
다이폴 안테나를 이용한 대지면의 복소 유전상수 측정

홍성욱*, 김흥수*

The measurement of the ground complex dielectric constant by using the dipole antennas

Seong-wook Hong, Heung-soo Kim

요 약

가시거리 환경에서 수신 전계강도는 반사매질의 전기적 특성에 의해 변화한다. 매질의 전기적 특성을 구하기 위해 안테나의 편파특성에 대한 반사계수 식과 매질에 대한 복소 유전상수의 관계식을 유도하고 수신 전력 식을 이용하여 반사계수와 송수신전력의 관계를 원의 방정식으로 표현하였다. 그리고 측정된 전계강도로부터 매질의 전기적 특성을 구하는 알고리즘을 제시하였다.

Abstract

The received field strength is varied with the electrical characteristics of the reflection medium in the case of the line-of-sight. To obtain the electrical characteristics of medium, the relationship between reflection coefficients and complex dielectric constants of the medium is derived, and a equation of circle which is related to reflection coefficient and ratio of transmitted power to received one is represented. A algorithm is proposed, which is to predict the electrical characteristics of the medium by using the received field strength.

I. 서 론

무선통신망에서 저비용 고품질의 서비스를 제공하기 위해서는 전파특성을 해석하여 통신시스템을

설계하여야 한다. 무선통신에서 전자파전파는 송신점과 수신점사이의 전파경로상에 존재하는 구조물에 의해 반사, 투과, 회절 및 산란 등에 의해 여러 경로를 따라 이루어지게 된다. 이와 같이

* 제주대학교 통신공학과

접수일자 : 1999년 11월 18일

다중전파경로를 갖게되면 통신품질 및 전송속도 등에 영향을 미치게 되므로 이를 예측하는 것은 통신망 설계에 필수적인 일이라 할 수 있다.

가시거리 전파환경에서 수신되는 전자파는 매질에 의한 반사파의 영향을 많이 받게되며, 반사매질은 복소유전상수로 특성을 나타낼 수 있고 이 값에 따라 반사계수는 달라지며 수신전계강도 또한 변동하게 된다. 이를 분석하기 위해서는 매질의 전기적 특성(도전율, 유전상수)이 필요하다. 실제 환경의 반사매질은 손실매질이지만 그에 대한 전기적 특성을 구한다는 것이 어렵기 때문에 손실이 없는 매질로 가정하여 반사현상을 해석하거나 일반적으로 알려진 유사한 매질의 전기적 특성을 이용하여 반사현상을 해석하고 있지만 실제 전자파를 측정하거나 예측하는데는 적합하지 않다.

전파경로예측에 있어서 광선추적기법은 복잡한 환경에서 경로손실, 지연확산과 같은 채널 파라미터를 예측하는데 주로 이용되고 있으나 반사매질의 특성이 문제가 되고 있다[1]. 반사파의 전파 특성에서 반사매질의 전기적 특성에 관한 연구는 실험 반사계수의 특성으로부터 매질의 전기적 특성을 분석하고 있다[2]-[4]. 매질의 전기적 특성에 관한 연구방법은 지향특성이 매우 예리한 혼 안테나를 사용하여 직접파 및 반사파의 전계강도를 각각 측정하고 이론 및 측정 반사계수를 비교하여 매질의 전기적 특성을 분석하였다. 그렇지만 측정방법에서 전방향성의 일반적인 안테나일 경우 적용할 수 없는 어려움이 있다.

전자파전파에서 매질의 전기적 특성에 의해 반사파가 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 매질의 전기적 특성을 분석하고 반파장 다이폴 안테나를 사용한 측정방법을 제시하여 여러 매질의 전기적 특성을 구하고자 한다. 안테나의 편파 특성에 대한 반사계수 식과 매질에 대한 복소유전상수 식으로부터 매질의 전기적 특성을 유도한다. 그리고 직접파와 반사파를 포함하는 수신전력 식을 이용하여 반사계수와 송수신 전력의 관계를 원의 방정식을 표현한다. 반파장 다이폴 안테나를 사용하여 반사매질에 대한 편파특성의 전계강도를 측정한다. 수신된 전계강도로부터 매질의 전기적 특성을 구하는 알고리즘을 제시하고 석분대지, 아스팔트대지,

잔디대지에 대한 전기적 특성을 측정으로부터 구한다.

II. 반사계수

1. 평탄한 대지에서의 반사

굴곡이 없고 유한한 도전율을 갖는 대지의 반사계수는 대지의 유전상수와 도전율에 의해 변하게 되며 입사전계의 편파특성에 따라 구해질 수 있다. 그림 1은 서로 다른 매질의 경계면에서 2개의 입사광선에 따른 반사 및 투과현상을 나타내고 있다. AE와 CB의 길이는 동일한 전파 이동거리에 의해 같으므로 입사각 θ_1 과 반사각 θ_3 은 같고 CB와 AD의 길이 비와 매질에서 전파속도 비의 관계로부터 스넬(Snell)의 법칙이 얻어진다.

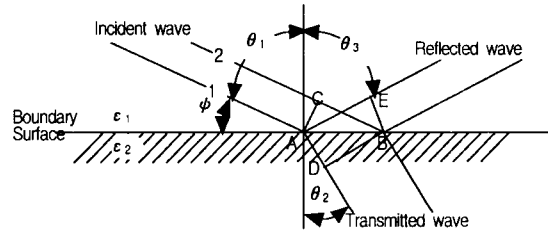


그림 1. 평탄한 대지에서의 반사 및 굴절
Fig. 1. Reflection and refraction on a flat surface

매질 1과 2의 파동 임피던스가 각각 η_1 과 η_2 일 때 AB 영역의 입사전력과 반사전력은 각각 $E_i^2 \cos \theta_1 / \eta_1$ 과 $E_r^2 \cos \theta_1 / \eta_1$ 에 비례하고 투과전력은 $E_t^2 \cos \theta_2 / \eta_2$ 에 비례하므로 에너지 보존법칙에 의해 다음의 관계가 유도된다.

$$\frac{E_r^2}{E_i^2} = 1 - \frac{\sqrt{\epsilon_2} E_t^2 \cos \theta_2}{\sqrt{\epsilon_1} E_i^2 \cos \theta_1} \dots\dots\dots (1)$$

수평편파는 전계가 경계표면에 평행한 경우이다. 입사전계 E_i 와 반사전계 E_r , 그리고 투과전계 E_t 에 대해 경계에서 전계 접선성분이 연속인 경계조건을 적용하면 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$E_i + E_r = E_t \dots\dots\dots (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입하고 스넬의 법칙을 적용하면 수평편파에 대한 반사계수가 구해지며, 전자파가 자유공간에서 반사표면에 입사한다면 반사계수는 반사면에 대한 입사여각 ψ 의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_h = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\sin \psi - \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right) - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right) - \cos^2 \psi}} \dots\dots\dots (3)$$

수직편파는 그림 1에서 전계가 경계면에 수직인 경우이다. 전계의 접선성분이 경계에서 연속인 조건을 적용하면 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$(E_i - E_r) \cos \theta_1 = E_t \cos \theta_2 \dots\dots\dots (4)$$

식(4)를 식(1)에 대입하여 스넬의 법칙을 적용하고, 전자파가 자유공간에서 대지면으로 진행하는 경우 대지면의 전기적 특성에 의한 반사계수는 입사여각에 대한 함수로 다음과 같다.

$$R_v = \frac{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right) \sin \psi - \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} - \cos^2 \psi}}{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right) \sin \psi + \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} - \cos^2 \psi}} \dots\dots\dots (5)$$

수평편파와 수직편파에 대한 반사계수는 식(3)과 식(5)에서 확인할 수 있듯이 매질의 전기적 특성, 주파수, 입사여각의 함수이고 복소수이기 때문에 입사파와 반사파는 크기뿐만 아니라 위상도 달라짐을 알 수 있다. 수평 및 수직편파의 반사계수 식에서 입사여각이 같다면 다음과 같은 수평 및 수직편파의 반사계수와 복소유전상수 (ϵ_c)의 관계를 유도할 수 있다. 복소유전상수는 유전상수가 ϵ_r 이고 도전율이 σ 인 매질에 대하여 Maxwell 방정식으로부터 구할 수 있다[5].

$$\epsilon_c = \epsilon_r - j60\sigma\lambda = \frac{(1 + R_v)(1 - R_h)}{(1 + R_h)(1 - R_v)} \dots\dots\dots (6)$$

식(6)에서 양변은 모두 복소수이다. 좌변의 실수부와 허수부에 있는 미지수는 각각 도전율과 유전상수이므로 도전율과 유전상수는 우변의 반사계수

관계로부터 구할 수 있다.

2. 직접파·반사파 모델

대지면상에 설치된 송수신시스템의 수신전계는 직접파와 반사파가 합성되어 이루어진다. 직접파·반사파 모델은 그림 2에서처럼 송신과 수신 안테나의 높이가 각각 h_1 과 h_2 이고, 전자파가 공간에서 지면에 일정한 각도 ψ 로 입사할 때 직접파와 대지 반사파를 고려한 모델이다.

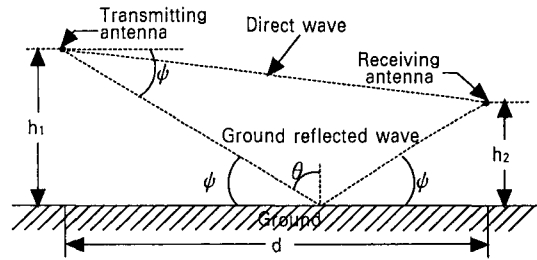


그림 2. 평탄한 대지상의 전파 경로
Fig. 2. Propagation paths over a flat ground

반사계수는 수신전력과의 관계를 가지며 수신전력은 직접파와 반사파의 벡터 합으로 구할 수 있다. 직접파·반사파 모델에서 수신전력과 반사계수는 다음과 같은 관계를 갖는다[6],[7].

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left| \frac{1}{r_1} e^{-jkn} + R_{h,v} \frac{1}{r_2} e^{-jkr_2} \right|^2 \dots\dots\dots (7)$$

여기서 P_t 는 송신전력이고 r_1 과 r_2 는 각각 직접 경로와 대지반사경로의 길이이다. 그리고 반사계수는 복소수이므로 다음과 같이 놓는다.

$$R_{h,v} = \gamma_{h,v} + j\zeta_{h,v} \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $\gamma_{h,v}$ 는 수평편파와 수직편파에 대한 반사계수의 실수 값이고 $\zeta_{h,v}$ 는 허수 값이다. 식(8)을 식(7)에 대입하고 반사계수의 실수부와 허수부에 대하여 정리하면 다음과 같이 유도할 수 있다.

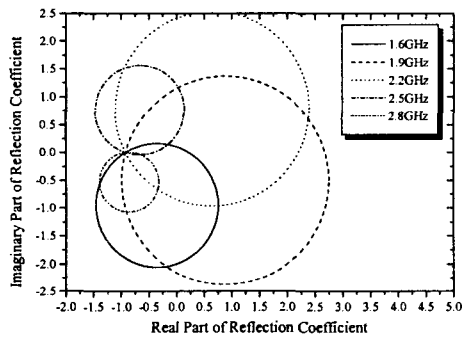
$$\left[\gamma_{h,r} - \frac{r_2 \cos k(r_2 - r_1)}{r_1} \right]^2 + \left[\zeta_{h,r} - \frac{r_2 \sin k(r_2 - r_1)}{r_1} \right]^2 = \left(\frac{4\pi r_2 \sqrt{P_r/P_t}}{\lambda} \right) \dots\dots\dots (9)$$

여기서 k 는 전파상수이다. 식(9)는 수평 및 수직 편파의 반사계수에 대한 원의 방정식으로 원의 중심은 $(r_2 \cos k(r_2 - r_1)/r_1, r_2 \sin k(r_2 - r_1)/r_1)$ 이고 반경은 $4\pi r_2 \sqrt{P_r/P_i}/\lambda$ 이다. 원의 중심은 전파경로 길이와 주파수의 관계식이므로 수평편파와 수직편파에서 항상 동일한 값을 가지며 단지 주파수와 입사여각에 의해 이동될 뿐이다. 원의 반경은 간접 경로길이와 송신전력과 수신전력의 비의 관계이다. 그러므로 동일한 전파환경과 송신전력일지라도 수신전력은 안테나의 편파특성에 의해 다른 값을 가져 수평편파와 수직편파에 대한 원의 반경은 서로 다른 크기를 가지게 된다. 또한 주파수와 입사여각

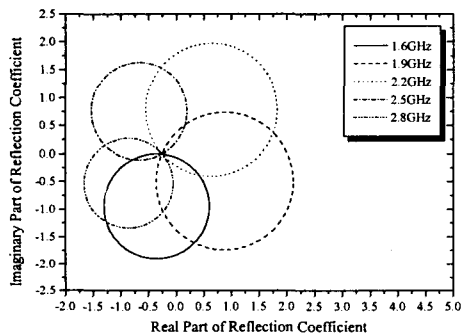
에 의한 환경의 변화가 있다면 원의 중심과 반경의 크기는 변하게 된다.

전파 측정에서 안테나 높이, 거리, 송신전력에 따라 수신전력 측정치를 얻는다면 임의의 주파수에 대한 원의 반경 및 중심을 구할 수 있다. 중심과 반경에 의한 원의 궤적에는 임의의 한 주파수와 입사여각에서의 반사계수의 값을 포함하고 있기 때문에 3개 이상의 주파수에 대한 원의 궤적을 이용하면 임의의 한 입사여각에서의 반사계수의 값을 구할 수 있고, 수평 및 수직편파 특성에 대한 매질의 반사계수를 얻는다면 매질의 전기적 특성을 추출할 수 있다.

그림 3은 입사여각이 8.53도일 때 여러 주파수에 대한 반사계수의 궤적을 나타낸 것이다. 매질의 형태는 유전상수가 15이고 도전율이 0.005(S/m)인 평균대지로 가정하였고 주파수는 1.6 GHz, 1.9 GHz, 2.2 GHz, 2.5 GHz, 2.8 GHz로 하였다. 각각의 주파수에서 원의 반경은 주파수에 의한 수신전력 변화와 안테나의 편파특성에 의한 수신전력 변화로 서로 다른 값을 가졌고, 수평편파와 수직편파에 대한 원의 중심은 동일한 전파환경에 의해 각각의 주파수에서 같은 값을 가졌다. 주파수에 대한 반사계수의 원들은 그림에서 관찰되듯이 한 점에서 교차하고 있으며 이 좌표의 범위는 반사계수 특성으로 예측할 수 있다. 반사계수의 위상 특성으로부터 교차점의 좌표는 수평편파인 경우 2사분면에 위치하고 수직편파에서는 3사분면과 4사분면에 위치하며 입사여각이 의사부위스터 각보다 작을 때는 3사분면에 위치한다[5]. 이들 좌표의 값은 입사여각에 대한 수직편파와 수평편파의 반사계수로 식(9)로부터 구할 수 있다. 그리고 매질의 전기적 특성은 반사계수를 식(6)의 복소 유전상수 관계식에 적용하여 구하였다. 매질의 전기적 특성에 대한 계산 결과는 가정한 평균대지의 전기적 특성과 일치하였으며 표 1에 나타내었다. 그러므로 동일한 전파환경에서 수직편파와 수평편파에 대한 수신전계강도 측정이 이루어진다면 반사매질의 전기적 특성을 추출할 수 있다.



(a) 수평편파
(a) Horizontal polarization



(b) 수직편파
(b) Vertical polarization

그림 3. 주파수에 대한 반사계수의 원
Fig. 3. Circles of reflection coefficients by various frequencies

표 1. 평균대지에 대한 전기적 특성 계산치
Table 1. Calculated values of electrical characteristics for average ground

| 반사계수 | | 유전상수 | 도전율 (S/m) |
|-----------------------------|-----------------------------|----------|-----------|
| 수평편파 | 수직편파 | | |
| -0.92376808 +j0.00008655 | -0.25449985 -j0.00050328 | 15.00589 | 0.00503 |

III. 측정방법

실제 전파환경에서 반사가 일어나는 매질 특성에 따라 수신 전계강도는 변동하게 되므로 매질의 전기적 특성은 반사현상을 분석하는데 필요할 뿐만 아니라 서비스 영역의 경계를 예측하는 방법에 있어 중요한 파라미터이다.

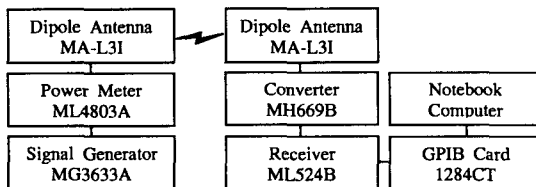


그림 4. 측정 시스템
Fig. 4. Measurement system

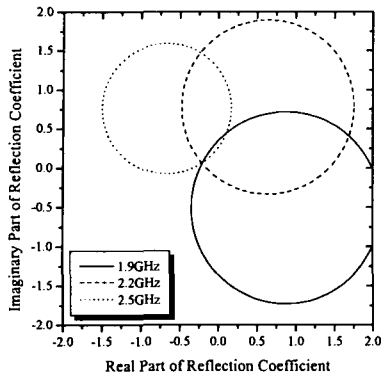
본 연구에서는 대지면의 전기적 특성을 구하기 위해 반파장 다이폴 안테나를 사용한 측정시스템을 그림 4와 같이 구성하였고 송수신 안테나의 높이는 1.5 m이고 송수신 수평거리는 20 m로 하였다. 반사매질은 실외환경에서 석분 대지, 아스팔트 대지, 잔디 대지로 선정하였다. 신호발생기와 주변장치로 구성된 송신부에서는 1.9 GHz, 2.2 GHz, 2.5 GHz 주파수에 대하여 -10 dBm, 0 dBm, 10 dBm의 전력을 출력하였고 수신기와 주변장치로 구성된 수신부에서는 각각의 송신출력과 송신주파수에 대하여 전계강도를 수신하였다. 그리고 데이터 저장 및 하드웨어를 제어하기 위해 컴퓨터가 이용되었다. 측정된 전계강도 데이터는 실시간 처리되어 저장할 수 있도록 GPIB 카드로 수신장치와 컴퓨터를 연결하였고 프로그램에 의해 수신기를 제어할 수 있도록 하였다.

측정방법은 개활 전파환경에서 대지면 위에 송수신 다이폴 안테나를 그림2와 같이 설치하여 수평편파와 수직편파일 때의 전계강도를 측정한다. 한점에서의 수평 및 수직편파에 대한 전계강도 측정은 3개의 주파수에 대해 이루어지며 한 주파수에서 송수신 전력비는 일정하기 때문에 이에 대한 확인 및 원의 반경에 대한 정확한 측정값을 얻기 위해 3개의 송신전력을 사용하였다. 또한 동일 매질에서 정확한 측정값을 얻기 위하여 장소를 3회 이동하여 반복 측정하였다. 1회 측정에서 전계강도 데이터의 수는 600개이고 통계처리하여 각각의 주파수에 대한 평균을 구하였다.

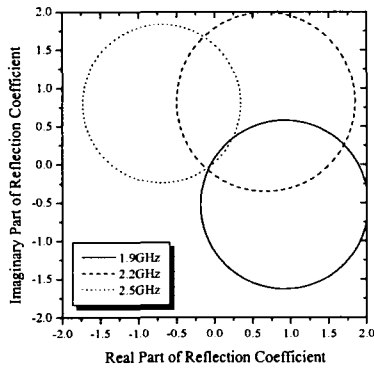
IV. 결과 및 고찰

표본환경에서 매질의 전기적 특성을 구하기 위하여 다이폴 안테나에 의해 3개의 출력전력 및 주파수에 대한 수신 전계강도 데이터를 얻었고, 이 측정 데이터를 적용한 반사계수의 특성을 분석하여 반사매질의 전기적 특성을 추출한다.

그림 5와 그림 6은 측정 데이터의 평균값을 식(9)의 원의 방정식에 적용하여 구한 반사계수의 궤적을 나타낸 것이다. 입사여각 8.53도에서 수평편파와 수직편파에 대한 반사계수는 여러 주파수의 원이 교차하는 좌표의 값이다. 그림 5에서 수직편파인 경우 반사계수의 교차좌표는 (-0.0650, -0.0244)이고 수평편파인 경우는 (-0.2038, 0.0669)이다. 그림 6에서 수직편파와 수평편파에 대한 교차좌표는 각각 (-0.1344, -0.0096)과 (-0.6308, 0.0129)이다. 잔디대지에서 수직편파와 수평편파에 대한 교차점의 좌표는 (-0.1729, -0.1873)과 (-0.2674, 0.0141)이다. 주파수가 같고 동일한 편파특성인 경우 송신전력을 달리하여도 원의 반경은 같기 때문에 송신전력과 주파수를 달리하여 반복 측정한 결과를 이용하여 반경에 대한 보정을 하였다. 표 2는 석분 대지, 아스팔트 대지, 잔디 대지에 대한 복소 유전상수의 추출값이다. 각 대지의 전기적 특성은 그림 5와 그림 6에서 구한 수직편파와 수평편파의 반사계수를 식(6)의 복소 유전상수에 적용하여 구하였으며 일반적인 습한 대지의 특성보다 유전상수는 작고 도전율은 유사한 값을 가졌다.

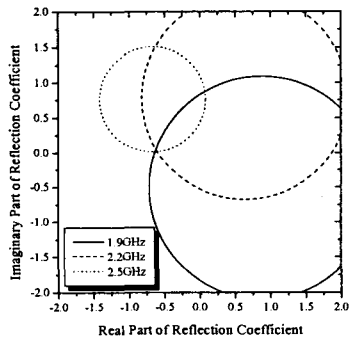


(a) 수평편파
(a) Horizontal polarization

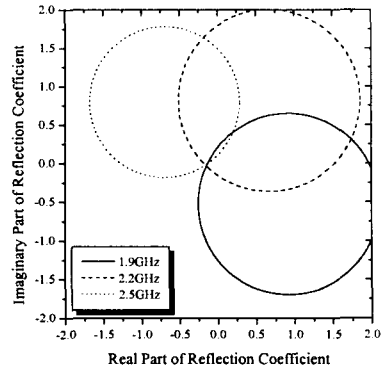


(b) 수직편파
(b) Vertical polarization

그림 5. 석분 대지에 대한 반사계수의 원
Fig. 5. Circles of reflection coefficient for stone powder



(a) 수평편파
(a) Horizontal polarization



(b) 수직편파
(b) Vertical polarization

그림 6. 아스팔트 대지에 대한 반사계수의 원
Fig. 6. Circles of reflection coefficient for asphalt

표 2. 복소 유전상수의 추출값
Table 2. Complex dielectric constants for three types of ground

| 반사매질 형태 | 유전상수 | 도전율(S/m) |
|---------|--------|----------|
| 석분 대지 | 1.3015 | 0.0303 |
| 아스팔트 대지 | 3.3619 | 0.0257 |
| 잔디 대지 | 1.1321 | 0.0604 |

V. 결 론

무선 채널의 전파특성에서 반사계수는 반사매질의 도전율과 유전상수에 따라 다르며 입사각에 따라 변화한다. 매질의 전기적 특성에 의해 수신 전계강도가 영향을 받기 때문에 매질의 전기적 특성을 구하기 위하여 반파장 다이폴 안테나를 사용한 측정방법과 반사현상을 분석하였다. 수평 및 수직편파의 반사계수와 매질의 전기적 특성에 대한 관계식을 유도하였고 수신전력 식을 이용하여 반사계수 원의 방정식을 유도하였다. 반파장 다이폴 안테나를 사용하여 수직 및 수평 편파에 따른 전계강도를 측정하였고, 측정 전계강도를 반사계수 원의 방정식에 적용하여 반사매질의 반사계수를 구할 수 있었다. 본 연구에서 제시한 측정방법은 반파장 다이폴 안테나를 사용한 매질의 전기적 특성을 구하는 측정방법으로 단순하기 때문에 개활

전파환경에서 쉽게 적용하여 매질의 전기적 특성을 구할 수 있다. 향후 연구는 복합환경의 반사현상 분석과 다이폴 안테나를 사용한 측정방법으로 실내의 매질에 대한 전기적 특성을 구하는데 있다.

참고문헌

[1] R. A. Valenzuela, "A ray tracing approach to predicting indoor wireless transmission", *IEEE Trans. VT. Conference*, Secaucus, New Jersey, pp.214-218, 1993.

[2] O. Landron, M. J. Feuerstein and T. S. Rappaport, "In situ microwave reflection coefficient measurements for smooth and rough exterior wall surfaces", *IEEE Trans. VT. Conference*, Secaucus, New Jersey, pp.77-80, 1993.

[3] O. Landron, M. J. Feuerstein and T. S. Rappaport, "A comparison of theoretical and empirical reflection coefficients for typical exterior wall surfaces in a mobile radio environment", *IEEE Trans. AP.*, vol.44, no.3, pp.341-351, 1996.

[4] M. Fiacco, M. Parks, H. Radi and S. R. Samders, "Indoor propagation factors at 17 and 60 GHz", *CCSR final report*, 1998.

[5] 이상설, *안테나 및 전파전파*, 형설출판사, pp.229-236, 1997.

[6] W. C. Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications Analog and Digital Systems*, McGraw-Hill, pp. 104-156, 1995.

[7] H. H. Xia, H. L. Bertoni, L. R. Maciel, A. Lindsay-Stewart and R. Rowe, "Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communications", *IEEE Trans. AP.*, vol.41, no.10, pp. 1439-1447, 1993.



홍 성 옥(洪性旭)
 1993년 제주대학교 통신공학과 (공학사)
 1996년 제주대학교 대학원 통신공학과(공학석사)
 1999년 제주대학교 대학원 통신공학과(공학박사)

*주 관심분야 : 안테나 및 전파전파, 이동통신



김 흥 수(金興洙)
 1978년 한양대학교 전자통신공학과(공학사)
 1980년 한양대학교 대학원 전자통신공학과(공학석사)
 1990년 한양대학교 대학원 전자통신공학과(공학박사)

1987년~현재 제주대학교 통신컴퓨터공학부 통신공학전공 교수

*주 관심분야 : 전자파 산란, 안테나 설계