

밀리미터파 무선전송채널의 강우 전파특성 예측모델 개발

김 영 민*

Prediction model of propagation of the millimeter wave wireless transmission channels in the rain environment

Young-Min Kim*

요 약

ITU-R의 강우에 의한 교차편파 모델은 35 GHz까지만 적용가능하다. 본 논문에서는 빗방울의 형태에 따른 강우입자의 산란특성을 해석하고 실제의 강우환경에서 충분한 정확도를 가지는 교차편파에 대한 단순한 이론모델을 제안하였다. 이를 측정치 및 ITU-R 모델과 비교함으로써 밀리미터파대역까지 적용할 수 있는 교차편파 추정모델을 도출하였다.

Abstract

The ITU-R model for cross-polarization due to rain is applicable only upto 3.5 GHz. The scattering characteristics of rain drops are analyzed by an analytical model. A simple theoretical model for croee-polarization, which is accurate enough in real rainfall environments, is proposed in this paper. By comparing this with measurement data and the ITU-R, we have also derived an prediction model for rain cross-polarization applicable upto millimeter wave band.

* 부산기능대학 매카트로닉스과 진임강사

I. 서론

무선통신시스템에서 인접시스템간의 간섭계산이나 무선채널의 용량을 높이기 위한 편파다이버시티의 효율계산을 위해서는 교차편파의 영향을 정확히 예측할 필요가 있다. 강우에 의한 교차편파는 파장, 빔방울 크기분포 그리고 빔방울의 형태와 강우율에 의해 영향을 받는다.

ITU-R에서 권고하고 있는 측정치에 근거한 교차편파 예측식은 35 GHz까지만 적용가능하며[1], 현재 밀리미터파대역까지 사용할 수 있는 모델로서 구체적으로 제안된 것이 없다. 지금까지 교차편파에 대한 이론모델은 다수 발표되었으나 적용영역이 제한되거나 너무 복잡하고 또한 측정이 매우 어려운 미지의 변수들을 포함하고 있기 때문에 실제 환경에 적용하기가 어렵다[2-5].

따라서 본 논문에서는 실제의 강우환경에서 충분한 정확도를 가지는 교차편파에 대한 단순한 이론모델을 제안하고, 이를 측정치 및 ITU-R의 교차편파 모델과 비교함으로써 밀리미터파대역까지 적용할 수 있는 교차편파 추정모델을 도출하였다.

II. 빔방울 형태에 따른 강우입자의 산란특성

그림 1~3은 주파수가 12.25, 19.45, 40 GHz 일 때의 구형(Mie), 편구형(Spheroid) 및 P-P빗방울의 크기에 따른 산란특성을 비교한 것이다. 여기서 12.25 GHz와 19.45 GHz는 우리나라 위성통신에 사용되는 주파수이며, 40 GHz는 ITU-R 모델을 적용시킬 수 있는 한계주파수이다. 그리고 구형 빔방울의 반경은 식 (1)에 주어진 실효반경이며, 편구형 빔방울의 단축 와 장축의 축비 τ 는

$$\tau = a/b = 1 - 0.41a_0 / 4.5 \quad (1)$$

로 주어진다. 이때 a 와 b 는 각각 , 으로 주어진다.

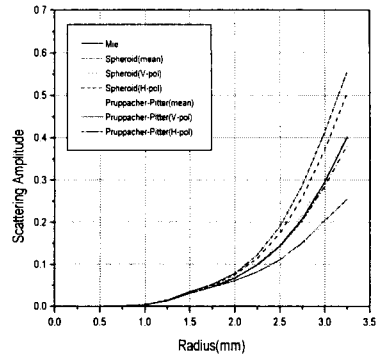


그림 1. 구형, 편구형 및 P-P빗방울의 반경에 따른 산란특성($f = 12.25$ GHz)

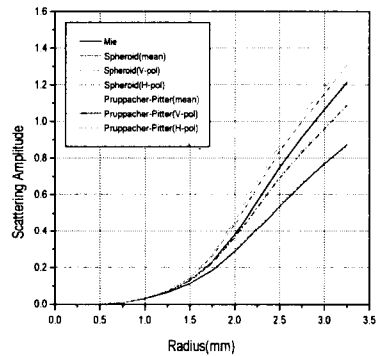


그림 2. 구형, 편구형 및 P-P빗방울의 반경에 따른 산란특성($f = 19.45$ GHz)

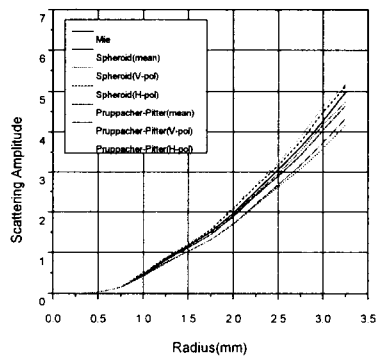


그림 3. 구형, 편구형 및 P-P빗방울의 반경에 따른 산란특성($f = 40$ GHz)

빗방울의 반경이 증가하면 단축과 장축의 길이의 차이가 증가하므로 수평편파와 수직편파에 대한 산란계수(전방산란 크기함수)의 편차가 커진다. 그리고 주파수가 증가할수록 파장에 대한 상대적인 축간 길이 차이가 커지기 때문에 두 편파에 대한 산란계수의 편차도 역시 증가한다. 두 편파의 평균치와 구형 빗방울의 산란계수를 비교해 보면 12.25 GHz 인 경우에는 구형 빗방울의 산란계수는 평균치와 거의 같으나 19.45 GHz와 40 GHz인 경우에는 수평편파쪽으로 치우쳐져 있으며 주파수에 따라 그 차이가 증가한다. 또한 40 GHz인 경우를 제외하고는 편구형 빗방울과 P-P빗방울의 수직편파에 대한 산란계수는 같고 수평편파의 경우는 약간의 편차를 보이고 있으며, 40 GHz인 경우에는 두 편파에 대한 산란계수 모두가 편차를 보이고 있다.

III. 교차편파 모델

1. ITU-R 모델

먼저 ITU-R Rec. 530-5에서 권고하고 있는 경우에서의 교차편파모델은

$$XPD = U - V \log CPA \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

로 주어진다[1]. 위 식에서 CPA는 ITU-R Rec. 530-5에서 권고하는 동일편파에 대한 강우감쇄(co-polarized rain attenuation)(dB)를 나타내며 XPD와 동일한 시간율을 갖는다. 양각이 적은 경우 수평 또는 수직편파에 대해서

$$U = U_0 + 30 \log f \quad (3)$$

$$V = 12.8 f^{0.19} \quad ((8 \leq f \leq 20 \text{GHz}) \\ = 22.6 \quad (20 \leq f \leq 35 \text{GHz}))$$

로 근사된다. 또한 의 하한치는 9 dB이며 강우감쇄가 15 dB 이상일 때 의 평균치는 15 dB이다. 그리고 식 (2)에서 CPA는 원편파에 대한 값을 사용하도록 권고하고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 35 GHz 이상의 밀리미터파대역에 대해서는 교차편파에 대한 예측식이 없다.

2. 교차편파 이론모델

그림4 에서 편구형 빗방울의 경사각(canting angle) θ (, 그리고 빗방울의 회전축과 회전축에 수직인 방향에 대한 전방산란크기함수를 각각 T_{II} , T_{I} 라 하자.

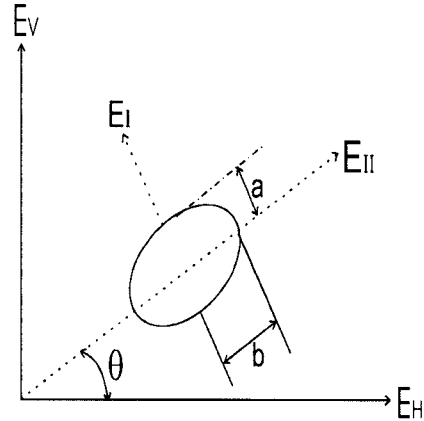


그림 4. 경사각이 있는 편구형 빗방울

단일산란을 가정하고 각 회전축 방향으로 편파된 전자파에 대한 등가의 투과계수를 T_{II} , T_{I} 라 할 때 수평, 수직편파된 파에 대한 표현식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_{oH} \\ E_{oV} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{II} & 0 \\ 0 & T_I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{IH} \\ E_{IV} \end{pmatrix} \quad (4)$$

위 식에서 E_{IH} , E_{IV} 는 입사파 전계의 수평, 수직성분을 나타내고 E_{oH} , E_{oV} 는 강우입자들을 통과한 전계의 수평, 수직 성분을 나타낸다. 그리고 등가의 투과계수 T_{II} 와 T_I 은 빗방울의 크기가 균일할 때

$$T_{II} = 1 - 2\pi N d S_{II}(0) / k^2 ,$$

$$T_I = 1 - 2\pi N d S_I(0) / k^2 \quad (5)$$

로 주어진다[8]. 여기서 는 전파상수, 은 단위체적당 강우입자의 수를 나타낸다. 식 (4)을 간략히 나타내면

$$\begin{pmatrix} E_{oH} \\ E_{oV} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{III} & T_{IV} \\ T_{VI} & T_{VII} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{IH} \\ E_{IV} \end{pmatrix} ,$$

$$T_{III} = T_{II} \cos^2 \theta + T_I \sin^2 \theta ,$$

$$T_{VV} = T_1 \cos^2 \theta + T_{11} \sin^2 \theta, \tag{6}$$

$$T_{HV} = T_{VH} = (T_{11} - T_1) \sin 2\theta / 2$$

로 표현된다.

경사각 θ 가 평균, 표준편차 σ 인 정규분포를 한다고 가정할 때 투과계수들에 대한 통계적 평균은 각각

$$\langle T_{HH} \rangle = (T_{11} - T_1) \langle \cos^2 \theta \rangle + T_1$$

$$= (T_{11} - T_1) (e^{2\sigma^2} \cos 2\theta_0 + 1) / 2 + T_1 \tag{7}$$

$$\langle T_{VV} \rangle = (T_1 - T_{11}) (e^{2\sigma^2} \cos 2\theta_0 + 1) / 2 + T_{11} \tag{8}$$

$$\langle T_{HV} \rangle = \langle T_{VH} \rangle = (T_{11} - T_1) \langle \sin 2\theta \rangle / 2$$

$$= (T_{11} - T_1) e^{2\sigma^2} \sin 2\theta_0 / 2 \tag{9}$$

가 된다. 따라서 수평 또는 수직편파로 입사한 경우의 교차편파 θ 에 대한 표현식은 다음과 같이 주어진다.

$$XPD_{VH} = 20 \log \left| \frac{\langle T_{VH} \rangle}{\langle T_{HH} \rangle} \right|$$

$$= 20 \log \left| \frac{\Delta T e^{-2\sigma^2} \sin 2\theta_0}{\Delta T e^{-2\sigma^2} \cos 2\theta_0 - T_0} \right| \tag{10}$$

$$XPD_{HV} = 20 \log \left| \frac{\langle T_{HV} \rangle}{\langle T_{VV} \rangle} \right|$$

$$= 20 \log \left| \frac{\Delta T e^{-2\sigma^2} \sin 2\theta_0}{\Delta T e^{-2\sigma^2} \cos 2\theta_0 + T_0} \right| \tag{11}$$

윗 식에서 θ 는 각각

$$\Delta T = (T_1 - T_{11}) / 2$$

$$= \frac{\pi N d}{k^2} [S_{11}(0) - S_1(0)]$$

$$= [(A_{11} - A_1) + j(\phi_{11} - \phi_1)] d / 2, \tag{12}$$

$$T_0 = (T_1 + T_{11}) / 2$$

$$= 1 - \frac{\pi N d}{k^2} [S_{11}(0) + S_1(0)]$$

$$= 1 - [(A_{11} + A_1) + j(\phi_{11} + \phi_1)] d / 2 \tag{13}$$

로 정의된 변수이다. θ 는 각각 강우감쇄계수 (neper/m) 와 위상계수(rad/m)를 나타 내며, 강우감쇄계수의 경우는 통상 을 곱해서 dB/km 단위로 사용된다. 실제 빔방울의 크기분포가 연속함수로 주어질 때 식 (12)의 θ 는 다음과 같이 주어진다.[8]

$$A_{i,11} + j\phi_{i,11} = \frac{2\pi}{k^2} \int_0^{D_m} S_{i,11}(0) N(D) dD \tag{14}$$

여기서 θ 는 빔방울의 밀도함수로서 는 직경이 θ 와 $\theta + \Delta\theta$ 에 분포하는 단위체적당 빔방울의 수를 나타내며, θ 은 빔방울의 최대 직경이다.

교차편파성분이 상당히 적은 경우 식 (13)은 다음과 같이 근사할 수 있으며 아래에 보인 바와 같이 통상의 강우환경에서 충분한 정확도를 가진다.

$$XPD_{VH} \approx XPD_{HV} \approx 20 \log(e^{-2\sigma^2} \sin 2\theta_0 / |\Delta T|) \tag{15}$$

그럼 5에서 알 수 있듯이 θ 는 거의 같으며, 단일산란을 가정한 근사모델에 의한 XPD가 다중산란을 고려한 XPD모델과 일치하거나 θ 의 평균치와 같음을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 식 (15)에 주어진 표현식을 XPD에 대한 이론모델로 제안하며, 다음 절에서 밀리미터파 대역까지 적용가능한 교차편파 추정모델의 도출을 위한 기본 모델로 사용하고자 한다.

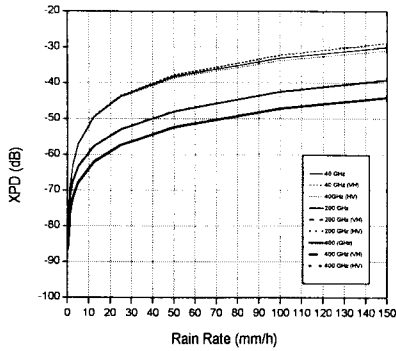


그림 5. 교차편파에 대한 이론모델의 비교 (Laws-Parson 분포)

IV. 밀리미터파대역까지 적용가능한 교차편파 추정모델

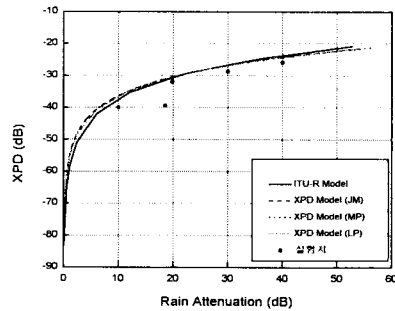
식 (2)에 주어진 ITU-R의 교차편파 모델은 35 GHz 이하에서만 유효하며, 그림 6에 보인 것처럼 유효영역에서는 측정치와 대체로 잘 일치하고 있다. 본 논문에서는 전술한 이론모델(식 (15))에서 주파수와 무관한 변수인 ω 을 초고주파대역의 ITU-R 모델 및 기존의 측정치와 잘 일치하도록 선택하고 이 값을 사용한 이론모델을 밀리미터파대역 교차편파모델로 제시하고자 한다.

이렇게 도출된 모델을 밀리미터파 대역까지 적용시킬 수 있는 근거는 식 (15)에 주어진 교차편파 모델에서 빔방울 크기분포 (식 (12)과 (14) 참조)가 밀리미터파대역까지 적용가능 하면(6) 교차편파 모델도 밀리미터파대역까지 적용시킬 수 있고, 전술한 ω 값은 주파 수와 무관하기 때문이다.

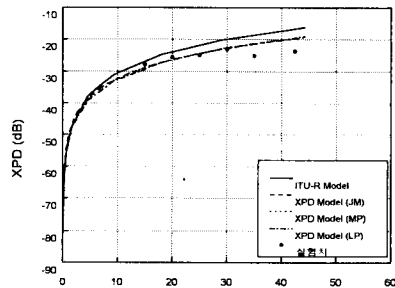
그림 6은 강우감쇄(CPA)에 따른 교차편파(XPD)를 보인 것으로 =10(, =40(일 때 주파수 30.9, 17.71 GHz에서 ITU-R 모델과 측정치를 잘 만족시키고 있음을 알 수 있다. 그림 6에서 JM, MP, LP는 이론 모델에 사용된 빔방울의 크기분포로서 각각 Japanese Model, Marshall-Palmer, Laws-Parsons 분포를 나타내며

[4-7], JM은 일본의 밀리미터파대역의 측정치로부터 도출된 빔방울의 크기분포로써 밀리미터파대역까지 적용 가능하나 MP와 LP는 40 GHz이상에는 적용시킬 수 없다. 그림 3에서 세 분포를 모두 보인 이유는 약 40 GHz 이하에서는 강우감쇄(CPA)나 교차편파가 서로 다른 빔방울 크기분포에 대해서도 모두 같은 값을 가짐을 보이기 위한 것이다.

강우환경에 따른 교차편파값은 본 논문에서 제시한 교차편파모델(식 (15)에 ω 를 사용)에 적절한 빔방울 크기 분포를 사용하면 구할 수 있다.



(a) 30.9 GHz



(b) 17.71 GHz

그림 6. 교차편파에 대한 이론모델과 ITU-R 모델 및 측정치와의 비교

그림 7은 강우율 50 mm/h와 100 mm/h에 대해 주파수에 따른 교차편파특성을 비교한 것이다. 그림 7에서 JM과 NEW는 각각 본 논문에서 제안한 XPD모델에 빔방울 크기분포로써 JM분포

$$N(D) = 1.73 \times 10^4 R^{-0.16} e^{-\Lambda D}, \quad (\Lambda = 5.11 R^{-0.25}) \quad (16)$$

와 본 연구팀에서 국내환경에 적합한 모델로 제안한

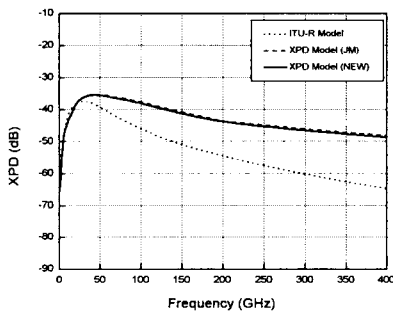
빗방울 크기분포(6)

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D}, \quad (\Lambda = 6.6R^{-0.33})$$

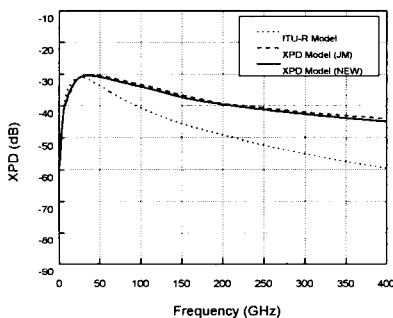
$$N_0 = 4.86R / [\Lambda^{-4} - (\Lambda + 0.582)^{-4}] \quad (17)$$

를 사용한 것이다. 그리고 ITU-R은 식 (2)에 주어진 ITU-R모델로서 CPA의 계산에는 식 (17)을 사용하였다.

식 (16)와 (17)에 주어진 빗방울 크기분포에 대한 강우감쇄(CPA)값은 약 40 GHz이상에서 차이가 나며, 100 GHz 이상에서는 약 5 dB정도의 차이를 보이나 (6), 교차 편파값은 거의 같다. 그리고 ITU-R모델과 본 논문에서 제시한 모델을 비교해 보면 약 40 GHz 이하에서는 차이가 별로 없으나 주파수가 증가할수록 그 차이는 매우 커진다.



(a) R = 50 mm/h



(b) R = 100 mm/h

그림 7. ITU-R 모델과 제안된 XPD 모델의 주파수에 따른 특성 비교

V. 결론

ITU-R의 교차편파모델은 실험식으로서 35 GHz 까지 만 적용가능하다. 본 논문에서는 실제 강우환경에서 400GHz까지 충분한 정확도를 가지면서도 단순한 교차 편파에 대한 이론 모델을 제안하였다.

교차편파의 이론모델은 빗방울의 크기분포와 빗방울의 경사각의 평균() 및 분산()의 함수이다. 이론모델은 빗방 울 크기분포가 밀리미터파대역까지 적용가능하면 교차편 파모델 역시 밀리미터파대역까지 적용할 수 있다. 그리고 와 은 주파수와 무관한 함수이다. 본 논문에서는 40 GHz 이하 주파수대역에서의 측정치 및 ITU-R모델과 비 교하여 이와 잘 일치하는 와 값을 구하고 이를 토대로 밀 리미터파대역까지 적용가능한 교차편파 추정모델을 제시 하였다.

ITU-R 모델은 예상한 바와 같이 약 40GHz이상에서 본 논문에서 제안한 모델과 큰 편차를 보였다. 본 논문에 서 제안한 추정모델은 400GHz까지 사용할 수 있으며, 앞으로 밀리미터파대역의 교차편파에 대한 측정치가 얻어 지면 보다 정확한 교차편파 추정이 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] ITU-R, "Aspects Relative to the Terrestrial Fixed Service," Rec. 530-5, 1994.
- [2] T. Oguchi and Y. Hosoya, " Scattering Properties of Oblate Raindrops and Cross Polarization of Radio Waves due to Rain(Part II) Calculation at Microwave and Millimeter Wave Regions," J. Radio Research Lab., vol. 21, no. 105, pp. 191-259, 1974.

[3] T. S. Chu, "Rain-Induced Cross-Polarization at Centimeter and Millimeter Wavelengths," Bell Sys. Tech. J., vol. 53, no. 8, pp. 1557-1579, 1974.

[4] W. L. Nowland, R. L. Olsen, and I. P. Shkarofsky, "Theoretical Relationship between Rain Depolarization and Attenuation," Electron. Lett., vol. 13, no. 22, pp. 676-678, 1977.

[5] D. A. de Wolf, "Simplified Analysis Line-of-Sight Propagation Through Rain," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 40, no. 8, pp. 912-919, 1992.

[6] 조삼모, 김양수, 백정기, 이성수, 김혁제, "국내환경에 적합한 밀리미터파대역에서의 강우감쇠 추정," 한국통신학회논문지, 제23권, 제7호, pp.1755-1763, 1998.

[7] J. O. Laws and D. A. Parsons, "The Relation of Raindrop-Size to Intensity," Trans. American Geophy. Union, vol.24, pp.452-460, 1943.

[8] J. S. Marshall and W. M. K. Palmer, "The Distribution of Raindrops with Size," J. Meteorol., vol.5, pp.165-166, 1948.

저자소개



김 영 민
 86.2. : 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 95.2. : 동아대학교 전자공학과 (공학석사)
 00.2. : 동아대학교 전자공학과 (공학박사)
 87.6. ~ 92.10. : 삼성항공 (주) KFP 생산기술부
 96.3. ~ 98.2. : 동아대학교 부설 정보통신연구소 특별연구원
 97.2. ~ 현 : 창원, 부산 기능대학 메카트로닉스과 전임강사