

SCM과 SCME채널 모형의 비교와 MIMO 시스템 레벨 성능에 미치는 영향

준회원 허 준 행*, 정회원 김 동 우**, 종신회원 이 희 수***

SCM and SCME Channel Models and Their Impacts on MIMO System Level Performance

Joon-Haeng Heo* Associate Member, Dongwoo Kim** Regular Member,
Heesoo Lee*** Lifelong Member

요 약

본 논문에서는 SCM(Spatial Channel Model)채널과 그것의 확장 모형인 SCME(Spatial Channel Model Extended)채널 모형의 차이를 비교하고, MIMO 시스템 레벨 성능에 미치는 영향을 모의실험을 통해 살펴본다. 모의실험은 SCM과 SCME채널 모형을 이용했을 때의 사용자의 개수 변화와 Drifting Time의 변화에 따른 시스템 레벨 성능의 변화를 관찰하기 위해 수행한다. Mid-path에 대한 영향으로 SCME 채널 모형이 SCM채널 모형보다 채널 이득의 변화가 크기 때문에 사용자의 변화에 따른 시스템 레벨 성능은 SCME채널이 더 좋다. 그리고, SCM 채널 모형보다 SCME채널 모형이 Drifting영향으로 인해 채널의 변화가 더 크기 때문에 이 영향에 의한 시스템 레벨 성능이 SCME의 경우 역시 더 좋아진다.

Key Words : SCM, SCME, MIMO, System Level Performance

ABSTRACT

In this paper, we explain differences between SCM and extended SCM(SCME), and investigate how these channel models affects MIMO system level performance. System level simulation is performed according to the number of users and drifting-time intervals with SCM and SCME, respectively. The performance of SCME is slightly better than SCM since mid-paths and the drifting-time in SCME causes more fluctuations in MIMO channels.

1. 서 론

최근 다중 안테나 기술인 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 무선 통신 기술에 관한 많은 연구가 되고 있다. 이 기술의 성능 비교와 평가를 위해 채널 모델 정의가 필요하다. 현재 MIMO 무

선 통신 기술에 적용가능한 채널 모델인 Spatial channel model (SCM) 이 802.11과 3GPP 표준화 기구에서 정의 되어 있다^[1].

SCM은 시스템 레벨 시뮬레이션에서 사용되는 홀트러진 확률 모델이 기반이 된, 기하학과 선을 기반으로 한 모델이다. Suburban Macro, Urban

* 본 연구는 2008년도 2단계 두뇌한국21 사업에 의해 지원되었습니다.

* 한양대학교 전자전기 제어계측공학과 이동통신망연구실 (busnang@wnl.hanyang.ac.kr),

** 한양대학교 전자컴퓨터공학부 부교수 (dkim@hanyang.ac.kr)

*** 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부 이동통신연구본부(heelee@etri.re.kr)

논문번호 : KICS2008-07-301, 접수일자 : 2008년 7월 7일, 최종논문접수일자 : 2008년 10월 7일

Macro, Urban Micro의 3가지 환경으로 정의되었으며 Urban Micro는 Line-of-sight(LOS)와 Non-LOS (NLOS) 전파로 나누어진다. 각 환경 시나리오는 Delay가 Dirac 함수로 표현된 6개의 경로로 고정되어 있으며 각 경로는 20개의 Sub-path로 구성되어 있다^[2]. 각 경로의 Power와 Delay와 각도는 미리 정의된 PDF와 Cross-correlation으로 정의된 확률 변수로 모델링 되어 있다. 모든 파라미터는 Fast-fading을 제외하고 시간에 독립되어 있다.

하지만, SCM은 2GHz의 중심 주파수에 5MHz의 대역폭으로 정의되어 있기 때문에 차세대 시스템에서 주로 이용된 2GHz와 5GHz의 중심 주파수와 최대 100MHz의 대역폭에서는 적합하지 않다. 그리고, SCM은 시간이 변함에 따라 파라미터가 변하지 않아서, 사용자의 이동을 시스템 레벨 시뮬레이션에서 반영하지 못하는 단점이 존재한다. 마지막으로 Macro 모델에서 LOS를 고려하지 않아서 Macro셀 내의 가까운 곳의 채널 영향을 명확하게 반영하지 못한다^[3].

SCM을 차세대 이동통신 시스템의 모델에 맞게 확장을 한 채널 모델이 Spatial Channel Model Extended (SCME)이다. SCME는 최대 5GHz대역의 100MHz 대역폭에서 모델링 되어있다. Sub-path의 Delay Spread를 변화시켜서 대역폭의 확장을 고려하였고, SCM의 거리 감쇄모델에서 5GHz 대역을 고려하기 위해 8dB의 이득을 더해주었다. 그리고 모든 시나리오에서 LOS를 고려하였고, 사용자의 이동에 따른 각도 변화를 고려하여 모델링하였다.

SCM과 SCME의 차이점을 분석하기 위하여 사용자가 1명부터 32명까지의 변화에 따른 시스템 레벨 성능 비교와, Drifting Time이 50, 500, 5000 Drifting Time일 때, 변화에 따른 시스템 레벨 성능을 비교하였다. 모든 경우 SCME 채널의 경우 SCM 채널보다 좋은 시스템 레벨 성능을 보여주었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는

SCM채널 모델과 SCME 모델과 다른 점을 설명하고, SCME채널의 특성을 그래프를 통해 보인다. III장에서는 모의실험을 통해 SCM채널 모형과 SCME채널 모형의 시스템 레벨 성능의 차이를 분석하고, 그에 따른 결론을 IV장에서 맺는다.

II. Spatial Channel Model Extended (SCME) 특성

SCME는 이름과 같이 SCM을 바탕으로 차세대 이동통신 시스템의 모델에 맞게 확장한 모델이다. 이런 접근 방법은 SCM과 호환성을 유지하면서 차세대 이동통신 시스템의 모델을 만들 수 있다. 앞으로 우리는 SCM에서 SCME의 확장되는 개념을 바탕으로 실제 시뮬레이션을 하였을 때 다른 점을 논의 할 것이다.

2.1 대역폭의 확장

SCM의 대역폭은 위에서 정의되어 있듯이 5MHz의 대역폭으로 모델링 되어있다. SCME는 원래 5MHz의 대역폭의 경우와 비교해서 기본적인 모델은 달라지지 않는다. SCM에서는 6개 경로안에 20개의 Sub-path의 Angular Spread는 변화되지만 Delay Spread의 값은 변화하지 않는다. SCME에서 Angular Spread는 동일하다. 하지만, Delay Spread는 Saleh와 Valenzuela가 indoor propagation 모델링을 위해 제안한 intra-cluster Delay Spread로 불리는 방법으로 접근한다^[4]. 20개의 Sub-path를 3개(Macro Model), 4개(Micro Model)의 Mid-path로 나누어진다. 각 모델에 따른 Delay와 각 Mid-path의 묶음은 표 1과 같이 정의된다.

2.2 거리 감쇄 모델

SCM의 거리 감쇄 모델은 Suburban, Urban Macro

표 1. SCME채널의 각 Sub-path의 Delay와, Sub-path번호

시나리오		Suburban Macro Urban Macro		Urban Micro	
각 경로당 Mid-path수		3		4	
각 경로와 Sub-path의 Delay관계	1	0 ns	1,2,3,4,5,6,7,8,19,20	0 ns	1,2,3,4,19,20
	2	7 ns	9,10,11,12,17,18	5.8 ns	5,6,7,8,17,18
	3	26.5 ns	13,14,15,16	13.5 ns	9,10,15,16
	4	-	-	27.6 ns	11,12,13,14

표 2. SCME 채널의 거리 감쇄 모델

시나리오		Suburban Macro	Urban Macro	Urban Micro
SCM의 거리 감쇄 (단위 : meter)	NLOS	$31.5+35.0\log_{10}(d)$	$34.5+35.0\log_{10}(d)$	$34.53+38.0\log_{10}(d)$
	LOS	-	-	$34.53+38.0\log_{10}(d)$
SCM 선택도의 표준편차 (dB)	NLOS	8	8	10
	LOS	-	-	4
SCME의 거리 감쇄 (단위 : meter)	NLOS	$7.17+38.0\log_{10}(d)$	$11.14+38.0\log_{10}(d)$	$31.81+40.5\log_{10}(d)$
	LOS	$30.18+26.0\log_{10}(d)$	$30.18+26.0\log_{10}(d)$	$30.18+26.0\log_{10}(d)$
SCME 선택도의 표준편차 (dB)	NLOS	10	10	10
	LOS	4	4	4
5GHz와 2GHz 거리 감쇄 차이	(N)LOS	+8 dB	+8 dB	+8 dB

모델은 COST-Hata-Model, Urban Micro 모델은 COST-Walfish-Ikegami 모델에 기반이 되어있다^[5]. 하지만 2GHz 대역과, 5GHz 대역을 동시에 비교할 수 있는 모델은 거의 존재하지 않는다. 이러한 것을 나타내기 위해, 2GHz 대역과 5GHz의 진공상태의 거리 감쇄 차이인 8dB의 이득을 더해준다. 그 결과는 표 2에 정리되어 있다.

2.3 모든 시나리오에서 Light-of-Sight (LOS) 고려 SCM에서 거리 감쇄와 Ricean K-factor 정의로 구성된 LOS 모델은 Urban Micro 모델에서만 선택 사항이다. SCME에서는 K-factor 정의를 Urban과 Suburban Macro 모델로 확장 시킨다. LOS가 계산될 확률은 $P_{LOS} = (1 - h_B/h_{BS})(1 - d/d_w)$ 와 같다. 여기서 h_{BS} 는 기지국의 높이, h_B 는 건물 높이의 평균, d_w 는 제한 거리이다. 건물 높이는 기지국 높이보다 높고, 제한 거리는 300m보다 짧다고 가정한다.

그리고 경험적인 Suburban 환경에서 기지국의 높이가 약 20m로 가정된 K-factor model이 있다.^[6] 이 모델은 비슷한 조건에서는 환경에 독립적인 크기를 가진다. 사용자의 높이가 1.5m, 전파 넓이는 360°, 계절은 여름일 때 K값은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$K = 15.4 - 5.0 \log_{10} d \quad (1)$$

d 는 기지국과 사용자 사이의 거리이고, K 의 단위는 dB이다.

2.4 각 경로의 Delay와 각도의 Drifting

각 경로와 Sub-path 위치정보는 경로번호인 n , Sub-path번호인 m , 시간의 파라미터인 k 로 정의

되어 있다. SCM에서는 각 Scatter의 위치는 고정되어 있다고 가정한다. 그 결과로 LOS 시나리오에서 LOS 각도를 제외하고 기지국으로부터의 scatter 각도는 바뀌지 않는다.^[11] 하지만, 실제 채널 환경과 더 유사하게 하기 위해서는 사용자의 움직임을 고려해야만 한다. 이것을 고려하기 위해 SCME에서는 시간에 따라 Sub-path의 각도와 delay가 변하게 된다. 이와 유사하게 기지국과 사용자 사이의 각도도 시간에 따라 변하게 된다. 시간에 따른 각도와 Delay 변화는 다음 식으로 표현된다.

$$\theta_{MSk+1} = \begin{cases} \theta_r - \gamma_k, & \text{for } d_{MS-BSk+1} < d_{MS-BSk} \\ \theta_{BSk} - 180^\circ + \gamma_k, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\theta_{BSk+1} = \theta_{BSk} - (\theta_{MSk+1} - \theta_{MSk})$$

$$d_{MS-BSk+1} = \frac{\sqrt{d_{MS-BSk}^2 - l^2 - 2d_{MS-BSk}l \cos(\varphi_{MS-BSk})}}{\cos(\varphi_{MS-BSk+1})}$$

$$\gamma_k = \left(\frac{\arcsin(d_{MS-BSk} \sin(\varphi_{MS-BSk}))}{d_{MS-BSk+1}} \right), l = \frac{\lambda}{2D_s} \quad (2)$$

위 식에서, $\varphi_{MS-BSk} = \theta_r - \theta_{nm,AoA,k}$ 이다.

$$\theta_{nm,AoA,k+1} = \begin{cases} \theta_r - \xi_k, & \text{for } d_{MS-BSk+1} < d_{MS-BSk} \\ \theta_r - 180^\circ + \xi_k, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\xi_k = \arcsin\left(\frac{d_{nm,k} \sin(\varphi_{nm,k})}{d_{nm,k+1}}\right), \quad (3)$$

위 식에서, $\varphi_{nm,k} = \theta_r - \theta_{nm,AoA,k}$ 이다.

$$d_{nm,k+1} = \frac{\sqrt{d_{nm,k}^2 + l^2 - 2d_{nm,k}l \cos(\varphi_{nm,k})}}{\cos(\varphi_{nm,k+1})}$$

$$\tau_{nm,k+1} - \tau_{nm,k} = \cos(\varphi_k)l/c \quad (4)$$

위 식에서, LOS sub-path에서는 $\varphi_k = \varphi_{MS-BSk}$ 이고, 이 외의 sub-path에서는 $\varphi_k = \varphi_{nm,k}$ 이다.

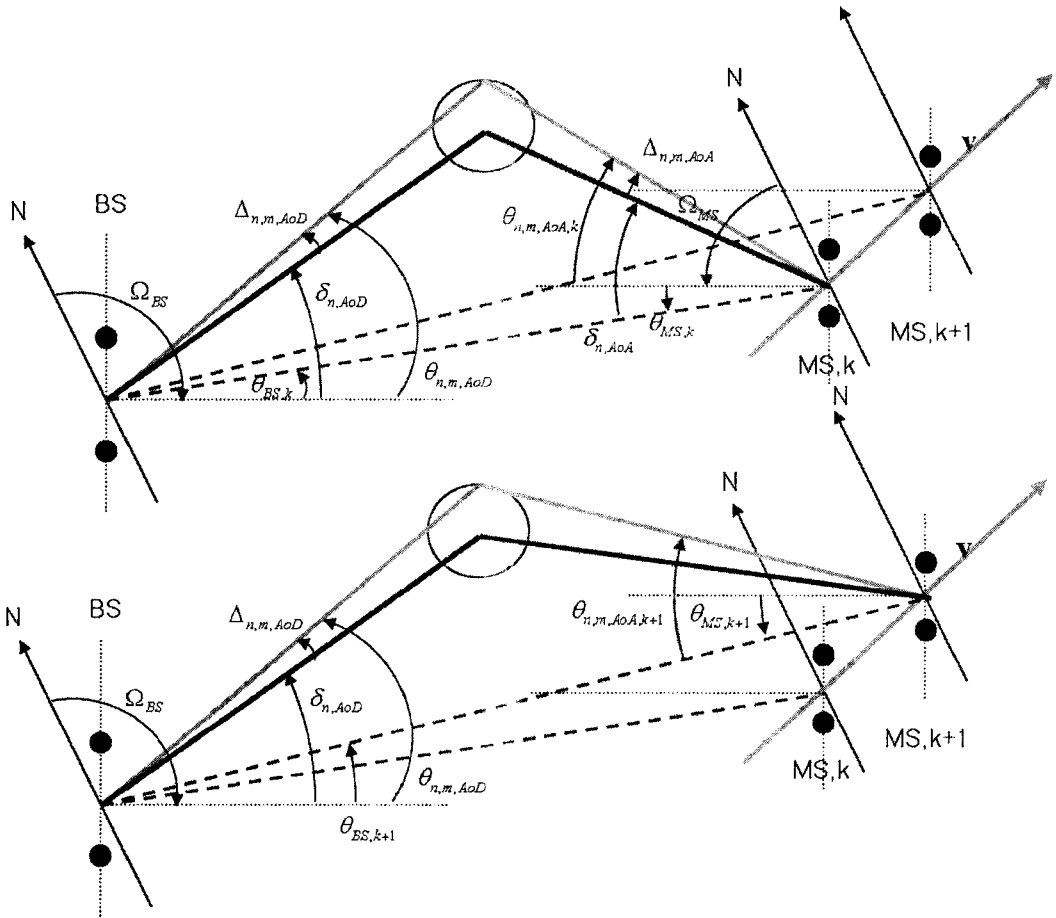


그림 1. SCME의 Time Drifting

그림 1은 SCME의 Time Drifting을 간단한 그림으로 나타낸 것이다.

2.5 SCME 채널 분포

그림 2번부터 7번까지는 시뮬레이션 한 SCME 채널의 분포를 나타낸 것이다. 수신기에서 분해가

능한 경로는 1칩레이트(Chip rate) 이내에 들어오는 경로의 에너지의 합으로 가정하였다. 칩레이트는 2.5MCps와 20MCps로 가정하였다.

그림 2와 3은 SCME의 경로의 개수를 나타내는 것인데 그림 2는 칩레이트를 2.5MCps로 하였고 그림 3은 칩레이트를 20MCps로 하였다.

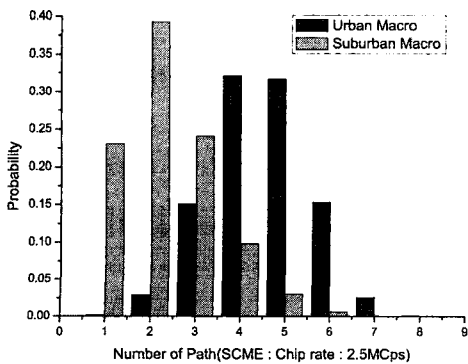


그림 2. 칩레이트를 2.5MCps로 했을 때 경로갯수 분포

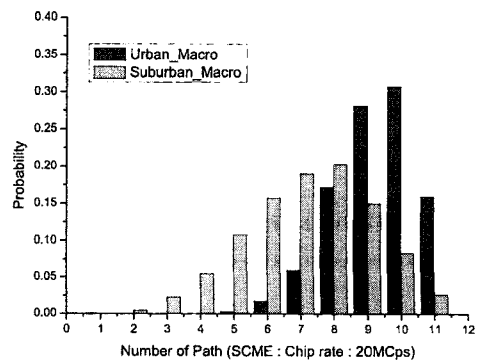


그림 3. 칩레이트를 20MCps로 했을 때 경로갯수 분포

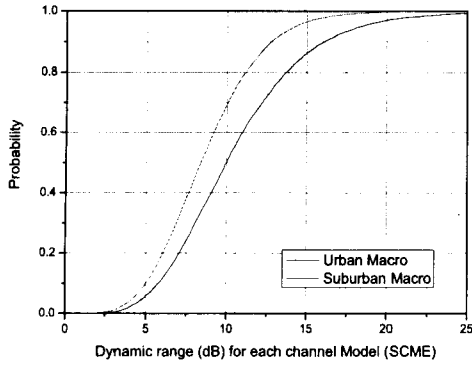


그림 4. SCME의 Dynamic Range 분포의 CDF

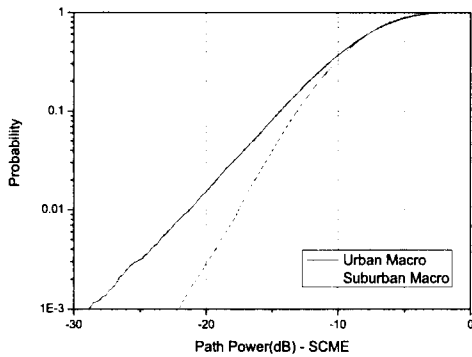


그림 5. SCME의 각 경로의 파워 분포의 CDF

그림 4는 SCME의 칩레이트가 20MCps일 때 각 Path Power의 Dynamic Range의 분포의 CDF를 나타낸 것이다. 여기서 Dynamic Range R는 다음과 같이 정의된다.

$$R = 10\log_{10}(Power_{max}/Power_{min}) \quad (5)$$

그림 5는 SCME의 칩레이트가 20MCps일 때 각 경로의 파워의 분포를 CDF로 나타낸 그림이고, 그림 6과 7은 대역폭의 확장에 따른 영향과 Drifting의 영향을 포함하고 LOS의 영향을 포함

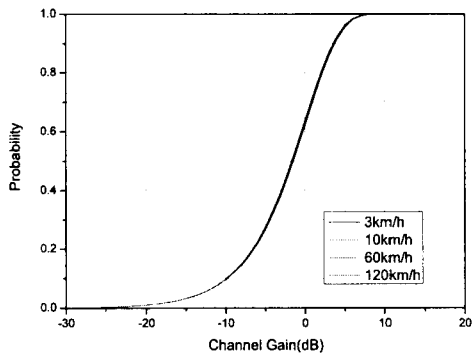


그림 6. 사용자의 이동속도에 따른 SCME 채널 이득의 CDF

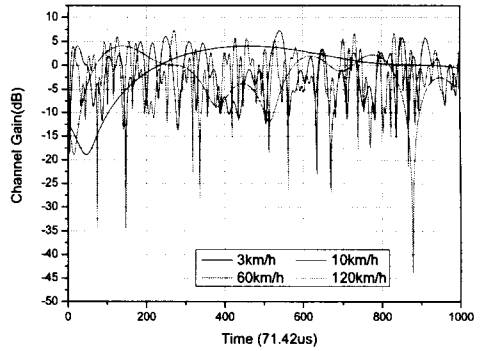


그림 7. 사용자의 이동속도에 따른 SCME 채널 이득의 변화

하지 않는 SCME 채널의 단말 이동속도별로 채널이득의 CDF와 시간에 따른 변화정도를 보여주는 그림이다.

III. 성능 비교

SCM과 SCME를 비교하기 위해, 다음과 같은 환경과 파라미터를 사용하였다.

3.1 시뮬레이션 환경

1개의 기지국과 여러개의 사용자가 존재하는 시스템을 가정하였다. 각 사용자는 거리 감쇄 영향이 다른 특성의 영향에 비해 굉장히 크기 때문에 거리 감쇄 영향을 무시하였고, 채널 성능은 기지국이 정확하게 알고 있다고 가정하였다. 채널 파라미터에 대한 정리는 표 3에 정리하였다. 그리고 채널 이득의 시스템 레벨 성능값은 (6)식과 같이 정의하였다.

표 3. 시뮬레이션 파라미터

종류	파라미터
채널 모델	Suburban Macro
변조 방법	OFDM- 3GPP LTE (FFT Size : 2048)
안테나 갯수	Tx : 4, Rx : 4
전송 대역폭	20MHz
Slot 길이	0.5ms
Sub-carrier 크기	15kHz
Sampling 주파수	30.72MHz
사용하는 Sub-carrier 갯수	1320
스케줄링 알고리즘	PFRS (Proportional Fairness Rate Scheduling)
Drifting 시간	50, 500, 5000(0.5/7ms)

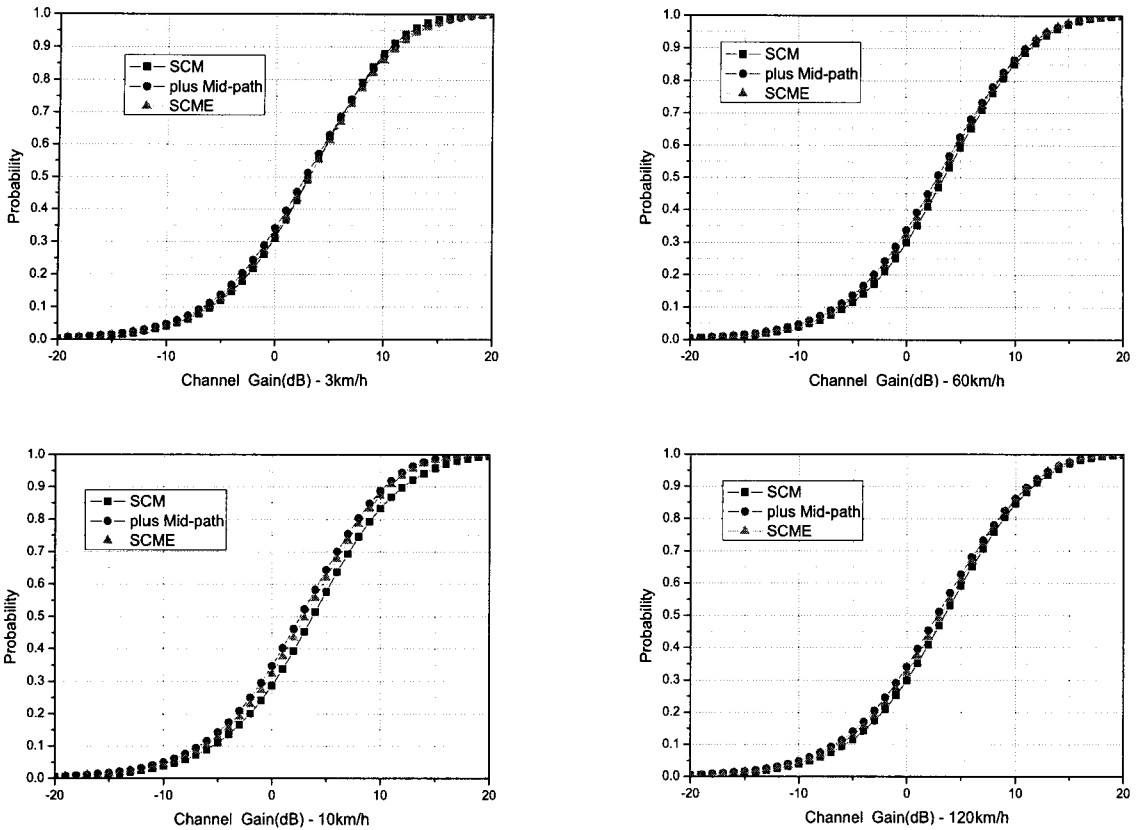


그림 8. 3km/h, 10km/h, 60km/h, 120km/h 일 때, 채널 이득의 CDF

$$C = \log_2(1 + \gamma_{channel}) \quad (6)$$

$\gamma_{channel}$ 은 잡음의 크기가 1일 때, SCM과 SCME 시뮬레이터에서 출력되는 채널의 SNR값을 더한 값이다.

3.2 SCM과 SCME의 성능 비교

그림 8은 SCM과 SCME에서 대역폭의 확장의 영향만을 고려한 채널과, SCME 채널 Gain의 CDF를 3km/h, 10km/h, 60km/h, 120km/h의 속도에서 비교한 그림이다. SCME Drifting Time은 $50 \times 0.5 / 7ms$ 마다, 시뮬레이션 시간은 57.15초 동안 진행하였다. 그림 분석 결과 SCM과 SCME의 채널 CDF 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

3.3 SCM과 Drifting을 적용하지 않은 SCME 차이 비교

그림 9는 다른 SCM과 Drifting을 적용하지 않은 SCME의 시스템 레벨 성능을 비교한 그림이다. 시뮬레이션은 사용자의 수가 1명에서 32명까지 변할 때 스케줄링 방법을 PFRS 방식으로 두 채널

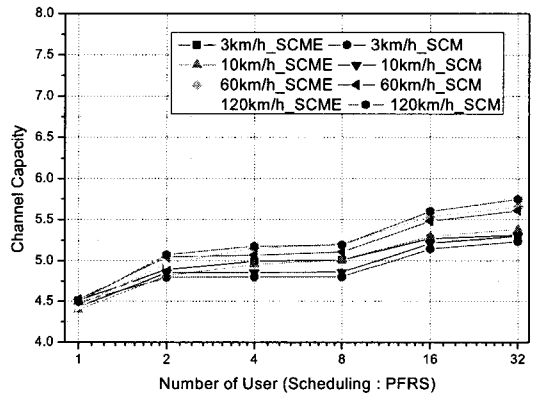


그림 9. 스케줄링 방식을 PFRS를 적용했을 때, 시스템 레벨 성능

널 모형을 비교하였다.

표 4는 그림 9에서 User 32명일 때, 시스템 레벨 성능값을 수치화하고, 시스템 레벨 성능을 오름차순으로 정리하고 그 차이를 나타낸 표이다. 표를 보면, SCM보다 SCME가 시스템 레벨 성능이 더 좋으며, 속도가 증가할수록 시스템 레벨 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

표 4. 스케줄링 방식을 PFRS, User가 32명일 때 시스템 레벨 성능과 그 차이

시나리오	성능 [bps]	차이
3km/h SCM	5.23372	
10km/h SCM	5.30036	0.06664
3km/h SCME	5.31240	0.01204
10km/h SCME	5.38085	0.06845
60km/h SCM	5.60754	0.22669
60km/h SCME	5.65666	0.04912
120km/h SCM	5.74613	0.08947
120km/h SCME	5.77976	0.03363

3.4 각 경로의 Delay와 각도의 Drifting 영향에 따른 SCM과 SCME차이 비교

그림 10과 11는 User가 8명, 32명일 때, 각 경로 의 Delay와 각도의 Drifting 영향에 따른 SCM과 SCME의 시스템 레벨 성능을 비교한 그림이다. 시뮬레이션은 Drifting Time (1 Drifting Time :

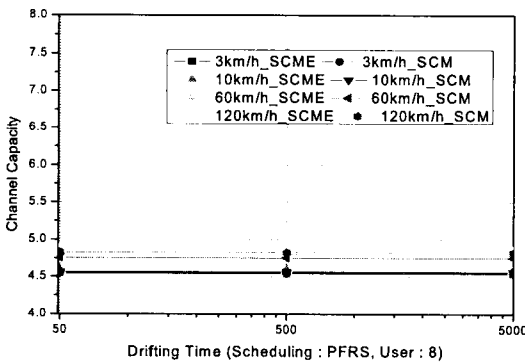


그림 10. User가 8명, 스케줄링 방식을 PFRS를 적용했을 때, 시스템 레벨 성능

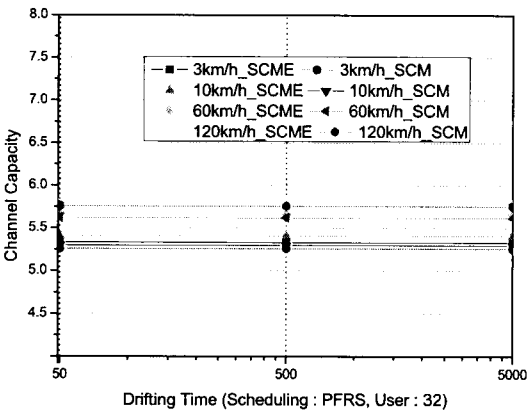


그림 11. User가 32명, 스케줄링 방식을 PFRS를 적용했을 때, 시스템 레벨 성능

71.42us) 이 50부터 5000까지 변할 때 스케줄링 방법을 PFRS 방식으로 두 채널 모델을 비교하였다. 본고의 실험환경에서는 Drifting Time이 50이상일 때, 시스템 레벨 성능에 주는 영향은 동일함을 알 수 있다.

표 5와 6는 User 8명과 32명일 때, Drifting Time이 50 (1 Drifting Time : 71.42us) 일 때, 시스템 레벨 성능값을 수치화 하고, 오름차순으로 정렬한 후, 위의 시나리오와의 차이를 나타낸 표이다. 표를 보면, 표 4와 같이 SCM보다 SCME의 시스템 레벨 성능이 더 좋으며, 속도가 증가할수록 시스템 레벨 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 표 4와 표 6을 비교해보면, Drifting Time에 의해 SCME의 시스템 레벨 성능이 조금 증가했음을 알 수 있다.

표 5. User 8명, Drifting Time이 50일 때, 시나리오에 따른 시스템 레벨 성능값과, 그 차이

시나리오	성능 [bps]	차이
3km/h SCM	4.54072	
3km/h SCME	4.56018	0.01946
10km/h SCM	4.56507	0.00489
10km/h SCME	4.59779	0.03272
60km/h SCM	4.75676	0.15897
60km/h SCME	4.80926	0.0525
120km/h SCM	4.82956	0.0203
120km/h SCME	4.88346	0.0539

표 6. User 32명, Drifting Time이 50일 때, 시나리오에 따른 시스템 레벨 성능값과, 그 차이

시나리오	성능 [bps]	차이
3km/h SCM	5.25903	
10km/h SCM	5.29565	0.03662
3km/h SCME	5.33363	0.03798
10km/h SCME	5.40738	0.07375
60km/h SCM	5.61702	0.20964
60km/h SCME	5.67120	0.05418
120km/h SCM	5.75788	0.08668
120km/h SCME	5.78815	0.03027

IV. 결론

대역폭의 확장 영향에 따른 차이를 비교하면,

스케줄링 방식이 PFRS 인 경우는 낮은 속도(3km/h, 10km/h) 일 때 SCM보다 SCME의 시스템 레벨 성능이 약간 더 좋을 수 있다. 이는 모델이 SCME로 확장되면서, Delay Spread가 Mid-path에 대한 영향으로 여러 경로가 존재하므로 채널 이득의 변화가 SCM보다 크기 때문에 SCME의 성능이 더 좋다.

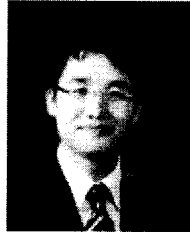
각 경로의 Delay와 각도의 Drifting영향에 따른 차이를 비교하면, 스케줄링 방식이 PFRS인 경우에는 같은 사용자가 계속 선택되는 것을 막기 위해 가중치를 두어 QoS를 보장한다. 따라서, 채널 이득 변화가 빠를수록 다른 사용자가 선택될 확률이 높아져서 시스템 레벨 성능이 높게 나타난다. 지금 SCME채널이 SCM보다 시스템 레벨 성능이 높게 나타나고 있다. 이는 위의 결과와 같이 SCME가 SCM에 비해, 채널의 변화가 심하다는 것을 보여주고 있다. 그리고, Drifting Time이 변함에 따라 시스템 레벨 성능의 변화는 거의 존재하지 않음을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 3GPP, "Spatial channel model for MIMO simulations", TR 25.996 V6.1.0, Sep. 2003. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/>
- [2] M. F. Pop, and N. C. Beaulieu, "Limitations of sum-of-sinusoids fading channel simulators," *IEEE Trans. Commun.*, vol.49, no.4, Apr. 2001, pp.699-708.
- [3] D. S. Baum, J. Hansen, J. Salo, G. D. Galdo, M. Milojevic and P. Kyösti, "An interim channel model for beyond-3G systems: extending the 3GPP spatial channel model (SCM)", in *Proc. IEEE VTC'05* vol.5, June. 2005, pp.3132-3136.
- [4] A. Saleh, and R. A. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.SAC-5, no.2, Feb. 1987, pp.128 - 137.
- [5] COST 231, "Urban transmission loss models for mobile radio in the 900- and 1800 MHz bands," TD(90)119 Rev. 2, Sep. 1991.
- [6] L. J. Greenstein, S. Ghassemzadeh, V. Erceg, and D. G. Michelson, "Ricean K-factors in narrow-band fixed wireless channels," in *Proc. WPMC'99*, Amsterdam, The Netherlands, Sep. 1999.

허 준 행 (Joon-Haeng Heo)

준회원



2007년 2월 한양대학교 전자컴퓨터공학부 학사졸업
 2008년 6월 한양대학교 전자전기제어계측공학과 석사과정
 <관심분야> Scheduling, Resource Management

김 동 우 (Dongwoo Kim)

정회원



1994년 8월 한국과학기술원 공학박사
 1994년 7월~2000년 2월 신세기통신 R&D센터 선임과장
 2000년 3월~2004년 2월 한양대학교 전자컴퓨터공학부 조교수

2004년 3월~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 부교수

<관심분야> Multi-user MIMO, Cognitive radio transmission

이 희 수 (Heesoo Lee)

중신회원



1993년 2월 한국과학기술원 학사
 1995년 2월 한국과학기술원 석사
 2001년 2월 한국과학기술원 박사
 2001년 3월~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
 <관심분야> IMT-Advanced system, MIMO, 적응전송, 다중접속 릴레이