

태양 잡음 굴절 현상과 위성지구국 안테나 양각과의 상관관계

(Correlativity between phenomenon of atmospheric refraction on sun interference and antenna elevation angles of satellite earth stations)

김 광 영* · 이 상 설*

(Kwang Young Kim, Sang Seol Lee)

요 약

GEO 통신위성을 운용하는 지구국 안테나는 매년 춘추분 경에 태양잡음 간섭을 받는다. 이런 현상들도 대기권내에서 광선의 굴절로 영향을 받게된다. 따라서 이론적인 태양잡음간섭 예측시간이 실제 간섭이 발생하는 시간과 잘 맞지 않는다. 이 연구에서는 광선의 굴절 현상과 지구국 안테나의 주 반사경의 크기, 위성과 지구국 안테나가 이루는 양각을 고려하여 실제 태양잡음 간섭시간을 해석하였다. 또한 95년도에 발사될 무궁화호 위성을 운용할 경우 야기 될 수 있는 대기권 굴절 현상은 무시될 수 있음을 증명하였다. 본 연구의 결과와 국내 위성 지구국서 실제로 측정된 태양잡음 간섭 시간과 비교 하였으며 두 결과가 잘 맞는다.

Abstract

The earth station antenna operating on a GEO communication satellite is influenced by sun interference in the period of the spring or the autumn equinox. Such phenomena are also undertaken by ray-bending phenomena in atmosphere. Therefore the prediction time of sun interference does not theoretically match actual interference time. In this paper, the actual sun interference time has been analyzed in consideration of ray-bending phenomenon, the size of main reflector of earth station antenna and elevation angle between an earth station antenna and a satellite. Ray-bending phenomenon in atmosphere is proved to be disregarded if the Mugungwha satellite is launched in 1995. The analysis results are compared with actual measurement values of sun interference time at local earth stations and the two data are in accord well.

I. 서 론

* 한양대학교 전자통신공학과
Dept. of Electronic Communication Eng.
Hanyang University

지구 적도 상공 35,786km에 위치한 정지 궤도(GEO)

: geostationary orbit)를 선회하고 있는 통신위성을 추적 운용하는 지구국(earth station)안테나는 매년 춘추분 기간을 전후하여 지구의 적도(赤道)와 태양의 황도(黃道)가 상호 겹쳐지면서 위성과 태양이 지구국 안테나 지향 양각 방향의 일직선상에 놓여 태양 잡음 간섭(sun interference)이 절정을 이룬다[1]. 이때 C/N의 열화로 기간중 매일 수분씩 통신이 두절되고 년 누계 0.02% 정도의 고장이 발생한다[2]. INTELSAT에서는 대기권에 대한 태양 광선의 굴절현상을 무시하는 조건에서 태양잡음 간섭 시각을 예보하고 있다. 그러나 대기층에 의한 태양 광선의 굴절 현상은 태양 잡음 간섭 발생 시각에 변화를 가져온다. 본 연구에서는 태양 잡음 간섭 발생 예보 시각과 실제 발생시각과의 차이를 분석함으로써 위성지구국 운용을 더욱 원활하게 하고자 한다.

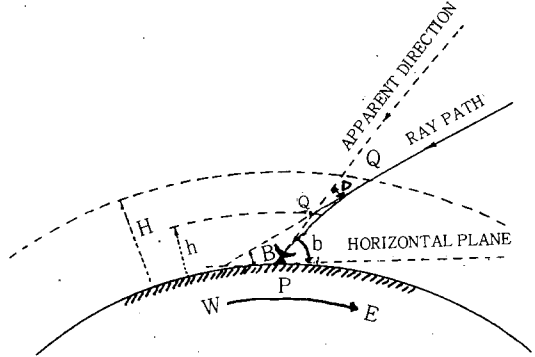
이러한 문제는 대기권의 굴절에 대한 정확한 모델을 작성하여 수학적으로 해석하기가 매우 어렵고 실용성도 없다. 따라서 엔지니어링 근사법이 적용되고 있다. 광선이 대기권을 통과할 때 일어나는 굴절 현상에 몇가지 파라미터가 영향을 주고 있음은 알려져 있으나 그 파라미터를 측정하기는 매우 어렵다. 즉 대기층의 두께, 대기의 고도, 건습도 등에 따른 굴절을 변화, 대기 온도의 불확정성, 대기 압력과 물방울 밀도 및 기후상태가 복합적으로 작용하기 때문이다. 광선의 굴절각은 태양 광선이 대기층에 진입되는 실제 입사 방향과 육안으로 보여지는 태양 방향(apparent direction)과의 사이각으로 완성된다.

본 연구는 GEO 통신위성을 운용하는 C-밴드가 포함된 우주창문(Radio Window : 1~10GHz 대역)범위 내에서 해석한 것이며 실측 데이터는 한국통신의 표준 지구국(금산, 보은, 용산)에서 여러해 동안 측정된 값이다.

II. 가상 모델

[그림 1]에서 입사광선은 진양각(true elevation angle)이 P점의 지평선상에서 B일 때 대기중 굴절 때문에 그 광선의 진로는 대기층의 입사 표면 Q점에서부

터 휘어진다. 따라서 b가 육안으로 실제 보여지는 양각(apparent elevation angle)이라할 때 그 각도차 D(refraction angle)는 다음 식으로 주어진다.



[그림 1] 대기층 굴절 모델 개략도

[Fig. 1] Approximate atmospheric refraction model

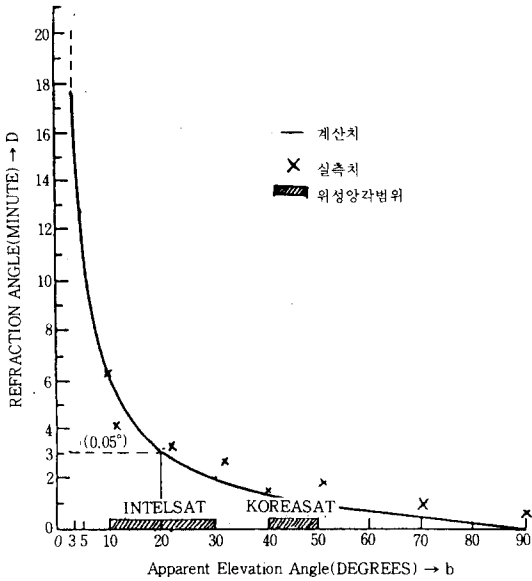
$$D = b - B \tag{1}$$

식(1)에서 D는 대기 조건에 따라 변동된다[3]. 대기 조건은 빛의 경로를 결정하는 굴절율에 영향을 끼치며 D의 정확한 측정은 굴절율의 측정에 의하여 가능하다. 하지만 굴절율의 정확한 측정이 불가능하므로 D는 근사적으로 추정하게 된다.

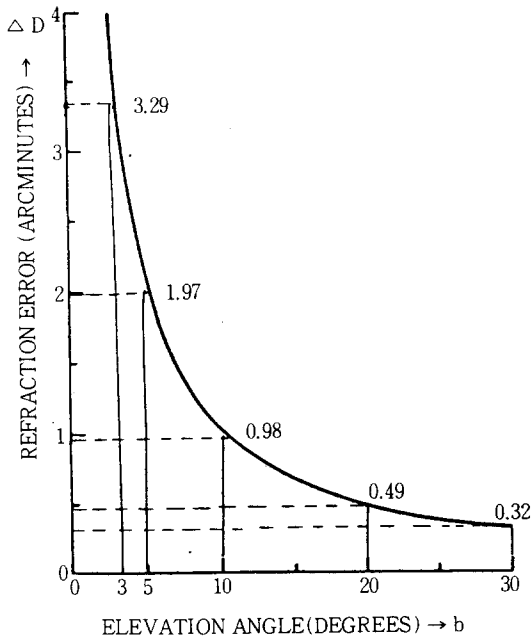
[그림 1]에서 q점은 대기권 높이의 중간치로 정한다. 대기권 높이H가 120Km일 때 q값은 60Km이다. h는 햇빛이 통과하는 경로가 대기 조건에 따라 변동하므로 일정한 값을 유지할 수 없으나 h로 일정한 평균값으로 가정한다. 실측 양각 b와 굴절각D는 다음 관계식을 만족한다[3].

$$D = n/b \tag{2}$$

여기서 n은 대기의 굴절지수이고 D와 b의 단위는 각도이다. 대기권이 100%수증기일 때의 n은 1.333이고 건조한 표준 대기일 때는 1.0003이다. 서울 지역에서 측정된 바에 의하면 n은 1.033에 접근하고 있다[3]. [그림 2]는 n=1.033인 경우 식(2)에 의한 계산 결과와 실측치를 비교하고 있다.



[그림 2] 서울 지구국 평균 굴절 각도차
 [Fig. 2] Average refraction angle difference for Seoul E/ S



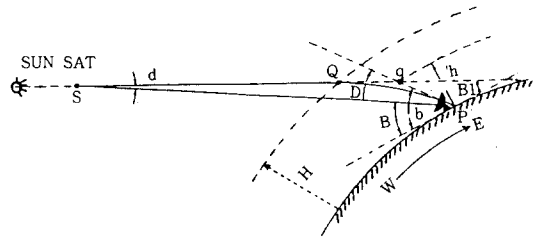
[그림 3] 굴절각 오차(아크분)
 [Fig. 3] Refraction angle error(ARCMIN)

[그림 2]에서 이론적인 추정치와 실측치 사이에 다소 굴절 오차를 보이고 있다. [그림 3]은 양각b에 대한 굴절 오차 ΔD 의 변화를 나타내고 있다. 굴절 오차는 ΔD 의 단위는 다음 식으로 정의되는 호분(AM : Arc minute)으로 표시하였다.

$$\Delta D (D/2\pi) \times 60 \quad (3)$$

[그림 3]에서 굴절 오차에는 한계가 있음을 알 수 있다. 예를 들면 INTELSAT 표준A지구국(C-밴드)안테나 최저 운용 양각은 5°, CCIR의 최저양각은 3°로서 각각의 오차는 2AM과 3AM 정도로 미세함으로 알 수 있다.

Ⅲ. 태양 잡음 발생 예보의 영향



[그림 4] 태양 간섭 영향
 [Fig. 4] Sun interference effects

[그림 4]에서 점P에 있는 지구국 안테나는 점S에 위치한 정지 궤도위성을 지향하고 있다. 대기권에 의한 굴절을 무시한다면, 태양 간섭 계산을 위한 알고리즘은 벡터 PS와 시간에 따라 변하는 태양 벡터(sun vector)에 대한 방향 여현 Pg에 의한 분리각도 D로 구성될 수 있다. 위성 지구국 안테나가 태양 간섭을 받게 되는 범위는 분리각도 D가 지구국 안테나에서 복사되는 주빔의 반치폭(semi-aperture) 보다 좁은 경우만므로 정의한다. [그림 4]에서 위성(S)로부터 안테나에 들어오는 입사광의 방향각b는

$$b = B + D \quad (4)$$

이다. 식(2)와 (4)에서 $n=1.033$ 일 때 다음 식을 얻는다.

$$b = \frac{B + \sqrt{B^2 + 4.132}}{2} \quad (5)$$

또한 [그림 4]의 삼각형 PS_q 로부터

$$d = \sin^{-1} \left[\frac{P_q}{S_q} \sin D \right] \quad (6)$$

이다. 여기서

$$P_q \cong h / \sin b \quad (7)$$

$$S_q = \sqrt{PS^2 + PQ^2 - 2(PS)(P_q) \cos D} \quad (8)$$

이다. 태양 잡음 간섭은 점 S, Q, P가 일직선에 놓일 때 최대가 된다. 대기권 밖에서의 직선 선분 S-Q의 연장선에 대한 B1은

$$B1 = B - d \quad (9)$$

이며, 여기서 식 (5), (7), (8), (6)순서에 의하여 d를 계산할 수 있다. 대기층에서의 굴절이 방위각에는 별 영향을 주지 않으므로 B1은 항상 B보다 작은 각으로 된다. 따라서 동쪽으로 지향하는 안테나의 태양 간섭은 대기권굴절로 인하여 먼저 발생되고 서쪽을 지향하는 안테나는 늦게 발생된다. 한국통신의 금산위성 제1지구국과 제2지구국은 각각 태평양(동편), 인도양(서편)을 전담하는 지구국으로서 위성안테나가 춘추분 전후(3월, 10월)하여 제1안테나(태평양위성)는 오전(8시, 9시)에, 제2안테나(인도양위성)는 오후(5시)에 태양 잡음 간섭 현상이 나타났다[4]. 일반적으로 굴절에 대한 간섭현상의 발생 시각차는 안테나의 앙각이 낮은 경우에서 심하지만 수 초(sec)미만에 불과하다. 최저 앙각, $b=1.033^\circ$ 에서 발생 시각차는 식(2)에서 $D=1$, 또 식(7)과 (8)에 $h=60\text{km}$, $PS=35,786\text{km}$ 을 각각 대입하여 P_g 와 S_g 를 구할 수 있다. 따라서 식(6)에서 $d=0.09^\circ$ 이다. 한편 지구는 시간당 15° 씩 동쪽으로 자전

하기 때문에 최대로 약 22초(sec) 지연된다.

대기권 굴절 영향의 실제 크기는 P-S 선상에서 결정될 수 있으므로 정확한 계산 입력을 얻기 위해서는 지구 중심표준축(geocentric reference axes)을 지역축(local axes)으로 변형시킬 필요가 있다.

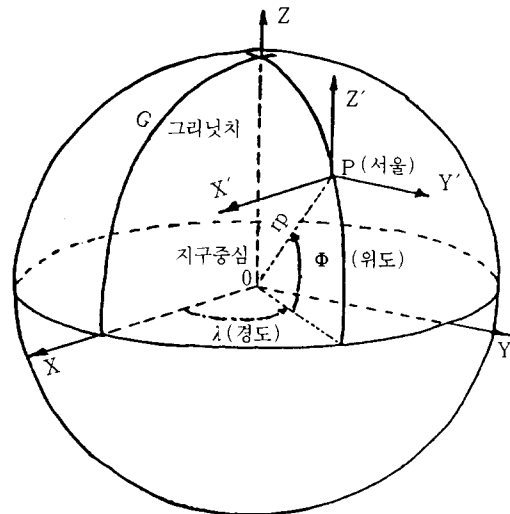
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} rp \cos \phi \cos \lambda \\ rp \cos \phi \sin \lambda \\ rp \sin \phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = |\zeta| \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = |\zeta| \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 λ 는 Z'중심의 경도회전이며 ζ 는 Y''중심의 위도회전을 의미한다.

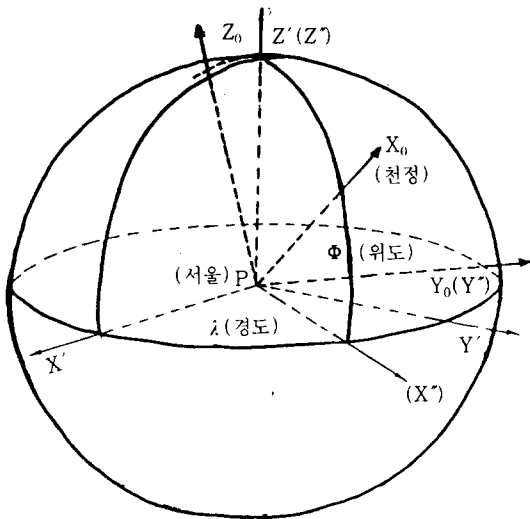
식(10), (11)에서 $[x]$ 요소는 당초 지구중심표준축, $[x_p]$ 는 지상의 P점 좌표, $[x']$ 는 변형시킨 지역중심축이다. 따라서 ground point(p)에서 태양(s) 축상의 적용좌표는 $[X_0, Y_0, Z_0]$ 로 구할 수 있다. [단: X_0 : local zenith, Y_0 : eastward]

[그림 5]와 [그림 6]은 변형된 지구중심축과 지역좌표시스템을 보이고 있다.



[그림 5] 변형된 지구중심축

[Fig. 5] Translated geocentric axes



[그림 6] 지역중심 좌표계
[Fig. 6] Local coordinate system

결국 실제적인 P-S 선상의 AZ, EL 각도는 식(12), (13)으로 각각 얻는다. 여기서 양각(B)은 계산에 큰 공헌을 하는 요소가 된다.

$$A(\text{방위각}) = \tan^{-1} (Y_0 / Z_0)$$

$$B(\text{양각}) = \tan^{-1} (X_0 / \sqrt{Y_0^2 + Z_0^2})$$

IV. 위성 지구국 태양 간섭 실측 사례

<표 1> 태양 간섭으로 인한 각 지구국별 고장 시간
[Table 1] Outage duration of various type of earth stations due to sun interference

측정년도	금산1국 (표준 A형)	금산2국 (표준 A형)	용산1국 (표준 B형)
1986	11분	12분	51분
1987	10·	41·	44·
1989	9·	9·	28·
1990	14·	22·	81·

<표 1>에 나타난 바와 같이 대형 안테나인 표준 A국(27-30m)들은 소형의 표준 B국(11m)보다 태양 잡음 간섭 지속시간이 짧게 나타나고 있다.[4] 이유는 지향성이 높은 표준 A국의 안테나 주빔의 반치폭(3dB)이 좁기 때문이다. 금산1국이 금산2국보다 태양 잡음 영향 지속시간이 짧은 이유는 인도양 60° 위성과 태평양 174° 위성과의 양각을 비교할 때 각각 9°와 26°로 전자의 경우에 대기권 굴절 진행로가 길어지기 때문이다.

<표 2>는 각 지구국에서 1993년 춘분기간중 태양 잡음 간섭 현상으로 정상 운용의 C/N값보다 6dB이상 열화된 실제 회선 고장시간을 나타내고 있다.

지구 자전 방향이 동쪽이므로 태평양 지구국(금산1국, 보은1국)들은 동쪽의 해를 먼저 맞이하므로 인도양 안테나보다 1-2일 앞서 오전 8시 또는 9시에 고장이 발생되고 한반도 서쪽에 위치한 인도양위성에 대해서는 오후 5시에 늦게 발생되고 있다. 태평양 지구국중에 금산(127° 29' 30"E, 37° 07' 19"N)이 보은(127° 51' 50"E, 36° 26' 57"N)보다 서편에 위치해 있고 사용 위성(금산은 VA F11, 보은은 VA F10)의 경사 궤도(Inclined Orbit)에도 차이가 있으므로 보은에서 먼저 태양 잡음이 발생함을 보이고 있다.[5]

특기할 일은 금산1국(표준 A)과 용산1국(표준 B)이 동일 위성(VA호 F11)을 사용하고 있으나 금산1국에서는 예보 첫날과 끝날은 태양 간섭이 미약하여 회선 고장시간이 총 16분인 반면에 용산1국은 총 41분으로 상대적으로 길어졌다. 이유는 주복사빔의 반치폭(3dB beamwidth)의 크기가 다른데서 연유한 것이다. 반치폭은 CCIR 고정 통신위성 지구국 안테나에 대한 도표[6]와 INTELSAT 공칭 공식 $BW = 21.1 / \{F(\text{GHz}) \times D(\text{m})\}$ 에 의하여 계산할 수 있다.[7] 여기서 F는 RF캐리어 주파수이며 D는 안테나 주반사기의 직경이다. 금산국(27.4m)이 반치폭은 0.2° 이고 용산국(11m)의 반치폭은 0.5° 이다.

[그림 7]과 [그림 8]은 1993. 10. 5 표준B국(용산)에서 측정 비교한 태양잡음 현상이며 [그림 9]과 [그림 10]은 1980. 3. 7 표준A국(금산)에서 측정 비교한 것이다.

〈표 2〉 93년 춘분기간중 태양 잡음 간섭 발생 실태 조사표

[Table 2] Sun interference phenomena observed during spring equinox '93

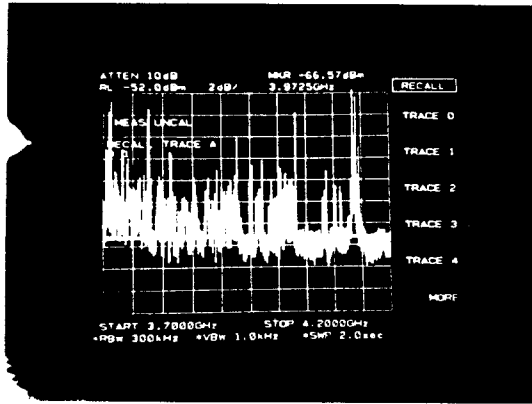
발생 월 일	발생 시간 (KST)	태양 잡음 간섭 지속 시간(분) (예보/실측)				
		금산 1국 (177° E)	보은 1국 (174° E)	금산 2국 (60° E)	보은 2국 (63° E)	용산 1국 (177° E)
3. 3	(P) 09		6 / 0			
3. 4	(P) 09	4 / 0	7 / 4			4 / 6
3. 5	(P) 09 (I) 17	7 / 4	8 / 7	5 / 0	6 / 9	7 / 7
3. 6	(P) 09 (I) 17	8 / 6	7 / 0	7 / 5	8 / 6	8 / 8
3. 7	(P) 09 (I) 17	8 / 6	4 / 0	8 / 10	8 / 5	8 / 11
3. 8	(P) 08 (I) 17	6 / 0		7 / 0	7 / 5	6 / 9
3. 9	(I) 17			4 / 0	3 / 0	
계		33 / 16	32 / 11	31 / 15	32 / 25	33 / 41

(P) 태평양 위성 (I) 인도양 위성 (E) 위성위치(동경)

주 : C/N 열화는 6dB

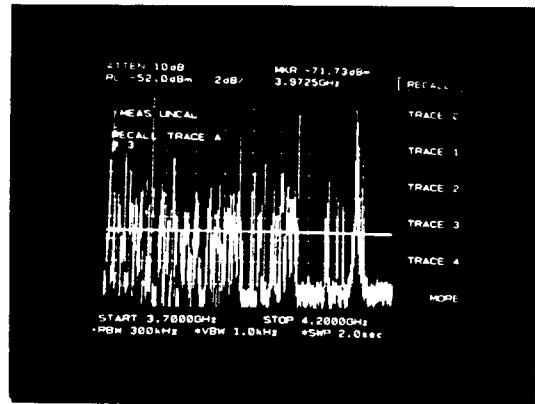
(P) Pacific Sat, (I) Indian Sat, (E) East degree of Sat, Position

note : C/N deteriorated more than 6dB from nominal value.



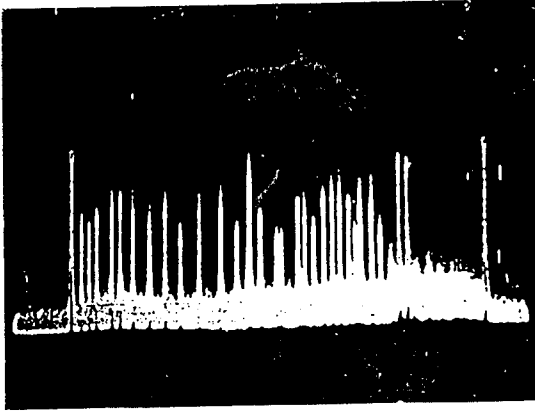
[그림 7] 태평양 177° 인텔셋 위성(08 : 34 KST 태양 잡음 4.5dB 증가 상태)

[Fig. 7] POR 177° E INTELSAT (4.5dB sun interference level at 08: 34 KST)



[그림 8] 인텔셋 위성(08 : 46 KST 태양잡음 종료 상태)

[Fig. 8] Ditto INTELSAT (Recovering from sun interference at 08: 46 KST)



[그림 9] 1980년 3월 174° E 인텔셋 IV 호의 애너로그 캐리어가 수용된 500MHz 전대역 정상 운용
 [Fig. 9] Normal operation status of analogue on the full transponder 500MHz bandwidth of IS-IV 174° E on March, 1980



[그림 10] [그림 7]의 전대역 캐리어에 대한 태양 잡음 간섭이 가장 심할 때의 백색 잡음 수준.
 [Fig. 10] Maximum white noise level of sun interference over the all carriers of Fig. 7.

V. 결 론

지구국 안테나가 GEO상의 통신위성에서 오는 전파를 수신할 때 매년 춘추분을 전후하여 태양 잡음 간섭

을 받는다. 태양 광선이 대기권 굴절 현상으로 간섭 잡음 발생 예보와 실 발생 시간에 차이가 발생한다. 이 현상에 대한 광파의 궤적을 근사화함으로써 실 발생 시간을 추정할 수 있다. 한국통신의 표준 지구국 안테나 5개를 실측한 결과 매년 춘추분 전후(위성 교체시 정도 변경에 따라 3월 3일부터 3월 10일 기간과 10월 3일부터 10월 10일 기간중)하여 굴절율에 영향을 주는 온습도, 풍속, 대기층 두께, 물방울 열도, 대기압력등이 불규칙하게 변화함에도 불구하고 이론 예보 시각과 실측 발생 시각에는 안테나 특성열화를 고려해도 약 1분이 내의 차이만을 보이고 있다.

태양 잡음 현상은 지구국 안테나 양각이 낮을수록 안테나가 소형일수록 주엽빔의 반치폭이 넓어져 간섭 영향이 오래 지속된다. TDMA, IBS, SCPC같은 디지털 캐리어는 FDMA/FM과 같은 애너로그방식과 달리 트랜스폰더 전회선이 동시에 영향을 받으며 우리나라 지구국이 위치해 있는 동경 127° 30' 기준축에서 관측할 때 동쪽 위성의 경우 오전 8시와 9시, 서쪽 위성의 경우 오후 5시 시간대에 태양 잡음이 발생하고, 북위 36° 30' 기준축에서 관측할 때 춘분(3.20일경)보다 2주일 이전, 추분(9.23일경)보다 1주일이후에 발생되고 있음이 확인되었다. 이유는 해가 동지에서 춘분으로 옮겨갈 때 남회귀선(23° 30' S)에서 시작하여 적도(0°)로 접근되는 과정에서 북반구에 위치한 우리나라 지구국 안테나가 적도 상공의 위성과 태양이 먼저 시선(視線: line of sight)을 이루기 때문이며 반대로 하지에서 추분으로 갈 때는 북회귀선(23° 30' N)에서 회귀되는 태양과 안테나와 위성간의 일치는 추분이 되는 적도를 지난 후에야 시선을 이루기 때문에 발생 시기가 지연된다.[8]

안테나 양각이 앞으로 발사될 무궁화호 위성은 양각(43°)이 INTELSAT(9°~27°)보다 높아서 태양 잡음 영향은 같은 크기의 안테나 조건이면 10여초 단축될 것으로 기대된다.[9][10] 측정 오차를 감안해도 한반도 어떠한 대기 조건에서도 굴절현상에 의한 잡음 변동시간은 30초 미만일 것으로 예측된다. 기존 지구국에 대하여는 태양 잡음 지속시간의 변화를 분석함으로써 안테나 시스템의 노후도를 평가할 수 있다.

왜냐하면 주반면경의 뒤틀림으로 인한 주빔의 voltage axial ratio 불량과 위성지향 주축을 벗어난 오조정 각도(misalignment angle)에 의한 cross polarization isolation 불량이 태양잡음 지속시간을 상대적으로 연장시키기 때문이다.

참 고 문 헌

1. B. N Agrawal, *Design of GEO Spacecraft*. Prentice-hall, 1986.
2. K.MIYA, *Satellite Communications Technology*. KEC Inc., 1982.
3. G. Porcelli, "Effects of Atmospheric Refraction on Sun Interference" Intelsat, 1986.
4. "錦山 衛星 地球局 年報" 第 16 號 韓國通信, 1991.
5. 김광영, "경사궤도상의 통신위성 운용개선연구" 한국통신학회지 제 10권 4호, 1993.
6. CCIR, "Fixed Satellite Handbook", ITU Geneva, 1988.
7. IADP, "Earth Station Technology", INTELSAT Washington D.C., 1984.
8. 이병선외 3명, "정지궤도 위성의 지구와 달에 의한 식에측", 전자통신 제 14권 1호, 1992.
9. 김광영, "위성통신 안테나 크기에 따른 태양잡음 간섭 영향", 대한 전자공학회지, 제 16권 2호 1993.
10. KIM K. Y, "Latest trends in satellite communication technology based on KOREASAT", APT-INTELSAT Joint seminar, Bangkok, Fed. 1992.