
유성 버스트 통신 경로의 무선 신호 특성 해석

김병철* · 미하일 티닌*

Numerical Simulation of Radio Signal Characteristics in Meteor Burst Radio Channel

Byoung-Chul Kim*, Mikhail V. Tinin*

요 약

유성버스트 통신로 해석에 사용되는 공식은 일반적으로 트레일에 대해 전파를 입사 후 반사된 전파의 특성 값을 이용하여 얻을 수 있다. 수치해석 시뮬레이션은 전계의 복소 공간 구조에서 나타낸다. 전계 강도에 대한 시작용은 비정적 모델을 연산하여 얻을 수 있다. 이러한 시작용은 기본적으로 유성 트레일의 매개 변수에 따라 변화하고 또한 이는 단일 산란시 신호 강도의 시종속에 많은 변수가 있다는 것을 나타낸다. 실제적으로 저밀도의 유성 트레일에서 사용하는 근사 매개 변수는 고밀도 유성과 같이 지속시간이 오래 유지되는 경우에도 적용이 가능하다.

ABSTRACT

The formulas taking into account the fundamental features of a meteoric radio propagation are obtained. Numerical simulation analysis has shown complex space structure of a field. Time behavior of intensity are researched taking into account nonstationary model. It is shown, this behavior essentially depends on parameters of a meteor trail, and that there is large variety of time dependencies of the signal intensity at the single scattering. In particular, at appropriate parameters of a meteor underdense trail it is possible large duration meteor bursts with which usually refer to an overdense meteor propagation.

키워드

Meteor, Overdense, Underdense, MBC, MBS

1. 서 론

우주진이 낙하하고 대기권에 돌입하면 가열 증발되면서 유성적(Meteor Trail)을 남긴다. 이때 발생하는 유성의 양은 전체 질량에 반 비례한다. 입자의 크기가 작은 유성은 대체로 100-120Km의 높

이에서 소실되면서 전리 기체주를 형성한다. 유성이 발생시키는 전리는 대기권에서 산란을 일으키므로 통신에 이용할 수 있는데 사용주파수는 50 MHz 대역을 사용한다[1-2]. BLOS(Beyond Line of sight) 통신은 일반적인 전리층 반사에 의해 시간적으로 변동되는 전리층 매질의 비균질성(Inhomo

*국립 밀양대학교 정보통신공학부

geneity)에 대해 산란이 발생하여 가능하다. 특히, 남, 북극의 전리층에서 다량 관찰된다. 유성 트레일에 의해 생성된 비균질성은 전리층의 비균질성과는 다르다. 유성에서는 성질이 강하고 주 축의 지향은 지구의 자장계에 종속이 되는 것이 아니라 자전으로 인한 지구와 유성의 상대적인 동적 방향이 일치한다. 유성 트레일의 길이는 다른 산란 매커니즘의 공간 선택성보다 더 확정적인 결과를 가져오므로 한편으로 이러한 특징을 이용하여 기존 산란 방식을 사용하여 도출하였으나 이는 유성의 길이가 길어질 경우에 적용하는 것은 어렵다. 기존에 유성 버스트 신호의 시공간 구조에 대해 보다 실질적이며 충실한 해석은 없었다. 가변 데이터 통신 속도를 가진 적응 유성 통신 시스템의 통신은 MBS(Meteor Burst Scatter) 해석의 필요성을 요구하게 되었다.

기존의 유성에 대한 반사계산법에서, 유성 트레일은 저밀도(Underdense)와 고밀도(Overdense)로 나뉜다[1-2, 6]. 선형 밀도 감소를 가진 저밀도 트레일의 산란 연산법에 대해 단일 산란 이론을 사용한다[7]. 그리고 보다 큰 밀도를 가진 고밀도 트레일에 산란연산법에 대해서는 기하광학적 방법으로 접근 할 수 있다[8]. 대부분의 경우 저밀도 트레일에 대한 산란이 빈번하게 관찰되고 있다[9]. 그러므로 본 논문은 저밀도 트레일을 기초로 고려한다.

II. 비균질성의 단일 산란

단일 산란 이론에서 산란파의 필드를 섭동 이론에 적용시켜 나타낸 파동방정식의 해에 대한 첫번째 근사는 다음과 같다.

$$U_1(\vec{r}) = k^2 \int_V \tilde{\epsilon}(\vec{r}') U_0(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}') d^3r' \quad (1)$$

여기에서는 $U_0(\vec{r})$ 는 입사파 즉, 비균질성이 없는 파의 전개이다. $G(\vec{r}, \vec{r}')$ 은 균질한 파이며 그린 함수이다. $k=2\pi f/c$ 는 파동수, c 는 자유공간에서의 광속도, $\tilde{\epsilon}(\vec{r}')$ 는 비균질성의 유전율이고 유성 트레일의 전자 집중도와 유전율과의 결합은 SI시스템에서의 관계에 의해서 결정된다.

$$\tilde{\epsilon}(\vec{r}) = -\frac{80.8}{f^2} N(\vec{r}) \quad (2)$$

f 는 송신기의 동작 주파수, $N(\vec{r})$ 는 전자 밀도이다. 자유공간에서 입사파 $U_0(\vec{r})$ 과 그린함수는 구형파와 유사하다. 그러므로 기존의 비 균질성을 나타내는 식(2)에 의한 식(1)은 산란파에 의해 전계를 나타낸다. 하지만 식(1)을 이용한 계산이 오히려 불편할 수도 있고 프라운호퍼(Fraunhofer) 영역과 같이 수신기와 송신기가 비균질 매질로부터 충분히 떨어져 있을 경우 식은 더욱 단순화 된다. 또한 이러한 영역에서 입사각과 같이 비균질성으로 제한된 그린함수의 위상 지연은 대부분 선형적이다. 이런 관점에서 원전계 영역에 대해 다음을 구할 수 있다[3].

$$U_1(\vec{r}) = \frac{k^2 \pi^2 A}{r_o r} \phi_{\epsilon_3}(\vec{Q}) \exp\{ik\psi\} \quad (3)$$

여기서

$$\phi_{\epsilon_3}(\vec{Q}) = (2\pi)^{-3} \int \tilde{\epsilon}(\vec{r}') \exp\{-i\vec{r}' \cdot \vec{Q}\} d^3r' \quad (4)$$

식(3)는 좌표 원점에 위치하는 비균질성의 삼차원 스펙트럼이다. \vec{r} 과 \vec{r}_o 는 수신기와 송신기의 좌표, 그림 1에서 보는 바와 같이 r 과 r_o 는 비균질 매질로부터 송신기와 수신기 사이의 거리이다.

$\psi = r + r_o$ 는 송신기에서 비균질 매질까지, 그리고 비균질 매질에서 수신기까지 위상 경로이다. A 는 송신전력과 송신 안테나의 지향성 다이어그램에 의해 정의된 입사 구형파의 크기이다.

$$\vec{Q} = -k \left[\frac{\vec{r}}{r} + \frac{\vec{r}_o}{r_o} \right] \quad (5)$$

식(5)는 산란 벡터이다. 식(3)의 적용 조건은 범위와 파장이 1~5km가 되는 프레즈넬(Fresnel) 영역의 크기에 대해 비균질매질의 전체 크기가 작은 경우이다. 유성 트레일의 특징은 20~30km에 이르는 트레일의 길이에 있다. 그러므로 트레일에 산란된 전계를 얻기 위한 식(3)의 적용은 부적합하다.

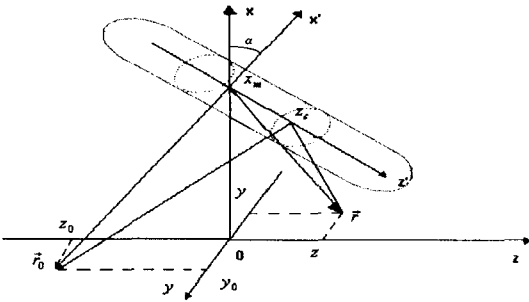


그림 1 유성버스트 신호
Fig 1. Geometry of the problem

식(1)은 식(3)의 적용 조건을 만족하지 못할 경우 즉, 비균질성이 근 전계영역에 존재할 경우에 고려된다[10,11]. 유성 전파 전파의 특징은 유성체의 부피에 있다. 만일 1~100m 정도의 횡단 유성 트레일의 크기들이 원전계 영역의 조건을 만족하면, 25km 정도의 종단 크기는 이미 근전계영역에 대응하게 된다. 본 논문에서는 약이방성 비균질 매질에서 식(3)에 의해 표현된 산란에 대응한 강이방성 비균질 매질에서의 산란이므로 이를 전파 산란체(Radio Scatter)이라 한다. 유성트레일을 고려할 때 강이방성 비균질성 매질상에서 산란시 식(1)의 분석을 수행한다. 트레일의 내부에 원점을 가지고 비균질성의 장축을 z축으로 하는 기본 좌표 시스템 x, y, z를 생각하자. 원전계 영역에서 트레일의 횡단 크기에 대해 식(1)의 결과인의 $\vec{\rho}' = (x', y')$ 횡단 좌표의 적분은 푸리에 변환 정도로 용이하다. 물론 모든 좌표상이 아니라 단지 x', y' 에 대한 것이다. z' 축에 대한 적분은 정재적 위상 방법에 의해 계산했다[10]. 이 방식은 비균질성의 수가 프레즈넬 영역의 수보다 많을 경우에 일치한다.

$$U_1(\vec{r}) = A \sqrt{\frac{2}{\Delta}} \frac{(\pi k)^{3/2}}{|\vec{r} - z_c'| |z_c' - r_0|} \cdot \Phi_{e_2}(\vec{Q}_2(z_c')) \exp\{ik\Psi_c\} \quad (6)$$

여기서

$$\Phi_{e_2}(\vec{Q}_2) = (2\pi)^{-2} \int \tilde{\epsilon}(\vec{\rho}') \exp -i\vec{\rho}' \cdot \vec{Q}_2 d^2\rho' \quad (7)$$

는 비균질성의 2차원 스펙트럼이다.

$$\Psi_c = \sqrt{(\rho' + \rho_0')^2 + (z' - z_0')^2} \quad (8)$$

$$\Delta = \left(\frac{1}{\rho'} + \frac{1}{\rho_0'}\right) \left[1 + \left(\frac{z' - z_0'}{\rho' + \rho_0'}\right)^2\right]^{-3/2} \quad (9)$$

$$\vec{Q}_2(z_c) = k \left[1 + \left(\frac{z' - z_0'}{\rho' + \rho_0'}\right)^2\right] \quad (10)$$

$$z_c' = \frac{z' \rho_0' + z_0' \rho'}{\rho' + \rho_0'} \quad (11)$$

여기서, $\rho' = |\vec{\rho}'| = \sqrt{x'^2 + y'^2}$, $\rho_0' = |\vec{\rho}_0'| = \sqrt{x_0'^2 + y_0'^2}$ 이다.

III. 비균질 모델

유성트레일의 모델은 식(12)의 정규분포를 가진다.

$$N(\vec{r}) = N_m \exp\left\{-\frac{\rho'^2}{2 l_{\perp}^2} - \frac{(z_m - z')^2}{2 l_{\parallel}^2}\right\} \quad (12)$$

여기서 l_{\perp} , l_{\parallel} 는 비균질의 횡, 종축의 크기, z_m 은 z' 축에서의 최대 좌표값이다. 원통형으로 계층화된 트레일의 일반적인 모델[7-8]에 비하여, 여기서는 축 z를 따라 트레일의 유한한 범위를 고려한다.

식(12)의 모델은 스펙트럼을 쉽게 찾기 위해 편리하다. 식(6)에서 식(12)의 2차원 스펙트럼으로 치환하여 산란파의 자장을 표현한다. 자장이 구해지면 수신기에 입력에서 적당한 전력과 산란된 성분의 세기를 구하는 것이 가능하다. 식(6), 식(12)를 이용하여 강 이방성에 대해 구한다.

$$P_r = P_i G_r R_i I(\vec{r}) \quad (13)$$

여기서

$$I(\vec{r}) = \left(\frac{80.8 \pi l_m}{c^2 r_o r}\right)^2 \frac{\lambda^3}{\Delta} \exp\left\{-\frac{z_c'^2}{l_{\parallel}^2} - Q_2^2 l_{\perp}^2\right\} \quad (14)$$

이다. $I(\vec{r})$ 는 감쇠된 세기, P_r 는 산란신호의 수신전력, P_t 는 방사된 송신전력, G_r 과 G_t 는 송수신 안테나의 이득, λ 는 파장, $2\pi N_m \ell_{\parallel}$ 는 선형 전자 밀도의 최대값이다. 식(15)는 함수의 최대값이다.

$$q(z') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} N(\vec{\rho}', z') d^2 \rho' = q_m \exp\left\{-\frac{z'^2}{\ell_{\parallel}^2}\right\} \quad (15)$$

약이방성에 대한 식은 (3)에 의해 구해진다.

$$I(\vec{r}) = \left(\frac{80.8\pi q_m}{c^2 r_o r}\right)^2 2\pi \lambda^2 \ell_{\parallel}^2 \exp\{-\vec{Q}l\}^2 \quad (16)$$

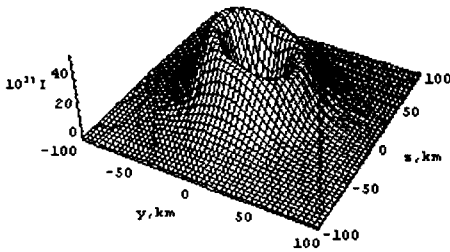


그림 2 강이방성 비균질성에 산란된 진행 전파의 전계강도의 공간 분포

Fig. 2 A Intensity space distribution for wave forward scattered on strongly anisotropic inhomogeneity

여기서 $\vec{Q}l$ 는 식 (17)과 같다.

$$(\vec{Q}l)^2 = k^2 \left\{ \ell_{\perp}^2 \left[\frac{\rho'^2}{r^2} + \frac{\rho_o'^2}{r_o'^2} + 2 \frac{x'x'_o + y'y'_o}{r_o r} \right] + \ell_{\parallel}^2 \left[\frac{z'^2}{r^2} + \frac{z_o'^2}{r_o'^2} + 2 \frac{z'z'_o}{r_o r} \right] \right\} \quad (17)$$

식(14), (16)은 좌표계 x', y', z' 에 대해 구해진다. 그림 1에서 z' 는 모서리 부분에서 지구의 표면에 대한 기울기이고, y' 축은 지구 표면과 평행을 이룬다. 이 좌표계를 α 각도 만큼 회전하고 x_m 높이 만큼 내리면, 지구 좌표계 x', y', z' 와 통하고 다음 식과 일치한다.

$$\begin{aligned} x' &= (x - x_m) \cos \alpha + z \sin \alpha \\ z' &= z \cos \alpha - (x - x_m) \sin \alpha \\ y' &= y \end{aligned} \quad (18)$$

III. 산란 필드의 수치해석

수치해석시, 트레일의 횡단부분의 감쇠된 전계강도 분포 $I(\vec{r})$ 를 고려 한다. 이를 위해 각도, $\alpha = \pi/2, y_m = 0, z_m = 0, x_m = 100$ 지점에 비균질의 중심을 위치시키고 그 지점의 소스는 $x_o = 0, y_o = 40km, z_o = 0$ 로 선택한다. 감쇠된 전계강도의 분포는 $x=200km$ 상공 즉, 비균질 매질의 후면에서 고려한다.

그림2는 $\alpha = 90^\circ, \lambda = 6m, q_m = 10^{13} m^{-1}, l_{\perp} = 1m, l_{\parallel} = 30km, x_o = 0, z_o = 0, y_o = 40km, x = 200km$ 일 경우 식(14)의 결과이다. 그림 3은 $l_{\parallel} = 30km$ 인 비균질성의 세로 크기를 제외하고 같은 매개변수값으로 볼 수 있는 약이방성의 경우에 대한 식(15)의 결과이다. 복잡한 전계 강도 분포는 강이방성 산란과 같은 특징을 나타낸다. 송신기와 수신기의 높이가 '0' 일 경우 지구 표면에서 산란된 자장에 대한 수치 해석을 한다. 유성 트레일의 방향은 지표면과 평행($\alpha = 0^\circ$)하고, 다른 트레일에 대한 매개변수는 위의 예와 동일하다. 소스는 $z_o = -500km, y_o = 0$ 의 좌표 지점에 위치한다. 비균질 매질의 중심은 $x + m = 100km, z_m = 0, y = 0$ 에 위치한다. 이 매개변수로부터 그림 4에 나타낸 감쇠 전계 강도 분포를 구한다. 그림 4의 감소밀도분포는 복잡한 공간을 나타낸다. 이런 다양한 크기의 공간도의 변화와 트레일의 조합으로 광범위한 시간 의존성을 가지게 된다. 특정 시간의 신호 강도의 변화를 구하기 위해 유성이 $z_m = z_{m0} + vt, x = x_m, y = 0$ 속도 v 인 직선을 따라 이동한다고 가정하자. 짧은 길이의 전파 산란은 이러한 가정을 전제로만 설명할 수 있다. 비균질의 크기가 시간 $\ell_{\perp} = l_{\perp 0}^2 + 4D_{\perp}t, \ell_{\parallel} = \ell_{\parallel 0} + 4D_{\parallel}t$ 로 변화한다는 가정 외에 횡축과 종축상의 확산 계수 D_{\perp} 와 D_{\parallel} 을 가진 모든 좌표계에서 비균질성의 확산을 고려할 수 있다.

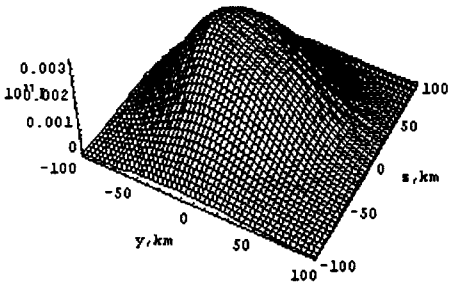


그림 3 약이방성 비균질성에 산란된 진행전파에 대한 전계강도의 공간 분포
Fig. 3. A intensity space distribution for wave forward scattered on weakly an isotropic inhomogeneity.

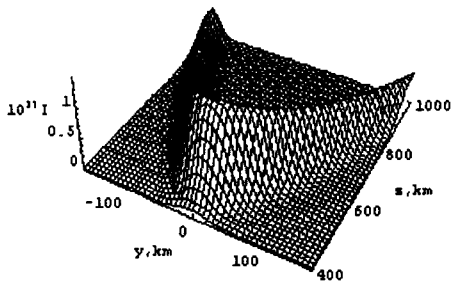


그림 4 강이방성 비균질성의 경사 산란된 전파의 전계 강도 분포
Fig. 4. A intensity space distribution for wave oblique scattered on strongly an isotropic inhomogeneity

송신기의 위치는 $z_0 = -500 \text{ km}$, $y_0 = 0$ 이며 수신기의 위치는 $z = 500 \text{ km}$, $y = 0$ 라고 가정한다. 비균질성은 이 경로의 가운데에 위치한다. 이전의 계산에서 사용된 트레일의 모델에서, 횡축 크기는 단지 확산 계수 $D_{\perp} = 1 \text{ m}^2/\text{sec}$ 만 가진 시간에 대해서만 변화 있다고 가정한다. 따라서 감소된 수신 신호 강도의 시간 변동은 그림 5와 같이 나타난다. 산란된 시간영역에서 지수함수적인 변화는 저밀도 트레일에서의 전형적인 산란 메커니즘이라고 고려한다.

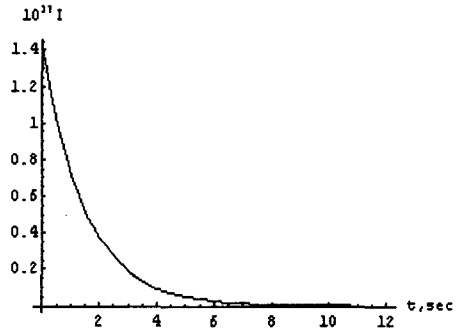


그림 5 변형된 횡단길이의 강이방성 비균질성인 경사산란 수신 신호의 시변화
Fig 5. Time variation of the intensity of a received signal for wave oblique scattered on strongly anisotropic inhomogeneity with the variable transversal size.

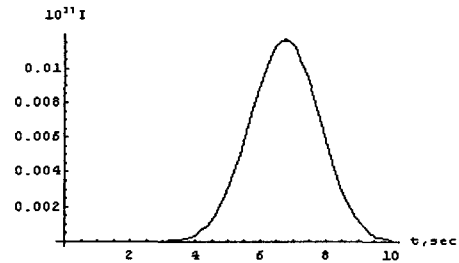


그림 6 초기위치 -150 km에서 20 km/sec로 이동하는 강등방성 유성의 경사 산란된 전파의 수신 신호강도의 시변화
Fig. 6. Time variation of the intensity of a received signal for wave oblique scattered on strongly an isotropic meteor moving with velocity 20 km/sec at its initial position -150 km.

만약 예를 들어 초기 위치 150km에서 20km/sec 속도의 유성의 움직임을 고려하면, 이미 다른 시간 관계의 특징인 그림 6을 얻을 수 있다. 이것은 빈번히 일어나는 고밀도 유성의 산란 메커니즘과 관련이 깊다. 만약에 각도 $\alpha = -3^\circ$ 상에서 유성트레일의 축을 변화시킬 다른 매개변수의 변동이 없다면 그림 7에 나타난 것과 동일한 시간 함수를 얻을 수 있다. 그림 6과 그림 7을 비교해 보면, 3° 상의 공간에서 트레일 지향 변동은 전계강도의 시간변화에 대한 정성적인 변화의 원인이다.

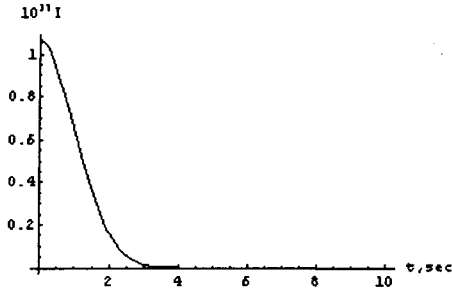


그림 7 지표면에 대해 -5도 이하로 발생한 유성에 대한 수신 신호 강도에 대한 시변화
 Fig. 7. The same, that in fig. 6 for a meteor moving under a angle of -5 degrees concerning a surface of the Earth.

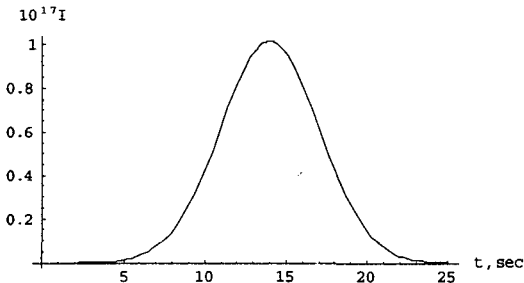


그림 8 저밀도 트레일의 버스트
 Fig. 8. The enduring burst for the underdense meteor trail.

지수변화로부터 확정값까지의 결합은 트레일의 매개변수 변화에서도 일어난다. 고밀도에서 산란 메커니즘의 기본 표준 참조값은 짧은 주기에 있다. 그림 8은 $\alpha=0$, $z_{m0}=-100\text{ km}$, $l_{\perp 0}=0.7\text{ m}$, $l_{\parallel}=30\text{ km}$, $v=7\text{ km/sec}$, $D_{\perp}=0.1\text{ m}^2/\text{sec}$, $D_{\parallel}=0$ 에서의 수치 해석 결과이다. 그림 8로부터 알 수 있듯이 저밀도 트레일의 유성 버스트 신호에도 적용 가능하다.

IV. 결 론

지표면에서의 전계 강도 분포에 대한 정성적 조사는 유성버스트 신호 해석에는 적용되지 않았다[1]. 본 논문에서 유도한 결과는 기본적인 유성에 대한 전파 전파에 대한 여러 특징과 유성 신호의 구조에 대한 시뮬레이션에 적용된다. 유성 신호 강도

의 시변특성은 기본적으로 트레일의 매개변수에 의해 변화 되었다. 기존의 단순한 지수함수형이 아니라 시간에 따른 다양한 함수형이 가능하다는 것을 나타낸다. 특히, 보통 고밀도 트레일에서의 산란인 트레일의 크기, 확산 계수, 속도, 운동방향 등의 매개변수의 경우, 장주기를 가진 저밀도 유성 버스트에 적용 가능하다. 여기서 주목할 것은 유성이 발생한 높이에서 모델의 매개변수를 고려한다면 실험결과에 보다 일치할 수 있다는 것이다. 변화가 심한 유성 전파 채널의 특성에 대한 설계의 경우 단지 통계적인 방법에 의해서만 가능했다.

본 논문의 결과는 분리된 서지(surge)들의 구조 분석을 위한 시뮬레이션에서 뿐만 아니라 통신 시스템 디자인을 위해서도 편리하다. 이전에는 통계적인 계산의 경우 신호 구조의 변동성은 고려되지 않았다[2,9,11]. 유도한 식은 통계적 특징을 가지고 있는 유성 전파 채널에 대해 적절하다.

참고문헌

- [1] Weitzen J. A. Meteor scatter communication: In Meteor Burst Communications. Wiley-Interscience Publication, N.Y. pp 9-58. 1993
- [2] Desourdis R. I. Modeling and analysis of meteor burst communications. In Meteor Burst Communications. Ed. D.L. Schilling, Wiley-Interscience Publication, N.Y. pp 59-342. 1993
- [3] Rytov S. M., Kravtsov Yu. A. and Tatarskii V. I. Introduction to Statistical Radiophysics, vol. 4, Wave Propagation through Random Media (New York: Springer). 1989
- [4] Tatarskii V. I. The Effect of a Turbulent Atmosphere on Wave Propagation (Va.: Springfield, National Technical Information Service).1971
- [5] Davidovici S., and Kanterakis E.G. Performance of meteor burst communication using variable data rates. In Meteor Burst Communications. Ed. D.L. Schilling, Wiley-Interscience Publication, N.Y. pp 383-410. 1993
- [6] Weitzen J. A. Meteor Scatter: an overview, IEEE Trans. Antennas and Propagation, 36(12), 1813-1819. 1988
- [7] Eshleman R. Meteor Scatter, In The Radio Noise Spectrum Ed. D. H. Menzel, Harvard Univ. Press, Cambr. Ma., 49-78. 1960

- [8] Manning L. A. Olique echoes from over-dense meteor trails, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, V.14(1/2), 82-93. 1959
- [9] Brown D. W. A Physical meteor-burst propagation model and some significant results for communication system design, *IEEE Journal. on Selected Areas in Communications* 3(5), 1985
- [10] Felsen L. B. and Marcuvitz N. *Radiation and Scattering of Waves*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1973
- [11] Akram A. and P.S. Cannon, A meteor scatter prediction model and its application to adaptive beam steering, *Radio Sci.* V. 32(3), 1997

저자소개

김병철(Byoung-Chul Kim)

국립 밀양대학교 정보통신공학부