

우주폐기물이 위성통신 방송신호 전파에 미치는 영향분석

The Analysis of the Effect on the Wave Propagation of DBS Signal by the Space Debris for Satellite Communication

이용민* · 홍완표** · 박종화*** · 양기덕**** · 나극환*

Yong-Min Lee* · Wan-Pyo Hong** · Chong-Hwa Park*** · Ki-Dug Yang**** · Keuk-Hwan Ra*

요 약

각종 원인에 기인하는 궤도별 우주폐기물의 분포는 우주환경에 있어서 위성통신 방송 및 통신신호의 전파전파에 방해요소로 작용하게 된다. 본 논문에서는 수치해석적 접근에 의해 우주폐기물의 공간분포밀도와 사용 주파수의 변화에 따른 EM파의 정규화 산란계수를 계산하고 우주폐기물에 의한 감쇠도 및 위상변화를 구하였다. 그 결과 우주폐기물에 의한 위성통신 방송신호 전파에 있어서 감쇠도는 베셀함수에 의해 표현된 전개 요소의 진폭함수의 실수부에 의해 가장 큰 영향을 받게 되고 위상 변화량은 허수부에 의해 주로 결정됨을 분석하였다. 본 논문의 결과는 우주폐기물의 기하급수적 증가에 따른 우주환경의 새로운 인식과 우주폐기물을 고려한 위성통신망의 링크버짓 설계의 활용에 적합하다.

Abstract

The distribution of the space debris caused by any source affects the DBS & FSS wave propagation for satellite communication. In this paper, the normalized expansion coefficients are evaluated with varying the volume distribution density of space debris and the operating frequency, and then the attenuation and phase shift are calculated by using the normalized expansion coefficients. Conclusively, the attenuation and phase shift are mostly affected with the real and imaginary part of the amplitude function, respectively, which represented by electric field component of the Bessel function. The results of this paper adapted for the design of the link budget for satellite communication system and the reconsideration of space environment as the space debris increases by geometric progression.

I. 서 론

1957년 인공위성의 효시가 되는 스프티닉 1호의

발사 이래 1994년 현재까지 약 4,000회로 추정되는 각종 통신 측지 첩보 및 실험위성 등의 발사로 지구 적도 상공 36,000 km의 정지궤도 이하의 공간에는 수많은 노후 위성, 부분 기능고장 위성과 더불어 발

「본 연구는 1996년 전파연구소 연구비 지원에 의하여 수행되었음.」

* 광운대학교 전자공학과(Dept. of Elec. Eng., Kwangwoon Univ.)

** 정보통신부 정보화 기획실 초고속망 구축과(Ministry of Inform. & Comm. ROK, Informatization Planning Office)

*** 정수기능대학 전자기술과(Dept. of Elec. Eng., Chungsoo Polytechnic Coll.)

**** 아주대학교 전자공학과(Dept. of Elec. Eng., Ajou Univ.)

· 논문 번호 : 970531-035

· 수정완료일자 : 1997년 8월 1일

사로켓트 상단의 위성 격납용기인 내연성의 웨어링 (Fairing) 의 파편(Fragment) 등으로 혼재된 부유물은 약 4,000톤으로 예상되며 많은 문헌에 의하면 현재 우주폐기물의 수는 약 350만개로 추정되고 있으며 이중 95%가 쓸모없는 우주쓰레기에 해당된다고 보고 있다^[2].

그 중에서 1 mm 이상의 우주폐기물을 약 350만개로 기준할 때 60%는 저궤도(LEO)에서의 로켓 자체에서 생성된 것이고 37%는 저궤도 위성의 탑재물(Payload) 구성품이며, 나머지 3%는 정지궤도(GEO)보다 오히려 타원궤도상에 위치한 위성체의 페이로드로 보고있다. 이처럼 인공적인 우주폐기물의 대부분이 존재하는 저궤도의 우주부유물에 대한 지상 관측자료에 의하면 10 cm 이상 파편은 약 7,000여 개, 1 cm 이상은 약 70,000여 개 정도가 존재하며, 이들 저궤도에서 발생된 파편들은 약 4년 정도가 경과되어도 고도는 초기와 동일하게 유지되면서 오히려 협궤도를 이탈하여 지구를 균등분포로 감싸게 되므로, 이러한 파편들이 우주환경에 있어 위성통신 방송신호의 전파에 방해 요소로 작용하게 된다^[5].

따라서 본 논문에서는 우주폐기물에 의한 전자파 감쇠효과를 분석하기 위해 먼저 우주폐기물의 구성물질을 임의의 유전체로 보고 구형 유전체에 대한 전자파 산란을 계산하였다. 그러나 실제 대다수의 우주폐기물이 도체로 구성되어 있으므로 최종적으로 우주폐기물을 구형 도체로 가정하고 이를 구형

유전체에 대한 특수한 경우로써 이에 대한 각각의 산란에너지 W_s , 우주폐기물에 의한 전자파의 위상 변화 Φ 그리고 특히, 매질에 의한 전자파의 감쇠량 A 등의 전파특성을 분석하였다.

II. 임의의 구형 유전체에 대한 전자파 산란

미 우주사령부(USSPACECOM)에 의해 관측 및 조사된 우주 공간상에 존재하는 우주잔재물의 추정 잔해 수는 표 1과 같으며, 이때 0.1~1 cm의 크기를 갖는 우주잔재물은 우주 공간에 부유하는 천연잔재물로서 지구궤도 공간을 약 20 km/sec의 속도로 움직이는 미소잔해(microdebris)이다^[1]. 본 연구에서는 분석대상을 크기가 1~10 cm인 인공 우주잔재물(이하 ‘우주폐기물’)로 한정지으며, 우주공간상의 우주폐기물의 형태는 특정지을 수 없을 뿐 아니라 레이다 유효반사 단면적(Radar cross section)과 우주폐기물의 물리적 크기는 우주폐기물이 구(sphere)라고 가정했을 경우에만 동일한 값을 가지므로 우주폐기물의 형태는 구형으로 간주한다.

2-1 구형 유전체에 의한 산란

그림 1에서와 같이 x축 방향과 y축 방향으로 각각 전계와 자계가 분포되고, z축 방향으로 평면파가 진행될 때 구형 유전체에 있어서의 입사파는 다

표 1. 우주잔재물의 추정 잔해 수

Table 1. Estimated debris population.

| 크 기 | 우주잔재물의 수(%) | 질 량(%) | 비 고 |
|----------|------------------------|---------------|-----|
| > 10 cm | 8,000 (0.02 %) | 99.93 % | |
| 1~10 cm | 110,000* (0.31 %*) | 0.035 %* | |
| 0.1~1 cm | 35,000,000* (99.67 %*) | 0.035 %* | |
| 전 체 | 35,117,000* (100 %*) | 2,000,000 kg# | |

* 통계적으로 산출된 값

보고 자료를 근거로 계산된 값

Legendre 다항식 $P_n(x)$ 에 의해 다시 쓰면

$$E_r^i = E_0 e^{j\omega t} \frac{\cos\phi}{jkr} \sum_{n=0}^{\infty} (-j)^n (2n+1) j_n(kr) \frac{\partial}{\partial\theta} P_n(\cos\theta)$$

이 되고 $\frac{\partial P_n}{\partial\theta} = P_n'$ 이므로 따라서,

$$E_r^i = E_0 e^{j\omega t} \frac{\cos\phi}{jkr} \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n (2n+1) j_n(kr) P_n'(\cos\theta) \quad (2)$$

이 된다. 동일한 방법으로 E_θ^i 와 E_ϕ^i 를 구하면 구좌표 계로 표현된 입사파의 전계 및 자계는 다음과 같다.

$$\vec{E}^i = \vec{a}_x E_0 e^{j(\omega t - kz)} \quad (3a)$$

$$= E_0 e^{j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [\vec{M}_n^{(1)}(k) + j\vec{N}_n^{(1)}(k)]$$

$$\vec{H}^i = \vec{a}_y H_0 e^{j(\omega t - kz)} \quad (3b)$$

$$= -\frac{kE_0}{\mu\omega} e^{j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [\vec{M}_n^{(1)}(k) - j\vec{N}_n^{(1)}(k)]$$

이고, 여기서

$$\vec{M}_n(k) = \frac{1}{\sin\theta} z_n(kr) P_n'(\cos\theta) \cos\phi \vec{a}_\theta - z_n(kr) \frac{\partial P_n'(\cos\theta)}{\partial\theta} \sin\phi \vec{a}_\phi \quad (4)$$

$$\vec{N}_n(k) = \frac{n(n+1)}{kr} z_n(kr) P_n(\cos\theta) \cos\phi \vec{a}_r + \frac{1}{kr} \frac{\partial}{\partial r} [z_n(kr)] \frac{\partial P_n(\cos\theta)}{\partial\theta} \cos\phi \vec{a}_\theta + \frac{1}{kr \sin\theta} \frac{\partial}{\partial r} [z_n(kr)] P_n(\cos\theta) \sin\phi \vec{a}_\phi \quad (5)$$

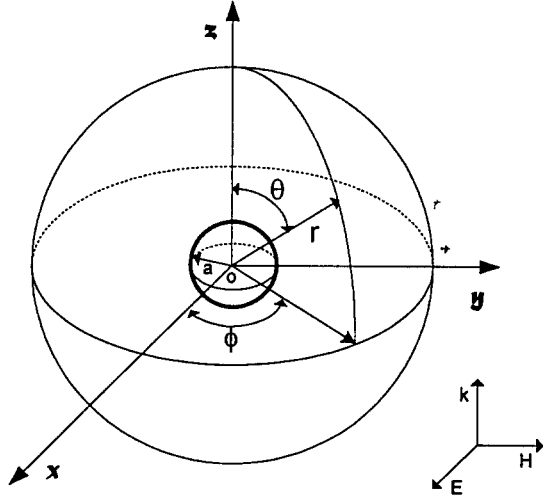


그림 1. 구형 유전체에 대한 EM 평면파의 입사
Fig. 1. Incident EM plane wave on a dielectric.

음과 같다.

$$\vec{E}^i = E_0 e^{j(\omega t - kz)} \vec{a}_x \quad (1a)$$

$$\vec{H}^i = \frac{E_0}{\eta} e^{j(\omega t - kz)} \vec{a}_y \quad (1b)$$

여기서, η : 자유공간의 고유임피던스 [Intrinsic Impedance ($=\sqrt{\mu/\epsilon}$)]

식 (1)을

$$\vec{a}_x = \sin\theta \cos\phi \vec{a}_r + \cos\theta \cos\phi \vec{a}_\theta - \sin\phi \vec{a}_\phi$$

에 의해 구좌표 파동함수로 표현하면 입사파 전계의 r -성분 E_r^i 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_r^i = \cos\phi \sin\theta E_x^i = E_0 e^{j\omega t} \frac{\cos\phi}{jkr} \frac{\partial}{\partial\theta} (e^{-jkr \cos\theta})$$

식 (4), (5)에서 벡터 $\vec{M}_n(k)$ 과 $\vec{N}_n(k)$ 은 제1종 Bessel 함수로 표현된 구좌표계 벡터이다. 식 (3a), (3b)와 같이 직각좌표계에서 구좌표계로 좌표계 변환되어 표현된 입사파의 전계 및 자계는 두 개의 항으로 구성된다. 이 때, 첫 번째 항은 '진행파계(transmitted field)'로 간주되는 구 내부에서의 전자계이고 다른 한 부분은 '산란파계(scattered field)'로 불리우는 구 외부에 적용되는 부분이다. 따라서, 구형 유전체의 외부에 분포하는 전체 전자계는 입사파 계(incident field) \vec{E}^i, \vec{H}^i 와 산란파계 \vec{E}^s, \vec{H}^s 의 합이 되며, 산란파 계 \vec{E}^s, \vec{H}^s 를 식 (3)의 입사파 계의 형태로 나타내면 다음 식 (6)과 같다^[3].

$$\vec{E}^s = E_0 e^{j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \vec{M}_n^{(4)}(k) + j b_n \vec{N}_n^{(4)}(k)] \quad (6a)$$

$$\vec{H}^s = -\frac{kE_0}{\mu\omega} e^{j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \vec{M}_n^{(4)}(k) - j b_n \vec{N}_n^{(4)}(k)] \quad (6b)$$

여기서, a_n, b_n 은 정규화 미정계수이고, 벡터 $\vec{M}_n(k)$ 과 $\vec{N}_n(k)$ 의 위첨자⁽⁴⁾는 구좌표계의 제4종 Bessel 함수(또는 제2종 Henkel 함수)를 나타낸다. 따라서, 식 (4)와 (5)의 $z_n(kr)$ 은 식 (6)에서 $h_n^{(2)}$ 로 대체될 수 있다. 구좌표계의 Henkel 함수는 구형 유전체에 대한 입사파의 방사조건(radiation condition)을 만족하도록 함으로써 결정된다. 다시 말해서 $h_n^{(2)}(kr)$ 은 시간 요소 $e^{j\omega t}$ 에 의해

$$h_n^{(2)}(kr) \sim j^{n+1} \frac{e^{-kr}}{kr} \quad (7)$$

로 표현할 수 있으며, 식 (7)은 구형 유전체로부터 외부로 산란되는 구좌표계의 Henkel 함수로 표현된 전자파를 나타낸다. 유사한 방법으로 유전체 구

내부에서의 진행파 계 \vec{E}^t, \vec{H}^t 를 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{E}^t = E_0 e^{j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [c_n \vec{M}_n^{(1)}(k) + j d_n \vec{N}_n^{(1)}(k)] \quad (8a)$$

$$\vec{H}^t = -\frac{kE_0}{\mu\omega} e^{j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [c_n \vec{M}_n^{(1)}(k) - j d_n \vec{N}_n^{(1)}(k)] \quad (8b)$$

여기서, c_n 과 d_n 은 구 내부의 진행파 계에 대한 정규화 미정계수이고 k_1 은 구에 있어서의 전파상수이다. 식 (8)의 함수 $M_n^{(1)}$ 과 $N_n^{(1)}$ 은 식 (4), (5)의 $z_n(kr)$ 을 Bessel 함수 $j_n(k_1 r)$ 로 대치함으로써 얻을 수 있다. 이 경우에 있어서 계는 구의 중심이 위치한 구 좌표계의 원점에서 유한해야 하기 때문에 j_n 은 유일한 해가 된다.

식 (6)과 식 (8)의 미정계수 a_n, b_n, c_n 그리고 d_n 은 각각 \vec{E}^s, \vec{H}^s 와 \vec{E}^t, \vec{H}^t 에 대한 경계조건을 만족시키도록 함으로써 결정할 수 있다. 즉, 구 표면에서의 전체 전계 및 자계의 접선 성분에 대한 연속성(continuity)을 적용함으로써 정해진다. 그리하여 $r=a$ 에서

$$\vec{a}_r \times (\vec{E}^i + \vec{E}^s - \vec{E}^t) = 0 \quad (9a)$$

$$\vec{a}_r \times (\vec{H}^i + \vec{H}^s - \vec{H}^t) = 0 \quad (9b)$$

이고, 이것은 다시

$$E_\theta^i + E_\theta^s = E_\theta^t \quad (10a)$$

$$E_\phi^i + E_\phi^s = E_\phi^t \quad (10b)$$

$$H_\theta^i + H_\theta^s = H_\theta^t \quad (10c)$$

$$H_\phi^i + H_\phi^s = H_\phi^t \quad (10d)$$

과 마찬가지로 된다. 식 (3), (6) 그리고 (8)을 식 (10)에 대입시킨 후, 그 결과를 $\cos\phi$ 또는 $\sin\phi$ 로 나누고, 구간 $0 \leq \phi \leq 2\pi$ 에서 적분한 다음, 다시 $\frac{dP^m}{d\theta}$ 또는 $\frac{dP^1_m}{\sin\theta}$ 으로 나눈 후 구간 $0 \leq \theta \leq \pi$ 에서 적분하면

$$j_n(ka) + a_n h_n^{(2)}(ka) = c_n j_n(k_1 a) \quad (11a)$$

$$\mu_1 [k a j_n(ka)]' + a_n \mu_1 [k a h_n^{(2)}(ka)]' = c_n \mu_1 [k_1 a j_n(k_1 a)]' \quad (11b)$$

$$\mu_1 j_n(ka) + b_n \mu_1 h_n^{(2)}(ka) = d_n \mu_1 j_n(k_1 a) \quad (11c)$$

$$k [k a j_n(ka)]' + b_n k [k a h_n^{(2)}(ka)]' = d_n k_1 [k_1 a j_n(k_1 a)]' \quad (11d)$$

을 얻게 된다. 여기서 식 (11a)와 (11b)로부터 미정계수 a_n 과 c_n 을 구할 수 있고, 식 (11c)와 (11d)로부터 b_n 과 d_n 을 결정함으로써, 투자율(permeability) $\mu = \mu_0 = \mu_1$ 인 구형 유전체에 대한 산란파 계산에 필요한 4개의 정규화 미정계수를 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$a_n = \frac{j_n(m\alpha) [\alpha j_n(\alpha)]' - j_n(\alpha) [m a j_n(m\alpha)]'}{j_n(m\alpha) [\alpha h_n^{(2)}(\alpha)]' - h_n^{(2)}(\alpha) [m a j_n(m\alpha)]'} \quad (12a)$$

$$b_n = \frac{j_n(\alpha) [m a j_n(m\alpha)]' - m^2 j_n(m\alpha) [\alpha j_n(\alpha)]'}{h_n^{(2)}(\alpha) [m a j_n(m\alpha)]' - m^2 j_n(m\alpha) [\alpha h_n^{(2)}(\alpha)]'} \quad (12b)$$

$$c_n = \frac{j/\alpha}{h_n^{(2)}(\alpha) [m a j_n(m\alpha)]' - j_n(m\alpha) [\alpha h_n^{(2)}(\alpha)]'} \quad (12c)$$

$$d_n = \frac{j/\alpha}{h_n^{(2)}(\alpha) [m a j_n(m\alpha)]' - m^2 j_n(m\alpha) [\alpha h_n^{(2)}(\alpha)]'} \quad (12d)$$

여기서, $\alpha = ka = \frac{2\pi a}{\lambda}$ 로써 파수(wave constant)를 나타내며, 유전체의 굴절률 $m = \frac{k_1}{k}$ 은 유전체가 무손실 또는 손실이냐에 따라 실수 또는 복소수로 나타내어진다. 식 (12)에서 []'은 []안에 있는 Bessel 함수의 독립변수에 대한 편미분 즉, $[x z_n$

$(x)]' = \frac{\partial}{\partial x} [x z_n(x)]$ 를 의미한다. 또한 식 (12c), (12d)에는 Wronskian 관계식 $j_n(x)[x h_n^{(2)}(x)]' - h_n^{(2)}(x)[x j_n(x)]' = -\frac{j}{x}$ 이 적용되었다. 만약, 구형 유전체가 무손실이고 자유공간상에 존재한다면

$$k_1^2 = \omega \mu_0 (\omega \epsilon_1 - j \sigma), \quad k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \quad (13)$$

이 되고, 굴절률 m 은

$$m = \frac{k_1}{k} = \sqrt{\epsilon_c} = \sqrt{\epsilon_{r1} - j \frac{\sigma_1}{\omega \epsilon_0}} = m' - j m'' \quad (14)$$

이다.

2-2 구형 도체로 정의된 우주폐기물의 전자파 산란과 산란파 에너지

우주 공간상에서 발생하는 우주폐기물을 발생 원 인별로 분류하면 크게 다음 세 가지로 나눌 수 있다^[1].

첫째, 정상 운용 중인 위성에 의한 생성 (Operation debris).

둘째, 수명이 다한 노후 위성에 의한 생성 (Deterioration debris).

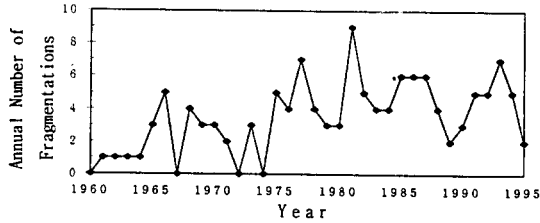
셋째, 위성의 분열 또는 파쇄(破碎)에 의한 생성 (Fragmentation debris).

이들은 위성의 궤도진입 과정이나 운용 중에 발생하는 빈 추진연료탱크나 렌즈 뚜껑, 패킹 소자, 추진 로켓의 몸체, 우주활동상에서 버려진 각종 물체 등에 의한 것과 우주 공간에서 발생하는 위성체의 분열사고 및 노후 위성의 천연 우주잔재물과의 충돌 또는 우주폐기물간의 충돌 등에 의해 발생된다(표 2)^[2].

또한, 최근 들어 위성체의 궤도 진입시 전이궤도(GTO)와 최종 궤도의 진입에 사용되는 로켓의 고

표 2. 연도별 위성체 분열사고 수

Table 2. Number of breakup events by year of occurrence.



체연료 연소과정에서 다량의 알루미늄이 분사되어 지구주위 환경에 직접적인 오염의 원인이 되고 있다. 이들 알루미늄 입자들은 고체연료의 연소율 (burn rate)을 증가시키기 위해 사용되는 산화알루미늄(Al_2O_3)의 첨가 및 연소에 의한 것으로써 이때, 비록 그 입자의 크기는 그리 크지 않지만 한번의 모터 점화로 약 10^{20} 개 정도의 알루미늄 입자가 최고 4 km/sec의 속도로 우주공간으로 광범위하게 방출된다^{[6],[7]}.

이처럼 실제 우주폐기물의 상당 수는 도체로 구성되어 있으며, 따라서 최종적으로 우주폐기물은 구형 도체로 가정한다. 이와 같은 구형 도체의 우주폐기물에 의한 전자파 산란은 앞절에서 취급한 구형 유전체의 특수한 경우로 취급될 수 있다.

우주폐기물이 구형 도체인 경우에 우주폐기물 내부의 전자계는 존재하지 않으므로 식 (10a), (10b), (10c) 그리고 (10d)의 우변은 모두 0이 된다. 따라서, 식 (12)에서 구한 구형 유전체에 대한 산란과 정규화 미정계수는 다음과 같이 간략화 된다.

$$a_n = -\frac{j_n(\alpha)}{h_n^{(2)}(\alpha)} \quad (15a)$$

$$b_n = -\frac{[\alpha j_n(\alpha)]'}{[\alpha h_n^{(2)}(\alpha)]'} \quad (15b)$$

$$c_n = 0 \quad (15c)$$

$$d_n = 0 \quad (15d)$$

이와 같은 구형의 도체 우주폐기물로부터 산란되는 산란파 에너지 W_s 는 식 (6)에서 구한 산란파 전자계 \vec{E}^s, \vec{H}^s 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$W_s = \frac{1}{2} Re \int_0^{2\pi} \int_0^\pi [E_\theta H_\phi^* - E_\phi H_\theta^*] r^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (16)$$

여기서, H_θ^*, H_ϕ^* 는 각각 H_θ 와 H_ϕ 의 켈레 복소수를 나타내고 각 전개 및 자계는 $r \gg a$ 에서 구해진 값들이다. 한편, 구좌표계 Bessel 함수의 점근적 표현에 의해 산란파 전개 \vec{E}^s 의 θ 와 ϕ 에 대한 성분은 다음 식으로 나타내어 진다.

$$E_\theta^s = \eta H_\phi^s = -\frac{j}{kr} E_0 e^{j(\omega t - kr)} \cos\phi S_2(\theta) \quad (17a)$$

$$-E_\phi^s = \eta H_\theta^s = -\frac{j}{kr} E_0 e^{j(\omega t - kr)} \sin\phi S_1(\theta) \quad (17b)$$

여기서, 진폭 함수 $S_1(\theta)$ 와 $S_2(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(\frac{a_n}{\sin\theta} P_n^1(\cos\theta) + b_n \frac{dP_n^1(\cos\theta)}{d\theta} \right) \quad (18a)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(\frac{b_n}{\sin\theta} P_n^1(\cos\theta) + a_n \frac{dP_n^1(\cos\theta)}{d\theta} \right) \quad (18b)$$

따라서, 식 (17)과 진폭 함수 $S_1(\theta), S_2(\theta)$ 에 의해 식 (16)을 다시 표현하면

$$W_s = \frac{\pi E_0^2}{2k^2 \eta} Re \int_0^\pi (|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2) \sin\theta d\theta \quad (19)$$

로 표현되며, 연계 Legendre 다항식(Associated Legendre polynomal)에서 항상 성립하는 항등식 (20)을 적용하면^[8]

$$\int_0^\pi \left(\frac{dP_n^1}{d\theta} \frac{dP_m^1}{d\theta} + \frac{1}{\sin^2\theta} P_n^1 P_m^1 \right) \sin\theta d\theta = \begin{cases} 0, & n \neq m \\ \frac{2}{2n+1} \frac{(n+1)!}{(n-1)!} n(n+1), & n = m \end{cases} \quad (20a)$$

$$\int_0^\pi \left(\frac{P_m^1}{\sin\theta} \frac{dP_n^1}{d\theta} + \frac{P_n^1}{\sin\theta} \frac{dP_m^1}{d\theta} \right) \sin\theta d\theta = 0 \quad (20b)$$

$r = a$ 인 구형 도체로 정의된 우주폐기물에 의한 $r \gg a$ 에서의 전체 산란파 에너지 W_s 는 식 (15a), (15b)의 미정계수 a_n , b_n 에 의해 최종적으로 식 (21)과 같이 구해진다.

$$W_s = \frac{\pi E_0^2}{k^2 \eta} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (21)$$

일반적으로, 산란에 의한 전파의 방사(radiation)는 산란 유효면적(Scattering cross section) Q_{sc} 에 의해 나타내어 지는데, 이 때 산란 유효면적 Q_{sc} 는 매초당 산란되는 전체 산란파 에너지 W_s 와 입사파의 에너지 밀도 P 의 비로 정의된다.

$$Q_{sc} = \frac{W_s}{P} \quad (22)$$

여기서, 입사파의 에너지 밀도 P 는

$$P = \frac{E_0^2}{2\eta} = \frac{1}{2} E_0^2 \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \quad (23)$$

와 같고, 전체 산란파 에너지 W_s 는 식 (21)에 나타내었다.

Ⅲ. 우주폐기물에 의한 전자파의 감쇠 및 위상변화

지금까지 위성통신용으로 사용되는 마이크로파 주파수 대역은 1~10 GHz로서 6/4 GHz의 C-밴드가 주로 사용되어 왔으나 최근 들어 통신량의 급증에 따라 기존에 사용하였던 주파수 대역의 할당이 포화점에 이르게 되었고 또한 이 주파수 대역을 사용하는 지상 통신망과의 혼신을 피하기 위하여 10 GHz 이상의 주파수 사용이 불가피하게 되었다. 그러나, 10 GHz 이상의 주파수 사용은 그 이하의 주파수에서 무시될 수 있었던 전파경로상의 각종 손실들에 의해 적지 않은 감쇠영향을 미치게 되어 위성통신 링크상의 신뢰도 및 성능을 저하시키게 된다.

위성통신에서의 전파전파 경로를 크게 대기 경로와 우주 경로로 나누어 생각할 때, 대기 중의 수증기, 안개, 산소, 강우, 얼음, 눈 그리고 그외 여러 종류의 가스들에 의한 대기손실은 이미 많은 연구 결과가 발표되어 있지만 우주공간상의 감쇠는 대부분 거리에 비례한 일정한 전파 자속밀도의 감쇠 정도로만 취급되어 왔다.

여기에서는 우주공간상의 일정 궤도에 균일 분포된 우주폐기물에 의한 EM파의 전파에 대한 감쇠와 위상변화를 분석함으로써, 링크버짓시 정해진 고정 감쇠값을 초과하여 발생하는 우주공간상의 우주폐기물에 의한 초과 감쇠값을 II장에서 서술한 산란파 해석 방법을 적용하여 계산하기로 한다.

거리 d 의 우주공간상에 단위 체적당 N 개의 구형 우주폐기물이 존재할 때, 이와 같은 우주공간상의 균일 분포 매질을 통과하는 EM파의 진폭은 $e^{-\gamma}$ 이 되며 이때, γ 는 감쇠상수로서 앞에서 정의한 진폭함수에 의해 표현하면 식 (24)와 같다^[3].

$$\gamma = \frac{N\lambda^2}{\pi} \text{Re}S(0) \quad (24)$$

여기서,

$$S(0) = S_1(0^\circ) = S_2(0^\circ) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n + b_n) \quad (25)$$

이다.

따라서, 우주공간상에 분포되어 있는 구형의 우주폐기물에 의한 EM파의 감쇠는

$$A = 10 \log_{10} \frac{1}{e^{-\gamma l}} = \gamma l 10 \log_{10} e \quad (26a)$$

또는

$$A = 4.343\gamma l \quad [\text{dB}] \quad (26b)$$

가 되며, 단위 길이당 감쇠도 A [dB]는 식 (27)과 같다.

$$A = 4.343 \frac{\lambda^2 N}{\pi} \text{Re}S(0) \quad [\text{dB}] \quad (27)$$

표 3. 크기별 우주폐기물의 공간밀도 분포

Table 3. Debris-size distribution Vs. number of debris with equivolumic diameter.

| Diameter of debris r (cm) | Number of debris with equivolumic diameter (numbers / km ³) | | | | |
|------------------------------|---|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 10 ⁻² | 10 ⁻¹ | 10 ⁰ | 10 ¹ | 10 ² |
| | Percent of total volume | | | | |
| 1 | 37.1 | 32.8 | 26.5 | 22.9 | 20.5 |
| 1.5 | 31.3 | 27.8 | 23.4 | 20.9 | 20.3 |
| 2 | 13.5 | 19.0 | 17.3 | 18.4 | 15.6 |
| 2.5 | 10.9 | 7.3 | 11.8 | 12.8 | 12.5 |
| 3 | 5.2 | 7.9 | 10.1 | 8.2 | 10.9 |
| 3.5 | 1.6 | 3.3 | 4.3 | 7.9 | 6.7 |
| 4 | 0.3 | 1.1 | 2.9 | 3.7 | 5.4 |
| 5 | 0.1 | 0.6 | 2.3 | 2.1 | 3.5 |
| 6 | | 0.2 | 1.2 | 1.7 | 2.0 |
| 8 | | | 0.2 | 1.1 | 1.5 |
| 10 | | | | 0.3 | 1.1 |

동일한 방법으로 구형 우주폐기물에 의한 EM파의 위상변화 Φ 를 계산하면, 파장 λ 및 진폭함수 $S(0)$ 의 허수부에 의해 식 (28)과 같이 결정된다.

$$\Phi = -\frac{\lambda^2 N}{2\pi} \text{Im}S(0) [\text{radians / unit length}] \quad (28a)$$

또는

$$\Phi = -\frac{\lambda^2 N}{2\pi} \text{Im}S(0) \frac{180}{\pi} [\text{deg / m}] \quad (28b)$$

이 된다.

IV. 분석 결과 및 고찰

이상에서 분석된 구형 도체로 정의된 우주폐기물에 의한 EM파의 감쇠 및 위상변화 결과를 고찰하기 위하여 구 소련에 의해 1988년 5월 15일 발사된 COSMOS 1943호 위성^[4]이 등방형으로 대폭발이 일어나서 고도 약 800 km 상공(LEO)에 표 3과 같

은 밀도분포로 지구주위를 우주폐기물이 고르게 분포되었다고 가정한다.

INT-ID : 1988-039A
 NAME : COSMOS 1943
 Source : Russia /USSR
 Period : 101.9 Min. (LEO)
 Inclination angle : 71.0°
 Launch date : May-15-1988
 Apogee : 855 km
 Perigee : 839 km
 RCS : 25.7167 m²

위의 가정에 대해 전체 체적에 대한 매 km당 감쇠도 A 와 위상변화량 Φ 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$A = 0.4343 \frac{\lambda^2}{\pi} \cdot 10^6 \sum pN(D) \text{Re } S(0) \quad \text{[dB / km]} \quad (29)$$

$$\Phi = - \frac{9\lambda^2}{\pi^2} \cdot 10^6 \sum pN(D) \text{Im } S(0) \quad \text{[deg / km]} \quad (30)$$

여기서, λ 는 사용 주파수의 파장 [cm], $N(D)$ 는 우주폐기물의 밀도 [numbers /km³]를 나타내며, p 는 우주폐기물의 크기별 백분율 (%)을 나타낸다. 이상의 가정 및 식 (29), (30)에 의한 분석 결과를 그림 2와 3에 보였다.

그림 2와 3은 우주폐기물이 1~10 cm의 크기로 표 2와 같이 분포할 때, 우주폐기물의 밀도 10⁻², 10⁻¹, 10⁰, 10¹ 그리고 10² [numbers /km³]에 대한 주파수 변화에 따른 감쇠도와 위상변화이다.

연구결과와 고찰을 위해 KOREASAT I, II호 방송신호(DBS)의 상향링크 주파수 14.5~14.8 GHz의 중심 주파수 14.65 GHz와 하향링크 주파수 11.7~12.0 GHz의 중심 주파수 11.75 GHz에서의 감쇠도와 위상변화를 표 4에 나타내었다.

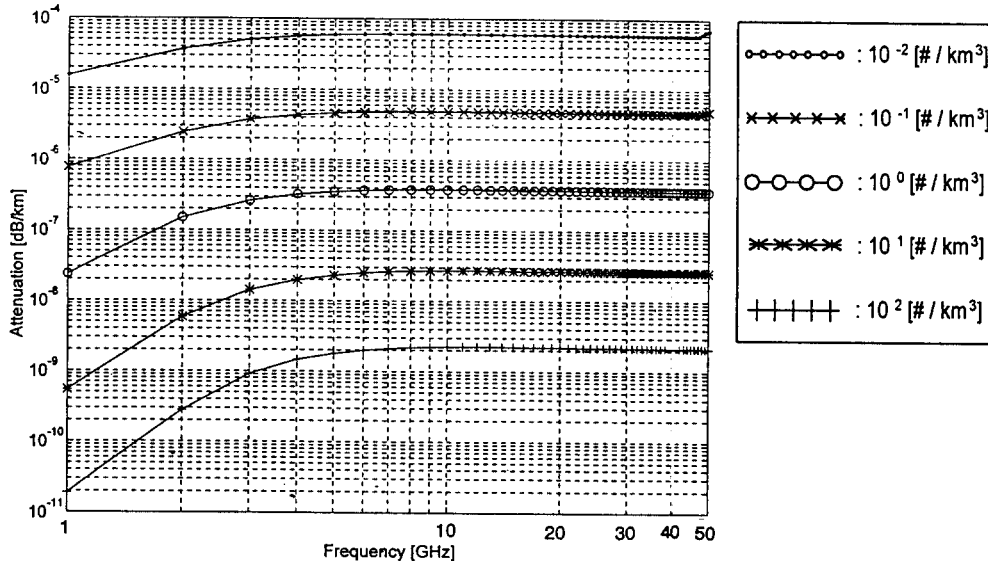


그림 2. 우주폐기물의 공간밀도별 주파수 대 감쇠 관계

Fig. 2. Frequency Vs. attenuation caused by debris with numbers of debris.

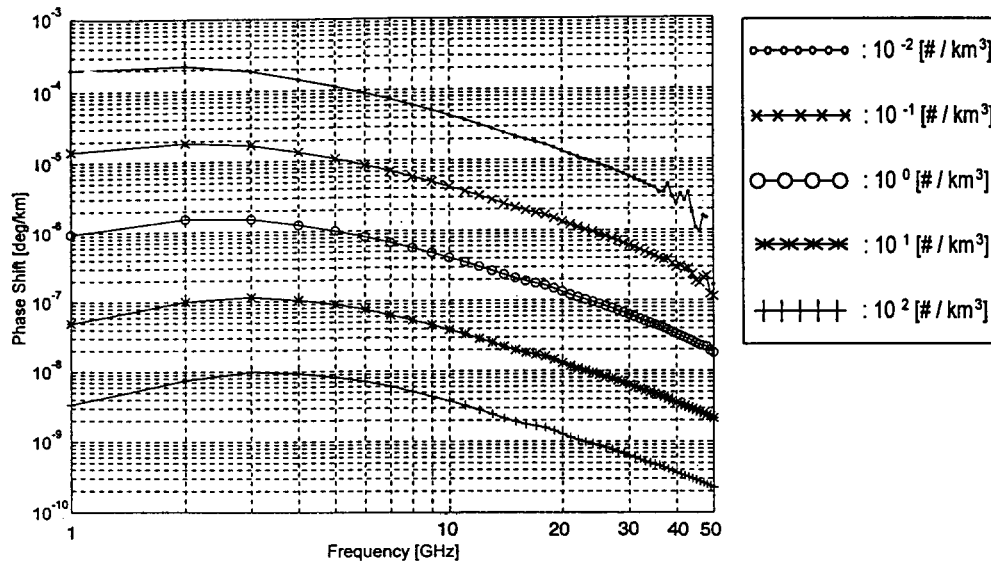


그림 3. 우주폐기물의 공간밀도별 위상변화 대 주파수 관계

Fig. 3. Frequency Vs. phase shift caused by debris with numbers of debris.

표 4. KOREASAT I, II 호 방송신호(DBS)에 대한 전파감쇠 및 위상변화

Table 4. Attenuation and phase shift for DBS signal of KOREASAT I, II.

| KOREASAT DBS 신호 | | 우주폐기물의 공간분포밀도(numbers /km ³) | | | | |
|------------------------------|-------------------|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | 10 ² | 10 ¹ | 10 ⁰ | 10 ¹ | 10 ² |
| Up-link (14.5~14.8 GHz) | 감쇠도 (dB /km) | 2.228880×10 ⁻⁹ | 2.693357×10 ⁻⁸ | 3.809765×10 ⁻⁷ | 4.807765×10 ⁻⁶ | 6.008704×10 ⁻⁵ |
| | 위상변화 (deg /km) | 1.981573×10 ⁻⁹ | 2.050122×10 ⁻⁸ | 2.171011×10 ⁻⁷ | 2.226553×10 ⁻⁶ | 2.264894×10 ⁻⁵ |
| Down-link (11.7~12.0 GHz) | 감쇠도 (dB /km) | 2.251493×10 ⁻⁹ | 2.717743×10 ⁻⁸ | 3.844387×10 ⁻⁷ | 4.848942×10 ⁻⁶ | 6.057170×10 ⁻⁵ |
| | 위상변화 (deg /km) | 2.911871×10 ⁻⁹ | 2.991644×10 ⁻⁸ | 3.167959×10 ⁻⁷ | 3.251236×10 ⁻⁶ | 3.336500×10 ⁻⁵ |

V. 결 론

우주폐기물에 의한 통신링크상의 전파전파에 대한 영향의 분석 및 예측은 끊임없이 거의 기하급수

적으로 증가하는 우주폐기물의 수를 고려할 때 매우 중요한 의미를 지니고 있다. 본 논문에서는 구형의 도체로 정의된 우주폐기물에 의한 지상국 또는 위성체로부터 송신된 전파신호의 산란 전자계를 유도하고, 산란 에너지를 분석함으로써 우주폐기물

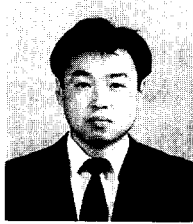
의 공간분포밀도와 크기 그리고 사용 주파수를 고려한 감쇠도와 위상변화량을 계산하였다. 우주폐기물의 공간분포밀도가 km^3 당 1개 정도 분포한다고 가정하였을 때, KOREASAT I, II호 방송신호(DBS)의 상향링크 주파수 14.5~14.8 GHz의 중심 주파수 14.65 GHz에서 감쇠도는 약 3.809765×10^{-7} dB/km, 위상변화량은 약 2.717743×10^{-7} deg/km가 되며, 하향링크 주파수 11.7~12.0 GHz의 중심 주파수 11.75 GHz에서는 약 3.844387×10^{-7} dB/km의 감쇠와 약 3.167959×10^{-7} deg/km의 위상변화가 발생됨을 분석하였다.

「궤도상 물체의 밀도가 일단 임계치를 초과하면 새로운 물체가 추가로 투입되지 않더라도 기존 부유 물체간의 상호 연쇄충돌 효과로 어느 시기에는 그 밀도가 저절로 급상승한다.」라는 이론에 근거해서⁶⁾ 우주폐기물의 수가 현재보다 약 3배 정도 누적되는 시점을 임계치 수준이라고 볼 때, 현재 추진 중인 IRIDIUM, GROBALSTAR, PROJECT-21, ODYSSEY 등 정지궤도 이하에서 운용될 수 있는 많은 위성 시스템들에 의한 우주폐기물의 수는 급속도로 증가할 것이며 10~20년 정도 후에는 그때까지 문제시 되지 않았던 우주폐기물에 의한 통신링크상의 전파 장애를 유발하게 될 것으로 본다. 따라서 위성 시스템을 설계할 때 우주폐기물에 의한 초과감쇠가 링크에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 링크버짓시 초과 감쇠값만큼 송신기 출력을 높이든지 안테나 크기를 크게 하여 실효 방사전력을 높이거나 또는 고성능 저잡음 수신기 등을 사용하여 시스템의 성능을 개선하여 최적의 시스템을 설계하기 위하여 본 연구결과는 유용한 해석방법으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Nicholas L. Johnson, and Darren S. McKnight, *Artificial Space Debris*, ORBIT BOOK COMPANY, pp. 1-24, 1987.
- [2] *Interagency Report on Orbital Debris*, Office of Science and Technology Policy, pp. 5-24, Nov. 1995.
- [3] Matthew and N. O. Sadiku, *Numerical Technology in Electromagnetics*, CRC Press, pp. 29-96, 1992.
- [4] NASA, *Satellite Situation Report*, NASA/GODDARD Space Flight Center, vol. 35, no. 6, June 30, 1995.
- [5] Robert C. Reynolds and Donald J. Kessler, "Orbital debris environment projections for space station", Proc. of the First European Conference on Space Debris, vol. ESA SD-01, pp. 337-348. Apr. 1993.
- [6] A. C. Mueller and D. J. Kessler, "The effect of particulates from solid rocket motors fired in space." *Advanced in Space Research* 5, pp. 77-86, 1985.
- [7] D. J. Kessler, "Orbital debris issues." *Advanced in Space Research* 5, pp. 3-10, 1985.
- [8] J. A. Stratton, *Electromagnetics Theory*, McGraw Hill, pp. 394-421, 1941.

이 용 민



1993년 2월 : 광운대학교 전자공학과 (공학사)
1995년 2월 : 광운대학교 전자공학과 대학원 (공학석사)
1995년 3월~현재 : 광운대학교 전자공학과 대학원 박사학위과정

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 수동부품 설계, 전파전파 및 전자기 해석

홍 완 표

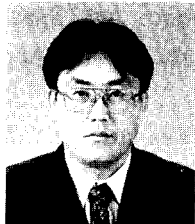


1990년 : 기술사(전기통신)
1993년 2월 : 연세대학교 산업대학원 (공학석사)
1984년~1987년 : 체신부 체신청 본부 통신정책국
1987년~1989년 : Bell Telephone

Manufacturing Co. Defense & Aerospace Depart 파견
1989년~1994년 : 체신부 통신정책실, 정보통신 진흥국 (통신사무관)
1995년~현재 : 정보통신부 정보화 기획실 초고속망 구축과
1996년~현재 : 광운대학교 전자공학과 대학원 박사학위과정

[주 관심분야] 위성통신 및 전파전파, 초고주파 회로설계

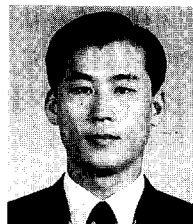
박 종 화



1988년 2월 : 광운대학교 산업대학원 전자공학과(공학석사)
1991년 8월~현재 : 광운대학교 전자공학과 대학원 박사학위 과정
1996년~현재 : 정수기능대학 전자기술과 교수

[주 관심분야] RF 및 초고주파 회로설계, 위성통신 및 마이크로파 디지털 통신

양 기 덕



1987년 2월 : 인하대학교 전자공학과(공학사)
1993년 6월 : 미국 Polytechnic Univ. 전기전자공학과 대학원 (공학석사)
1994년 3월~현재 : 아주대학교 전자공학과 대학원 박사학위 과정

[주 관심분야] 이동통신 및 위성통신 부품개발, 초고주파 부품 수치해석

나 극 환



1973년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1977년 2월 : 연세대학교 전자공학과 대학원(공학석사)
1981년 7월 : 불란서 ENSEEIHT 국립종합공과대학 전자공학과(공학박사)

1986년~현재 : 광운대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 레이더 및 위성통신