 분포를 다음과 같이 얻는다.

$$X_j^I\sim\begin{cases}N(\sqrt{E_1}\{\cos\phi_1x_{1,r}(t_j)-\sin\phi_1y_{1,r}(t_j)\},\sigma_T^2), & r=0,1,\cdots,L_p-1\text{일 때},\\ N(0,\sigma_T^2), & \text{그밖}.\end{cases} \tag{71}$$

여기서, $\sigma_T^2=\sigma_I^2+\sigma_O^2+\sigma_N^2$이다. 마찬가지로 X_j^Q의 분포를 얻는다.

$$X_j^Q\sim\begin{cases}N(\sqrt{E_1}\{-\sin\phi_1x_{1,r}(t_j)-\cos\phi_1y_{1,r}(t_j)\},\sigma_T^2), & r=0,1,\cdots,L_p-1\text{일 때},\\ N(0,\sigma_T^2), & \text{그밖}.\end{cases} \tag{72}$$

부록 2. 국소 최적 검파기의 검정통계량 유도

$\theta=0$일 때 $f_{X^I,X^Q}(x^I,x^Q)$의 첫째 도함수는 아래와 같이 늘 0이다.

$$\frac{df_{X^I,X^Q}(x^I,x^Q)}{d\theta}\Big|_{\theta=0}=E\left\{\sum_{i=1}^{N}f'(0;i)\prod_{j\neq i}^{N}f(0;j)\right\}=0. \tag{73}$$

여기서,

$$\begin{aligned}E\{f(0;i)\}&=E\left\{-s_ia^T\frac{df(0;i)}{dx_i^I}-s_ib^T\frac{df(0;i)}{dx_i^Q}\right\}\\&=0\end{aligned} \tag{74}$$

이다. $\theta=0$일 때 $f_{X^I,X^Q}(x^I,x^Q)$의 둘째 도함수는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\frac{d^2f_{X^I,X^Q}(x^I,x^Q)}{d\theta^2}\Big|_{\theta=0}&=E\left\{\sum_{i=1}^{N}(f''(0;i)\prod_{j\neq i}^{N}f(0;j)\right.\\&\quad\left.+f'(0;i)\sum_{j\neq i}^{N}f(0;j)\prod_{k\neq j,k\neq i}^{N}f(0;k))\right\}.\end{aligned} \tag{75}$$

$$\begin{aligned}f''(0;i)&=(s_ia^T)^2\frac{d^2f(0;i)}{dx_i^{I2}}+(s_ib^T)^2\frac{d^2f(0;i)}{dx_i^{Q2}}\\&\quad+(s_ia^T)(s_ib^T)\frac{d^2f(0;i)}{dx_i^Idx_i^Q}+(s_ia^T)(s_ib^T)\frac{d^2f(0;i)}{dx_i^Qdx_i^I},\end{aligned} \tag{76}$$

$$\begin{aligned}E\{(s_ia^T)^2\}&=E\{(s_ib^T)^2\}\\&=\frac{1}{2}E\{x_{1,0}^2(t_i)+y_{1,0}^2(t_i)\}\\&=\frac{1}{2}(2\sigma_f^2+A_s^2)\end{aligned} \tag{77}$$

이고,

$$E\{(s_ia^T)(s_ib^T)\}=0 \tag{78}$$

이다. 식 (75)의 첫째 항은 다음과 같다.

$$E\left\{\sum_{i=1}^{N}f''(0;i)\prod_{j\neq i}^{N}f(0;j)\right\}=\frac{1}{2}(2\sigma_f^2+A_s^2)\sum_{i=1}^{N}h(x_i^I)+h(x_i^Q)\prod_{j=1}^{N}f(0;j). \tag{79}$$

여기서,

$$h(x) = f_W''(x)\, f_W(x) \tag{80}$$

이다. 마찬가지로,

$$\begin{aligned} f(0;i)f(0;j) &= (s_i a^T)(s_j a^T)\frac{df(0;i)}{dx_i^I}\frac{df(0;j)}{dx_j^I} \\ &+ (s_i b^T)(s_j b^T)\frac{df(0;i)}{dx_i^Q}\frac{df(0;j)}{dx_j^Q} \\ &- (s_i a^T)(s_j b^T)\frac{df(0;i)}{dx_i^I}\frac{df(0;j)}{dx_j^Q} \\ &- (s_i b^T)(s_j a^T)\frac{df(0;i)}{dx_i^Q}\frac{df(0;j)}{dx_j^I}, \end{aligned} \tag{81}$$

$$\begin{aligned} E\{(s_i a^T)(s_j a^T)\} &= E\{(s_i b^T)(s_j b^T)\} \\ &= \frac{1}{2}E\{x_{1,0}(t_i)x_{1,0}(t_j) + y_{1,0}(t_i)y_{1,0}(t_j)\} \\ &= \frac{1}{2}(2\sigma_f^2 + A_s^2)J_0(w_m|i-j|T_c) \end{aligned} \tag{82}$$

이고,

$$\begin{aligned} E\{(s_i a^T)(s_j b^T)\} &= E\{(s_i b^T)(s_j a^T)\} \\ &= 0 \end{aligned} \tag{83}$$

이다. 식 (75)의 둘째 항은

$$\begin{aligned} & E\left\{\sum_{i=1}^{N} f(0;i)\sum_{j\neq i}^{N} f(0;j)\prod_{k\neq j,k\neq i}^{N} f(0;k)\right\} \\ &= \frac{1}{2}(2\sigma_f^2 + A_s^2)\sum_{i=1}^{N}\sum_{j\neq i}^{N} J_o(w_m|i-j|T_c) \\ &\times\ g(x_i^I)g(x_j^I) + g(x_i^Q)g(x_j^Q)\prod_{k=1}^{N} f(0;k). \end{aligned} \tag{84}$$

여기서, $J_0(x)$는 1종 0차 베셀함수이고, $\omega_m = \frac{\omega_o v}{c}$, $g(x) = -\frac{f_W'(x)}{f_W(x)}$이다. 또, v는 바라는 쓰는이의 이동속도이고, c는 빛의 속도이다. 식 (82)와 (83)은 [12]의 다음과 같은 결과로부터 얻을 수 있다.

$$E\{x_{1,0}(t_i)x_{1,0}(t_j)\} = E\{x_{1,0}^2(t_i)\}J_0(w_m|t_i - t_j|), \tag{85}$$

$$E\{y_{1,0}(t_i)y_{1,0}(t_j)\} = E\{y_{1,0}^2(t_i)\}J_0(w_m|t_i - t_j|), \tag{86}$$

$$E\{x_{1,0}(t_i)y_{1,0}(t_j)\} = 0. \tag{87}$$

식 (26), (79), (84)를 쓰고 정리하면 국소 최적 검파기의 검정통계량 (27)을 얻는다.

참 고 문 헌

[1] S.G. Glisic, T.J. Poutanen, W.W. Wu, G.V. Petrovic, and Z. Stefanovic, "New PN code acquisition scheme for CDMA networks with low signal-to-noise ratios", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 47, pp. 300-310, Feb. 1999.

[2] 윤석호, 윤형식, 송익호, 김선용, 이용업, "나머지 부호 위상차가 일으키는 시스템 성능변화를 줄이는 직접수열 부호분할 다중접속 부호획득방법", 대한전자공학회논문지, TC편, 제37권, 25-34쪽, 2000년 4월

[3] A. Polydoros and M.K. Simon, "Generalized serial search code acquisition: the equivalent circular state diagram approach", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 32, pp. 1260-1268, Dec. 1984.

[4] R.R. Rick and L.B. Milstein, "Parallel acquisition in mobile DS-CDMA systems", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 45, pp. 1466-1476, Nov. 1997.

[5] W. Zhuang, "Noncoherent hybrid parallel PN code acquisition for CDMA mobile communications", *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, Vol. 45, pp. 643-656, Nov. 1996.

[6] 김홍길, *직접수열 부호분할 다중 접속 시스템에서 강인 검파기를 쓴 의사잡음 부호획득기법*, 박사학위논문, 한국과학기술원, 대전, 2000년 8월

[7] H.G. Kim, I. Song, S.Y. Kim, and J. Lee, "PN code acquisition using nonparametric detectors in DS/CDMA systems", *Signal Process.*, Vol. 80, pp. 731-736, Apr. 2000.

[8] S.A. Kassam, *Signal Detection in Non-Gaussian Noise*, Springer-Verlag, New York, NY, 1988.

[9] A. Polydoros and C.L. Weber, "A unified approach to serial search spread-spectrum code acquisition-part I: general theory", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 32, pp. 542-549, May 1984.

[10] P.P. Gandhi and S.A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background", *IEEE Trans. Aerosp., Electr. Systems*, Vol. 24, pp. 427-445, July 1988.

[11] R.R. Rick and L.B. Milstein, "Parallel acquisition of spread-spectrum signals with antenna diversity", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, pp. 903-905, Aug. 1997.

[12] W.C. Jakes, Jr., *Microwave Mobile Communi-*

cations, John Wiley & Sons, New York, NY, 1974.

저 자 소 개

金 洪 吉(正會員)

1972년 7월 20일 태어남. 1995년 2월: 한양대학교 공과대학 전자통신공학과 공학사. 1997년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학석사. 2000년 8월: 한국과학기술원 전자전산학과 공학박사. 2000년 8월~현재: 삼성전자 통신연구소 책임연구원. <관심분야 : 검파, 부호획득, 이동통신>

宋 翊 鎬(正會員)

1960년 2월 20일 태어남. 1982년 2월, 1984년 2월: 서울대학교 전자공학과 공학사 (준최우등), 공학석사. 1985년 8월, 1987년 5월: 펜실베니아 대학교 전기공학과 공학석사, 공학박사. 1987년 3월~1988년 2월: 벨 통신연구소 연구원. 1988년 3월~현재: 한국과학기술원 전자전산학과 조교수, 부교수, 교수. 1995년 1월~2001년 12월: 한국통신학회 논문지 편집위원. 2000년 1월~2001년 12월: 대한전자공학회 논문지 편집위원. 1991년 11월, 1996년 11월: 한국통신학회 학술상 받음. 1993년 11월: 한국음향학회 우수연구상 받음. 1998년 11월, 2000년 11월: 한국통신학회 LG학술상; 모토롤라학술상 받음. 1999년 11월: 대한전자공학회 해동논문상 받음. 2000년 3월: 젊은 과학자상 받음. 대한전자공학회, 한국음향학회, 한국통신학회 평생회원; IEE 석학회원; IEEE 선임회원; IEE 공인기술사. <주관심분야 : 통계학적 신호처리와 통신이론, 신호검파와 추정, 이동통신>

鄭 昌 溶(學生會員)

1975년 2월 15일 태어남. 2000년 2월: 한양대학교 수학과 이학사. 2000년 3월~현재: 한국과학기술원 전자전산학과 석사과정. <관심분야 : 이동통신, 정보보호>

權 炯 文(學生會員)

1976년 4월 2일 태어남. 2000년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 전자공학전공 공학사. 2000년 3월~현재: 한국과학기술원 전자전산학과 석사과정. <관심분야 : 변복조이론, 오류정정부호>

金 容 晳(正會員)

1959년 8월 20일 태어남. 1983년 2월: 성균관대 전자공학과 공학사. 1983년 1월: 삼성전자 입사. 1991년 5월: 직무발명부문 '대통령상' 2000년 2월: 삼성그룹 기술상 '대상'. 2000년 4월: 정보통신의 날 '국무총리상'. 1998년 3월~2000년 2월: 성균관대 겸임교수. 2000년 3월~현재: 반도체설계교육센터 (한국과학기술원) 운영위원. 1998년 4월~현재: 삼성전자 통신연구소 수석연구원. <관심분야 : 단말모뎀개발, 이동통신, SOC 설계>