

논문 2010-4-8

색채 공간 기반의 가시광 통신 변조기법 성능개선 연구

Study on Performance Improvement of VLC Modulation Scheme Based on Color Space

이경근*, 박영일**, 김기두**

Kyung-Keun Lee*, Young-Il Park**, Ki-Doo Kim**

요 약 본 논문에서는 색채 공간의 불균일도를 반영한 심벌 판정기법을 제안하고, 색채공간 기반의 변조기법과 기존의 빛의 세기 기반의 제안한 WDM 기법과의 BER 성능을 비교 분석한다. AWGN 및 common mode 잡음의 채널 조건에서, 제안한 색채공간 기반 변조 기법의 BER 성능개선 가능성을 수치적 시뮬레이션을 통해 입증한다.

Abstract In this paper, we propose the symbol decision method considering the non-uniformity in color space and analyze the BER performance of modulation scheme based on color space, comparing with the conventional WDM scheme based on light intensity. Through numerical simulation, we show the BER performance superiority under the condition of AWGN and common mode noise.

Key Words : VLC, CCM, WDM, CIE 1931, Boundary decision

1. 서 론

가시광 통신이란 가시광을 이용한 통신방식이며, 가시광은 기존의 전파를 이용한 무선통신과는 통신 채널과 신호원에서 큰 차이를 갖고 있다. 신호 자체가 기존 전파와는 특이한 특성을 갖고 있으므로 가시광 통신에서는 이를 잘 활용할 필요가 있다^[1]. 본 논문에서는 색채 공간 기반의 가시광 통신의 성능 개선 방법으로 색채 공간의 특성을 반영한 수신 심벌 판정 기법을 제안하였다. 성능 검증을 위해 시뮬레이션을 통해 동일한 채널잡음 조건하에서 제안한 기법과 기존의 빛의 세기 기반의 WDM 기법의 BER 성능을 비교하여 제안한 방법의 성능이 우수함을 입증하고자 한다. 본 논문의 구성은 1장에서 CIE 1931, CCM(Color Code Modulation), WDM(Wavelength Division Multiplex)에 대하여 설명하고, 2장에서 제안한

수신 심벌 판정 기법에 대하여 논한다. 3장에서는 성능 개선 입증에 위한 시뮬레이션 결과를 보이고, 4장에서 결론을 맺는다.

1. CIE 1931

CIE 1931 XYZ 색채 공간(혹은 CIE 1931 색채 공간)^[2]은 인간의 색채 인지에 대한 연구를 바탕으로 수학적으로 정의된 최초의 색채 공간 가운데 하나이다. 인간의 눈에는 단파장(S), 중파장(M), 장파장(L)의 세 가지 빛을 받아들이는 수용기인 원추세포가 존재한다. 따라서 원칙적으로, 세 개의 변수로 인간의 색 감각을 표현할 수 있다. 삼색 자극값은 식 (1)과 같이 가산 혼합 모델에서 삼원색을 조합하여 원하는 색을 만들 수 있는 조합을 가리킨다. 삼색 자극값은 주로 CIE 1931 색채 공간에서 X, Y, Z값으로 표현된다. 색채 공간은 이 세 개의 자극값과 각각의 색깔을 연관시키는 수학적 모델을 가리킨다. 인간의 눈은 세 개의 색채 수용기를 갖고 있기 때문에, 모든 가시광선의 분포도는 3차원 도형이 된다. 그러나 색은 밝

*준회원, 국민대학교 전자정보통신대학 전자공학과

**정회원, 국민대학교 전자정보통신대학 전자공학과

접수일자 2010.6.17, 수정일자 2010.7.13

게재확정일자 2010.8.13

기와 색도의 두 가지 요소로 나눌 수 있다. 예를 들어, 흰색은 밝은 색이며, 회색은 동일한 흰색의 좀 더 어두운 형태라 말할 수 있다. 즉 흰색과 회색은 밝기는 다르지만 색도는 같은 색이다. CIE 1931 색채 공간은 Y 값이 밝기 또는 조도의 값이 되도록 설계되어 있다. 따라서 색은 식 (2)와 같이 X, Y, Z로부터 계산된 두 개의 값 x, y로 표현할 수 있다. 그림 1은 CIE1931 색채 공간을 나타낸다.

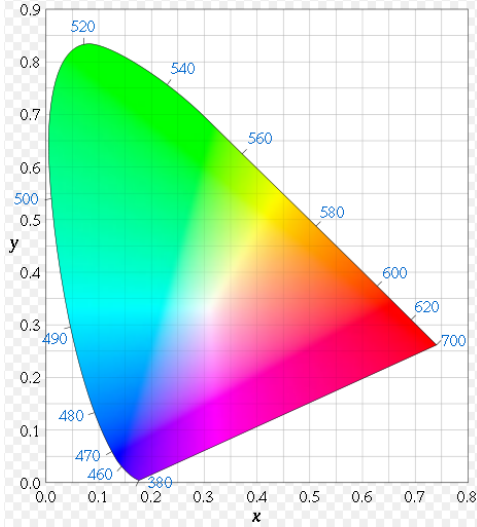


그림 1. CIE 1931 색채 공간
Fig. 1. CIE 1931 Color space.

$$\begin{aligned} X &= 2.7689R + 1.7517G + 1.1302B \\ Y &= R + 4.5907G + 0.0601B \\ Z &= 0.0565G + 5.5943B \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (3)은 x, y 좌표 값으로부터 X, Y, Z 세 개의 자극값을 구하는 식이다. 식 (4)는 X, Y, Z로부터 R, G, B 값을 구하는 식이다.

$$\begin{aligned} X &= \frac{Y}{y}x \\ Z &= \frac{Y}{y}(1-x-y) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R &= 0.4184657X - 0.15866Y - 0.08283Z \\ G &= -0.091169X + 0.252431 + 0.015708Z \\ B &= 0.0009209X - 0.00255 + 0.178599Z \end{aligned} \quad (4)$$

2. CCM(Color Code Modulation)

CCM은 색채 공간을 이용한 변조 방식을 의미한다^[4]. CCM에서의 변조 방식은 심벌을 색채 공간 위의 한 점 x, y 좌표로 매핑(mapping)하고 식 (3)과 (4)를 이용하여 x, y 좌표로부터 R, G, B 삼원색의 비율로 변환한다. 수신 심벌의 판정은 색채 공간의 x, y 좌표를 이용하여 송신심벌과 수신심벌의 좌표상 거리를 기준으로 하였으며^[3], 편의상 이러한 심벌 판정 기법을 ‘distance decision’이라 칭한다.

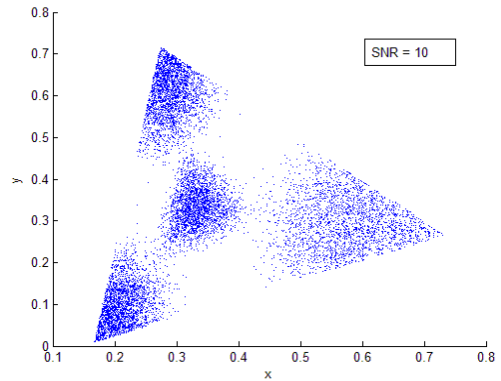


그림 2. AWGN 채널 환경에서 수신된 수신심벌
Fig. 2. Received symbol under AWGN channel noise.

그림 2는 AWGN채널 환경에서 수신된 심벌을 x, y 좌표로 변환한 것을 보여준다. 그림 2에서는 노이즈의 영향을 받은 심벌이 그 위치에 따라 퍼짐의 모양과 정도가 불균일함을 볼 수 있다. 이는 CCM에서 수신 심벌을 판정할 때 색채 공간에서 심벌 좌표간 거리만으로 판정하게 될 경우 심벌경계가 겹치게 되어 에러확률이 증가하게 될 수 있음을 보여준다. 따라서 색채 공간을 이용하는 가시광 통신에서 에러확률을 줄이기 위해서는 심벌의 위치에 따라 서로 다른 크기의 심벌경계가 설정 되어야 한다.

3. WDM(Wavelength Division Multiplex)

가시광 통신에서 WDM은 광원의 빛의 세기(intensity) 차이로 변조시키는 기법이다^[5]. WDM에서의 변조 방식은 CCM과 달리 심벌을 3차원 R, G, B 공간에 직접 매핑 한다. 심벌 판정은 R, G, B의 intensity 차이를 기준으로 한다.

II. 본 론

식 (1)에서 보는바와 같이 삼원색을 X, Y, Z 값으로 변환하는 과정은 비선형적이다. 따라서 두 색을 똑같은 양만큼 섞어 만들어진 색은, 두 점의 중간에 있지 않다. 다시 말해, 색채 공간상의 거리는 두 색의 차이와 일치하지 않는다. 이를 색채 공간의 불균일도라 한다. 이러한 이유로 색채 공간에서 심벌간 거리만으로 심벌판정을 하게 될 경우에 에러확률이 높아진다. 따라서 색채 공간의 불균일도를 반영한 새로운 판정기법이 필요하며, 본 논문에서는 이를 고려한 새로운 수신 심벌 판정 기법을 제시한다. 제시한 수신 심벌 판정 과정은 네 단계로 나누어 설명할 수 있다.

첫째, 심벌을 색채 공간의 x, y 좌표로 매핑한다. 이때 x, y 좌표는 색채 공간 내에서 인접 심벌간 거리가 최대가 되도록 한다. 그림 3은 색채 공간에서 인접심벌간 거리가 최대가 될 때의 심벌 위치를 보여준다.

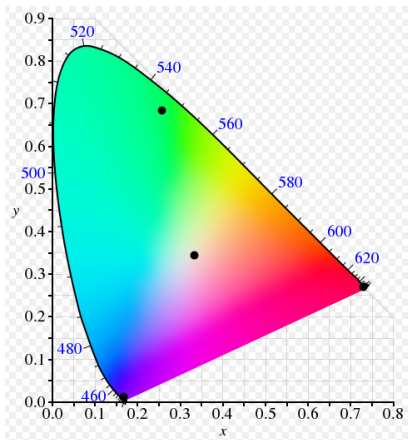


그림 3. 색채 공간에서의 심벌 위치
Fig. 3. Symbol position in color space.

x, y 좌표로 매핑된 각 심벌의 좌표값을 식 (3)과 (4)를 통해 R, G, B 값으로 변환한다. 그림 4는 3차원 R, G, B 축에서 심벌의 위치를 표현한 것이다.

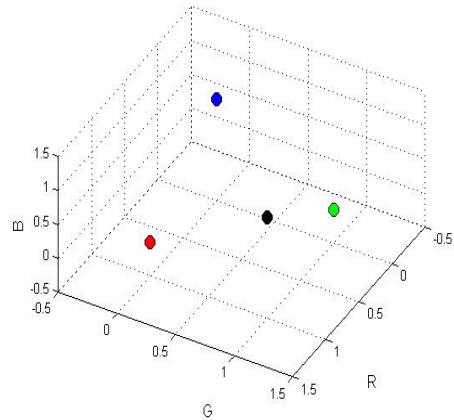


그림 4. R, G, B 3차원 공간에서의 심벌 위치
Fig. 4. Symbol position in 3-dimensional(RGB) space.

둘째, 각 심벌의 3차원 R, G, B 좌표를 중심으로 하고 서로 겹치지 않는 범위에서 최대크기를 갖는 구(sphere)를 형성한다. 이 구는 채널을 통과하면서 노이즈의 영향을 받아 심벌의 intensity가 변하는 모습을 가정한 것이다. 서로 겹치지 않는 범위에서의 최대 크기를 갖는 구를 구하기 위해서 각 심벌의 R, G, B 좌표에서 가장 가까운 심벌과의 거리를 지름으로 한다. 가시광 통신에서의 노이즈는 태양광, 형광등과 같은 주변 광원에 기인한다. 이들 노이즈는 원래 신호의 세기에 더해져서 수신단에 들어오게 된다. 전송 거리에 따른 감쇄를 고려하지 않았을 경우에 수신단에 들어오는 광세기는 노이즈의 영향으로 인해 원래 세기보다 더 커지게 된다. 따라서 구의 모양도 3차원 축에서의 심벌위치를 기준으로 R, G, B 값이 커지는 방향만을 고려한다. 그림 5는 최종적으로 심벌의 intensity가 변하는 모습을 가정한 구의 그림이다.

셋째, x, y 좌표에서의 심벌경계를 구하기 위해 두 번째 단계에서 구한 구의 표면좌표를 색채 공간으로 변환한다. 그림 6은 색채 공간으로 변환된 구의 표면좌표이다. 두 번째 단계에서 서로 겹치지 않는 범위에서 최대크기를 갖는 구를 구하였으므로 변환된 표면좌표는 에러없이 판정이 가능한 심벌영역의 최대크기이다. 이렇게 만들어진 선이 심벌경계선이 되고 심벌을 판정하는 기준이 된다.

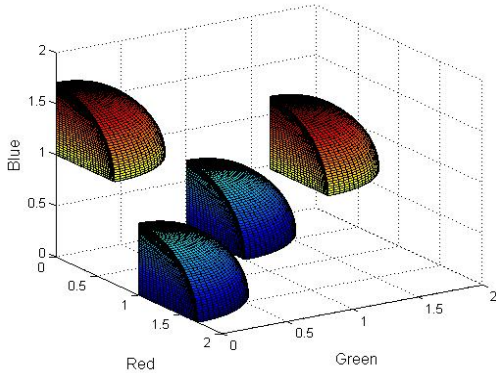


그림 5. Symbol intensity가 noise의 영향을 받은 것으로 가정한 구의 최종 모습

Fig. 5. A figure of the final sphere as assume that symbol intensity was affected noise.

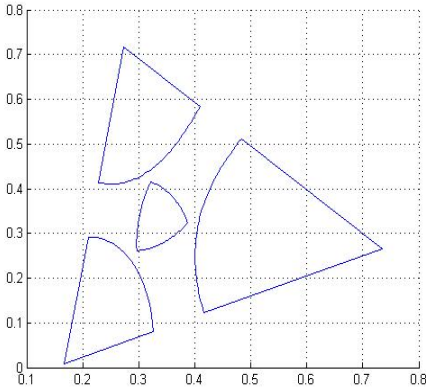


그림 6. 색채 공간으로 변환된 구의 표면좌표

Fig. 6. Surface coordinate of sphere after converting into color space.

넷째, 심벌을 판정하는 기법은 수신된 심벌이 각 경계 영역 내부에 위치하였을 경우에 그 영역에 해당하는 심벌로 판정한다. 영역 외부에 위치하였을 경우에는 수신 심벌로부터 가장 가까운 거리에 위치한 경계선을 찾은 후, 그 경계선에 해당하는 심벌을 송신심벌로 판정한다.

제안한 기법은 심벌영역을 색채 공간에서 바로 구하는 것이 아니고 R, G, B값에서부터 구하고 이를 식(1)과 (2)을 이용하여 x, y 좌표로 변환하기 때문에 색채 공간이 가지고 있는 불균일도를 반영하고 있다. 따라서 제안한 판정기법은 심벌간 거리로 수신심벌을 판정하는 기법에 비해 에러확률을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 제안한 수신심벌 판정기법을 편의상 ‘boundary decision’이라고 명한다.

III. 시뮬레이션

본 논문에서는 채널 노이즈로 AWGN만 고려한 경우와 AWGN과 common mode noise를 함께 고려한 경우, 두 가지 경우에 대해서 WDM, distance decision, boundary decision 방식을 통한 BER 성능을 비교하고자 시뮬레이션을 수행하였다. 가시광 통신에서 R, G, B가 받는 노이즈의 영향은 채널환경에 따라 색상별로 서로 다를 수 있다. 예를 들어, 주변 노이즈 광원에 붉은색이 많을 경우 Green, Blue에 비해 Red의 노이즈 신호가 더 많이 수신될 것이다. 이와 같은 이유로 본 시뮬레

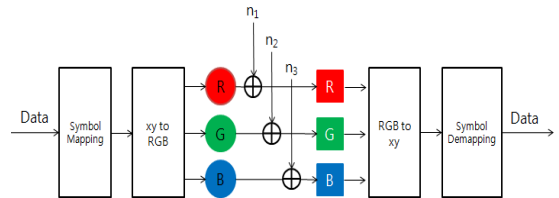


그림 7. CCM의 시스템 블록 다이어그램

Fig. 7. System block diagram of CCM.

이션에서는 R, G, B 각각에 대해 서로 다른 AWGN을 고려한다. Common mode noise는 AWGN과 별개로 노이즈에 white광이 섞여 있어서 광원의 intensity에 동일한 크기의 노이즈가 섞였을 때를 가정한 것이다. 따라서 common mode noise는 R, G, B에 동일한 값의 노이즈가 더해진다. AWGN은 MATLAB 7.6.0 awgn() 함수를 이용하여 구현하였고, common mode noise의 세기는 평균 심벌 intensity의 -10dB로 가정하였다. 시뮬레이션에 사용된 WDM의 intensity는 표 1과 같다. WDM에서 심벌의 intensity는 3차원 R, G, B축에서 각 심벌간의 최소거리가 최대가 되도록 배치하였다. 표 2는 시뮬레이션에 사용된 CCM에서의 x, y 좌표값, Y값 그리고 R, G, B intensity를 나타낸다. 본 논문에서 신호의 파워는 심벌의 intensity로 가정하였고, 동일한 실험 조건을 위해 WDM과 CCM의 평균 intensity를 같게 하였다.

표 1. WDM의 R, G, B Intensity

Table 1. R, G, B Intensity in WDM.

symbol	R	G	B
00	1	0	0
01	0	1	0
10	0	0	1
11	1	1	1

표 2. CCM의 xy 좌표, Y값 및 R, G, B Intensity
Table 2. x, y coordinate, Y value and R, G, B intensity in CCM.

symbol	x	y	Y	R	G	B
00	0.688	0.248	1	0.98	0	0.04
01	0.27	0.692	4.5	0	0.98	0.03
10	0.1666	0.0089	0.06	0	0	0.99
11	0.3333	0.3333	5.6	0.99	0.99	0.99

CCM 방식이 적용된 송수신과정은 그림 7과 같다. 입력된 데이터열은 색채 공간내의 x, y 좌표로 매핑된다. 매핑된 심벌은 좌표에 해당하는 R, G, B값으로 변환되어 LED를 통해 전송된다. 수신된 R, G, B값은 x, y 좌표값으로 변환된다. WDM의 통신과정은 x, y 좌표 변환과정 없이 심벌을 R, G, B 값으로 매핑하여 전송하고 수신된 R, G, B 값을 바탕으로 심벌을 디매핑(demapping)한다. 채널 노이즈는 CCM과 동일하게 적용된다. 본 시뮬레이션에서는 4개의 심벌을 사용하여 데이터를 전송한다. 4개의 심벌을 사용하는 WDM과 CCM을 각각 4WDM과 4CCM이라 명한다.

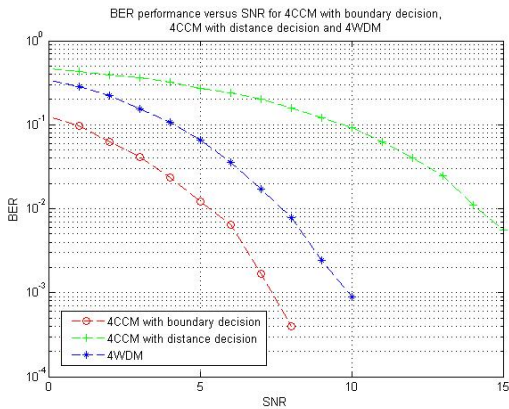


그림 8. AWGN 환경에서 4WDM, distance decision을 적용한 4CCM, boundary decision을 적용한 4CCM의 BER 성능 비교 그래프

Fig. 8. BER performance comparison of 4WDM, 4CCM with boundary decision and 4CCM with distance decision under AWGN channel noise.

그림 8은 AWGN 채널 환경에서 WDM, boundary decision을 적용한 4CCM, distance decision을 적용한 4CCM의 BER 성능을 비교한 그래프이다. 색채 공간의 불균일도가 고려된 boundary decision을 적용한 4CCM

이 distance decision을 적용한 4CCM뿐만 아니라 WDM 보다 BER 성능이 우월한 것을 볼 수 있다. BER이 10^{-2} 일 때 SNR 관점에서 distance decision을 적용한 4CCM과 WDM 방식에 비해 각각 약 9dB, 4dB 이득이 있다.

채널을 통과하면서 손상된 R, G, B가 x, y 좌표로 변환됐을 때 선형적으로 변환되지 않으므로 수신심벌들을 색채 공간에 표시하게 되면 불균일하게 퍼진다. 이런 색채 공간의 특성을 반영하지 않고 심벌간의 거리로만 심벌판정을 하게 되면 성능 악화는 피할 수 없다. Boundary decision을 적용한 4CCM은 이러한 색채 공간의 특성을 반영하였기 때문에 distance decision을 적용한 4CCM에 비해 향상된 BER 성능을 보일 수 있다. 또한 색채 공간은 RGB 비율에 따라 x, y 좌표가 결정된다. 예를 들면, RGB 비율이 1:1:1과 2:2:2인 경우 서로 같은 x, y 좌표를 가진다. 따라서 노이즈의 영향을 받아 RGB값이 변하더라도 그 비율이 유지된다면 색채 공간 내에서의 x, y 좌표는 변하지 않을 것이다. WDM에서는 RGB 비율에 상관없이 그 값이 변한다면 에러를 증가시키는 요인으로 작용한다. 이러한 색채 공간의 RGB 비율 특성과 색채 공간의 불균일도를 반영한 판정기법으로 인하여 WDM에 비해 boundary decision을 적용한 4CCM의 BER 특성이 우월해질 수 있다.

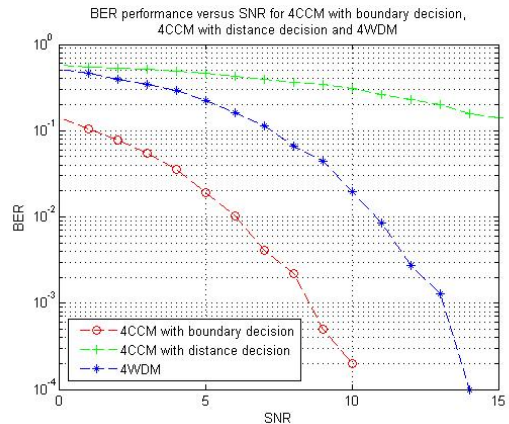


그림 9. AWGN+common mode noise 채널 환경에서 boundary decision을 적용한 4CCM, distance decision을 적용한 4CCM, 4WDM의 BER 성능 비교

Fig. 9. BER performance comparison of 4CCM with boundary decision, 4CCM with distance decision, and 4WDM under AWGN+common mode noise channel.

그림 9는 채널노이즈로 AWGN과 common mode noise를 함께 고려했을 경우 WDM, distance decision을 적용한 4CCM, boundary decision을 적용한 4CCM의 BER 성능을 비교한 그래프이다. BER이 10^{-3} 일 때 AWGN 만의 채널 환경에 비행 WDM의 SNR은 약 3dB 가, boundary decision을 적용한 4CCM은 약 1dB가 더 요구되는 것을 볼 수 있다. 이는 AWGN+common mode noise 채널 환경에서 boundary decision을 적용한 4CCM 방식이 WDM 방식에 비해 AWGN 만의 채널 환경에서 보다 상대적으로 더 우월함을 나타낸다. 그 이유는 boundary decision을 적용한 방식이 WDM 방식에 비해 common mode noise에 더 강인하기 때문인데, 그림 10으로 설명될 수 있다.

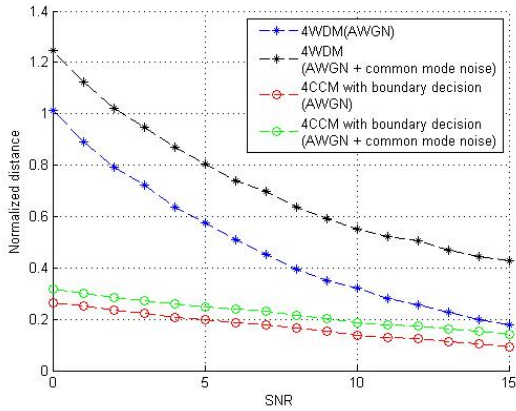


그림 10. Normalization된 수신심벌과 심벌경계와의 거리
Fig. 10. Distance to the symbol boundary from the received symbol position.

그림 10은 WDM과 boundary decision을 적용한 4CCM의 normalization된 수신심벌과 심벌경계와의 거리를 AWGN 채널환경과 AGWN 과 common mode noise를 함께 고려했을 경우에 대해 비교한 그래프이다. SNR이 5dB일 때 WDM과 boundary decision을 적용한 4CCM은 AWGN 채널환경에 비해 AWGN과 common mode noise를 함께 고려한 경우 수신심벌과 심벌경계와의 거리가 각각 약 0.2, 0.1 만큼 증가하였다. 이는 AWGN과 common mode noise를 함께 고려한 경우에 boundary decision을 적용한 4CCM 방식이 WDM 방식에 비해 상대적으로 더 우월함을 나타낸다.

IV. 결론

본 논문에서는 색채 공간의 불균일도를 반영한 새로운 수신 심벌 판정기법을 제안하였다. 제안한 기법은 x, y 좌표로 매핑된 심벌을 3차원 R, G, B 로 변환한 다음 이를 원점으로 하고 서로 겹치지 않는 범위에서 크기가 최대인 구(sphere)를 그리고, 그 구의 표면 좌표를 색채 공간내의 x, y 좌표로 변환한다. 이렇게 변환한 값은 심벌을 판정하는 기준이 된다. 본 논문에서 제안한 기법으로 판정한 CCM의 경우 채널노이즈로 AWGN만 고려하였을 경우와 AWGN+common mode noise를 고려한 경우 모두 WDM 과 distance decision을 적용한 CCM에 비해 우월한 BER 성능을 보여주었다. 그 이유는 R, G, B의 비율에 따라 x, y 좌표가 정해지는 색채 공간 특성과 색도도의 불균일도를 고려한 심벌 판정 기법 때문이다. 향후 제안한 판정 기법이 전송속도에 미치는 영향에 대한 연구와 다른 색채 공간에서의 적용 방법에 대한 연구를 진행할 예정이다.

참고 문헌

- [1] 장수영, "가시광 무선 통신의 기술 특징 분석," 한국 통신학회지(정보와 통신), 제 26권, 제 5호, pp asdf. 15-22, 2009. 3.
- [2] T. Smith, J. Guild, "The C.I.E Colorimetric Standards and Their Use," Transaction of the Optical Society, Volume 33, Number 3, pp.73-134, March 1932.
- [3] Roy S. Berns, "Principles of Color Technology," 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [4] Project: IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks, "Samsung, Intel, ETRI and CSUS merged proposal text," Nov. 2009.
- [5] H. Sugiyama, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Brightness Control Methods for Illumination and Visible Light Communication Systems," IEEE Wireless and Mobile Communications, pp. 78-83, 2007.

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. 20090083890)

저자 소개

이 경 근(준회원)



- 2009년 2월 국민대학교 전자공학부 학사
- 2009년~현재 국민대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학 중
<주관심분야: 디지털 통신, 가시광 통신>

박 영 일(정회원)



- 1987년 2월 서울대학교 전기공학과 학사
- 1989년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 석사
- 1995년 5월 Texas A&M Univ. EE Dept. 박사
- 1995년 8월~1999년 2월 KT 가입자 망 연구소
- 1999년 3월~현재 국민대학교 전자공학부 교수
<주관심분야: 광통신시스템, 광인터넷, 가시광통신>

김 기 두(정회원)



- 1980년 2월 서강대학교 전자공학과 학사
- 1980년~1985년 국방과학연구소 연구원
- 1988년 7월 미국 펜실베이니아주립 대학교 전자공학(MS)
- 1990년 12월 미국 펜실베이니아주립 대학교 전자공학 박사 (Ph.D)
- 1997년~1998년 미국 UCSD, Visiting Scholar
- 1991년~현재 국민대학교 전자공학부 교수
<주관심분야: 디지털통신, 가시광통신>