

지하철 환경에서 CDMA 이동통신시스템의 기지국 용량 분석

정회원 양원석*, 양은샘**, 박현민***

Capacity Analysis of Base Stations in CDMA Mobile Communications Systems in the Subway Environment

Won Seok Yang*, Eun Saem Yang**, Hyun Min Park*** *Regular Members*

요약

본 논문에서는 지하철의 전파환경과 트래픽 특성이 지상과 상이함을 밝히고 CDMA 이동통신시스템의 지하철 기지국 용량을 분석하고자 한다. 이를 위해 다중경로 페이딩에 의한 신호대 잡음비, 셀 구조에 따른 섹터화 이득, 전파환경에 의한 경로손실 지수 및 주파수재사용 계수 등을 분석하여 지하철 구간의 무선 파라미터를 도출하고 링크용량을 산정한다. 또한, 지하철 기지국에서 peakedness 지수를 측정하여 지하철 기지국에 peaked 트래픽이 발생함을 밝힌다. 마지막으로 포아송 트래픽을 가정하는 얼랑-B 모형 대신 peaked 트래픽을 고려하는 Neal-Wilkinson 모형을 이용하여 지하철 기지국의 얼랑 용량을 산정한다.

Keywords : capacity analysis, subway, Neal-Wilkinson, CDMA, traffic characteristics

ABSTRACT

We analyze the capacity of CDMA base stations in the subway environment. We investigate the characteristics of multipath fading, cell structures, and propagation environment in the subway, analyze signal to noise ratio, sectorization gain, path-loss exponent, frequency reuse factor, and obtain the link capacity of a base station in the subway. We measure the peakedness factor and reveal that base stations in the subway have peaked traffic. We use Neal-Wilkinson model to obtain the Erlang capacity instead of Erlang-B model based on Poisson traffic.

1. 서론

CDMA 이동통신시스템의 기지국 용량은 무선환경과 트래픽 특성에 영향을 받는다. 즉, 셀 구조와 지형에 따라 전파의 간섭과 감쇄 정도가 변화하므로 동시 사용자 수를 의미하는 링크용량이 변화한다. 기지국 용량은 트래픽의 확률적인 특성과 차단률을 서비스 품질 수준(GoS:Grade Of Service)의 파라미터로 고려

하여 링크용량을 기준으로 산정된다.

이동통신시스템에서는 일반적으로 얼랑-B 모형을 적용하여 기지국의 트래픽 처리용량인 얼랑용량을 산정한다^[1]. 얼랑-B 모형은 통화 발생과 통화시간이 각각 포아송 과정과 지수분포를 따른다고 가정하는 M/M/c/c 대기행렬 모형이다^[2]. 따라서 기지국 용량은 통화 발생과 통화시간과 같은 트래픽의 확률적 특성에 영향을 받는다.

* 이 논문은 2011년도 한남대학교 교비학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

* 한남대학교 경영학과 (wonsyang@hnu.kr), ** 한림대학교 컴퓨터공학과 (yanges@hallym.ac.kr)

*** 배재대학교 경영학과 (hmpark12@pcu.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-06-255, 접수일자 : 2011년 6월 16일, 최종논문접수일자 : 2011년 7월 13일

일반적으로 지상의 등방형 CDMA 이동통신시스템의 기지국 용량은 무선환경과 트래픽 특성을 기준으로 산정하고 있다^[1,3,4]. 지상의 등방형 셀 구조 이외에 중첩 셀, 도심 환경의 마이크로 셀 등 다양한 셀 크기를 고려한 기지국 용량도 연구되었으나^[5-8] 지상 이외의 장소에서 무선환경과 트래픽의 확률적 특성을 고려하여 기지국 용량을 체계적으로 다룬 연구는 나오지 않았다.

지상 이외의 장소 중에서 특히 지하철 구간의 무선환경과 트래픽 특성은 다음과 같은 점에서 지상과 다르다.

첫째, 지하철 구간의 전파 전달환경은 지상과 다르다. 지하철 구간은 밀폐된 터널구조이므로 전파의 전달경로가 막혀있기 때문에 경로손실이 지상과 다르다. 이동통신 이용자들은 이동 중인 지하철에서 서로 인접한 상태에서 통화를 하므로 지하철에서는 전파의 감쇄가 지상과 다르다. 따라서 지상을 기준으로 설정된 링크용량 방정식의 무선 파라미터를 변경해야 한다.

둘째, 지하철 차량이 다른 역사로 이동할 경우 다수의 승객이 통화하고 있다면 핸드오버(handover) 통화가 집단적으로 발생하게 된다. 일반적으로 기지국 용량 산정에 이용하는 얼랑-B 모형에서는 통화가 한 개씩 발생하는 포아송 과정을 가정한다. 따라서 지하철 기지국의 용량을 분석하기에는 얼랑-B 모형에 한계가 있다.

이동통신사업자는 막대한 이용대가를 지불하고 주파수 자원을 이용한다. IMT-2000의 주파수 이용대가로 비동기식 사업자에게는 1.3조원, 그리고 동기식사업자에게는 1.15조원이 부과되었다^[9]. 따라서 이동통신서비스의 사업성을 확보하기 위해서는 주파수의 효율적 이용이 매우 중요하다. 주파수 효율은 1Hz의 대역으로 초당 전송 가능한 비트수이다^[10]. 주파수 효율성을 증진하기 위해서는 전송 가능한 비트수인 기지국 용량에 대한 분석과 관리가 중요하다.

현재 국내에서는 수백여 개의 지하철 기지국이 운영되고 있고 지하철 이용인구와 연장구간이 증가하고 있으므로 지하철에서 이동전화의 통화품질이 더욱 중요해지리라 예상된다. 따라서 지하철에서의 이동통신 통화품질을 높이고 막대한 대가를 지불한 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 위해서는 지하철 기지국 용량에 대한 체계적인 분석이 필요하다.

이후 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 지하철의 셀 구조와 단말의 이동속도를 분석하여 지하철 환경에서 링크방정식의 파라미터를 도출하고 링크용량을 산정한다. 3장에서는 지하철 기지국의 트래픽

측정 자료를 토대로 지하철에서 peaked 트래픽이 발생함을 보인다. 마지막으로 Neal-Wilkinson 모형을 적용하여 지하철 환경에서 기지국 용량을 산정한다.

II. 지하철에서의 링크용량

2.1 파라미터값 산출

FA(Frequency Allocation)는 통화 전송을 위한 주파수 단위이다. 1 FA의 대역폭은 IS-95A와 CDMA 2000 1x에서는 1.25MHz이고 WCDMA에서는 5MHz이다. 링크용량은 동시 사용 가능자 수를 의미한다. 한 기지국의 1 FA에서 M명이 동시에 음성통화를 할 수 있다고 할 때 일반적으로 링크용량 M은 식 (1)과 같다^[3,4].

$$M = \frac{(W/R) f \lambda}{(E_b/N_0) v} \rho. \quad (1)$$

여기에서 W는 주파수 대역폭, R은 데이터 속도, E_b/N_0 는 신호대 잡음비, v는 음성 활성화율, λ는 섹터화 이득, f는 주파수채사용 계수, 그리고 ρ는 셀 로딩 지수를 나타낸다.

지하철에서는 무선환경이 지상과 다르므로 식 (1)과 같은 링크용량의 파라미터 값은 지하철 환경에 맞게 조정되어야 한다. 본 논문에서는 전력제어는 완벽하다고 가정한다.

2.1.1 신호대 잡음비(E_b/N_0)

빠른 속력으로 이동하는 지하철에서의 통화는 E_b/N_0 가 지상보다 크다. 단말이 이동하면 다중경로 페이딩이 발생하고^[11], 이로 인해 경로손실이 발생하므로 단말의 속력이 높을수록 E_b/N_0 가 증가한다.

서울메트로의 노선도 서비스를 이용하면 표 1과 같이 지하철의 평균 운행 속력이 30~40km/h임을 알 수 있다. 이동통신서비스 이용자들은 지하철이 이동하는 중에도 통화를 지속하므로 지하철에서는 단말의 이동속도를 30km/h로 간주할 수 있다.

표 2는 국내 PCS와 같은 1.9GHz 주파수 대역에서 다중경로 페이딩 및 페루프 전력제어를 고려한 경우 RC3(Radio Configuration 3) FCH(Fundamental Channel)의 FER(Frame Error Rate) 분석결과이다.

단말의 이동 속도가 3km/h와 30km/h인 경우 E_b/N_0 의 3GPP2 권고안은 표 2와 같다^[11].

표 2에 따르면 단말의 이동속도가 다른 두 경우

표 1. 서울 지하철의 운행 속력.
Table 1. The speed of subway trains in Seoul.

구분	출발	도착	거리 (km)	시간 (분)	평균속력 (km/h)
2호선	신림	사당	8.8	15	35.2
	신림	잠실	16.7	28	35.8
	신림	성수	23.2	39	35.7
3호선	대화	연신내	22.7	33	41.3
	대화	충무로	33.7	53	38.2
	대화	수서	54.4	90	36.3
4호선	당고개	충무로	15.4	26	35.5
	당고개	사당	29.5	51	34.7
	당고개	오이도	71.5	114	37.6

표 2. 단말 이동 속도에 따른 FER와 E_b/N_0 .
Table 2. FER and E_b/N_0 according to handsets' speed.

단말 이동 속도	파라미터	3GPP2 권고안		추정치 (FER 1%)
		하한	상한	
3km/h	FER	2.0%	0.5%	-
	E_b/N_0 (dB)	3.8	4.4	4.2
30km/h	FER	1.40%	0.50%	-
	E_b/N_0 (dB)	5.4	6.0	5.7

FER이 상이하여 E_b/N_0 를 직접 비교하기 어렵다. 본 논문에서는 FER과 E_b/N_0 의 변화가 선형이라고 가정하여 FER이 1%인 경우의 E_b/N_0 추정치를 산정하였다.

단말의 이동속도가 3km/h와 30km/h인 경우 E_b/N_0 의 추정치는 각각 4.2dB와 5.7dB이다. 단말 속력에 따라 전파환경을 구분하면 표 2에서 단말 이동 속도가 30km/h인 경우를 지하철 환경으로 간주할 수 있다. 결과적으로 지하철 기지국의 E_b/N_0 가 지상보다 1.3배 크다.

2.1.2 섹터화 이득

지상과 지하철은 셀 구조가 다르기 때문에 섹터화 이득이 다르다. 일반적으로 지상 기지국은 3섹터로 운영된다. 반면, 지하철은 차폐된 터널 구조이므로 지상의 기지국 신호에 영향을 받지 않고 지하철 구간의 다른 셀의 간섭도 거의 없을 것으로 예상된다.

따라서 지하철 기지국은 1섹터인 옴니(omni) 셀이라 간주할 수 있다. 그러므로 지하철에서의 섹터화 이득은 1로 간주한다.

2.1.3 경로손실지수

무선환경에 따라 주파수 경로손실이 다르므로 지상

과 지하철의 주파수재사용 계수가 서로 다르다. 기지국과 단말의 거리에 따른 전파의 경로손실은 경로손실지수(path-loss exponent)로 표현된다. 경로손실지수가 클수록 거리에 따른 경로손실이 증가한다. 경로손실지수는 대략 2~5 정도의 값을 갖고 일반적으로는 경로손실지수에 4를 적용한다. 자유공간에서는 경로손실지수가 2이다^[4].

지하철에서는 전파가 외부에서 지하철 차체를 투과해 내부의 이용자에게 전달된다. 이동성을 배재하면 지하철에서의 전파환경은 빌딩과 유사하다. 빌딩에서 경로손실은 표 3과 같이 기지국과 단말 사이의 층수에 영향을 받는다^[4].

지하철에서는 신호가 차체를 투과해야 하므로 전파환경이 표 3의 1층 간격과 유사하다. 그러나 지하철 내부에는 이용자들이 밀집되어 있어 전파의 감쇄가 이중으로 발생하여 표 3의 1층 경우보다 경로손실지수가 클 것으로 예상된다.

따라서 본 논문에서는 지하철에서 경로손실지수를 5로 설정한다.

표 3. 빌딩에서 기지국과 단말 간 층수에 따른 경로손실지수.
Table 3. Path loss exponents over the number of floors between a base station and a handset in a building.

구분	동일 층	1층	2층
경로손실지수	2.76	4.19	5.04

2.1.4 주파수재사용 계수

주파수재사용 계수는 타셀 간섭에 의한 용량 감소를 의미한다^[3]. 전파의 경로손실이 크고 섹터 수가 작을수록 타셀 간섭이 작아지기 때문에 결국 주파수재사용 계수가 증가한다.

Wang의 연구결과에 따르면 주파수재사용 계수는 표 4와 같이 경로손실지수와 더불어 섹터 수에도 영향을 받는다^[12].

지하철은 1섹터이고 경로손실지수가 5 정도이므로 표 4에서 알 수 있듯이 주파수재사용 계수가 0.75이다. 지상에서는 경로손실지수가 4정도이고 셀은 주로 3섹터이므로 지상의 주파수재사용 계수는 0.55 수준

표 4. 안테나 패턴 및 경로손실지수에 따른 주파수재사용 계수.
Table 4. Frequency reuse efficiency according to antenna patterns and path loss exponents.

경로손실지수	4	4.5	5
옴니 셀	0.65	0.7	0.75
섹터화 셀	0.55	0.6	0.62

이다. 결과적으로 지하철의 주파수재사용 계수는 지상에 비해 1.4배 정도 크다.

2.1.5 데이터 속도

기술규격에 규정되어 있거나 무선환경에 영향을 받지 않는 파라미터는 지상과 지하철에서 동일하다. 주파수 대역폭과 데이터 속도는 무선환경과 상관없다. 데이터 속도는 서비스와 이동통신기술에 따라 상이하다. 음성의 데이터 속도는 CDMA2000 1x에서는 9.6Kbps이나 WCDMA에서는 12.2Kbps이다. 지상과 지하철에서 동일한 서비스가 제공되고 동일한 이동통신기술이 적용되면 두 파라미터 값도 같다.

2.1.6 음성 활성화율

음성 활성화율은 사용자의 통화패턴에만 영향을 받는다. 지상과 지하철에서 이용자의 통화패턴이 다르다고 주장하기는 어렵다. 따라서 지상과 지하에서의 음성 활성화율은 동일하다고 할 수 있다.

2.2 지하철에서의 링크용량 산정

지금까지 논의를 토대로 지상 기지국의 링크용량 및 지하철 기지국의 링크용량을 산출하면 표 5와 같다. 결과적으로 지상과 지하철 기지국의 링크용량이 상이하므로 지상 기지국의 용량을 지하철 기지국에 그대로 적용하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

표 5. 지상 및 지하철 기지국의 링크용량.
Table 5. Link capacity of a base station on the ground and in the subway environment.

구분	지상 기지국 (3섹터)	지하철 기지국
대역폭(<i>B</i>), MHz	1.2288	1.2288
데이터 속도(<i>R</i>), Kbps	9.6	9.6
신호대 잡음비(<i>E_v/N₀</i>), dB	4.2	5.7
주파수 재사용률 (<i>f</i>)	0.60	0.75
음성 활성화율(<i>v</i>)	0.50	0.50
섹터화 이득(<i>λ</i>)	2.50	1.00
셀 로딩 지수(<i>ρ</i>)	60%	60%
링크용량 (IFA)	88	31
링크용량 (1섹터)	29	31

Ⅲ. 지하철에서의 열량용량

이동전화 이용자들은 자신이 원하는 때에 통화를 시도하므로 기지국 입장에서는 통화시도가 확률적으

로 발생한다고 간주할 수 있다. 통화시간도 이용자에 따라 다르므로 확률적이다. 따라서 식 (1)의 링크 용량 *M*에 통화시도와 통화시간의 확률적인 특성과 차단률을 GoS의 파라미터로 적용하여 기지국 용량을 산정한다.

일반적으로 식 (2)의 열량-B 모형을 이용하여 통화시도와 통화시간을 확률적으로 모형화하고 기지국 용량을 분석한다.

$$P_B = \frac{A^M/M}{\sum_{k=0}^M A^k/k!} \tag{2}$$

차단률 *P_B*가 주어진 경우, 식 (2)에서 *P_B*를 만족하는 *A*를 계산할 수 있다. 이때 *A*가 기지국의 트래픽 처리용량, 즉 열량용량이다. 여기에서 *M*은 식 (1)의 링크용량이다.

통신시스템에서는 ‘peakedness 지수’를 이용하여 트래픽을 분류한다. Peakedness 지수를 *Z*라 표기하면 *Z*는 제공로드(offered load)의 평균과 분산의 비율을 의미한다. *Z*=1이면 포아송 트래픽, *Z*<1이면 smooth 트래픽, *Z*>1이면 peaked 트래픽으로 분류한다^[3].

기지국 용량분석에 이용하는 열량-B 모형은 *M/M/c/c* 대기행렬 모형이므로 통화시도가 포아송 과정을 따른다고 가정한다. 다수의 이용자들이 이동하는 지하철 차량에 탑승한 상태에서 통화하게 되면 핸드 오버 시도호가 동시에 집단적으로 발생한다. 포아송 트래픽은 순간적으로 한 개씩 발생한다고 가정하므로 지하철에서 발생하는 트래픽은 포아송 트래픽과 확률적인 특성이 다르다.

일정 시간 간격동안 발생한 시도호 수를 *X*라고 하면 *Z* = *E[X]* / *V[X]*이다^[3]. 표 6은 국내 이동통신사업자가 서울에 위치한 6개 지하철 기지국에서 발생한 트래픽의 peakedness 지수를 분석한 결과이다. 각 기지국 별로 최번시 1시간동안 10초 간격으로 시도호 수를 측정하여 *Z*를 계산하였다.

표 6에서 *Z*의 평균은 1.9이다. 본 논문에서는 분석의 편의를 위해 *Z*=2로 근사화한다. 따라서, *Z*>1이므로 지하철 기지국에서는 peaked 트래픽이 발생하며 열량-B 모형을 이용하여 기지국 용량을 산정할 수 없다.

한편, peaked 트래픽의 경우에는 Neal- Wilkinson 방식을 이용하면 기지국의 열량용량을 산출할 수 있다^[3].

표 6. 지하철 기지국 트래픽의 peakedness 지수.
Table 6. The peakedness factor of the traffic in subway base stations.

기지국	1	2	3	4	5	6
peakedness 지수	2.3	1.6	1.5	1.8	2.8	1.6

차단률이 1%이고 $Z=2$ 인 경우, 얼랑-B와 Neal-Wilkinson 모형에서 산출한 얼랑용량은 표 7과 같다.

동일한 링크용량을 갖더라도 peaked 트래픽이 발생하면 포아송 트래픽이 발생하는 경우보다 얼랑용량이 작다. 표 7에서 링크용량이 25인 경우를 보자. $Z=1$ 인 포아송 트래픽을 가정하는 경우에는 기지국에서 차단률 1%를 만족시키며 16.1얼랑의 트래픽을 처리할 수 있다. $Z=2$ 인 peaked 트래픽의 경우에는 12.5얼랑 밖에 처리할 수 없다. 다시 말하면, peaked 트래픽이 발생하는 경우에는 포아송 트래픽의 경우보다 기지국 용량이 커야 동일한 품질목표를 달성할 수 있다. 결과적으로 포아송 트래픽 기준의 기지국 용량을 peaked 트래픽이 발생하는 기지국에 적용하면 차단률이 증가하여 통화품질이 저하된다.

표 5와 표 7을 정리하면 최종적으로 표 8의 기지국 용량을 얻을 수 있다.

기지국 트래픽은 얼랑단위이다. 따라서 두 경우의 얼랑용량을 비교하면 지하철의 기지국 용량이 지상보다 작으며 지상 대비 88% 수준이다. 결론적으로 지상 기지국의 용량을 지하철에 그대로 적용하면 지하철의 통화품질이 저하될 수 있다.

표 7. 얼랑-B와 Neal-Wilkinson 모형에서 산출한 얼랑용량 (차단률 1%).
Table 7. Erlang Capacity based on Erlang-B model and Neal-Wilkinson model.

링크용량	얼랑-B	Neal-Wilkinson ($Z=2$)
25	16.1	12.5
26	17.0	13.3
27	17.8	14.0
28	18.6	14.8
29	19.5	15.5
30	20.3	16.3
31	21.2	17.1
32	22.0	17.9
33	22.9	18.7
34	23.8	19.5
35	24.6	20.3

표 8. 지상 및 지하철 기지국 용량 비교.
Table 8. The capacity of a base station on the ground and in the subway environment.

구분	링크용량	얼랑용량	비교	얼랑용량 산정방식
지상	29	19.5	1	얼랑-B
지하철	31	17.1	88%	Neal-Wilkinson

IV. 결 론

본 논문에서는 지하철 차량의 이동에 따른 다중경로 페이딩에 의한 신호대 잡음비(E_b/N_0)의 증가, 섹터화 이득이 1로 간주되는 셀 구조, 통화 시 전파가 외부에서 지하철 차체를 투과해 내부의 이용자에게 전달됨에 따른 경로손실지수의 증가, 경로손실지수의 증가에 따른 주파수재사용 계수의 증가로 인해 지하철에서의 무선환경이 지상과 다름을 밝혔다.

또한 이를 바탕으로 링크용량을 산정할 수 있는 각 파라미터의 값을 제시하였다. 지하철에서는 핸드오버 시 집단적인 핸드오버 통화가 발생하므로 포아송 트래픽을 가정할 수 없다. 지하철 기지국의 트래픽 측정 결과 지하철 기지국에서는 peakedness 지수가 1보다 큰 peaked 트래픽이 발생하였다.

본 논문에서는 peaked 트래픽에 적용 가능한 Neal-Wilkinson 모형을 이용하여 기지국의 얼랑용량을 산정하였다. 차단률을 1%로 적용한 결과 1섹터 기준으로 지하철 기지국의 용량은 지상대비 88% 수준으로 분석되었다.

참 고 문 헌

- [1] 이상근, 방효창, "IMT-2000 CDMA 기술", 도서출판 세화, 2003.
- [2] Cooper, R. B., "Introduction to queueing theory", second edition, Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York, 1984.
- [3] Samuel C. Yang, "CDMA 이동통신 공학", 대영사, 1999.
- [4] Vijay K. Grag, "IS-95 CDMA and cdma2000: Cellular/PCS Systems Implementation", Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ 07458, 2000.
- [5] 민승욱, 최진규, "도심 MICROCELL의 CDMA 시스템 용량에 대한 기지국 배치 효과", 한국통신학회논문지, Vol.32, No.3, pp.153-160, 2007.

