

저궤도 이동위성통신망에서 위성의 이동성을 고려한 링크해석

正會員 黃 旻 鉉*, 金 炳 均*, 崔 炯 辰*

Link Analysis Considering the Satellite mobility in the LEO Mobile Communication Networks

Sung Hyun Hwang*, Byung Kyun Kim*, Hyung Jin Choi* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 저궤도 이동위성통신망에서 위성의 이동성을 양각(또는 전파거리)과 결부시켜 다중경로 페이딩과 위성간 간섭을 분석하고 다양한 전파전파 환경과 통신시스템 신뢰도에 대한 링크 성능을 평가하였다. 다중경로 페이딩은 전원지역, 도심지역 그리고 교외지역에서 위성의 이동에 따른 페이딩여유도의 변화를 통해 해석될 수 있으며, 위성간 간섭은 8 가지 유형의 간섭경로에서 저궤도 위성시스템 내부의 자체간섭, 타 저궤도 위성시스템에 의한 외부간섭 그리고 정지궤도 위성시스템에 의한 외부간섭을 분석하였다. 결론적으로 본 논문에서는 저궤도 위성통신망에서 시간의 흐름에 따른 통신링크의 변화를 양각과 전파거리에 따른 링크 여유도의 변화로 분석하였다.

ABSTRACT

In this paper, we analyze the multipath fading and the inter-satellite interference considering the satellite mobility in the LEO mobile satellite communication networks and evaluate the link performance for various wave propagation environments and reliabilities of communication system. Multipath fading is estimated by analyzing the variation of fading margin for the satellite motion in rural, urban and suburban environments. The inter-satellite interferences are classified into 8 types with respect to interference path. The interferences evaluated in the paper are as follows: intra-LEO satellite interference, inter-LEO satellite interference, and GEO satellite to LEO satellite interference. As a conclusion, this paper analyzes the change of elevation angle and propagation distance with respect to time in the LEO satellite network and presents the variation of link margin continuously.

*성균관대학교 전자공학과
論文番號: 97134-0419
接受日字: 1997年 4月 19日

I. 서 론

저궤도 위성은 사용자의 속도에 비해 상대적으로 매우 빠른 속도로 움직이기 때문에 다중경로에 의한 페이딩과 쉐도잉에 의한 신호감쇠가 정지위성 시스템보다 심각할 뿐만 아니라 위성이 이동함에 따라 서비스되는 양각이 달라져서 자유공간 손실과 간섭량이 변하게 되므로 시간의 흐름에 따라 통신링크의 환경이 크게 달라진다.

본 논문에서는 저궤도위성의 이동성을 시간과 결부시켜 위성채널 페이딩과 간섭량을 분석하고 이를 이용하여 링크예산을 작성함으로써 링크 여유도의 변화를 관찰하였다. 위성채널 분석은 그 환경을 3가지로 정의하여 각 파라메타의 변화와 수신신호의 cdf(cumulative density function) 특성을 보였으며 특히 cdf 특성은 링크해석시 페이딩 여유도로 사용되었다. 한편 간섭분석은 발생가능한 모든 간섭의 유형을 8가지로 분류하고[1] 각각 60분 동안 서비스되는 양각과 이탈각(off-axis angle)을 C/I 폭선과 함께 보임으로서 시간변동 링크예산의 작성을 가능하도록 하였다. 여기서 8가지 유형에 포함시킨 시스템별 간섭은 먼저 저궤도 위성시스템 내부의 자체간섭과 타저궤도 위성시스템에 의한 외부간섭 그리고 정지궤도 위성시스템에 의한 외부간섭으로서 순차적인 분석을 통해 링크예산의 상·하향 링크에 적용하였다. 원하는 비정지 위성시스템은 경사가 86.4°인 준 극궤도를 채택하는 비정지 위성시스템(이하 “극 저궤도위성”이라 명함)을 가정하고 간섭을 미치는 위성시스템은 경사가 52°인 경사궤도를 채택하는 비정지 위성시스템(이하 “경사 저궤도위성”이라 명함)과 전형적인 정지궤도 위성시스템으로 전제하였다. 단 각 시스템이 사용하고 있는 주파수 대역은 모두 동일하고 이상적인 QPSK 수신기를 가정하였다. 이와같은 환경을 기준으로 하여 고정시간에 대한 링크예산을 분석하였고 시간에 따른 링크예산의 변화는 링크 여유도의 기준으로 60분의 시간경과에 대한 결과를 제시하였다.

본 논문의 특징은 기존의 고정적인 링크해석에서 탈피하여 시간에 따른 위성의 이동성을 충분히 고려함으로써 통신링크의 환경을 연속적으로 묘사함에 있고 또한 실제 우리나라 지형에 기초한 데이터를 분석함으로써 현실성을 강조하였다는 점에서 그 의의

를 찾을 수 있다.

서론에 이어 II장에서는 저궤도 위성채널의 분석을 수행하고, III장에서는 저궤도 위성시스템에 미치는 간섭량을 계산하며, 이를 토대로 IV장에서는 저궤도 위성의 링크예산을 작성한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 비정지위성 채널의 페이딩 해석

저궤도 위성은 사용자에 비해 상대적으로 매우 빠른 속도(약 7~8 Km/s)로 지구 약 1,000Km 상공을 선회하는 위성으로 구성되어 있다. 따라서 라이시안 환경에서의 다중경로에 의한 페이딩과 쉐도잉 영향이 심각할 것으로 예상된다. 본 장에서는 저궤도 위성 채널의 모델을 제시하고 수신신호의 확률밀도함수와 누적분포함수를 구함으로써 위성 채널의 특성을 파악함과 동시에 정의한 3 종류의 환경에 실제 적용함으로써 링크해석에 필요한 페이딩 여유도의 개념을 고찰하였다.

2.1 위성 채널 모델

본 논문에서는 위성 채널 모델을 설정함에 있어 다중경로 페이딩 특성은 라이시안 분포를 선택하고 쉐도잉 특성은 로그노말 분포를 선택하였다. 위의 두가지 분포 특성은 모델 파라메타를 변화시킴으로서 전원지역 뿐만 아니라 교외지역과 도심지역에도 적용할 수 있다.

2.1.1 수신신호의 확률밀도함수 특성

페이딩과 쉐도잉 환경하에서의 수신신호 확률밀도함수(pdf: probability density function)는 일반적으로 다음과 같이 정의된다.

$$p(r) = \int_0^{\infty} p(r/s) p_s(s) ds \quad (1)$$

여기서, $p(r/s)$ 는 쉐도잉 s 환경에서 r 이 수신될 라이시안 확률밀도함수이고 $p_s(s)$ 는 쉐도잉 특성을 나타내는 로그노말 분포 확률밀도함수로서 정리하면 식 (2)와 같이 다시 쓸 수 있다[2][3].

$$p(r) = \int_0^{\infty} 2(K+1) \frac{r}{s^2} \exp \left[-(K+1) \left(\frac{r^2}{s^2} - K \right) \right]$$

$$I_0 \left[2 \frac{r}{s} \sqrt{K(K+1)} \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_s s} \exp \left[-\frac{(\ln s - m_s)^2}{2\sigma_s^2} \right] ds \quad 0 \leq r < \infty, s \geq 0 \quad (2)$$

그리고 식(2)에서 사용된 파라메타의 정의는 다음과 같다.

$I_0(x)$ = modified Bessel function of the first kind and zero order
 s = LOS 수신신호의 최대 진폭
 σ_f^2 = 다중경로를 통해 수신된 신호의 평균 신호전력
 $K = \frac{s^2}{2\sigma_f^2}$ = LOS 신호의 평균전력과 다중경로 신호의 평균전력의 비
 $m_s = E\{\ln(s)\}$ = s 의 logarithmic mean power
 $\sigma_s^2 = E\{(\ln(s))^2\} - \{E\{\ln(s)\}\}^2$ = s 의 logarithmic variance

2.1.2 수신신호의 누적분포함수 특성

식(2)에서 구한 확률밀도함수와 더불어 위성 채널 모델의 1차적인 특성을 나타내는 함수로서 다음에서 제시할 누적분포함수를 들 수 있다. 누적분포함수는 기준 수신신호레벨보다 작은 신호가 수신될 확률을 모두 더한 함수로서 수신신호의 전반적인 분포를 가늠케 한다.

수학적 표현은 다음과 같다.

$$F(r_0) = \Pr ob\{r < r_0\} = \int_0^{r_0} \int_0^\infty p(r/s) p_s(s) ds dr = \int_0^\infty \left[1 - Q \left(\sqrt{2K}, \frac{r_0}{s} \sqrt{2(K+1)} \right) \right] \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_s s} \exp \left[-\frac{(\ln s - m_s)^2}{2\sigma_s^2} \right] ds \quad (3)$$

여기서, $E_s\{\cdot\}$ 는 s 에 대한 평균을 의미하며, Q 는 Marcumm Q 함수를 나타낸다[4].

한편, 위와 같은 사실을 바탕으로 3 종류의 다른 환경에 대한 누적분포함수 특성을 양각의 시각에서 관찰할 수 있다. 환경유형은 주변건물이나 지형에 따라 전원지역(rural), 도심지역(urban), 교외지역(suburban)

으로 분류할 수 있다. 일반적으로 전원지역은 수목에 의한 웨도잉 영향이 심각하고 도심지역은 고층건물에 의한 다중경로 페이딩에 의한 감쇠가 상당하며 교외지역은 두 가지 특성이 공존하는 성격을 띠고 있다.

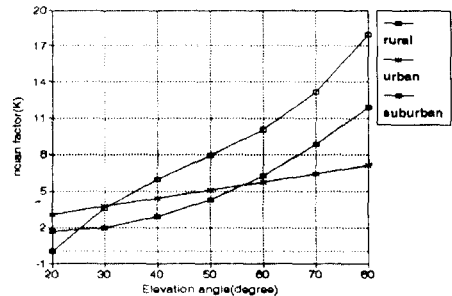
이와같은 cdf 특성이 저궤도 위성시스템의 특성을 충분히 반영하기 위해서는 채널모델의 파라메타 K , m_s , σ_s 가 각 환경에 대하여 양각의 함수로 정의될 필요가 있고 이러한 관계를 식(4)에 나타내었다.

$$K(\alpha) = K_0 + K_1 \alpha + K_2 \alpha^2 + K_3 \alpha^3$$

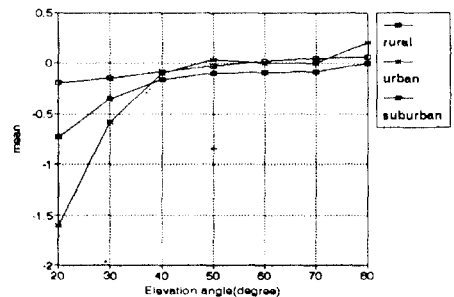
$$m_s(\alpha) = m_{s0} + m_{s1} \alpha + m_{s2} \alpha^2 + m_{s3} \alpha^3$$

$$\sigma_s(\alpha) = \sigma_{s0} + \sigma_{s1} \alpha + \sigma_{s2} \alpha^2 + \sigma_{s3} \alpha^3 \quad (4)$$

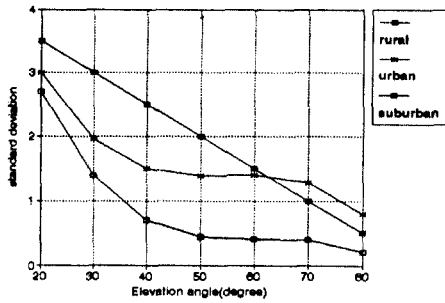
여기서, 사용된 계수는 ESA(European Space Agency)에서 구한 실측치를 이용하였으며 대체로 20°~80°에서 잘 적용된다[5]. 각 환경별로 양각에 대한 파라메타의 전체적인 변화는 그림 1과 같다.



(a) rician factor

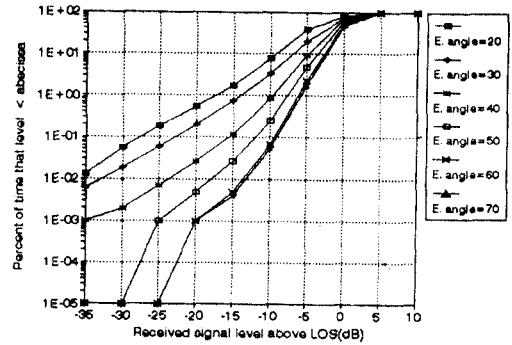


(b) mean



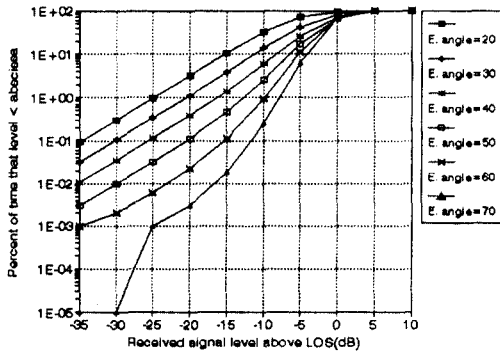
(c) standard deviation

그림 1. 모델 파라메타 변화
Fig. 1 Variations of model parameters



(c) 교외지역(suburban area)

그림 2 지역별 누적분포함수의 특성
Fig. 2 cdf characteristics for various environments



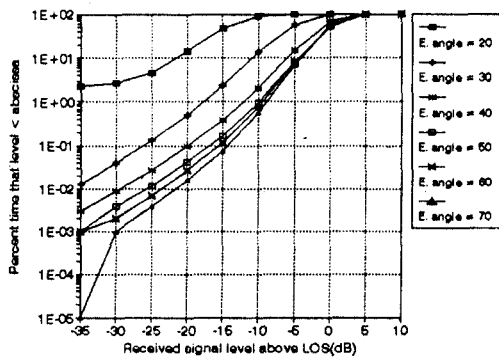
(a) 전원지역(rural area)

다양한 환경에서의 채널모델 파라메타가 위와 같이 정의될 때 서로 다른 양각에 대한 누적분포함수의 특성은 그림 2와 같다. 예상했던 대로 양각이 높아짐에 따라 동일한 기준 신호레벨에 대한 누적분포함수는 감소함을 알 수 있다. 다시 말해서 양각이 좋아질수록 기준 신호레벨보다 더 높은 레벨의 신호가 존재할 확률이 높아짐을 의미하는 결과라 할 수 있다.

2.2 페이딩여유도

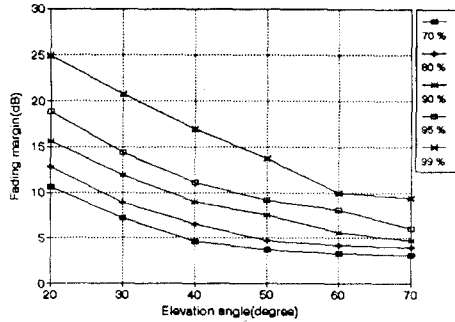
수신신호의 누적분포함수는 전체 수신신호를 100으로 가정했을 때 특정 신호레벨보다 작은 신호가 수신될 확률을 모두 더한 값으로서 채널환경의 신뢰도와 결부시킬 수 있다. 다시말해, 채널의 신뢰도란 전체 수신신호 가운데 신호포착이 가능한 신호의 비율로서 정의되는 반면 신호포착에 실패한 신호의 비율이 누적분포함수와 상통하는 의미이다. 그리고 원하는 채널 신뢰도를 보장하기 위해서는 페이딩 영향을 보상할 수 있는 특정 여유도가 요구되며 이를 페이딩 여유도라 정의한다.

일반적으로 페이딩 영향이 없는 이상적인 채널환경에서는 직접경로신호(LOS)가 수신단에 도달하고 이때 채널에서 요구되는 페이딩 여유도는 0인 반면 페이딩 영향이 심각해질수록 수신신호는 심각한 신호감쇠를 겪게되어 요구되는 페이딩 여유도도 높아진다. 예를 들어, 그림 2에서 90%의 채널 신뢰도를 얻고자 할때 페이딩 여유도는 누적분포함수 10%를

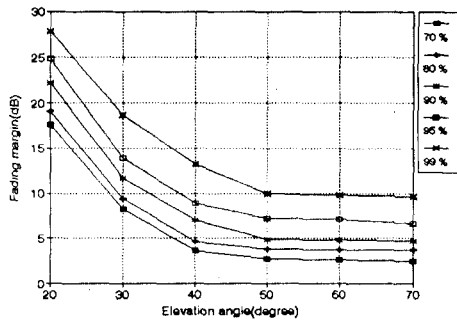


(b) 도심지역(urban area)

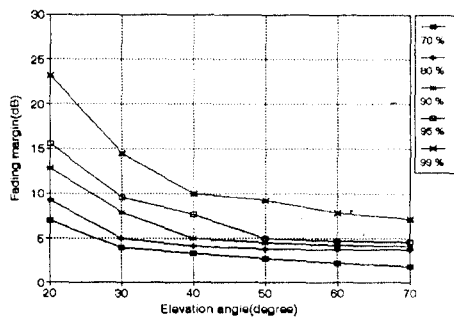
만족하는 기준신호레벨과 LOS 신호레벨까지의 차이 값으로 정의될 수 있다. 이러한 사실을 바탕으로 각 환경별로 다양한 신뢰도에 대한 페이딩 여유도의 변화를 그림 3에 나타내었다.



(a) 전원지역



(b) 도심지역



(c) 교외지역

그림 3. 환경별 페이딩 여유도의 변화

Fig. 3 Variations of fading margin for various environments

그림 3은 각 환경에 대한 신뢰도와 페이딩 여유도의 관계를 잘 보여주어주고 있다. 결론적으로 요구되는 채널 신뢰도가 높을수록 큰 페이딩 여유도가 필요하고 교외지역(suburban), 전원지역(rural), 도심지역(urban)의 순으로 페이딩 여유도가 높아짐을 알 수 있다.

Ⅲ. 비정지 위성시스템의 간섭 분석

최근 저궤도 위성의 개발이 가속화되고 제공되는 통신 서비스가 다양해짐에 따라 기존의 정지궤도 위성시스템에 의한 간섭과 타궤도 및 자체 궤도 내 위성시스템에 의한 간섭뿐만 아니라 지상PCS에 의한 간섭의 영향이 크게 증가되었다. 본 장에서는 자체 궤도 위성시스템 및 타 궤도 위성시스템 그리고 정지궤도 위성시스템에 의한 간섭을 분석하였다.

3.1 수학적 해석

수신신호에 미치는 간섭의 영향을 분석하기 위한 수식은 크게 반송파전력을 계산하는 부분과 간섭전력을 계산하는 부분으로 나눌 수 있다. 세부적으로 반송파전력은 신호원의 송신 EIRP, 수신이득, 그리고 여러 손실요소에 의해 결정된다. 특히 가장 큰 비중을 차지하고 있는 요소로서 자유공간 손실을 들 수 있다. 한편 간섭전력은 간섭원의 송신 EIRP, 수신이득, 그리고 여러 손실요소에 의해 결정되며 또한 간섭원 송신 안테나의 방사 특성에 의해서도 좌우된다.

한편, 실제 간섭의 영향을 계산하기 위한 신호대 간섭비의 수식은 반송파전력과 간섭전력의 정의를 이용하여 식(5)와 같이 쓸 수 있고 그림 4는 사용되는 파라메타의 의미를 보인 것이다.

$$\begin{aligned} \frac{C}{I} &= \frac{\frac{EIRP_{wt}}{L_w} \left(\frac{c}{4\pi f_w d_w} \right)^2 G_{wr}}{\frac{EIRP_{it}}{L_i} \left(\frac{c}{4\pi f_i d_i} \right)^2 G_{ir}} \\ &\approx \left(\frac{EIRP_{wt}}{EIRP_{it}} \right) \left(\frac{L_i}{L_w} \right) \left(\frac{d_i}{d_w} \right)^2 \left(\frac{G_{wr}}{G_{ir}} \right) (\because f_w \approx f_i) \quad (5) \end{aligned}$$

$EIRP_{wt}$: 신호원의 송신 EIRP

G_{wr} : 신호원 방향으로의 수신안테나 이득

L_w : 자유공간 손실을 제외한 여러 가지 다른 손실

f_w : 신호 주파수

d_w : 신호 전파거리
 $EIRP_{it}$: 원하는 지점의 안테나 방향으로의 간섭 EIRP
 G_{ir} : 간섭원 방향으로의 수신안테나 이득
 L_i : 자유공간 손실을 제외한 다른 손실
 f_i : 간섭 주파수
 d_i : 간섭 전파거리

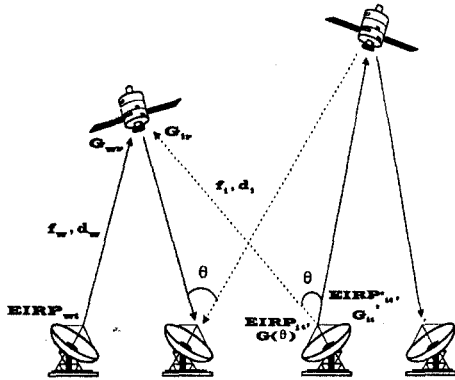


그림 4. 간섭분석 파라메타
 Fig. 4 Parameters used for interference analysis

그림 4에서 θ 는 송신 안테나의 축으로부터 부엽까지 벌어진 각을 나타내는데 일반적으로 안테나 이탈각(off-axis angle)이라 하며 여러 기관에서 이탈각에 대한 고유의 안테나 방사특성을 규정하여 사용하고 있다. 본 논문에서는 모든 위성과 지구국 안테나의 방사특성을 FCC에서 규정한 안테나 패턴을 사용하였다. 다시 식(5)는 규정한 안테나 방사특성과 간섭시스템을 중심으로 식(6)과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\frac{C}{I} (dB) \approx EIRP_{wt} (dBW) - L_w (dB) - 20 \log d_w (dB) + G_{wt} (dBi) - (EIRP_{it}^* (dBW) - G_{it}^* (dBi) + G(\theta) (dBi) - L_i (dB) - 20 \log d_i (dB) + G_{ir} (dBi))$$

여기서, $EIRP_{it}^*$ 는 간섭원이 원하는 수신 안테나 방향으로의 송신 EIRP이고 G_{it}^* 는 간섭원의 송신 안테나 축방향 이득이며 $G(\theta)$ 는 FCC에서 규정한 안테나 방사패턴을 의미한다[6].

3.2 간섭경로에 따른 기하학적 유형분류

위성시스템은 사용 궤도를 기준으로 정지궤도 위성시스템(GEO)과 비정지궤도 위성시스템(NGEO)으로 분류될 수 있으며 간섭경로를 기준으로 할 때 그림 5와 같이 모두 8가지의 간섭이 발생할 수 있다.

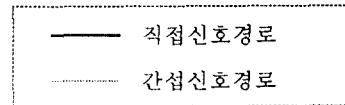
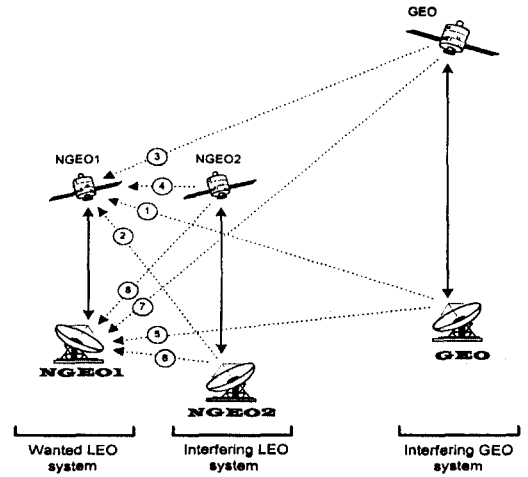


그림 5. 모든 간섭경로
 Fig. 5 All kinds of interference path

그림 5를 참조할때 유형 1은 GEO 지구국이 NGE0 위성에 간섭을 미치는 경우에 해당하며 각 위성의 궤도와 지구국의 위치를 고려한 기하학적 간섭경로를 그림 6과 같이 나타낼 수 있다[12]. 이는 GEO 시스템의 지구국 상향링크(feeder up link) 주파수가 NGE0 시스템의 지구국 상향링크 주파수에 간섭을 미치는 경우로서 간섭분석을 위한 수학적 표현은 식(6)을 이용하여 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{C}{I} (dB) \approx EIRP_{NEwt} (dBW) - L_w (dB) - 20 \log d_w (dB) + G_{NSwr} (dBi) - (EIRP_{GEt}^* (dBW) - G_{GEt}^* (dBi) + G_{GE}(\theta) (dBi) - L_i (dB) - 20 \log d_i (dB) + G_{NSwr} (dBi)) \quad (7)$$

여기서, 사용된 수식의 아래첨자는 다음과 같은 의미를 나타낸다.

N: N GEO	w: wanted system
G: GEO	i: interfering system
E: Earth station	t: transmitted
S: Satellite	r: received

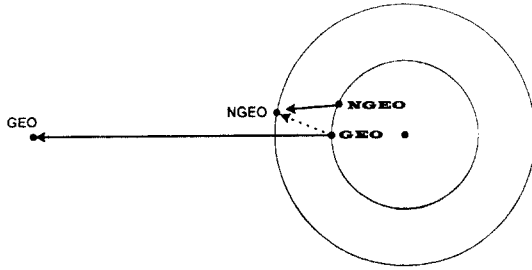


그림 6. 간섭유형 1
Fig. 6 Interference type 1

간섭 유형 2부터 8까지의 경우도 유형 1과 동일한 과정을 통해 간섭량을 분석하였다. 단 유형 5와 6에서 구한 간섭지구국이 통신지구국에 미치는 간섭량을 분석함에 있어 통신지구국의 고도는 해발 1 Km로 가정하였다.

위에서 열거한 8가지 유형에 대한 기하학적 구조를 생각해 볼 때 유형 1부터 4까지는 지구국 상향링크(feeder up link) 주파수가 받는 간섭량을 분석한 것으로서 링크해석시 상향링크에서 고려해야 할 간섭요소이고 유형 5부터 8까지는 사용자 하향링크(user down link) 주파수가 받는 간섭량을 분석한 것으로서 하향링크에서 고려해야 할 간섭요소이다.

3.3 간섭위성망의 유형분류

3.2절에서는 간섭분석을 위한 기하학적 구조를 간섭경로에 따라 8가지 유형으로 분류한 바 있다. 본 절에서는 이러한 8가지 유형을 바탕으로 궤도별 위성시스템간 간섭의 종류를 다음과 같이 세 가지로 분류하여 저궤도 위성시스템의 링크해석에 적용하였다.

첫째, 비정지궤도 위성시스템 내부의 자체간섭으로서 자신의 비정지궤도 위성시스템 내에서 통신중인 위성시스템을 제외한 다른 위성시스템이 통신위성시스템에 간섭을 미치는 경우이다. 둘째, 타 비정지궤도 위성시스템에 의한 외부간섭으로서 타 비정지궤도 위성시스템이 자신의 통신위성시스템에 간섭을

미치는 경우이다. 마지막으로 셋째는 정지궤도 위성시스템에 의한 외부간섭으로서 정지궤도 위성시스템이 자신의 비정지궤도 위성시스템에 간섭을 미치는 경우이다.

첫째와 둘째는 비정지궤도 위성시스템간 간섭으로서 3.2 절에서 분류한 8가지 구조중에서 유형 2, 4, 6, 8에 해당하고 셋째는 정지궤도 위성시스템과 비정지궤도 위성시스템간 간섭으로서 유형 1, 3, 5, 7에 해당한다.

간섭분석을 위한 시뮬레이션의 전제조건은 다음과 같이 가정하였다. 먼저 통신을 원하는 위성시스템은 경사가 86.4°인 준 극궤도를 선회하는 비정지 위성시스템(이하 “극 저궤도위성”이라 칭함)으로 가정하고 간섭을 미치는 타 비정지 위성시스템은 52°의 경사궤도를 채택하는 비정지 위성시스템(이하 “경사 저궤도위성”이라 칭함)으로 전제하였으며 간섭을 미치는 정지궤도 위성시스템으로는 전형적인 GEO 시스템을 가정하였다. 또한 요구되는 궤도특성(궤도수, 위성수, 궤도고도, 위성속도 등)은 극 저궤도위성의 경우 IRIIDIUM의 궤도특성을 따른다고 가정하였고, 간섭을 미치는 경사 저궤도위성은 GLOBALSTAR의 궤도특성을 따른다고 전제하였으며 정지궤도 위성은 동경 117도 적도 36,000Km 상공에 위치하는 한 개의 위성을 가정하였다. 한편, 시뮬레이션 수행과정에서 통신하고자 하는 극 저궤도 위성지구국의 위치는 대전(36N, 127E)으로 가정하고 간섭 지구국의 위치는 북경(40N, 117E)으로 가정하였으며 통신 위성은 대전에 위치한 지구국과 가장 가까운 거리의 극 저궤도위성으로 가정하였다[7][8][9][10].

여기서 저궤도 위성의 가장 큰 특징이 시간에 따른 위치변화, 즉 지구국이나 사용자의 입장에서 본 양각의 변화에 있고 본 장에서 수행할 위성망의 간섭분석도 시간의 흐름을 기준으로 한다는 것을 감안할 때 양각에 대한 시뮬레이션은 필수적이라 할 수 있다.

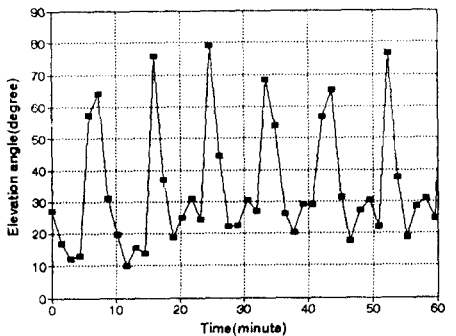
양각 시뮬레이션의 수학적 배경을 살펴보면 지구 표면과 위성궤도는 구좌표로 표현하여 모든 위치를 식별할 수 있도록 하고 이를 다시 직교좌표계로 변환하여 거리 계산을 가능하게 하였다. 지구국의 위치를 $E(r_E, \theta_E, \phi_E)$, 위성의 위치를 $S(r_S, \theta_S, \phi_S)$ 라고 할 때 양각 α 는 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$\cos \beta = \frac{R_E^2 + \overline{ES}^2 - R_S^2}{2R_E \overline{ES}}$$

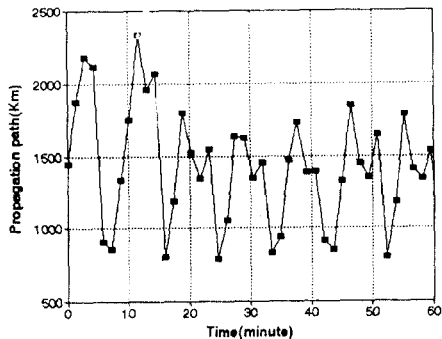
$$\alpha = \beta - 90^\circ = \cos^{-1} \left[\frac{R_E^2 + \overline{ES}^2 - R_S^2}{2R_E \overline{ES}} \right] - 90^\circ \quad (8)$$

여기서 R_E 는 지구 반지름을 나타내고 R_S 는 위성궤도 반지름을 의미한다.

그림 7은 극 저궤도 위성시스템의 궤도 시뮬레이션 결과로서 (a)는 양각의 변화를 (b)는 전파거리의 변화를 각각 대전을 중심으로 임의의 60 분 동안 제시한 것이다. 또한 이 결과는 II장에서 수행한 페이딩 분석결과와 본 장에서 얻은 간섭 분석결과를 IV장의 링크예산에 적용하는 기준으로 사용된다.



(a) 시간에 따른 양각의 변화



(b) 시간에 따른 전파거리의 변화

그림 7. 극 저궤도 위성시스템의 양각과 전파거리의 변화 (대전)

Fig. 7 Variations of elevation angle and propagation path in polar LEO satellite system(Taejeon)

3.3.1 극 저궤도 위성시스템 내부의 자체간섭

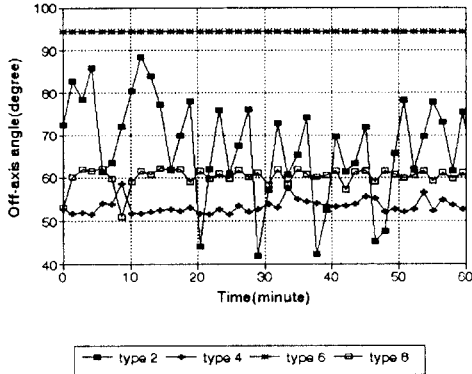
극 저궤도 위성시스템내에서 다른 극 저궤도 위성 시스템이 미치는 간섭을 분석한 것으로서 유형 2는 다른 극 저궤도 위성지구국이 통신중인 극 저궤도 위성에 간섭을 미치는 경우이고 유형 4는 다른 극 저궤도 위성들이 통신위성에 간섭을 주는 경우이며 유형 6은 다른 극 저궤도 위성지구국이 현재 송신하고 있는 위성지구국에 간섭을 미치는 경우이며 마지막으로 유형 8은 다른 극 저궤도 위성들이 통신지구국에 간섭을 일으키는 경우이다. 각 시스템에 대한 입력 데이터는 표 1과 같다[11].

유형 2와 6은 다른 극 저궤도 위성지구국에 의한 간섭량을 분석한 것이다. 간섭 지구국의 위치는 북경 (40N, 117E)에 위치한 하나의 지구국만을 고려한 것으로서 전세계에 분포하는 수십 여개의 지구국 중에서 한개의 지구국에 의한 간섭의 영향만을 고찰하였기 때문에 아래 보인 간섭결과는 실측치보다 다소 높은 C/I 값을 얻을 수 있다. 3.1절의 수식에서도 알 수 있듯이 양각은 반송파전력에 영향을 주고 이탈각 (off-axis angle)은 간섭전력에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 실제로 그림 8을 보면 유형 2는 이탈각이 약 40°에서 90°까지 시간별로 다양하게 분포하기 때문에 C/I 레벨이 양각뿐만 아니라 이탈각에 의해 심각한 영향을 받는것을 알 수 있다. 반면 유형 6은 그림 5에서도 예상할 수 있듯이 이탈각이 91.52°로 일정하기 때문에 시간별 C/I 변화가 이탈각에 의해 영향을 받지 않고 양각의 곡선 형태를 그대로 따라감을 알 수 있다.

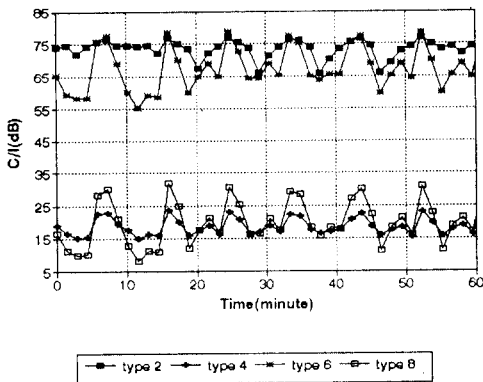
한편 유형 4와 8은 다른 극 저궤도 위성에 의한 간섭량을 분석한 것으로서 간섭위성은 현재 통신위성을 제외한 모든 극 저궤도 위성이라고 전제하였다. 수행한 시뮬레이션의 결과는 모든 간섭위성을 고려하였기 때문에 C/I 레벨이 유형 2, 6에 비해 매우 낮은 값을 갖으며 또한 실측치와 거의 일치할 것으로 예상된다. 그림 8-(a)에서 보인 시간별 이탈각의 변화는 유형 2, 6과 달리 시간과 일대일 대응이 불가능하므로 간섭전력에 가장 큰 영향을 미치는 최소 이탈각의 변화를 시간에 따라 나타낸 것이고 그림 8-(b)는 요구되는 채널 신뢰도를 90%로 가정했을때 전원지역에 대한 C/I 변화를 보인것이다.

표 1. 각 시스템별 입력 데이터
Table 1. Input data for systems

시스템 분류 구성 요소	NGEO1 시스템 (wanted LEO system)		NGEO2 시스템 (interfering LEO system)	
	up-link	down-link	up-link	down-link
지구국 송신 EIRP	68.0 dBW		68.0 dBW	
위성 송신 EIRP		44.9 dBW		44.9 dBW
자유공간 손실을 제외한 손실요소	33.1 dB	1.0 dB	33.1 dB	1.0 dB
통신 지구국 수신안테나 이득	30.1 dBi	1.0 dBi		
간섭 지구국 수신안테나 이득	33.0 dBi	4.0 dBi		
간섭 지구국 송신안테나 축방향 이득			64.8 dBi	
간섭 위성 송신안테나 축방향 이득				23.1 dBi



(a) 시간에 따른 이탈각의 변화



(b) 시간에 따른 C/I의 변화

그림 8. 극 저궤도 위성시스템 내부의 자체간섭(전원지역, 신뢰도 90%)

Fig. 8 Internal interference of Intra-polar LEO satellite system(rural area, reliability 90%)

3.3.2 타 경사저궤도 위성시스템에 의한 외부간섭

타 저궤도에 의한 외부간섭을 고려한 것으로 경사 저궤도 위성시스템이 극 저궤도 위성시스템에 미치는 간섭을 분석하였다. 유형 2는 경사 저궤도 위성지구국이 극 저궤도 통상위성에 미치는 간섭량을 분석한 것이고 유형 4는 경사 저궤도 위성들이 극 저궤도 위성에 간섭을 미치는 경우이며 유형 6은 경사 저궤도 위성지구국이 극 저궤도 위성지구국에 간섭을 미치는 경우이며 마지막으로 유형 8은 경사 저궤도 위성들이 극 저궤도 위성지구국에 미치는 간섭량을 분석한 것이다. 각 시스템별 입력 데이터는 표 2와 같다 [11].

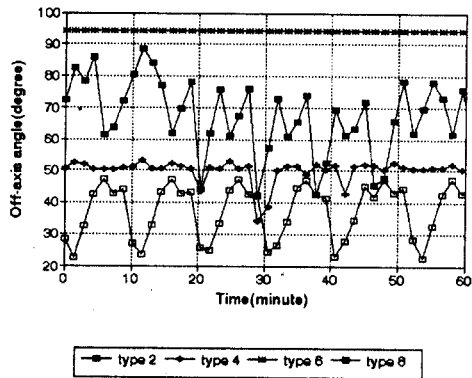
여기서 유형 2와 6은 지구국에 의한 간섭으로서 간섭 지구국은 북경(40N, 117E)에 위치해 있다고 가정하였다. 전세계에 위치한 수십 여개의 지구국 중 한 개만을 고려한 결과이므로 실측치보다 다소 높은 C/I 레벨을 얻을수 있다. 그림 9를 보면 유형 2는 이탈각(off-axis angle)이 40°에서 90°까지 큰 폭으로 변하기 때문에 양각과 이탈각이 변함에 따라 C/I 곡선이 민감하게 변하는 것을 알 수 있다. 반면에 유형 6은 시간에 따라 이탈각이 94.36°로 일정하기 때문에 C/I 곡선은 전반적으로 양각 곡선의 형태를 그대로 따라간다.

유형 4와 8은 위성에 의한 간섭으로서 시간에 따른 최소 이탈각의 변화를 보인 것이다. 전반적으로 양각과 이탈각에 의한 영향을 충실히 보여주고 있다. 특히 이탈각이 극도로 낮아지는 시간대에서는 간섭전력의 급격한 증가로 C/I 레벨이 크게 악화됨을 알 수 있다.

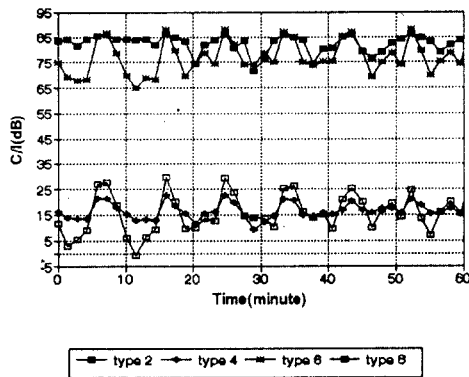
표 2. 각 시스템별 입력 데이터

Table 2. Input data for systems

구성 요소	NGEO1 시스템 (wanted LEO system)		NGEO2 시스템 (interfering LEO system)	
	up-link	down-link	up-link	down-link
지구국 송신 EIRP	68.0 dBW		26.3 dBW	
위성 송신 EIRP		44.9 dBW		37.5 dBW
자유공간 손실을 제외한 손실요소	33.1 dB	1.0 dB	1.1 dB	1.0 dB
통신 지구국 수신안테나 이득	30.1 dBi	1.0 dBi		
간섭 지구국 수신안테나 이득	33.0 dBi	4.0 dBi		
간섭 지구국 송신안테나 축방향 이득			64.8 dBi	
간섭 위성 송신안테나 축방향 이득				14.8 dBi



(a) 시간에 따른 이탈각의 변화



(b) 시간에 따른 C/I의 변화

그림 9. 경사 저궤도 위성시스템에 의한 외부간섭(전원지역, 신뢰도 90%)

Fig. 9 External interference by inclined LEO satellite system(rural area, reliability 90%)

3.3.3 정지궤도 위성시스템에 의한 외부간섭

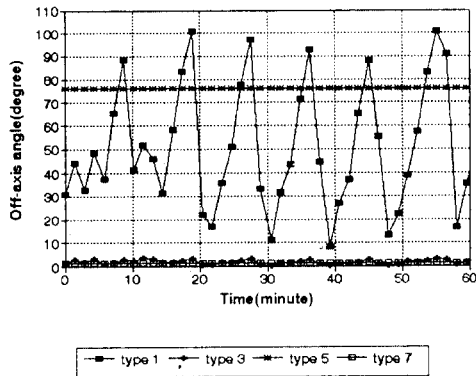
정지궤도 위성시스템이 극 저궤도 위성시스템에 미치는 간섭을 분석한 것으로서 정지궤도 위성의 위치는 경도 117°의 36,000 Km 적도상공으로 가정하였다. 그림 5를 참고할 때 해당하는 유형은 1, 3, 5, 그리고 7로서 유형 1은 정지궤도 위성지구국이 극 저궤도 위성에 미치는 간섭을 분석한 것이고 유형 3은 정지궤도 위성이 극 저궤도 통신위성에 간섭을 미치는 경우이며 유형 5는 정지궤도 위성지구국이 극 저궤도 위성지구국에 간섭을 미치는 경우를 해석한 것이며 마지막으로 유형 7은 정지궤도 위성이 극 저궤도 위성지구국에 미치는 간섭을 분석한 것이다. 각 시스템에 따른 입력 데이터는 표 3과 같다[11].

여기서 유형 1과 5는 정지궤도 위성지구국에 의한 간섭으로서 지구국의 위치는 북경으로 가정하였으며 정지궤도 위성지구국의 개수는 한 개라고 가정하였고 실측치와 큰 차이가 없을 것으로 예상된다. 유형 1은 이탈각(off-axis angle)이 약 10°에서 100°까지 시간별로 다양하게 분포하므로 이에 대한 간섭전력도 큰 차이가 발생하여 C/I 레벨의 변화가 심각하게 일어나고 있다. 반면 유형 5는 이탈각이 76.25°로 일정하기 때문에 C/I 곡선은 양각의 변화 곡선을 그대로 따라가는 형태를 띠고 있다. 유형 3과 7은 정지궤도 위성에 의한 간섭으로서 그림 5의 기하학적 구조로 보아 극도로 낮은 이탈각을 가질 것으로 예상된다.

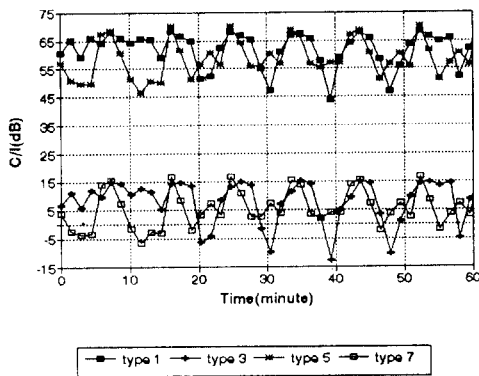
실제로 그림 10-(a)를 보면 유형 3의 경우 이탈각이 0~4°로 극히 낮은 각도로 간섭을 미치는 것을 알 수

표 3. 각 시스템별 입력 데이터
Table 3. Input data for systems

구성 요소	시스템 분류	NGEO 시스템 (wanted LEO system)		GEO 시스템 (interfering GEO system)	
		up-link	down-link	up-link	down-link
지구국 송신 EIRP		68.0 dBW		50.0 dBW	
위성 송신 EIRP			44.9 dBW		70.7 dBW
자유공간 손실을 제외한 손실요소		33.1 dB	1.0 dB	2.0 dB	0.1 dB
통신 지구국 수신안테나 이득		30.1 dBi	1.0 dBi		
간섭 지구국 수신안테나 이득		33.0 dBi	4.0 dBi		
간섭 지구국 송신안테나 축방향 이득				69.3 dBi	
간섭 위성 송신안테나 축방향 이득					42.0 dBi



(a) 시간에 따른 이탈각의 변화



(b) 시간에 따른 C/I의 변화

그림 10. 정지궤도 위성시스템에 의한 외부간섭(전원지역, 신뢰도 90%)

Fig. 10 External interference by GEO satellite system(rural area, reliability 90 %)

있다. 그 결과 동일한 양각분포를 갖는 타 유형에 비해 간섭전력이 높고 따라서 C/I 레벨이 최악의 값을 갖게 되어 극 저궤도 위성시스템의 상향링크 통신환경을 극도로 악화시킬 것으로 예상된다. 또한 유형 7의 경우도 이탈각이 1.46°의 극히 낮은 고정각도로 대전에 위치한 극 저궤도 위성지구국에 간섭을 미치기 때문에 하향링크의 통신환경을 크게 악화시키는 요인으로 작용할 수 있다.

IV. 비정지 위성시스템의 링크해석

링크예산(Link Budget)이란 근본적으로 통신링크 상에서 발생하는 전력의 증·감을 계산함으로써 원하는 수준의 링크 신뢰성을 보장할 수 있는 링크여유도(Link Margin)를 가늠하고자 수행하는 전력예산으로 볼 수 있으며 기존의 정지궤도 위성통신의 경우 다각적인 분석이 이미 수행되어 왔으며 최근 들어 비정지궤도 위성통신에 대한 링크예산 작업이 활발히 진행되고 있다.

비정지궤도 위성시스템은 지구상공 780~2,000Km 지점의 여러 궤도상에서 일정한 주기로 선회하는 수십 개의 소형위성군과 전세계에 그물망처럼 퍼져있는 수십 개의 지구국으로 구성되어 있으며 특유의 낮은 저궤도와 빠른 공전속도 때문에 정지궤도 링크예산과는 다른 시각의 접근방법이 요구된다.

본 장에서는 II장에서 제시한 비정지궤도 위성채널의 페이딩 영향과 섀도잉영향에 의해 발생한 신호

전력의 감쇠를 고려하기 위해 페이딩 여유도(Fading Margin)를 링크예산에 적용하였으며 III장에서 수행한 위성시스템간 간섭량을 상·하향링크에 신호 대 간섭비로서 입력하였다. 수행한 링크해석은 순방향링크에 해당하며 채널환경과 신뢰도를 달리하면서 링크여유도의 변화를 시간에 따라 연속적으로 제시하였다.

4.1 시간고정 링크예산

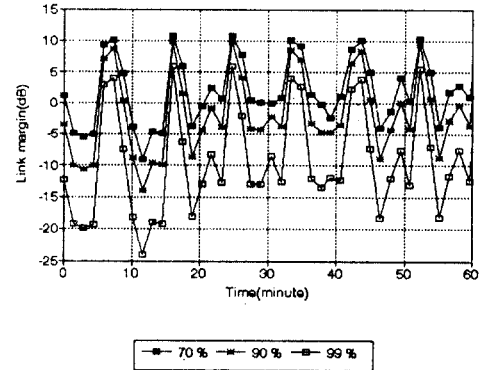
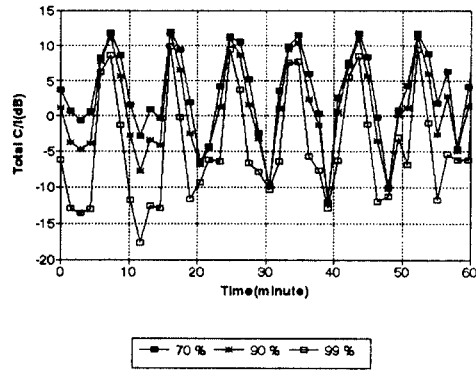
본 절에서는 전원지역에서 신뢰도 90%를 만족하는 극 저궤도 위성시스템의 순방향 링크예산을 고정 시점에서 작성한 것으로서 표 4와 같다. 사용된 링크 요소값은 각 시스템에서 이용되는 대표적인 값을 설정하였으며 페이딩 여유도와 위성간 간섭량은 임의로 적절한 수준에서 가정하였다.

표 4. 극 저궤도 위성시스템의 시간고정 Link Budget(전원지역, 채널신뢰도 90%)
Table 4. Link budget of polar LEO system in fixed time(rural area, reliability 90%)

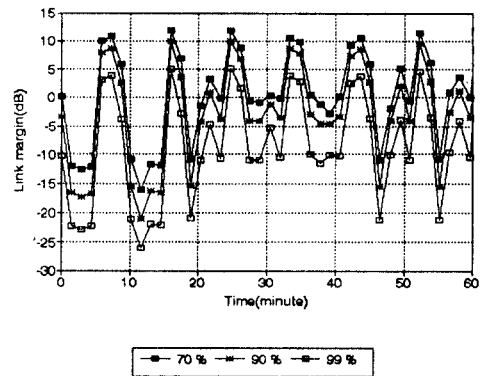
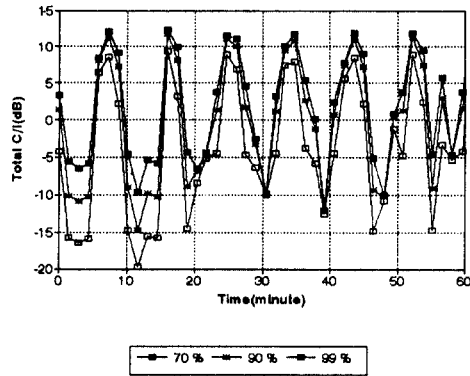
링크 요소	Wanted LEO system		Interfering LEO system		Interfering GEO system	
	linear	dB	linear	dB	linear	dB
상향 링크						
지구국 측						
상향 링크 주파수, GHz, dBHz	C-band		C-band		C-band	
송신 전력, W, dBW	3.16	5.0	1.8e-4	-37.4	1.86e-2	-17.3
송신 안테나 이득, dBi		64.8		64.8		69.3
선로 손실, dB						
안테나 포인팅 손실, dB		-1.8		-1.1		-2.0
♣ 지구국 EIRP, dBW		68.0		26.3		50.0
위성 수신 측						
전파거리, Km	1443.99					
자유공간 손실, dB		-185.0				
전파 손실 및 시스템여유도, dB						
편향 손실, dB		-33.1		-1.1		-2.0
수신 안테나 이득, dBi		30.1		3.6		17.0
♣ 수신 전력, W, dBW	1.0e-12	-120.0				
Boltzmann's constant, dB	1.38e-23	-228.6	1.38e-23	-228.6	1.38e-23	-228.6
위성체 잡음온도, K, dBK	1259.0	31.0	549.5	27.4	501.2	27.0
수신 채널 대역폭, MHz, dBHz	2.09	63.2	1.26	61.0	2.7e-2	44.3
♣ 수신 잡음 전력, W, dBW	3.63e-14	-134.4				
♣ 수신 간섭 전력, W, dBW	2.45e-13	-126.1				
♣ 상향 링크 C/N, dBW		14.4				
♣ 상향 링크 C/I, dBW		6.1				
♣ 상향 링크 C/(N + I), dBW		5.5				
♣ 상향 링크 C/(No + Io), dBW/Hz		68.7				

하향 링크						
위성 송신 측						
하향 링크 주파수, GHz, dBHz	S-band		S-band		S-band	
송신 전력, W, dBW	245.5	23.9	239.9	23.8	933.3	29.7
송신 안테나 이득, dBi		23.1		14.8		42.0
선로 손실, dB						
안테나 포인팅 손실, dB		-2.1		-1.1		-1.0
♣ 위성체 EIRP, dBW		44.9		37.5		70.7
사용자 측						
전파거리, Km	1446.4					
자유공간 손실, dB		-159.73				
대기 손실, dB						
편향 손실, dB		-1.0		-1.0		-0.1
앙각, °	30					
페이딩 여유도, dB		-11.9				
수신 안테나 이득, dBi		1.0		2.6		1.7
♣ 수신 전력, W, dBW	3.29e-13	-126.73				
Boltzmann's constant, dB	1.38e-23	-228.6	1.38e-23	-228.6	1.38e-23	-228.6
위성체 잡음온도, K, dBK	251.2	24.0	295.1	24.7	354.8	25.5
수신 채널 대역폭, MHz, dBHz	3.15e-2	45.0	1.26	61.0	2.7e-2	44.3
♣ 수신 잡음 전력, W, dBW	1.1e-16	-159.6				
♣ 수신 간섭 전력, W, dBW	1.08e-14	-139.66				
♣ 하향 링크 C/N, dBW		32.87				
♣ 하향 링크 C/I, dBW		12.93				
♣ 하향 링크 C/(N+I), dBW		12.89				
♣ 하향 링크 C/(No+Io), dBW/Hz		57.89				

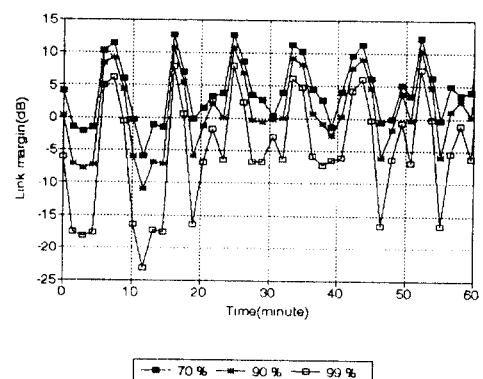
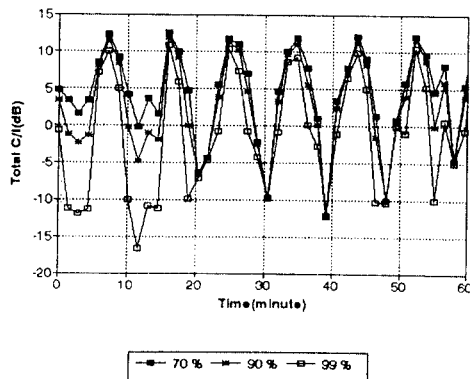
전체 링크						
♣ 전체 링크 C/(No+Io), dBW/Hz		57.54				
전송 속도, dBHz		36.8				
구현 손실, dB		2.0				
♣ 전체 링크 Eb/(No+Io), dBW/		28.74				
변조 방식	ideal QPSK					
요구되는 BER	1.612e-9					
요구되는 Eb/No, dBW	12.6					
국 저궤도 위성시스템의 Link Margin						
♣ 링크 여유도, dB	6.14					



(a) 전원지역



(b) 도심지역



(c) 교외지역

그림 11. 환경별 전체링크 C/I와 링크 여유도의 변화
Fig. 11 Variations of total C/I and link margin for various environments

4.2 시간변동 링크해석

비정지궤도 위성시스템의 가장 큰 특징은 시간의 흐름에 따라 링크환경이 큰 폭으로 변하는데 있다. 따라서 저궤도 위성통신의 경우 4.1절과 같은 시간 고정 링크예산은 큰 의미를 갖지 못한다. 본 절에서는 저궤도 통신위성의 이동성을 그림 7에 보인 양각을 기준으로 II장과 III장에서 이미 수행한 페이딩 여유도와 신호 대 간섭비의 결과를 이용하여 각 환경에 대한 상·하향 전체링크의 C/I 변화와 링크 여유도의 변화를 그림 11에 보였다.

일반적으로 높은 양각과 최소의 전파거리로 서비스되는 신호는 자유공간 손실에 의한 감쇠가 작은 반면 양각이 나빠지면 심각한 자유공간 손실과 페이딩 영향으로 인한 신호열화로 인해 링크 여유도가 극도로 악화된다. 그림 11은 이러한 관계를 잘 보여주고 있는데 양각이 높아질수록 전체링크의 C/I는 증가하고 링크 여유도도 높아짐을 알 수 있다.

결론적으로 신호가 높은 양각과 최소의 전파경로로 전송되거나 상·하향 전체링크를 통한 C/I가 최대가 되는 시점에서 최선의 링크 여유도가 보장됨을 알 수 있다. 실제로 그림 7과 11-(a)를 보면 신뢰도가 90%인 전원지역에 대해 시간이 15.98 분에서 양각이 75.97°, 전파거리가 801.26Km, 그리고 전체링크의 C/I가 11.71 dB로서 전반적인 조건이 최적이므로 최대의 링크 여유도 9.88 dB가 얻어지는 반면 11.62 분에서는 양각이 9.95°, 전파거리가 2329.05Km, 그리고 전체링크의 C/I가 -7.73 dB로서 전체적인 조건이 최악이므로 링크 여유도가 -14.04 dB로서 최소가 됨을 알 수 있다. 이와 같이 링크 여유도가 극도로 낮아지게 되면 통신환경에 심각한 악영향을 미치므로 적절한 링크 여유도의 보상이 요구된다.

V. 결 론

본 논문은 여러 전파전파 환경과 다양한 통신시스템 신뢰도에 대한 저궤도 위성채널의 성능을 평가하고 타 위성시스템이 극 저궤도 위성시스템에 미치는 간섭을 분석함으로써 시간변동에 따른 링크 여유도의 변화를 임의의 60분 동안 제시하였다.

분석 결과 양각이 낮아질수록 신뢰도가 높아질수록 요구되는 페이딩 여유도는 높아짐을 확인할 수 있

었고 직계는 2 dB에서 많게는 28 dB까지 분포하며 전반적으로 교외지역, 전원지역, 도심지역으로 갈수록 페이딩 영향이 심각해짐을 알 수 있었다. 타 위성시스템이 극 저궤도 위성시스템에 미치는 간섭량의 분석은 모든 간섭경로를 8 가지 유형으로 분류하고 이를 다시 3 종류의 간섭위성망에 적용하여 해석하였다. 여기서 유형 1, 2, 5, 그리고 6은 다른 지구국에 의한 간섭량으로 약 45 dB~90 dB 값을 갖고 유형 3, 4, 7, 그리고 8은 타 위성이 미치는 간섭으로서 약 -15 dB~30 dB 값을 갖는다.

이러한 결과를 바탕으로 극 저궤도 위성시스템의 링크예산을 작성하였으며 환경과 신뢰도에 따라 최소 -26 dB부터 최대 12 dB까지 분포함을 알 수 있었다. 따라서 높은 양각과 최단 거리로 전파되거나 전체링크의 C/I가 가장 커지는 시점에서 최고의 링크 여유도가 보장됨을 알 수 있다. 즉 신뢰도 90%를 만족하는 전원지역에서 양각, 전파거리, 그리고 전체링크 C/I 조건이 최적인 15.98 분에서 최대의 링크 여유도 9.88 dB를 갖는 반면 낮은 양각과 긴 전파거리 그리고 최악의 C/I 값을 갖는 11.62 분에서 극도로 열악한 링크 여유도 -14.04 dB가 얻어짐을 알 수 있다.

결론적으로 새롭게 발주된 저궤도 위성사업이 기존의 위성시스템과 공존하기 위해서는 타 위성시스템 및 자체시스템에 의한 상호간섭 분석이 링크요소 설계시 선행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. ITU-R Document 4A/TEMP/26-E, Nov. 1994.
2. F. Vatalaro and G. E. Corazza, "Probability of Error and Outage in a Rice-Lognormal Channel for Terrestrial and Satellite Personal Communications," IEEE Trans. Commun., vol. 44, pp. 921-924, Aug. 1996.
3. G. E. Corazza and F. Vatalaro, "A Statistical Model for Land Mobile Satellite Channels and Its Application to Nongeostationary Orbit Systems," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 43, pp. 738-742, Aug. 1994.
4. J. G. Proakis, Digital Communications, New York : McGraw Hill, 1983.

5. G. E. Corazza, A. Jahn, E. Lutz and F. Vatalaro, "Channel Characterization for Mobile Satellite Communications," Mobile and Personal Satellite Communications, London, U. K.:Springer, pp. 225-250, 1995.
6. Tri. T. Ha, Digital Satellite Communications. New York: McGraw-Hill, 2nd ed., 1990.
7. W. W. Wu, E. F. Miller, W. L. Pritchard and R. L. Pickholtz, "Mobile Satellite Communications," Proc. IEEE, vol. 82, pp. 1431-1448, Sep. 1994.
8. M. Werner, A. Jahn, E. Lutz and A. B tcher, "Analysis of System Parameters for LEO/ICO-Satellite Communication Networks," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 13, pp. 371-381, Feb. 1995.
9. H. Keller and H. Salzwedel, "Link Strategy for the Mobile Satellite System Iridium," Proc. ICC, pp. 1220-1224, May 1996.
10. D. Smith, R. Hendrickson and S. Jose, "Mission Control for The 48-Satellite Globalstar Constellation," IEEE Milcom, pp. 828-832, 1995.
11. K. G. Johannsen and S. K. Park, "LEO, MEO and GEO Mobile Satellite Performance Comparison," ICT'95, pp. 138-142, 1995.

※주관심분야: 위성통신, 이동통신, 디지털통신 기술 등임



崔 炯 辰(Hyung Jin Choi) 정회원
 1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 졸업(학사)
 1976년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 졸업(석사)
 1976년 3월~1979년 7월: 주식회사 금성사 중앙연구소 근무(연구원)

1979년 9월~1982년 12월: 미국 University of Southern California 전기공학과 박사(Ph.D)

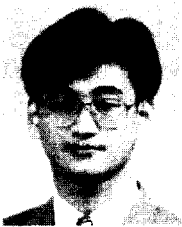
1982년 10월~1989년 2월: 미국 LinCom Corp. 연구원으로 근무

1989년 3월~현재: 성균관대학교 전자공학과(부교수)

※주관심분야: 디지털통신, 무선통신, 이동통신, 위성통신 및 동기화 기술을 포함한 Modem 기술 등임



黄 胜 铉(Sung Hyun Hwang) 정회원
 1996년 2월: 성균관대학교 전자공학과 졸업(학사)
 1996년 3월~현재: 성균관대학교 대학원 석사과정
 ※주관심분야: 위성통신, 이동통신, 디지털통신 기술 등임



金 炳 均(Byung Kyun Kim) 정회원
 1992년 2월: 성균관대학교 전자공학과 졸업(학사)
 1994년 2월: 성균관대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)
 1997년 8월: 성균관대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사)

1997년 9월~현재: 한국통신 프리텔 기술부문 개발센터 근무