

광대역 무선 패킷 통신망에서의 IMM 알고리즘을 이용한 간섭예측 및 전력제어

*정영헌, **홍순목

*경운대학교 디지털전자공학부, **경북대학교 전자전기컴퓨터학부

e-mail : *yhjung@ikw.ac.kr, **smhong@ee.knu.ac.kr

IMM-Based Interference Prediction and Power Control for Broadband Wireless Packet Networks

*Young-Hun Jung

School of Digital Electronic Engineering
Kyungwoon University

**Sun-Mog Hong

School of Electrical Engineering and
Computer Science
Kyungpook National University

Abstract

In this paper, we develop an effective method for estimating and predicting interference power strength using the IMM(Interacting Multiple Model) algorithm. Based on the proposed interference prediction algorithm, we adjust transmission power of mobile terminals to maintain a certain level of target signal-to-interference-plus-noise-ratio(SINR) at the base station. Results of numerical experiments are presented to show a performance profile of the proposed algorithm.

I. 서론

음성 데이터뿐만 아니라 영상 데이터 서비스, 인터넷 접속 서비스 등의 다양한 무선 이동통신 서비스 요구로 인하여 광대역 무선통신망에 대한 수요는 폭발적인 증가가 예상된다. 이러한 수요 증가 예측에 비해 이동 멀티서비스망의 무선자원은 제한되어 있고, 따라서 무선자원의 효율적 이용은 이러한 문제를 해결하기 위한 필수적 요구가 되었다. 무선자원 이용의 효율성을 제고하기 위해서는 채널상태와 다른 사용자에 의한 간섭을 예측하고 이에 대응하여 송신전력을 제어해야 한다[1-6]. 이를 통해 "near-far" 효과를 효과적으로 감축하여 서비스망의 용량을 최대화하고, 한편으로는 사용자의 전송전력 소모를 최소화하게 된다.

최근에 신호대 간섭및잡음비(SINR) 추정 및 전송전력제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Austin과 Stuber[1]은 TDMA 이동 멀티서비스망에서 각 TDMA 슬롯에서 송수신측이 미리 예약된 training sequence를 사용하여 간섭전력과 SINR을 추정하는 IP SIR 추정기를 제안하였다. Ramakrishna등[2]과 Anderson등[3]은 각각 CDMA 셀룰라 시스템과 TDMA 셀룰라 시스템에서 신호 부공간(signal subspace)을 기초로, SIR을 추정하는 문제를 다루었다. 최근, 보다 정확한 간섭및잡음전력 또는 SINR를 추정하기 위해 칼만 필터를 도입하게 된다[4-6]. Freris등[4]은 DS-CDMA 셀룰라 시스템에서 사용자(mobile station)의 이동속도에 따라 변화하는 채널 페이딩 상수를 칼만 필터를 이용하여 추정하고, 추정된 채널 상태를 이용하여 신호전력과 SIR을 추정하였다. Leung[5]은 칼만 필터를 이용하여 간섭전력을 예측하고, 예측된 간섭전력을 이용하여 원하는 SINR을 얻기 위한 전력제어 알고리즘을 제시하였다. Marcos[6]는 병렬로 구성된 각각의 칼만 필터들의 출력을 기초로, 데이터 신호의 밀도함수를 근사화해 범으로써, 데이터, 채널상태, 그리고 간섭전력을 추정하였다.

이 논문에서는 TDMA 무선 네트워크상에서 상호작용 다중 모델(IMM: Interacting Multiple Model) 알고리즘[7]을 이용하여 간섭전력을 예측하고, 예측된 간섭전력을 바탕으로 전송전력 제어방식을 제안한다. 사용자의 메시지(message) 길이는 새로운 사용자의 접속빈

도에 영향을 주고, 이는 결과적으로 사용자의 위치변동으로 나타나게 된다. 결국, 사용자의 메시지 길이는 기지국에서 받는 간섭전력의 시간적 변동성향에 영향을 미치게 된다[5]. 이 논문에서는, 간섭전력 추정을 위해 IMM 알고리즘을 구성한다. 이 알고리즘은 평균 메시지 길이를 매개상수로 하는 N 개의 간섭전력 모델에 각각 정합된 N 개의 칼만 필터들로 구성된다. 이렇게 예측된 간섭전력을 이용하여, 원하는 SINR을 얻기 위한 전송전력을 결정하여 전송한다. 이러한 예측과 전력제어는 페루프를 구성하게 된다.

II. 간섭 전력 모델링

2.1 무선 패킷 통신망

일반적으로 TDMA 무선 통신망 시스템에서는 송신 데이터 메시지는 여러 개의 패킷으로 나뉘어진다. 각각의 패킷들은 하나의 시간 슬롯(slot)안에 송신되어지며, 한 사용자(transmitter)의 데이터 메시지는 연속적인 패킷들로 구성되어진다.

터미널과 기지국사이의 경로 이득은 측정에 의해 정확히 추정할 수 있다. 특히, 터미널이 매우 천천히 움직이거나 정지한 경우의 경로 이득은 시간에 따른 변화가 없기 때문에 매우 정확한 추정이 가능하다. 그리고, 어느 한 시간 슬롯에서는 두 개 이상의 터미널이 동시에 한 기지국과 송신은 불가능하며, 더 많은 데이터 처리를 위해 기지국은 다른 기지국과 터미널사이에서 이루어진 제어에 관련된 정보는 교환하지 않는다.

2.2 메시지 길이에 따른 간섭전력 모델링

2.2.1 간섭전력 모델

간섭전력의 변화를 모델링하기 위해, k 번째 시간슬롯에서의 dBm단위의 간섭전력 $I(k)$ 을 상태(state)변수로 둔 상태 방정식을 유도하여야 한다. 간섭전력의 모델은 Leung[5]의 제안한 것과 같은 1차 ARMAX 시스템[8]으로 가정하도록 한다. 즉,

$$I(k+1) = \alpha I(k) + \beta I_{avg} + F(k) \quad (1)$$

$$Z(k) = I(k) + E(k) \quad (2)$$

와 같이 쓰여질 수 있으며, 여기서 I_{avg} 는 간섭전력의 평균치, $Z(k)$ 는 측정된 간섭전력을 말하고, $F(k)$ 와 $E(k)$ 는 각각 시스템의 불확정성을 나타내는 과정잡음과 측정잡음으로서 평균이 영이고 분산이 각각 Q 와 R 인 백색 가우시안이다.

먼저, 터미널의 송신 전력을 30dBm으로 두고, 평균 메시지 길이(L)를 1에서 15까지 변화시키면서 K 개의 시간 슬롯의 실제 간섭전력 시퀀스(sequence) $I(k)$,

표 1. 최소 자승 방법으로 구한 파라미터 α , β 와 과정잡음의 샘플분산 Q

	α	β	Q
$L=1$	-0.007	1.010	19.571
$L=2$	0.436	0.564	14.236
$L=3$	0.632	0.368	10.771
$L=4$	0.708	0.292	8.523
$L=5$	0.786	0.214	7.778
$L=10$	0.884	0.116	4.165
$L=15$	0.912	0.087	2.673

$k=1, \dots, K$ 를 이용하여 시스템 파라미터 α , β 를 최소자승(Least Square) 방법[8]으로 얻었다. 또한, 과정잡음의 분산 Q 는 과정 잡음 $F(k)$ 의 샘플분산(sample variance)를 통해 얻어 표 1에 나타내었다.

표 1에서 알 수 있듯이 평균 메시지 길이(L)가 길어질수록 α 는 0에서 1로, β 는 1에서 0으로 수렴한다. 그 이유는 메시지 길이가 길어질수록 사용자(터미널)의 위치 변화가 줄어들므로, 현재 시간에서의 간섭전력과 다음시간에서의 간섭전력의 연관성이 커지기 때문이다. Leung 모델[5]은 메시지 길이에 관계없이 $\alpha=1$, $\beta=0$ 의 모델이다.

2.2.2 모델의 유효성 검토

위에서 간섭전력의 모델링이 정확하다면, 과정잡음 $F(k)$ 는 평균이 영이고, 분산이 Q 인 백색 가우시안을 만족하여야 한다. 따라서, 과정잡음 $F(k)$ 가 이러한 성질을 만족하는지 확인하기 위해 2가지의 실험을 하였다. 먼저, i) 시간 평균 샘플 자기상관(autocorrelation)을 이용하여, 과정잡음 $F(k)$ 의 백색(whiteness) 성질을 확인하도록 한다.

$$\bar{\rho}(l) = \frac{\sum_{k=1}^K F(k)F(k+l)}{\left[\sum_{k=1}^K F(k)^2 \sum_{k=1}^K F(k+l)^2 \right]^{-1/2}} \quad (3)$$

$\bar{\rho}(l) \sim N(0, 1/K)$ 는 평균이 영이고 분산이 $1/K$ 인 가우시안 분포를 따르게 된다. 따라서, $\bar{\rho}(l)$ 의 95% 신뢰 구간은 $[-1.96/\sqrt{K}, 1.96/\sqrt{K}]$ 이며, $K=1000$ 인 경우 신뢰구간은 $[-0.06198, 0.06198]$ 이다. ii) 두 번째 실험으로는 평균이 영이고, 샘플 분산 Q 가 잘 맞는가를 확인하기 위해 $\bar{\epsilon}$ 을 구한다.

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K F(k)^2 / Q \quad (4)$$

$K\bar{\epsilon}$ 는 K 자유도를 가지는 chi-square 분포를 따른다. 따라서, 95% 신뢰 구간은 $[0.91425, 1.08953]$ 이다.

표 2. 시간평균 샘플 자기상관 $\bar{\rho}(1)$ 와 $\bar{\epsilon}$

	L=1	L=3	L=5	L=10	L=15
$\bar{\rho}(1)$	-0.001	0.051	0.060	0.030	0.040
$\bar{\epsilon}$	0.992	0.993	1.027	0.948	0.982

표 2는 식 (3)와 (4)의 $\bar{\rho}(1)$ 와 $\bar{\epsilon}$ 가 각각 신뢰구간 안에 있음을 보여 준다. 즉, 제시한 간섭전력의 모델은 실제 간섭전력을 잘 모델링한 것임을 알 수 있다.

2.3 IMM 알고리즘

IMM 추정 알고리즘은 하이브리드(hybrid) 시스템의 연속적인 상태(state)와 불연속적인 상태변수를 추정하는 하이브리드 필터이다. 간섭전력 예측 및 추정문제에서의 연속적인 상태변수는 간섭전력이고, 불연속적인 상태 변수는 평균 메시지의 길이로 볼 수 있다. 그림 1에서 보듯이 IMM 알고리즘은 세가지 과정을 거치게 되며, 그 첫 번째 과정은 상호작용단계로써 각 모드에 정합된 필터들의 추정을 혼합하여 어느 특정한 모드에 정합된 필터들의 초기치를 구하게 된다. 두 번째 단계는 병렬로 구성된 각 모드에 정합된 칼만 필터들의 추정치를 구하게 된다. 마지막으로, 조합단계에서는 각 모드에 정합된 칼만 필터들의 추정치를 가중치의 합으로 최종 추정치를 구하게 된다.

간섭전력 예측 및 추정을 위한 IMM 알고리즘 구성을 위해 평균 메시지 길이에 따른 M개의 모드를 가진 병렬 칼만 필터를 구성하게 된다.

2.4 전력제어 알고리즘

먼저, 원하는 SINR을 γ , k번째 시간 슬롯에서의 전송전력을 $p(k)$, 그리고 터미널과 기지국 사이의 경로 이득을 $g(k)$ 이라고 표시하자. 이 때 $I(k)$ 와 $\hat{\gamma}_{pre}(k)$ 은 dBm 단위에서의 실제 간섭전력과 예측된 간섭전력을 말하고, $i(k)$ 과 $\hat{i}_{pre}(k)$ 은 mW 단위에서의 실제 간섭전력과 예측된 간섭전력이다. 2.1절의 언급했듯이 경로 이득 $g(k)$ 은 매우 정확히 추정 가능하다. 따라서, 기지국은 터미널에게 아래 식과 같은 전력을 전송하도록 down-link 채널을 이용해 지시하게 된다.

$$p(k) = \gamma \frac{\hat{i}_{pre}(k)}{g(k)} \quad (5)$$

III. 모의실험

3.1 실험 환경 및 다중모델 구성

셀들은 그림 2와 같이 6각형대로, 4개의 영역으로 나뉘어진다. 같은 번호를 가진 영역들은 같은 채널을

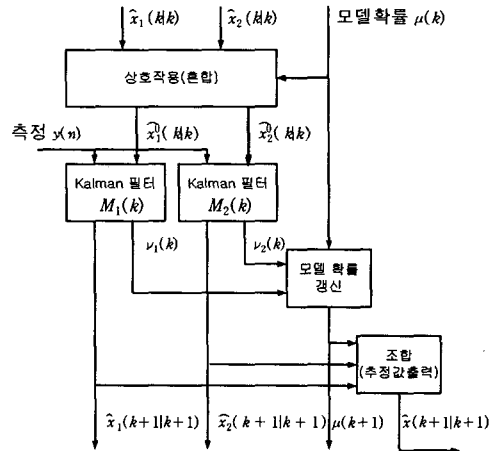


그림 1. 상호작용 다중모델(IMM)알고리즘 (M=2)

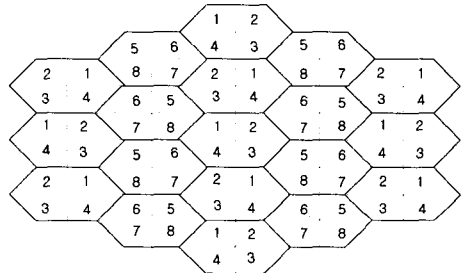


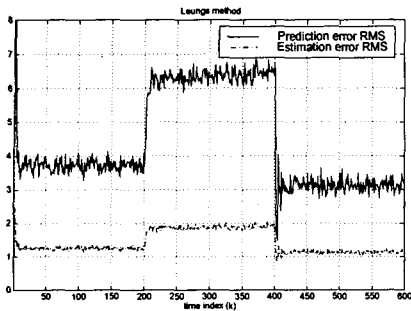
그림 2. 8채널로 구성된 셀 배치

사용하는 것으로 가정한다. 각 기지국 안테나는 빔폭이 60도인 지향성 안테나이고, 터미널은 전방향성 안테나를 가지며, 고정된 위치에서 가장 강한 신호전력을 제공하는 기지국을 선택하는 것으로 가정한다. 지수 4의 경로 손실모델을 사용하였으며, 8dB의 표준편차를 가지는 lognormal 음영 페이딩을 가정하였다[5]. 데이터 전송률은 1Mb/s, 시간 슬롯은 0.5ms으로 가정하고, 원하는 SINR은 17dB로 두었다.

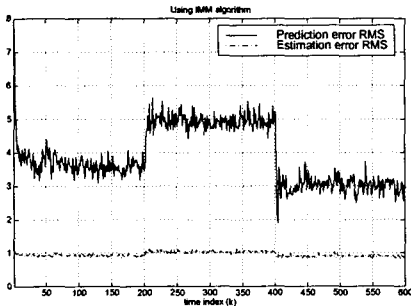
간섭전력 예측 및 추정을 위한 다중모델은 평균 메시지 길이가 각각 L=1, 3, 15인 3개의 모델로, 그리고 Markov 사슬행렬 Θ 의 대각요소는 0.8, 나머지 요소들은 모두 0.1로 두었다[7]. 첫 번째 구간[0sec, 0.1sec]에서는 평균 메시지 길이가 L=5, 두 번째 구간[0.1sec, 0.2sec]에서는 L=1, 나머지 구간[0.2sec, 0.3sec]에서는 L=10으로 두고, 500번의 Monte Carlo 실험을 통해 제안된 IMM 알고리즘과 Leung의 방법[5]을 비교하였다.

3.2 실험결과 및 검토

그림 3에서는 Leung의 모델과 제안된 IMM 모델을 사용한 각각의 경우, 간섭전력 예측오차 및 추정오차



(a)



(b)

그림 3. 간섭전력 예측오차 및 추정오차의 RMS
(a) Leung의 모델 (b) 제안된 IMM 알고리즘

의 RMS를 나타내었다. 그림 3에서 보듯이 제안된 모델이 첫 번째 구간과 두 번째 구간에서 예측 및 추정 오차가 Leung의 결과에 비해 매우 작은 것을 알 수 있다. 세 번째 구간, 즉 $L=10$ 인 구간에서는 제안된 IMM 모델과 Leung의 모델의 차이가 거의 없기 때문에 거의 유사한 수준의 성능을 보인다.

표 5에서는 아래 (6)식과 같은 원하는 SINR과 실제 SINR의 오차 RMS를 구하였다.

$$SINR_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{M} \frac{1}{N} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^N (SINR_i(k) - SINR_{target})^2} \quad (6)$$

여기서 M 은 Monte Carlo 실험횟수, N 은 시간 슬롯의 총수를 말한다. 표에서 보듯이 $L=10$ 인 경우는 Leung의 결과와 유사하지만, $L=5$ 인 경우와 특히, $L=1$ 인 경우는 제안된 IMM 알고리즘을 사용하였을 때 월등히 원하는 SINR을 잘 추종함을 알 수 있다.

IV. 결론

이 논문에서는 TDMA 무선 네트워크상에서 IMM 알고리즘을 이용하여 간섭전력을 예측하고, 예측된 간섭전력을 바탕으로 전송전력을 제어하는 방식을 제안했다. 사용자의 메시지 길이에 따른 간섭전력의 모델을 구하고, 이 모델을 이용한 N 개의 병렬 칼만 필터로 IMM 알고리즘을 구성하였다. 이 알고리즘은 메시지

표 3. SINR의 오차 RMS

	$SINR_{RMS}$ (dB)	
	Leung 모델	IMM 알고리즘
$L=1$ 인 구간	6.3406	4.9404
$L=5$ 인 구간	3.9989	3.8345
$L=10$ 인 구간	3.1405	3.0419

길이 변화에 적응하며 간섭전력을 예측, 추정하였다. 단일 모델의 Kalman 필터를 이용한 Leung의 방법에 비해 뛰어난 예측성능을 보임을 실험을 통해 확인하였다.

참고문헌

- [1] M. D. Austin and G. L. Stuber, "In-service signal quality estimation for TDMA cellular systems," *Wireless Personal Communications*, Vol. 2, No. 3, pp. 245-254, 1995.
- [2] D. Ramakrishan, N. B. Mandayam, and R. D. Yates, "Subspace based estimation of the signal to interference ratio for CDMA cellular systems," *IEEE 47th Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 735-739, 1997.
- [3] M. Anderson, N. B. Mandayam, and R. D. Yates, "Subspace based estimation of the signal to interference ratio for TDMA cellular systems," *Wireless Networks*, Vol. 4, pp. 241-247, 1998.
- [4] N. Freris, T. G. Jeans, and P. Taaghoh, "Adaptive SIR estimation in DS-CDMA cellular systems using Kalman filtering," *Electronic Letters*, Vol. 37, pp. 315-317, 2001.
- [5] K. K. Leung, "Power control by interference prediction for broadband wireless packet networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Vol. 1, No. 2, pp. 256-265, April 2002.
- [6] S. Marcos, "A network of adaptive Kalman filters for data channel equalization," *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 48, No. 9, pp. 2620-2627, Sept. 2000.
- [7] Y. Bar-Shalom, K. C. Chang, and H. A. P. Blom, "Tracking a maneuvering target using input estimation versus the interacting multiple model algorithm," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-25, pp. 175-188, March 1989.
- [8] L. Ljung, *System Identification, 2nd Ed.*, New Jersey: Prentice Hall, 1999.