

DAB 시스템에서의 패킷오율 모델링

이현, 조삼모, 이봉호, 이수인
한국전자통신연구원, 방송시스템연구부
대전광역시 유성구 가정동 161번지

Packet Error Rate Model for DAB system

Hyun Lee, Sammo Jo, Bong ho Lee and Soo In Lee
Electronics and Telecommunication Research Institute(ETRI)
E-mail: hlee2@etri.re.kr, silee@etri.re.kr

요약

패킷 기반 통신 시스템에서는 비트오율 보다 패킷오율이 시스템 파라미터 설계에 보다 중요한 역할을 한다. 패킷오율을 분석하기 위해서는 대부분의 접근이 패킷을 이루고 있는 비트열의 오류 발생 사건을 독립이라고 가정한다. 그러나 실제의 통신 시스템에서는 오류 발생 형태가 버스트 형태로 그룹을 이루고 있다[1].

본 논문은 비터비 디코더를 포함하는 통신 시스템에 있어서의 버스트의 확률 분포를 기반으로 한 PER 모델을 제안하고, Eureka-147 방식의 디지털 오디오 방송 시스템의 시뮬레이션을 통하여 얻은 비트열에 대한 패킷오율과 제안한 패킷오율 모델과의 비교를 통하여 제안한 모델을 검증하였다.

1. 서론

국내 디지털 오디오 방송의 잠정 표준으로 채택된 유럽형 DAB방식인 Eureka-147시스템은 전송 방식으로 OFDM을 채택하여 고속의 데이터 열을 저속의 다수 데이터 열로 전송하는 다중 반송파 전송의 기법을 사용하므로 이동 수신시 문제가 되는 다중 경로 왜곡이나 페이딩 환경에 강한 성능을 보이며, 오디오 프로그램외에도 데이터 프로그램도 동일 주파수 채널 내에서 제공할 수 있다.[2] 또한, 채널부호화 방식으로는 부호율 1/4 및 구속장 $K=7$ 인 길쌈부호 모부호로 하여 RCPC(Rate Compatible Punctured Convolutional code)를 적용하여 길쌈 부호율을 가변시킬 수 있는 구조를 가진다.

비터비 알고리즘은 길쌈부호를 디코딩하는데 효과적인 복호화 방법이며 트렐리스 다이어그램(trellis diagram)을 통하여 최적 경로를 순환적으로 찾는다. 이 알고리즘은 Eureka-147 DAB(Digital Audio Broadcasting) 수신 시스템에 적용하고 있다. 비터비 알고리즘의 특징중의 하나가 발생 비트 오류 패턴이 burst로 정의되는

그룹의 형태로 오류가 나타난다.[1] 오류가 발생하는 그룹의 분포를 분석하는 것은 패킷 단위의 통신 시스템의 설계에서는 중요한 역할을 한다.

일례로 Eureka-147 방식의 DAB 상에서 멀티미디어 파일 전송 수단을 제공하는 방식으로는 MOT 프로토콜 규약이 있으며, MOT 프로토콜 [3][4]은 멀티미디어 파일을 오류 없이 전송하기 위하여, 파일을 세그먼트로 분할하여 분할된 세그먼트를 반복하여 전송할 수 있는 수단을 제공한다. 세그먼트를 반복적으로 전송할 경우에는 데이터 전송률이 반복 횟수에 반비례하여 감소하며, 세그먼트 크기가 클수록 세그먼트의 redundancy가 증가하여 데이터 전송률을 감소시킨다. 따라서, 원하는 세그먼트 오율을 만족하면서, 데이터 전송률을 최소로 하는 세그먼트 반복 횟수 및 세그먼트 크기를 설정하는 것은 DAB 멀티미디어 파일전송에서 중요한 부분이다. 세그먼트의 오율은 burst의 통한 분석으로 예측할 수 있다.

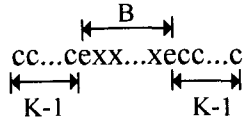
본 논문에서는 burst의 확률 분포를 기반으로 한 PER(Packet Error Rate) 모델을 제시하였으며, 모델의 타당성을 검증하기 위하여 Eureka-147 시스템에 대한 시뮬레이터를 구성하였고, 시뮬레이터에서 발생하는 비트 오류율로부터 burst의 확률 분포를 나타내는 파라미터를 추출하여 제안된 PER 모델에 적용 하였다. 패킷 길이에 대한 PER을 제안된 모델과 시뮬레이터를 통하여 발생된 오류 비트율로부터 얻어지는 PER을 비교 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 burst의 확률 분포에 대하여 서술하고, 3장에서는 burst 확률 분포에 따르는 PER 모델을 제안하고, 4장에서는 이동 채널 환경에서의 시뮬레이션을 통해 3장에서 제시한 수식 모델과 시뮬레이션 결과와 비교하고, 5장에서는 결론을 맺는다.

2. Burst 및 Gap 확률 분포

코드율 $1/n$, 구속장이 K 인 길쌈부호($n, 1, K$)

의 비터비 알고리즘의 출력 비트열을 그림 2.1과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2.1] burst 및 gap 개념도

문자 c는 에러없이 디코딩된 비트를 의미하며, e는 에러가 발생한 비트이며, x는 c 또는 e를 의미한다. 비트열 xxx...x가 K-1개의 연속적인 c를 포함하고 있지않고 exxx...xe의 비트열은 길이 B인 버스트로 정의한다. 2개의 버스트 사이의 c 비트열을 길이 G인 gap으로 정의하며 gap의 길이는 K-1 이상이다.

Miler [6]는 burst 길이에 대한 분포 및 gap 길이에 대한 분포를 모델링하기 위하여 기하분포(Geometric distribution)을 사용 하였다. 모델 파라미터는 AGL(Average Gap Length), ABL(Average Burst Length) 및 burst 내의 평균 비트오율을 사용 하였으며, burst 길이에 대한 확률 분포는 식 2.1 과 같이 모델링을 하였다.

$$P(B=l) = p(1-p)^{l-1}, \quad l > 0 \quad (2.1)$$

여기서, $p = 1/\bar{B}$, \bar{B} 는 ABL을 의미한다.

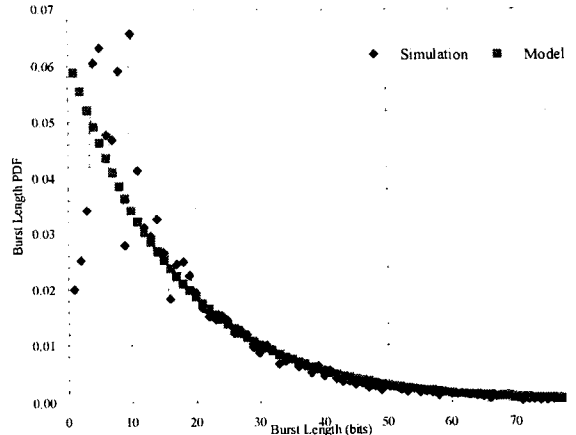
PER은 gap 분포에 대하여 많은 영향을 준다. Gap 길이 분포를 나타내는 $P(G=g)$ 는 비터비 디코딩된 비트열이 오류 비트가 나타났을 때, 연속적으로 g 비트가 오류 없는 비트일 확률을 의미한다. Gap 길이에 대한 확률 분포는 식 2.2와 같이 확률 분포를 근사화 할 수 있는 것으로 알려져 있다.[6]

$$P(G=g) = q(1-q)^{g-K+1}, \quad \forall g \geq K-1 \quad (2.2)$$

여기서 $q = \frac{1}{\bar{G}-K+2}$, \bar{G} 는 AGL를 의미한다.

현재까지의 비터비 출력에 대한 연구 방향은 burst 분포에 대하여 확률분포의 근사화에 중점을 두고 있다.[1]

본 논문에서는 Miler가 제안한 burst 및 gap 분포에 대하여 기하분포를 제안한 확률 분포를 이용하여 패킷 내에서의 burst의 중복 현상을 분석한 PER 모델을 제안한다.



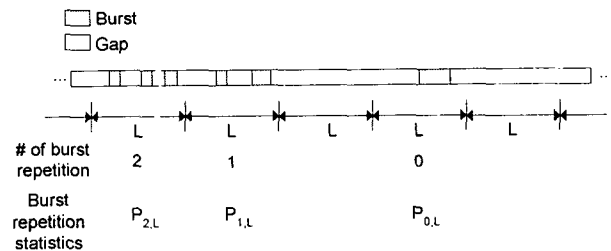
[그림 2.2] Burst 길이에 대한 PDF(시뮬레이션 및 기하 모델 비교)

그림 2.2는 Miler가 제안한 기하분포의 정확도를 보여준 그림이다. 시뮬레이션을 통하여 발생된 비트열을 통하여 burst 길이를 구하여 PDF를 나타내었고, 식 과 같은 기하 분포로 나타내었을 경우의 PDF를 나타내었으며, 시뮬레이션 결과와 모델과의 유사성을 볼 수 있었다.

3. PER 모델링

Burst 확률 모델을 기반으로 하여 PER 을 구해 내기 위해서는 BRP(Burst Repetitions Probability)를 다음과 같이 정의한다. BRP는 그림 3.1에서 나타낸 것과 같이 길이가 L 비트인 패킷내에서 포함되는 burst의 m 번 중복 횟수가 발생하는 확률을 의미한다. 예를 들면 $P_{0,L}$ 는 패킷 내에서 포함되는 burst의 개수가 1개가 있을 확률이고 $P_{1,L}$ 는 패킷내의 burst 개수가 2개 있을 확률을 나타낸다.

$$P_{m,L} \cong \{ \text{패킷 길이가 L 비트이 m번 중복된 burst가 존재할 경우의 패킷 오류 확률} \}$$



[그림 3.1] Burst 중복 확률 개념도

정의된 $P_{m,L}$ 을 사용하여, $PER(L)$ 을 나타내려면 식 3.1과 같이 $PER(L)$ 은 $P_{m,L}$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$PER(L) = \sum_{m=1}^{\infty} P_{m-1,L} \quad (3.1)$$

PER 를 계산하기 위하여 다음과 같은 확률을 정의한다.

$P(A_L) \cong \{ \text{패킷 길이가 } L \text{ 비트일 경우 패킷 중복을 허용하지 않았을 때의 패킷 오류 확률} \}$

$P(B_{m,L}) \cong \{ \text{패킷 길이가 } L \text{ 비트이고 패킷이 오류가 발생한 경우 } m \text{ 번 중복이 되는 경우에서 패킷 오류 확률} \}$

정의 $P(A_L)$ 과 정의 $P(B_{m,L})$ 에 의하여, $P_{m,L}$ 는 다음 식 3.2와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{m,L} = P(A_L)P(B_{m,L} | A_L) \quad (3.2)$$

패킷 중복을 허용하지 않을 경우의 패킷 오류 확률은 $P(A_L)$ 는 식 3.3과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(A_L) = \sum_{m=1}^{\infty} m P_{m-1,L} \quad (3.3)$$

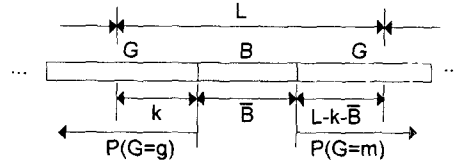
패킷의 수가 충분히 많은 경우에는 무한한 burst 및 gap 의 비트열에서의 패킷 시작점은 랜덤하게 분포되어 있다. 따라서, $P(A_L)$ 는 \bar{G} , \bar{B} , 패킷 길이 L 에 비례 관계가 있다. 하나의 패킷에서 burst 중복을 허용하지 않는다면, $P(A_L)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(A_L) \approx \frac{\bar{B} + L - 1}{\bar{B} + \bar{G}}, \quad 1 \leq L \leq \bar{G} + 1 \quad (3.4)$$

P_{m-1} 를 등비급수로 가정하여 $P_{m-1} = ar^{m-1}$ 로 치환하면 $P(A_L)$ 과 $PER(L)$ 은 식 3.5와 식 3.6으로 표현할 수 있다. $P_{m-1} = ar^{m-1}$ 의 가정은 시뮬레이션 결과로부터 얻은 가정이며, 정확한 일치여부를 보여주지는 않지만, P_{m-1} 의 추세는 유사하였다. $PER(L)$ 은 식 3.4와 같이 P_{m-1} 의 합으로 나타나며, m 이 증가할 경우의 $PER(L)$ 에 주는 영향은 감소하게 된다. 3000 비트의 L 길이인 패킷에 대하여 발생하는 중복 경우는 7차 중복까지 발생 하지만, 2차 이상의 중복 확률은 PER 값의 10% 미만을 차지하였다.

$$P(A_L) = \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot ar^{m-1} = \frac{a}{(1-r)^2} \quad (3.5)$$

$$PER(L) = \sum_{m=1}^{\infty} ar^{m-1} = \frac{a}{1-r} \quad (3.6)$$



[그림 3.2] $P_{0,L}$ 개념도

$P_{0,L}$ 을 구하기 위하여, 그림 3.2의 개념도에서 보듯이 L 패킷 내에서 패킷 시작점을 나타내는 burst의 시작점 k 의 확률 분포를 균일 분포로 가정하고, 패킷 내에 존재하는 burst 길이를 \bar{B} 로 고정하면, $P(B_{0,L} | A_L)$ 은 패킷 내에서 하나의 burst가 존재할 경우, Miller의 기하분포를 적용하여, burst 시작점 k 의 변화에 따라서 다음 수식 3.7과 같이 구할 수 있다.

$$P(B_{0,L} | A_L) = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \sum_{g=k}^{\infty} P(G=g) \sum_{m=L-k-\bar{B}}^{\infty} P(G=m) \quad (3.7)$$

식 3.4와 식 3.7을 결합하면, $P_{0,L}$ 은 다음 수식 3.8과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{0,L} &= P(A_L)P(B_{0,L} | A_L) \\ &= \frac{\bar{B} + L - 1}{\bar{B} + \bar{G}} \cdot \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \sum_{g=k}^{\infty} q(1-q)^{g-k} \sum_{m=L-k-\bar{B}}^{\infty} q(1-q)^{m-k-\bar{B}} \\ &= \frac{\bar{B} + L - 1}{\bar{B} + \bar{G}} \cdot (1-q)^{L-2K+2-\bar{B}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

식 3.5와 식 3.6과 식 3.8을 결합하면 식 3.9 및 식 3.11을 유도되어지며, $PER(L)$ 은 식 3.11과 같이 표현할 수 있다.

$$a = P_{0,L} = \frac{\bar{B} + L - 1}{\bar{B} + \bar{G}} \cdot (1-q)^{L-2K+2-\bar{B}} \quad (3.9)$$

$$1-r = (1-q)^{L/2-K+1-\bar{B}/2} \quad (3.10)$$

$$PER(L) = \frac{\bar{B} + L - 1}{\bar{B} + \bar{G}} (1-q)^{L/2-K+1-\bar{B}/2} \quad (3.11)$$

여기서 패킷 길이 L 의 범위는 $4K - 4 + \bar{B} \leq L \leq \bar{G} + 1$ 이고, $q = \frac{1}{\bar{G} - K + 2}$, K 는 길

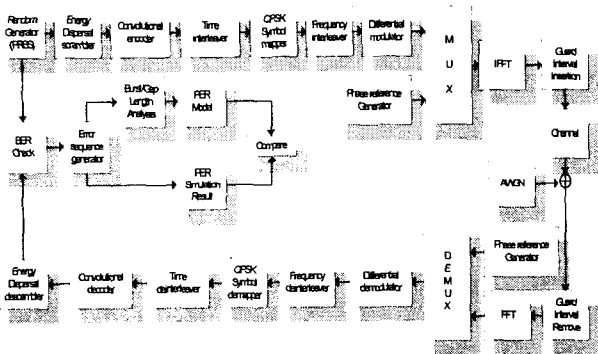
삼부호의 구속장을 의미한다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 구성

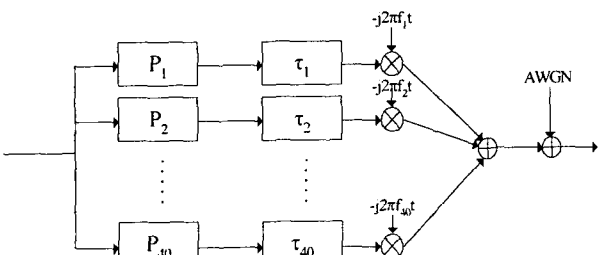
그림 4.1은 Eureka-147 DAB 시스템의 송수신 시뮬레이터 및 비트 오류 분석의 개념적인 구성도를 나타낸다. 각 모듈별 기능은 ETS 300 401을 기반으로 구현되었으며, Eureka-147 DAB 표준에서 다중화 부분을 제외하여, 하나의 Service Component에 관한 기본 모듈을 포함하고 있다.

채널 모델에서는 COST-207을 기반으로 한 DAB 채널 모델을 적용할 수 있다. 최종단에서 PRBS(Pseudo Random Bit Sequence)의 소스 비트열과 수신된 비트열을 비교하여 발생된 오류 비트열을 이용하여 BER를 계산할 수 있다. 오류 비트열을 토대로 burst 및 gap의 모델 파라미터를 추출하여 PER 모델의 입력 파라미터로 사용한다. 시뮬레이션을 통한 오류 비트열을 저장하여, 패킷 길이에 대한 PER을 수신된 오류 비트열을 통하여 구해 낸 후, 패킷 길이에 따르는 PER 모델과 시뮬레이션을 통하여 수신된 오류 비트열에 의하여 계산된 PER을 구하여 모델과의 비교를 통하여 정확도를 측정한다.



[그림 4.1] 시뮬레이션 구성도

4.2 채널 모델



[그림 4.2] 채널 모델 구성도

지상파 DAB이동통신 채널 모델은 COST-207 모델을 기반으로 한다. [5] 그림 4.2는 채널모델을 도시화한 것이며, 고정된 지연값, 도플러 주파수 편이 및 동등 진폭 감쇄를 가지는 40개의 다중경로로 구성된다. 각 경로에 대한 지연값은 다음 수식과 같은 확률밀도함수로부터 발생된다.

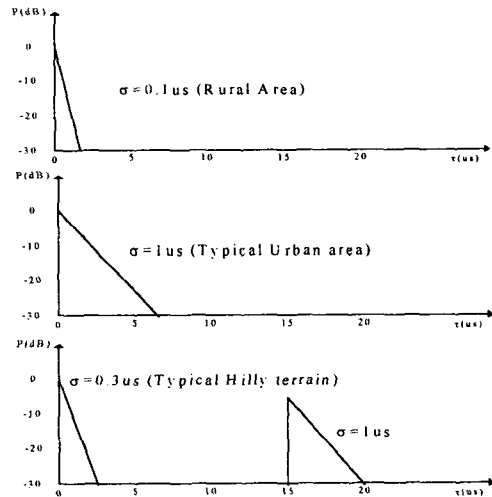
$$P(\tau) = Ke^{-\tau/\sigma}, \quad 0 < \tau < \tau_{\max} \quad (4.1)$$

$$= 0, \quad \text{elsewhere} \quad (4.2)$$

여기서, σ 는 지연값의 표준편차를 의미하며, τ_{\max} 는 최대 지연값, K는 상수를 의미한다. RA(Rural Area), TU(Typical Urban area), TH(Typical Hilly terrain)에 대한 전력지연 프로파일은 그림 9에 나타내었다. 각 경로에 대한 고정 도플러 주파수 편이는 수식 4.3으로 결정된다.

$$f_i = f_{\max} \cos(\theta_i) \quad (4.3)$$

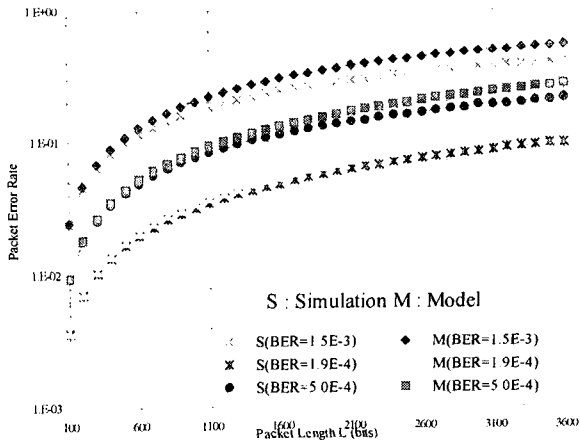
여기서, f_{\max} 는 v/λ (차량속도/RF 반송파 파장)에 의하여 결정되며, θ_i 는 0과 2π 사이에서 균일하게 분포되어지는 확률변수이다.



[그림 4.3] 채널 프로파일

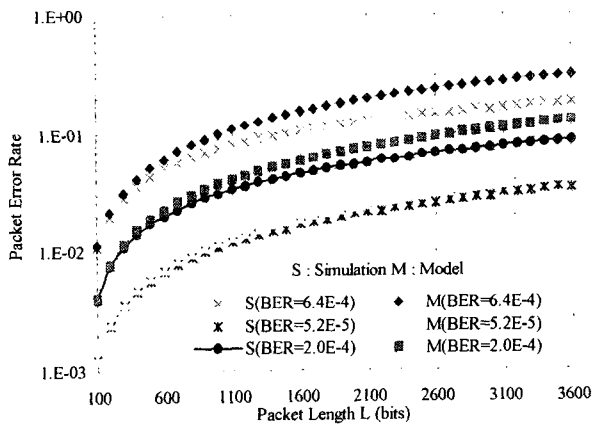
4.3 시뮬레이션 결과 및 분석

그림 4.4는 TU 프로파일을 적용한 채널 모델에서 47 km/hour의 도플러 속도, 중심 주파수 230 MHz 및 길쌈 부호화율 1/2, SNR = 13, 14, 15 dB에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과이다.



[그림 4.4] 시뮬레이션 1 결과

그림 4.5는 TU 프로파일을 적용한 채널 모델에서 47 km/hour의 도플러 속도, 중심 주파수 230 MHz 및 길쌈 부호화율 3/8, SNR = 12, 13, 14 dB에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과이다.



[그림 4.5] 시뮬레이션 2 결과

시뮬레이션 결과에 대한 모델과의 평균오차를 계산하면 다음 표 4.1과 같다. 오차는 모두 10% 이내로 양호한 결과를 보여 준다.

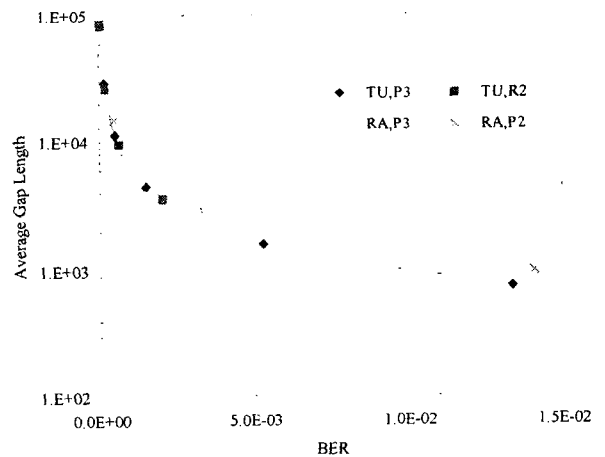
[표 4.1] 모델 오차율

실험	BER	부호화율	평균오차	비고
1	1.5E-3	1/2	0.092	
	1.9E-4		0.014	
	5.0E-4		0.039	
2	6.4E-4	3/8	0.088	
	5.2E-5		0.005	
	2.0E-4		0.028	

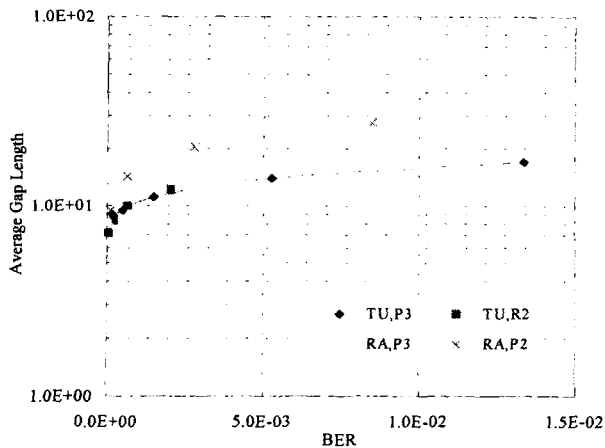
시뮬레이션 결과와 제안된 모델에 의한 PER값의 값을 비교해보면, 전체적인 추이는 유사함을 알 수 있었고, PER이 낮을수록, 패킷 길이가 짧을수록, 모델이 정확도가 높음을 알 수 있었다.

PER이 높은 경우나 패킷 길이가 증가할 경우에서 발생하는 모델과의 오차는 모델링을 하기 위하여 적용한 Miller가 제안한 burst의 확률 분포 모델에서 오차가 발생할 수 있으며, 패킷 길이가 증가할 경우에는 패킷 내의 burst가 중복될 확률이 증가하게 되어, 모델 유도 과정에서 가정한 burst 중복 확률의 등비급수 가정의 위배로 오차가 발생한다.

BER로부터 PER를 구하기 위해서는 BER에 대한 AGL, ABL 관계가 필요하며, 시뮬레이션 1, 2의 결과로부터 그림 4.6 및 4.7과 같이 관계도를 나타낼 수 있다. 관계도에서는 같은 채널 프로파일을 가지는 결과에 대하여 유사성을 볼 수 있었으며, 각 채널 프로파일 별로 근사화하여, BER를 AGL, ABL로 표현할 수 있으며, 그 표현식을 제안한 PER 모델과 결합하여 BER과 PER의 관계를 표현할 수 있다.



[그림 4.6] BER 과 AGL 관계도



[그림 4.7] BER 과 ABL 관계도

5. 결론

본 논문에서는 Eureka-147 시스템과 같이 길쌈 부호가 존재하는 시스템에서의 burst에 대한 확률 분포를 기반으로 하여, PER를 구하는 모델을 제안 하였다. Eureka-147 DAB 시스템을 COST-207을 기반으로 한 이동채널 환경에서의 시뮬레이션을 통하여 제안한 모델의 정확도 검증 실험을 하였다. 결과로는 모델 추정치와 시뮬레이션 결과치는 유사한 추세를 보였으며, $PER=10^{-1}$, 패킷 길이 L이 3000비트 이하에서 우수한 정확도를 보여 주었다.

제안된 PER 모델의 적용예로서 Eureka-147 DAB 시스템과 같은 $BER=10^{-4}$ 으로 설계된 시스템에서 MOT 프로토콜을 통하여 세그먼트 전송시 발생하는 PER를 제안된 모델로 분석하면 MOT 프로토콜 전송 파라미터 설계에 적용할 수 있다.

본 논문에서 향후 진행되어야 할 연구 방향은 burst 확률 분포를 표현 하는 ABL, AGL 파라미터에 대하여, BER과의 근사화 기법을 제안하여 본 논문에서 제안한 PER 모델과의 연동을 통하여 BER과 PER의 상관 관계를 밝히는 부분이 있을 수 있다.

참고 문헌

- [1] A. Franchi and R. A. Harris, "On the error burst properties of Viterbi decoding," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, Geneva, Switzerland, May 1993, pp. 1086-1091
- [2] "EN 300 401 Radio Broadcasting System; Digital Audio Broadcasting(DAB) to mobile, portable and fixed receivers," ETSI, Aug. 2000.

- [3] "EN 301 234 - Digital Audio Broadcasting(DAB); Multimedia Object Transfer(MOT) protocol," ETSI, 1992.
- [4] "TR 101 497 Digital Audio Broadcasting System Rules of Operation for the Multimedia Object Transfer Protocol(RO MOT)," ETSI, 1999.
- [5] L. Thibanh and M. ThienLe, "Performance Evaluation of COFDM for Digital Audio Broadcasting Part I: Parametric Study," *IEEE Trans. On Broadcasting*, vol. 43, no 1, pp. 64-75, Mar. 1997.
- [6] R. L. Miller, L. J. Deutsch, and S. A. Butman, "On the error statistics of Viterbi decoding and the performance of concatenated codes," JPL Publication 81-9, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, Sep. 1981.