

Deterministic Channel Models for Wireless Communications

고일석
인하대학교

요약

최근 컴퓨터 발전에 따라 이동통신용 채널모델로 deterministic 방법이 활발히 연구되고 있다. 이 방법은 기존의 stochastic 방법과 달리 주어진 환경의 전파전파현상을 물리 이론을 바탕으로 정확하게 예측하는 것을 목적으로 한다. 그러므로 차세대 주파수 환경 분석과 같은 다양하고 새로운 분야에 적용가능하고 연구의 진전에 따라 모델의 정확도 및 신뢰도가 점점 높아지고 있다. 그러므로 본보에서는 현재까지의 연구 결과를 정리하고 방법의 장단점을 논한다.

1. 서론

이동통신 기술은 최근 10여 년간 급속히 발전되어 왔다. 아날로그에서 디지털 통신으로 음성에서 데이터통신으로 기술 발전이 이루어져 왔다. 이동통신 시스템은 하나의 전송 매체 즉 자유공간을 사용하여 원하는 데이터를 전송하므로 자유공간 즉 채널을 최대한 효율적으로 사용하는 것이 매우 중요하다. 그러나 전송 매질에는 많은 물체들이 놓여 있고 이러한 물체의 크기, 재질 등이 달라 전송 신호에 주는 영향 또한 물체마다 다르다.

또 고정된 물체 외 움직이는 물체나 아니면 바람 등에 의해 변화되는 환경 등이 채널의 특성을 시간에 따라 변화하게 만든다. 이렇게 복잡하고 예측하기 힘든 채널을 통해 정보를 전송하기 위해 현재까지 많은 기술이 채널의 영향을 극

복하는데 초점을 두었다. 그러므로 채널 특성의 정확한 이해가 통신 시스템을 설계, 분석, 평가하는 첫걸음임이 분명하다.

채널특성을 기술하는 방식은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 많은 데이터를 바탕으로 채널 특성을 통계적으로 기술하는 stochastic approach이고 다른 것은 전파전파 현상의 물리적 특성을 기반으로 채널 특성을 예측하는 deterministic approach이다[1, 2]. 두 방식은 서로 다른 장, 단점이 있다. 예를 들면 stochastic approach는 물리적 전파전파 현상을 무시하지만 많은 실험 데이터를 사용하면 정확도가 어느 정도 보장이 된다. 그리고 현재 통신 시스템을 평가하는데 사용되고 있는 표준화된 모델을 제공한다[2]. 그러나 구축하는데 많은 시간과 노력이 요구되고 필요에 따라 계속해서 개량해야 한다. deterministic approach는 stochastic approach와는 달리 물리적 전파전파 현상을 물리 이론을 바탕으로 예측하는데 중점을 둔다. 그러므로 이 방법은 환경, 주파수와 같은 외부 변수에 상관없이 사용할 수 있다. 그리고 전파전파 현상을 정확히 이해할 수 있어 안테나배열 같은 RF 구조를 보다 정확하게 디자인할 수 있다. 그러나 이 방법은 계산에 시간이 많이 걸리고 실 환경을 단순화 시켜 모델링하므로 정확도에 문제가 있을 수 있다.

그리고 현재 통신 시스템에서 요구하는 정보를 예측하기에는 방법의 복잡도가 매우 높아 사용에 제약이 따른다[1]. 그러나 deterministic approach의 발전 가능성은 매우 높고 컴퓨터의 발전으로 점차 사용범위가 넓어지고 있다. 그러므로 본보에서는 현재 활발히 연구되고 있는 deterministic approach를 간략하게 소개한다.

II. Stochastic Channel Model

전파전파현상은 Maxwell's equation을 주어진 환경에 맞추어 풀면 정확히 예측할 수 있다. 그러나 일반적으로 고려되는 대상 즉 채널환경의 복잡도가 매우 높아 Maxwell's equation을 정확하게 풀 수 없어 여러 근사법이 사용된다. 전송 신호에 영향을 주는 것은 채널내의 여러 물체이다. 이러한 물체들은 다양한 모양을 가지고 있고 여러 매질로 구성되어 있어 전자기적 특성 즉 유전률(dielectric constant)도 넓은 범위에 분포되어 있다. 그리고 이러한 물체의 위치 또한 환경에 따라 다르게 분포되어 있어 언급된 많은 환경 요소들이 전송 신호에 주는 영향을 분석하는 것은 실질적으로 불가능 하다. 그러므로 실제 통신채널을 분석하는 방법으로 stochastic 방법을 많이 사용한다. 우선 실제 많이 사용하는 Rayleigh channel의 물리적 배경을 살펴 봄으로써 stochastic approach의 한계를 살펴 보자.

2.1 Rayleigh/Ricean Channel

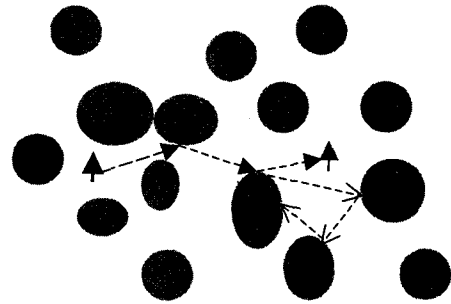
Random media내의 전파전파현상은 오래 동안 연구되어 왔다 [3]. 특히 라디오의 초기 역사에서 전파전파 현상을 이해하는 것은 군 통신, 레이더같은 많은 응용분야에서 매우 중요했다. Random media는 많은 물체들이 무질서하게 분포되어 있는 채널을 의미한다. 여기서는 문제를 간단하게 하기 위해 (그림 1)에서 보듯이 2D 환경을 고려 하고 각 물체는 비슷한 크기와 형태를 갖는다고 가정한다. 물체의 위치는 uniform distribution과 같은 일정한 PDF(Probability Density Function)로 기술할 수 있고 위치를 사이의 correlation은 상대적으로 작다고 가정한다. 즉 많은 물체들이 전 공간에 균일하게 분포되는 상황이다. 이러한 매질을 여기서는 statistically uniform random media라 부른다.

일반적으로 물체가 전송 신호에 미치는 영향은 크게 두 가지이다 [3]. 첫 번째는 물체자체의 loss에 의해 신호가 흡수되는 absorption loss이고 다른 것은 물체가 신호를 다른 방향으로 산란 시켜 신호의 크기를 줄이는 scattering loss이다. 그러므로 random media내 위치하는 두 안테나 즉 transmitter와 receiver 의 거리가 멀어 질수록 전송 신호는 감쇠(attenuation)되어 직접 전달되는 신호의 크기는 아주 작

아져 무시할 수 있어 receiver단에 도착하는 신호는 물체에 의해 산란되는 들어 오는 신호라고 가정할 수 있다. 이러한 환경을 NLOS(Non-Line-of-Sight) 환경이라 부른다. 만약 물체의 밀도가 높아지면 statistically uniform random media내 한 점을 중심으로 관측되는 신호의 크기 분포는 공간적으로 균일해지는 경향이 있다. 이러한 현상을 diffusion scattering이라 부른다[3]. 담배 연기가 공간으로 퍼져나가는 것을 생각하면 쉽게 이해할 수 있다: 담배 연기 분자는 많은 공기 분자와 충돌하면서 공간 속으로 퍼져 나간다. 문제를 간략하게 하기 위해 물체에 의해 산란되는 신호는 다음과 같이 입사신호와 비례 관계가 있다고 가정한다.

$$E^s = R \cdot E^i$$

여기서 E^s 는 산란 신호이고 E^i 는 물체의 입사신호이다. 그리고 R 은 물체의 영향을 나타낸다. R 은 일반적으로 물체의 형상, 재질을 알면 정확하게 예측할 수 있으나 예측이 복잡하므로 여기서는 간단하게 complex RV(random variable)로 모델링한다.



(그림 1) Random Medium와 random media내의 전파전파 현상

그러므로 NLOS환경에서는 한 점에서 받는 신호는 다음과 같이 쓸 수가 있다.

$$y = x_1 + x_2 + \dots \quad (1)$$

여기서 y 는 받는 신호고 x_j 는 임의의 azimuth angle에서 오는 신호이다. 앞서 설명한대로 밀도가 높으면 diffusion scattering을 가정할 수 있어 x_j 의 크기는 비슷하다. 또 x_j 는 각 물체에서 오는 무한개의 신호를 합한 것이고 또 이러한 신호는 random media의 특성 (short correlation length)때문

에 statistically independent하다고 가정 할 수 있다. 그러므로 x_j 의 real과 imaginary part 분포는 central limit theorem에 의해 Gaussian으로 가정할 수 있어 식 (1) 또한 Gaussian으로 가정할 수 있다. 그러므로 한 점에서 수신되는 신호의 크기는 Rayleigh 분포가 되고 phase는 uniform 분포가 된다[4]. 만약 LOS인 경우 Rician channel이 되어 크기분포는 Rician distribution으로 바뀐다.

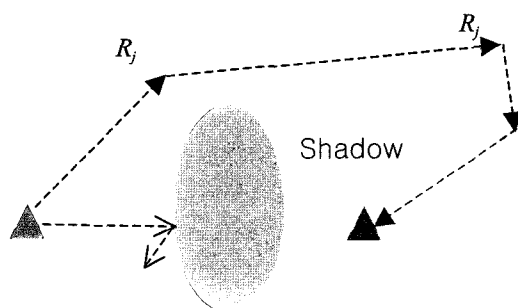
Rayleigh channel은 가장 기본이 되는 stochastic 채널 모델이고 통신 시스템해석에 많이 사용되고 있다. 그러나 앞서 설명한대로 Rayleigh channel은 channel의 randomness가 커질수록 정확하나 실제 채널 환경에서 물체의 위치는 일정한 규칙을 가지고 존재하므로 Rayleigh channel의 효용성은 한계가 있다. 그러므로 Rayleigh의 여러 분포를 사용하여 측정결과를 모델링한다[5].

2.2 Shadow Fading

(그림 2)에서 보는 것과 같이 큰 물체는 일정한 방향에서 오는 신호를 막는 효과가 있어 이럴 경우 수신 신호특성을 앞서 설명한 Rayleigh 분포로는 정확하게 설명할 수 없다. 이러한 효과는 (그림 2)에서 보듯이 일정한 영역에 걸쳐 신호에 영향을 끼쳐 long-term fading이라 불린다. 이러한 현상은 보통 lognormal distribution을 가지고 기술 된다. 이의 물리적 배경은 다음과 같다.

수신 신호는 (그림 2)에서 보듯이 적은 수의 신호의 합으로 이루어져 있다. 여기서는 하나로 가정한다. 그러면 수신 신호는 다음과 같이 표현 된다.

$$y = R_1 + R_2 + \dots \quad (1)$$



(그림 2) Shadow region

앞서 설명한대로 R_j 는 각 물체가 신호에 주는 영향이다. 만약 물체의 모양이나 매질이 다양하면 일정한 PDF로 R_j 를 기술할 수 있다. 특히 object의 위치가 random하게 분포되어 있어 R_j 를 random variable로 가정할 수 있고 또 앞서 설명한 것 같이 R_j 는 statistically independent하다. 이러한 product는 central limit theorem에 의해 lognormal로 수렴한다[4]. 그러므로 앞서 설명한 Rayleigh channel에서와 같이 lognormal 분포 또한 random media에서는 정확하나 실제 환경에서의 정확도는 떨어진다.

III. Deterministic Channel Model

이 절에서는 간단히 현재까지 알려진 deterministic방식의 접근방법을 정리한다. 2.1 - 2.2에서 설명 했듯이 stochastic 접근 방법은 random media에서 잘 맞는다. 현재에는 앞서 설명한 model외 많은 model이 알려져 있으나 정확도에 대해서는 비슷한 문제가 있다[6]. 그러므로 stochastic 모델의 사용범위는 한정 될 수 있다.

현재 computer의 급속한 발전에 따라 실 환경내의 전파전파 현상을 전자기이론을 바탕으로 예측할 수 있게 되었다. 이 방법을 사용하기 위해서는 다음 두 가지 사항을 고려 해야 예측 결과의 정확도가 높아진다.

1. 각 object의 scattering
2. object 사이의 interaction

다음절에는 각 물체의 산란계산방법을 정리하였다.

3.1 UTD (Uniform Theory of Diffraction) [7]

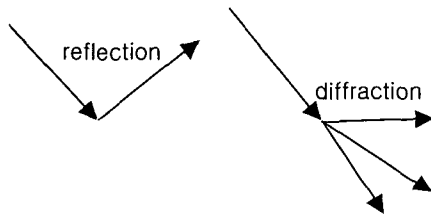
전자기이론을 사용하여 전파전파 현상을 예측하기 위해서는 채널내 물체의 산란현상을 계산하여야 한다. 일반적으로 빌딩 같은 물체의 크기는 매우 커 UTD같은 high frequency technique을 사용한다. 일반적으로 건물들의 모양은 아주 복잡하다. 이러한 복잡한 모양을 정확하게 고려하는 것은 실질적으로 불가능 하다. 그러므로 현재 사용 가능한 코드는 건물을 큰 박스형태로 가정한다. 즉 건물 표면은 평평하고 건물의 전체 크기와 모양만 고려한다.

UTD는 산란을 두 개의 mechanisms으로 분리한다:

1. GO(Geometrical Optics) component
2. Diffraction

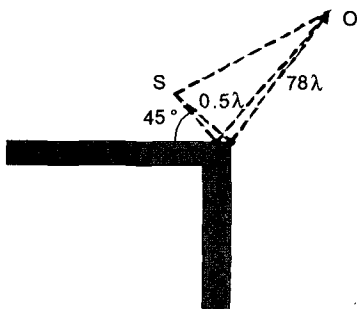
GO는 건물 표면에서의 반사를 의미한다. 이 GO component는 존재범위가 한정 되어있어 diffraction을 고려해야 전 공간에 따른 물체의 산란을 어느 정도 정확하게 예측할 수 있다. 이런 diffraction은 건물모서리에서만 발생한다고 가정 한다. Diffraction을 고려하지 않으면 shadow region에서 전파가 전달이 안되 정확도가 떨어진다. GO 계산은 단순하나 diffraction 계산은 복잡하다. 특히 diffraction coefficient가 일반적인 dielectric corner에 대해 알려져 있지 않아 heuristic coefficient를 사용하여 dielectric object에 대한 UTD의 전반적인 정확도는 떨어진다 [8]. 그러므로 일반적으로 현재 사용하는 UTD의 문제점을 정리하면 다음과 같다.

1. 건물 표면의 irregularity 무시
2. dielectric wedge의 diffraction coefficient



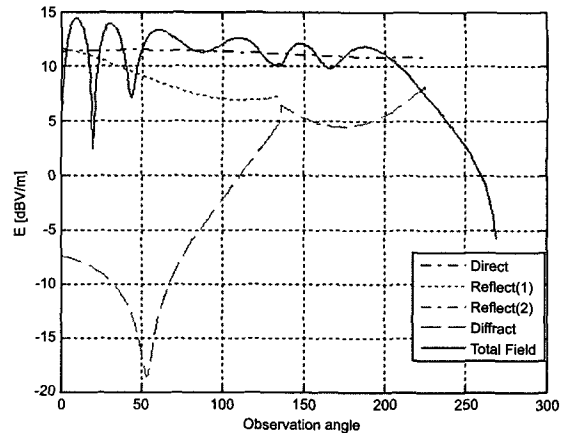
(그림 3) Reflection & Diffraction

간단한 예를 통해 reflection과 diffraction의 역할을 보자. (그림 4)는 simulation환경이다.



(그림 4) 건물의 scattering simulation 환경

S는 신호원, O는 관찰점이며 회절 wedge 에서 각각 0.5λ , 78λ 떨어져있고 신호원은 45도 각도로 wedge에 입사하고 있다. 이때 wedge는 콘크리트로 구성된 dielectric wedge이다. 관찰점은 0도부터 270도까지 변화시키며 전계강도 변화를 관찰하였고 (그림 5)가 결과를 보여 준다.



(그림 5) 건물의 scattering 특성

(그림 5)에서 보듯이 입사파(incident wave)와 반사파(reflected wave)는 일정 영역에서만 존재하고 만약 회절파(diffracted wave)가 존재하지 않으면 신호는 연속하지 않고 특히 shadow region에서는 신호가 존재하지 않게 된다. 그러나 shadow region내의 신호크기는 무시할 수 없다.

지표면은 지구상 어디에나 존재 하므로 이를 정확하게 고려하는 것은 매우 중요하다. (그림 6)에서 보듯이 안테나가 지표면, 여기서는 half-space dielectric 위에 놓여 있는 경우의 exact solution은 Sommerfeld에 의해 1909년에 처음으로 알려졌다. Sommerfeld에 의해 제시된 해는 Sommerfeld integral알려진 식을 포함하고 있어 이의 계산 방법은 오랜 기간에 걸쳐 연구되었다. 자세한 사항은 [9]를 참조하면 많

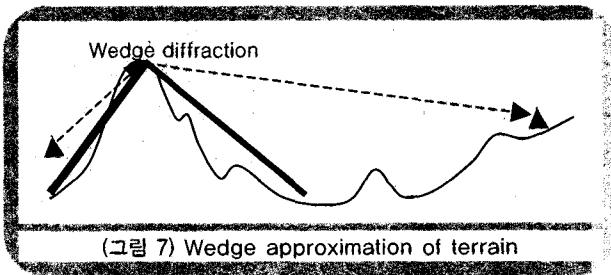


(그림 6) Sommerfeld Problem

은 참조 자료(reference)와 함께 잘 설명 되어 있다.

지표면을 정확하게 고려하는 것 매우 복잡하므로 가장 많이 사용하는 근사법은 (그림 6)에서 보듯이 GO approximation이고 이는 2-ray model로 알려져 있다. 이 방법은 transmitter와 receiver의 높이가 높을수록 정확하다. 만약 transmitter와 receiver의 높이가 적으면 이 방법을 사용할 수 없다.

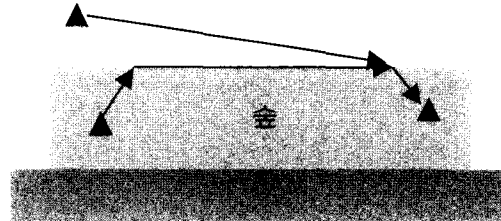
만약 지표면이 uniform하지 않고 굴곡이 있으면 (그림 7)과 같이 지형을 근사화한 후 UTD를 사용하여 전송 신호를 계산한다. 일반적으로 이러한 접근 방법은 실험에 기반을 둔 empirical model 예를 들면 ITS model에 비해 좋은 정확도를 보인다[10].



3.3 Vegetation

지구 위의 많은 지역이 풀, 나무와 같은 vegetation으로 덮여 있어 이의 영향을 고려하는 것은 매우 중요하다. 특히 주파수가 올라 갈수록 vegetation의 영향은 더욱 커진다. 일반적인 vegetation구조는 매우 복잡하고 많은 산란체(scatterer)를 포함하고 있어 vegetation을 정확히 모델링하기 매우 어렵다. 그러므로 vegetation의 구조를 무시하고 보다 단순화시키는 방법이 주로 사용된다. 숲과 같은 매질은 전체를 하나의 effective media로 모델링한다. 이때 effective dielectric constant는 보통 mean field를 보존 하도록 예측한다. Foldy's approximation 같은 방법이 effective dielectric constant를 계산하는데 많이 사용되고 있다[3, 11]. 이때 안테나의 위치에 따라 물리적 전파전파 현상이 달라진다. (그림 8)는 두 경우에 따른 전파 전파 현상을 보여준다. 두 안테나가 숲속에 있는 경우 전파는 숲과 공기의 경계를 따라 전파되므로 실제 path-loss는 일반적으로 UTD를 사용하여 예측하는 path-loss보다 훨씬 적게 된다. 이러한 wave를 lateral wave라 불

린다 [12]. 실제 넓은 주파수에 대해 나무의 path-loss는 실험 및 모의 실험에 따라 알려져 있다 [13].



(그림 8) Two wave propagation mechanisms for forested environment

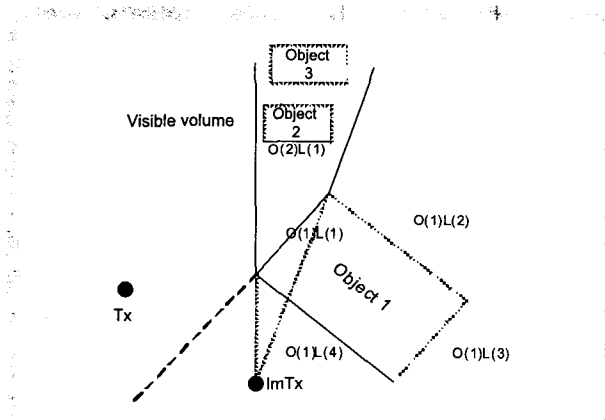
이러한 모델은 mean field측 coherent power만 예측할 수 있으므로 신호의 변동(fluctuation)을 예측하기 위해서 다른 여러 방법이 사용되어 왔다[14, 15]. 하나의 접근방법은 나무를 fractal geometry를 사용하여 정확하게 모델링한 후 각 나무의 구성물들의 산란을 계산하여 이를 coherent하게 합하는 모델이다[15]. 이런 방법으로 나무 구조를 보다 정확하게 고려할 수 있고 또 나무를 statistically 생성하므로 신호의 변동 또한 예측할 수 있다.

도시에서 내에서는 나무가 숲과 같이 많이 존재하지 않아 한 그루의 나무 효과를 예측해야 한다. 앞서 언급한 fractal tree를 사용하여 이러한 효과를 계산할 수 있으나 보통 계산량이 많아 사용하기가 어렵다. 그러므로 나무를 단순 모델링한 방법이 많이 사용되고 있다. Simulation 결과는 path-loss에 나무가 큰 영향을 줄을 보인다 [16].

3.4 Ray-tracing

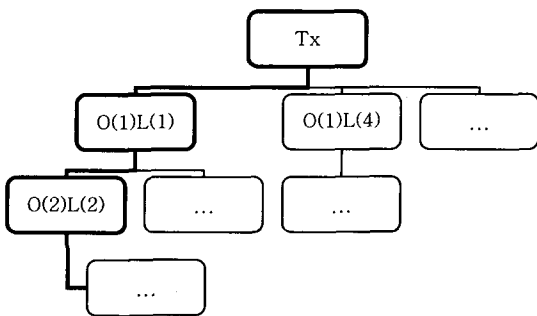
도시와 같은 많은 건물이 있는 경우에는 UTD를 사용하여 건물 하나의 산란을 계산하는 것 외 건물 사이의 상호작용(interaction)을 정확하게 고려 하는 것 중요하다. 이러한 상호작용을 고려하는 방법 중 하나가 ray-tracing이다. UTD를 사용하면 건물이 발생시키는 ray를 정확하게 알 수 있어 이 ray를 쫓아 다른 건물이 고려하고 있는 ray에 영향을 주는지를 예측하여 건물 사이의 상호작용을 고려할 수 있다. 일반적으로 두 개의 다른 알고리즘이 사용되고 있다. 하나는 shooting and bouncing algorithm이다. 이는 transmitter에서 ray를 생성하여 이를 추적하여 만약 object에 ray가 부딪치

면 UTD를 사용하여 크기나 방향을 계산하는 방법이다. 이때는 transmitter에서 많은 ray를 생성하고 생성된 ray가 일정한도 아래로 적어지면 추적을 멈춘다. 다른 방법은 각 건물의 위치 database를 바탕으로 ray가 발생할 수 있는 경우의 수를 미리 tree로 만들어 놓고 이를 바탕으로 ray를 추적하는 방식이다.



(그림 9) Ray-tracing tree generation environment

이를 보다 자세히 설명하면 다음과 같다. 송신기에서 N차 반사-회절 볼륨으로 구성된 가시 트리를 구성하기 위해 가시 볼륨에 대한 검색을 수행한다. (그림 9)과 같은 송신기와 오브젝트 구성에서 송신기는 오브젝트 1에 대해 $O(1)L(1)$ 과 $O(1)L(4)$ 가 가시 상태에 있으며 $O(1)L(2)$ 와 $O(1)L(3)$ 는 비가시 상태에 있다. 이 경우 가시 볼륨을 $O1L1$ 과 $O1L4$ 에 대해 생성하며 $O(1)L(1)$ 의 경우 꼭지점을 $ImTx$ 로 하고 면 $O(1)L(1)$ 을 포함하는 볼륨 내에 오브젝트 2와 3이 존재한다.



(그림 10) Generated ray-tracing tree

그러나 오브젝트 2는 $O(2)L(1)$ 만 가시 상태에 존재하며 오브젝트 3은 모든 면이 $O(2)L(1)$ 에 의해 비가시 상태가 되기 때문에 트리 구성에서 제외된다. 따라서 생성된 트리는 (그림 10)과 같다.

이러한 ray-tracing code에는 크게 세 가지 정보가 필요하다.

1. 각 건물의 정확한 크기 및 위치 데이터베이스
2. 구성 물질 유전률 정보
3. RF spec.: 주파수, 안테나 위치 등

Ray-tracing 방법은 입력변수(input)만 바꾸어서 어떠한 통신 시나리오에서도 사용가능 하며 특히 주파수에 상관없이 사용 가능 하다. 그러나 도심 지역에서는 많은 건물을 고려해야 하므로 계산 속도가 느리고 앞서 언급한대로 건물을 단순화 시켜 모델링을 하여 높은 주파수에서는 정확도가 떨어진다. 그리고 앞서 언급한 vegetation효과를 ray-tracing방법과 정확하게 연계하기 힘들다. 최근에 건물벽에서 발생하는 diffusion scattering을 고려하는 ray-tracing 방법이 제안되었다 [17].

광선 추적법의 정확도를 확인하기 위해 부산 서면에서 측정된 데이터와 모의실험결과를 비교하였다. 부산 서면은 전형적인 도심 환경으로 중심에서 방사형으로 도로가 분포하고 건물 밀도가 높아 전형적인 도심 협곡 환경을 보여주고 있다. (그림 11)은 2D 실험 환경을 보여 준다. 각 건물의 크

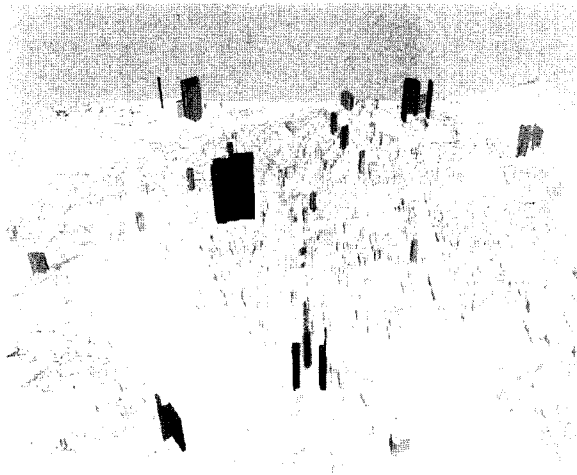


(그림 11) 부산서구 건물 배치

기 및 위치는 실측정에 의해 정확한 값을 얻었다. (그림 12)는 3차원 영상을 보여 준다.

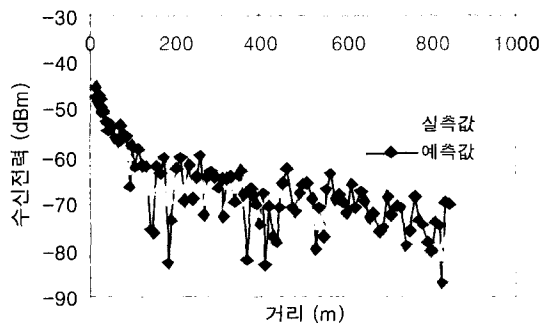
중심 주파수는 8 GHz 이며 스펙트럼 분석기와 신호 발생기를 사용하여 수신 전력을 측정하였다. 송신기의 높이는 9 m, 수신기의 높이는 1.5 m 이고 송신기는 혼안테나, 수신단은 다이폴 안테나를 가정하였다.

도심에서 반사·회절 횟수는 경험적으로 최대 4 회, 1회로 설정하였으며 가시 환경에서 다양한 조합의 실험으로부터 도출된 경험적인 횟수이다.



(그림 12) 3차원 환경 및 모의 실험 결과

(그림 13)은 실험 결과와 측정 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 실험 데이터와 simulation 결과는 잘 일치한다.



(그림 13) 실험 및 모의 실험 데이터

다. 후반부의 적은 에러는 계산시간을 줄이기 위 적은 건물만을 사용하였고 또 지표면을 평평하다고 가정하므로 지표면에서의 반사를 정확히 예측하지 못해 생긴 에러로 사료된다. 주파수가 높아 건물 표면이나 지표면을 정확하게 모델링하지 않으면 정확도가 떨어진다.

3.5 Fully Numerical & Hybrid Methods

기본적으로 수치해석방법은 물체 크기에 비례해서 메모리가 필요하므로 전파전파 현상 모의 실험에 적용할 수 없다. 그러나 주파수가 매우 낮은 경우에는 전체 문제의 크기가 줄어들어 수치해석방법을 사용할 수 있다. 중요한 응용분야는 HF(High Frequency)를 사용하는 통신이다. 이때는 ducking과 같은 기후 조건과 산과 같은 지역 조건이 중요하다. 이런 경우 파동방정식(wave equation)보다 다루기 쉬운 포물선 방정식(parabolic equation)을 사용한다. 진행방향으로 전파의 변화량이 작다고 가정하면 파동방정식을 포물선 방정식으로 쉽게 근사화 시킬 수 있다. 포물선 방정식은 split-step algorithm을 사용하여 매우 효율적으로 계산할 수 있다 [18]. 다른 방법으로는 FDTD(Finite Difference Time Domain)을 사용하여 Maxwell's equation을 정확하게 푸는 방법이 있다 [19]. FDTD방식은 아직 매우 저 주파수범위에 한정되어 사용되고 있다.

수치해석방법은 물체의 산란현상을 정확하게 계산할 수 있으므로 앞서 설명한 UTD보다 정확도가 높고 특히 빌딩 표면의 불균일성(irregularity)를 쉽게 고려할 수 있다. 그러므로 이러한 장점을 ray-tracing 방법과 같이 사용하는 방법이 제안되었다 [20]. 물체의 산란은 수치해석방법을 사용하고 물체사이의 상호작용은 ray-tracing을 사용하여 고려한다. 이러한 hybrid 방법은 기존의 ray-tracing 방식 보다 계산량이 높아 아직 활발히 사용하지는 않고 있다.

IV. 결 론

본고에서는 물리이론에 기반을 둔 통신 채널 방법을 간단히 고찰하였다. 기존의 통계적 방법은 사용이 간단하나 일반적으로 많은 실험을 통해 만들어 진다. 그러므로 주파수

같은 환경이 바뀌면 모델을 구축하는데 많은 노력과 시간이 든다. 이에 반해 전자기 이론에 바탕을 둔 채널 모델은 한번 구축하면 많은 시나리오에 사용할 수 있고 특히 path-loss를 위치에 따라 정확히 예측할 수 있다. 그러므로 현재 사용하지 않는 주파수의 전파전파 특성을 예측하는데 쉽게 사용할 수 있다. 그러나 이런 방법은 일반적으로 실제 환경을 이상적인 환경으로 간략화하므로 예측의 정확도가 떨어지고 아직까지는 계산량이 매우 높다. 그러나 많은 연구를 통해 실험 결과와 비교해서 deterministic 방식의 정확도는 계속 높아지고 있다

참 고 문 헌

- [1] H.L. Bertoni, Radio Propagation for Modern Wireless Systems, Prentice Hall, New Jersey, 2000.
- [2] M.D. Yacoub, Foundations of Mobile Radio Engineering, CRC Press, Boca Raton, 1993.
- [3] A. Ishimaru, Wave Propagation and Scattering in Random Media, IEEE Press, Piscataway, 1997.
- [4] A. Papoulis and A.U. Pillai, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, Mc-Graw Hill, Boston, 2002.
- [5] M.D. Yacoub, "The κ - μ Distribution and the η - μ Distribution," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 49, No. 1, PP 68 - 80, Feb. 2007.
- [6] D. Didascalou, J. Maurer and W. Wiesbeck, "Subway Tunnel Guided Electromagnetic Wave Propagation at Mobile Communications Frequencies," *IEEE Antennas Propagat.* Vol. 49, No. 11, PP 1590 - 1596, Nov. 2001.
- [7] A.K. Bhattacharyya, High-Frequency Electromagnetic Techniques, Recent Advances and Applications, Wiley, New York, 1995.
- [8] R.J. Luebbers, "Finite Conductivity Uniform GTD Versus Knife Edge Diffraction in Prediction of Propagation Path Loss," *IEEE Antennas Propagat.* Vol. AP-32, No. 1, PP 70 - 76, Jan. 1984.
- [9] K. Sarabandi, M. D. Casciato, and I. Koh, "Efficient Calculation of the Field of a Dipole Radiating Above an Impedance Surface," *IEEE Antennas Propagat.* Vol. 50, No. 9, PP 1222 - 1235, Sept. 2002.
- [10] K.A. Chamberlin, and R.J. Luebbers, "An Evaluation of Longly-Rice and GTD Propagation Models," *IEEE Antennas Propagat.* Vol. AP-30, No. 6, PP 1093 - 1098, Nov. 1982.
- [11] L.L. Foldy, "The Multiple Scattering of Waves," *Phys. Rev.* Vol. 67 PP 107-119, 1945.
- [12] K. Sarabandi, and I. Koh, "Effect of Canopy-Air Interface Roughness on HF-VHF Wave Propagation in Forest," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* Vol. 50, No. 2, PP 111 - 121, Feb. 2002.
- [13] M.A. Weissberger, "An Initial Critical Summary of Models for Predicting the Attenuation of Radio Waves by Trees," Tech. Rep. ESD-TR-81-101, EMC Analysis Center, Annapolis MD USA, 1982.
- [14] K. Sarabandi, and I. Koh, "A Complete Physics-Based Channel Parameter Simulation for Wave Propagation in a Forest Environment," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* Vol. 49, No. 2, PP 260 - 271, Feb. 2001.
- [15] I. Koh, and K. Sarabandi, "Polarimetric Channel Characterization of Foliage for Performance Assessment of GPS Receivers Under Tree Canopies," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* Vol. 50, No. 5, PP 713 - 726, May 2002.
- [16] S.A. Torrico, H.L. Bertoni, and R.H. Lang, "Modeling Tree Effects on Path Loss in a Residential Environment," *IEEE Antennas Propagat.* Vol. 46, No. 6, PP 872 - 880, June 1998.
- [17] T. Fugen, J. Maurer, T. Kayser, and W. Wiesbeck, "Capability of 3-D Ray Tracing for Defining Parameter Sets for the Specification of Future Mobile Communications Systems," *IEEE Antennas Propagat.* Vol. 54, No. 11, PP 3125 - 3137, Nov. 2006.
- [18] L. Sevgi, C. Uluisik, F. Aklemen, "A MATLAB-Based Two-Dimensional Parabolic Equation Radiowave

Propagation Package," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 47, No. 4, PP 164 - 175, Aug. 2005.

- [19] J.J. Simpson, and A. Taflove, "A Review of Progress in FDTD Maxwell's Equations Modeling of Impulsive Subionospheric Propagation Below 300kHz," *IEEE Antennas Propagat.* Vol. 55, No. 6, PP 1582 - 1590, June 2007.
- [20] Y. Wang S.N. Safieddin and S.K. Chaudhuri, "A Hybrid Technique Based on Combining Ray Tracing and FDTD Methods for Site-Specific Modeling of Indoor Radio Wave Propagation," *IEEE Antennas Propagat.* Vol. 48, No. 5, PP 743 - 754, May 2000.



1992년 연세대학교 학사
1994년 연세대학교 석사
2002년 The University of Michigan at Ann Arbor 박사
2004년 ~ 현재 인하대학교 교수
관심분야: 무선채널 모델링, Analytical & Numerical Methods in Electromagnetics

고 일 석

