특집논문-10-15-6-03

VHF 및 UHF 대역의 DTV 수신기 전계강도 예측

서 경 환^{a)†}, 정 혁^{a)}, 이 주 환^{b)}

The Prediction of Field Strength for DTV Receiver in the VHF and UHF Bands

Kyoung-Whoan Suh^{a)†}, Hyuk Jung^{a)}, and Joo-Hwan Lee^{b)}

요 약

본 논문에서는 30 MHz ~ 3000 MHz 대역에서 1 kW ERP에 대해 점-대-지역 전파특성 예측에 이용되는 ITU-R 권고 P.1546 전파 모델을 이용하여 DTV 수신기의 전계강도 예측을 위한 방법을 제안한다. DTV 수신기의 유도된 전계강도 수식과 권고에서 기술된 절차를 이용하여 수치계산을 통한 결과를 제시한다. 또한 산출된 결과의 적절성 검증에 위해 Okumura-Hata 모델과 비교하였으며, 수신 전계강도가 약 6.9 ~ 11.5 % 범위 내에 오차가 있음을 확인할 수 있었다. 제시된 방법은 DTV 수신지역의 전계강도 예측을 통한 송신된 신호의 품질 분석은 물론, 양호한 전파환경 구축을 위한 적절한 국소 선정을 제공한다. 또한 동일 대역의 주파수 공유를 위한 보호비 또는 이격 거리 분석에도 직접 활용이 가능하다.

Abstract

In this paper, we propose the methodology of prediction of field strength for a digital television (DTV) receiver by virtue of Recommendation ITU-R P.1546. The curves shown in this recommendation represent the point-to area field strength for 1.0 kW effective radiated power in the 30 MHz ~ 3000 MHz. Based upon the procedures described in this Recommendation, computation results are presented here from the derived formulation of field strength for DTV receiver. To show the validity of this method, some results are compared with the analysis by Okumura-Hata model and it was shown that the error of field strength is in the range of 6.9 ~ 11.5 %. The presented method provides not only the predicted values of field strength for DTV receiving area to check the quality of transmitted signal, but also an appropriate site selection for obtaining good propagation environment. In addition, it can be directly used for analyzing the protection ratio or separated distance for frequency sharing in the same band.

Keyword: VHF/UHF propagation model, field strength, Rec. ITU-R P.1546, Digital TV receiver sensitivity

I. 서 론

2000년 이후 세계적으로 지식정보화 사회의 추세에 따라 산업 전반에 디지털 혁명이 일어나고 있으며, 특히 정보통신 기술의 급격한 발전은 방송과 통신의 융합 서비스를 창출하게 되었다. 이러한 변화는 지상파 방송 분야에서도 아날로그에서 디지털로의 전환을 촉진하고 있으며, 현재 정부에서도

a) 강남대학교 전자공학과
Electronics Engineering, Kangnam University
b) 한국전자통신연구원 전파기술연구부
Radio Technology Research Department, ETRI

† 교신저자 : 서경환 (kwsuh@kangnam.ac.kr)

※ 본 연구는 강남대학교 2010학년도 교내 연구비 지원에 의한 것임.

· 접수일(2010년8월16일), 수정일(2010년10월8일), 게재확정일(2010년11월5일)

2013년 1월 1일부터 디지털 TV 방송을 계획하고 있다. 디지털 방송 전환은 방송신호 형태의 차이를 가져오며, 수신기가 놓인 지역의 전파환경에 따라 양호한 품질을 얻거나 또는 품질의 열화로 인해 난시청 지역이 발생할 수도 있다.

이를 해소하기 위해서는 송신소 위치에 대한 이론적 전계강도 계산을 근거로 방송서비스 구역을 설계할 필요가 있으며, 나아가 실제 전파환경을 측정하여 이론과 실제의 차이를 보정할 수도 있다. 일반적으로 보다 많은 송신소를 설치하면 할수록 난시청 지역을 해소할 수가 있으나, 이는 경제적인 제한이 따를 수도 있다. 따라서 일부 지역에서는 송신소 설치보다는 송신 신호를 재전송하는 일종의 중계기를 두어 신호의 품질 개선을 확보할 수 있는 방안이 대두되고 있으며, 이에 대한 연구가 발표되기도 하였다^[1,2].

또한 DTV 전환에 따른 주파수 대역 및 채널 변경이 예상되고 있어 기존 주파수에 비해 동일한 방송 권역 및 서비스 품질 확보 등을 위해 관련된 분야의 연구가 수반될 것으로 여겨진다. 최근에 이러한 필요성에 대해 DTV 수신 전계강도를 예측하는 방법의 하나로 ITU-R 권고 P.1546 전파모델을 이용한 선행 연구가 발표되기도 하였다^[3].

본 논문에서는 이러한 필요성에 대한 보다 포괄적인 결과 도출 및 분석을 시도하기 위해 VHF/UHF 대역의 방송 및 이동 서비스의 전파모델인 ITU-R 권고 P.1546을 이용하

여 DTV 수신 전계강도 예측을 위한 방법 및 결과를 제시한다. 주파수 30 MHz ~ 3000MHz 범위를 대상으로 지상파 방송 서비스를 위한 점-대-지역 전계강도 예측을 위한 계산 방법을 정립하고, 수치 계산 결과를 비교 및 분석한다. 제시된 방법은 DTV 수신지역의 전계강도 예측을 통한 신호의 품질 분석은 물론, 양호한 전파환경 구축에 필요한 중계기 위치 설정 등에 직접 활용할 수가 있다.

논문의 구성으로는 먼저, 본 연구에서 전파강도 예측의 근간이 되는 ITU-R 권고 P.1546 모델을 설명하고, 둘째, DTV 수신 전계강도 계산을 위한 수식을 정립하며, 적용된 모델과 비교 분석을 위해 도심 지역의 Okumura-Hata 모델도 제시된다. 셋째, 전계강도 예측을 위한 변수 설정 및 계산 결과를 도출하고, 타 예측 모델과의 비교 및 분석을 하며, 끝으로 결론 및 향후 연구 과제를 제시한다.

II. ITU-R 권고 P.1546

1. 권고 개요

ITU-R 권고 P.1546은 지상 서비스의 점-대-지역 전파특성 예측 방법에 관한 권고서이다^[4]. 적용 대상은 주파수 30

표 1. ITU-R 권고 P.1546 모델의 변수
Table 1. Variables of Rec. ITU-R P.1546 Model

변수	정의	한계
$f(MHz)$	동작 주파수	30 ~ 3,000 MHz
$d(km)$	경로 길이	1 ~ 1,000 km
$p(\%)$	퍼센트 시간 (부록 1-8)	1 ~ 50%
$h_1(m)$	송신기 안테나 높이 (부록 5-3), 한계 (부록 5-4.1)	육상: 상한 3000m, 하한 없음 해상: 1m ~ 3000m
$h_a(m)$	지상 송신기 안테나 높이 (부록 5-3.1.1), 한계 (부록 5-3)	지역의 클러터(clutter) 높이보다 커야 함
$h_b(m)$	0.2d ~ d(km) 내에 지형평균 높이 위의 기지 안테나 높이 (단, $d < 15 km$, 지형정보 가능 경우)	제한은 없으며, 단지 $d < 15 km$ 육상경로 포함
송신기 주변 클러터 높이	송신기 주변의 상대적 클러터 높이	없음
$R(m)$	수신기 주변의 상대적 클러터 높이	없음
θ_{tcu} (도)	지형 클리어런스(clearance) 각	0.55 ~ 40 도
$\theta_{eff}, \theta_{eff1}, \theta_{eff2}$ (도)	송신기/기지 유호 지형 클리어런스 각 (부록 5-9)	양(+)의 값

그림 1. 주파수 600 MHz 에 대한 전계 강도 특성
Fig. 1. Characteristics of electric field strength for 600 MHz

MHz ~ 3000 MHz, 거리 1 ~ 1000 km (육상경로, 해상경로 또는 육상 지상의 혼합 경로), 유효 송신고도 3000 m 이하이다. 또한 전계강도 곡선은 1 kW ERP 방사시 수신 고도 10 m 지점에서의 전계강도, 주파수 100, 600, 2000 MHz, 경로는 육상 및 해상 (cold/warm), 시간율은 1, 10, 50 %가 적용된다. 이러한 전파 모델을 이용하여 VHF 대역의 레이더 간섭에 의한 양립성 분석에 적용한 연구 결과가 제시된바가 있다⁵⁾.

적용하고자 하는 주파수, 시간율, 송신 안테나의 높이가 주어진 곡선 그래프와 일치하지 않는 경우, 보간법과 외삽법을 이용하여 전계강도를 산출한다. 그림 1은 하나의 예로 ITU-R 권고 P.1546에 제시된 장소율 50 %, 시간율 50%,

주파수 600 MHz 에 대한 전계강도 특성 곡선을 보여주며, 표 1은 관련 변수의 적용 한계를 나타낸다.

송신 및 중계국 안테나의 높이, h_1 이 10 m 와 3000 m 사이에 있는 경우, 그리고 만약 h_1 이 전계강도 곡선에 제시된 10, 20, 37.7, 75, 150, 300, 600, 1200 m 중의 하나의 값과 일치하지 않는다면 다음 식을 이용하여 전계강도, E (dB(μ V/m)) 보간법으로 구할 수 있다.

$$E = E_{lwr} + (E_{upr} - E_{lwr}) \log(h_1/h_{lwr}) / \log(h_{upr}/h_{lwr}) \quad (1)$$

여기서 h_{lwr} 은 $h_1 < 1200$ m 면 600 m, 그렇지 않으면 h_1 보다 작은 가장 근접한 평균 유효 높이이다. h_{upr} 은

$h_1 > 1200$ m 면 1200 m, 그렇지 않으면 h_1 보다 큰 가장 근접한 평균 유효 높이이다. E_{lwr} 는 요구되는 거리에서 h_{lwr} 에 대한 전계강도 값이다. E_{upr} 는 요구되는 거리에서 h_{upr} 에 대한 전계강도 값이다. $h_1 > 1200$ m 인 경우에는 외삽법을 적용하며, $h_1 > 3000$ m 인 경우에는 이 권고는 타당하지 않다.

한편 거리에 따른 전계강도의 보간법은 식 (2)와 같다.

$$E = E_{lwr} + (E_{upr} - E_{lwr}) \log(d/d_{lwr}) / \log(d_{upr}/d_{lwr}) \quad (2)$$

여기서 d 는 예측하고자 하는 거리, d_{lwr} 는 거리 d 보다 작은 가장 가까운 일람표 거리, d_{upr} 은 거리 d 보다 큰 가장 가까운 일람표 거리, E_{lwr} 는 d_{lwr} 에 대한 전계강도, E_{upr} 는 d_{upr} 의 전계강도이다. 이 권고는 1 km 보다 작거나 1000 km 보다 큰 d 값에 대해서는 타당하지 않다.

또한 주파수에 대해 요구하는 주파수가 100 MHz 보다 큰 육상 경로 및 해상 경로에 대해 주파수 함수에 따른 전계강도 보간법은 다음과 같다.

$$E = E_{lwr} + (E_{upr} - E_{lwr}) \log(f/f_{lwr}) / \log(f_{upr}/f_{lwr}) \quad (3)$$

여기서 f 는 예측하고자하는 주파수(MHz), f_{lwr} 는 더 낮은 명목상의 주파수(만약 $f < 600$ MHz, 100 MHz, 그렇지 않으면 600 MHz), f_{upr} 는 더 높은 명목상의 주파수(만약 $f < 600$ MHz, 600 MHz, 그렇지 않으면 2000 MHz), E_{lwr} 는 f_{lwr} 에서 전계강도, E_{upr} 는 f_{upr} 에서 전계강도이다. 주파수 2000 MHz 보다 큰 경우에 대한 외삽법으로 구한 전계강도는 최대값이 자유공간에서의 전계강도를 초과하지 않는 범위에서 제한된다.

끝으로 $1 \sim 50$ % 시간 사이에 주어진 퍼센티지(%) 시간 에 대한 전계강도 값은 명목상의 값 $1 \sim 10$ % 시간 또는 명목상의 값 $10 \sim 50$ % 시간 사이에 보간을 취함으로써 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E(dB(\mu V/m)) = E_{upr}(Q_{lwr} - Q_t) / (Q_{lwr} - Q_{upr}) + E_{lwr}(Q_t - Q_{upr}) / (Q_{lwr} - Q_{upr}) \quad (4)$$

여기서 t 는 예측을 요구하는 % 시간이며, t_{lwr} 는 더 낮은 명목상의 % 시간, t_{upr} 는 더 높은 명목상의 % 시간, $Q_t = Q_i(t/100)$, $Q_{lwr} = Q_i(t_{lwr}/100)$, $Q_{upr} = Q_i(t_{upr}/100)$, E_{lwr} 는 시간 퍼센티지 t_{lwr} 에서 전계강도 값, E_{upr} 는 시간 퍼센티지 t_{upr} 에서 전계강도 값이며, 그리고 $Q_i(x)$ 는 역상보누적(inverse complementary cumulative) 정규분포함수이다. 이 권고는 퍼센티지 시간 $1 \sim 50$ % 내에서 보간 적용은 타당하나 이 범위를 벗어난 외삽법은 타당하지 않다.

2. 전계강도 보정

한편 방송송신 및 중계국 안테나 높이 h_1 에 대한 결정은 다음과 같다. 계산에 적용된 h_1 은 경로의 형태 및 길이, 그리고 높이 정보에 대한 다양한 항목에 의존하므로 이는 모든 것이 다 가능하지 않을 수 있다. 먼저 바다 경로에 대한 h_1 은 해수면 위의 안테나 높이이다. 육상경로에 대해서는 방송송신 및 중계국 안테나 유효 높이, h_{eff} 는 방송송신 및 중계국 안테나가 방송수신 및 이동단말 안테나 방향으로 거리 3 km ~ 15 km 사이에서 지상 평균 레벨 위의 높이로 정의한다. 따라서 $h_1 = h_{eff}$ 가 되며, h_{eff} 를 모르는 경우에는 일반적인 지형 정보로부터 산출되어야 한다. 만약에 방송송신 및 중계국 안테나가 주변 클러터(clutter)의 높이 아래 있다면 이 권고는 타당하지 않다. 단, 육상경로에서 거리가 15 km 보다 작은 경우에 대해서는 h_1 을 달리 정의하고 있다.

또한 방송수신 및 이동단말 안테나 높이에 대한 전계강도 보정은 다음과 같다. ITU-R 권고 P.1546에서 제시된 전계강도 곡선들은 기준 방송 수신 및 이동단말 안테나 높이, $R(m)$ 에 대한 것이며, 이는 방송수신 및 이동단말 안테나를 둘러싼 지면 덮개의 높이를 대표하는 것으로 최소 10 m 이다. 예로 도심지역은 20 m, 밀도가 높은 도심지역은 30 m, 부 도심지역은 10 m 이며, 바다 경로는 $R = 10$ m 이다.

방송수신 및 이동단말 안테나가 육지에 있는 경우, 도착하는 전파의 양각을 고려해야 하는데, 이는 수정된 대표적 클러터 높이 $R'(m)$ 는

$$R' = (1000dR - 15h_1) / (1000d - 15) \quad (5)$$

이다. 여기서 h_1 와 R 의 단위는 m이며, 거리 d 의 단위는 km이다. 또한 $h_1 < 6.5d + R$ 이면 $R' \approx R$ 로 한다.

방송수신 및 이동단말 안테나가 도심 환경 속에 있을 때, 전계강도 보정은 다음과 같이 주어진다.

$$Correction = 6.03 - J(\nu), h_2 < R' \quad (6-a)$$

$$= K_{h2} \log(h_2/R'), h_2 \geq R' \quad (6-b)$$

여기서 h_2 (m)는 지면 위의 방송수신 및 이동단말 안테나의 높이이며, 이는 방송수신 및 이동단말 안테나가 위치한 둘레에 지표 뒤편의 대표적 높이이다.

$$J(\nu) = [6.9 + 20 \log(\sqrt{(\nu - 0.1)^2 + 1} + \nu - 0.1)] \quad (7-a)$$

$$\nu = K_\nu \sqrt{h_{dif} \theta_{clut}} \quad (7-b)$$

$$h_{dif}(m) = R' - h_2 \quad (7-c)$$

$$\theta_{clut}(\text{degree}) = \arctan(h_{dif}/27) \quad (7-d)$$

$$K_{h2} = 3.2 + 6.2 \log(f) \quad (7-e)$$

$$K_\nu = 0.0108 \sqrt{f} \quad (7-f)$$

여기서 f 의 단위는 MHz 이다.

특히 방송수신 및 이동단말 안테나가 시골 또는 개방 환경에 있을 때, 보정은 수식 (6-b)로 주어진다. 이 때 모든 h_2 값에 대해 $R' = 10$ m 로 고정한다. 그리고 $R' < 10$ m 인 도심 환경에서는 수식 (6)로 주어지는 보정은 $K_{h2} \log(10/R')$ 로 대체된다.

또한 지형 정보가 가능하며, 대류권 산란에 의한 추가 손실이 발생하는 경우에는 육상 경로에 대해 유효송신 안테나 높이, h_{eff} 가 음(-) 값을 가질 수 있는데, 이는 3 km ~ 15 km 거리에서 평균 지형 높이에 근거하기 때문이다. 따라서 h_1 은 음 값이 될 수 있으며, 이 경우에는 근처의 지형 방해물에 의해 회절의 효과가 고려되어야 한다. 이에

대한 손실 보정도 ITU-R 권고 P.1546에서 상세히 기술하고 있다^[4].

III. DTV 수신 시스템

1. 수신 전계강도

ITU-R 권고 P.1546 모델을 적용한 DTV 수신 시스템의 전계강도 유도에 대해 살펴보자. 먼저 수신기에 수신되는 전력을 수식으로 표현한 후, 그 결과를 전력과 전계강도 변환 관계를 통해 도출하고자 한다. 그림 2에서와 같이 TV 송신소에서 송출된 신호는 TV 수신기가 있는 위치까지의 거리, d (km) 및 전파환경에 따라 수신신호의 변화가 있으며, 수신신호의 레벨 P_r (dBm)은 다음과 같이 표현된다^[6].

그림 2. TV 송신소 및 수신기의 배치

Fig. 2. Deployment of TV transmitter and receiver

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - L_p \quad (8)$$

여기서 P_t 는 TV 송신소 송신기의 전력 (dBm), G_t 는 송신기 안테나 이득 (dBi), G_r 는 수신기 안테나 이득 (dBi),

L_t 는 송신기에서 삽입손실 (dB), L_r 는 수신기의 삽입손실 (dB), L_p 는 송신소와 수신기 안테나 사이의 전파경로 손실 (dB)이다.

다음은 수신 한계 레벨을 정의해보자. 어떤 비트오율 $BER = 10^{-y}$ 에서 DTV 수신기의 열잡음 전력에 대한 수신감도 레벨은 식 (9)로 표현되며, 상온에서 식 (10)과 같다.

$$P_{r-th} = 10 \log(kTB) + NF + S/N (@ BER = 10^{-y}) \quad (9)$$

$$P_{r-th} (dBm) = -174 + 10 \log_{10}(B_{IF}) + NF + S/N (@ BER = 10^{-6}) \quad (10)$$

여기서 $k (= 1.38 \times 10^{-23} J/K)$ 는 Boltzmann 의 상수, T 는 Kelvin 온도, B_{IF} 는 수신기 IF 대역폭(Hz), NF 는 수신기 잡음지수(dB), S/N 는 일반적으로 영상 데이터 전송에서는 $BER = 10^{-6}$ 에서 선정된 변조방식별로 주어지는 값이다. 한편 디지털 지상파 방송시스템, ATSC(DTV) 에서는 간섭에 대한 보호비 기준을 MPEG-2 디멀티플렉서 (demultiplexer) 입력단에서 $BER = 3 \times 10^{-6}$ 정의하고 있으나, 본 계산에서는 근사적으로 비트 오류율 편의상 10^{-6} 을 적용하였다^[7].

식 (10)의 단위는 전력이므로 이를 전계강도로 변환하는 과정이 필요하다. 이를 위해 자유공간에서 안테나에 의해 수신되는 전력 $P(W)$ 는 등방성 안테나 이득 $G=1(0dB)$ 이라 두면

$$P(W) = \frac{E^2 \times \lambda^2}{377 \times 4\pi} \quad (11)$$

이 된다. 여기서 λ 는 파장 (m) 이다. 파장을 주파수와 자유공간의 광속도($3 \times 10^8 m/sec$)로 나타내고, 전력 P 의 단위를 mW, 전기장 E 의 단위를 $\mu V/m$, 주파수 f 의 단위를 MHz로 표현하여 식 (11)의 양변에 $10 \log$ 를 취하면 다음과 같이 정리된다.

$$P(dBm) = -77.2 + 20 \log E(\mu V/m) - 20 \log f_{MHz} \quad (12)$$

따라서 DTV 수신기의 수신한계 레벨의 전계강도, $E_{P_{r-th}}(dB(\mu V/m))$ 는 식 (12)로부터 수신기 안테나 이득, $G_r(dB)$ 및 수신기의 삽입손실, $L_r(dB)$ 을 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{P_{r-th}} = P_{r-th}(dBm) + 20 \log f_{MHz} + 77.2 - G_r + L_r \quad (13)$$

여기서 f_{MHz} 는 송신기의 중심 주파수(MHz)이다. 수신기 안테나 이득 및 삽입손실을 추가한 것은 수신한계레벨의 전계강도를 구하므로 안테나 이득만큼 더 미약한 신호를 받을 수 있으므로 감해주며, 반면에 수신기의 손실은 더해지게 된다.

시뮬레이션에서 사용한 전파 손실 모델은 ITU-R 권고 P.1546 의 전파 곡선들인데, 이들은 1 kW 유효방사전력 (ERP)에 대한 전계강도 값($dB(\mu V/m)$)이다. 1 kW ERP는 약 62.1 EIRP에 해당하며, 이를 자유공간 전계강도로 나타내면 다음과 같다.

$$E(dB(\mu V/m)) = 106.9 - 20 \log d_{km} \quad (14)$$

따라서 식 (14)를 일반적인 자유공간 손실 식에 대입하여 정리하면 기본 전송손실, $L_p(dB)$ 는 전계강도, $E(dB(\mu V/m))$ 를 $E_{p.1546}$ 으로 표현하면 다음과 같이 정리된다.

$$L_p = 139.3 - E_{p.1546} + 20 \log f_{MHz} \quad (15)$$

이상에서 도출된 식 (13)에서 P_{r-th} 를, 그리고 (15)에서 L_p 를 각각 식 (8)에 대입한다. 따라서 일반적인 수신전계강도 $E_p(dB(\mu V/m))$ 는 ITU-R 권고 P.1546 의 전계강도 곡선 $E_{p.1546}$ 으로 표현하면 다음과 같이 정리된다.

$$E_p = E_{p.1546} + P_t + G_t - L_t - 62.1 \quad (16)$$

여기서 DTV 수신한계전계강도를 구할 때는 $E_p = E_{P_{r-th}}$ 로 대체하면 된다. 최종적으로 식 (16)의 62.1의 물리적 의

미는 1 kW ERP를 dBm 단위로 환산한 결과와 동일하게 되었음을 알 수 있다. 따라서 송신전력, $P_t(dBm)$ 와 안테나 이득, $G_t(dBi)$ 의 합이 62.1 라면 결국 수신 전계강도는 바로 ITU-R 권고 P.1546의 전계강도 곡선의 값에서 송신기의 삽입손실, $L_t(dB)$ 을 뺀 값이 됨을 의미한다.

2. Okumura-Hata 모델

ITU-R의 전파모델과의 양립성 분석을 위해 이동 업무에 적용되고 있는 도심 지역의 Okumura-Hata 전파모델의 전계 강도는 다음과 같이 주어진다^[4].

$$E = 69.82 - 6.16 \log f + 13.82 \log H_1 + a(H_2) - (44.9 - 6.55 \log H_1)(\log d)^b \quad (17)$$

여기서

E : 1kW ERP에 대한 전계강도($dB(\mu V/m)$)

f : 주파수 (MHz)

H_1 : 지상 기지국 유효안테나 높이(30 ~ 200 m)

H_2 : 지상 이동국 안테나 높이(1 ~ 10 m)

d : 거리 (km)

$$\begin{aligned} a(H_2) &= (1.1 \log f - 0.7) H_2 - (1.56 \log f - 0.8) \\ b &= 1, \quad d \leq 20 \text{ km} \\ b &= 1 + (0.14 + 0.000187f + 0.00107 H_1')(\log[0.05 d])^{0.8}, \\ &\quad d > 20 \text{ km} \\ H_1' &= H_1 / \sqrt{1 + 0.000007 H_1^2} \end{aligned} \quad (18)$$

이다.

이상에서 기술한 2가지 전파 모델에 대해 주어진 거리에서 전계강도 또는 그 역의 경우에 대해 원하는 결과를 산출할 수 있으며, 제한된 범위 내에서 비교가 가능하다.

IV. 수치계산 및 분석

1. 변수설정 및 계산절차

표 2는 본 논문에서 수치계산에 관련된 변수를 포함하는

DTV 수신기의 전기적 특성을 한 예로 나타내었으며, 변수에 대한 값은 편의상 가정한 경우이다. 또한 ITU-R 권고 P.1546 모델을 이용하여 수신 전계강도 한계에 따른 거리를 계산하기 위해 육상 경로에 대해 시간수신확률은 50%, 공간수신확률은 수신기 지역의 50%로 가정하였다.

표 2. 가정한 시스템 변수 및 조건

Table 2. Assumed system parameters and conditions

$B(Hz)$	$NF(dB)$	$S/N(@BER=10^{-6})$	$G_r(dBi)$	$G_t(dBi)$	$L_t=L_r(dB)$
6×10^6	2.0	22.0 dB	10	20	0

수신기의 수신한계레벨의 전계 강도 및 관련 변수에 대해 구하는 절차는 다음과 같다. 첫째, 식 (10) 및 표 2의 변수들로부터 수신기 감도 레벨을 계산한다. 둘째, 식(13)을 이용하여 수신기의 수신한계 전계강도를 계산한다. 셋째, 식 (16)을 이용하여 수신한계 전계강도를 주는 거리, 주파수 등의 변수에 대해 권고 P.1546 모델에 제시된 절차를 이용하여 관련된 값을 구한다.

상기 조건을 이용하여 수치계산 대상은 DTV 수신기가 시골 또는 개방지역에 있는 경우와 도심 또는 과밀 도심지역에 있는 경우이며, 각 경우에 대해 전파손실, 임계전계강도를 주는 거리, Okumura-Hata 모델과 비교 등을 보인다. 특히 도심지역에 대한 전계강도를 산출하기 위해 식 (5) ~ (7)에 제시된 보정 값을 추가로 계산하여 계산된 전계강도에 더 해주어야 하며, 이는 도심지역에서 발생하는 추가적인 회절손실을 의미한다.

2. 계산결과 및 고찰

2.1 시골 지역

그림 3은 식 (13)을 이용하여 표 2의 변수 값으로부터 구한 수신한계 레벨의 전계강도, $E_{P_{r-th}}$ 을 주파수에 대해 나타내었다. 주파수 500, 600, 700 MHz에서 수신한계 전계강도는 각각 약 38.9, 40.5, 41.8 $dB(\mu V/m)$ 값을 갖는다. 식 (13)에서 알 수 있듯이 시스템 특성이 정해지면 단지 주파수에 따라 수신한계 레벨이 변화가 있다. 만약 상대적 수신한계 레벨의 변화 $\Delta E(dB) = 20 \log(f/f_{ref})$ 로 표현되며,

$f_{ref} = 600$ MHz로 하면 $f = 500$ 및 700 MHz에 대한 ΔE 는 각각 약 -1.6 및 $+1.3$ dB가 된다. 단, 여기서 안테나 이득은 변화가 없는 것으로 하였다.

그림 3. 주파수에 따른 수신한계레벨의 전계강도
Fig. 3. Threshold electric field strength as a function of frequency

그림 4는 방송수신 및 이동단말 안테나가 시골 또는 개방 환경에 있을 때, 전파의 손실을 알아보기 위한 것으로 식 (15)을 이용하여 주파수 600 MHz, 거리 50 km, 송신 안테나 높이에 따른 전파손실, L_p (dB)를 보여준다. 이때 수신 안테나의 높이(h_2)는 편의상 10, 30, 60 m로 하였다. 송신 안테나 높이(h_1)는 10, 20, 37.5, 75, 150, 300 m로 하였으

그림 4. 송신 및 수신 안테나 높이에 따른 전파손실
Fig. 4. Propagation loss for transmitter and receiver antenna heights

며, 보간법을 적용하여 구한 $h_1 = 50$ m에서의 전파손실은 $h_2 = 10, 30, 60$ m일 때 각각 약 167, 157, 151 dB가 된다. 수신 안테나의 높이가 높을수록 감쇠가 상대적으로 줄어드는데, 이는 방해물(clutter) 의한 회절손실이 감소하기 때문이다.

그림 5는 송신안테나 높이 및 송신출력에 대한 수신임계 전계강도를 주는 거리를 도출한 것이다. 선택한 DTV 채널의 중심 주파수는 600 MHz, 송신 출력, P_t 는 1.0 kW, 10 kW로 가정하였으며, 그림 4와 동일한 전파환경에서 단지 수신 안테나 높이, $h_2 = 10$ m로 한 경우, 식 (16)을 이용하여 임계 전계 강도 값을 주는 거리를 계산한 것이다. 송신출력 $P_t = 1$ kW (= 60 dBm) 일때, 송신 안테나의 높이 $h_1 = 70, 150$ m에 대해 수신한계 레벨에 도달하는 전송거리는 각각 약 69.6, 82.4km가 된다. 동일한 송신 안테나 높이에서 송신 출력이 클수록 더 먼 거리까지 전파됨을 알 수 있다.

그림 5. 수신기 임계전계강도에 따른 거리
Fig. 5. Distance for receiver threshold electric field strength

2.2 도심 지역

그림 6은 주파수 600 MHz, $d=30$ km에서 수신 안테나 높이 $h_2=10$, 송신 안테나 높이 $h_1=10, 20, 37.5, 75, 150, 300$ m에 대해 도심 및 과밀 도심 $R=20, 30$ m에 대한 경로 손실을 나타낸다. 수신기의 안테나 높이 보다 주변의 방해물의 대표적 높이가 커지기 때문에 회절에 대한 추가

손실이 발생한다. 여기서 거리가 $d = 30 \text{ km}$ 이므로 식 (5)의 적용 조건에서 $R' \approx R$ 이 되어 추가 손실은 송신 안테나 높이의 함수가 아님을 알 수 있다. 따라서 계산된 추가 손실은 식 (6) 및 (7)로부터 가능하며, 계산된 값들 간의 차이는 약 5.6 dB 가 되며, 이를 반영된 최종 손실을 그림 6에 제시하였다.

그림 6. 도심 및 과밀 도시에 따른 전파 손실
Fig. 6. Propagation loss for urban and dense urban

그림 7은 그림 6의 과밀 도시의 결과에 대해 송신 안테나 높이에 따른 수신 임계전계강도를 주는 거리를 제시하였다.

그림 7. 수신기 임계전계강도에 대한 거리
Fig. 7. Distance for receiver threshold electric field strength

여기서 송신 출력 $P_t = 1.0 \text{ kW}$, 표 2의 변수 값들을 적용하였으며, 송신 안테나 높이 $h_1 = 10, 20, 37.5, 75, 150, 300 \text{ m}$ 에 따라 나타낸 것이다.

끝으로 Okumura-Hata 모델과의 비교를 위해 그림 7의 결과를 근거로 표 3에 나타내었다. 과밀 도시에 대해 주파수 600 MHz, 송신 출력 1.0 kW 에서 그림 7에서 송신 안테나 $h_1 = 37.5, 70, 150 \text{ m}$ 인 경우, 동일한 임계전계강도를 주는 거리를 각각 구하여 거리 d 에 기입하였다. 여기서 송신 안테나의 높이 선정은 Okumura-Hata 모델에서 안테나 높이가 30 ~ 200 m 범위에 있기 때문이다.

또한 식 (17)를 이용하여 동일한 거리에서 Okumura-Hata 모델에 의해 구한 전계강도를 제시하였으며, 안테나 높이가 낮을수록 그리고 거리가 짧을수록 전계강도 오차가 상대적으로 줄게 됨을 알 수 있다. 전계강도의 % 오차는 약 6.9 ~ 11.5 사이에 있음을 보여준다. 이러한 오차는 측정에 의한 모델 방법의 정형화에 따른 근원적인 차이로 발생한 것으로 보이며, ITU-R 권고 P.1546 모델은 $h_2 = H_2 = 1.5 \text{ m}$, $R = 15 \text{ m}$ (R 은 수신기 주변의 대표적 클러스터 높이), $d = 10 \text{ km}$ 까지는 Okumura-Hata와 유사한 결과를 준다고 한다^[4].

표 3. Okumura-Hata 와 ITU-R 권고 P.1546 의 비교
Table 3. Comparison of Okumura-Hata and Rec. ITU-R P.1546

$H_1 = h_1(m), R = 30m$		37.5	70	150	
거리, $d(km)$		19.66	26.47	36.59	
전계강도, $E(dB(\mu V/m))$	ITU-R P.1546 ^a	46.54	46.54	46.54	
	Okumura-Hata ^b	49.74	50.54	51.86	
전계강도 오차(%)		$100 \times (b - a) / a$	6.88	8.60	11.43

V. 결 론

본 논문에서는 ITU-R 권고 P.1546에서 제시된 주파수 30 MHz ~ 3000 MHz 대역에 지상 서비스를 위한 점-대-지역 전계강도 산출 절차를 이용하여 DTV 송신 신호의 전계강도 예측을 위한 방법을 정립하고, 수신기의 수신 전계강

도에 대한 수식 유도와 관련 변수를 이용한 수치 계산 및 결과를 분석하였다. 송신소 시스템의 설정 변수에 대해 주파수에 따른 수신한계레벨의 전계강도, 송신 안테나 높이에 따른 전파손실 및 전파 도달 거리를 살펴보았다. 또한 도출된 결과를 비교하기 위해 도심 지역의 Okumura-Hata 모델과 분석도 수행하였으며, 계산에 의하면 거리 약 20 ~ 40 km 사이에서는 전계강도 오차가 약 6.9 ~ 11.5 % 가 있음을 확인할 수 있었다.

제시된 분석 방법은 DTV 수신지역의 전계강도 예측을 통한 신호의 품질 분석은 물론, 양호한 전파환경 구축에 필요한 송신소 및 중계국 위치설정, 간섭에 대한 양립성 분석 등에 직접 활용할 수가 있다. 추후 연구로는 실제 지형정보를 이용한 다양한 변수에 대해 전계강도 도출 및 분석 등이 남아 있다.

참 고 문 헌

- [1] 목하균 외 5인, "DTV 분산중계망 필드 테스트 결과," 방송공학회논문지, 제14권, 제4호, pp. 518-536, 2009년.
- [2] 김홍목 외 7인, "분산중계기 part I: 분산중계기술," 방송공학회논문지, 제15권, 제1호, pp. 14-28, 2010년.
- [3] 서경환, 이주환, 정혁, 최성웅, "DTV 송신 신호의 전계강도 예측에 대한 연구", 한국방송공학회 2010 하계, 학술대회, S14-1, 2010. 7. 8~10, 제주도, 대한민국.
- [4] Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz, Recommendation ITU-R P.1546-3, 2007.
- [5] N.H. Jeong, J.H. Lee, K.W. Suh, "Analysis of frequency sharing between mobile systems and radiolocation radars in VHF band", The 12th International Conference on Advanced Communication Technology, Phoenix Park, Korea, pp.1179-1183. Feb. 7-10, 2010.
- [6] Roger L. Freeman, Radio system design for telecommunication, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [7] Planning criteria for digital terrestrial television services in the VHF/UHF band, Rec. ITU-R BT.1368-8, 2009.

저 자 소 개

서 경 환

- 1991년 8월 : 한국과학기술원 공학박사 (초고주파 및 안테나 전공)
- 1983년 1월 ~ 1998년 10월 : 삼성전자 정보통신본부 수석연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 강남대학교 전자공학과 교수
- 주관심분야 : 마이크로파 회로, RF 모델 및 무선전송시스템, 주파수 조정 및 간섭 분석 등

정 혁

- 2009년 8월 : 강남대학교 전자공학 학사
- 2009년 9월 ~ 현재 : 강남대학교 전자공학과 석사과정 재학
- 주관심분야 : RF 설계 및 구현, 무선통신 시스템 성능 분석 등

저 자 소 개

이 주 환

- 1988년 2월 : 서강대학교 전자공학 학사
- 2000년 2월 : 충남대학교 전파공학 석사
- 1990년 2월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원
- 2001년 1월 ~ 현재 : 한국 ITU-R 연구위원회 SG5 분과위원
- 주관심분야 : 고정통신, 전파특성, 전파자원, 무선측위 등