

계층변조 지수(α)에 따른 지상파 디지털 방송 시스템의 전송성능 분석

이성윤*, 김재길*, 이제원*, 윤선희*, 안재민^o

Transmission Performance Analysis for Terrestrial Digital Broadcast Systems According to Hierarchical Modulation Factor(α)

Sungyoon Lee*, Jae-kil Kim*, Jewon Lee*, Seonhui Yun*, Jae Min Ahn^o

요약

본 논문은 계층변조(Hierarchical Modulation) 기법이 적용된 지상파 방송 전송 시스템의 지상파 방송권역 판단을 위한 해석적 기법을 제시한다. 계층 변조된 비균일 QAM 성상도에 대하여 AWGN 환경에서의 Q-함수 해석을 기반으로 비트오류율(BER, Bit Error Rate)을 유도한다. 도출된 비트오류율은 계층변조 지수(Hierarchical Modulation Factor, HMF, α)와 연관성을 가지며, Log-distance 경로 손실 모델에 따라 전송 신호에 대한 링크 해석을 시행 하면 방송권역의 유효 반경으로 연결될 수 있다. 최종적으로 HMF에 따른 기본계층(High Priority, HP) 정보의 방송 권역과 향상계층(Low Priority, LP) 정보 방송 권역의 비율을 계산하며 이를 기반으로 하여 선택된 비율에 따른 HMF를 결정하게 된다.

Key Words : Hierarchical Modulation, Hierarchical Modulation Fator(α), DTV, Log-distance path-loss model, Effective SNR

ABSTRACT

An analytical method for identifying terrestrial broadcasting coverages is proposed for a terrestrial broadcasting transmission system adopting a hierarchical modulation technique. Bit Error Rates(BERs) are derived for hierarchically modulated non-uniform QAM constellations based on the Q-function analysis in AWGN environments. The derived BERs depend on the hierarchical modulation factor α (HMF) and could be mapped to the broadcasting coverages according to the link budget analysis based on the log-distance path loss model. Finally the broadcasting coverage ratios for high priority(HP) streams and low priority(LP) streams are calculated and presented for the determination of the HMF.

I. 서론

이날로그에서 디지털 방식에서의 TV 방송 변화에 따라 많은 국가에서 지상파 방송 주파수 축소 및 반

※ 본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행되었습니다.

♦ 주저자 : 충남대학교 정보통신공학과 이동멀티미디어 통신 연구실 leesy@cnu.ac.kr, 준회원

° 교신저자 : 충남대학교 정보통신공학과 이동멀티미디어 통신 연구실, jmahn@cnu.ac.kr, 종신회원

* 충남대학교 정보통신공학과 이동멀티미디어 통신 연구실, stone0517@cnu.ac.kr, 준회원,

jw_lee@cnu.ac.kr, 준회원, seonhuiyun82@gmail.com, 정회원

논문번호 : KICS2012-06-271, 접수일자 : 2012년 6월 1일, 최종논문접수일자 : 2012년 9월 10일

환을 하고 있다. 국내에서도 지상파 방송용으로 사용되던 698-806MHz에 이르는 108MHz의 주파수 대역폭에 대한 회수가 이미 이루어진 상태이다. 한편 3차원 TV 및 초고화질 TV(Ultra-High Definition TV, UHD TV) 등의 방송 기술 발전은 현 지상파 DTV 시스템의 하나인 ATSC(Advanced Television System Committee)의 19.4Mbps의 데이터 전송률만으로는 지원할 수 없는 다양한 콘텐츠의 수요를 불러올 것으로 예상되며 이에 따라 지상파 방송의 고효율 전송 및 효율적 주파수 사용에 관한 연구가 진행되어야 한다.^[1]

고효율 전송 기법의 지상파 방송 적용을 위해서는 QAM 성상도의 성상의 개수를 늘여야 하지만, 지상파 방송망 내에서의 수신기 위치에 따른 경로 손실에 의하여 송신 안테나에서 수신기가 멀어질수록 수신 신호대잡음비(Signal-to-noise Ratio, SNR)가 작아져 수신 성능을 제대로 보장할 수 없는 문제가 발생하게 된다. 이에 SNR이 낮은 경우 최소한의 데이터 수신율을 보장하고, SNR이 높은 경우 최대의 데이터 전송률을 제공할 수 있는 계층변조(Hierarchical Modulation) 기법이 하나의 대안으로 제시되고 있다. 이러한 동향에 따라 차세대 방송 서비스의 품질 향상을 위한 다양한 방법 중 제한된 주파수 범위에서의 효율적 사용 및 기존 시스템과의 호환성을 유지하며, 시스템에 따라 다양하게 구현 가능한 계층변조에 대한 연구가 다양한 분야에 걸쳐 진행되고 있다.^[2] 계층변조의 실 예로, 우리나라에서는 Eureka-147 DAB 시스템을 기반으로 하는 T-DMB(Terrestrial-Digital Multimedia Broadcasting) 시스템의 진화 기술 규격에서 계층변조를 적용하였고, 유럽은 DVB-T(Digital Video Broadcasting-Terrestrial) 방송 서비스에서 계층변조 기법을 표준으로 채택하고 있다.^[3,4]

계층변조 기법은 기존 시스템의 데이터에 부가적 데이터를 삽입함으로써, 차세대 지상파 방송 서비스에 증가된 유효 데이터 전송률을 제공하며, 전계 강도가 높은 지역에는 확장된 데이터로 인한 고화질, 고음질의 향상된 품질의 서비스를 제공한다. 반면, 전계 강도가 낮은 지역은 최소한의 유효 데이터 전송률을 제공함으로써, 서비스 요구만족에 따른 다양한 콘텐츠 서비스 오지구역 최소화를 보장한다.^[5,6] 이 때 계층변조 적용에서 심벌 거리 간 비를 의미하는 계층변조지수(Hierarchical Modulation Factor, α)^[5]가 의미하는 바가 크다. 계층변조지수(α)의 변화에 따라 기존 시스템 데이터인 기본계층(High Priority,

HP) 정보 기반의 방송권역과 추가 데이터가 삽입된 향상계층(Low Priority, LP) 정보 기반의 방송권역이 변화하게 되고, 두 계층 간 방송권역은 반비례 관계가 된다. 이는 지수(α)의 증가에 따라 심벌 성상도가 향상계층이 적용된 균일 성상도에서 기본계층의 균일 성상도로 변화하기 때문이다. 계층변조가 적용된 지상파 방송 전송 시스템 운영에 있어 각 계층의 방송권역 운영 비율은 계층변조지수(α)에 의하여 결정되기 때문에 적정 지수(α)의 선택이 요구되어진다.

이에 본 논문은 적정한 계층변조지수(α)의 선정을 위한 기준을 제시하기 위하여, 지상파 방송 전송에서의 경로손실 모델로써 Log-distance 경로 손실 모델을 적용하고 계층변조지수(α)의 변화에 따른 기본계층 및 향상계층의 계층별 방송권역의 변화를 분석하였다. 이 결과를 바탕으로 방송권역 비율과 계층변조지수(α)의 상관관계를 표로 제시하였다. 서론에 이어 II장에서는 QAM계열의 계층변조 방식 및 계층변조지수(α)를 제시하고, III장에서 계층변조지수(α)에 따른 비트오류율(Bit Error Rate, BER)을 Q-함수를 이용한 수학적 모델링으로써 제시한다. IV장에서는 Log-distance 경로 손실 모델을 통한 특정 조건에서의 계층변조지수(α)의 선택 근거를 제시한 뒤 V장에서 결론을 맺는다.

II. 계층변조

2.1. 계층변조 구성

계층변조 기법은 기존 변조 방식의 데이터에 추가적인 데이터를 삽입함으로써 통신 가능 환경과 조건에 따라 유효 데이터를 증가시킬 수 있는 기법이다. 계층변조의 구조는 기존 시스템의 데이터 스트림인 기본계층과 추가 삽입되어지는 향상계층^[8]으로 구성된다. 본 논문에서는 차세대 지상파 디지털 방송 시스템에서 적용 가능한 64-QAM 변조 기법에 추가적 데이터를 삽입함으로써 데이터 스트림을 확장하는 계층변조 기법을 사용한다. 계층변조 구성은 균일 64-QAM(그림1) 기반의 기본계층, 균일 QPSK(그림2) 기반의 향상계층으로 구분된다.

두 계층의 결합으로 비균일 256-QAM 형태의 8비트 스트림 심벌 신호를 생성하여 전송하며 그림 3과 같은 성상도로 나타난다. 구성된 계층변조 심벌은 총 8비트로 구성되며 그림 4와 같이 상위 6비트($B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$)는 기본계층 데이터 스트림에 의해 결정되며 하위 2비트(B_6, B_7)는 향상계층 데이터 스트림에 의하여 결정된다. 기본계층 영역 내 4개의 심벌

들은 동일 성분의 64-QAM 매핑 비트를 가지며, 향상계층 하위 2비트의 삽입 영향으로 비균일 256-QAM 성상도를 구성한다.

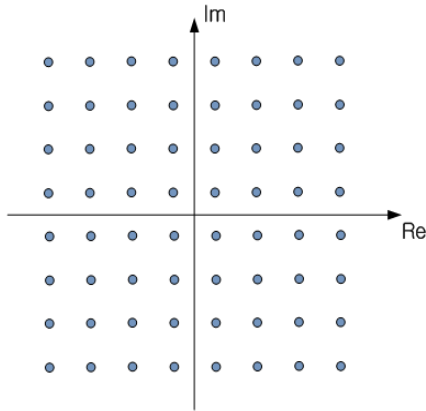


그림 1. 균일 64-QAM 성상도
Fig. 1. Uniform 64-QAM Constellation Map

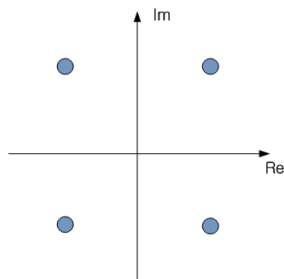


그림 2. 균일 QPSK 성상도
Fig. 2. Uniform QPSK Constellation Map

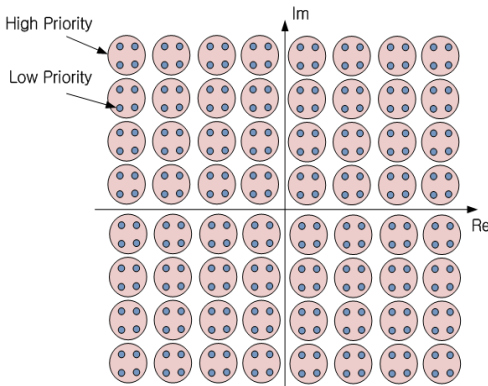


그림 3. 비균일 256-QAM 성상도
Fig. 3. Non-uniform 256-QAM Constellation Map

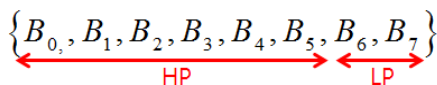
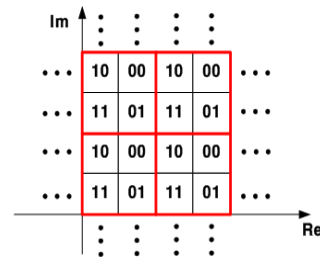


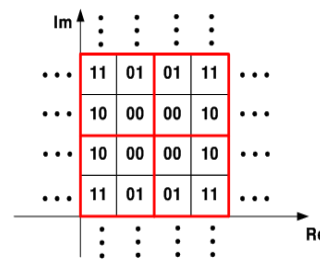
그림 4. 계층변조 심벌 구조
Fig. 4. Structure of Hierarchical Modulation Symbol

계층변조를 이용한 심벌 매핑은 기본계층 비트열의 홀수 번째 비트, 짝수 번째 비트 그룹을 각각 실수부와 허수부로서 구성하여 그레이 부호화 된 심벌을 구성하게 된다. 같은 방법을 이용한 QPSK 기반 향상계층 역시 홀수 번째 비트와 짝수 번째 비트를 이용한 그레이 부호화 된 심벌을 구성하여 기본계층과 결합을 통한 비균일 256-QAM 심벌을 생성하게 된다. 그러나 각각의 계층 간 단순 결합을 적용하면 해당 계층에서의 비트 구성 그레이 부호화는 유지가 가능하나, 두 계층 결합 후 비균일 256-QAM 조건에서 그레이 부호화 규칙이 성립되지 않는다. 결과적으로 두 계층 간 단순 결합은 인접 심벌 간 1비트 또는 그 이상의 비트 차이를 보이는 비균일 형태의 비트 구성 심벌로써 매핑 되는 결과를 가진다. 이는 수신 성능의 결과에 영향을 줄 수 있는 요인이다.

이에 본 논문에서는 향상계층 부분의 심벌 매핑을 그림 5와 같이 기존 그레이 부호화 된 매핑에 거울 효과(Mirror Effect)를 도입하여 변형된 형태의 매핑 방법을 적용하였다. 이 과정은 두 계층 간 결합 후 비균일 256-QAM 심벌 매핑에서 그레이 부호화 규칙이 성립되는 결과를 가진다.



(a) 기존 그레이 부호화 된 QPSK 비트 매핑



(b) 거울 효과가 적용된 QPSK 비트 매핑

그림 5. 계층변조 향상계층(LP)에서의 QPSK 비트 매핑
Fig. 5. QPSK bits mapping in Hierarchical Modulation Low Priority

2.2. 계층변조 지수(a)

본 절에서는 앞서 제시한 계층변조 기법이 적용된 비균일 256-QAM 심벌 성상 간 최소 거리 비를 결정

하는 계층변조지수(α)를 소개한다. 계층변조지수(α)의 변화에 따라 비균일 256-QAM의 심벌 성상 간 거리 변화로 각각 다른 형태의 심벌 매핑이 발생하게 된다. 이는 심벌 오류 및 비트 오류의 변화를 초래하여 수신 성능에 중요한 영향을 주게 된다.

계층변조지수(α)는 그림 6에 나타난 심벌 성상 및 결정경계(decision boundary)간 거리인 p, q로 정의한다. 항상계층 성상점과 기본계층 결정경계간 최소거리를 p, 기본계층 중심축과 항상계층 성상점간 최소거리를 q로써 정의하고, p와 q의 거리 비율을 다음과 같이 계층변조지수 α로 정의한다.

$$\alpha = \frac{p}{q} \tag{1}$$

한편 계층변조지수(α)의 변화에 따른 계층변조의 성상도를 구하기 위하여 p, q는 식 (2), (3)으로써 나타낸다. 여기서 β는 정규화 상수이다.

$$p = \frac{\alpha}{\sqrt{\beta}(1 + \alpha)}, \beta = 42 \tag{2}$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{\beta}(1 + \alpha)}, \beta = 42 \tag{3}$$

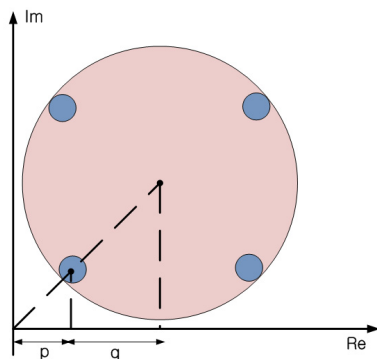


그림 6. 심벌 성상 간 최소거리
Fig. 6. Minimum Distance between Symbol Constellations

식 (1)~(3)을 이용하여 계층변조 지수(α)의 변화에 따른 심벌 성상 간 최소거리를 파악하며, 지수(α)가 1인 경우 균일 256-QAM, 무한히 커질수록 균일 64-QAM의 성상도로 수렴하는 결과를 도출할 수 있다.

III. 비트오류율(BER)의 유도

3.1. AWGN 환경에서 기본계층 비트오류율 수학적 모델

차세대 지상파 디지털 방송의 보편성을 유지하면서 안정적인 서비스를 제공하기 위해서는 단일주파수방송망 내 전송 환경에 따라 적정 계층변조지수(α)를 선택해야 한다. 이에 본 절에서는 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 환경에서 Q-함수를 이용하여 계층변조지수(α)에 따른 비트오류율의 수학적 모델을 도출한다.

비균일 256-QAM의 비트 오류는 심벌 간 거리 및 가우시안 분포도를 기준으로 해당 심벌의 정확한 검출 영역을 선택하고, 좌우로 분포되는 비트 오류율에 대한 수학적 정리를 통하여 공식화 한다. 이때 검출 영역 및 오류 영역을 구분 짓는 중요한 요소로써 앞서 II장 2절에서 설명한 심벌 간 최소거리 p, q를 사용한다. 이는 계층변조지수(α)에 따라 심벌 간 거리가 변경되고, 성상 좌표 변화로 인하여 비트오류율 변화를 분석하기 위함이다.

Q-함수를 사용한 비트오류율 정의에 앞서 항상계층 매핑에서 거울 효과를 이용한 변형 매핑 적용을 통하여 전체 심벌 간 그레이 부호 규칙이 성립됨을 보인바 있다. 이는 계층변조를 통하여 형성된 비균일 256-QAM에서 인근 심벌 비트 간 1비트 차이를 유지함을 의미한다. 그레이 부호 규칙 하에 잡음에 따른 비트 오차 경우의 수를 제약 할 필요가 있다. 본 논문에서는 성상도 상 2비트 오차의 경우까지 고려하였고, 모든 심벌에서 그림 7과 같이 상하좌우 영역로의 1비트 오차와 2비트 오차, 대각선 2비트 오차의 경우를 바탕으로 수학적 모델을 제시한다.

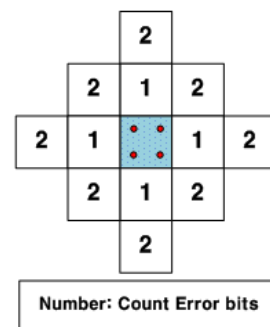


그림 7. 기본계층(HP)에서 오류 비트 수
Fig. 7. Amount of Error Bits in HP Area

기본계층의 경우 영역 안 4개의 심벌로 구성되어 있어, 각 심벌의 비트오류율을 계산하여 조합함으로써 기본계층 영역의 비트오류율을 결정하게 된다. Q-함수 적용을 위해서는 그림 8과 같이 경계에 따른 영역 할당이 수반되어야 한다. 그림 8은 기본계층 영역 안 1개 심벌의 검출 영역, 오류 영역을 도시한 예

이다. 기본계층 영역 표적 심벌을 중심으로 동일 기본계층 영역(2q + 2p 구간: 백색 영역) 경계까지의 구간이 검출 영역이며 좌우로 분포되어진 영역이 앞서 고려한 1비트, 2비트 오류율 영역을 의미한다.

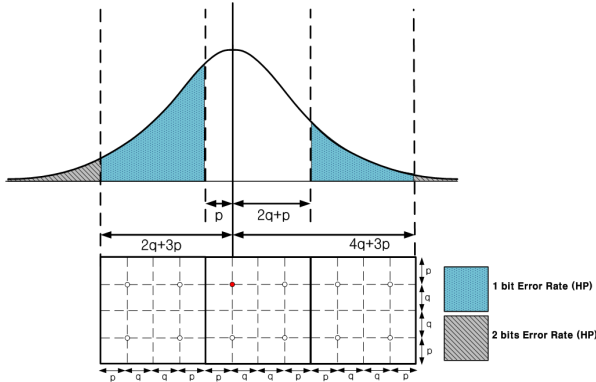


그림 8. 가우시안 분포에서 기본계층(HP) 비트 오류율
Fig. 8. Bit Error Rate of HP in Gaussian Distribution

가우시안 분포의 경계를 이용한 방법을 통하여 각각의 기본계층 영역 비트 오류율에 대한 정의를 도출한다. 본 논문에서 제시한 비균일 256-QAM은 64개의 기본계층 영역이 생성된다. 그림 9와 같이 64개의 영역 중 동일 비트 오류율을 가지는 영역별 구분이 가능하다. 동일 오류율 그룹화 분석으로 6개의 그룹으로 분리되는 결과를 갖고 이를 바탕으로 그룹별 비트 오류율은 Q-함수 도입을 통하여 수학적 모델로써 식 (4)를 제시한다.

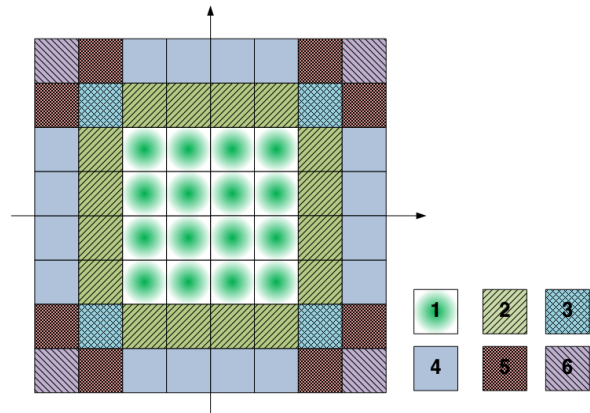


Fig. 9. Distribution Map of Same Error Rate Areas in HP
그림 9. 기본계층(HP)에서 동일 오류율 영역 분포도

$$N_0 = 10^{\frac{SNR[dB]}{10}}$$

$$A = Q\left(\sqrt{\frac{2(2q+p)^2}{N_0}}\right) \quad B = Q\left(\sqrt{\frac{2(4q+3p)^2}{N_0}}\right)$$

$$C = Q\left(\sqrt{\frac{2(p)^2}{N_0}}\right) \quad D = Q\left(\sqrt{\frac{2(2q+3p)^2}{N_0}}\right)$$

$$P(E|1) = \frac{1}{3} \{A+B+C+D+(A-B)^2 + (C-D)^2 + 2(A-B)(C-D)\}$$

$$P(E|2) = \frac{1}{12} \{4A+2B+4C+3D+2(A-B)^2 + 2(C-D)^2 + 4(A-B)(C-D) + 2(A+C)(A-B+C-D)\}$$

(4)

$$P(E|3) = \frac{1}{12} \{4A+2B+4C+2D+(A-B)^2 + A^2 + (C-D)^2 + 2(A-B)(C-D) + C^2 + 2AC + 2(A+C)(A-B+C-D)\}$$

$$P(E|4) = \frac{1}{12} \{3A+3B+3C+3D+2(A-B)^2 + 2(C-D)^2 + 4(A-B)(C-D)\}$$

$$P(E|5) = \frac{1}{12} \{3A+3B+3C+3D+(A-B)^2 + (C-D)^2 + (A-B)(C-D) + (A+C)(A-B+C-D)\}$$

$$P(E|6) = \frac{1}{12} \{2A+2B+2C+2D+(A-B)^2 + (C-D)^2 + 2(A-B)(C-D)\}$$

식 (4)에서 정리한 6개 영역의 비트 오류율을 기본계층 전체 영역에 적용하여 최종 기본계층 비트오류율을 식 (5)와 같이 정의 할 수 있다.

$$P_E = \left\{ \frac{1}{4}P(E|1) + \frac{1}{4}P(E|2) + \frac{1}{16}P(E|3) + \frac{1}{4}P(E|4) + \frac{1}{8}P(E|5) + \frac{1}{16}P(E|6) \right\} \quad (5)$$

그림 10은 AWGN에서 이론적 64-QAM 비트 오류율, 계층변조 지수(a)가 ∞(모의실험 a=10²⁰⁰)일 때 기본계층 비트오류율의 측정치와 식(5)에서 모델링한 이론치를 비교한 그래프이다. 3개의 그래프 모두 일치하는 결과를 얻었으나, 수학적 모델의 비트 오류율 오차는 모델링 과정에서 모든 비트 오류의 고려가 아닌 2비트 오류에 한정된 과정에서 발생한 오차로 판단할 수 있다.

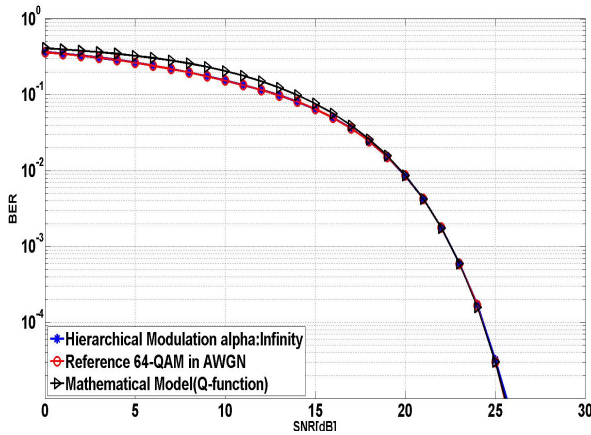


그림 10. 비트 오류율(기본계층)
Fig. 10. Bit Error Rate(HP)

3.2. AWGN 환경에서 향상계층(LP) 적용 비트 오류율 수학적 모델

1절에서 기본계층의 성상 구조에 따른 가우시안 분포 조건에서의 비트오류율을 분석하였다. 본 절에서는 향상계층이 삽입된 비트오류율을 수학적 모델로써 제시한다.

향상계층에 삽입된 비트는 기본계층과 마찬가지로 비트 오차 경우의 수 제한이 필요하다. 이에 오차 고려 조건을 그림 11과 같이 상하 좌우 1비트와 2비트 오차영역, 대각선 2비트 오차 역역으로서 정의 한다. 향상계층이 삽입 된 영역은 8비트 구성의 1개 심벌이 존재한다. 이는 기본계층 영역의 동일 비트 성분(6비트)을 가지는 4개의 심벌 존재와 구분되며, 동일 오류 영역 심벌들의 비트 오류율 조합이 아닌 단일 심벌로써 영역 비트 오류율 정의를 의미한다.

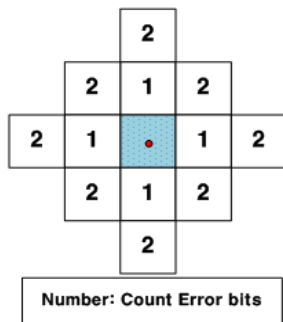


그림 11. 기본계층(HP)+향상계층(LP)에서 오류 비트 수
Fig. 11. Amount of Error Bits in HP+LP Area

그림 12는 향상계층이 삽입된 비균일 256-QAM 심벌의 비트 검출 영역, 오류 영역을 가우시안 분포도에 도시한 예이다. 향상계층을 포함한 비균일 256-QAM 비트 오류율의 수학적 모델링을 위해서는

그림 12와 같이 가우시안 구간 영역 선택 과정이 요구된다. 표적 심벌을 중심으로 동일 향상계층 삽입 영역($p + q$ 구간: 백색 영역) 경계까지는 정확한 검출 영역이며, 좌우 분포된 영역은 기본계층의 경우와 같이 1비트, 2비트 오류율 영역을 의미한다.

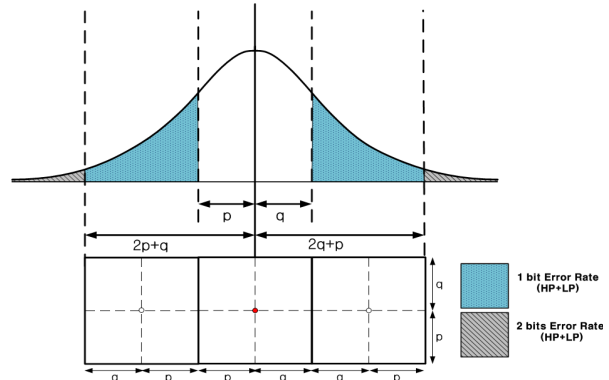


그림 12. 가우시안 분포에서 기본계층(HP)+향상계층(LP) 비트 오류율
Fig. 12. Bit Error Rate of HP+LP in Gaussian Distribution

향상계층이 삽입 된 경우 기본계층의 64개 영역에 확장된 256개의 영역이 생성된다. 이 영역 안에서 심벌 좌표는 계층변조 지수(α)에 따라 변화 하며, 동일 비트오류율을 가지는 영역별 분리가 가능하다. 그림 13은 향상계층이 삽입된 동일 비트오류율 영역 그룹화 결과를 도시한 것이다. 그림 13과 같이 그룹화 결과 6개의 그룹으로 분리되고, 이를 바탕으로 그룹 별 비트오류율은 Q-함수를 이용한 수학적 모델로써 식 (6)과 같이 정리할 수 있다.

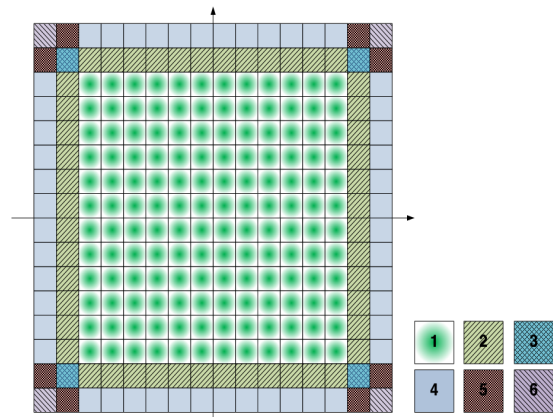


그림 13. 기본계층(HP)+향상계층(LP)에서 동일 오류율 영역 분포도
Fig. 13. Distribution Map of Same Error Rate Areas in HP+LP

$$N_0 = 10^{-\frac{SNR[dB]}{10}}$$

$$A = Q\left(\sqrt{\frac{2(p)^2}{N_0}}\right) \quad B = Q\left(\sqrt{\frac{2(2p+q)^2}{N_0}}\right)$$

$$C = Q\left(\sqrt{\frac{2(q)^2}{N_0}}\right) \quad D = Q\left(\sqrt{\frac{2(2q+p)^2}{N_0}}\right)$$

$$P(E|1) = \frac{1}{4}\{A+B+C+D+(A-B)^2 + (C-D)^2 + 2(A-B)(C-D)\}$$

$$P(E|2) = \frac{1}{8}\{2A+2B+2C+D+2(A-B)^2 + 2(A-B)(C-D) + 2C(C-D)+2C(A-B)\} \quad (6)$$

$$P(E|3) = \frac{1}{4}\{A+B+C+(A-B)^2 + C^2 + 2C(A-B)\}$$

$$P(E|4) = \frac{1}{8}\{A+B+2C+2D+2(C-D)^2 + 2(A-B)(C-D)\}$$

$$P(E|5) = \frac{1}{8}\{A+B+2C+D+2C(C-D) + 2(A-B)(C-D)\}$$

$$P(E|6) = \frac{1}{4}\{C+D+(C-D)^2\}$$

식 (6)과 같이 모델링된 신호 대 잡음비에 따른 6개 영역의 비트오류율을 향상계층이 삽입된 비균일 256-QAM 전체 영역에 적용하여 최종 비트오류율을 식 (7)과 같이 정의 할 수 있다.

$$P_E = \left\{ \frac{9}{16}P(E|1) + \frac{3}{16}P(E|2) + \frac{1}{64}P(E|3) + \frac{3}{16}P(E|4) + \frac{1}{32}P(E|5) + \frac{1}{64}P(E|6) \right\} \quad (7)$$

그림 14는 AWGN에서 이론적 균일 256-QAM 비트 오류율, 계층변조 지수(α)가 1 일 때 비균일 256-QAM 비트오류율 측정치와 식 (7)에서 모델링된 이론치를 비교한 그래프이다. 3개의 그래프가 거의 일치하는 결과를 얻었으나, 수학적 모델의 비트오류율에서 발생한 근소한 오차는 모델링 과정에서 모든 비트 오류의 고려가 아닌 2비트 오류에 한정된 과정에서 발생한 오차이다.

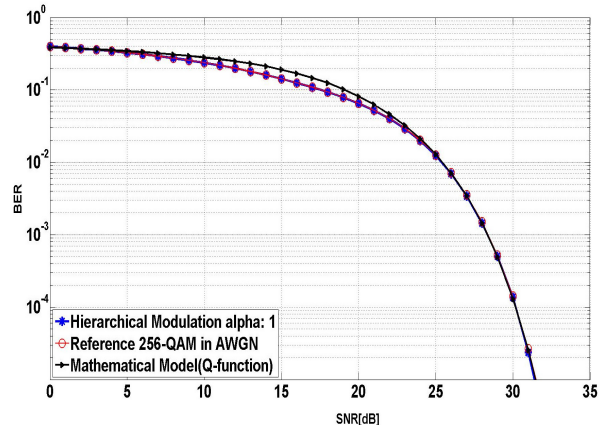


그림 14. 비트 오류율(기본계층+향상계층)
Fig. 14. Bit Error Rate(HP+LP)

3.3. 계층변조 지수(α)에 따른 비트오류율 모의실험

1, 2절에서 제시한 계층 별 비트오류율의 수학적 모델을 바탕으로 계층변조 신호의 계층변조지수(α)에 따른 수신성능 분석을 위한 모의실험을 수행하였다. 이때 수신 성능 비트오류율 5% 기준에 인접한 신호 대잡음비를 고려하였으며, 계층변조지수(α)는 1에서 증가하여 10까지 제한하였다.

그림 15는 계층변조지수(α) 변화에 따른 계층변조 신호의 수신성능 그래프이다. 기본계층의 그래프는 계층변조지수(α)의 증가에 따라 오류율이 점차 감소하지만, 향상계층을 포함한 비균일 256-QAM 비트오류율은 점차 증가한다. 이는 계층변조지수(α)가 증가함에 따라 향상계층 심벌이 기본계층 심벌을 중심으로 정상 좌표가 모이면서 기본계층 검출 영역 경계로부터 멀어지게 되지만, 기본계층 심벌에 근접한 향상계층 검출 영역에 근접하게 되기 때문이다.

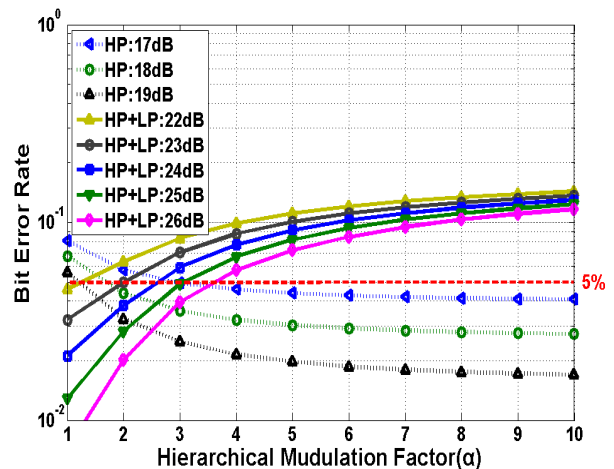


그림 15. 계층변조 지수(α) & 신호 대 잡음비에 따른 비트 오류율
Fig. 15. Bit Error Rate according to Hierarchical Modulation Factor(α) & SNR

IV. 계층변조 지수(α)에 따른 방송권역 분석

4.1. 계층변조 지수(α)에 따른 수신 방송권역

계층변조 적용시의 수신 신호대잡음비와 계층변조 지수(α) 변화에 따른 수신성능 변화를 III장에서 확인하였다. 신호대잡음비 변화에 따른 수신성능 변화는 방송권역 내 수신기 위치에 따른 수신신호 크기 변화와 밀접한 관련이 있다. 그러므로 적정한 계층변조를 위해서는 방송권역 내 전송환경에 맞는 계층변조 지수(α) 선정이 매우 중요하다. 이에 Log-distance 경로 손실모델을 적용하여 방송권역 내 수신 신호대잡음비와 계층변조지수(α) 변화에 따른 각 계층별 방송권역 변화를 분석하였다.

그림 16은 Log-Distance 경로 손실 모델을 도시한 것으로써 송신 안테나 부근에서는 높은 수신 신호대잡음비를 보이고 수신 안테나가 송신 안테나와 멀어질수록 낮은 수신 신호대잡음비를 보이는 것을 의미한다. d_0 는 자유공간 경로 손실로 표현할 수 있는 Log-Distance 경로 손실 모델의 기준거리, d 는 송신 안테나와 수신 안테나간 거리이다.

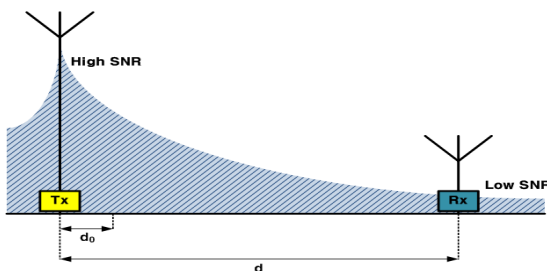


그림 16. SISO Log-Distance 경로 손실 모델
Fig. 16. SISO Log-Distance Path Loss Model

송신 안테나의 전력 손실을 Log-Distance 경로 손실 모델에 적용하면 식 (8), (9)와 같다.

$$PL_F(d_0)[dB] = 10\log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = -10\log\left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^2}\right) \quad (8)$$

$$PL_{LD}(d_0)[dB] = PL_F(d_0)[dB] + 10n\log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (9)$$

$PL_F(d_0)$ 는 자유 경로 손실, $PL_{LD}(d)$ 은 Log-Distance 경로 손실을 나타내며 P_t , P_r , G_t , G_r , λ , n 은 각각 송신 전력, 수신 전력, 송신 안테나 이득, 수신 안테나 이득, 파장, 경로 손실 지수이다.

Log-Distance 경로 손실을 모델링하기 위하여 단일 송·수신 안테나, d_0 는 1km, d 는 50km 까지, 경로 손

실 지수 3.5, 송신 전력을 60 dBm, 잡음 전력 -97 dBm을 적용하였으며, 그림 17은 모델에 근거하여 송신 안테나로부터의 거리에 따른 수신 신호대잡음비 분석 결과를 도시한 것이다.

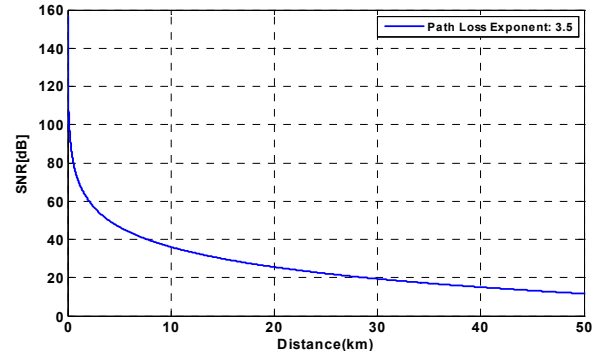


그림 17. Log-Distance 경로 손실 모델 시뮬레이션 결과
Fig. 17. Log-Distance Path Loss Model Simulation result

III장 3절 그림 15의 결과를 이용하여 표적 계층변조 지수(α)에서 수신 성능 비트오류율 5% 기준에 가장 근접한 신호대잡음비를 각 계층별(HP, HP+LP)로 찾아낸다. 표적 계층변조지수(α)에서의 조건 신호대잡음비가 결정되면 Log-Distance 경로 손실 모델 그림 17의 y축에 대응되는 유효 신호 대 잡음비(Effective SNR)을 찾고 해당 거리를 구하게 된다. 결정된 거리는 적정 계층변조지수(α)에서 수신 성능 비트오류율 5% 이하의 조건을 만족하는 계층별 방송권역을 의미한다. 그림 18은 앞선 과정을 수행하여 계층변조지수(α)에 따라 조건을 만족하는 각 계층별 방송권역 변화를 도시한 결과이다.

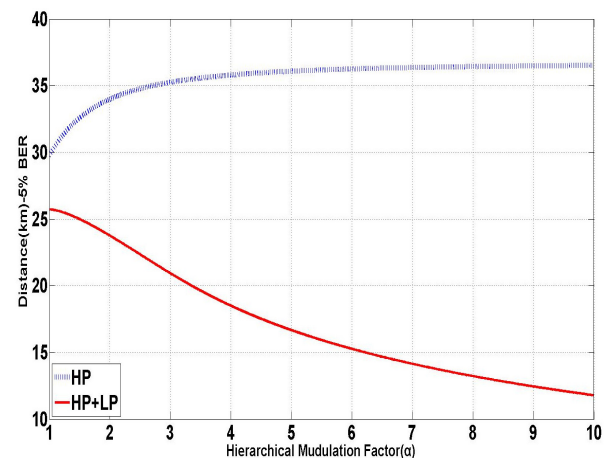


그림 18. 지수(α)에 따른 방송권역 변화 (5% 비트 오류율)
Fig. 18. Change of Coverage Distance according to Factor(α) (5% BER)

4.2. 계층변조 지수(α) 선정 기준

그림 18의 결과를 살펴보면, 기본계층 영역에서 비트 오류율 5% 조건에서 계층변조지수(α)가 무한히 증가함에 따라 방송권역 거리는 36.7km 로 수렴한다. 이는 모의실험 조건에서 낮은 신호대잡음비 지역에서 최소 수신 성능 보장 거리를 의미한다. 높은 신호대잡음비 지역에서 최대 수신 성능 보장 거리를 선정하기 위해서 계층변조지수(α)가 선정되어야 한다. 하지만 그림 18에서처럼 계층변조지수(α)의 변화에 두 계층 간 방송권역 거리는 반비례 관계이기에 두 계층 모두 증가 또는 감소를 만족하는 지수(α)의 선정에 어려움이 있다. 이에 본 논문에서 적정 계층변조지수(α) 선정을 위하여 최소 수신 성능 보장 거리 (36.7km) 대비 기본계층의 방송권역 감소율에 따른 낮은 신호대잡음비 지역 수신 성능 보장 거리를 선정하고, 해당 지수(α)에 따른 향상계층이 삽입된 높은 신호대잡음비 지역의 방송권역 거리를 표 1을 통하여 제시한다.

표 1. 계층변조 지수(α) 선정 기준
Table 1. Basis of Hierarchical Modulation Factor(α)'s selection

HP coverage decreasing rate via $\alpha=\infty$ (64-QAM) distance	Distance (km) HP	α	Distance (km) HP+LP	$\frac{HP+LP}{HP}$
0%	36.7	∞	-	-
10%	33.03	1.63	24.69	75%
11%	32.65	1.52	24.95	76%
12%	32.3	1.43	25.14	78%
13%	31.94	1.35	25.29	79%
14%	31.54	1.27	25.43	81%
15%	31.2	1.21	25.52	82%

지수(α) 선정의 예로써, 최소 수신 성능 보장 거리 36.7km에서 15% 감소 된 31.2km의 기본계층이 수신되는 낮은 신호 대 잡음비 지역 수신 거리를 결정한다. 이때의 적정 계층변조 지수(α)는 1.21이며 비균일 256-QAM 수신 이 보장되는 높은 신호대잡음비 지역 수신 거리는 25.52km가 된다. 최소 수신 성능 보장 거리의 축소를 감수하여 최대 수신 성능 보장 거리를 확장시키게 되며 본 논문의 제시 방법을 이용하여 환경 및 조건에 따라 적정 계층변조지수(α)를 선정 할 수 있다.

V. 결 론

차세대 지상파 디지털 방송 시스템에 증가된 유효 데이터 전송률을 제공하고, 전계 강도가 높은 지역에 고품질 서비스를 제공하기 위하여 계층변조 기법을 소개하였다. 계층변조 적용에 있어 다양한 요소들이 송·수신 성능 결과에 반영되지만, 심벌 성장간 거리의 비인 계층변조지수(α)의 선택에 따른 수신 성능의 변화폭이 매우 크므로 적절한 계층변조지수(α)의 선정을 위한 근거가 제시되어야 한다. 이에 본 논문에서는 AWGN환경에서의 Q-함수 기반 비트오류율 해석 및 log-distance 경로손실 모델을 이용한 방송권역 분석을 통하여 계층변조지수(α) 선택의 이론적 근거를 제시하였다.

비트오류율 5% 조건을 기준으로 계층변조 지수(α)에 따른 각 계층 별 방송권역을 분석한 모의실험 결과는 비트오류율 5% 조건에서 계층변조지수(α)의 증가에 따라 기본계층의 방송권역 거리가 36.7km로 수렴하게 됨을 보였으며, 이 수렴값을 기반으로 기본계층의 방송권역 감소율(10~15%)을 선정하고, 이때의 계층변조지수(α)의 값(1.63~1.21)과 확장된 향상계층이 삽입된 방송권역 거리(24.69~25.52km)를 선정할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 제시하는 수학적 모델을 기반으로 한 계층변조지수(α) 선정 방법을 통하여 기존 시스템 적용 및 향후 고품질 서비스 제공을 위한 계층변조 기법 도입에 있어 특정 조건 및 환경에 따른 적정 계층변조지수(α)를 선정할 수 있을 것이라 예상된다.

참 고 문 헌

[1] ATSC Digital Television Standard, Doc, A/53, Part 1~6, Jan, 2007.
 [2] J. Kim, E. S. Kang, C. H. Lim, D. S. Han, "Performance Analysis of Hierarchical Modulation based on DQPSK," *Korean Society of Broadcast Engineers Conference*, pp. 165-168, Nov. 2006.
 [3] Digital Audio Broadcasting (DAB): DMB video service, User Application Specification, ETSI TS 102 428, Jun. 2005.
 [4] DVB Terrestrial: Hierarchical modulation, DVB Project, <http://www.dvb.org/>, Mar. 2000.
 [5] D. C. Shin, J. K. Kim, J. W. Lee, S. Y. Lee, J. M. Ahn, "Hierarchical Modulation Scheme

to Assure Environmental and Adaptive Receive Rate of Terrestrial 3D HDTV in SFN," *2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics(ICCE)*, Feb. 2012.

- [6] H. Jiang, P. A. Wilford, "A Hierarchical Modulation for Upgrading Digital Broadcast Systems," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol 51, No.2, Jun. 2005.
- [7] G. S. Lee, J. S. Lim, S. I. Lee, "Technique of Advanced T-DMB," *Information and Communications Magazine*, vol 25, No.4, pp. 56-61, Apr. 2008.
- [8] S. J. Lee, S. W. Lee, K. T. Yang, J. S. Lim, "Study on the Performance of Hierarchical Modulation for AT-DMB System," *Journal of Broadcast Engineering*, Vol 14, No.4, pp. 509-517, Jul. 2009.
- [9] R. E. Ziemer, W. H. Tranter, *Principle of Communications (System Modulation and Noise)-Fifth Edition*, JOHN WILEY & SONS, INC., pp. 334-335, 2002.
- [10] Y. S. Cho, J. W. Kim, W. Y. Yang, C. G. Kang, *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*, WILEY, pp. 4-5, 2010.

이 성 윤 (Sungyoon Lee)



2011년 2월 충남대학교 전자전파정보통신공학부 졸업
 2011년 3월~현재 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사과정
 <관심분야> 차세대 이동통신, OFDM 이동통신

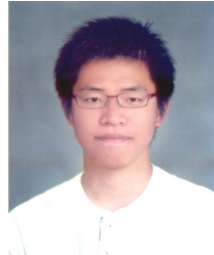
김 재 길 (Jae-kil Kim)



2009년 2월 충남대학교 전자전파정보통신공학부 졸업
 2011년 2월 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사
 2011년 3월~현재 충남대학교 전자전파정보통신공학과 박사과정

<관심분야> 차세대 이동통신, 지상파 DTV, 위성항법시스템

이 제 원 (Jewon Lee)



2011년 2월 충남대학교 전자전파정보통신공학부 졸업
 2011년 3월~현재 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사과정
 <관심분야> 차세대 이동통신, OFDM 이동통신

윤 선 희 (Seonhui Yun)



2006년 2월 충남대학교 전자전파정보통신공학부 졸업
 2008년 2월 충남대학교 정보통신공학과 석사
 2008년~2012년 한국전자통신연구원 연구원
 2009년 3월~현재 충남대학교 전자전파정보통신공학과 박사과정
 <관심분야> 차세대 이동통신, 항재밍 알고리즘, 위성항법 시스템

안 재 민 (Jae Min Ahn)



1987년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업
 1989년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
 1994년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
 1994년~1999년 삼성전자 선임연구원
 2007~2008년 정보통신연구진흥원 차세대이동통신사업단장, 정보통신부 차세대 이동통신 PM
 1999년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부 교수
 <관심분야> 차세대 이동통신 물리계층 및 Radio Resource management