

---

# 밀리미터파 시스템에서의 MCF 분석

이종길\*

## Analysis of MCF in Millimeter Wave Systems

Jong Gil Lee\*

---

본 연구는 2005년도 인천대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었음

---

### 요 약

밀리미터파는 고해상도의 거리 및 영상정보를 얻기 위하여 매우 유용하게 쓰여 질 수 있다. 또한 고속 멀티미디어 서비스의 필요성이 갈수록 커지고 상대적으로 낮은 주파수 대역의 주파수 자원이 부족하기 때문에 밀리미터파를 이용한 광대역 통신시스템에서의 실용화를 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 이러한 밀리미터파 시스템의 성능을 제대로 평가하기 위해서는 우선 대기 중에서의 밀리미터파의 전파특성에 대한 분석이 선행되어야 한다. 전계에 의한 강도 변화정도와 MCF(Mutual coherence function)는 밀리미터파 전파에 있어서의 대기에 의한 영향을 표시하게 된다. 본 논문에서는 밀리미터파 전파특성을 분석하기 위하여 QOM(Quasi-optical method) 방법을 적용하여 안테나 초점평면에서의 전계에 의한 강도 분포로부터 MCF를 얻을 수 있는 기법을 고찰하였다. 아울러 효과적인 측정 및 분석을 위하여 전계에 의한 강도 대신 안테나 초점평면에서의 플럭스(flux) 측정을 통하여 MCF를 구할 수 있는 방법을 제안하였다.

### ABSTRACT

Millimeter waves can be used for high resolution ranging and imaging. As the necessity of high-speed multimedia communication increases, millimeter wave systems are being developed since they are useful for wide band communication considering the shortage of available spectrum bands. However, it is necessary to analyze the characteristics of millimeter propagation in the atmosphere to assess the performance of millimeter wave systems. MCF and intensity fluctuations describe atmospheric effects on millimeter wave propagation. Using the quasi-optical method, a method is investigated to obtain MCF from the intensity distribution of focal plane. Also, a practical method is proposed to compute MCF from the flux measurement in the antenna focal plane

### 키워드

MCF, millimeter wave, QOM, intensity, propagation

## I. 서 론

밀리미터파는 광대역 통신 및 특수한 목적으로의 사용 영역이 점차 넓어지고 있다. 그러나 이러한 밀리미터파

시스템의 성능을 평가하기 위해서는 밀리미터파 대역에서의 대기 중의 전파특성에 관한 연구가 선행되어야 한다. 대기 중에서의 전파 특성에 관한 일반적인 이론은 Manning 등이 저술한 논문에 상세히 기술되어 있다[1][2].

이 이론은 한정된 개구면 크기와 그에 따른 5가지 종류의 대기 중에서의 전자파 전파 특성에 대하여 설명하고 있다. 이러한 이론적인 전파 특성 모델들은 실험적으로 측정 가능한 값들을 이용하여 밀리미터파의 전파특성을 분석할 수 있게끔 하여준다. 여기서 실험적으로 측정 가능한 값인 전계에 의한 도달 강도 및 MCF는 매우 중요한 값으로 밀리미터파의 대기 중의 전파특성을 결정짓는 중요한 변수이다.

본 논문에서는 특히 전파 진행방향의 횡단면에 놓이며 복소 전계의 cross correlation 값으로 정의되는 MCF에 관하여 주목하고자 한다. 전계벡터  $\vec{E}'$ 를 시간변화에 따른 각주파수 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\vec{E}'(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t) \exp(-j\omega t) \quad (1)$$

여기서  $\vec{E}'$ 의 시간에 대한 변화량은 유전율  $\epsilon(\vec{r}, t)$ 의 랜덤 특성에 따라 다르다. 전파하는 전자파의 주파수에 비해서 대기교란에 의한 주파수는 무시할 수 있다고 가정한다면 Maxwell 방정식으로부터의 벡터 파동 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \epsilon \vec{E} + \nabla(\vec{E} \cdot \nabla \ln \epsilon) = 0 \quad (2)$$

대기 중에서의 투자율(magnetic permeability)  $\mu$ 가 1이고 유전율의 변화정도가 크지 않다면 파동 방정식은 각각 세 개의 스칼라 방정식으로 다음과 같이 나누어 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \epsilon \vec{E} = 0 \quad (3)$$

스칼라 방정식인 식 (3) 및 Rytov방법 [3]에 의하면 MCF,  $\Gamma$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Gamma(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = E_0(\vec{r}_1) E_0^*(\vec{r}_2) \exp[-\frac{1}{2} D(\vec{r}_1, \vec{r}_2)] \quad (4)$$

식(4)에서의  $E_0$ 와  $D$ 는 각각 대기의 영향을 받지 않은 전자파의 전계 성분과 파형 구조함수(wave structure function)로서 나누어질 수 있다. 여기서  $\vec{r}$ 는 위치벡터

를 나타내며  $E_0$ 는 전계를 표시한다. 식(4)에서 알 수 있는 것처럼 MCF는 상태가 변화하는 매체에서 전파되는 전자파의 coherence 손실정도를 표시한다. 따라서 MCF는 실질적인 응용분야에서 매우 중요한 함수로서 헤테로다인 수신기의 신호 대 잡음 비, 대기권 전파에서의 해상도 한계 등을 결정한다. 또한 전파된 전자파의 안테나 수신 개구 면에서의 전계에 의한 평균 강도 분포 함수와 직접적으로 연관되어 있다.

## II. Quasi-optical 방법 분석

MCF는 전파매체에서의 굴절율이 불균일하게 변화함으로써 많은 영향을 받게 된다. 따라서 기상정보는 밀리미터파 시스템의 전천후 성능을 분석하는데 매우 중요한 요소이다. MCF가 1/e 배로 감소되는 횡단면에서의 coherence 길이는 대기 중의 안개, 연기 등에 의해서 심각할 정도로 감소될 수 있다. 여기서  $\rho_0$ 를 대기중의 MCF가 1/e 배로 감소되는 횡단면에서의 길이라고 한다면 Z만큼 떨어진 거리에서 얻을 수 있는 최소 해상도는  $Z/(k\rho_0)$ 와 같이 표시된다. 그러므로 coherence 길이의 감소는 해상도가 저하된다는 것을 의미하며 전자파 빔의 분산이 증가한다는 것을 알 수 있다.

QOM(Quasi-optical method) 방법은 안테나 초점평면에서의 전계에 의한 강도 분포로부터 MCF를 구하기 위하여 사용할 수 있다. 대부분의 경우 몇가지 가정이 만족하는 상황에서는 반사안테나의 초점평면에서의 전계는 개구면에서의 전계가 푸리에 변환된 형태로 나타나게 된다 [4]. 즉 이러한 관계식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$E(q) = (ik/2\pi f) \exp(ikL) \times \iint_{S_a} E(\vec{r}) W(\vec{r}) \exp[-ik(\vec{q} \cdot \vec{r})/f] d^2\vec{r} \quad (5)$$

식 (5)에서의 각 부호들의 의미는 다음과 같이 표시된다.

$\vec{q}$ : 초점평면에서의 위치벡터

$\vec{r}$ : 개구면에서의 위치벡터

$k$  : the wave number

$f$  : 파라볼라 안테나의 초점거리

$L$  : 위상변이 상수

$S_a$  : 개구면의 면적

$W(\vec{r})$  : 0 또는 1로 표현되는 개구면 함수

식(5)가 적용될 수 있는 가정은 다음과 같이 쓸 수 있다.

a. 안테나의 직경 및 곡률반경, 입사되는 파형 전면은 전자파의 파장에 비하여 상대적으로 모두 큰 값을 가져야한다.,

b.  $q < \sqrt{\lambda f / 2}$

c.  $F \gg 1/4$ ; 여기서  $F$ 는  $f$ (개구면의 직경)으로 표시되는 숫자

따라서 초점평면에서의 점  $q$ 에서의 강도  $I(q)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$I(q) = [k / (2\pi f)]^2 \iint E(\vec{r}) E^*(\vec{r}') W(\vec{r}) W^*(\vec{r}') \times \exp[-ik\vec{q} \cdot (\vec{r} - \vec{r}') / f] d^2\vec{r} d^2\vec{r}' \quad (6)$$

여기서 전계  $E$ 는 전자파가 전파되는 불안정한 대기의 통계적인 특성 때문에 랜덤 함수로 표시된다. 그러므로 강도의 앙상블 평균(ensemble average)을 구하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\langle I(q) \rangle = [k / (2\pi f)]^2 \iint \Gamma(\vec{r}, \vec{r}') W(\vec{r}) W^*(\vec{r}') \times \exp[-ik\vec{q} \cdot (\vec{r} - \vec{r}') / f] d^2\vec{r} d^2\vec{r}' \quad (7)$$

여기서  $\Gamma(\vec{r}, \vec{r}') = \langle E(\vec{r}) E^*(\vec{r}') \rangle$ 는 개구면에서의 전계 MCF를 표시하게 된다. 대기중을 전파하는 전자파에서 이러한 불규칙적으로 변화하는 대기의 전기적인 파라미터로 인한 영향을 표시하는 것이 MCF이다. 그러므로 적분식(7)을  $\Gamma$ 에 대하여 풀기 위하여 푸리에 역변환을 취하여야 한다. 약간의 연산과정을 거치면 안테나

와 대기의 영향을 고려한 다음과 같은 전체 전달함수 (transfer function)를 구할 수 있다.

$$H_T(\vec{\rho}) = \int \Gamma(\vec{r}, \vec{r} - \vec{\rho}) W(\vec{r}) W^*(\vec{r} - \vec{\rho}) d^2\vec{r} \quad (8)$$

여기서  $\vec{\rho} = \vec{r} - \vec{r}'$ 로 표시하였다. 만약 통계적인 불균질성(inhomogeneity)이 미미하다면 (8)식은 다음과 같이 두개의 항으로 분리하여 각각의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$H_T(\vec{\rho}) = \Gamma(\vec{\rho}) \int W(\vec{r}) W^*(\vec{r} - \vec{\rho}) d^2\vec{r} = \Gamma(\vec{\rho}) H_A(\vec{\rho}) \quad (9)$$

여기서  $H_A(\vec{\rho})$ 는 안테나 전달함수를 의미하며 직경  $d$ 를 가지는 각 원점이  $\vec{r}$  축과  $\vec{\rho}$  축에 있는 두 원의 중첩되는 면적을 표시하게 된다. 그러므로 적분결과는 두 원의 중첩되는 면적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_A(\rho) = (d^2 / 2) \times [\cos^{-1}(\rho / d) - (\rho / d)(1 - (\rho / d)^2)^{1/2}] \quad (10)$$

여기서  $\rho > d$ 인 경우  $H_A(\rho)$ 의 값은 0이다.

### III. 초점평면에서 신호해석

이제 앞의 장에서 설명한 것처럼 초점평면에서의  $\langle I(q) \rangle$ 를 측정함으로써 다음과 같이 표시되는 전체 전달함수를 구하여야 한다.

$$H_T(\rho) = \int \langle I(q) \rangle \exp(ik\vec{\rho} \cdot \vec{q} / f) d^2\vec{q} \quad (11)$$

여기서  $\langle I(q) \rangle$ 는 원형의 개폐되는 홀(iris)을 초점평면에 두고서 닫히고 열리는 정도에 따른 플럭스(flux)의 증감 정도를 측정함으로써 얻어질 수 있다. 반경  $R$ 를 가지는 iris를 통해 전달되는 플럭스  $F(R)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(R) = \int_0^{2\pi} \int_0^R \langle I(q) \rangle q dq d\theta = 2\pi \int_0^R \langle I(q) \rangle q dq \quad (12)$$

평균 강도  $\langle I(q) \rangle$ 를 실험적으로 측정된 플럭스 항으로 바꾸어 표현될 수 있도록 (12)식을 미분하면 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} F(R) = 2\pi \langle I(R) \rangle \quad (13)$$

그러므로 R에서의 플럭스에 대한 미분이 강도로 나타내게 된다. 그러나 이러한 플럭스에 대한 미분량을 실험적으로 측정하는 것은 매우 어려운 작업이다. 따라서 다음과 같이 플럭스의 측정을 통하여 전체 전달함수, 즉 MCF를 얻는 방법을 제안하고자한다.

전계에 의한 강도 분포  $\langle I(q) \rangle$ 의 대칭성을 고려하면 (11)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_T(\rho) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \langle I(q) \rangle \exp(k\rho q \cos\theta / f) q dq d\theta = 2\pi \int_0^\infty \langle I(q) \rangle J_0(k\rho q / f) q dq \quad (14)$$

따라서 식(14)는  $\langle I(q) \rangle$ 의 푸리에-베셀(Fourier-Bessel) 변환을 나타낸다. 여기서  $J_n$ 은 첫 번째 종류의 n차 베셀 함수를 표시한다. (14)식은 반경 R을 통과하는 플럭스,  $F(R)$  항으로 다시 표현할 수 있다. 즉,

$$H_T(\rho) = \int_0^\infty dF(q) / dq J_0(k\rho q / f) dq \quad (15)$$

부분 적분을 시행한 후 베셀함수의 순환 특성을 이용하면 전체 전달함수  $H_T(\rho)$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_T(\rho) = J_0(k\rho q / f) F(q) \Big|_0^\infty + k\rho / f \int_0^\infty F(q) J_1(k\rho q / f) dq \quad (16)$$

식 (16)에서 첫 번째 항은 q가 무한대로 감에 따라 점점 0으로 가게 되며 정의에 따라서  $F(0)$ 는 0이다. 그러나 실제 적분구간은 0부터 무한대까지가 아니라 0부터 초점평면 스캐너의 최대반경,  $q_{max}$  까지 이다. 따라서 식(16)의 첫 번째 항을 무시할 수 없으므로 식은 다음과 표시할 수 있다.

$$H_T(\rho) \approx J_0(k\rho q_{max} / f) F(q_{max}) + k\rho / f \int_0^{q_{max}} F(q) J_1(k\rho q / f) dq \quad (17)$$

푸리에 변환의 정의에 의하면  $\langle I(q) \rangle$ 는 초점평면  $[0, \infty]$  사이에서 적분되어야 하지만 실질적으로 식 (17)은 여전히 유효하다. 왜냐하면 대부분의 수신 전력은 최대 반경  $q_{max}$  안의 면적에 존재하기 때문이다. 그러므로 실험적으로 얻어지는 플럭스를 이용하여 (17)식으로부터 전체 전달함수  $H_T(\rho)$ 를 구할 수 있다. 따라서 MCF는 식 (9)를 이용하여 전체 전달함수를 식 (10)의 안테나 전달함수,  $H_A(\rho)$ 로 나누어줌으로써 얻을 수 있다.

#### IV. 모의 데이터를 이용한 MCF 결과 분석

플럭스나 전계에 의한 강도 등은 실제 측정하지 않고는 얻을 수 없기 때문에 모의 플럭스 데이터를 이용하여 앞장에서 제시한 방법대로 MCF가 제대로 구해질 수 있는지를 검증하고자 한다. 모의실험의 목적으로 다음과 같은 강도를 갖는 경우를 고려하여 보자. 즉,

$$I(q) = A \exp(-a^2 q^2) \quad (18)$$

여기서 상수 A 및 a는 초점평면에서의 최대반경  $q_{max}$ 에서 강도가  $e^{-3}$  배로 감소되며 초점평면에서의 전체 수신 전력은 1 milliwatt가 되도록 결정하였다. 그러므로 모의실험을 위한 플럭스 함수는 다음과 같이 표시된다.

$$F(r) = 2\pi \int_0^r \langle I(q) \rangle q dq$$

$$= \frac{\pi A}{a^2} (1 - \exp(-a^2 r^2)) \quad (19)$$

여기서 앞에서 언급한 모의 조건을 만족하도록 각 상수들을  $a = 78.7 \text{ m}^{-1}$ ,  $A = 1.97 \text{ watt/m}^2$ ,  $q_{\text{max}} = 2.2 \times 10^{-2} \text{ m}$ 로 하였다.

이제 (17)식을 이용하여 전체 전달함수를 구하여 본다. 근사적인 전체 전달함수를 구하는 과정에서 연산오차를 줄이고 적분 값의 정확도를 높이기 위하여 리만 합(Riemann sum) 대신에 가우스 쿼드러처(Gauss-Legendre Quadrature) 기법 [5]을 이용하여 계산하였다. 연산 결과를 그림 1에 표시하였다. 그림 2는 MCF를 보여주고 있는데 식(9)를 이용하여 전체전달함수를 안테나 전달함수로 나누어서 얻어진 결과이다. 그림 1, 그림 2에서 보는 것처럼 결과 그림에서 MCF의 coherence 길이는 매우 짧게 나타나는 데 이는 선정된 강도 모델의 분포의 형태가 매우 분산된 형태이기 때문이다.

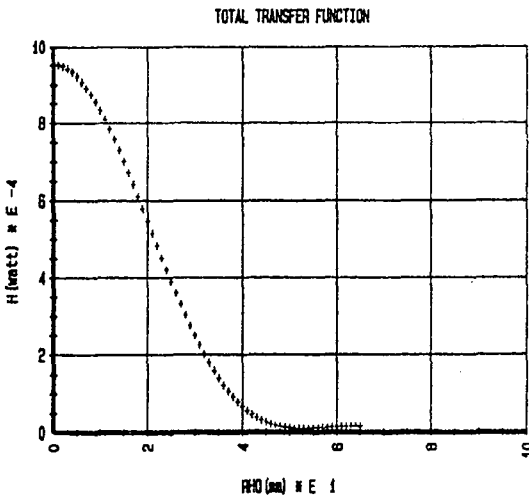


그림 1. flux 모델로부터 구한 전체 전달함수  
Fig. 1 the computed total transfer function,  $H_T(\rho)$  from the flux model

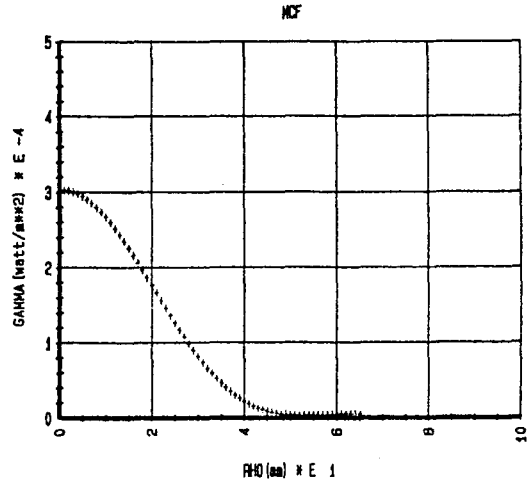


그림 2. 안테나 전달함수,  $H_A(\vec{\rho})$  를 고려하여 얻어진 MCF

Fig. 2 The obtained mutual coherence function,  $\Gamma(\rho)$  considering the antenna transfer function,  $H_A(\vec{\rho})$

그런데, 여기서 주의하여야 할 점은 수치적분을 통하여 얻은 전체 전달 함수,  $H_T(\rho)$  의 정확도가 어느 정도인지 검증하여야만 한다. 따라서 이러한 결과들은 해석학적인 해가 존재하는 경우와 비교하여 그 정확도를 확인할 수 있다. 본 논문에서 모의한 것처럼 전체에 의한 강도가 가우시안 빔 형태로 표시된다면 전체 전달 함수,  $H_T(\rho)$  의 해석학적인 해는 푸리에 - 베셀 변환(Fourier-Bessel transform)[6]을 통하여 정확하게 구할 수 있다. 사용한 강도 모델을 식 (14)에 대입하면 전체 전달 함수,  $H_T(\rho)$ 에 대한 정확한 해석학적인 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$H_T(\rho) = \frac{\pi A}{a^2} \exp \left[ - \left( \frac{k}{2fa} \right)^2 \rho^2 \right] \quad (20)$$

여기서 식 (20)의 결과는 해석학적인 해를 구하기 위하여 초점평면에서의 적분구간이 무한대까지 행해졌다고 가정하는 경우이다. 그림 3에 전체전달함수에 대한 정확한 해석학적인 결과와 근사적인 수치적분에 의한 결과를 표시하였다.

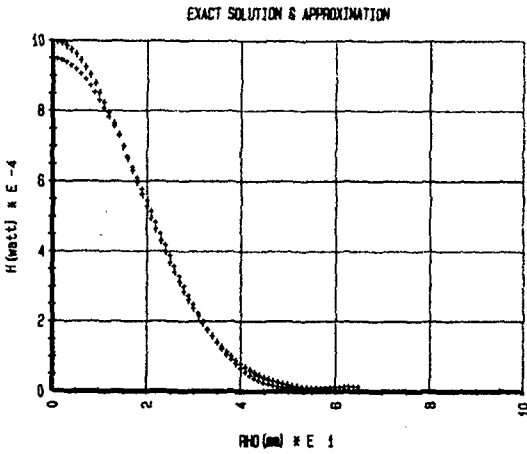


그림 3. 전체 전달함수,  $H_T(\rho)$  의 정확한 해에 대한 근사적인 값 비교

Fig. 3 Comparison between the exact solution and approximation of total transfer function,  $H_T(\rho)$

그림 3에서 보는 것처럼 플렉스 모델로부터 근사적으로 구한 값을 정확한 값과 비교하여 보면 결과들은 신뢰할 수 있을 정도로 거의 같게 나타나고 있다. 물론 예상했던바와 같이 식 (16)에서의 적분 상한구간을 무한대 대신에  $q_{max}$  로 근사화 시켰기 때문에 오차는 피할 수 없으며 수치적분에 의한 오차도 물론 포함되어 있다. 그러나 이러한 오차 값은 큰 영향을 줄 정도로 크지 않기 때문에 이러한 방법을 적용하는데 있어서 큰 어려움은 없다. 그림 4에 실제 값에 대한 상대적인 오차를 %로 나타내었다. 그림 4에서 보는 것처럼 상대적인 오차도 크게 나타나지 않는다. 일부 상대오차가 크게 나타나는 영역은 실제 값이 0에 접근하는 아주 작은 값을 갖게 되는 영역으로 오차가 과장되어 나타나게 되는데 그림 3에서 보는 것처럼 절대적인 오차는 무시할 수 있을 정도이다.

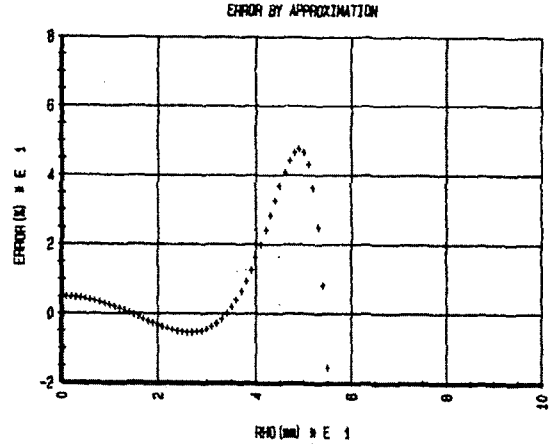


그림 4. 해석학적인 해와 비교한 상대오차 백분율  
Fig. The relative percentage error comparing with an analytic solution

### V. 결론

MCF는 밀리미터파 시스템의 전천후 성능을 분석하는데 매우 중요한 요소이다. 대기권 전자파 전파에 있어서의 제반 영향들이 MCF에 반영되기 때문이다. 본 논문에서는 밀리미터파 전파특성을 분석하기 위하여 QOM(Quasi-optical method) 방법을 적용하여 안테나 초점평면에서의 전계에 의한 강도 분포로부터 MCF를 얻을 수 있는 기법을 고찰하였다. 특히 MCF를 좀더 효율적으로 구할 수 있도록 실질적인 방법을 제안하였다. 일반적으로 평균 강도의 측정은 상당히 어려울 뿐만 아니라 많은 측정 오차가 발생할 수 있다. 그러나 플렉스 측정은 원형의 개폐 센서 등을 이용하여 비교적 쉽고 정확하게 이루어질 수 있다. 따라서 플렉스 측정을 통하여 QOM 기법으로 MCF를 구할 수 있는 제안된 방법은 밀리미터파 시스템의 평가 및 분석에 매우 유용하게 쓰일 수 있을 것이다. 또한 제안된 방법의 정확도를 검증하였으며 실질적으로 이러한 제안된 방법을 적용하는데 있어서의 오차는 무시할 수 있을 정도로 작게 나타남을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] R. M. Manning, F. L. Merat, and P. C. Claspy, "Theoretical investigation of millimeter wave propagation through a clear atmosphere", Proc. SPIE, vol. 337, pp. 67-80, 1982
- [2] R. M. Manning, F. L. Merat, and P. C. Claspy, "Theoretical investigation of millimeter wave propagation through a clear atmosphere", Proc. SPIE, vol. 410, pp. 119-136, 1982
- [3] V. I. Tatarski, *Wave propagation in a turbulent medium*, Dover publications, New York, 1961
- [4] P. C. Claspy and F. L. Merat, "Atmospheric propagation studies at near-millimeter wavelengths", Proc. SPIE, vol. 337, pp. 81-87, 1982
- [5] G. A. Korn and T. M. Korn, *Mathematical Handbook*, McGraw Hill, New York, 1961
- [6] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*, McGraw Hill, New York, 1968

저자소개

이 종 길 (Jong Gil Lee)



1982년 2월 연세대학교 전자 공학과 (공학사)

1985년 1월 미국 Case Western Reserve University, Electrical Eng. (M.S.)

1990년 5월 미국 Clemson University, Electrical Eng. (Ph.D.)

1991년 1월 ~ 1993년 2월 삼성전자 특수연구소

1993년 3월 ~ 현재 인천대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심 분야: 무선통신, 레이더신호처리, 통신시스템, 스펙트럼분석