

레이더 간섭에 의한 M/W 방송 중계 시스템의 품질 열화에 대한 연구

*서경환 **정혁 ***이주환

*강남대학교, **강남대학교, ***ETRI

*kwsuh@kangnam.ac.kr

A Study on Quality Degradation of M/W Broadcasting Relay System Caused by Radar Interference

*Suh, Kyoung-Whoan **Jung, Hyuk ***Lee, Joo-Hwan

*Kangnam University, **Kangnam University, *** ETRI

요약

최근 세계전파통신회의(WRC)에서는 자연 재해를 예방하여 인명 안전을 보호하기위해 해양 및 우주 등 지구 환경 감시를 위한 레이더 주파수의 분배를 시행하였고, 또한 WRC-12 에서도 추가적 분배를 논의하고 있다. 이러한 추세에 일환으로 정부에서는 3.0, 5.6, 9.3 GHz 등의 대역에 탐지 레이더를 설치 및 운용 중에 있으며, 일반적으로 레이더 송신 출력의 비고조파 불요 및 2차 고조파 스퓨리어스 방사가 해당하는 M/W 방송 중계망에 유입되어 전송품질을 열화 시키는 주요인 되기도 한다.

본 논문에서는 M/W 방송 중계망에 레이더 간섭이 유입되는 경우에 대해 안정된 전송품질 확보를 위한 보호비, 전송 오류, 가용율 설정 등을 산출하고 결과를 분석한다. 분석 대상으로는 탐지 레이더 신호의 비고조파 불요 방사와 2차고조파 스퓨리어스 방사가 현재 운용중인 6.2 GHz 대의 방송 중계 시스템의 수신기에 유입되는 경우로 간섭 분석을 수치계산을 통해 제시한다. 적용한 분석 방법은 상이한 주파수 대역에서 이중 서비스 간의 간섭 분석 및 주파수 조정절차에도 적용이 가능하다.

1. 서론

ITU-R(국제전기통신연합-전파)의 WRC(세계전파통신회의)-12 의제 중에는 자연 재해를 예방하여 인명 안전을 보호하기위해 해양 및 우주 등 지구 환경 감시를 위한 레이더 주파수의 추가 분배가 현재 논의 되고 있으며, WRC-03/07에서는 고해상도를 얻기 위해 기상 레이더 및 X-band SAR 용의 주파수를 각각 추가 배정을 한 바 있다. 이러한 추세에 일환으로 최근 정부에서는 3.0, 5.6, 9.3 GHz 등 대역에 탐지 레이더를 설치 및 운용 중에 있으며, 일반적으로 레이더 송신 출력은 비고조파 불요 및 2차 고조파 스퓨리어스 방사가 해당하는 M/W 중계망의 유입되어 전송품질 열화를 시키는 주요인 되기도 한다[1].

일반적으로 서로 다른 주파수 대역에서 상이한 서비스간의 간섭은 비고조파 불요 방사와 2차, 3차 등 고조파의 스퓨리어스 방사와 관련이 있다. 마이크로파 대역의 신호를 이용한 무선 서비스는 고정, 이동 및 위성 통신과 무선 측위, 기상, 무선 항행 목적의 레이더 등 여러 가지가 있다. 이 중에서 특히 방송 중계망과 레이더 간에 간섭은 레이더의 높은 출력에 의한 불요방사 및 고조파 신호의 방사가 방송 중계 시스템의 수신기에 유입되어 전송 품질 열화를 종종 유발한다.

방송 중계망의 주파수는 대개 3.4 ~ 11.2 GHz 신호를 이용하여 전송거리 약 20 ~ 80 km 에 대해 음성, 데이터, TV 영상 등 멀티미디어 정보의 높은 비트 열을 전송하는 목적으로 적용된다. 전송 용량은 대개 155.520 Mbps (STM-1) 또는 311 Mbps (2 x STM-1) 이다. ITU-T 에서 엄격하게 전송품질 요구에 대해 제시하고 있는데, 이 들은 오류초 (ES), 과도오류초 (SES) 등을 ITU-T Rec. G.826에서 명시하고 있다. 음성 또는 영상 전송 품질은 ES 동안에 현저하게 저하되며, SES 동안

에는 무선 채널에서는 사용이 불가하게 된다[2].

본 논문에서는 6.2 GHz 방송 중계망에 3.0, 5.6GHz 대역에 동작하는 탐지 레이더의 비고조파 불요 방사와 2차고조파 스퓨리어스 방사에 의한 간섭이 유입되는 경우, 전송 품질에 미치는 영향을 포괄적으로 정립하고 간섭에 대한 수치계산 및 그 결과를 고찰한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 간섭 시나리오 및 페이드 마진을 정립하고, 둘째, 간섭에 따른 전송품질 열화, 보호비 및 가용율에 대해 기술한다. 셋째, 간섭에 따른 전송품질에 관한 수치계산 및 고찰을 하며, 끝으로 결론 및 향후 연구 과제를 도출한다.

2. 간섭 및 페이드 마진

가. 간섭 시나리오

레이더로부터 어떠한 스퓨리어스 방사는 방송 중계 장치의 안테나에 유입되어 수신기에서 어떤 간섭전력 레벨 I 을 발생시키며, 이는 수신기의 배경 잡음 레벨 N 과 비교된다. 간섭은 부가적인 잡음으로 감지되어 이는 C/N 을 열화시켜 결국 전송 오류를 유발한다.

표 1은 레이더 시스템의 변수를 파악하기 위해 최근에 강우 예측 및 홍수 예방 목적으로 설치 및 운영되고 있는 2.7 ~ 3.0 GHz 대역의 기상 레이더의 전기적 특성들을 한 예로 나타내었다.

그림 1은 Rec. ITU-R F.1097-1에서 제시된 Arlanda 레이더로부터 측정된 필터링 없는 송신 스펙트럼의 예이다. 6 GHz 대역의 위쪽 및 아래쪽에 스퓨리어스가 존재하며, 이는 레이더의 침투치 전력보다 약 50 dB 아래에 있음을 보여준다.

표 1. 기상 레이더 시스템의 전기적 특성

특성	Radar G
플랫폼 형태, 용도	지상, 기상
튜닝 영역 (MHz)	2700 ~ 3000
변조	PON
송신기출력 (안테나 유입) (kW)	500
펄스 폭(μ s)	1.6 (short pulse) 4.7 (long pulse)
펄스 상승/하강 시간 (μ s)	0.12
펄스 반복 율 (pps)	318 ~1304 (short pulse) 318 ~452 (long pulse)
Duty cycle (%)	0.21 최대
Chirp 대역폭	NA (not applicable)
펄스 코드 부 펄스 폭	NA
압축 율	NA
RF 방사 대역 폭 (-20dB, 3 dB)	(4.6 MHz, 600 kHz)
출력 소자	Klystron
안테나 패턴 형태	Pencil
안테나 형태	파라볼릭 리플렉터
안테나 편파	선형 : 수직, 수평
안테나 주 빔 이득 (dBi)	45.7
안테나 양각 빔 폭 (도)	0.92
안테나 방위각 빔 폭 (도)	0.92
안테나 수평 스캔 율 (도/s)	18
안테나 수평 스캔 형태	360 도 및 섹터
안테나 수직 스캔 율 (도/s)	14 단계/5분
안테나 수직 스캔 형태 (도)	고정 단계: 0.5 ~ 20
안테나 부엽 레벨 (1번째) (dBi)	+20
안테나 높이 (m)	30
수신기 IF 3 dB 대역폭	630 kHz
수신기 잡음 지수 (dB)	2.1
최소 분별 신호 레벨 (dBm)	-115
수신기 전단 1dB 이득 압축점 (dBm)	-17
수신기 on-tune 포화 레벨 (dBm)	-10
수신기 RF 3 dB 대역폭 (MHz)	1.6
수신기 RF 및 IF 포화 레벨 및 회복 시간	-10 dBm, 1 μ s
도플러 필터링 대역폭 (Hz)	Estimate 95(*)
간섭 제거 특성	-
지리학적 분포	Worldwide
사용 시간 율 (%)	100

방송 중계 장치의 간섭 계산 및 보호비 도출을 위해 그림 2에서는 간섭 시나리오의 전형적인 예를 제시하였다. 레이더 송신기에서 방송 중계 장치의 수신기로 또는 역으로 간섭이 유발될 수 있다.

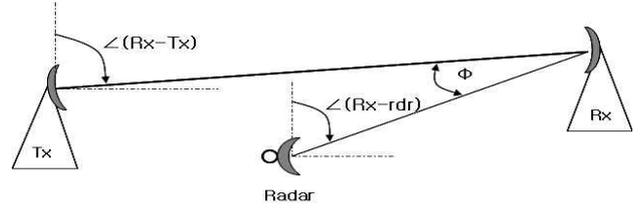


그림 2. 간섭신호 분석을 위한 레이더와 방송 중계 링크

그림 2에서 레이더 (rdr)와 방송 중계 시스템의 수신기(Rx) 사이의 거리 $D(km)$ 는 식 (1)과 같이 표현되며, lat 는 위도, $long$ 는 경도를 의미하며, 모두 단위는 도(degree) 이다[3].

$$d = 111.317 \cos^{-1} [\sin(lat Rx) \times \sin(lat rdr) + \cos(lat Rx) \times \cos(lat rdr) \times \cos(long Rx - long rdr)] \quad (1)$$

한편 방송 중계 장치의 송신기와 수신기로부터 레이더에 대한 변별 각 Φ (degree)은 방위각 차이로 계산이 가능하다.

$$\Phi = \angle(Rx - Tx) - \angle(Rx - rdr) \quad (2)$$

여기서 $\angle(Rx - Tx)$ 및 $\angle(Rx - rdr)$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\angle(Rx - rdr) = \tan^{-1}[(\sin(long rdr - Long Rx) / D)] \quad (3)$$

$$\angle(Rx - Tx) = \tan^{-1}[\sin(long Tx - long Rx) / D]$$

$$D = \cos(lat Rx) \times \tan(lat rdr) - \sin(lat Rx) \times \cos(long rdr - long Rx)$$

그림 2에서와 같이 레이더로부터 방송 중계 장치의 수신기로 유발되는 원하지 않는 신호 즉, 간섭 I 는 다음과 같이 주어진다[3,4].

$$I = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - L_p - FDR_{IF} \quad (4)$$

여기서 I 는 피해 수신기 입력단에서 레이더 펄스들의 침투 전력 (dBm), P_t 는 레이더 송신기의 침투 전력 (dBm), G_t 는 레이더의 주 빔 안테나 이득 (dBi), G_r 는 분석대상인 레이더 기지국의 방향으로 피해 수신기 안테나 이득 (dBi), L_t 는 레이더 기지국 송신기에서 삽입손실 (dB), L_r 는 피해 수신기의 삽입손실 (dB), L_p 는 송신과 수신 안테나 사이의 전파경로 손실 (dB), FDR_{IF} 는 주파수의존제거 (Frequency Dependent Rejection)로 원하지 않는 송신기의 방사 스펙트럼에 대해 피해 수신기 IF 선택도에 의해 산출되는 양(dB)으로 다음과 같다.

$$FDR = 10 \log \left(\frac{\int_{-BW/2}^{BW/2} S(f) df}{\int_{-BW/2}^{BW/2} S(f) R(f + \Delta f) df} \right) \quad (5)$$

여기서 $S(f)$ 는 송신기 전력 스펙트럼밀도(Watts/kHz), BW 는 피해 수신기 채널의 대역폭, $R(f)$ 는 수신기 선택도, 그리고 Δf 는 송신기 캐리어 주파수와 수신기 캐리어 주파수와의 차이이다.

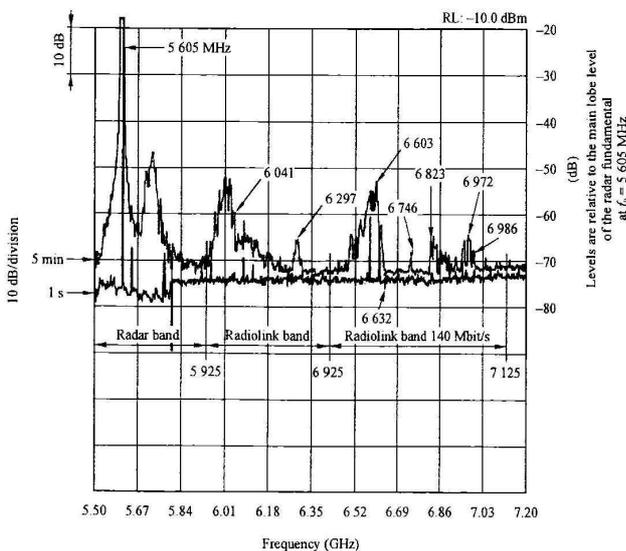


그림 1. 필터링 되지 않는 레이더의 주파수 스펙트럼

나. 불요신호 분석

다. 페이드 마진

방송 중계 장치에 수신된 신호는 직접파와 간접파의 합으로 표현되어 다중경로에 기인한 주파수 선택적 페이딩이 발생한다[5]. ITU-R P.530-10 에 의하면 최악 월에 주파수 f (GHz)에 대해 수신된 전력 p 가 p_0 보다 적거나 동일하게 될 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P(p \leq p_0) = K d^{3.6} f^{0.89} (1 + |\epsilon_p|)^{-1.4} \frac{p_0}{p_n} \times 10^{-2} \quad (6)$$

여기서 K 는 지형기후인자로 표 2와 같이 주어지며, d 는 거리(km), f 는 주파수(GHz), p_n 는 페이딩이 없을 경우의 수신된 전력이다. ϵ_p 는 경로 기울기(milliradians)로 $|h_R - h_T|/d$ 이며, h_R 및 h_T 는 각각 송신 및 수신 안테나의 높이이다. 식 (6)의 타당한 범위는 거리 7 ~ 95km, 주파수 2 ~ 37 GHz 이다.

표 2. 지형 기후인자 K

변수 K	조건
$K=10^{-6.5} P_L^{1.5}$	송수신 안테나 중에 더 낮은 위치의 있는 안테나가 바다표면으로부터 700m 아래에 존재하는 링크
$K=10^{-7.1} P_L^{1.5}$	송수신 안테나 중에 더 낮은 위치의 안테나가 바다표면으로부터 700m 이상에 존재하는 링크
$K=10^{-5.9} P_L^{1.5}$	링크가 중규모로 물의 분포, 다수의 호수 또는 해안 영역을 지나는 구간
$K=10^{-5.5} P_L^{1.5}$	링크가 대규모로 물의 분포 또는 해안 영역을 지나는 구간

일반적으로 다중경로 페이드 마진(FM)은 페이딩이 가장 많이 발생하는 해당 월의 평균치로 어떤 시간백분율을 초과하는 경우의 페이딩 깊이이며, 식 (6)에서 선정된 시간백분율에 대한 필요한 FM은

$$FM = 10 \log \left(K d^{3.6} f^{0.89} (1 + |\epsilon_p|)^{-1.4} \right) - 10 \log(p_w) \quad (7)$$

이 된다. 여기서 $FM = 10 \log \left(\frac{p_n}{p_0} \right)$ 이며, $p_w = P(p \leq p_0) \times 100$ (%)로 시간 백분율을 나타낸다. P_L 는 지상 100m 이내에 평균 굴절 기울기가 $-100N$ units/km 보다 적을 시간에 대한 백분율이다. 한국의 P_L 은 ITU-R P.453-9에 의하면 1, 5, 10을 갖는다.

3. 전송품질 및 가용율

가. 전송품질 열화

가우시안과 같은 간섭이 백색 가우시안 잡음 채널과 결합될 경우, 전체 C/N_{tot} 는 다음과 같이 주어진다.

$$C/N_{tot} = (N/C + I/C)^{-1} \quad (8)$$

여기서 $I/C = I_1/C + I_2/C + \dots + I_n/C$ 이며, $I_i/C (i=1, 2, \dots, n)$ 는 i 번째 무작위 간섭원의 간섭 대 캐리어의 비이다[2,5].

간섭에 의해 수신 한계레벨이 감소하면 페이드 마진이 줄어들며, 이를 N/I 로 표현된 마진 열화(ΔM)는 다음과 같다.

$$\Delta M = 10 \log(1 + 10^{(-N/I)/10}) \quad (9)$$

간섭을 유발하는 레이더가 360도를 연속적으로 스캐닝 하는 경우,

안테나의 빔이 통과할 때마다 감지되는 레이더 펄스의 전체 수는

$$N = \frac{1}{RPM} \times 60 \times \frac{BW}{360} \times PRF \quad (10)$$

이다. 여기서 N 은 레이더 주 빔이 방사하여 지나가는 동안 즉, 빔 통과 당 감지되는 펄스의 수이고, RPM 은 안테나 회전율(rpm)이며, BW 은 레이더의 주 빔의 폭(degrees), 그리고 PRF 는 펄스 반복 율(pps)이다.

하나의 빔이 통과하는 동안에 레이더 주 빔으로부터 피해 수신기에 감지되는 펄스열의 전체 지속은

$$PTD = N \times PRI \quad (11)$$

이다. 여기서 N 레이더 주 빔이 방사하여 통과할 때 감지되는 펄스의 수이며, $PRI (= 1/PRF)$ 는 펄스 반복 간격(sec)이다.

한편 방송 중계 장치의 최종 출력 데이터의 비트 오류율은

$$BER = \frac{PDT}{T_{sym}} \times m \quad (12)$$

이 된다. 여기서 T_{sym} 은 디지털 변조의 심볼율(symbol rate)이며, m 은 심볼 당 비트 수를 의미한다. 일반적으로 임펄스 응답의 폭은 수신기 IF 대역폭의 역수이다.

나. 보호비 및 가용율

보호비는 무선 통신망에 허용되는 신호 대 간섭 전력의 최소 비를 의미하며, 다음과 같이 표현된다.

$$PR = C/N(BER 10^{-y}) + FM + N/I - FDR \quad (13)$$

여기서 $C/N(BER = 10^{-y})$ 는 해당 변조방식에서 비트오율 10^{-y} 일 때, 값이며, N/I 는 잡음 대 간섭 신호의 전력비이다.

성공적인 망 설계 및 전송품질 확보를 위해서는 아래 식 (14)를 만족하여야 한다. 여기서 $(C/I)_{obj}$ 는 목표하는 C/I 이다[3,6].

$$C/I \geq (C/I)_{obj} = PR \quad (14)$$

한편 가용율은 비트오율이 10^{-6} 이상이 되는 시간이 10 초 미만인 경우, 전체 장치 운용 시간에 대한 백분율로 표현하다. 고품질을 적용하는 디지털 링크에서의 가용율 목표(ITU-R F.695)에서는 우리나라에 적용되는 링크 거리 L 이 $280km < L < 2500km$ 구간에서는 가용율 목표 A (%)와 링크내의 각 국소간의 가용율은 각각 다음과 같다.

$$A = 100 - (0.3 \times L/2500) \quad (15-a)$$

$$X^y = A/100 \quad (15-b)$$

여기서 X (%)는 국소 구간 목표 가용율, $y = L/d$ 로 전체 링크에서 국소간의 거리 d (km)로 나눈 값이다. 이는 전송 구간별로 가용율 시간의 발생 확률은 각각 독립적인 것을 의미하고 있다.

4. 수치계산 및 결과

M/W 방송 중계 장치의 주파수 대역은 6.2(5.925 ~ 6.425)GHz, 레이다 대역은 표 1 또는 그림 1 과 같으며, 불요파 및 고조파가 방송 중계 장치에 영향을 줄 수 있는 경우이다. 6.2 GHz 대의 방송 중계 장치에 배정된 주파수 분배는 ITU-R Report 934-2 에 채널 간격 29.65 MHz, 최소 전송용량은 155.520 Mbps 이상이다. 그림 3은 실제 M/W 방송 중계 시스템의 64-QAM 변조된 IF 대역의 스펙트럼이다.

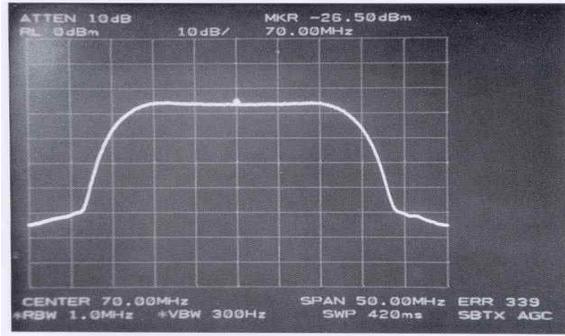


그림 3. 64-QAM 변조된 IF 스펙트럼 특성(roll-off=0.3)

피해 M/W 방송망 주파수 대역은 6.2 GHz, 간섭 유발은 탐지 레이다의 불요방사 또는 고조파 신호이다. 그리고 FDR = 0 인 경우를 가정하였으며, 이는 피해 수신기의 선택도가 채널 대역폭 내에 간섭원의 송신 스펙트럼 마스크를 감쇠 없이 수용하는 경우이다. 변조 방식은 대표적으로 M-ary QAM에 국한하여 ITU-R F.111 참고하였다.

그림 4는 식 (8)를 이용하여 64-QAM 변조에서 레이다 간섭 양, $N/I = \infty, 10, 6, 3$ 에 따른 비트오율의 변화를 나타내었으며, 방송 중계 망에서는 $N/I = 6.0$ dB를 최대 허용 간섭으로 정하고 있다.

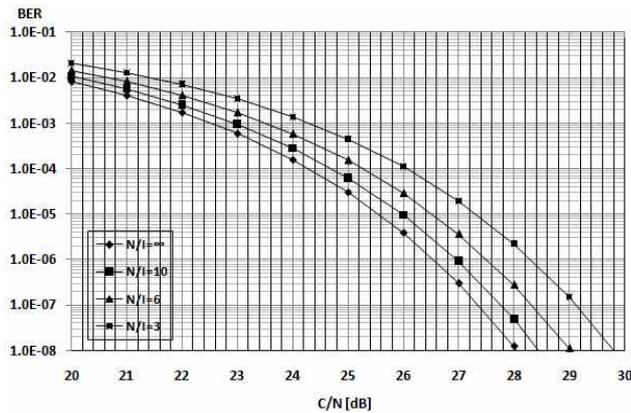


그림 4. 간섭 양에 따른 비트 오율의 변화

그림 5는 식 (13)을 이용하여 적용된 변수는 M-ary QAM 에 대해 주파수 $f = 6.2$ GHz, $N/I = 6$ dB, 시간 백분율 $p_w = 0.01\%$, $P_L = 10$, $FDR = 0$, $K = 10^{-6.5} \times P_L^{1.5}$, 경로 경사각 (ϵ_p) = 0에 대해 거리의 함수로 페이드 마진(FM) 및 보호비(PR)를 나타내었다. 한 예로 거리 70km 에서의 FM과 PR은 각각 약 43.5 및 73.3 dB이다.

그림 6은 식 (15)를 이용하여 전체 방송 중계 망 링크의 길이 $L = 500$ km, 설정한 가용율 $A = 99.94\%$, 각 국소 간의 간격에 따른 구간 가용율을 나타내었으며, 거리 70km 에서는 약 99.9916% 이다.

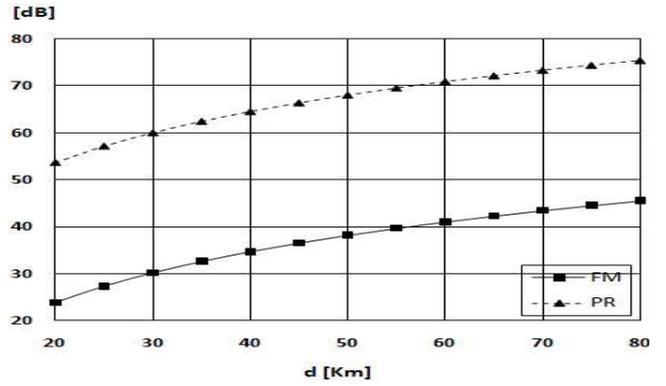


그림 5. 거리에 따라 요구되는 보호비 및 페이드 마진

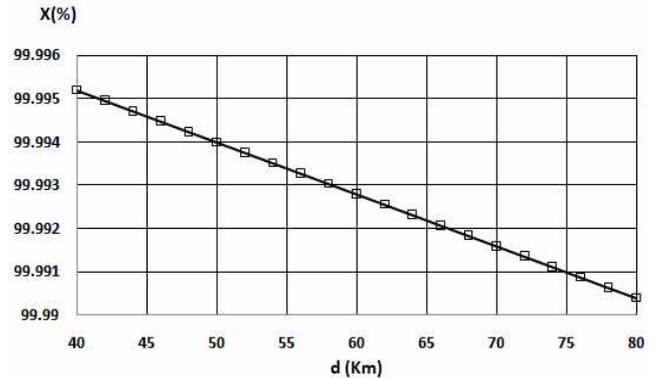


그림 6. 설정 거리에 대해 링크 구간에 대한 가용율

5. 결론

본 논문에서는 M/W 방송 중계 시스템에 탐지 레이다의 간섭이 유발되는 경우에 대해 간섭 분석 및 전송품질 열화에 대한 이론적 정립과 수치계산에 의한 결과를 분석하고 고찰하였다. 레이다의 불요 방사 및 고조파 신호의 유입, 즉 간섭 신호의 한계와 전송품질, 보호비, 가용율 등 상관관계를 살펴보았다. 제시된 분석 방법은 실제 방송 중계망간은 물론, 타 시스템의 간섭으로부터 전송품질 예측을 위한 방법으로 적용할 수 있으며, 나아가 신규 레이다 국소 설정에 관련된 주파수 조정 절차에 직접 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

향후 연구로는 간섭에 따른 주파수 조정 절차, 레이다 신호의 불요파 제거 또는 감소를 위한 효과적인 필터링 방법, 그리고 방송 중계 시스템의 수신기에 무작위 발생 오류 및 버스트(burst) 성격의 오류를 제거하기 위한 보다 강력한 오류정정(FEC) 및 인터리빙 등이다.

참고 문헌

- [1] 국방부, 국제 주파수 분배정책 대응 군 무선체계 주파수 영향분석 연구, 2009년 12월.
- [2] Carlos, Microwave radio link: From theory to design, Wiley-Interscience, 2003.
- [3] 서경환, "디지털 마이크로웨이브 링크 설계를 위한 전송품질 및 주파수 이전에 대한 연구", 한국전자과학회논문지, 제14권 제5호, p. 489-498, 2003년 5월.
- [4] 한국전자통신연구원, 정량적 분석에 의한 M/W 통신망의 간섭 보호비 연구, 2005년 11월.
- [5] L. J. Greenstein and M. Shafi, "Outage calculation method for microwave digital radio," IEEE Com. Mag., vol. 25, no. 2, pp. 30-39, Feb. 1987.
- [6] K.W. Suh, "A generalized formulation of protection applicable to frequency coordination in digital radio relay networks", Radio Science Vol. 42, RS1007, doi:10.1029/2006RS003470,2007.