

정지궤도 위성과 지구국간 광통신 링크의 전송속도 해석

Analysis of Data Rate on Optical Communication Links between Geo-Satellite and Earth Station

韓宗碩*, 鄭鎮鎬**, 金映權***

(Jong-Seok Han, Jin-Ho Jung and Yung-Kwon Kim)

요 약

정지궤도 위성과 지구국간 광통신을 대기상태와 각도의 함수로써 해석할 수 있는 한모델(Han's model)을 제시하였다. 한모델에서는 대기상태를 맑은날, 구름낀 날, 안개, 해이즈, 비, 눈의 여섯가지 전형적인 상태로 구분한다. 비트오류율 10^{-7} 을 만족하는 데이터 전송속도를 한모델을 이용하여 상향링크와 하향링크에 대해 해석하였다. 상향링크시의 포인팅손실이 하향링크시의 대기에 의한 공간 가간섭 저하보다 크기 때문에 데이터 전송속도는 하향링크 보다 오히려 상향링크시에 제한됨을 알 수 있었다.

Abstract

Han's model, which is able to analyze optical communication between earth station and geo-satellite as a function of atmospheric conditions and elevation angles, is presented. In Han's model, atmospheric conditions are roughly classified into six basic types; clear sky, cloud, haze, fog, rain and snow. Data rate satisfying for the BER below 10^{-7} is analyzed by Han's model in case of up-link and down-link, respectively. Data rate is more limited by up-link than by down-link because the pointing loss caused by atmosphere on the up-link is greater than the spatial coherence degradation caused by atmosphere on the down-link. Keyword : Han's model, Wireless optical communication, Geostationary satellite link, Atmospheric effect, Spatial coherence degradation

I. 서 론

다가올 21세기는 정보통신과 항공우주 산업이 양축을 이

루는 시대가 될 것이며 지상과 우주공간에서 레이저를 이용한 광통신은 21세기의 중요한 통신매체로 부각될 것이다. 이미 지상에서는 광섬유를 이용하여 음성뿐만 아니라 동화상을 보내기 위한 초고속 광통신망(BISDN)의 구축이 진행 중에 있다. 우주공간에서의 광통신은 레이저의 높은 주파수로 인해 초고주파에 비해 수만배 이상의 대역폭을 얻게됨으로써 정보의 초고속 전송이 가능해지고, 높은 안테나이득으로 인해 안테나의 크기를 줄일 수 있다. 또한 레이저의 높은 지향특성에 의해 저전력통신이 가능해지며 위성간 신호간섭을 제거시킬 수 있다. 이러한 광통신의 장점은 결국 위성이

* 데이콤 綜合研究所 主任研究員
(Junior Engineer, Dacom R&D Center)

** 湖西大學校 電氣電子制御工學部
(Dept. of Elec. Eng., Hoseo Univ.)

*** 建國大學校 電氣電子工學部
(School of Elec. Eng., Konkuk Univ.)

接受日:1997年8月2日, 修正完了日:1997年10月13日

나 우주선에 탑재되는 통신시스템의 무게 및 크기를 감소시켜 비용의 절감을 가져오게 된다^[1-2].

우주 광통신의 이러한 많은 장점 때문에 미국을 비롯한 유럽연합, 일본에서는 이미 오래 전부터 이 분야의 연구에 상당한 투자를 하고 있다. 미국은 1970년대 초에는 SFTS(Space Flight Test System), AFTS(Airbone Flight Test System)과 같은 우주광통신 링크 구축을 위한 기초연구가 시작되었다^[1-2].

1980년대 초에는 위성간 광통신링크 구축을 위한 LCS (Laser Crosslink Subsystem) 프로젝트가 수행되었으며 같은 시기에 MIT공과대학 링컨 연구소에 의해 ACTS (Advanced Communication Technology Satellite) 일환으로 동식기 광통신 시스템에 관한 연구가 수행되었다^[2-3].

1992년 12월에는 미항공우주국 제트추진연구소(NASA-JPL)의 GOPEX(Galileo Optical Experiment) 프로젝트에 의해 목성탐사선과 인공위성간 광통신을 성공시켰다. 1995년 초부터는 역시 미항공우주국 제트추진 연구소에 의해 위성간 초고속 광통신을 위한 연구가 수행중이다^[2]. 유럽연합은 유럽우주국(ESA)을 중심으로 SILEX(Space Intersatellite Link Experiment)프로젝트를 통해 1990년대 후반부터 정지궤도위성(GEO)과 저궤도위성(LEO)간 광통신을 위한 연구가 진행 중에 있다. 일본은 우정성 산하 통신종합연구소 우주 광통신센터에서 LCE(Laser Communication Experiment)프로젝트를 통해 지구국과 위성간 광통신을 성공시키기 위한 연구를 추진 중에 있으며 이를 위해 1994년에 일본 과학실험위성 4호를 발사하였다^[2]. 이러한 연구들이 성공리에 수행되면 21세기에는 우주의 무선 광통신망과 지상의 유선 광통신망을 레이저로 연결하기 위한 연구가 반드시 필요하게 될 것이다.

그러나 레이저를 이용한 우주-지상망간의 연결은 지구의 대기현상에 의해 크게 영향을 받기 때문에 이의 실현을 위해서는 대기를 통한 광위성통신에 관한 연구가 선행되어야만 한다. 그러나 대기를 통한 광위성통신에 관한 연구는 미국과 같은 과학선진국에서도 맑은 날의 교란대기채널에 국한되어 있으며^[3], 비, 눈, 안개, 헤이즈 등의 산란 대기채널을 포함한 다양한 기상상태에서의 광위성통신 정보전송속도에 관한 해석모델은 아직 보고된 바 없다. 따라서 본 논문에서는 정지궤도 위성과 지구국간의 광통신을 기상상태와 앙각에 따라 해석할 수 있는 광위성 통신링크의 새로운 해석모델인 한모델(Han's

model)을 제시하고, 이 해석모델을 근거로 지구국의 앙각과 이 지역에서의 대기상태에 따른 전송속도를 해석한다.

광통신에 영향을 미치는 대기현상은 크게 흡수, 교란, 산란 세가지로 분류되며 맑은 날씨의 광무선통신은 주로 흡수, 교란에 의해 지배되고 흐린 날씨에는 흡수, 산란에 의해 지배된다. 이때 흡수현상은 광원의 파장을 적절히 선택함으로써 극복되어 질 수 있으므로 대기광통신 채널은 교란대기와 산란대기로서 기술할 수 있다^[3]. 광위성 통신에 영향을 미치는 대기현상은 상향링크에서는 빔편향, 이미지 표동(image dancing) 등이고 하향링크에서는 빔퍼짐, 빔강도변화(beam scintillation), 공간간섭 저하(spatial coherence degradation)등으로 다르게 나타나기 때문에 상향링크와 하향링크는 동일채널로 간주될 수 없다^[4]. 따라서, 본 논문에서는 상향링크와 하향링크에 대해 각각 다르게 모델링한다. 또한 상향링크와 하향링크 각각에 대해서는 다시 맑은 날의 교란대기 채널과 눈, 비, 안개, 구름 등이 존재하는 산란대기 채널로 나누어 모델링한다.

상향링크시 위성은 광테레오다인 수신방식을, 하향링크시 지구국은 교란과 산란에 의한 영향 모두를 최소화시키기 위해 직접 광수신방식을 채택한다. 위성은 직경 1[m]의 광카세그레인 안테나를 송/수신 겸용으로 사용하고 지구국은 직경 5[m]의 광카세그레인 안테나가 송/수신 겸용으로 사용되었다고 가정한다. 광원으로는 대기흡수의 영향을 적게 받으면서 송/수신 신호의 간섭을 방지하기 위해 상향링크에서는 1.55[μ m] 파장, 하향링크에서는 0.84[μ m] 파장의 1 watt 반도체 레이저를 사용하고, 변조방식은 상향링크에서는 교란에 강한 2진 FSK방식을, 하향링크에서는 ASK방식을 선택한다. 이때 상향링크와 하향링크시 대기상태와 앙각에 따른 정보 전송속도를 수치해석을 통해 연구한다.

II. 대기 광채널 해석

광통신에 영향을 미치는 대기효과는 흡수, 교란, 산란 등이며, 날씨에 따라 각기 다른 대기효과가 발생한다. 날씨에 흐린 날에는 흡수와 산란이 주된 대기효과이며, 맑은 날씨상태에서는 흡수와 교란이 주된 대기효과이다. 본 장에서는 광위성통신에 영향을 미치는 흡수, 교란, 산란 등의 대기효과에 대해 설명한다.

2-1. 흡수(Absorption)

광신호가 대기를 통과할 때, 대기 구성분자에 의해 에너지 흡수가 발생 하며, 흡수를 일으키는 주요 대기 구성분자로 는 수증기, CO₂, O₂ 등이 있다. 그림 1은 구름이 없는 전형적인 맑은 날씨상태의 대기전송도로서 대기 입자에 의한 광파의 흡수현상은 광원의 파장을 적절히 선택하여 대기의 전송도를 높이면 어느 정도 줄일 수 있다.^{[3][5]}

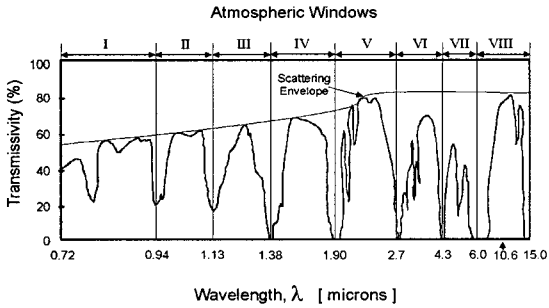
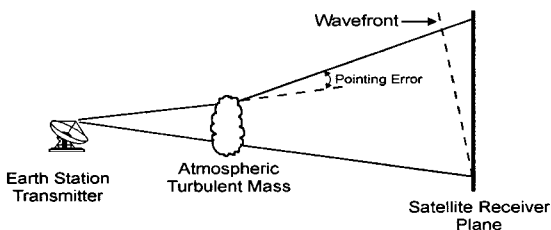


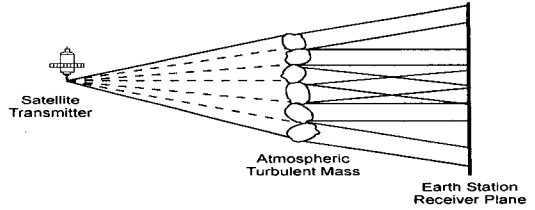
그림 1. 파장에 따른 대기의 전송도
Fig. 1. Atmospheric transmissivity vs. wavelength.

2-2. 대기교란(Atmospheric Turbulence)

1~2°C정도의 작은 온도변화에 의해 공기의 굴절률이 연속해서 변하는 대기현상이 바로 교란현상이다. 이러한 대기의 불규칙한 움직임은 주로 태양에 의한 대기가열, 바람과 대류현상에 의한 공기의 와류에 의해 발생된다. 광신호가 이와 같은 교란대기를 통해 전파할 때, 신호의 진폭과 위상이 불규칙하게 변화되며, 이러한 불규칙 변동이 광통신 시스템의 성능을 저하시키는 요인이 된다.



(a) $dB \ll 1$ (상향링크의 경우)



(b) $dB \gg 1$ (하향링크의 경우)

그림 2. 빔 직경과 교란대기의 상대적 크기에 따른 대기 교란효과

Fig. 2. Atmospheric turbulence effects as a function of beam diameter and turbulence dimension.

광파에 대한 교란대기 효과는 레이저 빔의 직경(dB)과 비균질 교란매질의 상대적 크기에 의존한다. 레이저 빔의 직경이 교란매질에 비해 매우 큰 경우 교란매질은 빔의 부분들을 독립적으로 회절 시켜 동위상면이 심하게 왜곡되며 그림 2-b에 잘 나타나 있다. 그리고 이 경우 교란에 의한 영향은 신틸레이션(scintillation), 위상가간섭성 파괴(degradation of phase coherence)등 이다. 반대로 레이저 빔의 직경이 교란매질의 크기보다 매우 작은 경우의 대기교란 효과는 그림 2-a에 보인바와 같이 빔을 편향시킨다.

교란의 세기를 나타내는 척도인 굴절률 구조함수 $C_n^2(h)$ 은 대기의고도 h 및 하루중 시간, 계절, 지역적 대기조건에 따라 변하는 값이다. 다음 그림3은 Rome Air Development Center에서 발표한 자료로서 하루중 고도에 따라 변화하는 굴절률 구조함수를 낮과 밤으로 구분해서 얻은 평균값이다.^[3]

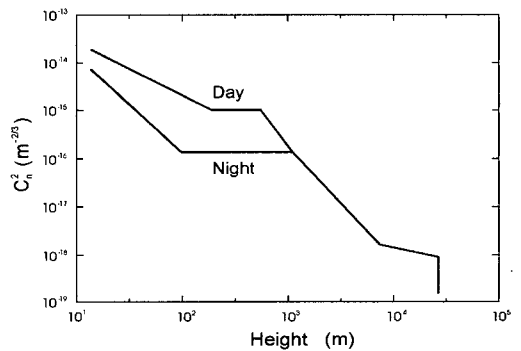


그림 3. 굴절률 구조함수
Fig. 3. Refractive-index structure function.

2-3. 대기산란(Atmospheric Scattering)

산란은 크게 레이라이(Rayleigh)산란과 미(Mie)산란으로 구별된다. 여기서, 레이라이(Rayleigh) 산란은 맑은 대기에서 작은 입자에 의해 파장이 짧은 영역에서 주로 발생하며, 손실곡선은 λ^{-4} 의 곡선을 따른다^[5]. 미(Mie)산란은 에어로솔(aerosol)산란이라고도 하며, 안개, 물방울, 빗물, 눈 등과 같이 큰 입자들에 의해 일어나며, 광통신에서 문제가 되는 대기산란현상은 바로 미(Mie)산란에 의해 발생된다. 광통신 시스템에서 가장 큰 문제가 되는 산란손실은 날씨상태에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 산란손실은 안개, 헤이즈, 비, 눈 등의 날씨상태에 따라 독립적으로 계산해야 한다.

광신호가 산란대기중을 전파시 산란대기에 의해 발생하는 산란감쇠는 $e^{-\sigma_{scat} \cdot z}$ 로 표현되므로 산란감쇠의 대수적 표현 L_{scat} 는 다음식으로 유도된다.

$$\begin{aligned} L_{scat}[dB] &= 10 \log e^{-\sigma_{scat} \cdot z} \\ &= -\sigma_{scat} \cdot z \cdot 10 \log e \\ &= -4.4 \cdot \sigma_{scat} \cdot z \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, z 는 전송거리이고, σ_{scat} 는 산란감쇠계수 [km⁻¹]이다. 따라서, 전송거리(z) 1[km]당 산란감쇠를 나타내는 산란감쇠계수의 대수적 표현인 $\sigma_{scat} [dB/km]$ 는 다음식으로 유도된다.

$$\sigma_{scat} [dB/km] = 4.4 \times \sigma_{scat} [km^{-1}] \quad (2)$$

2-3-1. 안개와 헤이즈에 의한 산란

안개는 수증기가 기층 중에서 응결하여, 아주 작은 물방울이 되어 대기의 밀층(고도 100[m] 이내)에 떠돌고 있는 현상을 말한다. 본 논문에서 사용하는 광원의 파장대인 0.84[μ m]와 1.55[μ m] 적외선 영역에서의 안개에 의한 산란 감쇠계수는 다음 식으로 나타내진다^[6].

$$\sigma_f = \frac{3.91}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q [km^{-1}] \quad (3-a)$$

$$\sigma_{f[dB/km]} = \frac{16.98}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q [dB/km] \quad (3-b)$$

여기서, v 는 가시도, q 는 실험데이터에 의해 결정되

는 값으로 $q = 0.585 V^{1/3}$ 이다. 헤이즈(haze)는 대기 중에 퍼져있는 작은 입자들로, 입자의 반경이 0.5 [μ m]에 이르는 작은 염결정, 매우 미세한 먼지, 또는 연소로 생긴 물질들로 구성이 된다. 습도가 매우 높은 곳에서 습기들은 이러한 입자들에 응축이 되어 물방울을 형성하며 이 입자들은 응축 핵으로 행동을 하게된다. 헤이즈는 가시도가 1[km]이상이라는 점을 제외하고는 안개와 동일하기 때문에 감쇠계수를 구하는 식도 동일하며, 다만 가시도가 1[km]이상이기 때문에 안개와 q 값이 다르다. 다음식은 헤이즈에 의한 감쇠계수를 나타낸다^[6].

$$\sigma_h = \frac{3.91}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q [km^{-1}] \quad (4-a)$$

$$\sigma_{h[dB/km]} = \frac{16.98}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q [dB/km] \quad (4-b)$$

여기서, q 는 실험 데이터에 의해 결정되는 값으로 가시도에 따라 다음식과 같이 주어진다.

$$q = 0.585 V^{1/3}, V \leq 7 [km] \quad (5-a)$$

$$q = 6.583 \times 10^{-3} V + 1.07, V > 7 [km] \quad (5-b)$$

2-3-2. 비와 눈에 의한 산란

대기 중에서 내리는 비와 눈은 광파가 대기를 통해 진행하는데 많은 영향을 미치는 산란감쇠의 요인이 되며, 빗방울의 반경(보통 약 0.05[cm] 정도)과 눈의 반경이 파장보다 훨씬 크기 때문에 가시영역 및 적외선영역에서의 눈과 비에 의한 산란감쇠는 파장에 독립적이다^[6]. 비에 의한 산란 감쇠계수는 Rensch와 Long에 의해 다음 식과 같이 강우량의 함수로 나타내진다^[6].

$$\sigma_r = 0.423 P^{0.501} [km^{-1}] \quad (6-a)$$

$$\sigma_{r[dB/km]} = 1.837 P^{0.501} [dB/km] \quad (6-b)$$

여기서, P 는 강우량(mm/hr)이다. 눈에 의한 감쇠계수도 실험적인 결과에 의하여 다음식으로 주어진다.

$$\sigma_s = 1.3 P^{0.5} [km^{-1}] \quad (7-a)$$

$$\sigma_{s[dB/km]} = 5.65 P^{0.5} [dB/km] \quad (7-b)$$

여기서, P 는 적설량(mm/hr)을 나타낸다.

2-3-3. 구름에 의한 산란

구름은 수증기가 공중 높은 곳에서 응결되어 아주 작은 물방울이나 얼음 덩어리로 되어 있는 상태를 말한다. 따라서 구름을 통과하는 광파는 구름중의 물방울이나 얼음덩이로 인해 심한 산란을 겪게되고 광전력은 심하게 감소된다. 구름의 산란에 의한 광전력의 감소정도를 나타내는 척도로는 산란계수나 혹은 산란계수의 역수인 차광길이(extinction length)를 사용한다. 광파가 산란매질을 차광길이 만큼 진행하면 광전력은 4.4[dB] 감소하게 된다. 따라서 구름을 통하여 1만큼 진행한 광신호 전력의 감소는 다음식과 같이 주어진다^[4].

$$\sigma_{cloud} [dB] = 4.4 \times (l/l_e) [dB] \quad (8)$$

표 1은 구름의 종류, 높이, 형태, 평균 두께, 차광길이 등을 나타낸다^{[4][7]}.

표 1. 전형적인 구름의 파라미터

Table 1. Some typical cloud parameters.

구름의 종류	평균고도 (km)	차광 길이 (m)	평균 두께 (m)
권운 (Cirrus)	11 - 12	350	3
권층운 (Cirrostratus)	9 - 10	350	5
권적운 (Cirrocumulus)	6 - 9	350	5
고적운 (Altostratus)	5 - 9	65	18
고층운 (Altostratus)	3 - 4	45	30
난층운 (Nimbostratus)	2 - 3	55	51
적란운 (Cumulonimbus)	1 - 10	25	120
층적운 (Stratocumulus)	1 - 2	20	27
층운 (Stratus)	0.1 - 0.5	15	62
적운 (Cumulus)	1 - 2	50	10

III. 광수신 방식

3-1. 직접 광수신방식

직접 광수신방식은 광헤테로다인 수신방식과는 달리 국

부발진기가 없어 입력단에서 입력신호와 국부발진기 신호의 파두를 일치시킬 필요가 없으며 일반적으로 그 구조가 광헤테로다인 수신방식에 비해 간단한 것이 특징이다.

그림 4는 직접 광수신방식의 일반적인 구조를 나타낸 것이다. 대기채널을 통한 광신호는 대기산란과 교란에 의해 랜덤하게 된다. 이때 정규화된 신호전력의 분산 ΔP_r 은 다음 식과 같다^[4].

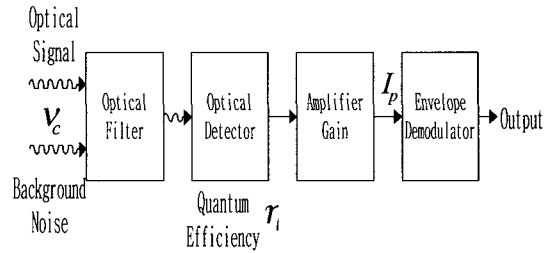


그림 4. 직접 광수신방식의 일반적인 구조
Fig. 4. Generalized schematic of optical direct detection system.

$$\begin{aligned} \Delta P_r &= \frac{\text{var}(P_r)}{(P_r)^2} \\ &= \frac{2}{d^2} \int_0^1 \exp[-3.44(\frac{ud}{r_0})^{5/3}] \\ &\quad \times [\cos^{-1}u - u\sqrt{1-u^2}]udu : \text{교란} \quad (9) \\ &= \frac{2}{d^2} \int_0^1 \exp[-(\frac{ud}{r_0})^2] \\ &\quad \times [\cos^{-1}u - u\sqrt{1-u^2}]udu : \text{산란} \end{aligned}$$

여기서, d 는 안테나의 직경, r_0 는 대기의 공간 위상 간섭길이이다. 그림 4에서 신호광 전류의 평균값 I_p 은 다음 식으로 주어진다^[4].

$$I_p = D \overline{P_r} G \quad (10)$$

여기서, $D = \frac{e\eta}{h\nu_c}$ 로 e 는 전자의 전하량, η 는 광검출소자의 양자화효율, h 는 플랑크상수, ν_c 는 광원의 주파수이고 G 는 전류이득이다. 또한 광수신기의 부하저항이 R_L 일 때 평균 신호전력은 다음 식과 같다.

$$S = I_p^2 R_L = (D \overline{P_r} G)^2 R_L \quad (11)$$

광대역 통과필터와 공간필터를 통과한 후 배경잡음은 제거되고 수신기를 저온상태로 유지하면 열잡음을 무시할 정도로 줄일 수 있다. 따라서 잡음전력은 산란잡음

과 대기채널에 의한 신호의 분산전력향으로써 다음 식과 같이 표현된다^[4].

$$N_{shot} = 2eG^2\overline{DP_r} B_c \quad (12)$$

여기서, B_c 는 신호의 대역폭이다.

대기채널에 의한 잡음전력

$$: N_{at} = G^2D^2 var(P_r)R_L \quad (13)$$

식(9)와 식(11), 식(12), 식(13)으로부터 직접 광수신 방식의 신호 대 잡음비는 다음식과 같다^[4].

$$SNR = \frac{(D\overline{P_r}G)^2 R_L}{2eG^2D\overline{P_r}B_c + G^2D^2 var(P_r)R_L} \quad (14)$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{2h\nu_c B_c}{\eta P_r}\right) + \Delta P_r}$$

직접 광수신방식에서는 광수신기의 직경이 대기 위상 가간섭길이에 비해 클수록 신호 대 잡음비가 개선됨을 알 수 있으며 이를 개구평균효과(aperture averaging effect)라 한다^[4].

위성의 송신단에서 신호를 ASK변조하고 지구국의 수신단에서 신호를 포락선복조하였을 때 비트오류율은 다음 식과 같다^[17].

$$BER = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{SNR}{4}\right) \quad (15)$$

3-2. 광헤테로다인 수신방식

일반적으로 광수신방식은 광신호를 직접 수신하는 직접 수신방식과 들어오는 광신호를 먼저 강한 국부발진기(Local Oscillator: LO)의 신호와 결합하여 중간주파수(IF)의 차신호를 발생하는 광헤테로다인 수신방식이 있다. 광헤테로다인 수신방식은 직접 수신방식보다 복잡하고, 입력신호와 국부발진기 신호의 파두가 정확히 일치되어야 하는 단점이 있으나 중간주파수 신호의 증폭이 상대적으로 용이하고, 국부발진기를 제외한 모든 다른 원인에 의해 발생하는 열잡음과 비가간섭적인 배경잡음을 제거해 주므로 강한 배경간섭이 존재하는 곳에서 매우 효율적이다.

본 논문에서는 이와 같은 장점 때문에 광헤테로다인 수신방식을 사용하였으며 광헤테로다인 수신기의 구조는 그림 5와 같다.

그림 5의 광헤테로다인 수신기의 출력에서의 신호 대 잡음비(β)는 다음식과 같다^{[8][18]}.

$$\beta = \eta_{het} \cdot \left(\frac{\eta P_s T_s}{h\nu}\right) \quad (16)$$

여기서, η_{het} 은 수신기의 헤테로다인 효율로서, 공간 모드 정합시는 η_{het} 은 1이고, 공간모드 부정합시는 $\eta_{het} < 1$ 이다.

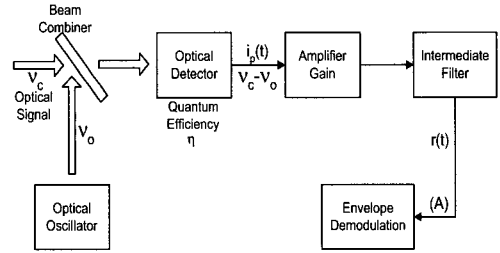


그림 5. 광헤테로다인 수신기 수신기의 일반적인 구조
Fig. 5. Generalized schematic of an optical heterodyne receiver.

가우시안 채널의 경우, 수신된 신호가 2진 FSK 변조된 신호일 때 인코히어런트 복조시 비트오류율(BER)은 다음과 같다^[8].

$$FSK : BER = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\beta}{2}\right) \quad (17)$$

IV. 광위성통신 링크 모델링

정지궤도 위성과 지구국간 광통신 링크는 상향링크(up link)와 하향링크(down link)로 나뉘어 진다. 광위성 통신에서는 채널에 영향을 미치는 대기현상이 상향링크에서는 빔편향, 이미지 표동 등이고 하향링크에서는 빔 퍼짐, 빔 강도변화(beam scintillation), 공간가간섭 저하(spatial coherence degradation)등으로 다르게 나타나기 때문에 상향링크와 하향링크를 동일채널로 간주할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 상향링크와 하향링크를 각각 다르게 모델링하였다.

4-1. 상향링크 모델링

맑은 날의 교란대기채널과 비, 눈, 안개, 헤이즈 등의 산란대기채널을 포함하는 다양한 기상상태에서의 정지궤

도위성과 지구국간 광통신링크 해석을 위한 링크방정식은 다음식과 같다.

$$P_{R(dB)} = 10 \log(P_T) + T_T + G_T + P_E - L_{space} - L_{scat} + G_R + G_c + T_R - M \quad (18)$$

여기서, $P_{R(dB)}$ 은 수신전력 (dBW), P_T 는 레이저의 출력 (W), T_T 는 송신시스템의 안테나 부주사(feed) 효율 (dB), G_T 는 송신안테나 이득 (dB), P_E 는 대기교란에 의한 포인팅손실(Pointing loss) (dB), L_{space} 는 대기흡수를 고려한 공간전파손실 (dB), L_{scat} 는 대기의 산란손실 (dB), G_R 는 수신안테나 이득(dB), G_c 는 부호이득 (dB), T_R 는 수신시스템의 안테나 부주사(feed) 효율 (dB), M 는 이득여유(dB)이다.

본 논문에서 제시한 (18)식을 이용한 정지궤도위성과 지구국간 광통신링크 해석모델을 한모델(Han's model)이라 명명하고, 이 모델을 이용하여 상향링크와 하향링크를 모델링하였다. 상향링크 광위성통신시, 광신호는 대기에 의한 흡수, 교란, 산란을 겪게 된다. 광신호는 맑은 대기상태에서는 교란의 영향을 크게 받으며 눈, 비, 안개, 헤이즈, 구름 등의 흐린 날씨에서는 산란의 영향을 크게 받는다. 따라서 본 절에서는 광위성통신 상향링크를 교란대기와 산란대기로 나누어 모델링 하였다. 식 (18)에서 산란손실(Lscat)과 포인팅 손실(PE)을 제외하 나머지 인자는 대기상태와 무관한 항으로서 항상 일정한 식으로 주어진다. 그러나 포인팅 손실(PE)은 교란, 산란의 대기상태에 따라 다른 값을 취하며, 산란손실(Lscat)은 산란대기에서만 존재하는 항으로 비, 눈, 안개, 헤이즈, 구름 등의 날씨상태에 따라 각각 다르게 나타난다. 따라서 광위성통신 상향링크를 교란대기와 산란대기로 나누어 모델링 할 때에는 포인팅 손실과 산란손실을 각각의 대기상태에 맞게 모델링하여야 한다.

광위성통신 상향링크에서 지구국 송신안테나와 위성의 수신안테나는 광카세그레인 안테나를 사용하는 것으로 가정한다. 따라서 링크방정식에서 지구국 송신안테나 이득(G_T)과 위성의 수신안테나 이득(G_R)은 다음식으로 주어진다^[1].

$$G_T = 10 \log \left[\frac{4\pi A_T}{\lambda^2} \times g_T(\alpha, 0, \gamma, 0) \right] \quad (19)$$

여기서, λ 는 광원의 파장, A_T 는 송신안테나의 면적, α (truncation ratio) = 1차 렌즈의 반경/빔폭 (a/w),

γ (abscuration ratio) = $\frac{b(2차 렌즈의반경)}{a(1차 렌즈의반경)}$ 이다.

$g_T(\alpha, 0, \gamma, 0)$ 는 광카세그레인 송신안테나의 전 송효율 인자로서 다음식으로 주어진다^[1-9].

$$g_T(\alpha, 0, \gamma, 0) = \frac{2[\exp(-\alpha^2) - \exp(-\gamma^2 \alpha^2)]^2}{\alpha^2} \quad (20)$$

α 와 γ 와의 관계는 2차 요동이론(second order perturbation theory)에 의해 주어진 γ 의 값에 대한 최적의 α 값을 구할 수 있으며 다음과 같이 나타낸다^[1,9].

$$\alpha \approx 1.12 - 1.30\gamma^2 + 2.12\gamma^4 \quad (21)$$

$$G_R = 10 \log \left[\frac{4\pi A_R}{\lambda^2} \times (1 - \gamma^2) \right] \quad (22)$$

여기서, A_R 은 수신안테나 면적이고 $(1 - \gamma^2)$ 은 카세그레인 안테나의 2차 거울에 의한 수신 광신호의 감소를 나타낸다.

안테나 이론에 따르면, 자유공간의 전송손실(Lfree)은 다음 식과 같다^{[10][11]}.

$$L_{free} = 10 \log \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right)^2 \quad (23)$$

여기서, l 는 정지궤도 위성과 지구국간의 거리, λ 는 광원의 파장이다. 여기서 정지궤도 위성과 지구국간의 거리는 양각에 따라 달라지며 다음 식과 같이 주어진다^[12].

$$l [km] = 35786 \cdot \sqrt{1 + 0.4199 \cdot (1 - \cos \beta)} \quad (24)$$

$$\beta = 90^\circ - i - \sin^{-1} \left[\frac{\cos i}{6.6235} \right]$$

여기서, i 는 양각 이다.

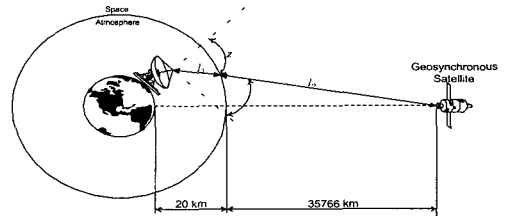


그림 6. 정지궤도 위성과 지구국간의 거리
Fig. 6. The distance between geo-stationary satellite and earth station.

식(24)에서 양각(i)이란 지구국에서 위성을 올려다 본 각도로서 지구국과 정지궤도 위성이 위치한 곳의 경도와 위도에 관련되며 다음 식으로 주어진다^[11].

$$i = \tan^{-1} \left[\frac{\cos(G) \cdot \cos(L) - 0.1512}{\sqrt{1 - \cos(2G) \cdot \cos(2L)}} \right] \quad (25)$$

여기서, $G = S - N$ 이고 S 는 위성의 경도, L 은 지구국의 위도, N 은 지구국의 경도이다. 또한 그림 6에서 보듯이 지구국과 정지궤도 위성간 거리는 대기권 통과거리 l_1 과 우주 공간에서의 거리 l_2 로 나눌 수 있으며 양각이 10° 이상인 지역에서는 다음의 근사식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} l_1 &\approx 20 \cdot \sec(90^\circ - i) \text{ [km]} \\ l_2 &\approx 1 - l_1 \text{ [km]} \end{aligned} \quad (26)$$

그림 1로부터 광원의 파장이 $0.84[\mu\text{m}]$ 와 $1.55[\mu\text{m}]$ 에서 흡수로 인한 대기의 전송도는 약 0.6이다. 따라서 대기의 전송도를 고려하면 대기권에서의 공간전파손실은 식(23)으로부터 $(10/6) \times L_{\text{free}}$ 로 변형되어야 하며 이것이 만족되기 위해서는 l_1 이 $\sqrt{10/6} \times l_1$ 으로 변형되어야 한다. 따라서 대기흡수를 고려한 공간전파손실은 다음 식과 같다^[13].

$$L_{\text{space}}(i) = 10 \log \left[\frac{4i}{\lambda} \left(\sqrt{\frac{10}{6}} l_1 + l_2 \right)^2 \right] \quad (27)$$

광통신 시스템에서 동기를 맞추거나 데이터를 전송하기 전에, 먼저 전송된 빔은 수신기에 정확하게 도달해야 한다. 그러기 위해서는 송신기는 적절하게 수신기를 향하여야 하며, 이를 포인팅(pointing)이라 한다^[14].

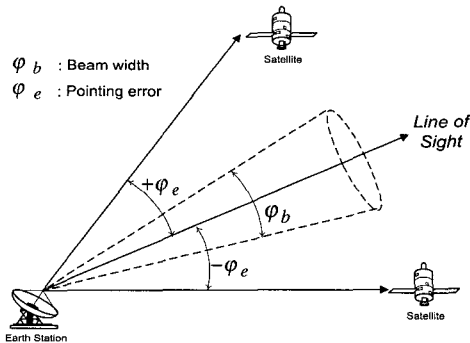


그림 7. 전송 시스템에서 빔 폭과 포인팅 에러
Fig. 7. Beamwidths and pointing errors in transmitting systems.

그림 7에서 위성의 수신안테나는 지구로부터 전송된 빔폭 내에 포함되어야 하며, 포인팅 에러(φ_e) 발생시 송신안테나는 포인팅 에러를 보상하기 위해 빔 폭을 $\pm \varphi_e$ 로 증가해야만 하기 때문에 위성의 수신기는 수신 전력의 감소를 갖는다. 이러한 포인팅 에러의 보상을 위한 수신전력의 감소를 포인팅 손실이라 하며 다음과 같이 나타낸다^[14].

$$\begin{aligned} P_E &= 10 \log \left(\frac{P_r}{P_{rb}} \right) \\ &= 10 \log \left(\frac{\varphi_b}{\varphi_b + 2\varphi_e} \right)^2 \end{aligned} \quad (28)$$

여기서, P_r 은 포인팅 에러가 발생하였을 때의 수신전력, P_{rb} 는 포인팅 에러가 없을 때의 수신전력, φ_e 는 포인팅 에러, φ_b 는 송신되는 광신호의 빔폭이다.

이러한 포인팅 손실은 광위성통신 상향링크에서와 같이 빔이 충분히 퍼지기 이전에 빔 폭보다 큰 비균질 공기군인 대기를 통과하는 경우에 특히 심각하다. 광원으로부터 나오는 빔이 가우시안(Gaussian)이라고 가정하면 식(28)의 빔폭(φ_b)은 송신안테나의 직경과 다음과 같은 관계를 가지고 있다^[15].

$$\varphi_b = 1.27 \times (\lambda/D) \text{ [rad]} \quad (29)$$

여기서, D 는 송신안테나의 직경이다. 또한 광위성통신 상향링크에서 대기에 의한 포인팅 에러는 양각에 따라 변하는 대기의 위상 가간섭 길이(r_i)에 의존하며, 시간에 따라 랜덤하게 변하는 순시치이므로 이를 실효치(rms)로 표시하면 다음 식과 같다^[15,16].

$$\varphi_e(i) = \frac{\lambda}{2\sqrt{2}r_i} \text{ [rad]} \quad (30)$$

상향링크의 경우 대기에 의한 포인팅에러는 전형적으로 $\pm 1 \sim \pm 15[\mu\text{rad}]$ 의 값을 갖으며 극심한 경우 $50[\mu\text{rad}]$ 정도의 값을 갖는다.

4-1-1. 교란대기에서의 상향링크 모델링

가시도 $25[\text{km}]$ 이상인 전형적인 맑은 날씨로 표현되는 교란대기에서는 산란손실이 존재하지 않으며 교란에 의한 포인팅손실이 식(28)처럼 주어진다. 이때 포인팅손

실을 결정하는 포인팅에러는 식(30)으로부터 교란에 의한 위상가간섭 길이(r_i)에 의존하며 광위성통신 상향링크에서 교란에 의한 대기의 위상 가간섭 길이는 다음 식으로 주어진다^[3].

$$r_i = \left[0.423 (\sec^2(90^\circ - i)) \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \times \int_0^{20km} C_n^2(h) dh \right]^{-\frac{3}{5}} \quad (31)$$

4-1-2 산란대기에서의 상향링크 모델링

산란대기에서는 비, 눈, 안개, 헤이즈 등의 산란입자에 의한 산란손실(L_{scat})이 발생하며 대수적으로 표현하면 다음식과 같다.

$$L_{scat} = \sigma_{scat}[dB/km] \cdot h_s \sec(90^\circ - i) + \sigma_{cloud}[dB] \quad (32)$$

여기서, $\sigma_{scat}[dB/km]$ 는 비, 눈, 안개, 헤이즈 등에 의한 산란 감쇠계수의 대수적 표현 [dB/km]이고 $\sigma_{cloud}[dB]$ 는 구름에 의한 산란감쇠의 대수적 표현 [dB]이다.

산란대기에서 교란에 의한 위상가간섭 길이와 산란손실은 비, 눈, 안개, 헤이즈, 구름 등의 날씨상태에 따라 각각 다르게 나타나므로 날씨상태별로 나누어 분석하여야 한다.

(1) 구름긴 흐린 날씨

비나 눈이 오지 않으면서 구름만 긴 날씨의 교란에 의한 위상가간섭 길이는 식(31)과 같으며 구름에 의한 산란손실은 식(32)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_{scat} = \sigma_{cloud}[dB] = 4.4 \times \frac{1}{l_e} \sec(90^\circ - i) \quad (33)$$

여기서, 1은 구름의 평균두께이고, l_e 는 차광길이이다.

(2) 안개와 헤이즈

안개와 헤이즈는 구름이 없는 날씨에 지표면으로부터 100[m] 이내에 발생한다[10]. 따라서 안개와 헤이즈 상태의 상향링크에서는 지표면으로부터 100[m] 높이까지에서는 산란손실이 존재하고 100[m]에서 20[km]까지에서는 교란에 의한 포인팅에러가 발생하며 이때 교란에 의한 위

상가간섭 길이는 식(31)로부터 다음 식으로 주어진다.

$$r_i = \left[0.423 (\sec^2(90^\circ - i)) \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \times \int_{0.1km}^{20km} C_n^2(h) dh \right]^{-\frac{3}{5}} \quad (34)$$

또한 산란손실은 식(32)로부터 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$L_{scat} = 0.1 \cdot \sigma_{f\&h}[dB/km] \cdot \sec(90^\circ - i) \quad (35)$$

여기서, $\sigma_{f\&h}[dB/km]$ 는 안개와 헤이즈에 의한 산란감쇠 계수의 대수적 표현 [dB/km]이다.

(3) 비와 눈

비와 눈은 비구름이 존재해야만 내릴 수 있으며 비구름은 지속적인 비를 내리게 하는 난층운과 번개를 동반한 소나기와 우박 등을 내리게 하는 적란운으로 나뉜다. 비나 눈이 내리는 날씨의 상향링크에서는 지표면으로부터 약2[km] 높이까지에서는 산란손실이 존재하고 2[km]에서 20[km]까지에서는 교란에 의한 포인팅에러가 발생하며 이때 교란에 의한 위상가간섭 길이는 식(31)로부터 다음 식으로 주어진다.

$$r_i = \left[0.423 (\sec^2(90^\circ - i)) \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \times \int_{2km}^{20km} C_n^2(h) dh \right]^{-\frac{3}{5}} \quad (36)$$

또한 이들 구름에 의해 내리는 비에 의한 산란손실은 식(32)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$L_{scat} = \sigma_{r}[dB/km] \cdot h_s \sec(90^\circ - i) + \sigma_{cloud}[dB] \quad (37)$$

여기서, $\sigma_{r}[dB/km]$ 는 비에 의한 산란감쇠 계수의 대수적 표현 [dB/km]이다.

지상의 기온이 영하로 떨어지게 되면 난층운과 적란운에 의해 눈이 내리게 된다. 이때 내리는 눈에 의한 산란손실은 식(32)로부터 다음식과 같이 구할 수 있다.

$$L_{scat} = \sigma_{s}[dB/km] \cdot h_s \sec(90^\circ - i) + \sigma_{cloud}[dB] \quad (38)$$

여기서, $\sigma_{s}[dB/km]$ 는 눈에 의한 산란감쇠 계수의 대수적 표현 [dB/km]이다.

위 식들에서 난층운과 적란운이 존재하는 높이(h_b)와 이들에 의한 산란손실이 다르기 때문에 난층운에 의한 눈, 비와 적란운에 의한 눈, 비로 나누어 해석해 보아야 한다. 이처럼 각각의 날씨상태에서 발생하는 포인팅 손실과 산란손실을 식(18)에 대입하면 상향링크에서 날씨에 따른 위성의 수신전력을 구할 수 있다.

상향링크에서는 대기에 의해 위상왜곡을 겪은 빔이 장거리 전송후 넓게 퍼지게 되고 위성의 수신안테나는 왜곡을 겪은 광파의 위상면에 비해 아주 작기 때문에 수신된 빔은 평면파로 간주하여 위성의 광테로다인 수신기의 신호 대 잡음비(β)는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다^[16].

$$\beta = \frac{\eta P_R T_b}{h\nu} \quad (39)$$

여기서, η 는 광수신 소자의 양자효율, T_b 는 2진 신호의 전송주기, P_R 는 수신전력, ν 는 광원의 주파수, h 는 플랑크 상수이다.

본 논문에서는 상향링크의 변조방식으로 교란에 강한 2진 FSK방식을 선택하였으며 2진 FSK 변조한 신호에 대한 비트오류확률(P_e)은 (17)식과 같다^[8,16]. 위성의 수신전력(P_R)은 양각과 날씨에 따라 변하는 값이다. 따라서 양각과 날씨의 변화에 상관없이 위성이 항상 일정한 비트 오류확률을 유지하기 위해서는 양각과 날씨에 따라 지구국 송신단에서 보내는 신호의 전송률(data rate)을 변화시켜 주어야 하며 식(17)과 식(38)로부터 다음식과 같이 구해진다.

$$R_b(i, w) = \frac{1}{T_b(i, w)} = \frac{-\eta P_R(i, w)}{2h\nu \log_e(2P_e)} \quad (40)$$

여기서, $R_b(i, w)$ 는 양각과 날씨변화에 따른 신호의 전송속도[bits/sec], i 는 양각, w 는 날씨상태이다.

4-2. 하향링크 모델링

하향링크 모델링시 링크의 성능을 평가하는 링크방정식은 상향링크와 마찬가지로 식(18)처럼 주어진다. 이 중에서 송신안테나 이득(G_T), 대기흡수를 고려한 공간전파 손실(Lspace), 대기산란 손실(Lsat), 송/수신안테나 부주사효율(T_T, T_R), 시스템 이득여유(M)등은

상향링크와 동일하다. 그러나, 하향링크에서는 상향링크와 반대로 광신호의 빔이 정지궤도 위성에서 지구국으로 송신될 때 이미 우주공간에서 상당히 큰 폭으로 퍼진 후 대기권에 진입하므로 대기에 의한 포인팅에러는 크게 문제가 되지 않는다. 하지만 상당히 큰 폭으로 퍼진 빔은 상대적으로 작은 대기의 비균질 공기군에 의해 동일 위상면이 파괴되어 대기의 위상가간섭 길이만큼 파두면이 분할되어 지구국 수신안테나에 입사된다. 이때 지구국의 수신단에서 직접 광수신방식에 의해 수신된 신호의 신호 대 잡음비는 다음식과 같다.

$$SNR = \frac{1}{\left(\frac{2h\nu\epsilon}{\eta T_b P_R}\right) + \Delta P_R} \quad (41)$$

여기서 ΔP_R 은 정규화 신호전력의 분산으로서 식(9)에 주어져 있으며 수신안테나 직경 a 와 교란과 산란대기에 의한 위상가간섭 길이 r_o 에 의존하는 값으로 교란대기에 의한 위상가간섭 길이는 식(31)처럼 주어지며 산란대기에 의한 위상가간섭 길이는 다음 식으로 주어진다^[4].

$$r_i = \frac{\lambda}{\sqrt{\theta^2} \cdot \sqrt{\sigma_{scat} \cdot z}} \quad [m] \quad (42)$$

여기서, z 는 전송거리[km], σ_{scat} 는 산란 감쇠 계수 [km^{-1}], $\sqrt{\theta^2}$ 는 매질의 전방 산란각의 실효치 [rad], λ 는 광원의 파장 [μm]이다.

산란매질의 전방산란각의 실효치는 0.4 ~ 1 [rad]의 전형적인 값을 갖는다. 본 논문에서는 최악의 조건에 맞추어 설계하는 것으로 가정하며 따라서 전방산란각의 실효치를 1 [rad]으로 한다. 식(42)에 이러한 조건을 대입하면 광위성통신 하향링크에서 산란대기에 의한 위상가간섭 길이를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$r_i[m] = \frac{\lambda}{\sqrt{\sigma_{scat} \cdot h_s \sec(90^\circ - i) + l \sec(90^\circ - i)/l_e}} \quad (43)$$

여기서, h_s 는 비, 눈, 안개, 해이즈 등의 기상현상이 나타나는 대기의 높이[km], l_e 는 구름에 의한 산란감쇠 계수의 역수인 차광길이[m], l 는 구름의 평균두께[m]이다.

산란대기에 의한 위상가간섭 길이는 비, 눈, 안개, 해이즈, 구름 등의 날씨상태에 따라 각각 다르게 나타나며 식(43)로부터 아래의 식들로 구해진다.

구름에 의한 위상가산섭 길이

$$r_i = \frac{\lambda}{\sqrt{l \sec(90^\circ - i) / l_e}} \quad [m] \quad (44)$$

안개와 헤이즈에 의한 위상가산섭 길이

$$r_i = \frac{\lambda}{\sqrt{0.1 \cdot \sigma_{f\&h} \sec(90^\circ - i)}} \quad [m] \quad (45)$$

여기서, $\sigma_{f\&h}$ 는 안개와 헤이즈에 의한 산란 감쇠계수 [km^{-1}]이다.

비에 의한 위상가산섭 길이

$$r_i = \frac{\lambda}{\sqrt{\sigma_r \cdot h_s \sec(90^\circ - i) + l \sec(90^\circ - i) / l_e}} \quad [m] \quad (46)$$

여기서, σ_r 는 비에 의한 산란감쇠 계수 [km^{-1}]이다.

눈에 의한 위상가산섭 길이

$$r_i = \frac{\lambda}{\sqrt{\sigma_s \cdot h_s \sec(90^\circ - i) + l \sec(90^\circ - i) / l_e}} \quad [m] \quad (47)$$

여기서, σ_s 는 눈에 의한 산란 감쇠 계수 [km^{-1}]이다.

본 논문에서는 하향링크의 변조방식으로 직접 광수신방식에 적합한 2진 ASK방식을 선택하였으며 2진 ASK 변조한 신호에 대한 비트오류확률은 (15)식과 같다. 지구국의 수신전력은 양각과 날씨에 따라 변하는 값이다. 따라서 양각과 날씨의 변화에 상관없이 지구국이 항상 일정한 비트오류확률을 유지하기 위해서는 양각과 날씨에 따라 위성의 송신단에서 보내는 신호의 전송률(data rate)을 변화시켜 주어야하며 식(15)와 식(41)로부터 다음식과 같이 구해진다.

$$R_b(i, w) = \frac{1}{T_b(i, w)} = \frac{\eta P_R(i, w)}{2h\nu_c} \left(\frac{1}{4 \log_e(2P_e) + \Delta P_R} \right) \quad (48)$$

여기서, $R_b(i, w)$ 는 양각과 날씨변화에 따른 신호의 전송속도 [bits/sec]이다.

V. 수치해석 및 결과고찰

5-1. 상향링크에서의 전송속도 해석

본 절에서는 광위성통신 상향링크에서 10^{-7} 의 비트오류율을 만족시키기 위해 필요한 지구국의 정보 전송속도를 대기상태에 따른 양각의 함수로써 해석한다. 지구국 송신단의 광원은 출력 1watt의 InGaAsP 반도체 레이저이고, 지구국과 위성의 송·수신안테나의 부주사효율은 -3[dB]이다. 또한 광통신 채널에서 발생하는 연접 및 랜덤오류를 정정하기 위해 송신단에서는 인터리버(interleaver)를 갖는 길쌈부호기(convolutional encoder)를 사용하는 것으로, 수신단에서는 디인터리버(deinterleaver)를 갖는 비터비복호기(Viterbi decoder)를 사용하며 이들에 의한 부호화이득은 5[dB]로 가정한다^[13]. 그리고 광위성통신 시스템의 구조적 손실, 위성에 의한 자체손실, 지구국 통신시스템의 손실 등을 고려하여 시스템 마진을 두었으며 이 값은 3[dB]의 전형적인 값으로 가정하였다.

표 2. 광위성통신 상향링크 설계조건

Table 2. The design parameters on the up-link of optical satellite communication.

설계 항목	설계 조건
광원의 출력(PT)	1[w]
광원의 주파수 및 파장(ν & λ)	193.54[THz] & 1.55[μm]
송·수신 안테나 부주사 효율 (TT,TR)	0.5 (-3dB)
송신 안테나 직경	5[m]
수신 안테나 직경	1[m]
송·수신 안테나 차단비율(γ)	0.2
광 수신소자의 종류 및 양자화 효율(η)	APD(avalanche photodiodes) . 0.9
부호화 이득(Gc)	5[dB]
시스템 마진(M)	3[dB]
수신 시스템의 임계 비트오류율(BER)	10^{-7}

표3 계속

전송속도		100	10	1
대기상태		[Gbps]급	[Gbps]급	[Gbps]급
적란운에의한비	강우량(10mm/hr)	×	90° ~58°	58° ~44°
	강우량(20)	×	90° ~68°	68° ~49°
	강우량(30)	×	90° ~82°	82° ~54°
	강우량(40)	×	×	90° ~59°
	강우량(50)	×	×	90° ~63°
난층운에의한비	적설량(3)	×	90° ~55°	55° ~42°
	적설량(5)	×	90° ~78°	78° ~53°
	적설량(8)	×	×	90° ~72°
	적설량(10)	×	×	×
	적설량(15)	×	×	×
적란운에의한비	적설량(3)	×	90° ~79°	79° ~53°
	적설량(5)	×	×	90° ~62°
	적설량(8)	×	×	90° ~76°
	적설량(10)	×	×	×
	적설량(15)	×	×	×

전송속도		100	10	1
대기상태		[Mbps]급	[Mbps]급	[Mbps]급
적란운에의한비	강우량(10mm/hr)	44° ~35°	35° ~30°	30° ~26°
	강우량(20)	49° ~40°	40° ~33°	33° ~29°
	강우량(30)	54° ~43°	43° ~36°	36° ~31°
	강우량(40)	59° ~46°	46° ~38°	38° ~33°
	강우량(50)	63° ~49°	49° ~41°	41° ~35°
난층운에의한비	적설량(3)	42° ~34°	34° ~29°	29° ~25°
	적설량(5)	53° ~42°	42° ~35°	35° ~31°
	적설량(8)	72° ~54°	54° ~44°	44° ~38°
	적설량(10)	90° ~62°	62° ~50°	50° ~42°
	적설량(15)	×	90° ~64°	64° ~52°
적란운에의한비	적설량(3)	53° ~43°	43° ~36°	36° ~31°
	적설량(5)	62° ~48°	48° ~40°	40° ~34°
	적설량(8)	76° ~55°	55° ~45°	45° ~39°
	적설량(10)	90° ~60°	60° ~49°	49° ~41°
	적설량(15)	90° ~74°	74° ~56°	56° ~47°

(참조) × : 전송 불가능. - : 해당사항 없음

5-2. 하향링크에서의 전송속도 해석

본 절에서는 광위성통신 하향링크에서 10^{-7} 의 비트오류율을 만족시키기 위해 필요한 위성의 전송속도를 대기 상태에 따른 양각의 함수로서 해석한다. 하향링크의 성능을 평가하는 링크방정식은 상향링크와 마찬가지로 식(18)처럼 주어진다. 이중 레이저의 출력(P_T), 송신안테나 이득(G_T), 수신안테나 이득(G_R), 대기흡수를 고려한 공간전파손실(Lspace), 대기 산란손실(Lscat), 송/수신안테나 부주사 효율(T_T, T_R), 채널 코딩에 의한 부호화 이득(G_c), 시스템 마진(M)등은 상향링크와 동일하다. 그러나 하향링크에서는 레이저의 파장, 송/수신안테나의 크기, 포인팅 에러 등이 상향링크와 다르다. 우선 레이저의 파장은 상향링크로부터 오는 광신호와의 간섭을 피하기 위해 0.84[μ m]를 선택하였으며 이때 상향링크와 하향링크 광원간의 주파수 차이는 약 164[THz] 정도로 주파수대역에서 신호의 간섭을 피하기에 충분한 값이다. 또한 이 파장은 그림 1에서 보듯이 흡수의 영향을 줄일 수 있다. 위성의 크기 및 가격을 줄이기 위해서는 위성의 사용전력을 줄여야 하며 이러한 이유로 인해 위성의 안테나는 작을수록 좋다. 따라서 하향링크에서 위성의 송신안테나는 차단비율이 0.2인 직경 1[m]의 광카세그레인 안테나를, 지구국의 수신안테나는 직경 5[m]의 광카세그레인 안테나를 사용하는 것으로 가정하였다. 상향링크에서 대기에 의한 포인팅에러는 $\pm 1 \sim \pm 15[\mu rad]$ 정도로 매우 큰 반면 하향링크에서는 무시할 정도로 작다. 따라서 본 논문에서는 하향링크에서 대기에 의한 포인팅 에러를 0.1[μrad]으로 설정하였다. 광위성통신 하향링크에서 위성의 정보 전송속도를 결정하기 위해서 본 논문에서 설정한 설계조건들을 정리하면 표 4와 같다.

표 4의 설계조건과 식(48)로부터 광위성통신 하향링크에서 양각과 대기상태에 따른 정지궤도위성 송신시스템의 전송속도(R_b)는 다음식으로 얻어진다.

$$R_b(i, w) = 1.9 \times 10^{12} \times P_R(i, w) \times (0.0162 - \Delta P_R) \text{ [Mbps]} \quad (49)$$

하향링크에서 지구국의 수신전력(P_R)을 결정하기 위해 식(18)에 표 4의 설계조건을 대입한다.

표 4. 광위성통신 하향링크 설계조건
Table 4. The design parameters on the down-link of optical satellite communication.

설계 항목	설계 조건
광원의 종류 및 출력(PT)	AlGaAs 반도체레이저, 1[w]
광원의 주파수 및 파장(ν & λ)	357[THz] & 0.84[μ m]
송/수신 안테나의 부주사효율(TT,TR)	-3dB
송신안테나 직경	1[m]
수신안테나 직경	5[m]
송신안테나의 차단비율(γ)	0.2
수광소자의 종류 및 양자화효율(η)	APD & 0.9
대기의 포인팅 에러(φ_e)	0.1[μ rad]
부호화 이득(Gc)	5[dB]
시스템 마진(M)	3[dB]
수신 시스템의 임계 비트오류율 (BER)	10^{-7}

하향링크에서 직접 광수신방식에 의해 위성으로부터 오는 광신호를 수신시 신호의 공간가간섭 저하에 의해 수광전력의 섭동이 발생하고 이렇게 변화하는 광수신전력의 정규화 분산값(ΔP_R)은 잡음전력으로 작용하여 지구국 수신시스템의 신호 대 잡음비 및 위성의 정보전송율에 영향을 미친다. 또한 광수신전력의 정규화 분산값과 대기 산란손실은 대기상태에 따라 변화하는 값이기 때문에 광위성통신 하향링크에서 위성의 정보 전송속도는 대기상태별로 나누어 해석해 보아야한다. 하향링크에서도 상향링크와 마찬가지로 대기상태를 전형적인 맑은 날씨, 구름낀 흐린 날씨, 안개와 헤이즈, 비, 눈 등으로 5등분하여 해석해 보았다.

(1) 맑은 날씨의 하향링크 전송속도

전형적인 맑은 날씨의 하향링크에서는 산란손실은 존재하지 않으며 신호의 공간가간섭 저하에 의한 광수신전력의 정규화 분산값(ΔP_R)이 잡음전력으로서 전송속도에 영향을 미친다. 맑은 날 ΔP_R 은 맑은 날 대기의 위상가간섭 길이를 나타낸 식(31)와 지구국의 안테나 직

경 5[m]를 식(9)에 대입하여 구한다. 표 4의 설계조건과 식(19)의 송신안테나 이득, 식(22)의 수신안테나 이득, 식(27)의 공간전파손실, 하향링크 포인팅손실을 식(18)에 대입하여 지구국의 수신전력 P_R 을 구한 후 광수신전력의 정규화 분산 ΔP_R 과 함께 식(49)에 대입하면 전형적인 맑은 날 위성에서 광신호를 ASK변조하여 전송하고 지구국에서 직접 광수신방식에 의해 수신하였을 때 비트오류율(BER) 10^{-7} 이하를 만족시키는 위성의 정보 전송속도를 양각의 함수로써 구할 수 있으며 이 결과는 그림 8에 나타나 있다. 맑은 날씨의 하향링크는 대기교란효과의 차이 때문에 낮과 밤으로 나누어 생각할 수 있다.

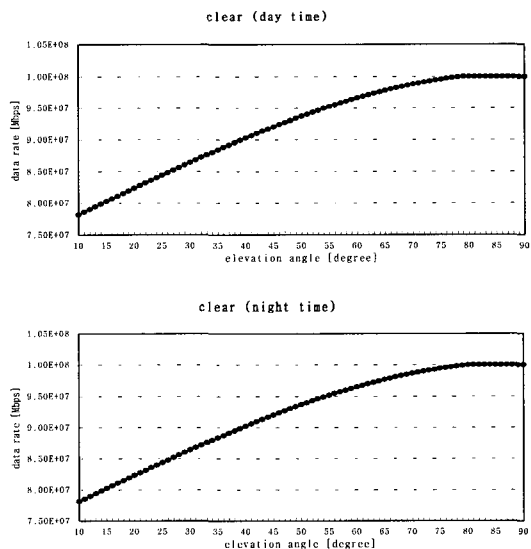


그림 8. 맑은날씨 하향링크에서 지구국의 양각에 따른 정보전송속도

Fig. 8. Data rate of earth station vs. elevation angles on the down-link in clear atmospheric condition.

(2) 구름낀 흐린 날씨의 하향링크 전송속도

하향링크에서 구름낀 흐린 날씨에는 구름에 의한 산란손실과 신호의 공간가간섭 저하에 의한 광수신전력의 정규화 분산값(ΔP_R)이 잡음전력으로서 전송속도에 영향을 미친다. 구름낀 날 대기의 위상가간섭 길이를 나타낸 식(44)와 지구국의 안테나직경 5[m]를 식(9)에 대입하여 구름낀 날의 ΔP_R 을 구한다. 표 4의 설계조건과 식(19)의 송신안테

나 이득, 식(22)의 수신안테나 이득, 식(27)의 공간전파손실, 하향링크 포인팅손실, 식(50)의 구름에 의한 산란손실을 식(18)에 대입하여 지구국의 수신전력 P_R 을 구한 후 광수신전력의 정규화 분산 ΔP_R 과 함께 식(51)에 대입하면 구름 낀 흐린 날 하향링크에서 비트오류율(BER) 10^{-7} 이하를 만족시키는 위성의 정보 전송속도를 양각의 함수로써 구할 수 있으며 이 결과는 그림 9에 나타나 있다.

(3) 안개와 헤이즈에서의 하향링크 전송속도

안개나 헤이즈가 낀 날씨의 하향링크에서는 이들에 의해 산란손실과 신호의 공간가간섭 저하가 발생한다. 안개와 헤이즈에 의한 산란손실은 상향링크와 같은 방법으로 계산한다. 안개와 헤이즈 낀 날 하향링크에서는 신호의 공간가간섭 저하에 의한 광수신전력의 정규화 분산값 (ΔP_R)이 잡음전력으로서 전송속도에 영향을 미친다. 안개와 헤이즈상태에서의 대기의 위상가간섭 길이를 나타낸 식(45)과 지구국의 안테나 직경 5[m]를 식(9)에 대입하여 안개와 헤이즈상태에서의 ΔP_R 을 구한다.

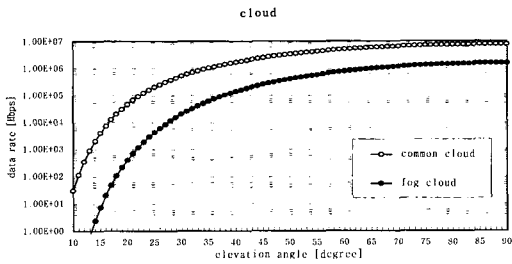


그림 9. 구름 낀 흐린날씨의 하향링크에서 지구국의 양각에 따른 정보전송속도

Fig. 9. Data rate of earth station vs. elevation angles on the down-link in cloudy atmospheric condition.

표 4의 설계조건과 식(19)의 송신안테나 이득, 식(22)의 수신안테나 이득, 식(27)의 공간전파손실, 하향링크 포인팅손실, 안개와 헤이즈에 의한 산란손실을 식(18)에 대입하여 지구국의 수신전력 P_R 을 구한 후 광수신전력의 정규화 분산 ΔP_R 과 함께 식(51)에 대입하면 안개와 헤이즈 낀 날 하향링크에서 비트오류율(BER) 10^{-7} 이하를 만족시키는 위성의 정보 전송속도를 양각의 함수로써 구할 수 있으며 이 결과는 그림 10에 나타나 있다.

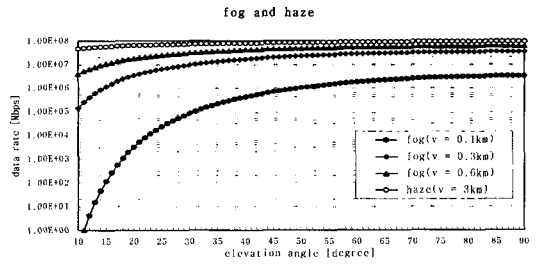


그림 10. 안개와 헤이즈 낀 날씨의 하향링크에서 지구국의 양각에 따른 정보전송속도

Fig. 10. Data rate of earth station vs. elevation angles on the down-link in foggy and hazy condition.

(4) 강우시 하향링크의 전송속도

강우시 하향링크에서는 비에 의한 산란손실과 신호의 공간가간섭 저하가 발생한다. 이 중 비에 의한 산란손실은 상향링크와 동일하다. 강우시 하향링크에서는 신호의 공간가간섭 저하에 의한 광수신전력의 정규화 분산값 (ΔP_R)이 잡음전력으로서 전송속도에 영향을 미친다. 강우시 대기의 위상가간섭 길이를 나타낸 식(46)과 지구국의 안테나 직경 5[m]를 식(9)에 대입하여 강우시의 ΔP_R 을 구한다. 표 4의 설계조건으로 부터 지구국의 수신전력 P_R 을 구한 후 광수신전력의 정규화 분산 ΔP_R 과 함께 식(51)에 대입하면 강우시 하향링크에서 비트오류율(BER) 10^{-7} 이하를 만족시키는 위성의 정보 전송속도를 구할 수 있으며 이 결과는 그림 11, 그림 12에 나타나 있다.

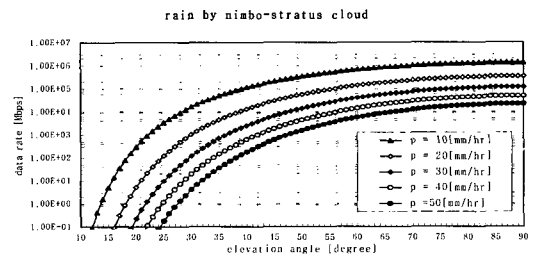


그림 11. 하향링크에서 난층운에 의한 강우시 지구국의 양각에 따른 정보전송속도

Fig. 11. Data rate of earth station vs. elevation angles on the down-link in case of rain by nimbo-stratus cloud.

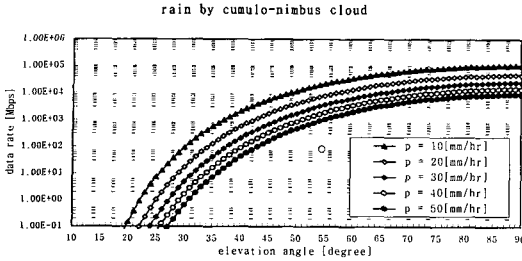


그림 12. 하향링크에서 적란운에 의한 강우시 지구국의 앙각에 따른 정보전송속도

Fig. 12. Data rate of earth station vs. elevation angles on the down-link in case of rain by cumulo-nimbus cloud.

그림 12, 그림 12로부터 강우시 하향링크에서의 전송속도는 강우의 종류, 강우량, 앙각에 의해 변화되며 앙각이 낮아지고, 강우량이 증가할수록 감소하며 적란운에 의한 강우가 전송속도를 제한함을 알 수 있다.

(5) 강설시 하향링크의 전송속도

강설시 하향링크에서는 눈에 의한 산란손실과 신호의 공간간섭 저하가 발생한다. 이중 눈에 의한 산란손실은 적설량만의 함수이기 때문에 상향링크와 동일하다. 강설시 하향링크에서는 신호의 공간간섭 저하에 의한 광수신전력의 정규화 분산값(ΔP_R)이 잡음전력으로서 전송속도에 영향을 미친다. 강설시 대기의 위상간섭 길이를 나타낸 식(47)과 지구국의 안테나 직경 5[m]를 식(9)에 대입하여 강설시의 ΔP_R 을 구한다. 표 4의 설계조건과 식(19)의 송신안테나 이득, 식(22)의 수신안테나 이득, 식(27)의 공간전파손실, 하향링크 포인팅손실, 눈에 의한 산란손실을 식(18)에 대입하여 지구국의 수신전력 P_R 을 구한 후 광수신전력의 정규화 분산 ΔP_R 과 함께 식(51)에 대입하면 강설시 하향링크에서 비트오류율(BER) 10^{-7} 이하를 만족시키는 위성의 정보 전송속도를 앙각의 함수로써 구할 수 있으며 이 결과는 그림 13, 그림 14에 나타나 있다.

그림 13, 그림 14로부터 광위성통신 하향링크에서의 전송속도는 강설에 의해 가장 심하게 제한됨을 알 수 있다. 또한 강설시의 전송속도는 적설량과 앙각에 의해 변화되며 앙각이 낮아지고, 적설량이 증가함에 따라 심하게 감소한다.

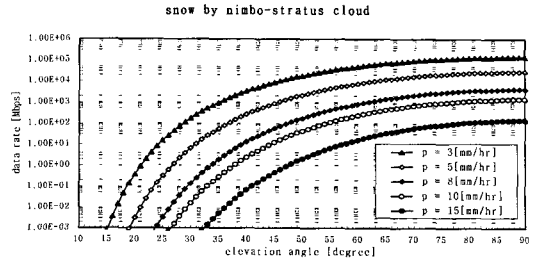


그림 13. 하향링크에서 난층운에 의한 강설시 지구국의 앙각에 따른 정보전송속도

Fig. 13. Data rate of earth station vs. elevation angles on the down-link in case of snow by nimbo-stratus cloud.

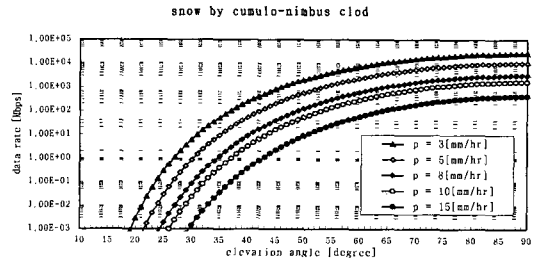


그림 14. 하향링크에서 적란운에 의한 강설시 지구국의 앙각에 따른 정보전송속도

Fig. 14. Data rate of earth station vs. elevation angles on the down-link in case of snow by cumulo-nimbus cloud.

(6) 하향링크에서 대기상태에 따른 전송속도 비교

본 절에서는 광위성통신 하향링크에서 맑은 대기, 구름낀 대기, 헤이즈, 안개, 비, 눈의 여섯가지 전형적인 대기상태에 따른 전송속도를 비교하여 표 5에 정리하였다.

5-3. 결과 고찰

본 절에서는 5-1절 상향링크와 5-2절 하향링크 수치해석으로부터 얻어진 결과에 대한 원인을 분석하였다. 맑은 날 상향링크에서는 낮시간이 밤시간보다 전송속도가 낮게 나타났으며, 이것은 낮시간이 밤시간에 비해 교란이 강하기 때문에 교란에 의한 포인팅손실이 밤시간보다는 낮시간에 더 커지기 때문이다. 그러나 그림 8로부터 맑은날

정지궤도 위성과 지구국간 광통신 링크의 전송속도 해석

표 5. 광위성통신 하향링크에서 대기상태와 전송속도에 따른 양각의 범위

Table 5. Ranges of elevation angles vs. atmospheric condition and data rate on the down-link of optical satellite communicatio.

대기상태		전송속도		
		100 [Gbps]급	10 [Gbps]	1 [Gbps]
맑은 대기	낮	90° ~10°	-	-
	밤	90° ~10°	-	-
구름 낀 대기	보통구름	90° ~23°	23° ~17°	17° ~14°
	안개구름	90° ~39°	39° ~28°	28° ~22°
안개 및 헤이즈	가시도 (3km)	90° ~10°	-	-
	가시도 (0.6)	90° ~10°	-	-
	가시도(0.3)	90° ~10°	-	-
	가시도(0.1)	90° ~32°	32° ~23°	23° ~18°
난층 운에 의한 비	강우량 (10mm/hr)	90° ~40°	40° ~29°	29° ~23°
	강우량(20)	90° ~56°	56° ~39°	39° ~30°
	강우량(30)	90° ~78°	78° ~48°	48° ~37°
	강우량(40)	×	90° ~57°	57° ~43°
	강우량(50)	×	90° ~67°	67° ~48°
적란 운에 의한 비	강우량(10)	90° ~84°	84° ~49°	49° ~37°
	강우량(20)	×	90° ~58°	58° ~43°
	강우량(30)	×	90° ~66°	66° ~47°
	강우량(40)	×	90° ~75°	75° ~51°
	강우량(50)	×	×	90° ~55°
난층 운에 의한 눈	적설량(3)	90° ~73°	73° ~47°	47° ~36°
	적설량(5)	×	90° ~64°	64° ~46°
	적설량(8)	×	×	90° ~62°
	적설량(10)	×	×	90° ~77°
	적설량(15)	×	×	×
적란 운에 의한 눈	적설량(3)	×	90° ~64°	64° ~47°
	적설량(5)	×	×	90° ~54°
	적설량(8)	×	×	90° ~65°
	적설량(10)	×	×	90° ~74°
	적설량(15)	×	×	×

대기상태		전송속도		
		100 [Mbps]	10 [Mbps]	1 [Mbps]급
맑은 대기	낮	-	-	-
	밤	-	-	-
구름 낀 대기	보통구름	14° ~11°	11° ~10°	-
	안개구름	22° ~18°	18° ~16°	16° ~14°
안개 및 헤이즈	가시도 (3km)	-	-	-
	가시도 (0.6)	-	-	-
	가시도(0.3)	-	-	-
	가시도(0.1)	18° ~15°	15° ~13°	13° ~12°
난층 운에 의한 비	강우량 (10mm/hr)	23° ~19°	19° ~16°	16° ~14°
	강우량(20)	30° ~25°	25° ~21°	21° ~19°
	강우량(30)	37° ~30°	30° ~26°	26° ~22°
	강우량(40)	43° ~34°	34° ~29°	29° ~25°
	강우량(50)	48° ~39°	39° ~32°	32° ~28°
적란 운에 의한 비	강우량(10)	37° ~31°	31° ~26°	26° ~23°
	강우량(20)	43° ~35°	35° ~29°	29° ~26°
	강우량(30)	47° ~38°	38° ~32°	32° ~28°
	강우량(40)	51° ~41°	41° ~34°	34° ~30°
	강우량(50)	55° ~44°	44° ~36°	36° ~31°
난층 운에 의한 눈	적설량(3)	36° ~29°	29° ~25°	25° ~22°
	적설량(5)	46° ~37°	37° ~31°	31° ~27°
	적설량(8)	62° ~48°	48° ~40°	40° ~34°
	적설량(10)	77° ~55°	55° ~45°	45° ~38°
	적설량(15)	90° ~79°	79° ~58°	58° ~48°
적란 운에 의한 눈	적설량(3)	47° ~37°	37° ~32°	32° ~27°
	적설량(5)	54° ~43°	43° ~36°	36° ~31°
	적설량(8)	65° ~50°	50° ~41°	41° ~35°
	적설량(10)	74° ~54°	54° ~44°	44° ~38°
	적설량(15)	90° ~65°	65° ~51°	51° ~43°

(참조) × : 전송 불가능, - : 해당사항 없음

하향링크에서는 강교란인 낮시간이 약교란인 밤시간에 비해 전송속도가 약간 높게 나타났다. 이는 하향링크에

서는 포인팅손실보다 신호의 공간가간섭 저하가 교란의 주된 영향으로서, 직접광수신방식을 사용하는 하향링크에서는 교란에 의한 공간위상 가간섭길이(r_0)가 작은 낮시간이 개구평균효과가 커서 수신단에서 교란 대기채널에 의한 잡음의 영향을 적게 받기 때문인 것으로 보인다.

구름낀 흐린 날은 그림 9으로부터 안개구름낀 날이 보통구름들이 낀 날보다 전송속도가 낮게 나타났으며 이것은 안개구름이 보통구름들보다 차광길이는 짧은 반면 구름의 두께는 훨씬 크기 때문이다.

표3과 표5에서 보면 안개에 의한 산란 감쇠계수가 비와 눈에 의한 산란 감쇠계수에 비해 훨씬 큼에도 불구하고 안개낀 날씨의 전송속도가 비와 눈이 오는 날씨의 전송속도보다 높게 나타났다. 이는 안개가 존재하는 높이가 0.1[km] 정도인데 비해 눈, 비가 존재하는 높이는 1.5~2.5[km]로 훨씬 높아 전체적인 산란손실이 비와 눈이 안개보다 크기 때문이다.

그림 11, 12를 보면 하향링크 모두 강우시에는 적란운에 의한 강우가 난층운에 의한 강우보다는 전송속도를 제한하였다. 이것은 적란운이 난층운보다 존재하는 높이는 낮지만 구름의 두께가 두껍고 차광길이가 짧기 때문에 적란운에 의한 산란손실이 훨씬 크다. 따라서 적란운의 산란손실에서 난층운의 산란손실을 뺀 값보다 지면으로부터 난층운과 적란운까지의 전송거리를 뺀 차에서 발생하는 강우에 의한 산란손실이 작기 때문인 것으로 보인다.

그림 13, 14에서 보듯이 강설시에는 하향링크 모두 양각이 높고 적설량이 적을수록 적란운에 의한 강설이 전송속도를 제한하고, 양각이 낮고 적설량이 클수록 난층운에 의한 강설이 전송속도를 제한하였다. 이것은 양각이 높고 적설량이 적을수록 눈구름에 의한 산란손실이 증가 되고, 양각이 낮고 적설량이 많을수록 눈에 의한 산란손실이 증가 되기 때문이다. 또한 상, 하향링크 모두 양각이 감소함에 따라 전송속도가 급격하게 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 양각이 낮아질수록 정지궤도 위성과 지구국간의 거리가 멀어지며, 특히 통신성능에 가장 심각한 영향을 미치는 대기권 통과거리가 길어지기 때문이다.

마지막으로 상향링크인 표 3과 하향링크인 표 5의 결과를 비교해 보면, 모든 날씨에 대해 하향링크가 상향링크에 비해 전송속도가 높음을 알 수 있다. 이것은 상향링크시 발생하는 포인팅손실이 하향링크시 신호의 공간가간섭 파괴에 의한 손실보다 크기 때문인 것으로 보인다.

VI. 결 론

정지궤도위성과 지구국간 광통신링크에서 양각과 지구국의 대기상태에 따른 정보전송속도를 해석할 수 있는 한모델(Han's model)을 제시하였다. 또한 한모델(Han model)을 가지고 정지궤도 위성과 지구국간의 광통신 링크에서 양각과 대기상태의 변화에 대해 10^7 이하의 비트 오류율을 유지시키기 위한 위성과 지구국의 정보 전송속도를 수치해석하였다. 광위성통신에 심각한 장애를 유발시키는 대기상태를 맑은 대기, 구름낀 흐린 대기, 헤이즈 안개, 비, 눈의 여섯 단계로 나누었고, 이러한 대기상태가 광위성통신에 미치는 영향은 상향링크와 하향링크시 다르게 나타나므로 광위성통신 링크를 상향링크와 하향링크로 나누어 해석하였다.

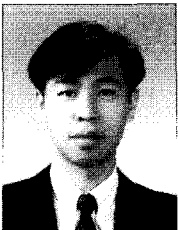
수치해석 결과로부터 폭우나 강설을 제외한 날씨에서는 지구국과 정지궤도 위성간에 레이저를 이용한 [Gbps]급 이상의 초고속 통신이 가능함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 폭우나 강설을 제외한 날씨에서는 지상의 초고속 통신망(BISDN)과 정지궤도 위성을 포함한 우주의 무선 광통신망간의 레이저를 이용한 직접적인 연결이 가능함을 의미한다. 또한 폭우와 강설을 제외한 날씨에는 위성통신에 마이크로파 대신 지향성이 매우 우수한 레이저의 사용이 가능해짐으로써 현재 우리 나라, 일본, 중국간에 문제가 되고 있는 인접한 국가간 위성신호간섭을 제거할 수 있으며 정지궤도 위성간의 간격을 현재 수준의 수천 분의 일로 줄일 수 있기 때문에 마이크로파 위성통신에서 크게 문제가 되고 있는 정지궤도의 부족현상을 근본적으로 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 마이크로파에 비해 수만 배에 가까운 무선 주파수 대역을 확보하게 됨으로써 점차 폭주하는 통신수요로 인한 주파수 자원의 부족현상을 근본적으로 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만, 폭우나 눈이 내리는 날씨에는 정지궤도 위성과 지구국간 광통신링크의 전송속도가 [Mbps]나 [Kbps]급으로 떨어지기 때문에 제한된 통신이 불가피하다. 따라서 이러한 날씨에는 우선순위가 높은 정보순으로 전송을 하거나 지상의 초고속 정보통신망을 통해 정보를 폭우나 눈이 오지 않는 지역의 지구국으로 전송한 후 이곳에서 정지궤도 위성과 통신을 하는 것이 바람직하다.

본 논문에서 제시한 정지궤도위성과 지구국간 광통신링크 모델인 한모델(Han's model)은 광위성통신시 지구국의 양각과 그 지역의 대기상태에 따른 정보전송속도를 해석하는데 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Morris Katzman, Ed, *Laser Satellite Communications*. Prentice-Hall, 1987.
- [2] Stephen G. Lambert and William L. Casey, *Laser communications in space*. Artech House, 1995.
- [3] K. A. Winick, "Atmospheric Turbulence-Induced Signal Fades on Optical Heterodyne Communication Links," *Appl. Opt.*, Vol. 25, pp. 1817-1825, June, 1986.
- [4] Rober M. Gagliardi, Sherman Karp, *Optical Communications*. New York: John-Wiley & Sons, 1995.
- [5] William K. Pratt, *Laser Communication Systems*. John-Wiley & Sons, 1969.
- [6] G. Waldman and J. Wootton, *Electrop-Optical Systems Performance Modeling*. Artech House, 1993.
- [7] 김광식, "알기쉬운 기상지식," 일지사, 1973.
- [8] CHIEN-CHUNG CHEN, "Performance Analysis of Noncoherently combined Large Aperture Optical Heterodyne Receiver," *IEEE Trans Commun*, Vol.33, pp.1013-1021, July 1990.
- [9] Bernard J. Klein and John J. Degnan, "Optical Antenna Gain, 1 : Transmitting Antennas," *Applied Opt.*, Vol.13, No.9, September 1974.
- [10] John Gowar, *Optical Communication Systems* Prentice-Hall, 1984.
- [11] Robert L. Douglas, *Satellite Communication System*, Prentice-Hall, 1988
- [12] M. Richharia, *Satellite Communications Systems Design Principles*. McGraw-Hill, 1995.
- [13] 한종석, 정진호, 김영권, "교란대기하에서 광위성 통신링크의 양각에 따른 광헤테로다인 수신기의 최적 설계에 관한 연구", 대한전자공학회지 Vol. 30 A권 pp. 28-39, 4월, 1993.
- [14] Rober M. Gagliardi, Sherman Karp, *Optical Communications*. New York : John-Wiley & Sons, 1976.
- [15] B.E.A. Saleh and M.C. Teich, *Fundamental of Photonics*. John-Wiley & Sons, 1991.
- [16] 한종석, 이준구, 정진호, 김영권, "BISDN용 광위성 통신 업링크의 양각에 따른 송신안테나 최적 설계에 관한 연구", 대한전자공학회지 Vol. 32, A권, pp. 1382-1390, 10월, 1995.
- [17] 진년강, "아날로그와 디지털 통신," 청문각, 1990.
- [18] Jong Seok Han, Sang Gyu Lee, Hyung Lae Kim, Yung Kwon Kim, "The design of optical heterodyne receiver as elevation angle on optical satellite communication downlink for BISDN under turbulent atmosphere", *ISITA'94*, vol. 2, pp.1251-1256, Nov. 1994.
- [19] 이상규, 한종석, 정진호, 김영권, "BISDN용 광위성통신 다운링크의 양각에 따른 수신안테나 설계에 관한 연구", 대한전자공학회지 Vol. 32, A권, pp. 394-402, 3월, 1995.

저 자 소 개



韓宗碩(正會員)
1997년 2월 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 현재 데이콤 종합연구소 주임연구원. 주관심분야는 광파통신, 광위성통신, 집적광학, ATM 등임.



金暎權(IEEE Korea Council Chairman)
현재 건국대학교 전기·전자공학부 교수. 주관심분야는 광파통신, 광위성통신, 집적광학 등임.

鄭鎮鎬(正會員) 第1卷 第1號 논문 97-01-06 참조.
현재 호서대학교 전기전자제어공학부 부교수.