

# Cross QAM의 선택적 성좌점을 사용하는 EVM 기반 SNR 추정 성능

## EVM Based SNR Estimation Performance in Cross QAM Using Selected Constellation Points

곽재민\*

Jae-Min Kwak\*

### 요 약

본 논문에서는 ADSL, VDSL, DVB-C 등의 통신 시스템에 적용되고 있고, 적응변조나 blind equalization에서 유용하게 사용될 수 있는 Cross QAM의 SNR 추정 성능에 대해 분석하였다. 우선 레일리 페이딩 채널에서의 Cross QAM의 심볼에러율을 분석하였다. 그리고, Cross QAM의 성좌점에 대한 판정영역 특성에 착안하여, 성좌점별로 EVM 기반의 SNR 추정기법을 사용하는 것을 제안하고, 성좌점별로 SNR 추정성능이 다르게 나타남을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 시뮬레이션 결과로부터 Cross QAM에서 SNR 추정에 사용하는 성좌점을 선택적으로 사용하면, AWGN 채널이나 라이시안 페이딩 채널에서 추정성능을 개선할 수 있음을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, we investigate the signal to noise ratio (SNR) estimation performance of Cross quadrature amplitude modulation (QAM), which is being used for asymmetric digital subscriber line (ADSL), very high bit rate digital subscriber line (VDSL), and digital video broadcasting - cable (DVB-C), and has been found to be useful in adaptive modulation and blind equalization. At first, the symbol error rate (SER) performance of Cross QAM is analyzed in Rayleigh fading channel. Then we suggest error vector magnitude (EVM) based SNR estimation utilizing the selected constellation points having different types of decision region from one another, and verify that SNR estimation performance of each points have different performance pattern through simulation. From the simulation results, it has been found that when suggested selected constellation points are used for SNR estimation in Cross QAM, estimation performance is enhanced in additive white Gaussian noise (AWGN) channel or Ricean fading channel.

Key words : Cross QAM, Simulation, Estimation, SNR

### I. 서 론

QAM 변조방식은 한 심볼(symbol)에 포함되는 정

보비트의 수가 짝수개 일 때 일반적으로 정방형의 성좌점을 이용하게 되며 4QAM, 16QAM, 64QAM, 256QAM 등이 그 예이다. 이에 비해 Cross QAM은 한

\* 목포해양대학교 해양전자통신공학부(Division of Marine Electronics and Communication Eng., Mokpo National Maritime University)

· 제1저자 (First Author) : 곽재민

· 투고일자 : 2012년 4월 10일

· 심사(수정)일자 : 2012년 4월 12일 (수정일자 : 2012년 6월 8일)

· 게재일자 : 2012년 6월 30일

심볼을 이루는 비트의 수가 홀수개일 때, 즉 32QAM, 128QAM, 512QAM 등에서 선호되는 QAM 계열 변조 방식이다.

Cross QAM은 5~15비트로 한 심볼로 구성하는 형태로 ADSL, VDSL 등의 시스템에 사용되어왔고, DVB-C와 같은 디지털 비디오 방송시스템에도 적용되고 있으며, 최근의 연구에서는 적응변조나 blind equalization과 같은 기술에 유용하게 사용될 수 있는 것으로 알려져 있다.

참고문헌 [1]에서는 심볼당 비트수가 홀수개 일때 Cross QAM을 사용하면 Rectangular QAM에 비해 피크전력(peak power)과 평균전력(average power) 모두 감소시킬 수 있으며 1dB이상의 평균 SNR 이득이 발생함을 보였다. 또한, 최근의 많은 연구가 이루어지고 있는 적응변조기술을 이용하는 시스템에 QAM 계열의 통신방식을 적용하는 경우 채널 품질에 따라 성상도의 크기를 변화시켜 전송속도를 적응시키게 되는데, Square QAM 만을 사용하게 되면 세밀한 성상도 크기 조절이 이루어지지 않게 된다. 따라서 Cross QAM을 도입함으로써 SNR의 이득뿐만 아니라 채널 품질에 보다 효과적으로 대응시켜 전체적인 쓰루풋(throughput)을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다 [2],[3]. 이러한 Cross QAM의 유용성에도 불구하고 최근에는 정확한 심볼에러 확률이 이론적으로 유도되었다[4],[5].

한편, 앞에서 언급한 적응변조시스템과 같은 링크 적응기술이 필요한 시스템에서는 SNR 추정기술은 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 채널이 시간에 따라 변동하는 무선 통신 시스템에서는 추정된 SNR에 따라 변조기법과 채널 부호화율을 결정하여 쓰루풋을 극대화할 수 있도록 적절한 파라미터를 설정해야 한다.

기존의 논문들에서 연구된 QAM 방식에서의 SNR 추정방식은 크게 두가지로 나뉜다. 첫 번째는 송·수신기 사이에 미리 정해 놓은 특정 훈련심볼열을 이용하는 방법, 두 번째는 특정 심볼에 대한 정보없이 성좌점 상에서 실제 수신된 값과 수신신호로부터 판정된 심볼 값과의 에러, 즉 EVM을 이용한 DD (Decision Directed)방식이다[6]. 이와 관련된 기존의 논문들에서는 Cross QAM 방식에서의 SNR 추정에

대한 연구는 진행되지 않았다.

본 논문에서는 개념적으로 간단한 EVM을 이용하는 DD 방식을 기반으로 하여 Cross QAM 시스템에서 성좌점들 별로 판정영역의 특성이 다른 점을 고려하여 EVM 특성이 다르게 나타나게 되므로 이를 고려한 SNR 추정 성능에 대해 다룬다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 II장에서 Cross QAM의 성좌점별 판정영역의 특성이 어떻게 다른지에 대해 설명하고 레일리 페이딩 채널에서의 심볼에러 확률에 대한 유도과정을 참고문헌 [5]에 근거하여 설명한다. III장에서는 Cross QAM 방식에서의 EVM 기반 SNR 추정기법에 대해 설명하고, IV장에서 수치해석 및 시뮬레이션 결과를 제시하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. Cross QAM의 판정 영역 특성과 심볼에러확률

Cross QAM에서는 일반적인 Square QAM이나 Rectangular QAM 방식과는 다른 성좌도로 표현되며, 이에 따라 세가지 형태의 독특한 판정영역을 나타내게 된다.

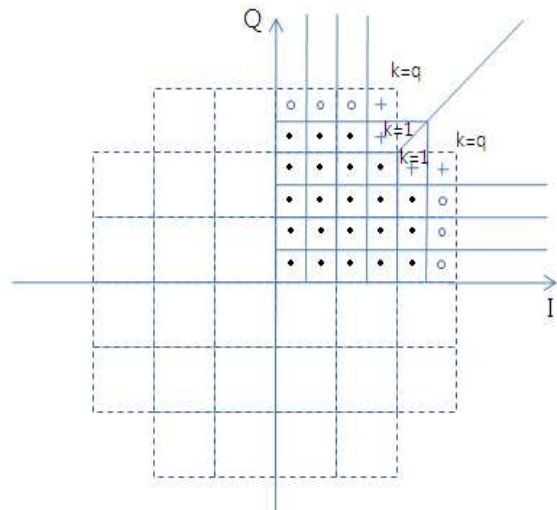


그림 1. 128 Cross QAM 성좌도(q=2)와 판정경계  
Fig. 1. Constellation diagram and decision boundaries of 128 Cross QAM(q=2).

그림 1에 128 Cross QAM의 성좌도 예를 보인 바

와 같이 32 포인트 이상의 M-ary Cross QAM의 정상도는 6×6의 정방형 블록들 중에서 4개의 모서리 블록들이 삭제된 형태로 볼 수 있으며 각각의 블록들은  $q^2 = M/32$ 개의 균일하게 분포하는 성좌점들로 구성되어 있다. 그림 1을 살펴보면 3가지 형태의 서로 다른 판정영역을 가지는 성좌점들로 구분할 수 있으며 각각 검은점, 흰점, +점으로 구분하였고 실선으로 판정경계들을 구분하여 1사분면에 대해서만 예를 들어 나타내었다.

송신신호를  $s$ , 채널의 페이딩 계수를  $c$ , 잡음을  $n$ 이라 할 때 주파수 비선택성 레일리 페이딩 채널에서 샘플링 시점의 수신신호  $r$ 은 다음 식과 같다.

$$r = cs + n \tag{1}$$

이때, 페이딩 계수  $c$ 와 잡음  $n$ 은 각각 평균이 0인 복소 가우시안 확률밀도함수를 가지며, 페이딩 계수의 실수성분과 허수성분에 대한 분산은  $\sigma_c^2$ , 잡음의 실수성분과 허수성분의 분산은  $\sigma_n^2 = N_0/2$ 이다.

수신기에서 채널정보를 알고 있다면, Zero forcing 등화 후 판정 디매퍼(demapper)의 입력신호는 다음과 같다.

$$\hat{s} = r/c = s + z \tag{2}$$

여기서,  $z$ 는 실수성분이  $x_z$ 이고 허수성분이  $y_z$ 인 복소수가 되며 Jacobian 변환을 통해 다음과 같은 가우스 분포 형태가 아닌 결합 확률밀도함수를 갖는다.

$$p_z(x, y) = \frac{\sigma_n^2}{\pi\sigma_c^2(\sigma_n^2/\sigma_c^2 + x^2 + y^2)^2} \tag{3}$$

최종적으로 식(3)의 결합확률밀도함수를 이용하여 레일리 페이딩 채널에서의 M-ary Cross QAM의 독특한 판정영역을 고려한 정확한 평균 심볼에러확률은 다음 식으로 유도될 수 있다[5].

$$P_{ser}(M) = 1 - \frac{1}{M} \left( 1 + 2q\lambda_q + (8q-2)\lambda + (M-12q+3)\frac{4}{\pi}\lambda\tan^{-1}(\lambda) + \frac{8}{\pi}\lambda\sum_{k=1}^{q-1}\tan^{-1}((2k+1)\lambda) + \frac{4}{\pi}\sum_{k=1}^{q-1}k\lambda_k\tan^{-1}((k+1)\lambda_k) - \frac{4}{\pi}\sum_{k=1}^qk\lambda_k\tan^{-1}((k-1)\lambda_k) \right) \tag{4}$$

여기서,  $\lambda$ 와  $\lambda_k$ 는 각각 다음과 같다.

$$\lambda = \sqrt{\frac{48SNR}{31M-32+48SNR}}$$

$$\lambda_k = \sqrt{\frac{96SNR}{31M-32+96k^2SNR}}, \quad k = 1, 2, \dots, q. \tag{5}$$

식 (4)와 식 (5)를 이용하여 그림 2와 같이 레일리 페이딩 채널에서의 Cross QAM 변복조방식의 SER 성능그래프를 그림2와 같이 구할 수 있다.

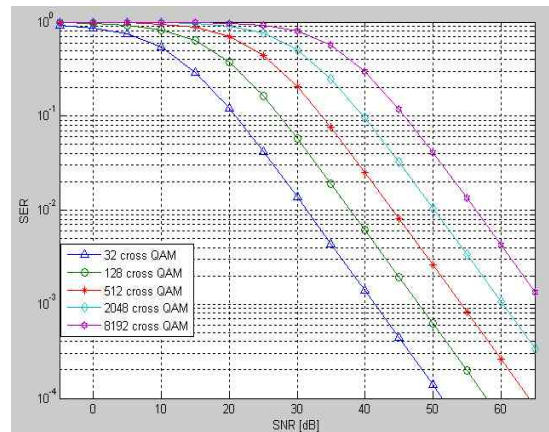


그림 2. 레일리 페이딩 채널에서 Cross QAM의 심볼에러확률(M=32, 128, 512, 2048, 8192)  
Fig. 2. SER of cross QAM in Rayleigh fading channel(M=32, 128, 512, 2048, 8192)

Cross QAM에서 심볼당 비트수가 2개씩 증가됨에 따라 M값이 32에서 128, 512, 2048, 8192 등의 순서로 증가되며, 이때 한 심볼당 비트수는 각각 5, 7, 9, 11, 13에 대응된다. 레일리 페이딩 채널에서 Cross QAM을 사용하는 경우 10-3의 SER을 기준으로 살펴본다면 비트 수가 2개씩 증가함에 따라 대략적으로 7dB

정도의 SNR이 추가적으로 요구됨을 알 수 있다. 이러한 성능 그래프로부터 채널환경에 따라 특정성능을 달성하기 위해 요구되는 SNR Table을 만들 수 있으며, 이에 따라 적응변조를 적용하는 경우 채널품질에 따라 SNR 추정을 통해 변조레벨을 변화시켜 쓰루풋을 증가시킬 수 있게 된다. 다음 장에서는 이러한 SNR 추정기법중의 하나로 EVM 기반의 DD방식으로 SNR을 추정하는 방법에 대해 알아보고 Cross QAM에서의 선택적 성좌점별 추정성능을 검토해 본다.

### III. EVM 기반의 SNR 추정기법

송·수신기에서 QAM 계열의 변·복조방식을 채용하는 경우, 수신기에서 수신신호를 판정한 후의 성좌점과 이를 기준으로 실제 페이딩과 잡음을 거쳐 수신된 신호의 복소 값을 비교하여 에러벡터를 구하는 EVM을 통해 SNR을 추정할 수 있다. 그림 3에서 32 Cross QAM을 채용하는 경우의 예를 들어 1 사분면에 대한 성상도와 EVM의 개념을 보여주고 있다.

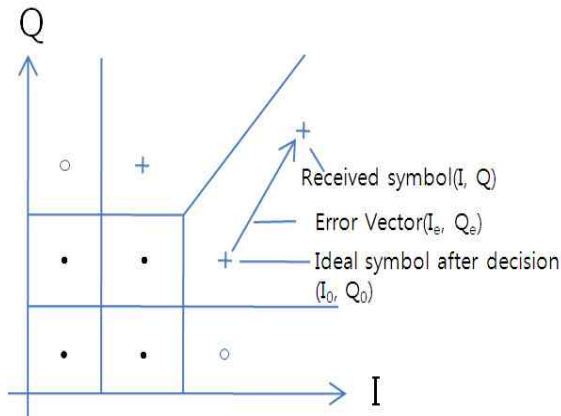


그림 3. Cross QAM에서의 EVM 개념 (M=32)  
Fig. 3. Concept of EVM in Cross QAM (M=32)

그림 3에서  $(I_0, Q_0)$ 는 수신기에서 수신한 신호로부터 판정한 후의 이상적인 성좌점이고,  $(I, Q)$ 는 실제 채널을 통해 수신된 신호의 복소 벡터값이며,  $(I_e, Q_e)$ 는 수신된 복소 벡터값에서 판정한 성좌점의 복소 값의 차이를 나타내는 에러벡터이다. 판정 후에 결정되는 이상적인 경우의 각 성좌점에 해당하는 심볼들에 비해 실제 수신된 심볼의 성좌점은 잡음과 페

이딩의 영향으로 에러벡터만큼 어긋나게 수신된다. 이러한 에러벡터를 계산하여 평균심볼 전력과의 비를 구함으로써 SNR을 추정할 수 있게 된다.

Cross QAM의 각 성좌점들의 평균 심볼 전력값을  $P_0$ 라고 하면, 정규화된 RMS에러는 다음과 같이 정의된다[7].

$$Error_s = \sqrt{\frac{I_e^2 + Q_e^2}{P_0}} = \sqrt{\frac{(I - I_0)^2 + (Q - Q_0)^2}{P_0}} \quad (6)$$

식 (6)에 대해 역수를 취하면 식 (7)과 같이 SNR의 추정치  $\widehat{SNR}$ 을 구할 수 있다.

$$\widehat{SNR} = 1/ Error_s^2 = \frac{P_0}{(I - I_0)^2 + (Q - Q_0)^2} \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)에 서술된 수식을 이용하여 DD 방식의 EVM 기반 SNR 추정이 가능하다. 식 (7)의 수식은 하나의 수신 복소 샘플에 대한 SNR 추정치이므로 실제 평균 SNR을 추정하기 위해서는 가능한 많은 수 (N)의 샘플로 SNR을 추정하여 평균을 취해주어야 한다.

이러한 DD 방식의 EVM을 이용하는 경우, 페이딩과 잡음의 영향이 심하여 수신된 심볼 성좌점이 이상적인 경우의 성좌점의 판정영역을 벗어나게 되는데, 이때에는 송신 심볼과 다른 심볼로 판정되어 기준 성좌점을 다른 것으로 간주하게 되고, 판정에러가 발생하게 된다. 따라서 채널 환경이 열악한 경우에는 잘못된 기준 성좌점을 기준으로 에러벡터를 계산하게 되므로 실제 SNR과 추정된 SNR의 차이가 커지게 된다.

이러한 EVM 방식의 추정개념을 고려하면 그림 3의 Cross QAM 성좌도에서 +로 표시된 성좌점의 판정영역이 넓기 때문에 판정에러가 발생하는 확률이 적어서 일반적인 AWGN 채널에서는 다른 성좌점 심볼들보다 SNR 추정의 정확도가 높을 것이라는 것을 예상할 수 있다. 물론 흰점으로 표시된 성좌점은 검은점으로 표시된 성좌점보다 판정영역이 넓어 추정

성능이 높을 것으로 예상할 수 있다.

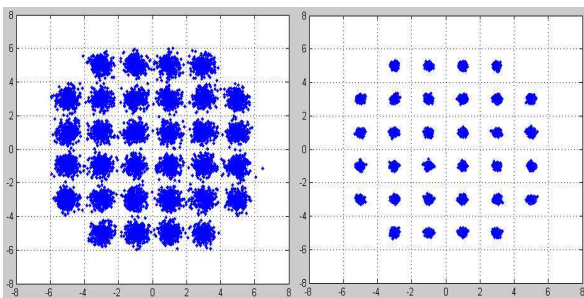
IV. 수치해석 및 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 Cross QAM에서의 SNR 추정시 가장 넓은 판정영역을 가지고 있는 심볼의 성좌점 (+) 들 만을 SNR 추정의 샘플들로 이용하는 경우의 성능을 시뮬레이션을 통해 살펴보고, 나머지 상대적으로 판정영역이 좁은 흰점, 검은점에 해당되는 성좌점 심볼들만을 이용하는 각각의 경우에 대한 SNR 추정 성능들과 비교하여 본다.

시뮬레이션을 통한 추정성능을 구하기 위해 표 1에 나타낸 바와 같이 32 Cross QAM, 그리고 세가지 형태의 판정영역을 가지는 성좌점들에 대해서 AWGN 채널과 Flat Rayleigh fading 채널에 대해서 고려하였고, SNR 추정을 위한 샘플의 수는 104 또는 105개의 추정용 시뮬레이션 샘플을 사용하였다.

표 1. Cross QAM에서의 SNR 추정 시뮬레이션 조건  
Table 1. Simulation condition for SNR estimation in cross QAM.

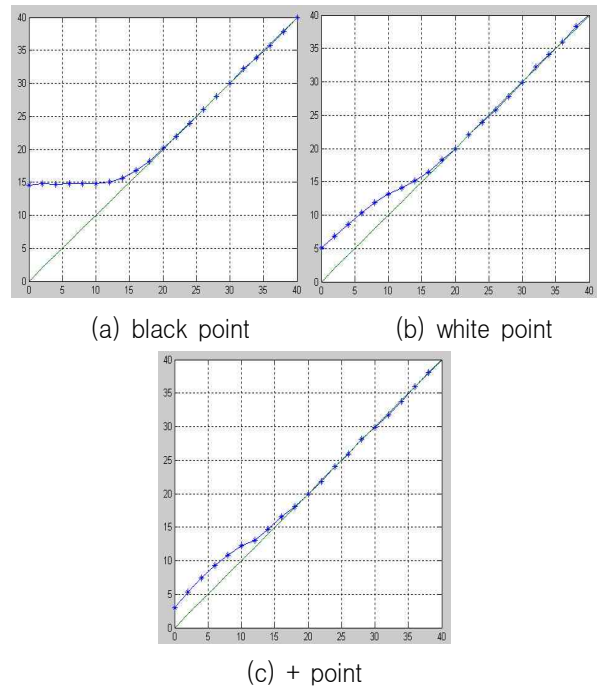
파라미터	설명
변조방식	32 Cross QAM
SNR추정용 성좌점 종류	+, O, ·
채널	AWGN, Flat Rayleigh Fading
SNR 추정용 샘플 수	$10^4$ or $10^5$



(a) SNR=20dB (b) SNR=30dB  
그림 4. Cross QAM 수신신호의 성좌도 (AWGN 채널, N=104)  
Fig. 4. Constellation diagram of received signal in 32 Cross QAM (AWGN channel, N=104)

그림 4는 AWGN 채널에서 32 Cross QAM 방식을 적용한 경우의 수신신호에 대한 성좌점들을 시뮬레이션을 통해 보여주고 있다.

그림 5의 (a), (b), (c)는 AWGN 채널에서 그림 3에 제시한 32 Cross QAM의 성좌점 중 검은점, 흰점, +점 각각 대해서 판정된 심볼을 기준으로 EVM 방식으로 SNR을 추정한 결과이다. 여기서 x축은 실제 SNR이고 y축은 예측한 SNR이다. 실선으로 표시된 것이 이상적인 SNR 추정 그래프이고, \*에 연결된 선으로 표시된 그래프가 시뮬레이션을 통해 추정한 성능 그래프이다. 전체적으로 SNR이 약 18dB 이상인 경우는 세가지 경우 모두 정확한 추정 성능을 보여주고 있다. 그러나, SNR이 낮을 때, 판정영역이 넓은 +점으로 판정되는 경우에 대한 추정성능인 (c)를 살펴보면, SNR이 18dB 이하인 경우에 있어서 (a)와 (b)의 경우에 비해 추정성능이 우수한 것을 확인 할 수 있다. 이는 그림 3에 제시한 성좌도에서 흰점과 검은점으로 판정되는 심볼을 SNR 추정에 이용하게 되면 판정 영역이 +점에 비해 좁아서 실제 에러백터보다 잡음을 작게 인식하게 되기 때문이다.



(a) black point (b) white point  
(c) + point  
그림 5. AWGN 채널에서 Cross QAM의 SNR 추정성능 (dB 단위, N=105)

Fig. 5. SNR estimation performance of Cross QAM in AWGN channel(dB scale, N=105)

그림 6의 (a), (b), (c), (d)는 레일리 페이딩 채널에서 그림 3에 제시한 32 Cross QAM의 성좌점 중 검은점, 흰점, +점, 그리고 전체 성좌점들을 이용하는 경우 4가지 각각 대해서 zero forcing 등화 후 판정된

심볼을 기준으로 EVM 방식으로 SNR을 추정한 결과이다. 여기서 x축은 실제 SNR이고 y축은 예측한 SNR이다. 우선 SNR이 낮을 때, 판정영역이 가장 넓은 + 점으로 판정되는 경우에 대한 추정성능인 (c)를 살펴보자. 판정영역이 넓은 만큼 페이딩을 보상시킬 때 잡음이 증폭되는 현상이 발생하면, 잡음이 넓게 흩어지게 되므로 평균적으로 SNR 추정성능이 실제보다 낮게 나타나는 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 SNR이 높아지면서 조금씩 개선되다가 점차 개선도는 미미하게 된다. 이는 SNR이 매우 높아서 판정에러가 전혀 발생하지 않더라도 레일리 페이딩을 보상하는 과정에서 잡음 증폭에 의해 어느 정도의 SNR 추정에러는 계속 남게 되기 때문에 발생하는 현상으로 볼 수 있다.

아지게 되면 사라지게 되며, 실제 SNR이 높아짐에 따라 유클리드 거리가 먼 point에 해당하는 송신된 신호가 수신시 black point로 판정되는 확률이 작아지므로 이때는 + point에서의 현상처럼 점차 SNR 추정값이 실제보다 더 작아지게 되는 효과가 더 커지게 되는 현상이 발생한다.

마지막으로 (d) total point 는 전체 성좌점들 모두를 SNR 추정에 사용하는 경우의 추정 성능인데, + point를 사용하는 경우와 거의 비슷한 성능을 나타내며, SNR이 낮은 경우에는 오히려 성능이 미미한 차이로 좋은 현상이 발생하였다. 이로부터 레일리 페이딩 채널환경에서는 SNR 추정에서 성좌점의 선택적 활용이 효과가 없다는 것을 알 수 있다.

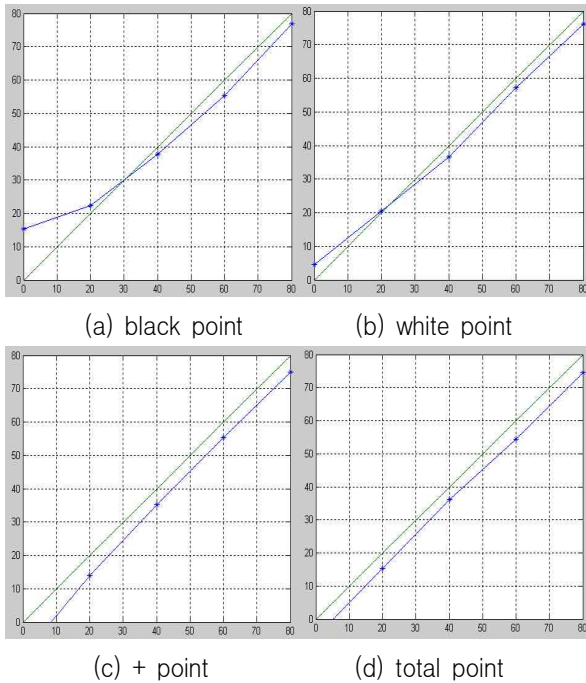


그림 5. 레일리 페이딩 채널에서 Cross QAM의 SNR 추정성능 (dB 단위, N=105)

Fig. 6. SNR estimation performance of Cross QAM in Rayleigh fading channel(dB scale, N=105)

한편, SNR이 낮을 때 (a) black point와 (b) white point의 경우는 오히려 이상적인 SNR 추정이 이루어질 때보다 더 높게 추정하는 현상이 발생하였다. 이는 유클리드 거리가 먼 다른 성좌점이 black point로 판정되더라도 판정 영역이 다른 점들보다 좁으므로 SNR이 낮은 경우에 오히려 SNR을 높게 추정하게 된다. 그러나 이러한 현상은 실제 SNR이 어느정도 높

## V. 결 론

본 논문에서는 적응변조를 포함한 다양한 통신시스템에 효과적으로 적용될 수 있는 Cross QAM의 SNR 추정 성능에 대해 분석하였다. 레일리 페이딩 채널에서의 Cross QAM의 심볼에러율을 확인하고, 성좌점에 대한 판정 영역 특성에 착안하여, EVM 기반의 SNR 추정기법을 성좌점별로 적용하여 32 Cross QAM의 예를 들어 시뮬레이션을 통해 추정성능을 분석하였다. 분석 결과, AWGN 채널에서는 낮은 SNR에서는 + point 만을 사용하는 경우가 SNR 추정 성능이 월등하게 나타났으나, 레일리 페이딩 채널에서는 전체 성좌점들 모두를 SNR 추정에 사용하는 경우가 + point 만을 사용하는 경우와 거의 비슷한 성능을 나타내었다. 즉, 레일리 페이딩 채널환경에서는 SNR 추정에서 성좌점의 선택적 활용이 별 효과가 없었다.

따라서, 이러한 결과들로부터 AWGN 채널이나 직접파성분이 강해 신호의 포락선 변동이 심하지 않은 라이시안 채널에서는 Cross QAM 방식을 채용하는 경우 판정영역이 넓은 + point를 사용하는 것이 SNR 추정에서 우월한 성능을 갖게 됨을 알 수 있으므로, 제안한 기법을 적용하면 SNR 추정에 연관된 시스템의 성능을 개선하여 설계하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것이다. 추가 연구방향으로서 레일리, 라이시안 등의 채널의 특성을 인지하여 유리한 채널추정

성좌점을 결정하기 위한 기법의 연구가 필요할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. G. Smith, "Odd-bit quadrature amplitude-shift keying," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 23, no. 3, pp. 385-389, Mar. 1975.
- [2] S. Panigrahi and T. Le-Ngoct, "Fine-granularity loading schemes using adaptive Reed-Solomon coding for discrete multitone modulation systems," in *Proc. IEEE ICC'05*, vol. 2, Seoul, Korea, pp. 1352-1356, May 2005.
- [3] V. Demjanenko, P. Marzec, and A. Torres, "Reasons to use non squared QAM constellations with independent I&Q in PAN systems," *IEEE P802.15-15-03-0311-00-003a*, July 2003.
- [4] J. Li, X.-D. Zhang, and N. C. Beaulieu, "Precise calculation of the SEP of 128- and 512-Cross-QAM in AWGN," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 1, pp. 1-3, Jan. 2008.
- [5] Hua Yu and Gang Wei, "Symbol error probability of cross QAM in Rayleigh fading channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 5, May 2010.
- [6] IEEE Std 802.16a/D7.0-2002, Part16 : "Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems Medium Access Control Modification and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz," 2002.
- [7] 김명익, 안상식, "새로운 SNR 추정방법을 이용한 적응 OFDM 시스템," *대한전자공학회 논문지 43권 TC편 3호*, 2006.

### 곽 재 민 (郭宰旻)



1998년 2월 : 한국항공대학교 통신  
정보공학과(공학사)

1999년 8월 : 한국항공대학교 대학원  
통신정보공학과(공학석사)

2002년 8월 : 한국항공대학교 대학원  
통신정보공학과(공학박사)

2002년 7월~2003년 7월 : 한국전자통신연구원 네트워크  
연구소 (Post-doc.)

2003년 7월~2008년 2월 : 전자부품연구원 SoC 연구센터  
책임연구원

2008년 3월~현재 : 목포해양대학교 해양전자통신공학부  
조교수

관심분야 : 디지털 통신 시스템, 유무선 통신신호처리