

# Microwave 채널 환경에서 대역 제한 필터를 적용하는 OFDM/QPSK-DMR 시스템의 성능 분석

°안준배\*, 양희진\*\*, 오창현\*\*\*, 조성준\*\*\*\*

\* (주)솔리테크 R&D팀, \*\* 한국항공대학교 대학원 정보통신공학과

\*\*\* 한국기술교육대학교 정보기술 공학부, \*\*\*\* 한국항공대학교 전자·정보통신·컴퓨터 공학부

jbahn@st.co.kr, 74yhjin@mail.hankong.ac.kr

## Performance Analysis of OFDM/QPSK-DMR System Using Band-limited Pulse Shaping Filter over the Microwave Channel

°Jun-Bae Ahn\*, Hee-Jin Yang\*\*, Chang-Heon Oh\*\*\*, Sung-Joon Cho\*\*\*\*

\* R&D Team. SOLiD Technologies, Inc.,

\*\* Dept. of Inform. & Telecomm. Eng., Graduate School of Hankuk Aviation Univ.

\*\*\* School of Inform. Tech., Korea Univ. of Tech. and Edu.

\*\*\*\* School of Electronics, Telecomm. and Computer Eng. of Hankuk Aviation Univ.

E-mail : jbahn@st.co.kr, 74yhjin@mail.hankong.ac.kr

### Abstract

In this paper, we have proposed a OFDM/QPSK-DMR(Orthogonal Frequency Division Multiplexing/Quadrature Phase Shift Keying Modulation-Digital Microwave Radio)system using BL-PSF(Band-limited pulse shaping filter) over the Microwave channel. In the proposed DMR system, STS-1(51.84 Mbps) of SONET(Synchronous Optical Network) is first modulated by OFDM/QPSK symbol and used Band-limited pulse shaping filter. The advantage of the proposed DMR system is to simplify system complexity and increase IFFT/FFT block use-efficiency. The system performance of single carrier and OFDM systems is already proved that those of DMR systems have the same performance over AWGN(Additive White Gaussian Noise) channel environment. Therefore, the system is analyzed between proposed OFDM/QPSK-DMR and single carrier DMR systems and simulated by BER performance and Signature curve over Microwave channel environment. Simulation result is that the proposed system performances are approaching to the performance of single carrier DMR system as the number of Sub-carriers increasing.

Key words : DMR system, OFDM system, Band-limited Pulse Shaping Filter, Microwave channel

### I. 서론

급증하는 무선통신 서비스의 수요와 다양한 멀티

미디어 서비스의 이용이 늘어남에 따라 무선 통신 시스템은 대용량 고속 전송 서비스로 발전하게 되었다<sup>[1]</sup>. 이에 STS-1급의 전송속도를 기반으로 하는

무선전송 장비로 DMR시스템이 많이 사용되고 있으며 일반적으로 Single Carrier방식을 사용해 왔다<sup>[2]</sup>. 그러나 고속 데이터 전송 서비스에 대해 높은 신뢰성을 만족하기 위해서는 기존의 Single Carrier방식을 사용한 DMR시스템은 한계가 존재하기 때문에 이러한 문제점을 극복하기 위한 방안으로 MCM(Multi Carrier Modulation)방식의 일종인 OFDM시스템의 활용에 대한 연구가 발전하게 되었다<sup>[3]</sup>. 이런 OFDM방식의 특성을 이용한 DMR시스템은 ACI(Adjacent Channel Interference)의 영향을 줄이기 위해 여러 가지 Waveform Shaping기법을 이용한다. Waveform Shaping기법은 MCM방식의 대역효율을 증가시키기 위해 사용되며 크게 두 가지 방식으로 구분된다. 첫째, Band-limited Orthogonal 원리에 의한 Band-limited MCM방식이다<sup>[4]</sup>. 이 방식은 IFFT입력 단에서 Waveform Shaping을 수행하여 대역효율을 향상시킬 수 있지만 IFFT크기에 해당하는 Filter수가 요구되기 때문에 시스템의 구현이 복잡해지는 단점이 존재한다. 두 번째로는 Time-limited MCM방식으로 일반적인 OFDM방식에서 사용되는 Windowing기법이 여기에 속한다<sup>[5]</sup>. 이 방식은 GI(Guard Interval)와 Cyclic Extension을 사용하여 Time Variable한 채널 특성으로 인해 발생할 수 있는 간섭의 영향(ISI) 과 ICI(Inter Carrier Interference)를 줄일 수 있도록 하였지만 잉여 데이터의 사용으로 전송효율이 떨어지는 단점이 있다.

또한 IFFT입력 단에 GB(Guard Band)를 위한 영 삽입(Zero Insertion)으로 IFFT블록의 사용효율을 감소시킨다. 이와 같이 위 시스템들은 GI/GB등의 사용으로 인해 시스템의 전송효율이 떨어지는 단점이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 잉여 데이터의 사용으로 인한 전송효율 및 시스템효율을 저하시키는 문제점을 보완하기 위해 기존 Single Carrier DMR시스템에서 사용되고 있는 대역 제한 필터인 BL-PSF를 OFDM / QPSK-DMR시스템에 그대로 적용하여 시스템구현을 간단하게 하고 전송효율을 향상시킬 수 있도록 한다.

논문 구성은, 2장에서 제안하는 OFDM/QPSK-DMR 시스템의 송·수신단 구조와 BL-PSF특성을 설명한다. 그리고 3장에서는 Microwave 채널 환경에 대해 Single Carrier방식의 DMR시스템과 성능비교를 수행하였으며, 마지막 4장에서는 성능분석결과를 토대로 결론을 맺는다.

## II. 제안하는 OFDM/QPSK DMR 시스템 모델

그림 1은 BL-PSF를 사용한 OFDM/QPSK -DMR 시스템의 블록도를 나타낸다. IFFT변조 후에 각 샘플에 대해 대역 제한 필터의 특성을 적용해서 전송 대역을 제한하여 ACI를 방지한다.

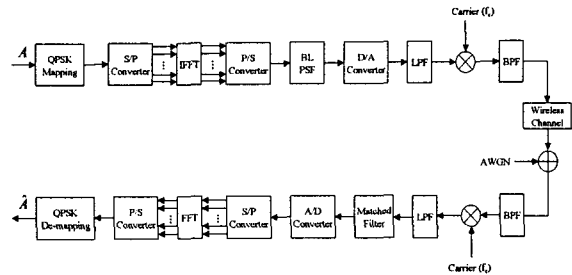


그림 1. 제안하는 OFDM/QPSK-DMR 시스템 모델 블록도

위 블록도에 따른 전송 신호의 수식적인 표현을 설명하면, 우선 DMR시스템으로 입력되는 2진 비트 열( $A = a[nT_s], b[nT_s] \in \{\pm 1\}$ )은 QPSK 매핑 과정을 통해  $a[nT_s]$  심볼로 변조된다.  $a[nT_s]$  심볼은 아래의 식 (1)과 같이 2차원 신호형태를 갖는 복소 신호이며  $T_s$  (25.92 Msps)의 심볼주기를 갖는다.

$$a[nT_s] = a[nT_s] + jb[nT_s] \quad (1)$$

위 심볼은 S/P 변환과정을 거쳐 IFFT연산을 취한다. 이때 IFFT입력으로 GB를 위한 영 삽입은 수행하지 않고 IFFT블록을 OFDM변조에 모두 사용하여 블록의 사용효율을 향상시켰다. 또한 전송효율을 향상시키기 위해 GT와 Cyclic Extension을 사용하지 않았다. 아래의 식 (2)는 IFFT의 출력신호  $x[kT_s]$ 를 정의한 것이다.

$$x[kT_s] = \sum_{n=0}^{N-1} a[nT_s] e^{-j2\pi f_n k T_s}, \quad k=0,1,\dots,N-1$$

$$f_n = n/NT_s = n/T_{sym}$$

$$T_{sym} = T_s \cdot FFTsize \quad (2)$$

여기서 N은 IFFT 크기이며 n, k는 각각 IFFT입·출력의 시간지수(Time Index)를 나타낸다. 그리고  $T_{sym}$  은 OFDM 심볼시간으로 S/P변환에 대한 단위 시간을 의미한다. OFDM변조된 신호는 P/S 변환과정을 거쳐 BL-PSF의 입력으로 들어가 필터의 Digital Impulse 응답인  $h[kT_s]$ 와 Convolution 연산

을 수행하게 된다<sup>[6]</sup>.

$$y[kT_s] = x[kT_s] \otimes h[kT_s]$$

$$= \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m(T_s/M)] h[k(T_s/M) - m(T_s/M)] \quad (3)$$

위 식 (3)에서 M은 과샘플(Over Sample)지수이다. 본 논문에서는 스펙트럼의 확산을 막아 전송대역을 제한하고 부호가 간섭(ISI)을 경감시키기 위한 BL-PSF로 Raised Cosine Filter를 사용한다.

Raised Cosine Filter는 Nyquist 제 1조건을 만족하는 필터 중 가장 대표적인 것으로 roll-off 스펙트럼 특성을 가지고 있다. 이러한 Filter의 주파수 응답 특성을 위해 M=2의 과샘플(Over Sample :  $T_s/2$ ) 값을 사용하였다. 아래의 식 (4)는 Raised Cosine Filter의 시간 응답 함수를 나타낸다<sup>[6]</sup>.

$$h(t) = \frac{\sin(\pi t/T_s)}{\pi t/T_s} \frac{\cos(\alpha \pi t/T_s)}{1 - 4(\alpha t/T_s)^2} \quad (4)$$

위 식에서  $\alpha$ 는 roll-off factor로 [0~1]사이의 값을 갖는다. 아래의 그림 2는 roll-off factor가 0.3인 경우에 Raised Cosine Filter의 시간 응답 특성과 주파수 응답특성을 나타내며 과샘플(Over Sample)지수 M=2인 경우에 대한 그래프이다.

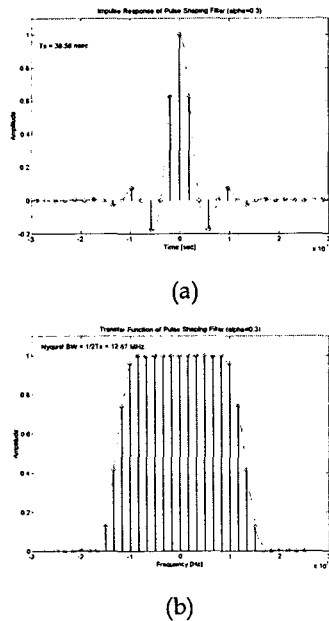


그림 2. Raised Cosine Filter의 응답특성(  $\alpha=0.3$  )  
(a) 시간 응답 특성, (b) 주파수 응답 특성

BL-PSF를 통과한 신호  $y[kT_s]$ 는 D/A과정과 LPF(Low Pass Filter)를 거쳐 반송파( $f_c$ )로 전송되며, 전송 신호  $s(t)$ 는 아래의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \text{Re}[y(t)e^{-j2\pi f_c t}] \quad (5)$$

그림 3은 8-Point IFFT출력신호에 대한 주파수 스펙트럼과 BL-PSF를 통과한 OFDM신호에 대한 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다.

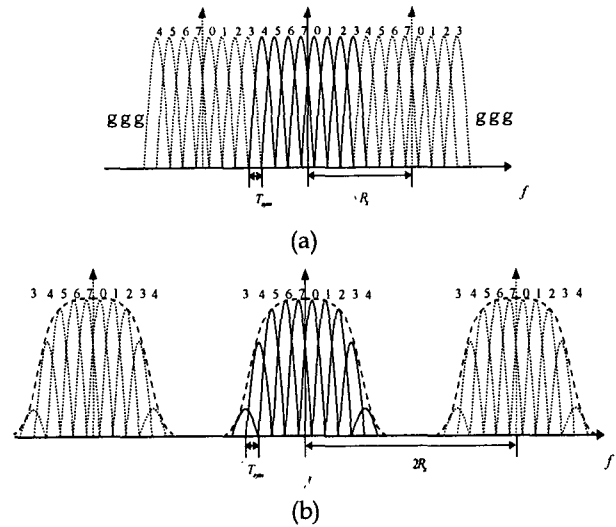


그림 3. 제안하는 OFDM/QPSK-DMR 시스템의 주파수 스펙트럼 (2 over sample)

- (a) IFFT 출력 신호의 주파수 스펙트럼
- (b) BL-PSF 출력 신호의 주파수 스펙트럼

위 스펙트럼을 살펴보면 대역 제한 필터 특성으로 인해 각 Sub-carrier의 진폭이 달라져 신호의 왜곡이 발생한 것처럼 보이지만 수신단에서 신호 복원 시 중첩되는 Sub-carrier 들로 인해 원 신호로 보상된다. 수신단을 간략히 설명하면, FFT이전에 Matched Filter와 A/D변환 과정을 통해 Waveform Shaping된 디지털 신호에서 송신 신호의 샘플을 (Sample Rate =  $T_s$ )과 동일하게 데이터를 추출해 내고 FFT과정과 QPSK복조 De-Mapping과정을 통해 원 신호를 복원해 낸다. 이를 수식적으로 정의하면 아래의 수식과 같다. 단, 수신신호는 채널에 대한 왜곡이 없고 잡음에 대한 영향은 무시한다. 수신 안테나로 들어오는 수신신호  $x(t)$ 는 BPF(Band Pass Filter)를 통해 잡음을 억제시키고 송신단과 동일한

주파수  $f_c$  로 동기 검파를 수행한 후 LPF로 Base-band신호  $y(t)$  를 추출해 낸다. 그리고  $y(t)$ 는 수신단의 Matched Filter  $h(-t)$ 와 Convolution 연산을 수행하며, A/D변환을 위해  $T_s$  구간동안 적분을 취한 후  $T_s$  간격으로 샘플을 취한다. 이에 대한 수식적 정의는 식 (6),(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{x}(t) = \int_0^{T_s} y(t) \otimes h(-t) dt \quad (6)$$

$$\hat{x}[kT_s] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[mT_s] R[(k-m)T_s] \quad (7)$$

여기서  $R[(k-m)T_s] = h[kT_s] \otimes h[-mT_s]$  를 나타내며, 아래와 같은 특징을 가지고 있다.

$$R[(k-m)T_s] = \begin{cases} 1, & k=m \\ 0, & k \neq m \end{cases} \quad (8)$$

본 논문에서는 Clock 동기과 Carrier 동기가 완벽하다고 가정한다. 따라서 Timing Error가 존재하지 않기 때문에 수신 신호는 식 (8)의 특성에 의해  $\hat{x}[kT_s]$ 을 정확하게 추출 할 수 있다. 그 다음 FFT 과정을 통해 아래의 식 (9)과 같이 OFDM의 직교 특성을 이용하여 원래의 전송 신호를 복원해 낸다.

$$\begin{aligned} \hat{d}[nT_s] &= x[kT_s] e^{2\pi j n T_s} \\ &= \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \hat{d}[kT_s] e^{-2\pi j n k T_s} \right\} e^{2\pi j n T_s} \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} \hat{d}[kT_s] \delta[(n-k)T_s] \\ &= \hat{d}[n], \quad (k=n) \end{aligned} \quad (9)$$

이와 같이 제안하는 DMR시스템 구조는 기존에 사용되었던 MCM방식의 DMR시스템 보다 구조적으로 훨씬 간단하며, OFDM변조를 위한 IFFT/FFT의 블록을 제외하고는 Single Carrier DMR시스템 구조와 유사한 특징을 가지고 있다. 그리고 기존 OFDM방식에 사용되었던 Windowing대신 BL-PSF를 사용하였기 때문에 ACI감소를 위한 영 삽입(Zero Insertion)이 필요하지 않다. 따라서 Sub-carrier의 증가에 따른 IFFT 블록 크기의 증가를 억제 할 수 있으며 IFFT 블록을 OFDM 변조의 신호처리에 100% 활용할 수 있어 시스템 사용 효율이 높아지는 장점이 있다.

### III. 실험 결과

본 논문에서는 Microwave 채널 환경으로 Two-ray 페이딩 채널 모델을 이용한다<sup>[7]</sup>. 제안하는 DMR시스템은 STS-1(51.84 Mbps)에 대해 OFDM/QPSK변조방식을 사용하므로 대략 30 MHz의 전송대역폭을 갖는다. 단, Delay path에 의한 Clock 동기과 Carrier 동기는 완벽하다고 가정한다. 그림 5는 Clock offset 과 Carrier offset 이 보상된 Single Carrier 방식의 DMR 시스템과 제안하는 OFDM/QPSK-DMR 시스템에 대한 성능 곡선으로 Notch 주파수(notch f)와 Fade Depth(b)를 가변시키면서 시뮬레이션을 수행 한 결과이다.

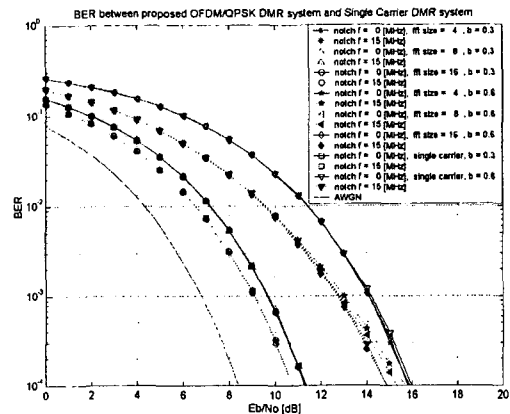


그림 5. 제안하는 DMR 시스템과 Single Carrier DMR 시스템의 BER 성능 곡선의 비교

위 시뮬레이션 결과를 살펴보면 Target BER이  $10^{-4}$  일 때 Fade Depth가 작을 경우( $b=0.3$ ), Notch 주파수의 위치가 바뀌거나 OFDM의 Sub-carrier의 크기가 달라지더라도 Single Carrier DMR시스템과 OFDM/QPSK-DMR시스템은 거의 동일한 성능을 나타낸다. 그렇지만 Fade Depth가 클 경우( $b=0.6$ )에는 OFDM/QPSK-DMR시스템에서 Notch 주파수의 위치가 전송대역의 끝(edge)에 존재 할 때 Target BER  $10^{-4}$  에서 Sub-carrier크기가 증가 할 수록 0.5 dB 씩 성능이 향상되며, Single Carrier방식의 DMR시스템의 성능에 근접해 간다. 그림 6은 Single Carrier방식과 제안하는 OFDM/QPSK-DMR시스템의 특성 그래프(Signature Curve)를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 과정은 Target BER을  $10^{-3}$  으로 설정하였으며 전송 대역폭으로 정규화 된 Notch 주파수와 Fade Depth(dB)에 의한 페이딩 영향만 나타내기 위해서 Eb/No는 50 dB

로 설정하여 잡음의 영향을 무시하였다. 아래의 Signature Curve를 살펴보면 제안하는 시스템의 Sub-carrier의 수가 많을수록 Single Carrier의 성능에 근접해 가는 것을 알 수 있다. 그리고 전송대역의 1/3 되는 곳(normalized notch  $f : 0.25$ )에서는 각 시스템의 성능 차이가 많이 줄어들며, 전송대역의 중심(center)과 끝 부분(edge)에서는 Single Carrier DMR 시스템과 제안하는 OFDM/QPSK-DMR 시스템의 성능의 차이가 뚜렷하게 구분된다.

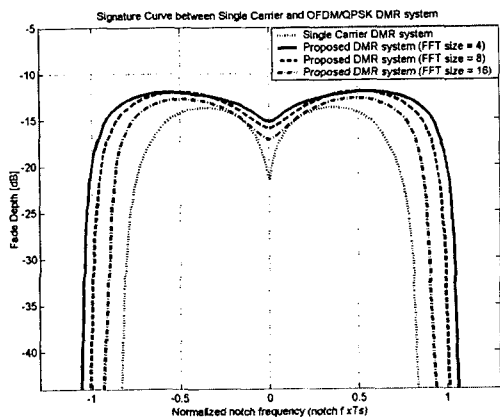


그림 6. Single Carrier 및 OFDM/QPSK-DMR 시스템의 특성 곡선

이와 같이 제안하는 DMR시스템은 Sub-carrier 수가 많아질수록 Single Carrier DMR시스템과 유사한 성능 특성을 나타낸다. 주파수 선택적 페이딩에 의해 특정 Sub-carrier에서만 성능이 악화되는 OFDM시스템의 특징을 활용하여 에러 정정 코드(Block coding)를 적용한다면 Single Carrier보다 더 우수한 성능을 가질 수 있을 것이다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 Microwave 채널 환경에 적합한 OFDM/QPSK DMR 시스템을 제안하고, Single Carrier방식의 DMR시스템과 성능을 비교 분석하였다. 일반적으로 AWGN 채널 환경에서는 Single Carrier 방식과 OFDM/QPSK방식이 동일한 성능특성을 갖지만 Microwave 페이딩 채널 환경에서는  $E_b/N_0$ 가 50 dB 이상 일 경우에는 제안하는 OFDM/QPSK-DMR시스템의 Sub-carrier의 수가 많을수록 Single Carrier 방식은 DMR 시스템 성능에 근접해지는 것을 알 수 있었

다. 그리고 Windowing을 사용하는 기존 MCM방식의 DMR시스템과 달리 GI/GB를 사용하지 않기 때문에 IFFT/FFT 블록의 이용 효율을 증가시키고 시스템의 복잡도를 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 Single Carrier방식에서 OFDM/QPSK방식으로 시스템을 확장할 경우, Single Carrier에서 사용되었던 여러 가지 통신 알고리즘들을 그대로 적용할 수 있어 시스템 확장성이 좋은 장점이 있다. 그리고 전송 대역 내에 Notch 페이딩의 특성이 존재 할 경우 OFDM시스템 특성 상 일정한 Sub-carrier에서만 페이딩영향으로 데이터가 주기적으로 손상되므로 블록 코딩과 인터리빙 등의 채널 코딩을 각 Sub-carrier마다 수행하면 이러한 주기적인 데이터의 손실을 줄일 수 있어 Single Carrier의 DMR시스템 보다 더욱 성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] L.M. Correia, R. Prasad, "An overview of wireless broadband communications", *IEEE Comm. Mag.*, vol. 35, no. 1, pp. 56~61, Jan. 1997.
- [2] T.P. Cameron, J.C.B. Saw and M.S. Suthers, "Applications of saw technology in a SONET-compatible high capacity digital microwave radio", *Proc. IEEE*, vol. 1, pp. 237~240, Oct. 1992.
- [3] R. Li, G. Stette, "Waveform shaped MCM for digital microwave radio", *IEEE Conf.*, vol. 3, pp. 1695~1699, Jun. 1995.
- [4] B. Hirosaki, "An orthogonally multiplexed QAM system using the discrete fourier transform", *IEEE Trans. Comm.*, vol. 29, pp. 982~989, Jul. 1981.
- [5] R. Li, G. Stette, "Time-limited orthogonal multicarrier modulation schemes", *IEEE Trans. Comm.*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 1269~1272, Feb./Mar./Apr. 1995.
- [6] Proakis, *Digital Communications*, Mc Graw Hill, pp. 556~561, 2001.
- [7] W. D. Rumlmer, R. P. Coutts and M. Liniger, "Multipath fading channel models for microwave digital radio", *IEEE Comm. Mag.*, vol. 24, no. 11, pp. 30~42, Nov. 1986.