

HAPS를 이용한 이동통신 시스템의 오수신 확률에 관한 연구

준회원 김혜영*, 정회원 고봉진**, 박무훈**

A Study on the Outage Probability of Mobile Communication System using HAPS

Hye-Young Kim Associate Member, Bong-Jin Ko**, Mu-Hun Park Regular Member

요약

인터넷 서비스 및 이동통신 서비스 등에 대한 사용자들의 더 많은 욕구를 충족시키기 위하여 무선통신은 많은 발전을 거듭해왔다. 그 중에서 차세대 무선통신을 주도할 인프라 중의 하나가 HAPS(High Altitude Platform Station : 성층권 통신시스템)이다. 본 논문에서는 이러한 HAPS를 사용하여 이동통신 시스템을 구축하였을 때의 오수신 확률에 대해 분석하였다.

먼저, 반송파 대 간섭 전력비를 파라메타로 하는 오수신확률을 유도하고, 이에 대한 해석결과를 수치계산 및 시뮬레이션하였다. 그 결과, 오수신 확률은 반송파 대 간섭 전력비(C/I)와 페이딩 심도(K)에 의해 큰 영향을 받게 되어, 일정한 C/I에 대해 K가 증가할수록, 일정한 K에 대해 C/I가 증가할수록 감소되어짐을 확인할 수 있었다. 또한, 양각 30°를 가지는 하나의 비행선 모델을 24개의 비행선 모델로 확장하면, 상대적으로 많은 간섭원으로 인해서 반송파 대 간섭 전력비가 나빠짐을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Wireless communications have been developed time and time to satisfy more demands of users for internet service, mobile communication service and so on. One of infrastructures leading the next generation wireless communication is HAPS(High Altitude Platform Station). This paper analyzed outage probability when a mobile communication system was constructed by using HAPS.

First, an approach to evaluate the carrier to interference power ratio was introduced and results from the analysis were calculated and simulated. From the results, carrier to interference power ratio (C/I) and fading depth (K) had an effect on outage probability; outage probability decreases when K increases for constant C/I or C/I increases for constant K. In addition, when outage probability for a platform with elevation 30 degrees is expanded into it for 24-platforms, outage probability(C/I=9.8dB) was worse because of many interferers relatively.

1. 서론

지금까지, 무선통신은 지상송전탑 사용에서부터 정지궤도 위성통신, 저궤도 이동 위성통신, CDMA 이동통신에 이르기까지 많은 발전을 거듭해왔다. 그

중에서도 인터넷 서비스 및 이동통신 서비스 등에 대한 사용자들의 더 많은 욕구를 충족시키기 위한 차세대 무선 통신을 주도할 인프라 중의 하나로 손꼽히는 것이 HAPS(High Altitude Platform Station : 성층권 통신 시스템)이다.

HAPS는 광역성, 동보성, 회선구성의 유연성, 광

대역성이라는 위성통신망의 장점과 수요에 따른 저기 공급, 시설의 유지보수 용이, 짧은 전송거리로 인한 단말의 소형화, 짧은 전송지연시간 등 지상이동통신망의 장점을 함께 갖추고 있을 뿐 아니라, 이를 활용함으로써 한정되어진 위성궤도 및 주파수 자원문제를 해결할 수 있다^[1].

또한, 현재 미국, 일본, 이스라엘을 중심으로 HAPS를 이용한 무선 중계 방식의 실용화 연구가 활발히 진행되고 있고, WRC-2000회의에서는 IMT-2000 대역에서 이를 지상기지국 대용으로 사용하자는 제안이 통과됨에 따라 HAPS의 개발은 더욱 가속화될 전망이다^[2].

본 논문에서는 이러한 복수개의 HAPS를 이용하여 이동 통신 시스템을 구성시, 이를 모델링하여 오수신 확률을 구함으로써 통신시스템의 성능을 예측하고자 한다. 먼저, II장에서 HAPS에 대해 간단히 소개하고, III장에서는 HAPS의 모델에 위성의 해석 모델을 도입하여 간섭모델을 제시하고, HAPS와 지구국간의 통신링크에서 존재하는 페이딩을 고려하였을 때의 반송파 대 간섭 전력비(C/I)와 오수신 확률을 유도한 후, 오수신 확률을 개선하기 위한 간섭감소기법을 소개한다. IV장에서는 III장에서 유도한 반송파 대 간섭 전력비를 simulation하여 검증하고, 간섭과 페이딩을 고려한 오수신 확률을 수치계산하여 검토하고, 복수개의 HAPS로 확장해 본 후, V장에서 결론을 맺는다.

II. HAPS

1. 특징

HAPS는 성층권(Stratosphere, 지상 20~80km 상공)에 중계기를 탑재한 비행선을 서비스 수요가 많은 지상의 일정 위치 상공에 체류시켜 고정/이동 디지털 무선 채널들을 다양한 전송률로 사용하여 양방향 통신이 가능하게 하는 것을 목적으로 한다.

HAPS의 주파수는 WRC-97에서 47.2~47.5GHz 및 47.8~48.1GHz로 상/하향 링크 각각 300MHz의 대역폭이 할당되었으나, 이 주파수 대역은 상/하향 각 300MHz 대역폭에 불과하여 다양한 서비스 요구를 충족시키기에는 다소 무리가 따르고, 또한 47GHz대 초고주파 대역을 사용함으로써 강우감쇠가 극심하며, 장비 이용 등 여러 가지 측면에서 Ka 대역 이하의 주파수에 비해 다수의 단점을 보유하고 있다. 이러한 이유로 WRC-2000회의에서는 18~32GHz대역과 3GHz이상의 지상 무선용으로 분

배된 주파수 대역에서의 성층권 통신시스템 활용 타당성 및 타 시스템과의 공유 문제에 관한 연구를 지속하자는 안이 통과되어졌다^{[2][3]}.

HAPS에서 사용되는 주파수가 초고주파 대역(47/48 GHz대)이므로 가지 경로(LOS) 통신 서비스를 기본으로 하여야 하며, 강우에 의한 신호 감쇠량이 매우 높아 적절한 양각 유지가 필수적이다. 그림1은 양각에 따른 HAPS의 서비스 지역을 제시한 것으로, 최소 요구 양각은 일반적으로 고층 빌딩이 밀집되어 있는 도심 지역에서 가지 경로 통신을 하기 위해서는 45°~60° 이상의 양각이 필요하고, 교외나 시골 평원 지역에서는 약 15°~30° 정도의 양각이 적절한 것으로 알려져 있다^[4].

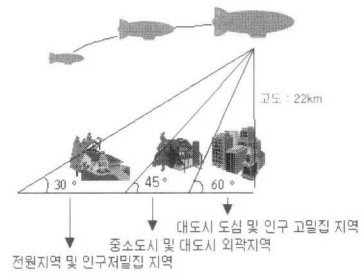


그림 1. 양각에 따른 서비스 지역의 예

III. HAPS의 오수신 확률

1. HAPS 모델

한반도의 HAPS의 적정 운용고도는 풍속 및 비행선의 요구 체적, 가용도(99.97%)등을 고려하여 지상 20.6 ~ 23.8km 상공으로 볼 수 있으며, 본 논문에서는 고도 22km를 기준으로 하였고, 주파수는 47GHz, 양각은 30°로 하였다.

양각을 30°로 설정하였을 때, 하나의 비행선에 대한 셀 커버리지는 그림 2와 같다. 그리고, 그림3의 남한 지역을 커버하는 footprint는 남한 지역을

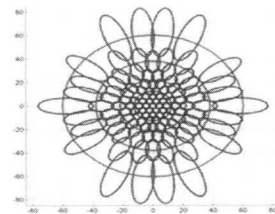


그림 2. 양각 30°로 하였을 때, 하나의 비행선에 대한 셀 커버리지

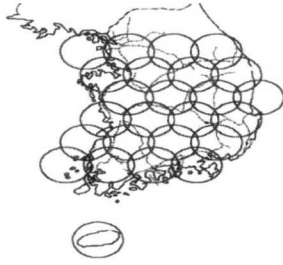


그림 3. 최소 서비스 각도가 30° 비행선 배치 예

서비스하기 위해서는 약 25기의 비행선이 소요될 것으로 예측됨을 보여준다⁵⁾.

2. 간섭 모델

HAPS에서의 간섭 분석을 위해 기존의 위성에서의 간섭 모델을 적용하였고⁶⁾, 이 때 성층권 비행선의 Payload는 현재 알려진 성층권의 규격을 그대로 적용하였고, 알려지지 않은 부분은 LEO위성의 규격을 채택하였다.

임의의 사용자 또는 그것의 통신 채널은 특정 index집합 (i, j, k) $i=1, \dots, N_u$ (사용자수), $j=1, \dots, N_c$ (비행선 당 셀수), $k=1, \dots, N_p$ (비행선수)를 통해 나타낼 수 있고, 통신 대상 이동체(wanted mobile)를 집합 (m, n, p) 로 할당을 하면, 이 모델의 분석에서 요구되는 양각들은 그림 4에 보여진다. θ_{ijk} 는 통신 대상 이동체를 포함하는 셀을 커버하는 메인로브의 boresight에서 사용자 (i, j, k) 를 바라보는 각이고, α_{ijk} 는 사용자 (i, j, k) 가 서비스를 제공하는 비행선을 바라보는 양각이다. (i, j, k) 를 (m, n, p) 로 대체하면 통신 대상 이동체에 대해서도 같은 정의가 적용되어질 수 있다⁷⁾.

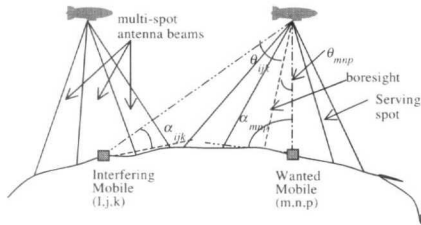


그림 4. wanted와 interfering 터미널의 관심의 각

본 논문에서는, 통신 대상 이동체를 향한 트래킹(tracking) 안테나가 아주 높은 지향성을 가져서 단지 서비스를 제공하는 성층권 비행선만을 바라보다

고 가정함으로써 통신 대상 이동체에 대한 down link는 간섭에 대해 더 이상의 영향을 미치지 않는다. 또한 reverse link는 단지 최악의 경우 링크로 보여질 때만 고려를 한다. 여기서 최악의 경우란 통신 대상 이동체와 간섭하는 이동체가 있는 셀 사이 거리가 최소인 경우를 말한다.

여기서, 통신 대상 이동체에 대한 reverse link의 경우, 임의의 순간에 $\alpha_{ijk} \geq \alpha_0$ (최소양각, 예를 들어 $\alpha_0 = 5^\circ$)을 가지고 간섭하는 이동체의 집합을 V 로 정의하면, up-link에서 신호 대 간섭 전력비(signal-to-interference power ratio)⁷⁾는 다음과 같이 쓰일 수 있다.

$$\frac{C}{I} = \frac{\beta_{mnp} \epsilon_{mnp}(\alpha_{mnp}) G_n(\theta_{mnp})}{\sum_{k=1}^{N_u} \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i=1}^{N_p} \gamma_{ijk} \mu_{ijk} \beta_{ijk} \epsilon_{ijk}(\alpha_{ijk}) G_n(\theta_{ijk})} \quad \{(i, j, k) \in V\} \tag{3.1}$$

- β_{ijk}^{-1} : 사용자 (i, j, k) 로부터 서비스를 제공하는 성층권 비행선까지의 경로감쇠
- $\epsilon_{ijk(a)}$: mobile terminal 대해 a 방향에서 송신전력과 안테나 이득의 내적
- γ_{ijk} : 직교성 factor, $\gamma_{ijk}=0$ 은 채널 (i, j, k) 와 (m, n, p) 가 완전하게 직교하는(간섭이 없다)것을 의미한다. $0 < \gamma_{ijk} \leq 1$ 동안에 이 채널은 간섭을 한다.
- μ_{ijk} : activity factor, 이것은 채널 (i, j, k) 가 활동할 때에서 시간의 주기

W 를 α_0 보다 큰 각도를 지니고, 서비스를 제공하는 비행선을 바라보며, (m, n, p) 와 같은 주파수 채널을 사용하는 사용자들을 포함한 V 의 부분집합이라 하고, 최악 경우 분석에 대해 $(i, j, k) \in W$ 에서 $\mu_{ijk} = 1$ (동시에 동작함)을 가정하자. 그리고 마지막으로 모든 이동 단말이 같은 전송 전력(전력제어 없음)이고, 일정한 이득 안테나를 가지는 경우, 식(3.1)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} C/I &= \frac{\beta_{mnp} G_n(\theta_{mnp})}{\sum_{k=1}^{N_u} \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i=1}^{N_p} \beta_{ijk} G_n(\theta_{ijk})} \\ &= \frac{C}{\sum_{(i, j, k) \in W} I_{ijk}} \end{aligned} \tag{3.2}$$

따라서, 오수신 확률 P_{out} 은 특정 C/I 수행하는데 실패할 확률로서 식 (3.3)과 같이 정의되고, 이때 $(C/I)_{TH}$ 는 다중 접속 기법과 디지털 변조 방식이 주어지면 주어질 때 알아낼 수 있다.

$$P_{out} = Prob\left\{\frac{C}{I} \leq \left(\frac{C}{I}\right)_{TH}\right\} \quad (3.3)$$

3. 페이딩을 고려한 간섭 모델

본 논문의 해석 모델에 페이딩 현상의 영향을 고려하면, 각각의 사용자가 일반적으로 각각 완전히 다른 환경에 위치하기 때문에 분석하기가 어렵다. 그래서 파라미터를 랜덤 변수로 간주해 통계적 모델로 분석할 수가 있다. 따라서 여기서는 페이딩이 존재하는 시스템의 오수신 확률의 간략적인 계산을 위해 전파(propagation)의 전달함수 포락선을 Rice 분포로 가정하였다. 이 경우에 식 (3.2)는 페이딩이 존재하는 신호 대 간섭 전력비 (signal to interference ratio), C_f/I_f 를 사용해 식 (3.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{C_f}{I_f} = \frac{\rho_{mnp} C}{\sum_{(i,j,k) \in W} \rho_{ijk} I_{ijk}} \quad (3.4)$$

여기서, Rice 랜덤변수의 자승(square)인 각 랜덤 변수 ρ 는 자유도 2를 지닌 noncentral χ^2 분포에 의해 표현된다.

오수신 확률 P_{out} 을 구하기 위해 식 (3.4)처럼 표현된 C_f/I_f 의 누적분포함수를 구할 필요가 있다. [8]과 [9]에 소개된 분석적인 간략화 방법에 의해 랜덤변수 Z 를 음수가 아닌 두 랜덤 변수의 비라고 둘 수 있다. 예를 들어, $Z = C_f/I_f$ 라 하면, Z 의 누적분포함수, $F_Z(Z)$ 는 다음 식 (3.5)와 같이 간략화된다.

$$F_Z(Z) \cong F_{C_f}(E[I_f]Z) \quad (3.5)$$

$F_{C_f}(C_f)$ 는 C_f 의 누적분포함수이고, $E[\cdot]$ 는 통계적 평균을 나타낸다. 간략화된 식 (3.5)는 $\sigma_{C_f}^2 \gg \sigma_{I_f}^2$ 일 때 유지될 수 있다. 이 경우 전체 간섭 I_f 가 평균값 $E[I_f]$ 에 의해 대체되어질 수 있기에 오수신 확률의 유도가 간략화된다. 따라서, $F_Z(Z)$ 는 자유도 2를 지닌 χ^2 분포의 누적분포함수에 의해 다음과 같다.

$$F_Z(Z) \cong F_{\rho}\left(\frac{K+1}{K} \frac{I}{C} Z\right) \quad (3.6)$$

그러므로 식 (3.6)을 이용하여 Rice 페이딩의 영향을 받은 C/I 즉, $Z = C_f/I_f$ 에 대한 누적분포함수의 식을 유도하면 식(3.7)과 같다^[10].

$$\begin{aligned} P_{out} &= F_Z(Z) \\ &= 1 - Q\left(\sqrt{2K}, \sqrt{2K\left(\frac{K+1}{K} \frac{I}{C} Z\right)}\right), \\ &= 1 - Q\left(\sqrt{2K}, \sqrt{2\left(K+1 \cdot \frac{I}{C} \cdot Z\right)}\right). \end{aligned} \quad (3.7)$$

여기서, 오수신 확률은 Rice factor와 하나의 간섭 I_{ijk} 가 I 에 대해 어떤 기여를 하는가에 관계없이 페이딩이 없을 때 C/I 에 의존한다. 본 논문에서 이 방법을 이용하기 위해서 반드시 분산비 ($\sigma_{C_f}^2 / \sigma_{I_f}^2$)가 임의의 값(분산비)보다 커야한다.

IV. 수치 계산 및 검토

1. 수치계산 값과 simulation 값의 비교

통신 대상 이동체와 간섭하는 이동체의 위치에 따른 100개의 다른 $(C, I_{ijk}, (i, j, k) \in W)$ 값들을 사용하여 III장에서 구한 오수신 확률식을 simulation 하였다.

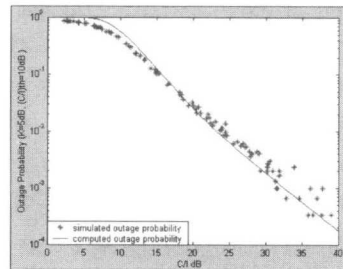


그림 5. $(C/I)_{th} = 10\text{dB}$, $K=5\text{dB}$ 일 때 수치계산된 오수신 확률과 simulation된 오수신 확률의 비교

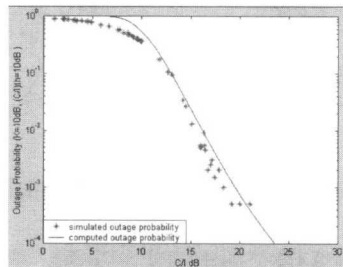


그림 6. $(C/I)_{th} = 10\text{dB}$, $K=10\text{dB}$ 일 때 수치계산된 오수신 확률과 simulation된 오수신 확률의 비교

2. 간섭과 페이딩을 고려한 오수신 확률

그림 7은 특정 페이딩 심도 $K=5dB$ 에서, $(C/I)_{TH}$ 를 변화시켰을 때 각 C/I (0,5,10,15, 20dB)가 가지는 오수신 확률을 나타낸다. 같은 K 값에 대해 C/I 가 클수록 오수신 확률은 낮아져 성능이 좋아짐을 알 수 있다. 또한 같은 C/I 값을 가지더라도 $(C/I)_{TH}$ 값이 커지면 오수신 확률이 커짐을 알 수 있다.

그림 8은 특정 $(C/I)_{TH}=5dB$ 에서, C/I 를 변화시켰을 때 각 페이딩 심도 K (0,5,10,15dB)에 대한 오수신 확률을 나타낸다. 페이딩 심도 K 가 증가할수록 오수신 확률은 낮아지게 된다.

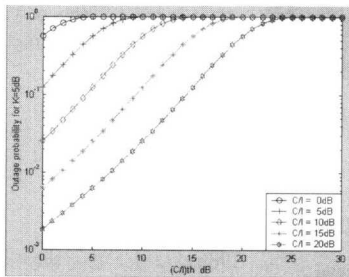


그림 7. 특정 K 값($K=5dB$)에서 $(C/I)_{th}$ 를 변화시켰을 때 각 C/I 값(0,5,10,15,20dB)이 가지는 오수신 확률

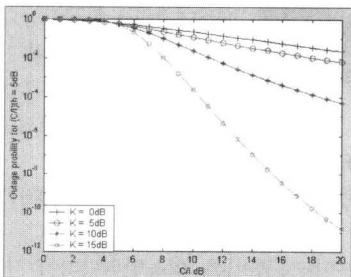


그림 8. 특정 $(C/I)_{th}=5dB$ 에서 C/I 를 변화시켰을 때 각 페이딩심도 K 값(0,5,10,15dB)에 대한 오수신 확률

3. 복수개 HAPS로의 확장

양각 30° 를 가지는 25기의 비행선을 사용하여 우리나라의 남한지역을 커버하는 셀 커버리지가 그림 3에서 보여졌다. 최소 양각을 5° 로 하였을 때, 제주도 지역을 커버하는 비행선을 제외한 24기의 비행선을 사용하여 임의의 셀에 위치하는 통신 대상 이동체에 대해 최악의 경우의 오수신 확률을 구한 것이 그림 9이다.

그림 10은 24기의 비행선을 배치한 최소양각 5°

의 오수신 확률과 하나의 비행선을 사용하였을 때의 오수신 확률을 비교하고 있다. 하나의 비행선에서보다는 복수개의 비행선을 사용함으로써 상대적으로 간섭원이 많아져 오수신 확률은 더 높게 된다는 것을 볼 수 있다.

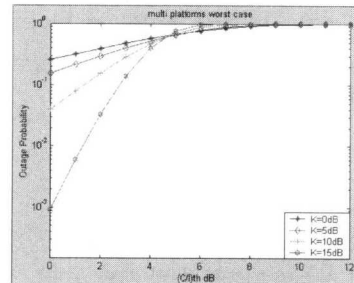


그림 9. 24기 비행선을 이용한 최악의 경우의 오수신 확률

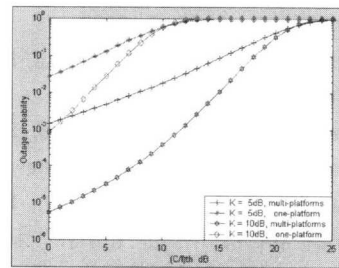


그림 10. 페이딩 심도 $K=5, 10dB$ 일 때 한기의 비행선과 24기의 비행선의 오수신확률비교

V. 결론

본 논문에서는 차세대 무선 통신 인프라의 하나인 성층권 통신 시스템 HAPS를 위성 시스템의 해석 모델에 적용하여 이동 통신 시스템의 성능을 평가하였다.

먼저, 간섭과 페이딩을 고려하여 특정 셀에 대한 임의의 간섭원들을 추출해 시뮬레이션한 값과 이론적으로 수치 계산한 값들의 비교에 의한 해석의 검증을 하였으며 해석결과, 페이딩이 없을 때의 반송파 대 간섭 전력비 C/I 와 페이딩 심도 K 가 오수신 확률에 결정적인 영향을 미친다는 것을 볼 수 있었다. 즉, 일정한 C/I 에 대해 페이딩 심도 K 값이 클수록, 일정한 페이딩 심도 K 값에 대해 반송파 대 간섭 전력비 C/I 가 클수록 outage 확률은 더 낮게 나타났다.

그리고 양각 30° 의 셀 커버리지를 가지는 하나

의 비행선에 대한 오수신 확률을 구하였으며, 또한 이에 대한 확장으로 우리 나라 남한 지역을 커버하기 위해 같은 양각의 셀 커버리지를 가지는 25기의 비행선을 배치하였고, 이 중에서 제주도 지역을 커버하는 비행선을 제외한 24기의 비행선에 대한 오수신 확률을 다시 구해 보았다. 전체 셀 중 임의의 특정 통신 대상 이동체가 주어질 때 하나의 비행선에 대한 C/I 가 14.7821 dB, 24기 비행선에 대한 C/I 가 9.7862 dB 였다.

참 고 문 헌

[1] 김재명, 박중홍, 이재현, 안도섭, “성층권 무선 중계 시스템 기술분석 및 개발 동향”, 전파진흥, 12월호, 1998

[2] 안도섭, 구본준, 백동철, “성층권 통신 시스템 (HAPS) 국제 표준화 동향”, 한국통신학회, 제7권, 제7호, pp. 74-79, 7, 2000

[3] “2000 세계 전파 통신회의 참가보고서”, 전파방송관리곡, 6, 2000

[4] F. Mini, R. Mizzoni, M. Piccinni, Skystation stratospheric telecommunication new payload description, Proc. of AIAA Conf., 1997

[5] 안도섭, 엄만석, 박광량, 김재명, “성층권 무선 중계 시스템의 셀 구성방식에 따른 탑재 안테나 패턴 연구”, 한국통신학회 추계 종합 학술발표회 논문집, 1998.

[6] G.Maral, J.J. de Ridder, B.B. Evans, and M. Richharia, “Low Earth Orbit Satellite Systems for Communications”, International Journal of Satellite Communications, vol. 9, pp. 209-225, 1991.

[7] G. E. Corraza and F. Vatalaro, “Interference Analysis in Satellite Cellular Systems”, in Proc. IEEE International Symposium Personal, Indoor and Mobile Radio communications (Boston MA), pp. 377-381, October. 1992.

[8] G. Immovilli and M. L. Merani, “Simplified evaluation of outage probability for cellular mobile radio systems”, *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 1365-1367, July. 1991.

[9] C. Caini, G. Immovilli, and M. L. Merani, “Outage probability for cellular mobile radio systems : Simplified analytical evaluation and simulation results”, *Electron. Lett.*, vol. 28,

pp. 669-671, March. 1992.

[10] F. Vatalaro, G.E. Corraza, C. Caini, C. Ferrarelli, “Analysis of LEO, MEO, and GEO Global Mobile Sattellite Systems in the Presence of Interference and Fading”, *IEEE Journal on Selective Area in Communications*, vol. 13, no. 2, February, 1995.

김 혜 영(Hye-Young Kim)

준회원



1999년 2월 : 창원대학교 전자공학과 졸업
 2001년 2월 : 창원대학교 전기전자 제어공학과 석사
 2002년 3월~현재 : 창원대학교 전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 전자공학, 통신이론

고 봉 진(Bong-Jin Ko)

정회원



1986년 2월 : 한국항공대학교 통신공학과 졸업
 1988년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과 석사
 1995년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과 박사
 1994년 3월~1996년 7월 : 인하공전 통신과 조교수

1997년 : ETRI 초빙연구원

1996년 8월~현재 : 국립창원대학교 전자공학과 부교수

<주관심 분야> 통신이론, 이동멀티미디어 시스템, 위성통신

박 무 훈(Mu-Hun Park)

정회원

1990년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업

1994년 3월 : 일본 동북대학교 전기통신공학과 석사

1996년 3월 : 일본 동북대학교 전기통신공학과 박사

1998년 9월~현재 : 국립창원대학교 전기공학과 조교수

<주관심 분야> 신호처리, 멀티미디어