

다수개 프레임을 활용한 DVB-S2 위성방송 시스템의 프레임 동기 및 구조 검출 성능 분석

준회원 김 상 태*, 강 석 현*, 종신회원 성 원 진*

Performance Analysis of Frame Synchronization and Structure Detection Utilizing Multiple Frames of the DVB-S2 Satellite Broadcasting System

Sangtae Kim*, Seokheon Kang* Associate Members, Wonjin Sung* Lifelong Member

요 약

DVB-S2 (Digital Video Broadcasting-Satellite, Version 2) 위성방송 시스템은 채널 상태에 따라 적응적으로 구조가 가변되는 프레임을 전송하므로, 수신기의 초기 동기 획득 과정에서는 프레임의 시작점과 구조를 동시에 검출하는 과정이 요구된다. 또한 동기 획득을 위한 최저 동작 신호 대 잡음비가 매우 낮음으로 인해, 요구 성능을 만족시키기 위해서는 다수개의 프레임을 활용하는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 DVB-S2 신호 전송 시 다수개의 프레임을 활용하여 시간 동기와 구조를 동시에 검출하는 방식에 대해 검출 오율을 유도하고 성능을 평가한다. 특히 신호 상관 출력의 연판정과 경판정 값을 사용 시 성능 및 복잡도 변화를 평가하고, 최적 성능을 위한 동기 파라미터를 제시하며, 분석 결과를 모의실험을 통해 검증한다.

Key Words : Frame synchronization Digital video broadcasting Satellite transmission, Mis-detection probability, soft combining

ABSTRACT

DVB-S2 (Digital Video Broadcasting-Satellite, Version 2) system transmits frames which adapt their structures based on the channel conditions, thus requiring simultaneous detection of the start of the frame (SoF) and the frame structure at the initial acquisition stage of the receiver. Also, a very low value of the minimum operating signal-to-noise ratio (SNR) for the acquisition necessitates a method utilizing multiple received frames to meet the required performance. In this paper, performance of joint time synchronization and frame structure detection methods using multiple DVB-S2 frames is evaluated by deriving the detection error probability. In particular, we evaluate the performance and complexity variations when the soft- and hard-decision values of the signal correlation output are used, present the synchronization parameters to optimize the performance, and verify the analysis results via computer simulations.

I. 서 론

DVB-S2 위성방송 시스템은 방송과 통신 융합

추세와 더불어 인터넷과 멀티미디어 콘텐츠 등 양방향 서비스에 적합한 기술로써^[1-3], 대용량 전송을 위해 주어진 대역폭과 신호 전력에서의 안정적인

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

논문번호 : KICS2007-08-351, 접수일자 : 2007년 8월 7일, 최종논문접수일자 : 2008년 1월 28일

전송률 보장이 요구된다. DVB-S2 표준은 최저 -2.35dB의 신호 대 잡음 비 (SNR; Signal-to-Noise Ratio)에서도 신호 동기가 필요하며, 채널 상태의 변화에 따라 최적의 부호화율 및 변조방식을 사용하여 전송하는 적응형 부호화 및 변조방식 (ACM; Adaptive Coding and Modulation)을 채택한다. 이때 전송 시 사용되는 총 16개의 ACM 모드는 각각 이 상이한 길이의 프레임 구조를 가진다. 따라서 수신단에서는 반송파 복구를 위해 낮은 신호 대 잡음 비 환경에서 프레임 동기뿐만 아니라 가변되는 전송 프레임 구조 검출 과정이 요구되며, 이 과정에서 발생하는 초기 동기의 성능 열화를 극복하기 위해서는 다수개의 프레임을 활용하는 것이 필요하다. 프레임 검출을 위해서는 수신된 심볼과 프레임의 동기위드의 상관값의 계산이 기본적으로 수행되며, 상관값 계산 후 문턱값 검사를 수행하는 방법^[4], 상관값에 대한 최대 우도 (ML; Maximum Likelihood) 방식 및 비최적 방식을 병행하는 방법^[5], 상관값 계산 후 다단계 문턱값 검사를 이용하는 기법^[6] 등이 제시되었으나, 기존의 방식들은 전송 프레임의 동기와 가변되는 프레임 구조를 동시에 검출하는 방식은 아니다. 또한 상관을 통한 프레임 동기 이후 ACM 정보를 포함하는 PLSC (Physical Layer Signaling Code) 복호를 수행하는 방법이 적용 가능하기, 복호를 하는 과정에서 시스템 복잡도와 초기 동기 시간이 증가한다. 본 논문에서는 다수개의 프레임을 활용하여 상관값을 누적한 후 가변되는 전송 프레임의 길이를 이용하여 PLSC 복호 이전에 프레임 동기와 구조를 동시에 검출할 수 있는 저복잡도 연관정과 경관정 기법을 제시한다. 제시하는 연관정 기법은 각각의 전송 가능한 프레임 길이에 해당하는 위치의 상관값들을 누적한 후 최대값을 구하는 방식이며, 경관정 기법은 문턱값 검사를 수행한 후 검출 여부를 이진 판별 인덱스만으로 저장함으로써 메모리 공간을 줄이는 방식이다. 특히, 두 가지 방식을 분석하기 위해서 상관값의 확률밀도함수인 chi-square 분포를 활용하여 연관정과 경관정 기법의 동기 오율을 각각 유도하고 파라미터 변화에 따른 성능을 제시한다. 또한 모의 실험을 수행하여 유도된 성능 분석 결과를 검증한다. II장에서는 DVB-S2 시스템의 프레임 구조와 상관식에 대해 설명하며, 경관정과 연관정을 이용한 알고리즘을 설명한다. 경관정을 활용한 프레임 동기 및 구조 검출 시의 성능 분석은 III장에서, 연관정을 활용한

프레임 동기 및 구조 검출 시의 성능 분석은 IV장에서 기술한다. V장에서는 기법 별 성능의 평가 및 비교 결과가 제시되며, VI장에서 결론을 맺는다.

II. DVB-S2 시스템의 동기 및 구조 검출

2.1 프레임 구조

DVB-S2 물리 계층 프레임의 일반적인 구조는 그림 1과 같으며, SoF와 PLSC로 구성된 PL (Physical Layer) 헤더와 데이터 심볼 및 파일럿 열로 구성된 FEC (Forward Error Correction) 프레임으로 구분된다. SoF (Start-of-Frame) 는 16진 표기 시 18D2E82로 구성되어 있는 동기워드로서, $\pi/2$ -BPSK 변조를 한 M 개의 심볼 열이며, 이때 $M =$

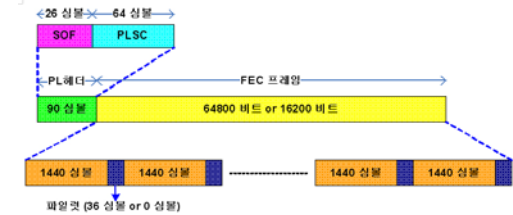


그림 1. DVB-S2 전송 프레임 구조

표 1. DVB-S2 가변 프레임 구조

구조 인덱스 (n)	변조 방식	FEC 프레임 당 비트 수	프레임 당 파일럿 심볼 수	프레임 당 전체 심볼 수 (L_n)
0	QPSK	64800	792	33282
1	QPSK	64800	0	32490
2	QPSK	16200	180	8370
3	QPSK	16200	0	8190
4	8PSK	64800	504	22194
5	8PSK	64800	0	21690
6	8PSK	16200	108	5598
7	8PSK	16200	0	5490
8	16APSK	64800	396	16686
9	16APSK	64800	0	16290
10	16APSK	16200	72	4212
11	16APSK	16200	0	4140
12	32APSK	64800	288	13338
13	32APSK	64800	0	13050
14	32APSK	16200	72	3402
15	32APSK	16200	0	3330

26이다. PLSC는 변조 방식 및 부호화에 관한 정보가 있는 5비트의 MODCOD와 프레임 길이 및 파일럿 유무의 정보가 있는 2비트의 TYPE가 채널 부호화 되어있는 64비트의 부호어이다. MODCOD와 TYPE의 MSB (Most Significant Bit)의 6비트는 (32,6)의 Reed-Muller 부호로 부호화 되며, 생성된 32비트의 비트 열을 TYPE의 LSB (Least Significant Bit)에 따라 반복 혹은 반전된 비트를 삽입하여 64비트의 PLSC를 생성한다. FEC 프레임은 LDPC (Low Density Parity Check) 코드 블록으로써 16가지의 가변적인 프레임 당 심볼 수를 가진다. 표 1에서와 같이 QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK의 4가지 변조 방식, 64800 비트/프레임, 16200 비트/프레임의 2가지 프레임 당 전송 비트 수, PL 헤더 이후 1440심볼마다 삽입되는 36개의 파일럿 열의 삽입 여부에 따라 총 $N = 16$ 개의 조합이 존재하며, 표에서 n 은 전송 프레임 구조 인덱스이고 L_n 은 n 번째 전송 프레임 구조의 프레임 당 전체 심볼 수이다.

2.2 상관 방식

M 개의 SoF 심볼을 s_k ($k = 1, \dots, M$), 송신 데이터 심볼 중 연속된 M 개의 심볼을 d_k ($k = 1, \dots, M$)로 표시하고, s_k 또는 d_k 에 분산이 σ_n^2 인 AWGN 샘플 n_k 가 더해진 수신 심볼을 r_k 로 표시할 때, 현재 수신된 M 개의 심볼이 SoF에 해당하는 경우를 가설 H_1 ($r_k = s_k + n_k, k=1, \dots, M$)로 정의한다. 또한 수신된 M 개의 심볼이 일반 데이터 심볼에 해당하는 경우 (SoF 심볼이 부분적으로 존재하는 경우도 포함)를 가설 H_0 ($r_k = d_k + n_k, k=1, \dots, M$)로 정의한다. 수신기는 H_0 또는 H_1 을 판별하기 위해 상관 (correlation) 구조를 일반적으로 활용한다. 상관도 계산을 위한 연산 방식은 다양한 형태가 존재하나, 가장 기본적인 형식은 수신 심볼열과 기 저장한 SoF 심볼열 간의 직접 상관 방식인

$$c_i = \sum_{k=0}^{M-1} r_{k+i} s_k^*$$

와 같은 연산이다. 이때 i 는 수신 심볼의 인덱스이다. 주파수 오차 존재 시 직접 상관 방식은 성능 열화를 겪음으로 인해, 차등 상관 형식^[8]으로 변형이 가능하다. 본 논문에서는 기준 성능 (baseline performance) 제시를 위해 주파수 오차가 없는 환경에서 직접 상관 방식 활용 시의 성능 분석을 결과를 제시한다. 상관

값 계산 이후 연관정 기법을 사용할 경우 c_i 값 자체를 사용하며, 경관정 기법의 경우 상관도 계산 이후 문턱값 검사를 수행한다. 문턱값 Γ 에 대해, H_0 인 조건 하에서 $|c_i|^2 > \Gamma$ 일 확률을 FAR (False Alarm Rate)로, H_1 인 조건 하에서 $|c_i|^2 < \Gamma$ 일 확률을 MDP (Mis-Detection Probability)로 정의한다.

2.3 경관정을 통한 index matching 방식

Index matching 알고리즘은 상관값 계산 후 문턱값 검사를 수행하여 심볼의 위치 판별 인덱스만을 이진수로 저장함으로써 메모리를 줄일 수 있는 방식이다. m ($= 1, 2, \dots, N_F$)은 프레임 검출에 활용되는 프레임 인덱스, n ($= 0, 1, \dots, N-1$)은 전송 가능한 프레임 구조 인덱스, L_0 는 가장 긴 프레임 구조에 해당하는 심볼 수, j ($= 0, 1, \dots, L_n-1$)는 SoF의 위치 인덱스라고 정의할 때 index matching 알고리즘의 동작 방식은 다음과 같이 2단계로 기술할 수 있다.

1단계: 상관값 계산 및 인덱스 생성

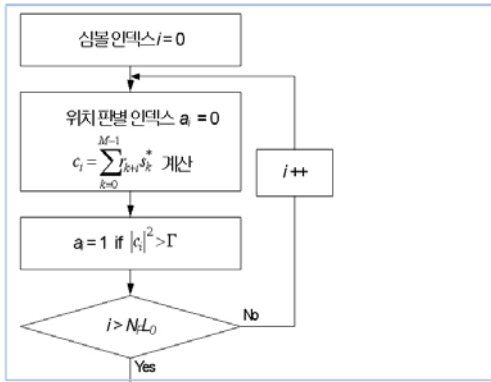
- 1) 상관값 c_i 계산
- 2) $|c_i|^2 > \Gamma$ 일 경우 이진 판별 인덱스 a_i 에 1을 저장, $|c_i|^2 < \Gamma$ 일 경우 a_i 에 0을 저장
- 3) 위 1)과 2)의 과정을 $i = 0, 1, \dots, N_F L_0 - 1$ 에 대해 수행

2단계: 인덱스 정합

- 4) $a_{(m-1)L_n+j} = 1$ 이면 인덱스 정합 카운터 $b_{n,j}$ 를 1만큼 증가
- 5) 위 4)의 과정을 $m = 1, 2, \dots, N_F$ 에 대해 수행
- 6) $b_{n,j} \geq N_C$ 이면 검출 카운터 인덱스 N_D 를 1만큼 증가
- 7) 위 4)–6)의 과정을 $j = 0, 1, \dots, L_n-1$ 및 $n = 0, 1, \dots, N-1$ 에 대해 수행
- 8) $N_D = 1$ 이면 $b_{n,j}$ 에 해당하는 n 과 j 를 프레임 구조와 동기 지점으로 검출

위 과정에 대한 순서도는 그림 2에 도시하였다. Index matching 알고리즘의 동작 방식을 메모리 및 복잡도 측면에서 보았을 때 a_i 를 저장할 $N_F L_0$ 비트의 메모리가 필요하며 간단한 카운터 계산만 요구된다.

1단계: 상관값 계산 및 인덱스 생성



2단계: 인덱스 정합

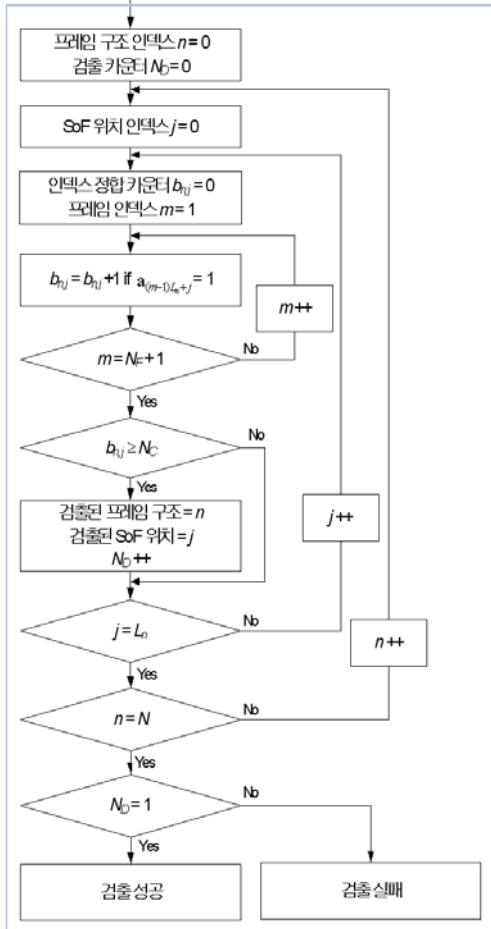


그림 2. Index matching 알고리즘 순서도

2.4 연관정을 통한 soft combining 방식
연관정을 이용한 soft combining 알고리즘은 다수개의 프레임들을 활용하여 전송 가능한 16가지 각

각의 프레임 구조 별 상관값들을 합한 후 최대값을 계산하여 프레임의 동기와 구조를 동시에 검출하는 방식으로 다음과 같이 3단계로 설명할 수 있다.

1단계: 상관값 계산 및 저장

- 1) 상관값 c_i 계산 후 저장
- 2) 위 1)의 과정을 $i = 0, 1, \dots, N_F L_0 - 1$ 에 대해 수행

2단계: 상관값의 합 계산 및 저장

- 3) 상관값의 합 $D_{n,j} = \sum_{m=1}^{N_F} |c_{(m-1)L_n+j}|^2$ 를 계산 후 저장
- 4) 위 3)의 과정을 $j = 0, 1, \dots, L_n - 1$ 및 $n = 0, 1, \dots, N - 1$ 에 대해 수행

3단계: 최대값 검출

- 5) $D_{n,j}$ 중 최대값에 해당하는 n 과 j 를 프레임 구조와 동기 지점으로 검출

위 과정의 적용 예시를 위해 간단한 예를 살펴보면 그림 3과 같다. 그림 3에서 송신 가능한 프레임은 $L_0 = 10$ 심볼/프레임, $L_1 = 7$ 심볼/프레임, $L_2 = 3$ 심볼/프레임인 3가지 경우이며, 0번째 프레임 구조 및 0번째 심볼 위치를 시작 지점으로 갖는 프레임을 전송하였다고 가정하였다. 또한 수신단에서 총 $N_F = 3$ 개의 프레임들을 검출에 활용하였다. 1단계에서 $N_F L_0 (= 30)$ 개의 c_i 를 계산한 후 저장하고, 2단계에서는 심볼 위치 및 프레임 구조 별로 상관값의 크기 제곱을 합한 후 저장한다. 예를 들어 0번째 심볼 위치 ($j = 0$)에서 0번째 프레임 구조 ($n = 0$)의 상관값 크기 제곱을 합하는 경우에는

$$D_{0,0} = \sum_{m=1}^3 |c_{(m-1)L_0+0}|^2 \text{이므로 } D_{0,0} = |c_{00}|^2 + |c_{10}|^2 + |c_{20}|^2 \text{를}$$

저장한다. 여기서 $L_i = \sum_{n=0}^{N-1} L_n$ 이라고 할 때, 3단계에서는 저장된 $L_i (= 20)$ 개의 $D_{n,j}$ 의 크기를 비교하여 이 중 최대값 $D_{n,j}$ 에 해당하는 n 과 j 를 각각 프레임의 구조와 동기 지점으로 검출한다. 실제 DVB-S2 프레임 구조의 경우 $N_F L_0$ 바이트의 상관값을 저장할 공간과 L_i 바이트의 상관값 합을 저장할 공간이 필요하다.

III. Index matching 알고리즘의 성능 분석

상관값 $|c_i|^2$ 의 확률 분포는 chi-square 분포를 가

c_i : i 번째 심볼 위치의 상관값

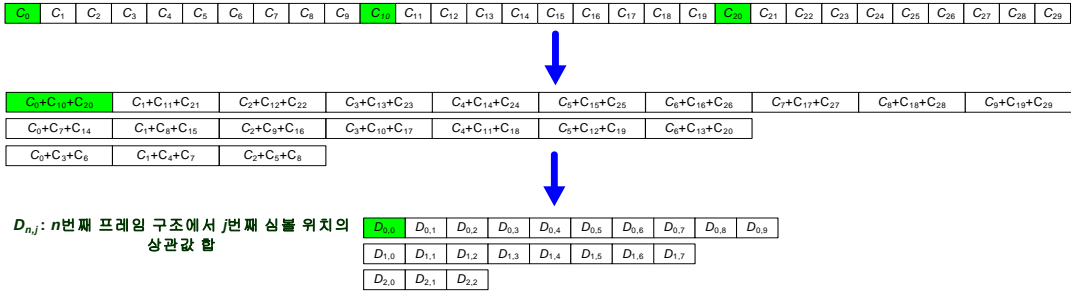


그림 3. Soft combining 알고리즘의 예시

진대⁹⁾. H_0 의 경우인 비 동기 시와 H_1 의 경우인 동기 시에 대한 각각의 확률밀도함수 (pdf; probability density function)를 구할 수 있으며, 이 확률밀도함수를 index matching 알고리즘의 성능 분석에 활용할 수 있다. 비 동기 시 m 번째 프레임의 i 번째 심볼에 대한 상관도 크기의 제곱을 $X_{m,i} = |c_i|^2$ 으로 정의할 때, $X_{m,i}$ 는 평균이 0이고 분산이 $\sigma^2 = M/2 + Mb_n^2$ 인 자유도 2의 central chi-square 분포를 따르며 pdf는 다음과 같다.

$$f_{X_{m,i}}(x) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

동기 시 m 번째 프레임의 i 번째 심볼에 대한 상관도 크기의 제곱을 $Y_{m,i} = |c_i|^2$ 으로 정의할 때, $Y_{m,i}$ 은 자유도 2를 갖는 non-central chi-square 분포를 따르며, pdf의 형태는

$$f_{Y_{m,i}}(x) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{s^2+x}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\sqrt{x} \frac{s}{\sigma^2}\right) dx \quad (2)$$

와 같다. 이때 활용 프레임 인덱스 $m = 1, 2, \dots, N_F$ 이고 수신 심볼의 인덱스 $i = 0, 1, \dots, L_n - 1$ 이다. 또한 분산 $\tilde{\sigma}^2 = Mb_n^2$, non-centrality 파라미터 $s^2 = M^2$ 이고, $I_z(\cdot)$ 는 z -th order modified Bessel function of the first kind이다. 수식 (1)과 (2)를 이용하여 FAR과 MDP를 나타내면 각각

$$FAR: q(\Gamma) = \int_{\Gamma}^{\infty} f_{X_{m,i}}(x) dx \quad (3)$$

$$MDP: p(\Gamma) = \int_0^{\Gamma} f_{Y_{m,i}}(y) dy \quad (4)$$

이고, N_F 개의 프레임에 활용할 경우 false alarm이 N_C 번 이상 발생할 경우를 $Q(\Gamma, N_F, N_C)$, mis-detection이 N_C 번 이상 발생할 경우를 $P(\Gamma, N_F, N_C)$ 라고 정의할 때, 이를 N_F, N_C, Γ 에 대한 수식으로 나타내면

$$Q(\Gamma, N_F, N_C) = \sum_{n=N_C}^{N_F} \binom{N_F}{n} (q(\Gamma))^n (1-q(\Gamma))^{N_F-n} \quad (5)$$

$$P(\Gamma, N_F, N_C) = 1 - \sum_{n=N_C}^{N_F} \binom{N_F}{n} (1-p(\Gamma))^n (p(\Gamma))^{N_F-n} \quad (6)$$

과 같다. 수식 (5)와 (6)을 이용하여 index matching 알고리즘의 프레임 검출 오류 (Frame Detection Error Rate)을 다음과 같이 정의하고, 이를 검출 성능 지표로 사용한다.

$$P_e^{\text{hard}}(\Gamma, N_F, N_C) = 1 - (1 - P(\Gamma, N_F, N_C))(1 - Q(\Gamma, N_F, N_C))^{L_n-1},$$

$$L_n = \sum_{n=0}^{N-1} L_n \quad (7)$$

이때, $(1 - P(\Gamma, N_F, N_C))(1 - Q(\Gamma, N_F, N_C))^{L_n-1}$ 부분은 정확한 동기 지점 및 프레임 구조에 대해서만 유일하게 검출에 성공하고, 다른 모든 경우에 대해서는 검출하지 않을 경우 ($N_D = 1$)에 대한 확률을 의미한다. 그림 4는 $N_F = 4, L_n = 211752, \text{SNR} = 3\text{dB}$ 의 경우에 대해 수식 (7)을 이용한 계산 결과와 모의 실험 결과를 비교한 것이며, Γ 는 잡음 성분이 없을 때 상관값을 0과 1사이에서 정규화 하였다. 도시된 결과를 통하여 'Analysis'로 표기한 수식 (7)의 결과와 'Simulation'으로 표기한 모의 실험 결과

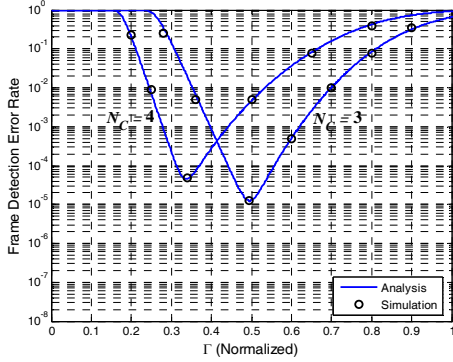


그림 4. Index matching 알고리즘의 프레임 검출 오율 수식 (7)의 검증

가 잘 일치함을 확인할 수 있다. N_c 와 Γ 의 값에 따라 프레임 검출 오율은 변화하므로 최소의 검출 오율 획득을 위한 파라미터 값을 결정하는 것이 필요하며, 다음 수식을 만족하는 Γ 값을 찾음으로써 최적 문턱값을 결정한다.

$$\frac{dP_e^{\text{hard}}(\Gamma, N_F, N_C)}{d\Gamma} = 0 \quad (8)$$

수식 (8)을 만족하는 Γ_{opt} 를 구하기 위해서 $x \gg \alpha^2 - \frac{1}{4}$ 일 때 $I_0(x) \approx \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}$ 의 근사식을 활용하며, 충분히 작은 크기의 MDP와 FAR을 가정한다 ($p(\Gamma) \ll 1$, $q(\Gamma) \ll 1$, $P(\Gamma, N_F, N_C) \ll 1$, $Q(\Gamma, N_F, N_C) \ll 1$). 또한 DVB-S2 파라미터의 $L_t = 211752$ 이므로 $L_t \gg 1$ 임을 사용하여 조건을 간소화시킬 수 있다. 수식 (7)을 수식 (8)에 대입하여 정리하면

$$\frac{dP(\Gamma, N_F, N_C)}{d\Gamma} + L_t \frac{dQ(\Gamma, N_F, N_C)}{d\Gamma} = 0 \quad (9)$$

이고, 수식 (5)와 (6)을 Γ 에 대해 미분하면 각각 다음과 같다.

$$\frac{dP(\Gamma, N_F, N_C)}{d\Gamma} \approx (N_F - 1)N_F p(\Gamma) \frac{dp(\Gamma)}{d\Gamma} \quad (10)$$

$$\frac{dQ(\Gamma, N_F, N_C)}{d\Gamma} \approx N_c \left(\frac{N_F}{N_c} \right) q(\Gamma)^{N_c - 1} \frac{dq(\Gamma)}{d\Gamma} \quad (11)$$

또한, 수식 (3)의 Γ 에 대한 미분식은

$$\frac{dq(\Gamma)}{d\Gamma} = -\frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

이고, 수식 (4)의 Γ 에 대한 미분식은

$$\frac{dp(\Gamma)}{d\Gamma} = \frac{\exp\left(-\frac{(\sqrt{\Gamma} - s)^2}{2\sigma^2}\right)}{2\tilde{\sigma}\sqrt{2\pi s}\sqrt{\Gamma}} \quad (13)$$

이므로, 수식 (9)–(13)을 수식 (8)에 대입하면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} & (N_F - 1)N_F \frac{\exp\left(-\frac{(\sqrt{\Gamma} - s)^2 + 1}{2\sigma^2}\right)}{4\pi s \tilde{\sigma}^2 \Gamma^{\frac{1}{4}}} \\ & \times \int_0^\Gamma \frac{\exp(-(\sqrt{x} - s)^2)}{x^{\frac{1}{4}}} dx \\ & = \frac{L_t N_C}{\sigma^2} \left(\frac{N_F}{N_C} \right) \exp\left(-\frac{N_C \Gamma}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

수식 (14)를 만족하는 Γ_{opt} 를 변화하는 파라미터 N_F 와 N_C 에 대하여 확인한 결과는 그림 6과 7에 표시된 바와 같다.

IV. Soft combining 알고리즘의 성능 분석

비 동기인 경우, N_F 개 상관값의 합을 확률 변수는 $X_i = \sum_{m=1}^{N_F} X_{m,i}$ 이다. X_i 는 평균이 0이고 분산이 $\sigma^2 = M/2 + M\sigma_n^2$ 인 자유도 $2N_F$ 의 chi-square 분포를 갖는 확률변수로서, 다음과 같은 pdf와 누적분포함수 (CDF; Cumulative Distribution Function)를 갖는다^{9,10}.

$$f_{X_i}(x) = \frac{x^{N_F - 1}}{(2\sigma^2)^{N_F} (N_F - 1)!} \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right) \quad (15)$$

$$F_{X_i}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right) \sum_{k=0}^{N_F - 1} \frac{1}{k!} \left(\frac{x}{2\sigma^2}\right)^k \quad (16)$$

동기인 경우, N_F 개 상관값의 합을 확률 변수는 $Y_i = \sum_{m=1}^{N_F} Y_{m,i}$ 이다. Y_i 는 분산과 자유도가 각각 $\tilde{\sigma}^2 = M\sigma_n^2$ 과 N_F 인 non-central chi-square 분포를 따르는 확률변수와 central chi-square 분포를 따르는

확률변수의 합으로써, 다음의 pdf를 갖는다^[10].

$$f_{Y_i}(y) = \frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{y}{s'^2} \right)^{\left(\frac{N_F-1}{2} \right)} \exp\left(-\frac{s'^2+y}{2\sigma^2} \right) I_{N_F-1} \left(\sqrt{y} \frac{s'}{\sigma^2} \right),$$

$$s'^2 = N_F \times s^2$$
(17)

이때, $Z = \text{Mix}\{X_1, \dots, X_{L_i-1}\}$ 로 정의된 확률변수 Z 는

$$F_Z(z) = \prod_{i=1}^{L_i-1} F_{X_i}(z) = F_{X_1}(z)^{L_i-1}$$
(18)

와 같은 CDF를 갖는다. 이를 활용하여 $\Pr\{Y < Z\}$ 를 soft combining 알고리즘의 프레임 검출 오류율로 정의하며, $\tau \geq 0$ 에 대해 다음을 유도한다.

$$P_e^{\text{soft}} = \Pr\{Y - Z < 0\} = \int_0^\infty \Pr\{Y = \tau, Z > \tau\} d\tau = \int_0^\infty f_Y(\tau)(1 - F_Z(\tau)) d\tau$$
(19)

수식 (19)에 수식 (16)–(18)을 대입한 후, 근사식

$$I_\alpha(x) \approx \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}$$

를 이용하면

$$P_e^{\text{soft}} \approx \int_0^\infty \frac{\exp\left(-\frac{(s' - \sqrt{\tau})^2}{2\sigma^2}\right)}{2\tilde{\sigma}\sqrt{2\pi}\sqrt{\tau}s'} \left(\frac{\tau}{s'}\right)^{\frac{N_F-1}{2}} \times \left(1 - \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{2\sigma^2}\right) \sum_{k=0}^{N_F-1} \frac{\left(\frac{\tau}{2\sigma^2}\right)^k}{k!}\right)^{L_i-1}\right) d\tau$$
(20)

와 같고, $\Gamma(a, z) = \int_z^\infty t^{a-1} e^{-t} dt$ 함수를 이용하여

$$P_e^{\text{soft}} \approx \int_0^\infty \frac{\exp\left(-\frac{(s' - \sqrt{\tau})^2}{2\sigma^2}\right)}{2\tilde{\sigma}\sqrt{2\pi}\sqrt{\tau}s'} \left(\frac{\tau}{s'}\right)^{\frac{N_F-1}{2}} \times \left(1 - \left(1 - \frac{\Gamma(N_F, \frac{\tau}{2\sigma^2})}{(N_F-1)!}\right)^{L_i-1}\right) d\tau$$
(21)

와 같은 프레임 검출 오류율의 근사식을 얻는다.

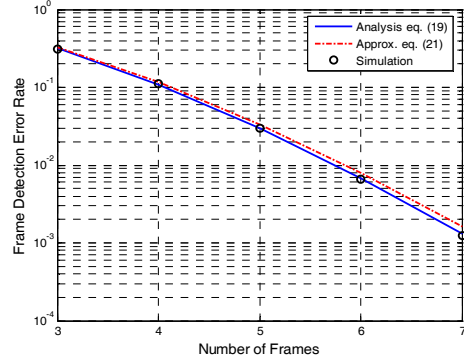


그림 5. Soft combining 알고리즘의 프레임 검출 오류율 수식 (19)와 (21)의 검증

DVB-S2 파라미터 $L_i = 211752$ 와 -5dB SNR의 경우에 대해 N_F 값의 변화에 따라 모의 실험을 한 결과와 수식 (19)의 결과가 일치함을 그림 5를 통해 확인할 수 있다. 그림에서 수식 (19)를 활용한 성능 평가 결과를 ‘Analysis eq. (19)’, 근사적인 수식 (21)을 ‘Approx. eq. (21)’, 모의 실험 결과를 ‘Simulation’으로 각각 표기하였다.

V. 성능 평가 및 비교

본 장에서는 유도된 index matching 알고리즘과 soft combining 알고리즘의 프레임 검출 오류율 식을 이용하여, 요구되는 최소 동작 신호 대 잡음비인 -2.35dB 와 대역폭 25MHz 의 전송 환경을 사용한 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널에서 두 가지 알고리즘의 성능 평가 및 비교 수행 결과는 다음과 같다. Index matching 알고리즘에 대해 파라미터 N_C 와 Γ 를 변화시킴에 따른 프레임 검출 오류율 성능은 그림 6과 7에서 나타내었다. $N_F = 10$ 개의 프레임을 활용하였을 경우 최적의 파라미터 $N_C = 6$ 과 $\Gamma = 0.49$ 일 때 4×10^{-5} 의 프레임 검출 오류율 성능을 보임을 그림 6에 도시하였고, $N_F = 15$ 개의 프레임을 활용하여 $N_C = 9$ 와 $\Gamma = 0.48$ 의 파라미터를 사용하였을 경우 프레임 검출 오류율 성능이 7×10^{-8} 으로 감소됨을 그림 7에서 확인할 수 있다. 따라서 $N_F = 15$ 개의 프레임 활용 시 DVB-S2에서 요구하는 10^{-7} 이하의 프레임 검출 오류율 성능을 만족한다. 가장 길이가 긴 구조의 프레임 전송을 기준으로 $N_F L_0 / \text{BW}$ 를 이용하여 ($\text{BW} = 25\text{MHz}$) 계산한 동기 시간은 각각 13.3msec 과 20.0msec 이다. 그림 8은 최적의 N_C 와 Γ 일 경우에 해당하는 index

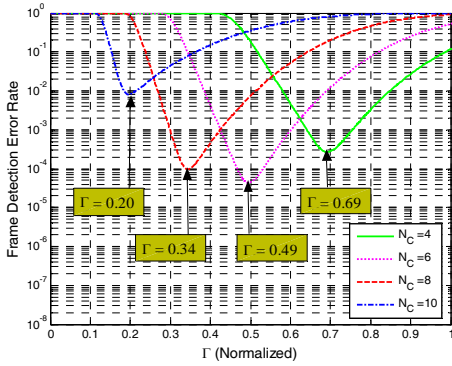


그림 6. Index matching 알고리즘의 프레임 검출 오율과 최적의 Γ ($N_F = 10$)

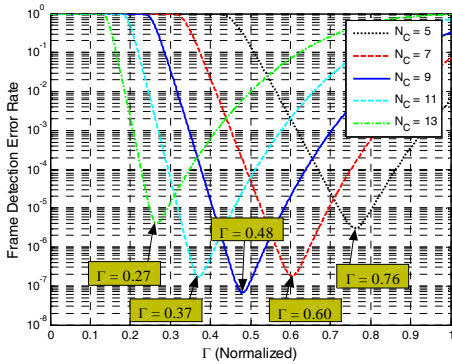


그림 7. Index matching 알고리즘의 프레임 검출 오율과 최적의 Γ ($N_F = 15$)

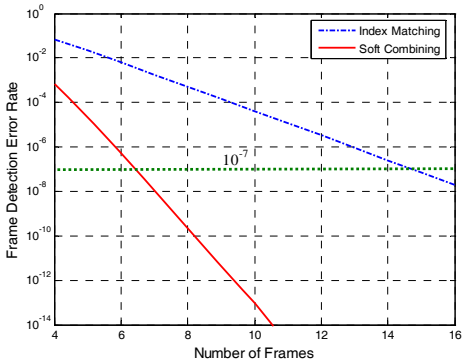


그림 8. Index matching 알고리즘과 soft combining 알고리즘의 프레임 검출 오율 비교

matching 알고리즘과 soft combining 알고리즘의 프레임 검출 오율 성능을 N_F 의 변화에 따라 비교한 그림이다. Soft combining 알고리즘은 10^{-7} 의 프레임 검출 오율 성능을 만족하기 위해서 $N_F=7$ 개를 활용하며, 이때의 프레임 동기 시간은 9.3msec

으로 같은 조건의 index matching 알고리즘에 비해 동기 시간이 약 2.2배 감소한다. 그러나 저장 공간의 측면에서는 2장에서 언급되었듯이 soft combining 알고리즘의 경우 $N_F L_0 + L_t$ 바이트의 저장 공간이 필요한 것에 비해 index matching의 알고리즘의 경우 $N_F L_0$ 바이트의 저장 공간이 필요하다. 따라서 soft combining 알고리즘과 index matching 알고리즘에서 동기 및 구조 검출을 위해 사용되는 프레임 개수를 각각 $N_{F,soft}$ 와 $N_{F,hard}$ 로 표시할 때, index matching 알고리즘의 저장 공간은 $N_{F,hard} L_0 / 8(N_{F,soft} L_0 + L_t)$ 의 비율로 줄어드는 trade-off 효과를 가진다. 본 논문에서 제시하는 다수 프레임 활용은 각 프레임 헤더 간에 독립적인 채널 환경이 적용됨을 전제로 하는 것으로서, 다수의 위성통신 시스템의 채널 모델로 사용되는 AWGN 채널 환경에 잘 적용된다. Rician 채널과 같이 프레임 간 상관 관계를 가지게 되는 경우 제시한 성능 대비 열화가 발생할 것으로 예상되며, Rician K-factor에 대한 정확한 성능 열화 정도는 추가적인 분석이 필요하다.

VI. 결론

본 논문에서는 낮은 신호 대 잡음비 환경에서 프레임 동기와 가변하는 전송 프레임의 구조를 동시에 검출하기 위해서 다수 개의 프레임을 사용하는 index matching 및 soft combining 알고리즘을 제시하였다. Index matching 알고리즘은 심볼 위치 판별 인덱스만을 저장함으로써 메모리를 감소시키며, soft combining 알고리즘은 누적된 최대 상관값을 활용함으로써 초기 동기 시간을 줄이는 효과를 가진다. 각 방식에 대한 프레임 검출 오율을 동기 시 및 비동기 시의 확률 분포식을 이용하여 유도하였으며, 유도 결과를 활용하여 파라미터 변화에 따른 오율 성능을 제시하였다. 두 방식 모두 요구되는 10^{-7} 오율을 -2.35dB SNR에서 만족할 수 있으나, 동기 시간 측면에서는 20.0msec 대비 9msec로 soft combining 알고리즘이 이점을 가지며, 반면 사용 저장 공간 측면에서는 index matching 알고리즘이 우수한 성능을 가진다.

참고 문헌

[1] ETSI EN 302 307 v1.1.1, Digital Video

Broadcasting (DVB): Second Generation Framing Structure, Channel Coding and Modulation System for Broadcasting, Interactive Service, News Gathering and Other Broadband Satellite Applications, June 2004.

- [2] E. Casini, R. De. Gaudenzi, and A. Ginesi, *DVB-S2 Modem Algorithm Design and Performance over Typical Satellite Channel*, ESA, ESTEC.
- [3] G. E. Corazza, M. Neri, R. Pedone, P. Salmi, A. Vanelli-Coralli, M. Villanti, G. Albertazzi, and S. Cioni, "On the adaptive DVB-S2 physical layer: Design and performance," *IEEE Wireless Commun.*, Vol.12, No.6, pp. 62-68, Dec. 2005.
- [4] M. Chiani and M. G. Martini, "On sequential frame synchronization in AWGN channels," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.54, No.2, pp. 339-348, Feb. 2006.
- [5] J. A. Gansman, M. P. Fitz, and J. V. Krogmeier, "Optimum and suboptimum frame synchronization for pilot symbol assisted modulation," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.45, No.10, pp. 1327-1337, Oct. 1997.
- [6] G. E. Corazza, R. Pedone, and M. Villanti, "Frame acquisition for continuous and discontinuous transmission in the forward link of satellite systems," *Int. J. Satell. Commun. Network*, Vol.24, No.2, pp. 185-201, Mar. 2006.
- [7] F.-W. Sun, Y. Jiang, and L.-N. Lee, "Frame synchronization and pilot structure for second generation DVB via satellites," *Int. J. Satell. Commun. Network*, Vol.22, No.3, pp. 319-339, May/June 2004.
- [8] M. H. Zarrabizadeh and E. S. Sousa, "A differentially coherent PN code acquisition receiver for CDMA systems," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.45, No.11, pp. 1456-1465, Nov. 1997.
- [9] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [10] M. K. Simon, *Probability Distributions Involving Gaussian Random Variables*. Kluwer Academic Publishers, 2002.

김 상 태 (Sangtae Kim)

준회원



2006년 8월 서강대학교 전자 공
학과 학사
2006년 8월~현재 서강대학교 전
자공학과 석사과정

<관심분야> 디지털통신, 고속모뎀, 통계적 통신 이론

강 석 현 (Seokheon Kang)

준회원



2005년 2월 서강대학교 전자 공
학과 학사
2007년 2월 서강대학교 전자 공
학과 석사

<관심분야> 디지털통신, 전송기술, 채널코딩

성 원 진 (Wonjin Sung)

종신회원



1990년 2월 서울대학교 전자 공
학과 학사
1992년 5월 Univ. of Michigan
(EECS) 석사
1995년 12월 Univ. of Michigan
(EECS) 박사
1996년 1월~2000년 8월 Hughes

Network Systems사 책임연구원

2000년 9월~현재 서강대학교 전자공학과 부교수

<관심분야> 이동무선통신, 통계적통신이론, MIMO,
위성모뎀