

참조 경로 비교법을 이용한 유성 버스트 무선로의 특성 추정

Estimation of Characteristics of Meteor Burst Radio Path Using Reference Path Comparison Method

김병철 · 김기채 · 이무영

Byoung-Chul Kim · Ki-Chai Kim · Mu-Yong Lee

요 약

본 논문은 불특정의 유성 버스트 통신 경로의 버스트 신호 발생빈도와 그 평균 지속 시간을 예측하는데 있어서 기존의 경로를 참조 경로로 하여 각 정수를 서로 비교 계산하므로써 간편, 정확하게 산출할 수 있음을 소개하는 것이다. 이 논문에서는 유성 경로의 발생빈도와 지속시간을 그 경로의 거리, 주파수, 안테나 이득, 송신 출력 그리고 수신기의 문턱치를 기존 경로와 비교 계산하여 산출할 수 있음을 해석적으로 증명하고 이것을 확인하기 위하여 한국 경산으로부터 일본 hamamatu 및 Hatinohe간의 750 km와 1,200 km의 두가지 경로에 관하여 각각 실험을 실시한 결과를 보고하고 있다. 그 결과 실험으로 얻어진 버스트 발생 빈도와 평균지속 시간은 해석 결과와 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

Abstract

This paper introduces a simple yet accurate method to predict burst rate and durance expected in a meteor burst communication path in question by comparing its path specifications to those of an exiting path. In this article, the authors analyze the method to derive the burst rate and duration by comparing span distance, frequency, antenna gain, transmitting power and threshold level to those of a existing path selected for the reference. The authors further report the result of experiments made for two difference paths: 750 km path and 1,200 km path to Hamamatu Japan and Hatinohe Japan from Kyongsan korea respectively. The occurring rate and average length of the bursts measured on the experiment paths show fairly good agreement with the analysis.

I. 서 론

지구 표면에는 일일 수백억 개 이상의 우주진이 낙하하고 있는데 이들은 대기권에 돌입하면서 발

열, 증발하여 유성 트레일이라 불리는 전리 기체 기둥을 발생한다. 유성 트레일은 큰 것은 육안으로도 그 빛이 인지되어 유성으로 불리는데 대부분은 수 밀리 초에서 수 초동안 존속하고는 확산, 소실된다. 그러나 그 동안은 VHF/UHF 대역의 전자파를

영남대학교 전기전자공학부(Dept. of Electrical & Electronics Eng., Young-Nam University)

· 논문 번호 : 970929-067

· 수정완료일자 : 1997년 12월 19일

잘 반사하기 때문에 이것을 이용하면 수동 중계 통신로를 구현할 수가 있다. 이 전자파 전송로는 트레일이 발생하는 순간에만 터지기 때문에 유성 버스트(meteor burst) 전송이라 불리며 존속기간 동안의 전송 특성이 대단히 안정되어 있다는 것이 특색이다.

유성 트레일은 지상 85~120 km 상공에 발생하기 때문에 그 전파 경로(radio path)는 저고도 위성통신 링크와 흡사하여 2000 km 이상의 장거리 BLOS(Beyond Line of Sight) 무선 전송로로서 특히 적합하다. 그러나 그 설비비와 유지비는 위성통신 경로와는 비교가 안될 정도로 저렴하여 “가난한 자의 위성통신”(poor mans satellite communication)이라고도 불리며 VHF대역의 가장 경제적인 통신방식의 하나로 알려져 있다.^{[1],[2]}

유성 버스트 통신 경로는 그림 1과 같이 트레일이 송신국 T와 수신국 R를 초점으로 하는 타원의 회전 표면상에 정접하는 위치에 발생하여야만 전송로가 구성된다. 따라서 그 밖의 위치에서는 이 파를 수신할 수가 없을뿐 아니라 다른 위치로부터의 송신 전파는 이 트레일에서 반사되어도 R점에는 도달하지 않는다. 즉, 유성 버스트 통신로는 일종의 공

간분할형, 시분할형 전송을 한다고 할 수가 있다. 이 특성을 이용하면 동일 지역에서도 동일 주파수로서 서로 다른 통신계가 통신할 수가 있어서 주파수의 이용효율이 높고 도청이나 방해에 대해서도 강하다는 특징이 있다.

이 방식은 재래식 V, UHF LOS(line-of-sight) 통신처럼 중계소(위성중계 또는 산정중계소)를 필요로 하지 않기 때문에 자연적, 인위적 재해에 대해서 생존율(survival rate)이 높다. 뿐만 아니라 단말기가 간헐적으로 동작하기 때문에 소전력으로 충분하며 안테나도 간단하여 무인시설(unattended terminal)에 편리하고 시스템의 구축과 운용이 용이하고 유지비가 저렴하다는 등 많은 특징이 있다. 재래식의 HF-SSB 무선 통신에 비교할 때도 전리층에 의한 전파상태 변화를 보상하기 위한 빈번한 주파수 절환작업 등이 필요없고 혼신, 잡음이 적으며 에러율(error rate)이 적기 때문에 보다 안정된 데이터 통신이 가능하다. 위성 통신에 비교할 때는 전송가능 데이터 속도는 늦으나 고가의 회선 임차료가 필요없고 고도의 지향성 안테나와 지향 유지장치, 고감도 수신장치, 대출력 송신장치 등이 필요없다. 이러한 장점을 이용하여 지금까지 상당한 실용 시스템이 해외에서 실용화되어 있으며 보다 효율적인 통신 특성을 구현하기 위한 연구가 계속되고 있다.^{[3]-[7]}

이 방식의 유일한 결점은 통신로가 간헐적으로 형성되기 때문에 음성이나 동영상과 같은 연속 신호의 전송에는 부적합하다는 점이다. 그러나 다소의 지연이 허용되는 저속 데이터 통신분야에서는 packet 전송 프로토콜(protocol)을 이용하면 고신뢰성의 통신 시스템을 구현할 수가 있다.

통신로의 설계에 있어서는 소정의 BER(Bit Error Rate)를 만족할 수 있는 범위 내에서 가능한 많은 데이터량을 전송할 수 있는 가장 경제적인 방식을 모색하는 것이 첫 번째 과제가 된다. 유성 버스트 전송로는 간헐적으로 형성되기 때문에 전송로의 도통율(duty rate) 즉, 단위 시간당 버스트의 발생수와 평균 지속시간이 전송 가능 데이터량에

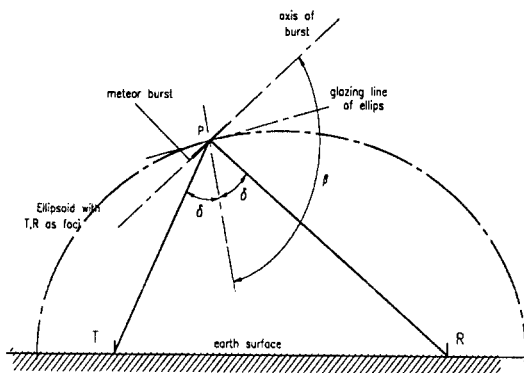


그림 1. 유성 트레일과 송, 수신점간의 기하학적 관계
Fig. 1. Geometric relations between meteor trail and transmitter /receiver point.

직접적인 결정 요소가 된다.

유성 트레일의 발생 메카니즘과 특성에 관해서는 일찍부터 레이더 관측과 물리학적 해석을 통해서 상당 수준 밝혀져 있으며^{[8],[9]}, 트레일 반사파의 통신 응용을 위해서도 버스트 신호의 발생 빈도, 지속 시간, 발생간격 등에 대한 연구 보고가 많이 나와 있어서^{[8]-[12]} 유성 버스트 통신로의 도통을 추정해 해석적으로도 어느 수준은 가능한 것으로 알려져 있다.

그러나 유성의 크기나 발생 빈도는 지역에 따라, 계절에 따라 그리고 시간에 따라서도 큰 폭으로 변동할 뿐 아니라 검지 가능한 버스트의 수와 지속시간은 송신기의 출력, 수신기의 문턱 전압 그리고 안테나의 이득과 지향 방향 등 많은 조건에 따라 달라지기 때문에 고도의 신뢰성을 요구하는 통신로의 설계를 위해서는 이러한 통계와 해석에만 의존하는 특성 추정은 거의 실용 가치가 없다. 이러한 이유 때문에 지금까지는 개설을 원하는 경로에 먼저 시험통신 시설을 설치하여 일정 기간 충분한 시험통신을 실시하여 기대 가능한 전송특성, 특히 도통율을 실험을 통하여 확인한 다음에 설계에 들어가는 것이 통례로 되어 있다.

그러나 설치에 있어서는 모든 경우에 일일이 시험통신을 실시한다는 것은 경제적으로나 시간적으로나 낭비가 커서 언제나 적용할 수는 없을 뿐 아니라 전파관리 행정상의 제한때문에 시험통신 자체가 불가능한 경우도 있을 수가 있다.

본 연구는 이러한 점에 착안한 것으로서 MBC 경로(Meteor Burst Communication Path)를 설계할 때 일일이 번잡한 시험통신을 경유하지 않고서도 높은 신뢰도로서 시스템 특성을 추정할 수 있는 방법으로서 참조 경로와의 비교법을 제안하는 것을 내용으로 하고 있다. 이 방법에서는 새로운 MBC 경로를 계획할 때 이미 가동 중에 있거나 시험통신이 완료되어 그 특성이 잘 알려져 있는 MBC 경로를 참조 자료로 하여 여기에 간단한 비례관계를 적용 계산하므로써 계획 경로에 대한 비교적 정확한 특성추정이 가능하다.

이 논문에서는 먼저 유성 버스트 통신로의 주요 특성이 어떻게 각 변수와 관련되는가를 해석하고 참조회로 비교법의 이론적 근거를 소개한다. 그 후, 이 방법의 타당성을 확인하기 위하여 경산과 일본국 Hamamatu간의 750 km 경로를 일본국 hamamatu와 Hatinohe 간의 750 km 경로를 참조 경로로 하여 비교법을 통하여 추정하고 이것을 직접 시험통신을 통하여 실험한 결과를 보고한다. 또한 같은 방법으로 경산과 Hatinohe 간의 1,200 km 경로를 역시 Hamamatu-Hatinoe 간의 750 km 경로를 참조 경로로 하여 특성을 추정한 결과도 보고한다.

II. 유성버스트 통신로의 일반적 특성

2-1 유성 트레일의 특징

유성은 우주에 부유하고 있는 우주진(cosmetic dust)이 지구 궤도와 조우하여 지표에 낙하하게 된 것을 말한다. 이 때 대기권에 진입하면서 마찰에 의해 가열되어 빛을 발하는데 육안으로 인식되는 유성은 대체로 질량이 수 10 mg 이상의 크기인 것들로 알려져 있다. 대부분의 유성은 도중에서 소진, 증발하지만 1 kg 이상이면 간혹 지상에 낙하하여 운석(隕石: meteor stone)이 된다. 지구상에 매일 10^{12} 개 이상 낙하하고 있다고 알려져 있는 우주진은 대부분 수 g 이하의 것으로서 이 중 통신에 이용이 가능한 우주진은 대체로 10^{-4} g 이상, 직경으로는 0.2 mm 이상의 것으로 알려져 있다. 유성은 1년에 한 두어번 집단적으로 발생하는 유성우(meteor shower)와 개별적으로 랜덤하게 발생하는 산재유성(sporadic meteor)의 두가지가 있다. 이 중 산재 유성은 독립하여 태양 주위를 공전하고 있는 비교적 큰 우주진으로 되어 있으며 그 발생은 랜덤하나 발생 빈도는 훨씬 많고 대체로 균등하게 발생하고 있으므로 통신 시스템의 설계는 주로 이 산재 유성을 대상으로 하게 된다. 그러나 산재 유성도 지구의 공전 운동에 따라 북반구에서는 겨울철보다 여름철에 발생 빈도가 높고 지구의 자전의 영

향으로 저녁보다 아침녘에 발생 빈도가 높다. 측정 결과에 의하면 대체로 8월이 2월보다 4배 정도, 그리고 오전 7시경이 오후 6시경 보다 4배 정도 발생 수가 많은 것으로 보고되어 있다^{[8],[9]}. 산재 유성은 질량이 적을수록 발생수가 많은데 크기에 관계없이 그 질량과 발생수의 적은 일정치가 된다는 성질이 있다. 즉, 10^{-4} g의 유성의 수는 10^{-3} g의 유성의 10 배 많다. 발생한 트레일의 길이는 질량이 클수록 길 어지지만 대체로 15 km에서 최대 50 km 정도로 알려져 있다. 유성 트레일은 극히 단시간에 형성되며 그 초기반경은 평균 자유 행정에 의해 결정되는데 전자파에 의한 측정예에 의하면 고도 80 km에서는 55 cm, 120 km에서는 4.35 m가 된다고 보고되어 있다.

형성된 트레일은 확산에 의해 서서히 팽창을 하여 발생후 t 초 후에는 그 반경은 $r = \sqrt{4Dt + r_0^2}$ 가 된다. 여기서 r_0 는 초기 반경으로서 유성의 크기에 의해 결정되는데 1 g 정도의 유성이면 60 cm 내외가 된다. D 는 확산 계수로서 많은 실험에 의하여 다음과 같은 실험식이 도출되어 있는데 대체로 고도 80 km에서는 $1 \text{ m}^2/\text{s}$, 120 km에서는 $140 \text{ m}^2/\text{s}$ 정도로 알려져 있다^[13].

$$\log_{10}(D_a) = 0.067(124 - 17\log_{10}f) - 5.6$$

유성 트레일은 VHF 대역의 전자파가 입사하는 경우 그림 2와 같이 원추형으로 전방으로 재방사시키는데 그 일부가 수신 안테나에 입력되면 송, 수신기 간에는 통신로가 터져서(burst) 데이터 전송에 기여하게 된다. 지금까지 레이더 등을 이용하여 유성 트레일로부터의 반사파의 형태를 관측 통계한 바에 의하면 대체로 그림 3과 같이 초기에 급속히 최대치까지 상승한 후 서서히 지수함수형으로 감쇄하는 파형이 대부분이다. 유성 버스트가 이와 같은 파형을 나타내는 것은 트레일이 시간이 경과함에 따라 점차 확산 팽창하며 거기 따라 전자파의 산란 위치도 변화하여 수신점에 도달한 전자파 위상이 서로 상쇄하기 시작하고 끝내는 소멸되어 없어지기 때문으로 해석이 되고 있다.

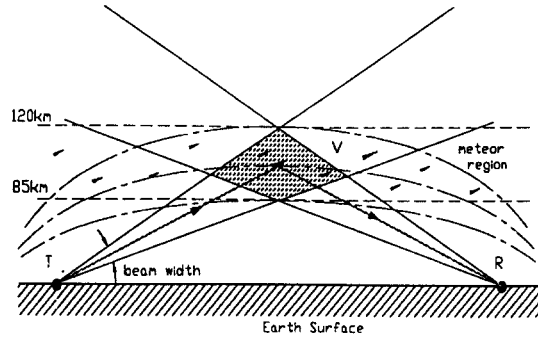


그림 2. 대표적인 유성 트레일 경로와 안테나 빔 각도
Fig. 2. Typical meteor trail path and antenna beam angle.

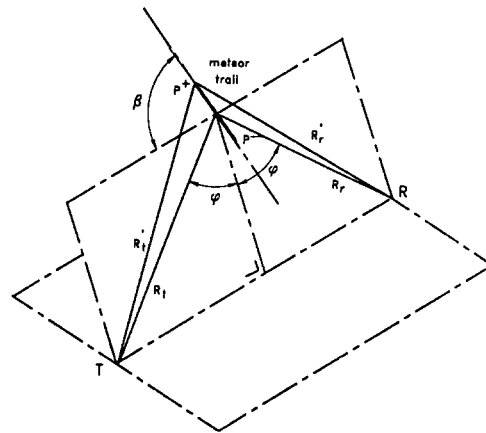


그림 3. 유성 트레일과 전자파 경로와의 기하학적 관계
Fig. 3. Geometric relations between meteor burst and electrical wave path.

이 밖에 질량이 큰 유성에 의하여 발생하는 강력한 버스트 신호를 종종 수신하게 되는데 이 때의 파형은 비교적 서서히 최고치에 도달한 후 급격히 감쇄하는 형이며 최대치는 전자의 수배에서 수 10배에 달하는 것도 있다. 이러한 트레일은 내부의 전리 전자의 선밀도가 파장에 비해 커서 고밀도 트레일(over-dense trail)이라 불리는데 마치 금속 원통과 같은 반사 특성을 보여서 버스트 신호는 극히 강력하고 지속시간도 길어서 수 10초에 달하는 것도

있지만 파형은 불규칙적이다. 이러한 고밀도 트레일은 버스트는 강하지만 극히 발생 빈도가 적어서 통신에는 이용하기 어렵다

따라서 통신 경로의 설계에는 대부분 전자 선밀도가 파장에 비해 적은 저밀도 트레일(under-dense trail)을 기준으로 하게 된다. 고밀도 트레일과 저밀도 트레일의 경계는 50 MHz 대역에서는 대체로 2×10^{14} electron/m 근방이 되며 이 때의 유성의 질량은 10 mg 내외로 해석되고 있다.

2-2 유성 버스트 전송로의 도통율

유성 버스트는 그림 1과 같이 송,수신 지점 T와 R를 초점으로 회전 타원면에 접하는 위치에 트레일이 발생하는 경우에만 수신기에 입력된다. T, R를 초점으로 하는 타원은 무수히 존재하기 때문에 회전면의 접점도 무수히 많지만 트레일은 높이 85~120 km 범위에서만 발생하고 이 중에서 그림 2와 같이 송, 수신 안테나의 지향 각도 내에 들어간 것만이 버스트 신호가 된다. 따라서 T, R간에 통신로가 구성되는 시간은 간헐적이므로 각 버스트의 지속시간을 t_i 로 하고 관측 시간을 T라 할 때

$$\Gamma = \frac{\sum t_i}{T} \quad (1)$$

식 (1)은 이 경로의 도통율(duty rate)로서 시스템의 성능을 결정하는 중요한 정수가 된다. 식 (1)은 일반적으로 시험통신을 통하여 실험적으로 구해진다. 도통율의 해석적인 추정은 그림 2와 같은 MBC 경로를 가정하여 구하게 된다. 여기서 수신기에 입력되는 버스트는 두 안테나의 지향 입체각 δ 가 표용하는 공간 V 내부에 발생하는 트레일에 의한 것이 될 것이므로 이 경로의 도통율은 식 (2)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$\Gamma = \iiint N_v(x, y, z) T_{ave}(x, y, z) dx dy dz \quad (2)$$

$N_v(x, y, z)$: 단위 체적의 공간에서 단위 시간에 발생하는 유성 유성 버스트의 수

$T_{ave}(x, y, z)$: 유성 버스트의 평균지속 시간(average duration time)

여기서 유성 버스트란 수신기에 입력된 미약한 버스트 신호중에서 수신기의 문턱전압(threshold voltage)을 초과하는 것을 말하는데 수신기의 입력은 송, 수신안테나 이득, 송신 출력, 주위의 잡음 전력, 트레일의 초기 반경, 트레일의 각도, 입반사파의 각도 등에 따라 결정된다.

그림 2를 보다 단순한 경로 모델로 치환한다면 경로의 도통율은 다음 식과 같이 된다.

$$\Gamma = \frac{N \cdot t_{ave}}{T} \quad (2a)$$

여기서 N은 T 동안에 관측된 버스트의 총수이고 t_{ave} 는 버스트의 평균 지속시간이다.

2-3 수신 버스트 전력과 파형

지금 송,수신점 T, R와 유성 트레일로서 구성된 전파 경로를 그림 3과 같다고 한다면 수신기의 입력 전력은 다음 식에 의하여 계산 된다^[17].

$$P_R = P_T \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \exp\left(-\frac{2}{\tau} t\right) \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{G_T G_R \lambda^3 q^2 r_e^2 \sin^2 \alpha}{16\pi^2 R_t R_r (R_t + R_r) (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \phi)} \quad (3a)$$

$$K_2 = \exp\left(-\frac{8\pi^2 r_0^2}{\lambda^2 \cdot \sec^2 \phi}\right) \quad (3b)$$

$$\tau = \left(-\frac{16\pi^2 D}{\lambda^2 \cdot \sec^2 \phi}\right) \quad (3c)$$

R_t, R_r : 유성 트레일로부터 송신 및 수신 안테나

까지의 거리

P_T, P_R : 송신 및 수신 전력

G_T, G_R : 송신 및 수신 안테나의 이득

β, Φ : 트레일과 전자파의 전파면 간의 각도 및 입사각과 반사각.

D : 트레일의 확산계수(높이 100 km 상공에서 는 약 5.88)

λ : 사용 전자파의 파장

r_0 : 트레일의 초기반경

r_e, q : 전자의 반경($r_e = 2.8 \times 10^{-15} m$) 및 트레일 의 전자 선밀도

식 (3)에 의하면 버스트 신호는 초기치가 $K_0 = P_T K_1 K_2$ 이고 시정수가 τ 인 지수함수적으로 감쇄하는 그림 4와 같은 곡선이 된다. 식 (3)에서 K_1 는 송신 안테나, 안테나 이득, 유성의 크기, 전자파의 각도 등에 의해서 결정되는 정수이고 K_2 는 트레일의 초기 반경에 의해 결정되는 정수이다.

일반적으로 저밀도 트레일은 질량이 수 mg 이하 인 운석에 의해 발생되므로 트레일 초기 반경은 수 cm 이하이고 300~2,000 km 거리에서의 반사각은 대체로 $\Phi = 50 \sim 80^\circ$ 가 될 것이므로 VHF 대역에서

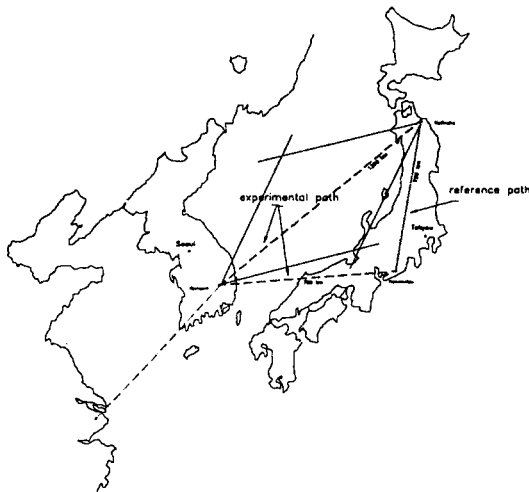


그림 4. 참조 경로와 계획 및 실험 경로

Fig. 4. Reference path and planned / experimental path.

참조 경로 비교법을 이용한 유성 버스트 무선로의 특성 추정

는 식 (3a)의 k 는 거의 1이라고 볼 수가 있다. 또, 송신 전자파는 수평 편파라 가정($\alpha = 90^\circ$)하고 송, 수신 빔이 그림 2와 같이 T, R 직선의 중점에서 교차하도록 조사(illuminate)한다면 $R_s = R_r = R$ 이므로 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$P_R = P_T K_0 \exp\left(\frac{2}{\tau} t\right) \quad (w) \quad (4)$$

$$K_0 = \frac{G_T G_R \lambda^3 q^2 r_e^2}{32\pi^2 R^3 (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \phi)} \quad (4a)$$

파형의 감쇄속도는 감쇄정수 τ 에 의해 결정되는데 트레일의 확산속도가 클수록, T, R 간의 거리가 적을수록(즉, 입반사각이 적을수록) 또 주파수가 높을수록 빨라진다.

지금 식 (4)로 표시되는 전력이 수신기에 입력하였을 때를 고찰한다면 그림 4와 같이 이 레벨이 수신기의 문턱치(threshold value) P_{th} 이상일 때에 한하여 수신기는 반응한다. 따라서 버스트의 지속 시간 t_b 는 식 (3)에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$t_b = \frac{\tau}{2} \log_e \frac{P_{th}}{P_m} \quad (\text{sec}) \quad (5)$$

또는

$$t_b = \tau \log_e \frac{V_{th}}{V_m} \quad (5a)$$

와 같이 된다.

단, 여기서 $P_m = P_T K_0$ 는 버스트의 초기치이고 V_{th}, V_m 는 각각 문턱전압과 전압초기치이다.

2-4 버스트의 발생수와 지속시간

식 (3)에 의하면 유성 트레일에서의 반사파는 트레일 내부의 전자 선밀도 q 에 비례하는데 전자선

밀도는 유성의 질량에 비례하는 것으로 알려져 있다. 지금 질량이 m 와 $m+dm$ 사이의 유성에 입사하는 전계를 v 라고 한다면 $v \, dm \propto m^{-s} \, dm$ 의 관계가 있다고 볼 수 있으며 임의의 질량 m_1 보다 큰 유성에 입사하는 전계는 ($m > m_1$) $\propto m_0^{-s+1}$ 이 된다. 여기서 s 는 일반적인 독립 유성(sporadic meteor)의 경우 정수 2가 된다.

질량과 전자 선밀도는 비례하므로 전자 선밀도가 q_0 이상인 트레일의 수 N 은

$$N(q > q_0) = c \, q_0^{-s+1} = c \, q_0^{-1} \quad (6)$$

이 된다. 여기서 $c = 1.3 \times 10^2 \, m^{-3} \, s^{-1}$ 로 한다면 N 은 매초당 $1 \, m^2$ 평면에 떨어지는 유성 트레일의 수가 된다.

한편, 수신기의 문턱전압 V_{th} 에 의해 검지되는 각 버스트의 지속시간을 t 로 하고 N 개의 버스트에 의한 총 도통시간을 T_b 로 한다면 다음과 같은 관계가 있다.^(부록 1참조)

$$T_b = \int t \, dN = \left(\frac{\tau}{a}\right) c V_{th}^{-a} = \left(\frac{\tau}{a}\right) N \quad (7)$$

여기서 a 는 정수로서 저밀도 트레일의 경우는 1이다. 이 식에 의하면 버스트의 평균 지속시간은 $(\tau/a) \approx \tau$ 로서 대체로 버스트 파형의 시정수와 같고 문턱치와는 무관하며 식 (3c)에서 알 수 있는 것과 같이 트레일의 확산계수, 전자파의 입, 반사각과 파장에 의해 결정된다는 것을 알 수가 있다.

이것은 실지에 있어서 문턱치를 낮추면 기존의 버스트의 지속시간은 길어지지만 새롭게 많은 짧은 버스트가 생겨나므로 평균 지속시간은 증가하지 않는다는 간단한 이치로부터도 알 수가 있다.

그러나 통신 경로의 도통율은 버스트의 발생수에 비례하므로 식 (7)에 의해

$$\Gamma(V > V_{th}) \propto V_{th}^{-a} = V_{th}^{-1} \quad (8)$$

이 되어 문턱 전압에 반비례한다.

III. 참조 경로 비교법

식 (4)에서 수신 전력 $P_R = P_{th}$ 로 놓으면 이 때의 트레일의 전자 선밀도 q_0 는 다음과 같이 된다.

$$q_0 = 6.31 \times 10^{15} \times R^2 (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \phi)^{\frac{1}{2}} \cdot (P_{th} / P_G R G_T)^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda^{-\frac{3}{2}} (1/m) \quad (9)$$

또한, 전자 선밀도가 q_0 이상이 되는 트레일의 수는 식 (6)에 의해

$$N(q > q_0) = c q_0^{-1} = 0.206 \times 10^{-13} \times \frac{1}{\sqrt{R^3 (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \phi)}} \cdot \sqrt{\gamma} \cdot \lambda^{\frac{3}{2}} (m^{-3} s^{-1}) \quad (10)$$

와 같이 구해진다. 여기서

$$\gamma = \frac{P_T G_T G_R}{P_{th}} \quad (11)$$

은 일종의 전력율로서 수신기의 문턱치에 대한 수신 전력의 전력의 비이다.

지금 기존의 경로(또는 시험 시스템의 경로)에 있어서 그 평균 버스트 발생빈도가 N_{ref} 라고 한다면 임의의 신설 경로의 버스트 발생 빈도 N 은 위 (11) 식을 사용한 다음 식으로부터 구할 수가 있다.

$$\frac{N}{N_{ref}} = \sqrt{\left(\frac{R_{ref}}{R}\right)^3 \cdot \frac{1 - \cos^2 \beta_{ref} \cdot \sin^2 \phi_{ref}}{1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \phi}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}} \cdot \sqrt{\left(\frac{f_{ref}}{f}\right)^3} \quad (12a)$$

또, 버스트의 지속시간은 식 (3c)를 사용하여 다

음과 같이 구할 수가 있다.

$$\frac{\tau}{\tau_{ref}} = \left(\frac{f_{ref}}{f}\right)^2 \cdot \left(\frac{\cos\phi_{ref}}{\cos\phi}\right)^2 \quad (12b)$$

시스템의 도통율은 버스트의 평균 지속시간을 t_{ave} 라 할 때 식 (2a)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Gamma &= t_{ave} \cdot N_{ref} \cdot \sqrt{\frac{P_T}{P_{Tref}}} \\ &\approx \tau \cdot N_{ref} \cdot \sqrt{\frac{P_T}{P_{Tref}}} \end{aligned} \quad (13)$$

IV. 실험

4-1 실험 방법

윗 항에서 논한 비교법의 타당성을 확인하기 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다. 먼저, 그림 4와 같이 경산-Hatinohe 간의 1,200 km 경로와 경산-Hamamatu 간의 750 km 경로를 신설하는 경우를 가정하고 이 경로에 관한 버스트의 발생 빈도와 지속시간 그리고 시스템의 도통율을 비교법으로 추정하기로 하였다. 이 때 참조 경로로서는 일본국 Shizuoka 대학의 실험 경로인 Hamamatu-Hatinohe 간의 750 km 경로를 선정하였다.

다음에는 실지로 경산에 실험국을 개설한 후, 경산-Hatinohe와 경산-Hamamatu 간의 경로에 관하여 시험통신을 실시하여 버스트의 발생빈도와 지속시간을 측정하고 위에서의 결과와 비교 평가하였다.

4-2 특성 추정

4-2-1 참조 경로의 특성 측정방법

Shizuoka 대학에서는 표 1과 같은 방법으로 참조 경로의 특성을 측정하여 그림 5와 같은 버스트의 발생 빈도-지속 시간 특성을 얻었는 것으로 보고

표 1. 참조 경로의 시험환경

Table 1. Test environment of reference path.

Item	Discription	Remarks
path	Hamamatu-Hatinohe	
distance	750 km	R = 391 km, Φ = 74°
TX RF output	300 W	48.375 MHz CW LSB
RX threshold	3,5,6,10 dB above noise level	refer to text
Signal	1200 Hz tone	BW 2.75 kHz
Antennas	10 dB 5-element Yagi	H-polarized
period of tests	6 times from 92 to 94	92.10 92.12 93.6 93.9 93.11 94.4

하고 있다.¹⁸⁾

참조 경로를 결정하는 범위는 북반구 동일 위도 부근에 속하며 계획 경로의 약 1,500 km 이내로 제한한다. 여기서 수신기의 문턱치는 실험개시 이전과 이후의 30초 동안의 배경 잡음(background noise)전력의 평균을 취하고 이 값을 기준으로 하여 각각 3, 5, 6, 10 dB 높은 값을 문턱치로 설정하

표 2. 참조 경로의 버스트 빈도와 지속시간

Table 2. Burst rate and duration of reference path.

Specs.	Threshold level (dB above noise level)	Value
N_{ref}	3	7.64
	5	4.12
	10	2.02
τ	3	247.3(mS)
	5	265.7(mS)
	10	280.2(mS)

였으며 수신된 신호는 DAT에 기록한 수신톤을 분리처리하고 문턱치를 초과하는 톤이 30 ms 이상 계속된 경우를 버스트로 인정하여 그 지속시간과 발생 빈도를 계수한 것으로 되어 있다. 그림 5에 의하면 측정일시에 따라 차이는 있으나 대체로 일정 범위 내에 수렴이 되어 있으므로 그 평균치를 택하여 참조 특성으로 하였는데 그 값은 표 2 및 그림 5(b)의 파선과 같다.

4-2-2 계획 경로 1(경산-hamamatu)의 제원
결과와 특성 추정

이 경로는 지상 거리가 750 km로서 위의 참조 경로와 우연히 일치한다. 그러나 주파수가 52 MHz, 출력이 200 W, 안테나 이득이 4 element Yagi로서 8 dB인 것이 참조회로와 다르다. 앞으로의 실험국을 이용한 측정에 대비하여 신호의 변복조 방식(LSB), 문턱치 설정 방법 등도 위에서의 참조 경로와 동일한 방법으로 정하였다.

식 (12a)에 의해 N/N_{ref} 를 계산하는데 거리 조건이 동일하므로 이 식의 첫째 괄호는 1이 된다. 그러나 제2괄호는 문턱치는 동일하지만 송신 출력과 안테나 이득이 참조 경로와는 다르기 때문에 식 (12a)에서

$$\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}} = \sqrt{\frac{P_T G_T G_R}{P_{T,ref} G_{T,ref} G_{R,ref}}} = 0.65$$

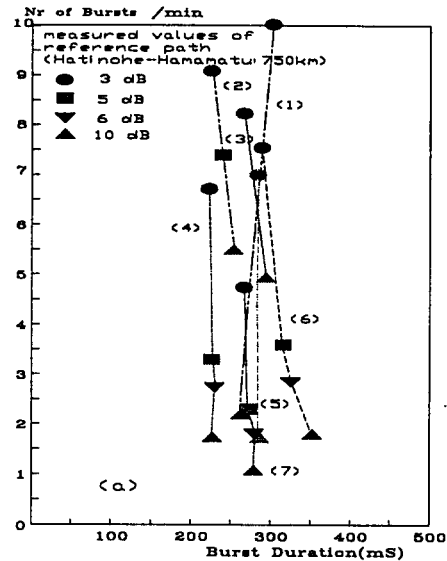
와 같이 되고 제3괄호는 주파수의 차이로 인하여

$$\sqrt{\left(\frac{f_{ref}}{f}\right)^3} = 0.897$$

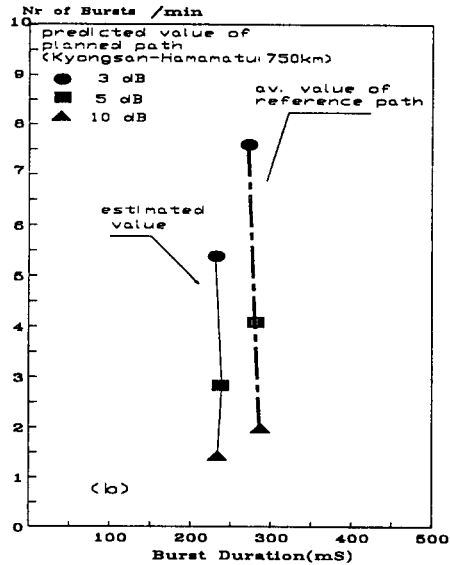
와 같이 된다. 따라서 추정되는 버스트 빈도는 $N = N_{ref} \times 0.65 \times 0.897$ 로부터 다음과 같이 구해진다.

$N(3 \text{ dB}) = 4.46, N(5 \text{ dB}) = 2.40,$
 $N(10 \text{ dB}) = 1.18$

또 지속시간은 식 (8b)에 의거하여 계산하는데 이 식의 제2괄호는 1이 되고



(a)



(b)

그림 5. 참조 경로의 실측치(a)와 그 평균치 및 추정치 (b)

Fig. 5. Measured value of reference path(a) and average /estimated value(b)

$$\left(\frac{f_{ref}}{f}\right)^2 = 0.865$$

이므로 지속시간은 $\tau = \tau_{ref} \times 0.868$ 로부터 다음과 같이 된다.

$$\tau(3 \text{ dB}) = 230(\text{mS}), \tau(5 \text{ dB}) = 236(\text{mS}), \tau(10 \text{ dB}) = 242(\text{mS})$$

그림 5는 이것을 그림으로 표시한 것이다.

4-2-3 계획경로 2(경산-Hatinohe)의 제원과 특성 추정

이 경로는 거리가 1,200 km에 주파수 48.375 MHz로 전송하는 장거리 경로이며 송신전력과 안테나는 경로 1과 같은 것을 사용한다.

간단한 계산에 의해 송,수신 안테나로부터 트레일까지의 거리는 $R = 613 \text{ km}$ 이며 입사각은 $\Phi = 78^\circ$ 가 된다는 것을 알 수가 있다. 따라서 식 (3a)는 제1괄호가 다음과 같이 계산된다. 여기서 트레일의 각도는 0에서 90° 사이에서 랜덤하기 때문에 평균치 45° 를 택하였다. 따라서 제1괄호의 값은

$$\sqrt{\left(\frac{R_{ref}}{R}\right)^3 \cdot \frac{1 - \cos^2\beta_{ref} \cdot \sin^2\phi_{ref}}{1 - \cos^2\beta \cdot \sin^2\phi}} = 0.52$$

와 같이 된다. 그러나 제2괄호는 경로 1의 조건과 동일하기 때문에 $\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}} = 0.65$ 이고 제3괄호는 1

이니, $\frac{N}{N_{ref}} = 0.52 \times 0.65 \times 1 = 0.34$ 이 된다. 추정 버스트 빈도는 $N = N_{ref} \times 0.34$ 로부터 다음과 같이 구해진다.

$$N(3 \text{ dB}) = 2.59, N(5 \text{ dB}) = 1.40, N(10 \text{ dB}) = 0.68$$

또, 지속시간은 식 (3b)에서 제1괄호는 1이고 제2 괄호는 $\left(\frac{\cos\phi_{ref}}{\cos\phi}\right)^2 = 1.89$ 가 되므로 시정수는 $\tau = \tau_{ref} \times 1.89$ 이 된다. 따라서 추정 버스트 지속시간은 다음과 같이 된다.

$$\tau(3 \text{ dB}) = 503(\text{mS}), (5 \text{ dB}) = 516(\text{mS}), (10 \text{ dB}) = 529(\text{mS})$$

그림 5는 이상을 그림으로 표시한 것인데 (a)의 (1)~(7)은 실험 회수를 나타낸다.

4-3 측정

위의 추정치의 정확성을 확인하기 위하여 실험국을 설치하고 시험 통신을 실시하였다.

4-3-1 시험통신 설비 및 방법

실험 경로로는 그림 4와 같이 한국 경산과 일본 Hamamatsu 간의 750 km 구간, 그리고 한국 경산과 일본 Hatinohe 간의 1,200 km 구간을 대상으로 하여 단위 시간당 버스트의 발생수와 발생 간격(waiting time)을 측정하고 그로부터 버스트의 발생 빈도와 평균 지속시간을 구하였다.

송신설비는 200 W, 50~60 MHz SSB형이고 수신설비는 10 dB 억압 입력 0.25 uV의 감도를 지닌 다목적 수신기에 신호 처리 장치로서 DAT와 PC를 부가한 그림 6과 같은 설비를 사용하였으며 안테나로서는 4-element Yagi(8 dB)를 사용하였다.

이 안테나는 빔 각도가 약 50° 로서 T,R 기선 중점 부근의 공간을 조사(illuminate)하도록 지향하였는데 이 경우 이론상 hot spot의 90 %를 공유공간으로 포용하게 된다.¹

측정 방법은 50 MHz 대역 신호를 1,200 Hz톤으로 변조하여 그 LSB를 200 W로서 송출하고 수신측에서는 이것을 수신하여 DAT에 기록한 후, 해석장치를 사용하여 특정 문턱치를 초과하는 버스트를 집계, 해석하도록 하였다.

문턱치는 실험개시 이전과 이후의 30초 동안의 배경 잡음(background noise)전력의 평균을 취하고 이 값을 기준으로 하여 각각 3, 5, 10 dB 높은

¹ T,R점을 초점으로 하는 무수한 타원의 회전면 중에서 R위치의 수신 전계강도에 가장 큰 공현을 하는 부분을 지칭하며 통상 T,R 축 선상의 중점근방의 공간이 된다. 해석결과에 의하면 1,000 km의 경우, 대체로 T,R축의 중점으로부터 반경 150 km 이내의 공간이 되는 것으로 보고되어 있다.^{[14],[15]}

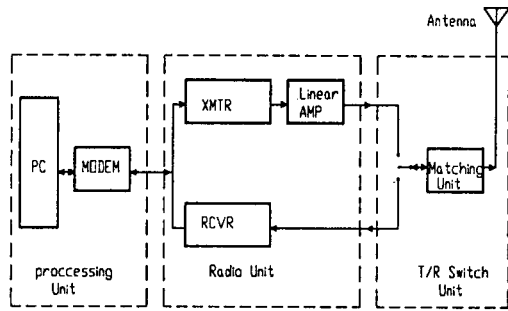


그림 6. 측정용 시험통신 시스템 구성도
 Fig. 6. Plot of experimental communication system.

값을 문턱치로 설정하였으며 이 값을 초과하는 버스트를 총 측정시간으로 제한값을 발생빈도 N으로 하였다.

수신된 신호는 DAT에 기록한 수신톤을 분리처리하고 문턱치를 초과하는 톤이 30 ms 이상 계속된 경우를 버스트로 인정하여 그 지속시간과 발생 빈도를 계수한 것으로 되어 있다.

실험기간은 4월중 총 6일간 18:00시에서 22:00까지 실시하였다. 지금까지의 레이더 관측에 의한 보고에 의하면 유성은 7, 8월경이 가장 발생빈도가 많고 12, 1월이 가장 적으며 일일 변동은 06:00시경이 가장 많고 18:00 경이 가장 적은 것으로 되어 있다. 따라서 본 실험은 계절로서는 중간치가 되고 일일 변동으로서는 가장 빈도가 적은 최악조건에 해당되므로 MBC 통신로의 설계의 참조 경로로서는 대체로 신뢰할 수 있는 시간을 선택한 것이 된다.

4-4 측정 결과 및 고찰

4-4-1 계획 경로 1(경산-Hamamatu 750 km)

이 구간에 관한 실험결과는 그림 7에 점선으로 표시된 바와 같이 나타났다. 문턱치 3 dB점을 관찰할 때 추정치는 빈도에 있어서 최대 21.4 % 정도,

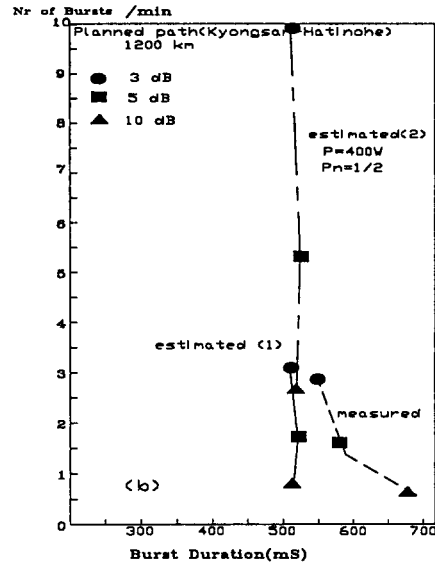


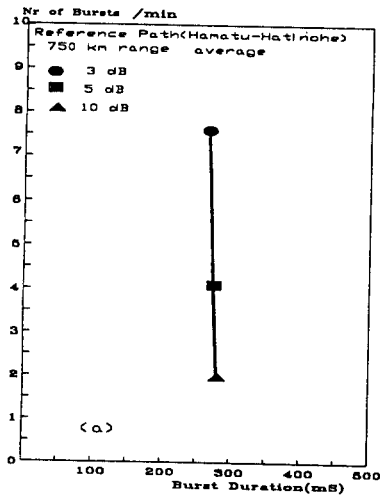
그림 7. 1200 km 계획 경로의 추정치 및 실측치
 Fig. 7. Predicted & measured value of 1200 km planned path.

지속시간에 있어서 7.7 % 정도 오차가 있으나 유성 버스트가 계절, 시간, 위치 등에 따라서 400 % 내외나 변화할 수 있다는 점을 고려할 때 비교적 잘 부합하고 있다고 볼 수가 있겠다.

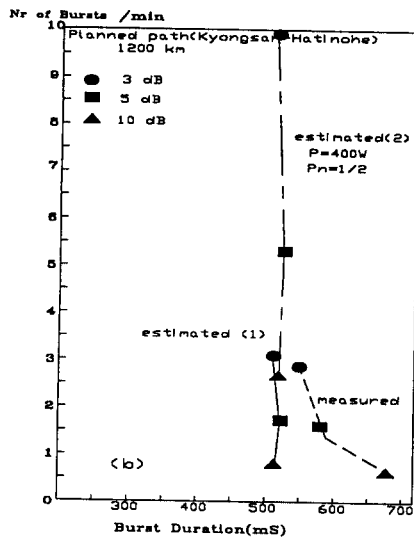
실측치가 추정치보다 다소 높게 나타난 것은 과밀도 트레일이 다소 포함되었기 때문으로 생각된다. 실지에 있어서는 과밀도 트레일이 상당량 발생하고 있으므로 저밀도 트레일만을 대상으로 하는 본 추정결과 보다는 언제나 높게 나타날 것이며 신설 경로 계획에 있어서는 오히려 안전한 설계에 도움이 된다.

4-4-2 계획 경로 2(경산-Hatinohe 1200 km)

이 구간에 관한 실험결과는 그림 8에 점선으로 표시된 바와 같이 나타났다. 3 dB점을 관찰하면 추정치와는 빈도에 있어서 최대 7.1 % 정도, 지속시간에 있어서 5.5 % 정도 오차가 있어서 대체로 잘



(a)



(b)

그림 8. 750 km 참조 경로의 평균치(a)와 1200 km 계획 경로의 추정치 및 실측치(b)

Fig. 8. Average value of 750 km reference path (a) and predicted & measured value of 1200 km planned path(b).

일치하고 있다. 이 실측결과를 본다면 이 경로에서는 이대로는 실용화가 어렵고 V를 보다 높여서 빈도수를 개선할 필요가 있다. 본 추산법으로 계산한다면 출력을 400 W 수준으로 높이고(3 dB) 수신 안테나의 위치를 조정하여 배경잡음을 3 dB 정도 낮추면 그림 8에 쇄선으로 표시된 것과 같이 개선이 가능하다.²

IV. 결 론

유성 버스트 통신은 유용한 VHF NLOS 통신 방식이기는 하나 유성 트레일의 발생빈도와 지속시간이 불규칙적이기 때문에 설치 이전에 상당한 기간의 시험통신 과정을 거쳐야만 신뢰성있는 경로를 설계할 수가 있다.

본 논문은 이미 가동 중에 있거나 시험통신을 토대로 하여 확실한 특성이 검증된 특정 경로를 참조 경로로 선택하여 계획 중인 경로의 기대 특성을 여기에 비교 계산하므로써 일일이 시험통신 과정을 거치지 않고서도 신뢰성있는 설계가 가능한 방법을 제안한 것이다.

본 논문에서는 이 방법을 이용하여 경산-hama-matsu 750 km와 경산-Hatinohe간 1200 km 간에 유성 버스트 무선 경로를 설치한다는 가정 하에 기존의 Hatinohe-Hamamatsu 간 750 km 경로를 참조 경로로 하여 이 두 경로에 대한 버스트의 발생빈도와 지속시간 특성을 추정하였으며 그 후, 이 경로에 직접 실험국을 설치 운용하여 시험통신을 실시하고 위의 추정 결과와 비교하였는데 대체로 빈도에 있어서 21.4 % 이내, 지속시간에 있어서 7 %의 정확도가 있음을 확인하였다. 두 경로 모두 지속시간에 있어서는 실측치가 추정치보다 높은 값을 갖고 특히 1200 km의 장거리 경로에서 이 경향이 현저하였는데 이것은 수신전계가 약한 경우에는 과밀도 트레일의 영향이 커지기 때문으로 해석되었다.

² 이 경우 $\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}} = \sqrt{\frac{P_T G_T G_R}{P_{T_{ref}} G_{T_{ref}} G_{R_{ref}}}} \cdot \frac{P_{thref}}{P_{th}} = 1.29$ 이므로 $N(3 \text{ dB}) = 7.64 \times 1.29 = 9.9$, $N(5 \text{ dB}) = 4.12 \times 1.68 = 5.3$, $N(10 \text{ dB}) = 2.6$ 과 같이 개선된다.

부록 1

트레일의 질량과 전자 선밀도는 비례하므로 전자 선밀도가 q_0 이상인 트레일의 수 N 은 식 (6)에 의해

$$N(q > q_0) = c q_0^{-s+1} = c q_0^{-1} \quad (1)$$

와 같이 된다. 여기서 $c = 1.3 \times 10^2 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 로 한다면 N 은 매초당 1 m^2 평면에 떨어지는 유성 트레일의 수가 된다. 유성 버스트는 수신기에의 입력 전압이 특정 문턱 전압을 초과하는 경우에만 터지며 이때 신호전송이 이루어진다. 따라서 한개의 저밀도 트레일로부터의 반사파를 전압으로 표시하면 (3)으로부터 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$V(t) = 0 \quad t < t_0$$

$$V(t) = V_m \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad t > t_0 \quad (2)$$

단 여기서 V_m 는 초기치이고 τ 는 버스트 파형의 시정수이다.

지금 특정 문턱전압 V_{th} 보다 더 큰 초기치를 지닌 버스트 수를 N 이라 한다면 식 (1)에서 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$N(V_m > V_{th}) = cV_{th}^{-a} \quad (3)$$

문턱 전압 V_{th} 에서 지속시간 t 인 버스트는 그 최대치가 식 (2)에서

$$V_m = V_{th} \cdot \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (4)$$

이다. 최대치가 V_m 와 $V_m + dV_m$ 사이에 있는 버스트의 수는

$$dN = acV_m^{-a-1}dV_m \quad (5)$$

와 같으므로 이들의 지속시간을 합하면 다음과 같다.

$$dT_b = t dN = tacV_m^{-a-1}dV_m$$

$$= t a c \left[V_{th} \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \right]^{a-1} \left(\frac{V_{th}}{\tau}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) dt \quad (6)$$

따라서 문턱값 V_{th} 을 초과하는 총 버스트 시간은

$$T_b = \int t dN = cV_{th}^{-a} \int_0^\infty \left(\frac{a}{\tau}\right) t \cdot \exp\left(-a\frac{t}{\tau}\right) dt$$

$$= \left(\frac{\tau}{a}\right) cV_{th}^{-a} \text{ 또는 } T_b = \left(\frac{\tau}{a}\right) N \quad (7)$$

와 같이 되어 $(\tau/a) \approx \tau$ 이 버스트의 평균 지속시간임을 알 수가 있다. 이 식은 또한 버스트의 평균 지속시간은 문턱치와는 무관하다는 것을 나타내고 있는데 이것은 실지에 있어서 문턱치를 낮추면 기존의 버스트의 지속시간은 길어지지만 새롭게 많은 짧은 버스트가 생겨나므로 평균 지속시간은 증가하지 않는다는 간단한 이치로부터도 알 수가 있다.

그러나 경로의 도통율은 버스트의 발생수에 비례하므로 식 (3)에서

$$I(V > V_{th}) \propto V_{th}^{-a} = V_{th}^{-1} \quad (8)$$

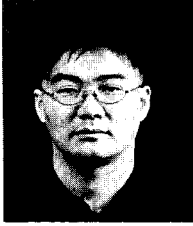
이 되어 문턱 전압에 반비례한다.

참고 문헌

- [1] G. R. Suger, "Radio propagation by reflection from meteor trails" *Proc. IEEE*, pp. 116-135, Feb. 1964.
- [2] 福田明 "流星 burst 통신" 電磁環境工學情報, pp. 90-99, Oct. 1991.
- [3] J. D. Oetting, "An Analysis of meteor burst communications for military applications", *IEEE. Trans. Comm.* COM-28, 9,

- pp. 1591-1600, Sept. 1990.
- [4] G. W. L. Davis, "The canadian JANET system" *proc. of IRE* 45, pp. 1666, Dec. 1957.
- [5] P. A. Forsyth, "The principles of JANET, a meteor burst communication system" *Proc. IRE*, vol. 45, no. 12, pp. 1642-1657, Dec. 1957.
- [6] P. J. Bartholome, "COMET-a new meteor burst system incorporating APQ and Diversity reception" *IEEE, Trans., Commun.*, vol. 52 no. 2, pp. 268-278, Apr. 1968.
- [7] D. E. Johnson : "Ten years experience with the SNOTEL meteor burst data acquisition system" *Proc. MBC symp.*, pp. SII. 5-SII. 20, Nov. 1987.
- [8] L. A. Manning "Meteor in the ionosphere" *Proc. IRE*, vol. 47, pp. 186-189, Feb. 1959.
- [9] J. A. Weitzen "Predicting the arrival of meteors for MBC" *Radio Science*, pp. 1009-1020, Nov-Dec. 1986.
- [10] G. R. Suger "Spatial properties of meteor burst propagation" *IEEE. Trans., Comm.*, pp. 841-845, June 1980.
- [11] J. A. Weitzen "A study of foot-print of meteor scatter communication" *IEEE. Trans. Comm.*, Apr. 1990.
- [12] 福田明 "流星 burst 通信system 特性" 信學論(B), pp. 345-344, 1982, 7.
- [13] T. R. Kaiser "Radio echo studies of Meteor Ionization" *Advan. physics*, vol 2. pp. 495-544, Oct. 1953.
- [14] V. R. Eshlman "Meteor and Radio Propagation," *Stanford Uni Rept.*, no. 49, Feb. 1959.
- [15] C. O. Hines "Journal variations in forward scattered meteor signals" *J. atmos. Terr. Phys.*, 9, pp. 229-232, Oct. 1960.
- [16] P. S. Cannon "The evolution of meteor burst communication system" *J. Inst. Electron. Radio Eng.*, vol. 57, 3, pp. 101-112, May 1987.
- [17] 福田明 "流星 burst 通信に依る 方向 Message 送systemの性能評價" 信學技報, pp. 119-126, 1992. 4
- [18] 福田明 "流星burst 通信" コロナ社, pp. 2-93, 1997. 3.

김 병 철

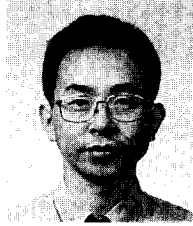


1994년 2월 : 영남대학교 공과대학
전자공학과(공학사)
1996년 2월 : 영남대학교 대학원 전
자공학과(공학석사)
1996년 3월~ 현재 : 영남대학교 대
학원 전자공학과(박사과정)

이 무 영

1932년 11월 29일생
1960년 : 한양대학교 전기공학과(공학사)
1972년 : 캐나다 BC 주립대학(공학석사)
1975년 : 영남대학교(공학박사)
1966년 9월~현재 : 영남대학교 전기전자공학부 교수
[주관심 분야] 전자파 이론, 전자파 응용 등

김 기 채



1984년 2월 : 영남대학교 공과대학
전자공학과(공학사)
1986년 3월 : 일본 Keio Univ. 대
학원 전기공학과(공학석사)
1989년 3월 : 일본 Keio Univ. 대
학원 전기공학과(공학박사)

1989년 4월~1993년 3월 : 한국표준과학연구원 전자파연
구실 선임연구원

1993년 4월~1995년 8월 : 일본 후쿠오카 공업대학 정보공
학과 조교수

1995년 9월~현재 : 영남대학교 전기전자공학부 조교수
[주관심 분야] 전자파이론 및 안테나, EMC/EMI, 전자
파 응용 등