

잡음 전력 추정을 이용한 등화기 탭의 최적 선택 방법

정회원 성원진*, 신동준**

Optimum Selection of Equalizer Taps using Noise Power Estimation

Wonjin Sung*, Dong-Joon Shin** *Regular Members*

요 약

이동무선통신환경에서의 다중경로 레일레이 페이딩 채널은 선형 필터 모델로 나타내어 질 수 있고, 지연 경로의 특성에 따라 필터 탭 중 일부만이 수신기 설계에 있어 중요하게 고려될 수 있다. 지연경로를 나타내는 탭 계수의 크기에 따라 채널 등화기에서 선택적으로 탭을 사용함으로써 수신기의 복잡도를 감소시키고 사용 전력을 줄이는 효과를 가져오게 된다. 본 논문에서는 주어진 채널의 선형 필터 모델에서 최적의 방법으로 탭을 선택하는 방법을 제시하고, 기존의 방법과 비교하여 성능 향상을 보였다. 또한 잡음 전력 값에 대한 정보가 있는 경우, 제시된 방법은 CFAR (Constant False Alarm Rate) 판별의 장점을 가지게 됨을 보이고, 잡음 전력을 추정했을 시의 성능을 정확한 수식으로 유도하였다. 잡음 전력 추정을 위한 잡음 샘플 수를 증가시킴에 따라 빠른 속도로 최적 성능으로 수렴함을 유도된 수식과 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

ABSTRACT

Multipath Rayleigh fading channels for mobile radio transmission can be represented by the linear filter model, and depending on the delay path characteristics, only a selected number of taps may have significance in the receiver structure design. By using tap-selective equalization, reduction in both processing complexity and power consumption can be obtained. In this paper, we present an optimal tap selection method for a given channel model, and demonstrate the performance improvement over an existing method. We show the method performs the CFAR (Constant False Alarm Rate) detection when the noise power information is available, and derive exact expressions of the error probability for the case of noise power estimation. Using the derived formulas and simulation results, it is demonstrated that the error probability quickly approaches to the optimal performance as the number samples used for the noise power estimation increases.

I. 서론

이동무선통신채널에서는 단말수신기의 이동성 및 다중경로로 인한 페이딩과, 지연확산으로 인한 심벌 간 간섭이 흔히 나타나게 된다. 이러한 통신채널을 선형 필터 모델인 tapped-delay-line (TDL)^[1]으로 나타내었을 때, 각각의 탭 계수는 지연경로의 채널 응답성분을 표시하고, 통신환경의 특성에 따라 일부의 탭은 무시할 수 있을 정도의 작은 크기를 갖게

된다^{[2][3]}. 이와 같은 채널의 특성은 수신기 구조 설계에 이용될 수 있다. 특히 지연 경로들로 인한 심벌 간 간섭을 완화하기 위한 등화기 설계의 경우 실제로 존재하는 지연 성분에 해당하는 탭만을 이용함으로써 복잡도를 크게 줄일 수 있게 된다. 이와 같이 채널 특성에 대한 정보를 이용하여 수신기 설계를 최적화 하는 방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 선형 등화기에서 탭을 선택적으로 이용하는 방법이 제시되었으며^[4], 지연 탭의 크기가 작

* 서강대학교 전자공학과 디지털전송연구실 (wsung@sogang.ac.kr)

** 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 부호및정보이론연구실 (djsin@hanyang.ac.kr)

논문번호 : K01206-1008, 접수일자 : 2001년 10월 8일

은 경우 조건부 등화를 수행함으로써 수신기의 전력 소모 감소 및 성능향상을 얻는 연구 결과가 보고되었다^[5]. MLSE(Maximum-Likelihood Sequence Estimation) 등화의 경우도 탭 선택적인 Viterbi algorithm을 사용하여 수신기 복잡도 감소 효과를 얻을 수 있다^[6,7]. CDMA 시스템의 경우 Rake 수신기에서 탭 선택적 방법을 이용하여 얻어지는 성능 향상이 모의실험결과를 통해 알려져 있다^[8].

이들 언급된 연구 결과의 경우, 통신 채널의 특성을 이용하여 탭을 선택적으로 활용한 수신기의 구조의 특성 및 성능개선 정도에 대한 논의는 충분치 되어 있으나, 주어진 채널 모델에서 탭을 선택하는 최적의 방법을 제시하고 있지는 않다. 본 논문에서는, 최대유사도(Maximum Likelihood; ML) 최적화의 관점에서 유도되는 탭 선택 방법을 제시하고 선택의 오류확률을 계산하였다. 오류확률을 이용하여 ROC (Receiver Operating Characteristics)를 구하고, 논문 [9]에서 제시되었던 방법과 비교하여 얻어지는 성능 이득을 정량화 하였다. 또한 수신기의 잡음 전력이 알려져 있을 때, 제시된 방법이 CFAR (Constant False-Alarm Rate) 특성을 가지게 됨을 보인다. 특히 잡음 전력의 크기가 수신기에서 추정되는 경우의 성능을 분석하고, 추정에 사용된 잡음 샘플 개수로 표현되는 탭 선택 오류확률의 정확한 수식을 유도하였다. 잡음 샘플 개수가 늘어남에 따라 추정을 통한 탭 선택 방법이 최적 성능에 빠르게 수렴함을 보이고, 결과를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 채널 모델 및 문제 정의를 하고, 최적 탭 선택 방법 및 오류 확률을 제시하였다. III장에서 성능 평가와 기존 방법과의 비교를 하고, IV장에서 잡음 전력 추정시의 성능을 분석하였다. 끝으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 최적 탭 선택 방법

1. 채널모델 및 문제 정의

전송되는 심벌 시퀀스를 $\{a_j\}$ 로 나타내고 수신기에서 매 심벌 간격으로 샘플된 시퀀스를 $\{r_j\}$ 로 나타낼 때, 지연시간을 갖는 다중 경로 페이딩 채널은 다음과 같은 선형 필터 모델로 나타내어질 수 있다^[11].

$$r_j = \sum_{i=0}^{N-1} f_i a_{j-i} + n_j \quad (1)$$

여기서 N 은 채널 필터의 길이이고, $\{n_j\}$ 는 분산값

이 $\sigma^2 = (1/2)E\{|n_j|^2\}$ 인 백색 복소 가우시안 잡음 샘플 시퀀스이며, $\{f_i\}$ 는 필터 탭 계수이다. 셀룰러 통신과 같은 지상이동통신환경의 경우, 각각의 탭은 크기 $|f_i|$ 가 레일레이 분포를 따르는 복소 가우시안으로 모델 된다.

탭 f_i 의 평균전력은 크기 제곱의 기대값인 $c_i^2 = (1/2)E\{|f_i|^2\}$ 으로 표시되고, 채널환경에 따라 탭 중 일부는 무시할 정도의 작은 평균전력을 갖게 된다. 본 논문에서는 [2]등의 논문에서와 마찬가지로 수식 (1)의 채널 필터가 $c_i^2 = 0$ 의 평균전력을 갖는 “제로 탭 (zero tap)”과 $c_i^2 > 0$ 의 평균전력을 갖는 “비제로 탭 (nonzero tap)”으로 구성되어 있다고 모델하고, 각각의 비제로 탭은 독립적 복소 가우시안이라 가정한다.

본 논문에서 다루는 문제는 이와 같은 채널 모델 하에서 데이터 심벌과 훈련시퀀스(training sequence)로 구성된 버스트(burst)가 수신되었을 때, 채널의 제로 탭과 비제로 탭을 판별하는 최적의 방법을 찾고 판별의 오류확률을 구하는 것이다. 단, 제로 탭과 비제로 탭의 개수 및 비제로 탭의 평균전력은 수신기에 알려져 있지 않다. N 개의 탭 각각이 제로 탭 또는 비제로 탭일 수 있으므로, 비제로 탭 유무와 위치에 따라 총 2^N 개의 가설(hypothesis)을 만들 수 있다. 즉 H_0 는 모든 탭이 제로 탭일 경우, H_1 은 탭 f_0 를 제외한 모든 탭이 제로 탭일 경우 등을 표시하기로 하면 H_0, H_1, \dots, H_n 의 2^N 가지 가설을 세울 수 있다 ($n = 2^N - 1$). 수신 샘플 벡터 $r = [r_0 \ r_1 \ \dots \ r_{L-1}]^t$ 가 주어졌을 때, 최대유사도의 관점에서 최적인 가설 선택 방법은 유사도 함수(likelihood function)인 조건부 확률밀도함수 $p(r|H_k)$ 를 최대로 하는 H_k ($k=0, 1, \dots, n$)를 선택하는 것이다.

2. 유사도 함수와 최적화

가설 H_n 에 대한 유사도 함수 $p(r|H_n)$ 을 다음과 같이 구할 수 있다. N 개의 채널 탭 계수들로 구성되는 탭 벡터 $f = [f_0 \ f_1 \ \dots \ f_{N-1}]^t$ 는 N 차원 복소 가우시안 확률밀도함수를 따르고, 탭 평균전력 크기를 대각원소(diagonal element)로 갖는 행렬 $C = \text{diag}[c_0^2 \ c_1^2 \ \dots \ c_{N-1}^2]$ 를 이용하여 $p(f|H_n)$ 을 표현하면

$$p(f|H_n) = \frac{1}{(2\pi)^N \det[C]} e^{-\frac{1}{2} f^H C^{-1} f} \quad (2)$$

로 나타내어진다.

길이 $L+N-1$ 의 혼련시퀀스 $a_{-N+1}, a_{-N+2}, \dots, a_{L-1}$ ($|a_i|=1$) 중 연속된 L 개의 심벌을 나타내는 벡터 $a_i = [a_{-i} \ a_{-i+1} \ \dots \ a_{-i+L-1}]^t$ ($i=0, 1, \dots, N-1$)와 이들 벡터로 구성된 행렬 $A = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{N-1}]$ 를 정의하고, 잡음 샘플을 나타내는 벡터 $n = [n_0 \ n_1 \ \dots \ n_{L-1}]^t$ 를 사용하여 수식 (1)을 $r = Af + n$ 의 벡터 표현으로 전환할 수 있다. 가설 H_n 과 f 의 값이 주어진 조건하에서 수신 샘플 벡터 r 은 평균값이 Af 인 L 차원 복소 가우시안 분포를 따르고 조건부 확률밀도함수

$$p(r|f, H_n) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^L} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \|r - Af\|^2} \quad (3)$$

를 갖는다. 수식 (2)와 (3)을 이용하여 유사도함수 $p(r|H_n)$ 을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p(r|H_n) = \int p(r|f, H_n) p(f|H_n) df = \frac{\det[B^{-1}]}{(2\pi)^L \sigma^{2(L-N)} \det[C]} e^{-\frac{\|Bz\|^2}{2\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} z^H B^{-1} z}$$

여기서 벡터 z 와 행렬 B 는 각각 $z = A^H r$, $B = A^H A + \sigma^2 C^{-1}$ 로 정의되었고, 표기에서 지수부의 “ H ”는 Hermitian operator를 의미한다. 이 중 벡터 $z = [z_0 \ z_1 \ \dots \ z_{N-1}]^t$ 의 i 번째 원소 $z_i = a_i^H r$ 은 수신 샘플 벡터 r 과 혼련시퀀스 벡터 a_i 의 상관도 (correlation)를 나타낸다. 유사도 함수에 로그를 취하고 상수항을 제거함으로써 다음의 로그 유사도함수(log-likelihood function) U_n 을 얻는다.

$$U_n = c^H B^{-1} c + 2\sigma^2 \ln \left(\frac{\sigma^{2N} \det[B^{-1}]}{\det[C]} \right) \quad (4)$$

무선이동통신시스템의 버스트 일부로 쓰이는 혼련시퀀스는 채널에서 생기는 시간, 주파수 및 위상 오차 등을 추정하는 목적으로 쓰이며 그 중 시간 오차 추정의 목적을 위해서는 자기상관함수 (autocorrelation function) 특성이 매우 중요하다. 심벌 길이의 정수배 만큼 시간 오프셋이 있을 때 직교성(orthogonality)이 우수함, 즉 $a_i^H a_j \ll a_i^H a_i$ ($i \neq j$)의 조건을 만족하는 시퀀스가 일반적으로 선택되어 쓰이게 된다. 이러한 경우 $A^H A \approx \text{diag}[L \ L \ \dots \ L]$ 로 근사가 되며, 위에서 정의된 행렬 B 는 $\text{diag}[L + \sigma^2/c_0^2 \ \dots \ L + \sigma^2/c_{N-1}^2]$ 으로 근사될 수 있다. 따라서 (4)의 로그 유사도함수는 $b_i = L + \sigma^2/c_i^2$ 의

정의를 사용하여

$$U_n = \sum_{i=0}^{N-1} \{b_i^{-1} |z_i|^2 + 2\sigma^2 \ln(\sigma^2/c_i^2 b_i)\} \quad (5)$$

로 표현할 수 있다.

가설 H_k ($k \neq n$)의 경우, 마찬가지로의 방법으로 유사도함수 및 로그 유사도함수가 유도될 수 있다. 탭 인덱스(index) $0, 1, \dots, N-1$ 중 가설 H_k 에서 비제로 탭에 해당하는 인덱스의 집합을 I_k 라 할 때 로그 유사도함수는

$$U_k = \sum_{i \in I_k} \{b_i^{-1} |z_i|^2 + 2\sigma^2 \ln(\sigma^2/c_i^2 b_i)\} \quad (6)$$

가 된다. $u_i = b_i^{-1} |z_i|^2 + 2\sigma^2 \ln(\sigma^2/c_i^2 b_i)$ 의 정의를 하면 $U_k = \sum_{i \in I_k} u_i$ 로 표현된다.

최대유사도를 갖는 가설 H_m 은 $k \neq m$ 인 모든 k 에 대해 $\sum_{i \in I_m} u_i > \sum_{i \in I_k} u_i$ 를 만족하는 m 을 찾음으로써 결정할 수 있고, 이 조건은 $i \in I_m$ 일 때 $u_i > 0$ 이고 $i \notin I_m$ 일 때 $u_i < 0$ 인 조건과 동일하다. 따라서 최적의 탭 선택은 각각의 탭에 대해 개별적인 문턱값 시험(threshold test)을 수행함으로써 얻어지게 된다. 즉 $u_i > 0$ 이면 i 번째 탭을 비제로 탭으로 판별하고, $u_i < 0$ 이면 제로 탭으로 판별한다. $u_i = b_i^{-1} |z_i|^2 + 2\sigma^2 \ln(\sigma^2/c_i^2 b_i) > 0$ 의 조건은 $|z_i|^2 > 2b_i \sigma^2 \ln(c_i^2 b_i / \sigma^2) = \gamma$ 의 조건과 동일하므로, i 번째 탭은 상관도 z_i 의 전력 $|z_i|^2$ 이 정해진 문턱값 γ 보다 클 때 비제로 탭으로 판별된다. 다음 장에서는 탭 판별의 오류확률과 CFAR 판별의 특성을 가지는 문턱값을 유도한다.

III. 성능 평가 및 기존 방법과의 비교

1. 오류 확률

오류확률은 비제로 탭이 제로 탭으로 잘못 판별될 확률 P_1 과, 반대로 제로 탭이 비제로 탭으로 잘못 판별될 확률 Q_1 으로 구분될 수 있다. 오류확률 P_1 과 Q_1 은 각각 검출이론에서의 “mis-detection probability”와 “false alarm”에 해당하는 값이라 할 수 있다^[10]. 판별의 근거로 사용되는 상관도는 $z_i = a_i^H (Af + n) = Lf_i + a_i^H n$ 이고 평균값이 0인 복소 가우시안 분포를 따른다. z_i 의 분산값은 i 번째 탭이 제로 탭인 경우 $L\sigma^2$ ($= \sigma_0^2$ 로 표기)이고 비제로

탭인 경우 $L^2\sigma_i^2 + L\sigma^2$ ($=\sigma_1^2$ 로 표기)이다. $|z_i|^2$ 은 지수분포(exponential distribution)를 따르며 확률밀도함수 $p(x) = (1/\sigma_1^2)e^{-x/\sigma_1^2}$ 또는 $(1/\sigma_0^2)e^{-x/\sigma_0^2}$ 를 갖는다. 문턱값이 γ 인 경우 탭 판별의 오류확률은 다음과 같이 구하여 진다.

$$P_1 = \int_0^\gamma \frac{1}{\sigma_1^2} e^{-x/\sigma_1^2} dx = 1 - e^{-\gamma/\sigma_1^2} \quad (7)$$

$$Q_1 = \int_\gamma^\infty \frac{1}{\sigma_0^2} e^{-x/\sigma_0^2} dx = e^{-\gamma/\sigma_0^2} \quad (8)$$

오류확률 중 false alarm이 정해진 값 Q_1 을 갖도록 판별하는 CFAR 검출의 경우 문턱값 γ 는 수식 (8)로부터 다음과 같이 정해진다.

$$\gamma = -\sigma_0^2 \ln Q_1 = -L\sigma^2 \ln Q_1 \quad (9)$$

이 경우 문턱값은 Q_1 값과 잡음평균전력 값으로부터 결정될 수 있고, 비제로 탭의 평균전력과는 무관하다. 수식 (9)의 문턱값을 사용했을 때의 오류확률 P_1 은 수식 (8)로부터

$$P_1 = 1 - e^{(\sigma_0^2/\sigma_1^2) \ln Q_1} = 1 - e^{\ln Q_1 / (1 + L\sigma^2/\sigma^2)} \quad (10)$$

이 된다.

상관도의 전력 크기로 탭 판별을 하는 방법은 수신된 다수의 버스트를 이용하여 오류확률을 줄이는 방향으로 적용될 수 있다. 수신된 K 개의 버스트에서 i 번째 탭에 대해 계산된 상관도를 $z_i^{(1)}, z_i^{(2)}, \dots, z_i^{(K)}$ 로 나타낼 때 탭 판별을 위한 변수를 $Z_{K,i} = \sum_{j=1}^K |z_i^{(j)}|^2$ 로 정의하고, 정해진 문턱값 γ 에 대해 $Z_{K,i} > \gamma$ 의 시험을 통해 비제로 탭 여부를 판별한다. 버스트간의 간격이 충분하거나 또는 페이딩 변화율이 빨라 $z_i^{(j)}, j=1, 2, \dots, K$ 가 독립적인 변수로 모델 되는 경우 $Z_{K,i}$ 는 K 개의 독립적인 지수 분포(exponential random variable)의 합이 된다. 따라서 $Z_{K,i}$ 는 자유도(degree of freedom)가 $2K$ 인 χ^2 -분포를 따르게 되고^[11], 확률밀도함수

$$p(x) = \frac{x^{K-1}}{(\eta^2)^K (K-1)!} e^{-x/\eta^2} \quad (11)$$

를 가진다. 수식 (11)에서 η^2 은 비제로 탭의 경우 $\eta^2 = \sigma_1^2$, 제로 탭의 경우 $\eta^2 = \sigma_0^2$ 이다. 이 확률밀도

함수를 $\eta^2 = \sigma_1^2$ 의 값에 대해 $[0, \gamma]$ 의 구간에서 적분하여 비제로 탭이 제로 탭으로 잘못 판별될 오류확률 P_K 가 얻어진다. 또한, $\eta^2 = \sigma_0^2$ 의 값에 대해 $[\gamma, \infty)$ 의 구간에서 적분하여 제로 탭이 비제로 탭으로 잘못 판별될 오류확률 Q_K 를 얻는다.

$$P_K = 1 - e^{-\gamma/\sigma_1^2} \sum_{j=1}^K \frac{1}{j!} \left(\frac{\gamma}{\sigma_1^2}\right)^j \quad (12)$$

$$Q_K = e^{-\gamma/\sigma_0^2} \sum_{j=1}^K \frac{1}{j!} \left(\frac{\gamma}{\sigma_0^2}\right)^j \quad (13)$$

실제 채널에서 버스트간의 상관도 $z_i^{(j)}$ 가 서로 독립적이지 않은 경우, 수식 (12), (13)은 오류확률의 하한경계(lower bound)값의 의미를 갖는다. 유도된 수식을 이용하여 구해진 오류확률을 그림 1에 도시하였다. 그림에서 수평축은 Q_K , 수직축은 P_K 이며, 두 오류확률 값들 사이의 매개변수는 문턱값 γ 이다. 얻어진 결과는 수신기에서의 탭 판별 성능을 ROC의 형태로 나타낸 것이며, 문턱값을 변화시킴에 따라 얻어지는 P_K, Q_K 간의 trade-off를 관찰할 수 있다. 또한 사용하는 버스트의 수 K 가 1씩 증가함에 따라, 고정된 Q_K 에 대해 오류확률 P_K 가 열 배 이상씩 감소함을 $K=1, 2, 3$ 의 경우에 대해 확인할 수 있다. 성능 평가를 위해 사용된 파라미터 값은 $L=14$ 와 탭 전력 대 잡음 전력 비 (탭 SNR) $\sigma_i^2/\sigma^2 = 10$ dB 이다.

2. 전력 비율 테스트와의 비교

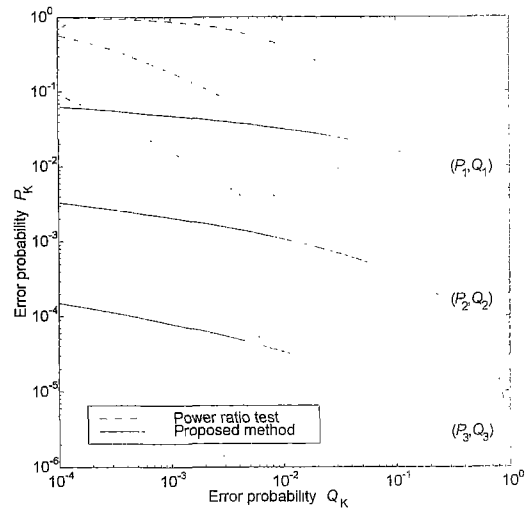


그림 1. 제안된 방법과 전력 비율 테스트의 탭 판별 오류확률

전력 비율 테스트(Power Ratio Test)는 채널 탭 추정 값간의 상대적인 전력을 비교하여 비제로 탭 여부를 판별하는 방법이다. K 개의 버스트에서 얻어진 i 번째 탭의 추정값을 $\hat{f}_i^{(1)}, \hat{f}_i^{(2)}, \dots, \hat{f}_i^{(K)}$ 로 나타내고 지연이 없는 탭 f_0 가 비제로 탭이라 가정한다. 탭 판별을 위한 변수를

$$X_{K,i} = \frac{\sum_{j=1}^K |\hat{f}_i^{(j)}|^2}{\sum_{j=1}^K |\hat{f}_0^{(j)}|^2}, \quad i=1,2,\dots,N-1 \quad (14)$$

와 같이 정의하고, 문턱값 γ 를 기준으로 $X_{K,i} > \gamma$ 를 만족하는 경우 i 를 비제로 탭으로 판별한다. 탭 추정값의 계산 방법 및 오류확률 성능 분석은 [9]에 제시되어 있다.

그림 1에서 전력 비율 테스트의 오류확률을 도식하고 본 논문에서의 방법과 비교하였다. 모든 범위의 P_K, Q_K 값에 대해 성능 향상을 확인할 수 있고, 성능 향상 폭은 사용한 버스트의 개수 K 가 커짐에 따라 증가한다.

IV. 잡음 전력 추정시의 성능 분석

1. 잡음 전력 추정을 이용한 탭 판별

수식 (9)에서 $q = -\ln Q_1$ 으로 정의하면 문턱값은 $\gamma = q\sigma^2$ 으로 표현될 수 있다. 즉 문턱값은 잡음 전력 σ^2 에 비례하는 값으로 정할 수 있다. 다수개의 버스트를 이용한 탭 판별의 경우도 마찬가지로 잡음전력 σ^2 과 버스트의 개수 K 에 비례하는 문턱값 $\gamma = Kq\sigma^2$ 을 정하고

$$Z_{K,i} > Kq\sigma^2 \quad (15)$$

의 조건을 만족하면 i 번째 탭을 비제로 탭으로 판별할 수 있다. 이와 같이 CFAR 특성을 갖는 문턱값 시험을 위해서는 잡음전력에 관한 정보가 필요하다. 수신기에서 잡음전력의 크기의 정확한 값이 알려져 있지 않은 경우, 수신된 잡음 샘플들의 전력 평균을 이용한 추정값을 사용할 수 있다. 수신기에서의 잡음 샘플은 수신된 버스트가 없는 시간 구간에서 얻거나, 또는 연속적으로 버스트가 수신되는 경우는 버스트간의 경계 부분에 존재하는 가드 시간(guard time)에서 얻을 수 있다. M 개의 복소 잡음 샘플을 이용한 잡음전력의 추정값은

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{2M} \sum_{j=1}^M |n_j|^2 \quad (16)$$

으로 표현되고, 수식 (15)와 (16)으로부터 얻어지는 탭 판별 기준은

$$Z_{K,i} > Kq \left(\frac{1}{2M} \sum_{j=1}^M |n_j|^2 \right) \quad (17)$$

이 된다. 판별을 위한 변수 $Z_{K,i}$ 를 잡음 샘플 전력의 합으로 나눈 새로운 변수 $Y_{K,i}$ 와 $\xi = Kq/(2M)$ 로 정의된 문턱값을 이용하면, 판별을 위한 기준을 $Y_{K,i} > \xi$ 로 정할 수 있다. 즉 수식 (17)로부터

$$Y_{K,i} = \frac{Z_{K,i}}{\sum_{j=1}^M |n_j|^2} = \frac{\sum_{j=1}^K |z_j^{(i)}|^2}{\sum_{j=1}^M |n_j|^2} > \frac{Kq}{2M} = \xi \quad (18)$$

를 얻는다.

2. 성능 평가

변수 $Y_{K,i} = Z_{K,i} / \left(\sum_{j=1}^M |n_j|^2 \right)$ 에서 분자와 분모는 각각 자유도가 $2K$ 와 $2M$ 인 χ^2 -분포를 따르고, 두 개의 독립적인 χ^2 불규칙변수의 비로 정의되는 변수는 F -분포를 따르므로, $Y_{K,i}$ 를 F -분포를 따르는 불규칙변수로 모델할 수 있다. 참고문헌 [11]에 제시되어 있는 확률 누적분포함수(cumulative density function)를 이용하여, 비제로 탭인 조건하에서 $Y_{K,i}$ 가 주어진 문턱값 ξ 보다 작을 확률 P_K 와 제로

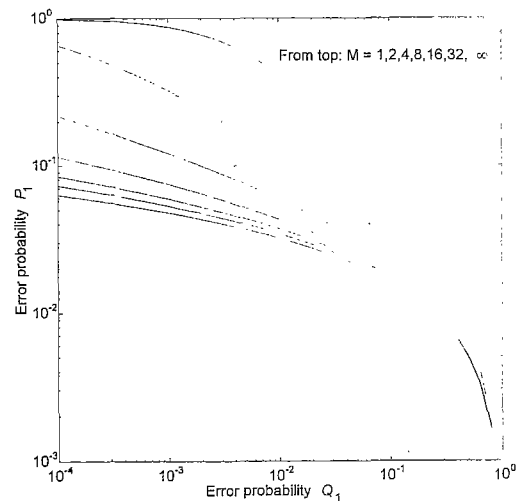


그림 2. 잡음전력추정을 이용한 탭 판별의 오류확률($K=1$)

탭인 조건하에서 $Y_{K,i}$ 가 ξ 보다 클 확률 Q_K 는 다음과 같이 구해진다.

$$P_K = 1 - \frac{1}{B(M, K)} \times \sum_{j=0}^{K-1} \binom{K-1}{j} \frac{(-1)^j}{M+j} \left(\frac{\mu_1^2}{\mu_1^2 + \xi} \right)^{M+j} \quad (19)$$

$$Q_K = \frac{1}{B(M, K)} \times \sum_{j=0}^{K-1} \binom{K-1}{j} \frac{(-1)^j}{M+j} \left(\frac{\mu_0^2}{\mu_0^2 + \xi} \right)^{M+j} \quad (20)$$

여기서 μ_0^2 , μ_1^2 , 베타함수(Beta function) $B(u, v)$ 는 각각 $\mu_0^2 = L$, $\mu_1^2 = L(1 + Lc_i^2/\sigma^2)$, $B(u, v) = \int_0^1 t^{u-1}(1-t)^{v-1} dt$ 로 정의되었다.

수식 (19)와 (20)의 오류확률을 ξ 를 매개변수로 하여 $K=1$, $L=14$, 탭 SNR $c_i^2/\sigma^2=10$ dB의 경우에 대해 나타내면 그림 2와 같다. 잡음전력 추정을 위한 샘플 개수 M 을 1,2,4,8,16,32로 늘려감에 따라 잡음전력이 알려져 있는 경우의 ROC에 빠르게 접근함을 확인할 수 있다. 잡음전력이 알려지지 않은 경우의 오류확률은 수식 (12)와 (13)에 해당되며 그림에서 $M=\infty$ 로 표시하였다. 잡음전력추정을 위해 사용하는 샘플 수가 50개 이상인 경우, 추정을 통한 탭 판별은 최적 성능에 매우 근접한 특성을 가지게 된다. 그림 3에서는 버스트의 개수 K 를 1, 2, 3으로 늘려가면서 $M=4$ 와 $M=16$ 인 경우에 대해 성능을 나타내었다. 잡음 샘플 수가 불충분할 경

우 ($M=4$), 최적성능으로부터의 성능 열화 정도는 K 가 큰 경우 더욱 크다. 잡음 샘플 수를 늘림에 따라 모든 K 값의 경우에 있어서 열화 정도가 감소함을 확인할 수 있다. 그림 3에서 “o”, “*”, “+”의 기호로 나타낸 점들은 시뮬레이션에 의해 얻어진 오류확률로써, 실선 및 점선으로 나타내어진 계산값과 매우 유사함을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 주어진 채널 모델에서 비제로 탭과 제로 탭을 판별하는 문제를 다루었으며, 최대 유사도의 관점에서 최적화 하는 과정으로 판별 방법을 유도하였다. 제시된 결과는 탭 선택적 등화기에의 적용 및 수신기 성능 분석에 활용될 수 있다. 단일 또는 다수개의 버스트를 사용한 경우에 대해 오류확률을 제시하였고, 전력 비율 테스트 방법과의 비교를 통해 성능향상을 보였다. 탭 판별을 위해 사용되는 문턱값은 수신특성에서 요구되는 FA 오류확률과 잡음전력값으로부터 정해질 수 있다. 특히 잡음전력의 추정값을 이용한 탭 판별의 경우에 있어서의 오류확률을 일반적인 수식으로 나타내었고, 계산결과를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

참고 문헌

- [1] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [2] R. Cusani and J. Mattila, "Equalization of digital radio channels with large multipath delay for cellular land mobile applications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 3, pp. 348-351, Mar. 1999.
- [3] ETSI/GSM Recommendation 05.05, *Radio Transmission and Reception*. European Telecommunications Standards Institute, Feb. 1996, Version 5.0.0.
- [4] S. Ariyavisitakul, N. R. Sollenberger, and L. J. Greenstein, "Tap-selectable decision-feedback equalization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 12, pp. 1497-1500, Dec. 1997.
- [5] L. Husson and J.-C. Dany, "A new method for reducing the power consumption of portable handsets in TDMA mobile systems: Conditional equalization," *IEEE Veh. Technol.*,

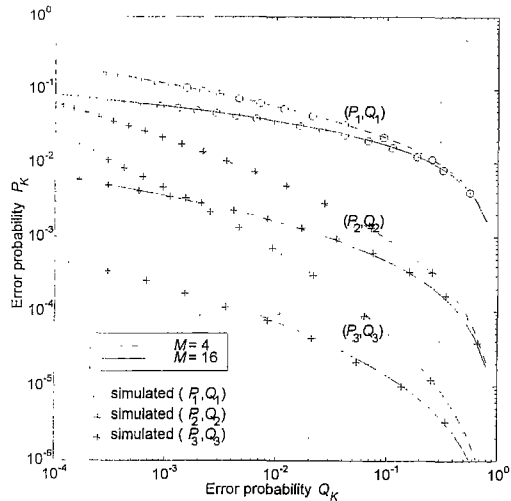


그림 3. 잡음전력추정을 이용한 탭 판별의 오류확률 ($K = 1, 2, 3$; 계산식과 시뮬레이션)

