

FM 대역에서 Digital Radio Mondiale Plus 신호 검출 기법

김성준, *위정욱, *전원기, *이경택, 최형진
성균관대학교, *전자부품연구원
ksjuny@keti.re.kr

Detection Method for Digital Radio Mondiale Signal in FM-band

Seong-Jun Kim, *Jung-Wook Wee, *Won-Gi Jeon, *Kyung-Taek Lee, Hyung-Jin Choi
Sungkyunkwan University, *Korea Electronics Technology Institute

요 약

본 논문에서는 동일 주파수 대역 내 DRM(Digital Radio Mondiale) Plus 신호와 FM(Frequency Modulation) 신호가 모두 서비스 되는 Hybrid 방송 모드에 적합한 DRM Plus 신호 검출 기법을 제안한다. OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 신호의 Guard-Interval 상관 기법을 그대로 적용할 경우 DRM Plus 신호 검출 성능은 우수하나, FM 신호 수신 시 False Alarm 발생 확률이 증가하는 문제점이 발생한다. 제안한 방법은 Guard-Interval 상관 방법에 Reference 블록을 포함하고 있어, 약한 DRM Plus 신호에서도 판별 확률이 높고, 아날로그 FM 신호 수신 시 False Alarm이 발생할 확률이 낮은 특징이 있다. 모의 실험을 통하여 제안한 기법의 성능을 확인한다.

1. 서론

디지털 라디오 방송은 음성 중심의 아날로그 라디오 방송에 비하여 CD급 품질의 스테레오 오디오 서비스뿐만 아니라 텍스트메시지, 슬라이드 쇼, 교통정보 및 저널라인 등 다양한 데이터 서비스를 제공한다. 또한 동일한 서비스 범위를 제공하면서도 송출 전력을 크게 줄일 수 있는 장점이 있기 때문에 여러 국가에서 아날로그 라디오 방송의 디지털 전환을 준비하고 있다.

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반의 DRM(Digital Radio Mondiale) Plus 시스템은 Band I~II 대역 (47MHz~174MHz)의 디지털 라디오 규격으로, 대역폭 100kHz에서 최대 185kbps의 데이터 전송률을 지원한다[1]. 따라서, 많은 국가에서는 DRM Plus를 아날로그 FM 방송을 대체할 디지털 라디오로 고려하고 있다. 그러나 아날로그 방송을 중단하고, 디지털 방송으로 완전 전환하기 전까지 점진적인 디지털 전환을 위하여 아날로그 FM방송과 DRM Plus 방송을 병행하는 Hybrid 방송모드를 유지할 계획이다. Hybrid 방송모드에서는 지역마다 FM 방송과 DRM Plus 방송 주파수 배치가 다르기 때문에 수신기는 현재 위치에서 어떤 주파수에 어떤 방송 서비스가 송신되는지 미리 알 수 없다. 따라서, DRM Plus 수신기는 채널에 대한 사전 정보가 없이, 선택하는 라디오 서비스 주파수에 따라 DRM Plus 신호나 아날로그 FM 신호 중 하나의 신호를 수신하며, 이러한 환경에서 수신기는 아날로그 FM 신호와 DRM Plus 신호를 구분해야 효율적으로 수신 신호를 복조 할 수 있기 때문에 모드 검출을 위한 신호 검출기가 필요하다. Hybrid 방송 모드에서는 일반적인 에너지 검출을 통한 신호 검출은 신호 구분이 불가능하며, Guard-Interval 상관 방법을 통한 DRM Plus의 신호 검출 방법도 FM 신호 수신 시 높은 False Alarm 확률을 가질 수 있다.

본 논문에서는 어떤 방송 신호가 수신되는지 알 수 없는

상황에서 약한 DRM Plus 신호에서도 판별 확률이 높고, 아날로그 FM 신호 및 잡음 신호 수신 시 False Alarm이 발생할 확률이 낮은 DRM Plus 신호 검출 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 DRM Plus 및 아날로그 FM 신호의 Baseband Modeling에 대하여 정리하고, 3절에서는 제안하는 DRM Plus 신호 검출 방법에 대한 설명과 DRM Plus 신호, FM 신호 및 잡음 신호가 수신되었을 경우 제안된 방식의 특징을 분석한다. 4절에서 컴퓨터 모의 실험을 통하여 제안하는 방식의 우수성을 입증하며, 마지막으로 6절에서 결론을 맺는다.

2. Hybrid Broadcasting Mode 시스템 모델링

OFDM 기반의 DRM Plus는 FM Band를 포함하는 Band II에서 사용 가능하다. 또한 많은 나라들은 디지털 라디오의 전환에 있어, 디지털 방송 완전 전환(ASO: Analog Switch Off) 이전에 다음 그림과 같이 아날로그 라디오와 디지털 라디오 서비스를 병행하는 Hybrid 방송을 계획하고 있다. 따라서 Hybrid 방송 모드에서 DRM Plus 수신기는 주파수 선택에 따라 DRM Plus 신호나 아날로그 FM 신호 중 하나의 신호만을 수신한다.

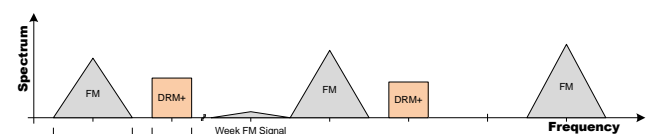


그림 1. FM Band에서의 FM 및 DRM Plus의 스펙트럼

k 개의 경로로 구성된 다중경로 채널을 통과한 m 번째 샘플링 시간에서의 DRM Plus 수신 신호는 다음과 같이 나타낼

수 있다.

$$r_{DRM+}[m] = \sum_{k=0}^{K-1} h_k[m] \cdot s_{DRM+}[m - T_s \cdot k] + \psi[m] \quad (1)$$

이때, $s_{DRM+}[m]$ 은 시간영역의 DRM Plus 신호 샘플(기저대역 변조된 OFDM 신호, IFFT 출력), $h_k[m]$ 은 k 번째 경로의 임펄스 응답이며, $\psi[m]$ 은 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 복소 AWGN(Additive White Gaussian Noise)을 의미한다. 또한 T_s 는 샘플링 주기를 의미한다.

또한, 다중경로 채널을 통과한 아날로그 FM 수신 신호는 다음과 같다.

$$r_{FM}[m] = \sum_{k=0}^{K-1} h_k[m] \cdot s_{FM}[m - T_s \cdot k] + \psi[m] \quad (2)$$

여기서, $s_{FM}[m] = \sqrt{A_{FM}} e^{j\phi_{FM}[m]}$ 는 아날로그 FM의 Baseband 신호이며, A_{FM} 은 FM 전송신호의 전력, $\phi_{FM}[m]$ 은 FM Instance를 의미한다. $\phi_{FM}[m]$ 과 메시지 신호 $M[m]$ 및 Frequency Sensitivity k_{FM} 관계는 다음과 같다.

$$\phi_{FM}[m] = 2\pi \cdot k_{FM} \sum_{\tau=-\infty}^m M[\tau] \quad (3)$$

3. 기존 Guard Interval 상관을 통한 신호 검출

본 절에서는 DRM+ 신호를 검출하기 위한 Guard-Interval 상관 방법을 설명하고 FM 신호가 수신되는 경우 발생하는 문제점을 분석한다.

무선랜과 같은 패킷기반의 버스트 데이터 전송 시스템에는 고정된 훈련 심벌이 존재하며, 수신시스템은 통상적으로 훈련 심벌의 상관을 통하여 신호 검출 및 초기 동기를 수행할 수 있다[2][3]. 반면, DVB-T 및 DRM과 같이 스트리밍 기반의 방송 시스템에는 훈련 심벌이 존재하지 않기 때문에, 고정된 신호와의 상관방법을 통한 신호 검출은 불가능하다. 따라서 훈련 심벌이 없는 방송 시스템에서는 수신 신호의 Guard-Interval 상관을 통하여 신호를 검출 한다[4][5].

다음 그림은 미지의 신호 $r[m]$ 이 DRM Plus 신호라고 가정하고 DRM Plus 신호를 검출하는 블록도이다.

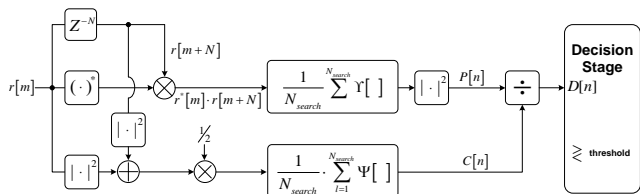


그림 2. Guard Interval 상관을 통한 DRM Plus 신호 검출기

OFDM 기반의 DRM Plus 신호 검출을 위하여 Guard-Interval 상관블록은 수식 (4)~(8)과 같이 Guard-Interval간격의 신호를 상관을 취한 후 관찰 심벌 주기 동안 평균을 취한다.

$$Y[T] = \frac{1}{s_{MaxDelay} \cdot N_G} \sum_{\tau=T}^{s_{MaxDelay}+T-1} \left[\sum_{m=\tau}^{\tau+N_G-1} r^*[m] \cdot r[m+N] \right] \quad (4)$$

$$P[n] = \left| \frac{1}{N_{search}} \cdot \sum_{l=1}^{N_{search}} Y[l \cdot N_s + n] \right|^2 \quad (5)$$

$$\Psi[T] = \frac{1}{2 \cdot s_{MaxDelay} \cdot N_G} \sum_{\tau=T}^{s_{MaxDelay}+T-1} \left[\sum_{m=\tau}^{\tau+N_G-1} \left\{ |r[m]|^2 + |r[m+N]|^2 \right\} \right] \quad (6)$$

$$C[n] = \left(\frac{1}{N_{search}} \cdot \sum_{l=1}^{N_{search}} \Psi[l \cdot N_s + n] \right) \quad (7)$$

$$D[n] = \frac{P[n]}{C[n]} > Threshold \quad (8)$$

위에서 $r[m] = r_{DRM+}[m]$ 인 경우에는 $r[m]$ 과 $r[m+N]$ 이 상관 값을 가지므로 식 (8)의 $D[n]$ 이 특정 임계값보다 클 확률이 높다.

반면, $r[m] = r_{FM}[m]$ 인 경우에도 FM 신호의 특성상 시간 영역에서 상관을 가지므로 식 (8)이 큰 값을 가질 가능성이 존재한다. $r[m] = r_{FM}[m]$ 인 경우의 특성을 분석하기 위하여 Flat-Fading 채널 환경과 N_s 샘플 동안 채널 변화가 없다고 가정하면, 식 (4)에서 수신된 FM 신호의 상관 식은 다음과 같이 전개된다.

$$r_{FM}^*[m] \cdot r_{FM}[m+N] = A_{FM} |h[m]|^2 \cdot e^{j(\phi_{FM}[m+N] - \phi_{FM}[m])} \quad (9)$$

$$= A_{FM} |h[m]|^2 \cdot e^{j2\pi \cdot k_{FM} \Pi[m, N]}$$

여기서 $\Pi[m, N]$ 은 $m+1$ 샘플부터 N 샘플의 메시지 합을 의미하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Pi[m, N] = \sum_{p=1}^N M[m+p] \quad (10)$$

따라서, 관찰하는 심벌 수 N_{search} 는 충분히 크다고 가정하면, FM 신호 수신시 Guard-Interval 상관을 통한 DRM Plus 신호 판별 값 및 정규 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P[n]_{r_{FM}} = \left| \frac{1}{N_{search}} \cdot \sum_{l=1}^{N_{search}} Y[l \cdot N_s + n] \right|^2 \quad (11)$$

$$= \left| \frac{A_{FM}}{N_G \cdot N_{search}} \cdot \sum_{l=1}^{N_{search}} \sum_{m=l}^{l+N_G-1} |h[m]|^2 \cdot e^{j2\pi \cdot k_{FM} \Pi[m, N]} \right|^2$$

$$= \frac{A_{FM}^2}{N_G^2} \cdot \left| E \left[\sum_{m=l}^{l+N_G-1} e^{j2\pi \cdot k_{FM} \Pi[m, N]} \right] \right|^2$$

$$C[n]_{r_{FM}} = \left(\frac{1}{N_{search}} \cdot \sum_{l=1}^{N_{search}} \Psi[l \cdot N_s + n] \right) \quad (12)$$

$$= E \left[\sqrt{A_{FM}} \cdot |h[m]| \cdot e^{j\phi_{FM}[m]} + \psi[m] \right]^2$$

$$= A_{FM} + \sigma_n^2$$

최종적으로 DRM Plus 신호 검출기의 최종 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D[n]_{r_{FM}} = \frac{A_{FM}^2}{N_G^2 \cdot (A_{FM} + \sigma_n^2)} \cdot \left| E \left[\sum_{m=l}^{l+N_G-1} e^{j2\pi \cdot k_{FM} \Pi[m, N]} \right] \right|^2 \quad (13)$$

식 (13)이 임계값보다 클 경우, OFDM 기반의 DRM Plus 신호로 판단하는 False Alarm이 발생한다. 또한, SNR이 증가함에 따라, 식 (13)은 커지므로 False Alarm 발생 확률이 증가한다.

3. 제안하는 DRM Plus 신호 검출 방법

본 절에서는 DRM Plus와 FM 서비스가 모두 존재하는 FM 대역에 적합한 DRM Plus 신호 검출 방법을 제안한다. 다음 그림은 제안하는 DRM Plus 신호 검출 방법의 블록도이다. 제안한 방법은 OFDM 신호의 Guard-Interval 상관방법으로 검출하는 블록과 FM 신호를 검출하는 Reference 블록으로 구성되어 있다.

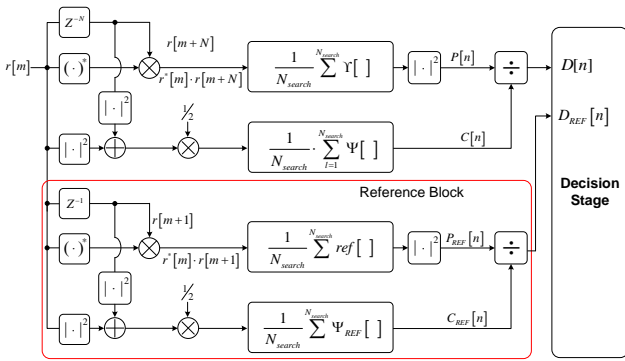


그림 3. 제안하는 DRM Plus 신호 검출기의 블록도

OFDM의 Guard-Interval 상관블록은 Guard-Interval간격의 신호를 상관을 취한후 관찰 심볼 주기 동안 평균을 취한다. 반면 Reference 블록은 다음과 같이 이전 샘플과 현재 샘플의 상관을 취한 후, 관찰 심볼 주기 동안 평균을 취한다.

$$P_{REF}[n] = \left(\frac{1}{N_{search}} \cdot \sum_{l=1}^{N_{search}} ref[l \cdot N_s + n] \right)^2 \quad (14)$$

$$ref[\tau] = \frac{1}{N_G} \sum_{m=\tau}^{\tau+N_G-1} r^*[m] \cdot r[m+1] \quad (15)$$

$$\Psi_{REF}[\tau] = \frac{1}{2 \cdot N_G} \sum_{m=\tau}^{\tau+N_G-1} \{r^2[m] + r^2[m+1]\} \quad (16)$$

$$C_{REF}[n] = \left(\frac{1}{N_{search}} \cdot \sum_{l=1}^{N_{search}} \Psi_{REF}[l \cdot N_s + n] \right) \quad (17)$$

최종적으로 각 블록의 출력은 다음과 같이 수신 신호의 전력 값으로 나누어주는 정규화 과정을 거친다.

$$D_{REF}[n] = \frac{P_{REF}[n]}{C_{REF}[n]} > Threshold \quad (18)$$

Central Limit Theorem에 의하면, FFT 크기가 클수록 시간 영역의 OFDM신호는 복소 가우시안 특성을 가진다[7][8][9]. 따라서, $r[m] = r_{DRM+}[m]$ 이라면 식 (14)의 $ref[\tau] \approx 0$ 이므로 $P_{REF}[n] \approx 0$ 이 되고, 결국 식 (18)의 $D_{REF}[n] \approx 0$ 이 된다. 그러나, $r[m] = r_{FM}[m]$ 인 경우에 OFDM 신호와 달리 시간 영역 수신 신호는 lag가 작을수록 큰 상관 값을 갖게 된다. 이를 분석하기 위해 식 (9) ~ 식 (12)에 $N=1$ 을 대입하여 정리하면 다음과 같은 검출 식을 얻을 수 있다

$$D_{REF}[n]_{FM} = \frac{A_{FM}^2}{N_G^2 \cdot (A_{FM} + \sigma_n^2)} \cdot \left| E \left[\sum_{k=0}^{N_G} e^{j2\pi k_{FM} M[m]} \right] \right|^2 \quad (19)$$

제안한 그림 3의 Decision Stage 블록은 Guard-Interval 상관을 통한 DRM Plus 신호 검출 블록과 FM 신호 검출을 위한 추가된 Reference 블록의 값을 입력 받기 때문에, DRM Plus 혹은 FM 신호판별을 위한 동작 순서가 필요하다. 다음 그림은 DRM Plus 판별을 위한 Decision Stage 동작 단계를 나타낸다.

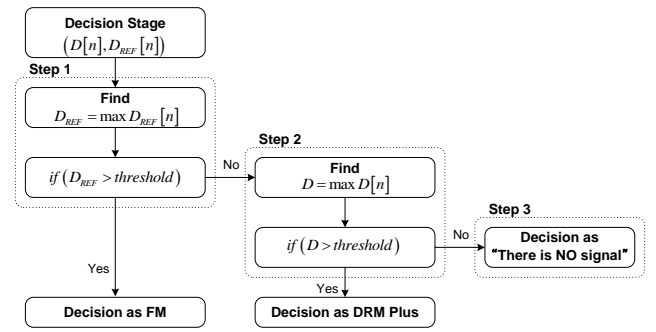


그림 4. DRM Plus 판별을 위한 Decision Stage 동작 단계

4. 컴퓨터 모의 실험

본 절에서는 FM 신호 수신 경우에 그림2의 Guard-Interval 상관을 통한 DRM Plus 신호 검출기와 그림 3의 제안된 DRM Plus 신호 검출기의 False-Alarm 성능에 대하여 컴퓨터 모의 실험을 통하여 성능을 비교한다.

모의실험을 위하여 다음 표와 같이 시스템 Parameter를 정의했다. 또한DRM Plus 검출의 성능을 평가하기 위하여 아래 표와 같이 DRM 컨소시엄에 제안된 Band I ~ Band II 대역 무선채널 모델을 이용하였다[1][6].

표 1. 모의실험을 위한 시스템 Parameter

System	Parameter	Value	
DRM Plus	FFT Size N	576	64*9 Prime Factor FFT
	$S_{MaxDelay}$	5	Include delay < 19.5us signal
Analog FM	Frequency Deviation	15kHz	
	Audio Source	1KHz Single Tone	$M[m]$
Common	Carrier Frequency	97.1 MHz	Band II(FM Band)
	Frequency Offset	Random CFO Range : $-\Delta f \sim \Delta f$	Subcarrier Spacing (Δf): 444.4Hz
	RX Signal Power	0 dB	$E[s[m]] = 1$
	Sampling Rate	256 kHz	$N \times \Delta f$

표 2. 채널 환경 Parameter

Channel	8:Urban		9: Rural		10: Terrain obstructed	
	60km/h		150km/h		60km/h	
Path no k	Delay (us)	Rel. Power (dB)	Delay (us)	Rel. Power (dB)	Delay (us)	Rel. Power (dB)
1	0	-2.0	0.0	-4.0	0.0	-8.0
2	0.2	0.0	0.3	-8.0	1.0	-2.0
3	0.5	-3.0	0.5	0.0	2.5	0.0
4	0.9	-4.0	0.9	-5.0	3.5	-1.0
5	1.2	-2.0	1.2	-16.0	5.0	-2.0
6	1.4	0.0	1.9	-18.0	8.0	-3.0
7	2.0	-3.0	2.1	-14.0	12.0	0.0
8	2.4	-5.0	2.5	-20.0	14.0	-6.0
9	3.0	-10.0	3.0	-25.0	16.0	-3.0

4.1 FM 신호 수신 경우

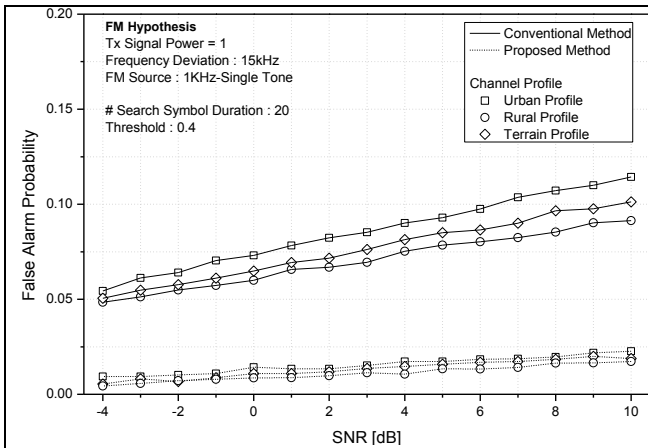


그림 5. $N_{search}=20$ 의 경우, 1KHz Single Tone FM 수신 시 False Alarm 발생 확률

그림 5는 임계값이 0.4일 때, $N_{search}=20$ 인 경우, 1kHz Single Tone의 FM신호 수신 시 채널 환경에 따른 False Alarm 확률을 도시한 그래프이다. 그림에서 Guard-Interval 상관 방법을 이용한 DRM Plus 신호 검색 방법과 제안한 방법 모두 FM 신호 수신 시 잡음영향이 줄어들어도, False Alarm 발생확률이 증가되는 것을 확인할 수 있다. 왜냐하면 식 (13) 및 식 (19)에서 잡음 전력이 줄어들수록, 임계값을 넘을 확률이 증가하기 때문이다. 그러나, 제안한 방법의 False Alarm 발생확률이 더 낮은 것을 확인할 수 있다. Urban 채널환경에서 SNR이 6dB인 경우, 기존의 Guard-Interval 상관방법을 이용하면 약 9.7%의 False Alarm 이 발생하지만, 제안하는 방법은 약 1.8%의 False Alarm이 발생한다. Urban 채널환경에서의 False Alarm 발생 확률이 다른 채널 환경보다 높은 것을 확인할 수 있다.

4.2 DRM Plus 신호 수신 경우

그림 6은 임계값이 0.4일 때, DRM Plus 신호를 수신하는 경우 채널 환경에 따른 Detection 확률을 도시한 그래프이다. 고려한 모든 채널에서 SNR 0.5dB에서 Detection 확률 95%를 만족하지만, 기존의 Guard-Interval 상관 방법이 제안한 방법보다 약 0.1~0.5dB 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다. 제안한 Reference 블록은 FM 신호를 검출하는 블록으로, DRM Plus 신호 수신 시 FM 신호로 판단하는 경우가 발생하기 때문이다. 또한 N_{search} 가 클수록 Detection 확률이 증가되는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 Terrain 채널 환경의 Detection 확률이 다른 채널 환경보다 높은 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 약한 DRM Plus신호에서도 판별 확률이 높고, 아날로그 FM 신호 및 잡음 신호 수신 시 False Alarm이 발생할 확률이 낮은 DRM Plus 신호 검색 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 기존의 Guard-Interval 상관기에 Reference 블록을 추가한 방법으로, FM 신호 수신시 False Alarm 발생 확률을 낮추는 특징이 있다. 또한, DRM Plus 신호를 수신하는 경우와 FM 신호를 수신하는 경우, Guard-Interval 상관 방법과 제안한 알고리즘의 수학적 분석을 하였으며, 컴퓨터 모의 실험을 통하여 성능을 도출하였다.

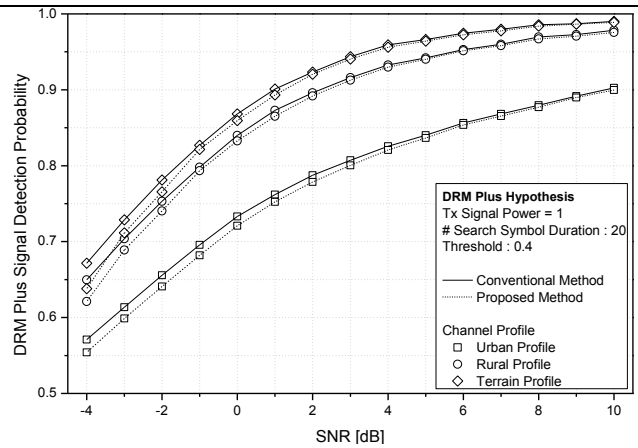


그림 6. $N_{search}=20$ 의 경우, DRM Plus 수신 시 Detection 확률

Reference

- [1] ETSI Standard. Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification. ETSI ES 201 980, V3.1.1, 2009-08.
- [2] R. Van Nee, and R. Prasad, "OFDM Wireless Multimedia Communications," Artech House, Boston, 2000.
- [3] T. M. Schmidl, and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 45, no. 13, pp. 1613-1621, Dec. 1997.
- [4] M. Sandell, J. J. van de Beek, and P. O. B'orjesson, "Timing and frequency synchronization in OFDM systems using the cyclic prefix," in *Proc. IEEE Int. Symp. Synchronization*, Essen, Germany, pp. 16-19, Dec. 1995.
- [5] L.P. Goh, Z. Lei, and F. Chin, "DVB detector for cognitive radio," in *Proc. IEEE ICC 2007*, pp. 6460-6465, Jun. 2007.
- [6] G. Zimmermann, "DRM+ Radio Channel Profiles for Use in Band II," DRM internal doc. no. TC_CM302, Nov. 2005
- [7] M. Fisz, "Probability Theory and Mathematical Statistics," Wiley, 1963
- [8] Yates, R. D. & D.J. Goodman, "Probability and Stochastic Process," Wiley, 1999
- [9] A. Bahai, M. Singh, A. J. Goldsmith, and B. R. Saltzberg, "A new approach for evaluating clipping distortion in multicarrier systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, vol. 20, no. 5, pp. 1037-1046, Jun. 2002.
- [10] C. S. Burms, "An In-Place, In-Order Prime Factor FFT Algorithm," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-29, pp. 806-817, Aug. 1981.
- [11] D. Kolba, T.Parks., "A Prime Factor FFT Algorithm Using High-speed convolution," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-25, pp. 281-294, Aug. 1977.

ACKNOWLEDGEMENTS

[본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [10039196, 전 세계 라디오 수신기술 및 스마트 기기 연동을 위한 스마트 플랫폼 개발]