

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제19권 제6호, 2014년 11월 (JBE Vol. 19, No. 6, November 2014)

<http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2014.19.6.826>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

상관성을 가진 도심무선채널환경에서 공간 변조 기법들의 성능분석

조 봉 균^{a)}, 한 동 석^{a)‡}

Performance Analysis of Spatial Modulation Schemes in Correlated Urban Wireless Communication Channels

Bonggyun Jo^{a)} and Dong Seog Han^{a)‡}

요 약

최근 공간 상관성이 존재하는 채널상황에서 수신 성능을 향상시킬 수 있는 공간 변조(spatial modulation, SM) 기법이 활발히 연구되고 있다. 공간 변조 기법은 수신된 신호들 간의 간섭을 제거하기 위하여 여러 개의 송신안테나 중에서 일부분을 이용하여 신호를 전송하고, 안테나 조합에 따라 추가적인 정보를 전송할 수 있다. 따라서 공간 변조 기법을 사용하여 기존 다중안테나(multi-input multi-output, MIMO) 시스템에 적용하면 도심무선채널환경의 상관성에 의한 간섭을 극복할 수 있다. 그러나 상관성이 존재하는 도심무선채널환경에서 공간 변조 기법들의 수신 성능 분석이 정확하게 이루어지지 않고 있다. 그러므로 본 논문에서는 상관성을 가진 도심 채널 모델에서 여러 가지 공간 변조 기법들의 수신 성능 및 채널효율을 분석하고, 도심무선채널환경에 적합한 공간 변조 시스템을 제안한다.

Abstract

Recently, spatial modulation (SM) schemes are considered to improve the reception performance in spatially correlated channel environments. SM schemes utilize a switching method between multiple transmitters to reduce the correlation among multiple transmitters to reduce the correlation of each received signals and can support transmission additional bits using antenna combinations without extra bandwidth. Therefore, SM schemes can overcome correlation interference of conventional MIMO in urban wireless channels. However, the performance comparisons between SM schemes are not yet performed in correlated urban wireless channels. In this paper, some representative SM schemes are compared and a suitable SM-MIMO system in correlated urban wireless channels is proposed.

Keyword : SM, Golden-SM, STBC-SM, correlated channel

a) 경북대학교 전자공학부 (School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)

‡ Corresponding Author : 한동석 (Dong Seog Han)

E-mail: dshan@knu.ac.kr

Tel: +82-053-940-8669

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 ICT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2014-H0401-14-1004)

※ 이 논문의 연구결과 중 일부는 “한국방송공학회 2014년 하계학술대회”에서 발표한 바 있음.

· Manuscript received September 2, 2014 Revised November 13, 2014 Accepted November 13, 2014

I. 서론

이동 중에 라디오, 데이터, 음악 등 수신이 가능한 멀티미디어 모바일 기기의 등장으로 이용자들은 휴대폰 단말기나 차량용 수신기를 통해 언제 어디서나 다양한 형태의 데이터서비스를 고속으로 즐길 수 있게 되었다. 이와 같이 다양한 멀티미디어의 서비스의 증가로 인하여 많은 정보를 전송하는 기술들이 활발히 연구되고 있으며, 그 중에서도 채널의 대역폭을 증가시키지 않고 대역 효율을 증가시킬 수 있는 다중안테나(multi-input multi output; MIMO) 기술이 각광받고 있다.

다중안테나 기술은 송·수신 안테나 개수를 증가시켜 채널 효율 및 수신 성능을 극대화시키는 기술로서, 방송, 모바일, 무선통신 등 많은 분야에서 활용되고 있다. 이러한 다중안테나 기술은 크게 공간 다이버시티(diversity)를 증가시키는 STBC(space-time block code)와 송신 안테나 개수에 비례하여 전송량을 증가시키는 V-BLAST(vertical-Bell Laboratories layered space-time)로 크게 나눌 수 있다^[1]. STBC는 송신되는 신호의 부호화 및 수신기의 복호화를 통하여 수신된 신호를 쉽게 분리할 수 있으며, LTE(long term evolution), LTE-A(advanced) 및 IEEE802.11ac WiFi 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 공간 다중화(multiplexing) 방식인 V-BLAST 계열은 각각의 송신기에서 서로 다른 정보를 보낼 수 있기 때문에 대역 효율이 뛰어나다^[2]. 그 중에서 대표적인 LDC(linear dispersion code) 및 DVB-NGH(digital video broadcasting for next generation handheld)에서 사용되고 있는 골든 부호(golden code)는 신호를 분산시켜 전송함으로써, 전송되는 성상의 오류확률을 낮추어 수신 성능을 향상시킨다^{[3][4]}. 또한 최근에 개발된 eSM(enhanced spatial multiplexing) 기법은 골든 부호의 복잡도를 줄이고 수신 성능을 향상시키기 위하여 개발되었다^[5]. eSM 기법은 기존 V-BLAST 전송 기법에 위상 도약(phase hopping) 기술과 전력 제어 기술을 접목시켜 실제 구현에서 나타나는 안테나 간의 전력 차를 극복하고, 수신 성능을 향상시켰다. 그러나 이러한 전통적인 다중안테나 기술들은 송신 안테나 개수가 증가할수록 수신기가 복잡해지며, 여러 안테나를 통해 송신된 신호들이 한 수신기에 섞여 들어오게 된다. 그러

므로 수신기에서는 ISI(inter-symbol interference) 문제가 발생하여 각 송신안테나에서 전송되는 신호의 채널 간의 상관(correlation)이 존재하는 환경에서도 취약하다. 또한 여러 개의 안테나를 사용함으로써 각 안테나별로 RF단이 필요함을 고려할 때, 구현 비용이 높다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하고, 채널 효율을 증가시키기 위하여 공간 변조(spatial modulation, SM) 기법이 개발되었다.

공간 변조 기법은 송신 안테나의 일부만 사용하여 신호를 전송하며, 수신기가 간단하다는 것이 장점이다. 공간 변조 기법은 안테나의 조합만을 이용하여 정보를 전송하는 공간 천이 변조(space shift keying, SSK)^[6]와^[6] 신호 성상을 결합하여 정보를 전송한다. 최근에는 수신 성능을 향상시키기 위하여 STBC 기법과 결합된 STBC-SM 기법 및 대역 효율을 증가시키기 위한 골든-SM 기법이 제안되었다^{[7][8][9]}. 이러한 공간 변조 기법들은 채널 상관 계수, 송·수신 안테나 개수 및 여러 가지 시스템 환경에 따라서 수신 성능의 차이가 심하다. 또한 도심무선채널환경에서 정확한 비교를 통하여 어떤 공간 변조 기법이 가장 좋은지에 대한 연구도 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 기존 다중안테나 시스템의 장점을 극대화하고 단점을 극복할 수 있는 기술인 공간 변조 기법들을 상관성이 존재하는 도심무선채널환경을 통하여 수신 성능을 분석한다. 이를 위하여 실제 상관성이 존재하는 도심무선채널환경 모델을 실험에 적용하여 가장 좋은 수신 성능을 가지는 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 기존 공간 변조 기법들에 대하여 간략하게 설명하고, 3장에서는 도심무선채널환경 및 실제 사용되어지는 채널 모델에 대하여 살펴본다. 4장에서는 상관성이 존재하는 도심무선채널환경에서 공간 변조 기법들의 성능을 분석하고, 가장 적합한 공간 변조 기법을 제안한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 공간 변조 기법

기존의 다중 안테나 시스템은 시간과 공간에 대해 다중화(diversity)를 얻는 원리이다. 이로 인하여 수신기가 복잡

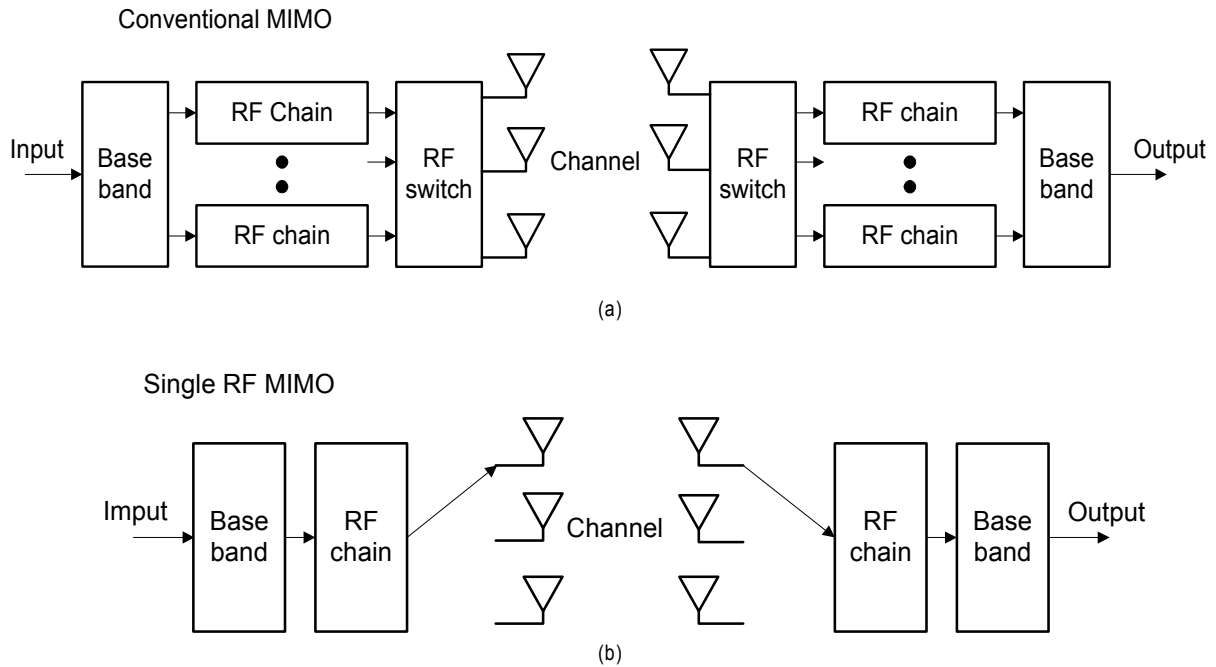


그림 1. 다중안테나 시스템 (a)일반적인 다중안테나 시스템 (b)단일 RF 다중안테나 시스템
 Fig. 1. MIMO systems (a)conventional MIMO (b)single-RF MIMO

해지고 안테나 간의 간섭 및 동기 등의 문제로 실제 구현에 한계를 가진다. 그림 1은 기존 다중안테나 기법과 단일 RF 다중안테나의 개념도를 나타낸다. 송신기 관점에서의 기존 다중안테나 시스템은 동시에 다중 안테나를 사용하기 때문에 각 안테나에 대한 RF단이 필요하다. 단일 RF 다중안테나는 다중 안테나를 동시에 사용하지 않고 하나의 안테나를 선택하기 때문에 하나의 RF단이 필요하다. 단일 RF 다중안테나 방식인 공간 변조 기법은 기존 다중안테나 시스템보다 수신기가 간단하고 송신 신호들 간의 간섭으로 인한 문제가 발생하지 않는다.

수신기에서는 송신된 신호들 간의 간섭으로 인하여 오류가 발생한다. 신호들 간의 간섭으로 인하여 발생하는 대표적인 ISI는 전자기파의 반사 성질로 인하여 주위의 장애물들에 의해 지연된 신호를 수신 받아서 시간과 공간 영역에서 신호들이 서로 섞이게 된다. 이로 인하여 송신 신호 검출 과정에서 오류가 발생된다. 그리고 IAS(inter-antenna synchronization)는 같은 시간에 전송된 모든 신호들의 동기가 동일해야

수신단에서 다중안테나를 통해 다중화 이득을 얻을 수가 있다. IAS를 해결하기 위하여 기존 다중안테나 시스템은 각 수신 안테나에 대하여 RF단이 모두 필요하다. 그러므로 기존 다중안테나 시스템은 송·수신기의 RF 장치들을 실제로 구현하는데 필요한 비용이 공간 변조 기법보다 크다.

그림 2는 기존 다중안테나 전송 기법들과 공간 변조 기법의 송신기를 나타낸다. 기존 다중안테나 시스템의 대표적인 전송 기법은 V-BLAST와 STBC이다. V-BLAST는 각 안테나에서 서로 다른 신호를 보내어 대역폭 효율을 향상시키는 공간 다중화의 원리를 사용한다. STBC는 각 안테나에서 서로 다른 신호를 보내고 시간에 대하여 직교성을 유지하게 부호화를 하여 시공간 다중화의 원리를 사용한다. 기존 다중안테나 시스템은 동시에 여러 개의 안테나를 사용하여 다중화를 얻는 원리를 사용하지만, 공간 변조 기법은 여러 개의 안테나 중 하나의 안테나를 선택하여 다중화를 얻는 원리를 사용한다. 각 안테나는 공간적으로 서로 다른 위치에 존재하기 때문에 채널 이득 값이 다르기 때문에 다중화를 얻는다.

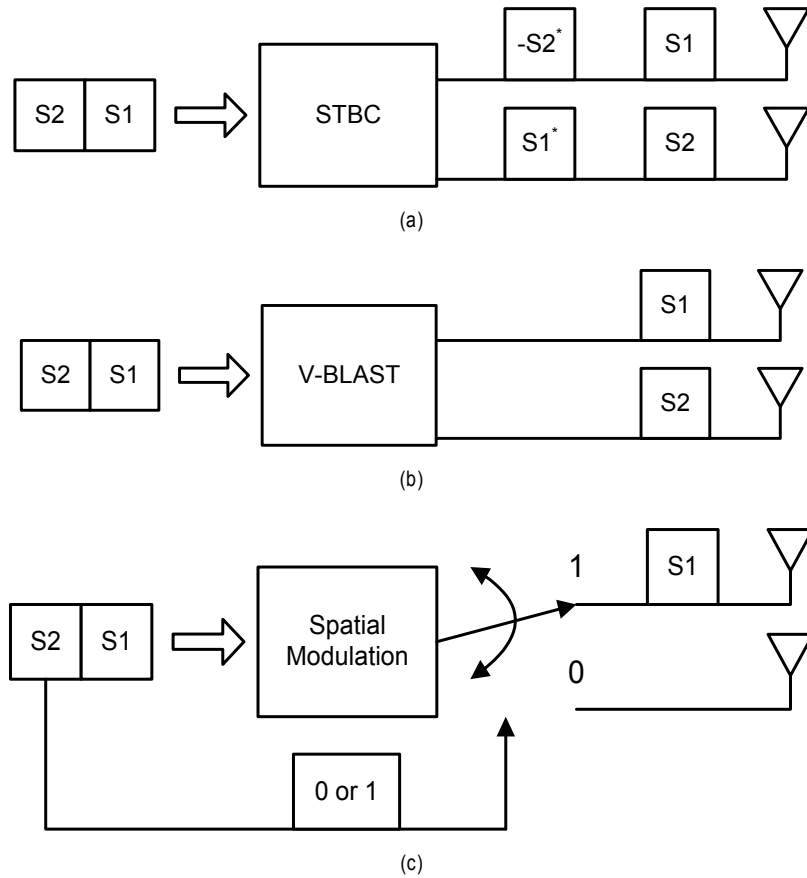


그림 2. 송신기 모델 (a)STBC (b)V-BLAST (c)공간 변조 기법
 Fig. 2. The transmitter model (a)STBC (b)V-BLAST (c)SM

공간 변조 기법에 STBC를 적용한 STBC-SM 기법은 송신 안테나를 2개를 동시에 STBC 형태로 사용하여 송신 심벌을 시공간에 대하여 직교성을 유지하여 다중화를 얻는다. 그리고 공간 변조 기법은 안테나를 선택하여 공간적으로 서로 다른 위치로 인한 채널 이득의 다양성을 이용한다. STBC-SM은 4개의 안테나를 사용하며, 그 중에서 2개의 안테나를 선택하여 STBC와 공간 변조 기법의 이점을 모두 가진다.

최근에 제안된 골든-SM 기법은 대역효율을 증가시키기 위하여 DVB-NGH에서 고려되고 있는 골든 부호를 공간 변조 기법에 적용시켰다^[8]. 골든 부호는 V-BLAST와 같이 송신 안테나 개수에 비례하여 대역 효율이 증가하며, 송신되는 신호를 분산시켜 신호를 전송한다. 분산된 송신 심벌

들은 황금 비율로 인한 최대 다이버시티를 가지게 되어 일부분의 정보를 잃는다 하여도 서로 다른 성상과 겹쳐지는 확률을 줄일 수 있다. 이러한 골든 부호를 공간 변조 기법에 적용시켜 대역효율 및 수신 성능을 향상시킬 수 있다. 다음 절에서는 이러한 공간 변조 기법, STBC-SM 및 골든-SM의 수신 성능을 비교하기에 앞서, 기존 도심무선채널환경에 대하여 간략하게 살펴보도록 하겠다.

III. 도심무선채널환경

도심무선채널환경은 직접적인 LOS(line of sight)가 없으

며, 고층빌딩에 의한 심한 회절손실을 겪고, 여러 물체에 의한 다중 반사 및 다중경로 페이딩을 겪는다. 또한 다중경로 반사파 간의 신호간섭 때문에 다중경로 페이딩을 겪으며 거리에 따라 전자파 세기가 빠르게 감소되는 특성을 가진다. 또한 인간주거환경을 고려하여 측정된 데이터의 체계적인 해석에 의해 제안된 모델들이 있다. 일반적으로 많이 쓰이는 롱리-라이스(Longley-Rice) 모델^[10] 외에 일본 도쿄 지역에서 측정을 통해 얻어진 실험 데이터를 근거로 제안된 오쿠무라(Okumura) 모델이 있으며^[11], 오쿠무라 모델을 바탕으로 하여 도심, 교외, 개방 환경에 대해 모델링된 하타(Hata) 모델이 있다^[12]. 또한 지역 대 지역 모델, 지점 대 지점 모델로 구분할 수 있는 리(Lee) 모델 등이 있다^[13]. 일반적으로 쓰이는 다중경로신호에 의한 이동통신 페이딩 현상에 의한 무선 채널 모델은 크게 두 가지로 나누어진다. 첫 번째로는 반사파가 우세한 레일리(Rayleigh) 채널 모델이 있으며, 직접파가 우세한 라이시안(Rician) 채널이 있다. 라이시안 채널 모델은 다음과 같다^[14].

$$\widehat{h}_{\nu,\kappa}(\tau,t) = \sqrt{\frac{K}{1+K}} h_{\nu,\kappa}^{LOS}(\tau,t) + \sqrt{\frac{1}{1+K}} h_{\nu,\kappa}(\tau,t) \quad (1)$$

여기서 $\widehat{h}_{\nu,\kappa}$ 는 시각 t 에서 지연 시간이 τ 인 송신 안테나 κ 와 수신 안테나 ν 사이의 채널이다. 직접파인 $h_{\nu,\kappa}^{LOS}$ 와 반사파인 $h_{\nu,\kappa}$ 가 합쳐져서 라이시안 채널을 구성하고 있음을 알 수가 있다. 또한 LOS성분의 전력과 산란성분들의 전력의 합의 비율인 K 값을 조절하여 직접파와 반사파의 비율을 조절할 수 있다. 본 논문에서는 실제 채널에서 기존 공간 변조 기법들의 수신 성능을 확인하기 위하여 WiMAX (IEEE802.16a 기반)에서 사용되고 있는 SUI(stanford university interim) 채널 모델을 고려하였다^[15]. SUI 채널은 채널 간의 상관 계수 및 지연 경로에 따라서 라이시안 채널 및 레일리 채널 특성이 잘 조합되어 있어 채널 간의 상관성이 존재하는 도심환경채널 모델로 적절하다. 또한 SUI 채널은 채널 상관 계수 및 도플러 계수에 따라 여러 가지 모델로 구현된다. 널리 쓰이고 있는 LTE 채널 모델은 채널 상관 계수가 고려되지 않아서 본 논문에서는 SUI 채널 모델을

고려하였다. 표 1은 본 연구에서 고려한 SUI 채널에 대한 대략적인 변수들이다.

표 1. SUI 채널
Table 1. SUI channel

Description	Path #	Doppler (Hz)	Fading Type	Delay (us)	Power (dB)	K-factor
SUI-1 $r=0.7$	1	0.4	Rician	0	0	4
	2	0.3	Rayleigh	0.4	-15	
	3	0.5	Rayleigh	0.9	-20	
SUI-2 $r=0.5$	1	0.2	Rician	0	0	2
	2	0.15	Rayleigh	0.4	-12	
	3	0.25	Rayleigh	1.1	-15	
SUI-3 $r=0.4$	1	0.4	Rician	0	0	1
	2	0.3	Rayleigh	0.4	-5	
	3	0.5	Rayleigh	0.9	-10	
SUI-4 $r=0.3$	1	0.2	Rayleigh	0	0	
	2	0.15	Rayleigh	1.5	-4	
	3	0.25	Rayleigh	4	-8	
SUI-5 $r=0.3$	1	0.2	Rayleigh	0	0	
	2	0.15	Rayleigh	4	-5	
	3	0.25	Rayleigh	10	-10	
SUI-6 $r=0.3$	1	0.4	Rayleigh	0	0	10
	2	0.3	Rayleigh	14	-10	
	3	0.5	Rayleigh	20	-14	

본 연구에서는 무지향성 안테나를 사용하여 전방위로 신호를 전송하는 표 1과 같은 SUI 채널 모델을 사용하여 기존 다중안테나 전송 기법과 공간 변조 전송 기법들의 수신 성

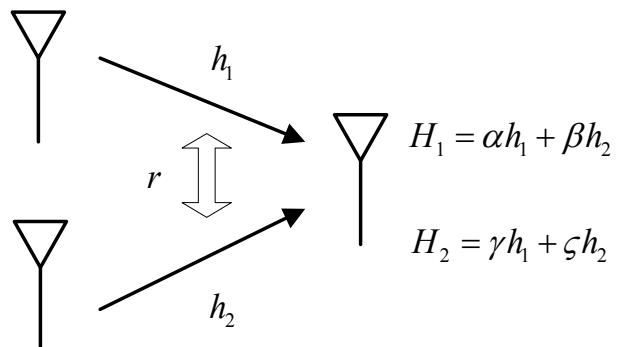


그림 3. 채널 간의 상관성
Fig. 3. The correlation between channels

능을 컴퓨터 실험을 통하여 알아보고자 한다. 표 1에서 r 은 채널 간의 상관 계수를 나타내며 개념은 다음 그림 3과 같다.

그림 3은 두 개의 서로 다른 안테나에서 송신된 신호들이 상관성이 존재하는 채널을 통과하여 수신기에 들어오는 과정을 나타낸다. 그림 3에서 표현된 채널 상관 계수 r 이 포함된 채널은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r \\ r & 1 \end{bmatrix}^{1/2} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)를 구하기 위해서는 다음과 같은 가정을 거친다. 송신 안테나 2개에서 전송된 신호는 서로 독립인 채널 h_1 과 h_2 를 통과하여 수신기에 전송된다고 가정할 때, 상관된 채널 H_1 과 H_2 를 이용한 상관 계수 r 을 구하는 방법은 다음과 같다^[16].

$$\begin{aligned} \text{cov}(h_1, h_2) &= 0 \\ r = \text{corr}(H_1, H_2) &= \frac{\text{cov}(H_1, H_2)}{\sqrt{\text{var}[H_1]\text{var}[H_2]}} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서 각각의 채널들 간의 상관값(correlation, corr)은 H_1 과 H_2 의 공분산(cov)과 분산(var)으로 나타낼 수 있다. 식 (3)의 공분산과 H_1 과 H_2 의 분산을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{cov}(H_1, H_2) &= \text{cov}(\alpha h_1 + \beta h_2, \gamma h_1 + \zeta h_2) \\ &= \alpha\gamma \text{cov}(h_1, h_1) + \alpha\zeta \text{cov}(h_1, h_2) + \beta\gamma \text{cov}(h_1, h_1) + \beta\zeta \text{cov}(h_1, h_2) \quad (4) \\ &= \alpha\gamma + \beta\zeta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{var}[H_1] &= \text{var}[\alpha h_1 + \beta h_2] \\ &= \alpha^2 \text{var}[h_1] + \beta^2 \text{var}[h_2] + 2\text{cov}(h_1, h_2) \\ &= \alpha^2 + \beta^2 \\ \text{var}[H_2] &= \text{var}[\gamma h_1 + \zeta h_2] \\ &= \gamma^2 \text{var}[h_1] + \zeta^2 \text{var}[h_2] + 2\text{cov}(h_1, h_2) \\ &= \gamma^2 + \zeta^2 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 상관된 채널 행렬을 구하기 위하여 식 (4)와 (5)를 식 (3)에 대입하고, $\begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r \\ r & 1 \end{bmatrix}$ 를 적용하면, 식 (2)의 상관 채널 행렬 $\begin{bmatrix} 1 & r \\ r & 1 \end{bmatrix}^{1/2}$ 를 구할 수 있다. 그러므로 식 (2)를 이용하여 SUI 채널의 상관 계수에 대한 채널 간의 상관성을 적용하여 기존 공간 변조 기법들의 수신 성능을 다음 절에서 분석한다.

IV. 도심채널에 적합한 공간변조 시스템의 성능비교

본 절에서는 차세대 모바일 방송을 위한 도심무선채널환경에서의 공간 변조 기법들의 수신 성능을 분석하기 위하여 SUI 채널 모델을 사용하였다. SUI-1부터 SUI-6까지 다

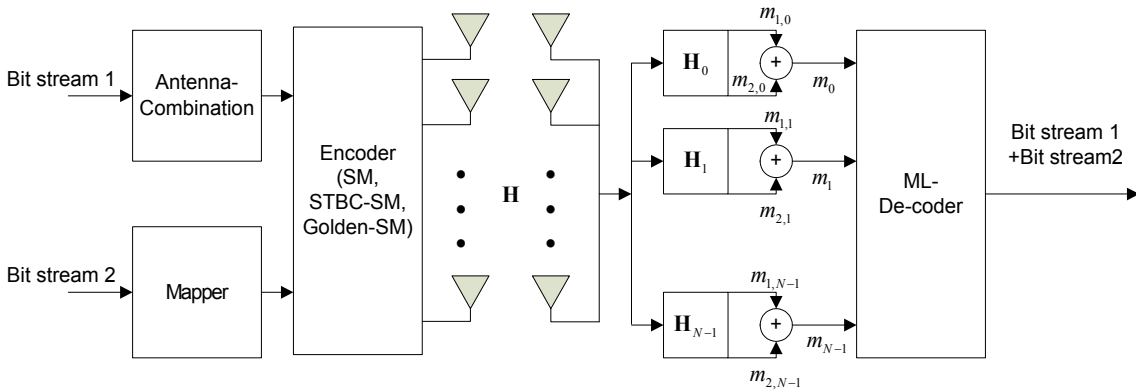


그림 4. 실험모델 블록도
Fig. 4. Simulation model block diagram

양한 간섭 채널 파라미터 r 과 채널의 최대 지연을 적용하여 실험하였다. 또한 다중 경로에 의한 영향을 최소화하기 위하여 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)을 사용하였으며, 최우검파(maximum likelihood, ML)를 이용하여 신호를 검파하였다. 다중 반송과 변조 방식인 OFDM은 보호구간을 두어 다중경로의 영향을 최소화해 높은 전송률을 획득할 수 있다. 그러므로 SUI 채널의 다중경로 페이딩 채널의 영향을 최소화하기 위하여 OFDM을 사용하였으며, 샘플링 레이트(sampling rate) $0.05\mu s$, 보호구간 길이를 $1.28ms$ 로 두어, SUI 채널의 최대 지연보다 길게 설정하였다. 다음은 그림 4는 컴퓨터 모의실험을 위한 실험모델 입출력 블록도이다.

그림 4에서 기존 공간 변조 기법, STBC-SM 및 골든-SM 기법의 입출력 블록도는 동일하다. 입력되는 비트열 1에 따라서 여러 개의 송신안테나 중 신호를 전송하는 안테나가 결정되는 것은 동일하며, 입력되는 비트열 2를 이용하여 STBC 부호화 및 골든 부호화를 하는 방법이 다르다. 수신기에서는 수신된 신호의 안테나 조합 및 심벌의 검파를 최우검파를 이용하여 검파한다.

컴퓨터 모의실험에 사용된 시스템 및 자세한 변수들은 표 2와 같다. 표 2에서 FFT 크기, 보호구간 길이 및 대역 효율은 1024, 1/4, 5bit/s/Hz로 동일하였으며, 수신 안테나 개수를 2개 및 4개로 고정하여 실험하였다. 실험 채널은 표 1의 SUI 채널 모델을 사용하였다. 또한 공정한 비교를 위하여 최근 무선통신 및 이동 통신 시스템에 널리 쓰이고 있는 STBC도 추가하여 실험하였다. 그리고 채널 상관 계수가 0.7, 0.4, 0.3인 SUI-1, SUI-3, SUI-5 등 세 개의 채널에서 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 다음은 SUI-1의 채널 환경

표 2. 다중안테나 기법 실험에 사용된 변수들

Table 2. System parameters are used for simulations of MIMO methods

	SM	STBC-SM	Golden-SM	STBC
MIMO 구성 ($M_t \times M_r$)	4x2, 4x4	4x2, 4x4	4x2, 4x4	2x2, 2x4
대역 효율	5-bits/s/Hz (8QAM)	5-bits/s/Hz (16QAM)	5-bits/s/Hz (QPSK)	5-bits/s/Hz (32QAM)
FFT 크기	1024	1024	1024	1024
보호구간 길이	1/4	1/4	1/4	1/4

에서 컴퓨터 모의실험한 결과이다. 여기서 M_t 는 송신 안테나 개수 M_r 은 수신 안테나 개수를 의미한다.

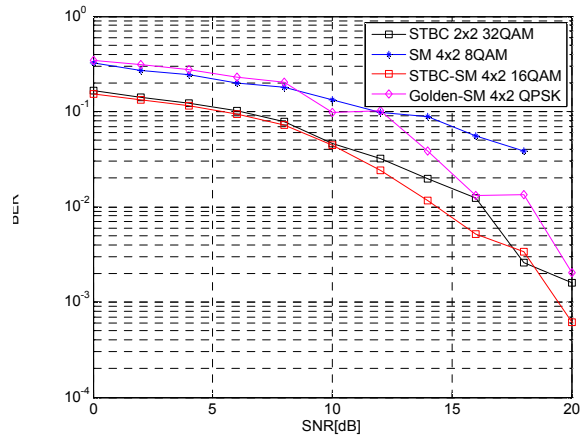


그림 5. SUI-1 채널에서의 다중안테나 수신 성능(스펙트럼 효율 5-bits/s/Hz, $M_t=4$, $M_r=2$, $r=0.7$)

Fig. 5. The reception performance of MIMO in SUI-1 channel for a spectral efficiency of 5-bits/s/Hz with $M_t=4$, $M_r=2$ and $r=0.7$.

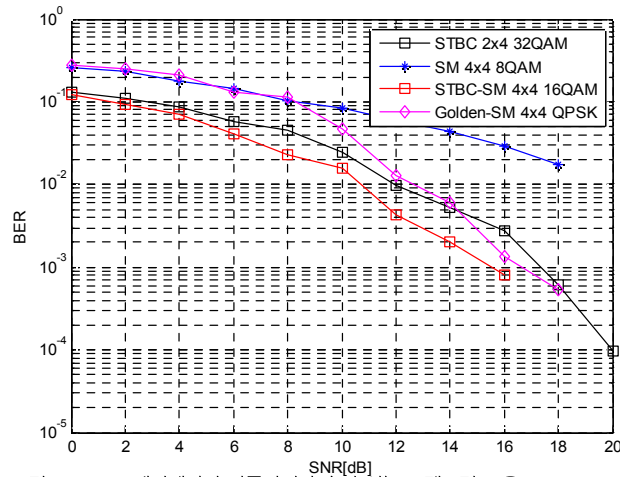


그림 6. SUI-1 채널에서의 다중안테나 수신 성능(스펙트럼 효율 5-bits/s/Hz, $M_t=4$, $M_r=4$, $r=0.7$)

Fig. 6. The reception performance of MIMO in SUI-1 channel for a spectral efficiency of 5-bits/s/Hz with $M_t=4$, $M_r=4$ and $r=0.7$.

그림 5와 6을 살펴보면, 채널 상관 계수가 $r=0.7$ 인 상관성이 심한 SUI-1 채널에서는 수신 안테나 개수와 상관없이 STBC-SM이 가장 좋은 성능을 보인다. 그러나 공간 변조 기법은 상관성이 존재하는 채널 환경에서 열악한 수신 성

능을 보이는데, 그 이유는 수신 신호 검파를 위해서 최우 검파 방법을 이용할 경우, 안테나 조합에 관한 검파 성능이 떨어져 전체 수신 성능에 영향을 준다. 그러나 STBC-SM 및 골든-SM 기법은 공간 다이버시티가 기존 공간 변조 기법보다 우수하기 때문에 간섭 채널에 대한 영향을 덜 받는다. 다음은 SUI-3에서 컴퓨터 모의실험한 결과이다.

그림 7과 8에서 채널 상관 계수가 0.4인 SUI-3에서 실험을 하였을 경우, 낮은 SNR 관점에서는 STBC-SM의 수신

성능이 가장 우수하지만 골든-SM의 수신 성능이 향상됨을 볼 수 있다. 또한 그림 8에서 SNR(signal to noise ratio) 10dB에서 수신 성능이 역전이 되는데, 이것은 신호를 분산시켜 전송하는 골든-SM의 다이버시티 이득이 높기 때문에 발생한다. 그러나 채널 상관 계수가 높은 채널에서는 분산시킨 정보가 서로 섞이므로 골든-SM의 수신 성능이 STBC-SM보다 나쁘다고 말할 수 있다. 다음은 SUI-5에서 컴퓨터 모의실험한 결과이다.

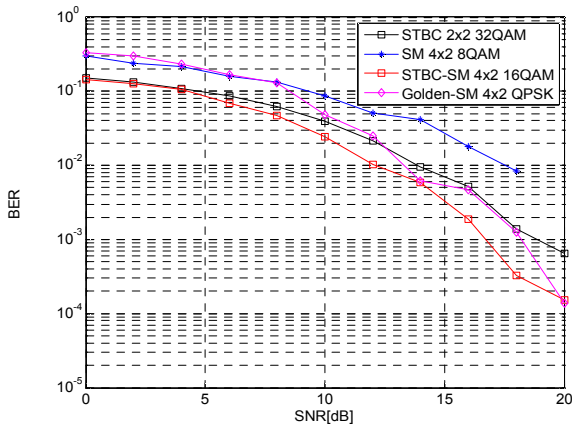


그림 7. SUI-3 채널에서의 다중안테나 수신 성능(스펙트럼 효율 5-bits/s/Hz, $M_t=4$, $M_r=2$, $r=0.4$)

Fig. 7. The reception performance of MIMO in SUI-3 channel for a spectral efficiency of 5-bits/s/Hz with $M_t=4$, $M_r=2$ and $r=0.4$.

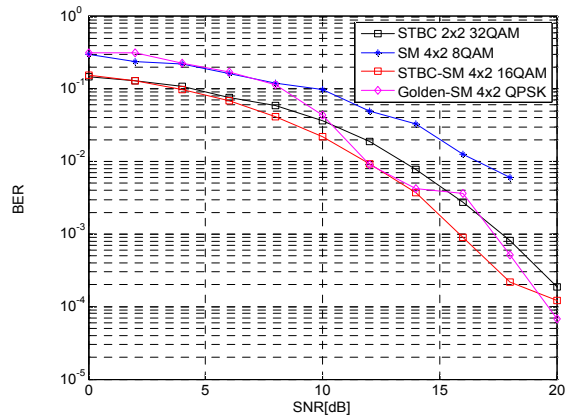


그림 9. SUI-5 채널에서의 다중안테나 수신 성능(스펙트럼 효율 5-bits/s/Hz, $M_t=4$, $M_r=2$, $r=0.3$)

Fig. 9. The reception performance of MIMO in SUI-5 channel for a spectral efficiency of 5-bits/s/Hz with $M_t=4$, $M_r=2$ and $r=0.3$.

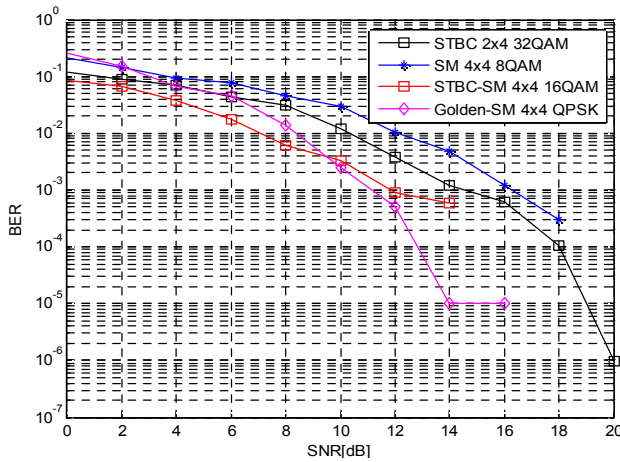


그림 8. SUI-3 채널에서의 다중안테나 수신 성능(스펙트럼 효율 5-bits/s/Hz, $M_t=4$, $M_r=4$, $r=0.4$)

Fig. 8. The reception performance of MIMO in SUI-3 channel for a spectral efficiency of 5-bits/s/Hz with $M_t=4$, $M_r=4$ and $r=0.4$.

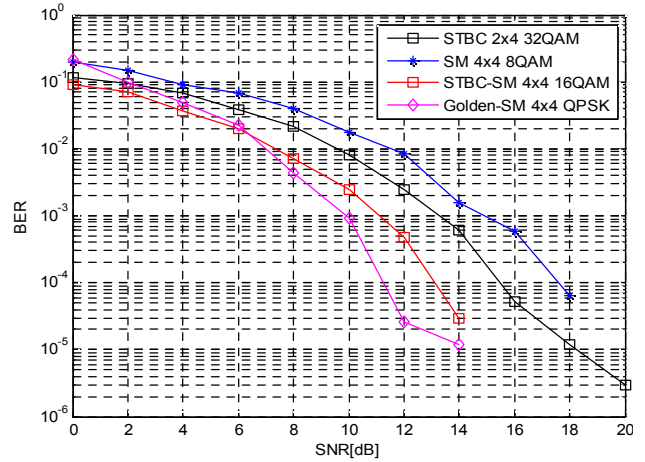


그림 10. SUI-5 채널에서의 다중안테나 수신 성능(스펙트럼 효율 5-bits/s/Hz, $M_t=4$, $M_r=4$, $r=0.3$)

Fig. 10. The reception performance of MIMO in SUI-5 channel for a spectral efficiency of 5-bits/s/Hz with $M_t=4$, and $M_r=4$ and $r=0.3$.

그림 9와 10에서 채널 상관 계수가 0.3으로 줄어들고 수신 안테나 개수가 4개일 경우에는 골든-SM의 수신 성능이 가장 좋다. 조건 및 채널 환경에 따라서 수신 성능이 우수한 기법이 달라지지만 전체적으로 보았을 때, 수신 안테나가 2개 및 채널 간 간섭 계수가 높을 때는 STBC-SM이 가장 우수하고, 수신 안테나 개수가 4개 및 채널 간 간섭 계수가 낮을 때는 골든-SM의 성능이 우수하다. 그리고 공간 변조 기법의 수신 성능이 STBC-SM 및 골든-SM보다 나쁜 이유는 송신부의 부호화 과정이 없어 부호화 이득이 없기 때문이다. STBC-SM 및 골든-SM은 신호를 STBC 부호화 및 골든 부호화를 이용하여 부호화 이득을 가지기 때문에 기존 공간 변조 기법보다 수신 성능이 뛰어나다.

앞으로의 무선 통신 및 근거리 통신은 대역효율이 가장 중요하다. 대역효율을 증가시키기 위해서는 높은 변조 레벨 및 많은 송·수신 안테나가 필요하다. 예를 들어 최신의 근거리 통신망 표준인 IEEE802.11ac에서는 최대 8개의 송신 안테나 및 4개의 수신 안테나를 사용하고 변조 성상 256QAM까지 사용한다. 이를 미루어 보아 차세대 근거리 통신망 및 이동통신 시스템은 더 많은 안테나와 높은 변조 성상을 필요로 한다. 실험 결과를 토대로 분석한 결과, 수신 안테나 2개를 사용했을 경우에는 STBC-SM의 수신 성능이 좋으나, 수신 안테나 4개를 사용했을 경우에는 골든-SM의 수신 성능이 좋았다. 또한 5-bits/s/Hz를 달성하기 위해서는 STBC-SM은 16QAM, 골든-SM은 QPSK를 써야한다. 그러므로 수신 안테나가 4개 이상이며, 높은 변조 성상을 사용하는 시스템의 경우에는 골든-SM이 가장 적합하다. 만약 골든-SM이 256QAM(8bits)을 사용한다면, 같은 대역효율을 내기 위해 STBC-SM은 65536QAM(16bits)를 사용해야 하므로 높은 변조 성상을 요구하는 시스템에서는 STBC-SM은 비효율적이다.

V. 결론

본 논문에서는 채널 간 상관성이 존재하는 도심무선채널 환경에 적합한 전송 기술을 결정하기 위하여 STBC 및 공간 변조 기법들을 전반적으로 분석하고 시뮬레이터를 통한 성능 분석을 수행하였다. 대역 효율이 가장 좋은 골든-SM

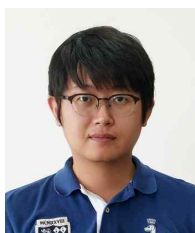
은 신호를 분산시켜 전송하므로 채널 간의 상관성이 심한 환경에서는 성능이 좋지 않으며, STBC-SM은 채널 간의 상관성에 약하고, 수신 안테나 개수가 적을 경우에는 골든-SM보다 수신 성능이 나쁘다. 그러나 복잡도 측면에서는 골든-SM이 4개의 심벌을 동시에 검파하므로 STBC-SM보다 계산량이 많다. 최종적으로는 송·수신 안테나 개수가 늘어나고 높은 전송량을 요구하는 차세대 이동통신 및 근거리 통신망에서는 골든-SM의 장점이 STBC-SM보다 더 높이가 평가될 것으로 보인다.

참고 문헌 (References)

- [1] BongGyun Jo and Dong Seog Han, "Performance Analysis and Design of MIMO Systems for Terrestrial Transmission of UHD TV", *Journal of Broadcast Engineering*, pp. 547-54, vol. 15, No. 4, July 2010.
- [2] P. Wolniansky, G. Foschini, G. Golden, and R.Valenzuela, "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," in *Proc.International Symp. Signals, Syst.,Electron.(ISSSE'98)*, pp. 295-300, Pisa, Italy, Sep. 1998.
- [3] B. Hassibi and B. M. Hochwald, "High-Rate Codes That Are Linear in Space and Time", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 48, NO. 7, July 2002.
- [4] J.-C. Belfiore, G. Rekaya, and E. Viterbo, "The Golden code: a 2x2 full-rate space-time code with non-vanishing determinants," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 4, pp. 1432-1436, April 2005.
- [5] Sangchul Moon, Woo-Suk Ko, David Vargas, David Gozalvez Serrano, M. Danish Nisar, and Volker Pauli. "Enhanced Spatial Multiplexing for Rate-2 MIMO of DVB-NGH System," *Invited paper in the 19th International Conference on Telecommunications*, April 2012.
- [6] J. Jeganathan, A. Ghayeb, L. Szczecinski, and A. Ceron, "Space shift keying modulation for MIMO channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3692-3703, July 2009.
- [7] E. Basar, U. Aygolu, E. Panayirci, and H. V. Poor, "Space-Time Block Coded Spatial Modulation," *IEEE Tran. on Commun.*, vol. 59, no. 3, pp. 8230832, Mar. 2011.
- [8] Myung Chul Park and Dong Seog Han, "A Golden Coded-Spatial Modulation MIMO System", *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 50, No. 10, October, 2013.
- [9] BongGyun Jo, Myung Chul Park and Dong Seog Han, "Reception Performance Analysis of SM Transmission Method in Correlated Channels," *Korean Society of Broadcast Engineers conference 2014*.
- [10] John S. Seybold *Introduction to RF propagation* John Wiley and Sons, 2005.
- [11] Y. Okumura et al., "Field Strength and its Variability in VHF and UHF

- Land Mobile Radio Service," Review of The Electrical Communication Laboratory, vol. 16, 1968.
- [12] M. Hata, "Empirical Formulas for propagation Loss in Land Mobile Radio Services," IEEE Tran. on Vehicular Technology, vol. 29, no. 3, 1980.
- [13] W. C. Y. Lee, Mobile Communications Engineering, New York: McGraw Hill, 1982.
- [14] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2003.
- [15] "IEEE Approves IEEE 802.16m - Advanced Mobile Broadband Wireless Standard," News release (IEEE Standards Association). March 31, 2011. Retrieved August 20, 2011.
- [16] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, Introduction to Space-Time Wireless Communications. 40 West 20th Street, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2003.

저 자 소 개



조 봉 균

- 2008년 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 공학사
- 2011년 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 공학석사
- 2011년 ~ 현재 : 경북대학교 IT대학 대학원 박사과정
- 주관심분야 : MIMO, 디지털 방송/통신 신호처리



한 동 석

- 1987년 : 경북대학교 전자공학과 공학사
- 1989년 : KAIST 전기 및 전자공학과 공학석사
- 1993년 : KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사
- 1987년 : 10월 ~ 1996년 8월 삼성전자 기술총괄신호처리 연구소 선임연구원
- 1996년 : 8월 ~ 현재 경북대학교 IT대학 교수
- 2006년 : 7월 ~ 2008년 7월 정보통신연구진흥원 디지털 TV/방송사업단 단장
- 2011년 ~ 현재 : 경북대학교 IT·자동차융합연구센터장
- 주관심분야 : 통신신호처리, 지능형 교통 시스템