



SOQPSK-TG 신호의 이중 듀오바이너리 MSK 모델링

김균회¹, 은창수²

Double Duobinary MSK Modeling of the SOQPSK-TG Signal

KyunHoi Kim¹ and Changsoo Eun²Agency for Defense Development¹, Chungnam National University²

ABSTRACT

The SOQPSK-TG is a modulated signal for aeronautical telemetry with a very good bandwidth efficiency. In this paper, the frequency waveform filter of the SOQPSK-TG is linearly approximated and modeled with a duobinary precoder and a modified frequency waveform filter having a phase transition period of about $1T_b$. In combination with the existing precoder, the SOQPSK-TG is modeled by a double duobinary MSK. Comparing the SOQPSK-TG signal and the newly modeled double duobinary MSK signal in time domain and frequency domain, it is confirmed that the two signals are almost identical and there is virtually no performance difference. Moreover, we can attain 0.1 dB BER performance improvement compared to the existing cosine filter when the filter of the IQ-detector is implemented with a cosine sum filter taking into account the change in the modulation index by the new double duobinary precoder.

초 록

SOQPSK-TG는 대역폭 효율이 매우 우수한 항공기 텔레메트리용 변조신호이다. 본 논문에서는 SOQPSK-TG 변조방식의 주파수 파형 필터를 선형 근사하여 듀오바이너리 프리코더와 약 $1T_b$ 구간의 위상천이 구간을 갖는 수정 주파수 파형 필터로 모델링하였다. 그리고 기존의 프리코더와 결합하여 이중 듀오바이너리 MSK로 SOQPSK-TG를 모델링하였다. SOQPSK-TG 신호와 새롭게 모델링한 이중 듀오바이너리 MSK 신호를 시간 영역, 주파수 영역에서 비교하여, 두 신호가 거의 일치하고 실질적인 성능 차이가 없음을 확인하였다. 또한 새로 모델링한 이중 듀오바이너리 프리코더에 의한 변조지수 변화를 고려하여 IQ-검출기의 검출 필터를 코사인 합 필터로 구현하였을 때 기존 코사인 필터 대비 약 0.1 dB 수신성능이 개선됨을 확인하였다.

Key Words : Telemetry(텔레메트리), CPM(연속위상변조), MSK(최소주파수편이변조), Duobinary Encoder(듀오바이너리 부호), SOQPSK-TG, Tamed-FM

1. 서 론

항공기 텔레메트리 통신시스템은 항공기의 계측데이터를 지상으로 무선 전송하는 하향링크 통신시스

템이다. 텔레메트리 송신기는 항공기의 협소한 공간에 탑재되어 지상의 수신소와 장거리 통신을 해야 하므로 전력 효율이 우수한 비선형 증폭기를 사용한 다. 정포락선 특성을 갖는 연속위상변조 신호는 비

† Received : August 4, 2021 Revised : - Accepted : September 27, 2021

¹ Graduate Student, ² Professor

¹ Corresponding author, E-mail : kyunee93@naver.com, ORCID 0000-0003-2639-4127

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

선형 증폭기에 의한 신호 왜곡을 방지할 수 있기 때문에 텔레메트리 표준 통신방식으로 채택하고 있다. IRIG-106에서는 주파수 효율에 따라서 CP-FSK, SOQPSK, Multi-h CPM과 같은 연속위상변조 방식을 제안하고 있다[1]. 연속위상변조 신호는 증폭 효율이 우수한 반면에 주파수 효율이 위상변조 방식보다 낮은 단점이 있다. 현재 무선통신의 발전으로 인해 주파수 자원의 수요는 갈수록 증가하고 있으므로 변조 신호의 주파수 효율을 높이는 것이 매우 중요하다. 변조 신호의 주파수 효율을 증가시키기 위해 전송 데이터들이 상관 관계를 갖도록 부호화하거나 변조 위상의 파형이 완만하게 변화하도록 성형한다. 상관 프리코딩은 듀오바이너리 부호를 포함하는 2-탭 이하 지연 신호들의 가중치 합으로 구성된 디지털 필터로 구현되며, 나이키스트 저역필터로 파형을 성형하기도 한다[5]. 대표적으로 듀오바이너리 MSK, Tamed FM(Frequency Modulation), Generalized TFM (GTFM) 등의 변조 방식이 있다. GMSK는 가우시안 필터로 변조신호의 위상천이 파형을 필터링하여 변조 스펙트럼의 대역폭을 제한한다.

한편 주파수 효율이 우수한 텔레메트리 표준 변조 방식인 SOQPSK-TG는 상관 프리코더, 주파수 파형 필터 및 주파수 변조를 사용하여 신호를 발생시키는 부분응답 연속위상변조 신호이다[2]. SOQPSK-TG는 정포락선 변조 신호를 발생시키는 비선형 연속위상 변조 신호이지만, 프리코더를 사용하여 선형변조 방식인 OQPSK 수신기로 신호를 검출할 수 있는 장점이 있다[3]. 그러나 SOQPSK-TG 송신기의 복잡한 프리코더와 심볼 간섭을 발생시키는 주파수 파형 필터가 주파수 효율에 미치는 영향을 쉽게 파악하기 어려운 구조를 갖고 있다. 최근의 연구에서 프리코더를 듀오바이너리 부호로 표현하여 SOQPSK-TG가 듀오바이너리 MSK의 한 종류라는 것이 확인되었다[4]. 그러나 SOQPSK-TG의 8상태 위상천이 특징을 설명하는데 듀오바이너리 프리코더만으로는 부족하다. 본 논문에서는 SOQPSK-TG의 주파수 파형 필터를 $2T_b$ 구간에서 선형 근사하여 주파수 파형 필터가 듀오바이너리 프리코더 역할을 수행함을 보였다. 그리고 2개의 듀오바이너리 프리코더를 결합하여 TFM 프리코더를 도출함으로써 SOQPSK-TG의 변조 위상이 8상태의 TFM 신호특성을 갖는다는 것을 보였다. 또한 새로운 주파수 파형 필터를 설계하여 이중 듀오바이너리 MSK로 SOQPSK-TG를 모델링하고 두 신호를 시간 영역, 주파수 영역에서 비교하고 최적 수신 성능을 예측하여 잘 일치함을 확인하였다. 본 논문에서 모델링한 이중 듀오바이너리 MSK의 프리코더로부터 SOQPSK-TG의 변조지수가 2가지 값을 갖는다는 특징을 도출하고 IQ-검출기의 검출 필터에 적용하여 수신 성능이 개선됨을 확인하였다.

II. 본 론

2.1 SOQPSK 신호 모델

연속위상변조 신호를 복소 기저대역 신호로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$s(t; \alpha) = \sqrt{\frac{E_b}{T_b}} \exp\{j\phi(t; \alpha)\} \quad (1)$$

여기서 E_b 는 비트당 에너지, T_b 는 비트당 전송 시간이다. 연속위상변조 신호의 위상 $\phi(t; \alpha)$ 은 식 (2)와 같이 전송 데이터 a_n , 위상 파형 $q(t)$, 변조지수 h 로 표현되고, 변조 신호의 위상 오프셋은 0으로 가정한다.

$$\phi(t; \alpha) = 2\pi h \sum_n \alpha_n q(t - nT_b) \quad (2)$$

여기서 위상 파형 $q(t)$ 는 주파수 파형 $g(t)$ 와 식 (3)의 관계를 갖으며, $\int_{-\infty}^{\infty} g(t) dt = 1/2$ 이다.

$$q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau \quad (3)$$

식 (2)에서 $h = 0.5$, $\alpha_n = 2d_n - 1$, $d_n \in \{0, 1\}$, $\alpha_n \in \{\pm 1\}$, $q(t) = \frac{t}{2T_b}$ 일 때 MSK 신호이고, $h = 0.5$, $\alpha_n = \alpha_{S_n} \in \{0, \pm 1\}$, $q(t) = \delta(t)$ 일 때, OQPSK 신호이다. 여기서 프리코더 출력 α_{S_n} 은 식 (4)와 같다[3].

$$\alpha_{S_n} = (-1)^{n+1} \frac{a_{n-1}(a_n - a_{n-2})}{2} \quad (4)$$

이와 같이 $h = 0.5$ 인 연속위상변조 신호의 위상 파형 조절하거나 입력 데이터를 프리코딩하여 변조 신호의 파형을 조절할 수 있다.

SOQPSK는 주파수 효율이 우수하고 정포락선 특성을 갖는 연속위상 OQPSK 신호로서 Fig. 1과 같이 프리코더 α_{S_n} , 주파수 파형 필터 $g(t)$, 변조지수 $h = 0.5$ 의 주파수 변조기로 구성된다[1]. SOQPSK는 $g(t)$ 에 따라 2가지 종류가 있는데, SOQPSK-MIL은 주파수 파형 $g_{MIL}(t)$ 가 식 (5)인 완전응답 신호이다.

$$g_{MIL}(t) = \frac{1}{2T_b} \text{ for } 0 \leq t \leq T_b \quad (5)$$

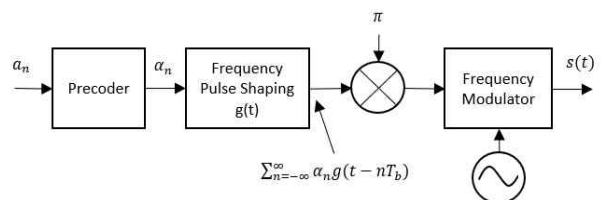


Fig. 1. SOQPSK transmitter

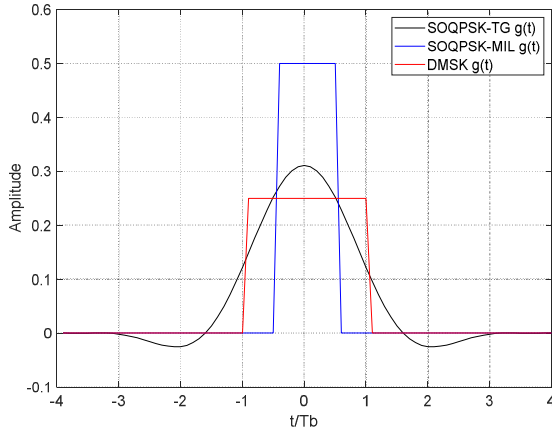


Fig. 2. Frequency pulse comparison by modulations method

반면에 SOQPSK-TG는 주파수 파형 $g_{TG}(t)$ 가 식 (6)과 같이 $8T_b$ 구간 동안 수정 올림코사인 필터의 임펄스 응답을 갖는 부분응답 신호이다.

$$g_{TG}(t) = n(t)w(t) \quad (6)$$

여기서, $n(t) = \frac{A \cos(\pi \rho B t / T_s)}{1 - 4(\rho B t / T_s)} \frac{\sin(\pi B t / T_s)}{\pi B t / T_s}$ 는 진폭 A , 롤오프율 $\rho = 0.7$, 시간조정율 $B = 1.25$ 인 수정 올림코사인필터, $w(t) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \left(\left| \frac{t}{T_s} \right| - T_1 \right) / T_2 \right) \right]$ 는 심볼주기 $T_s = 2T_b$, $T_1 = 1.5$, $T_2 = 0.5$ 이고 $g_{TG}(t)$ 의 시간 구간을 결정하는 시간영역 윈도우 함수이다 [1]. SOQPSK의 주파수 파형은 Fig. 2와 같다.

2.2 SOQPSK의 듀오바이너리 MSK 모델링

2.2.1 SOQPSK-MIL 신호

MSK 신호의 입력 신호 a_n 을 식 (7)과 같이 $\alpha_{M,n}$ 으로 차동복호 프리코딩하여 변조한 프리코딩 MSK 신호는 $\cos\left(\frac{\pi}{2T_b}(t+T_b)\right)$ 로 펄스 성형한 하프사인과형 OQPSK 신호와 일치하여, OQPSK IQ 검출기로 데이터를 검출할 수 있다[3].

$$\alpha_{M,n} = (-1)^{n+1} a_n a_{n-1} \quad (7)$$

SOQPSK의 프리코더 $\alpha_{S,n}$ 은 MSK 신호를 OQPSK 신호로 변환시키는 프리코더 $\alpha_{M,n}$ 과 식 (8)의 듀오바이너리 부호 $\alpha_{D,n}$ 의 결합으로 표현된다[4,10].

$$\alpha_{D,n} = \frac{1}{2}(a_n + a_{n-1}) \quad (8)$$

SOQPSK의 프리코더를 식 (7)과 식 (8)로 정리하면 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_{S,n} &= (-1)^{n+1} \frac{a_{n-1}(a_n - a_{n-2})}{2} \\ &= \frac{1}{2}(\alpha_{M,n} + \alpha_{M,n-1}) = \alpha_{DMSK,n} \end{aligned} \quad (9)$$

그러므로 SOQPSK-MIL의 프리코더 출력 $\alpha_{S,n}$ 은 듀오바이너리 MSK(DMSK) 신호의 프리코더 $\alpha_{DMSK,n}$ 과 일치하여, 식 (10)과 같이 두 가지 변조방식이 동일함을 확인할 수 있다.

$$\phi_{MIL}(t; \alpha) = \pi \alpha_{DMSK,n} q_{MIL}(t - nT) \quad (10)$$

2.2.2 SOQPSK-TG 신호

Figure 3은 SOQPSK-TG 신호의 주파수 파형 $g_{TG}(t)$, 위상 파형 $q_{TG}(t)$ 이다. $q_{TG}(t)$ 를 $2T_b$ 구간의 부분응답 $q_{Rec}(t)$ 로 선형 근사할 때, 누적 위상은 식 (11)과 같이 듀오바이너리 부호 과정이 된다.

$$\begin{aligned} \phi_{g_{REC}}(t; \alpha) &= \frac{\pi}{4T_b} \sum_{i=n-1}^n \alpha_i (t - iT_b) \\ &= \frac{\pi t}{2T_b} \frac{1}{2}(\alpha_n + \alpha_{n-1}) + \phi_k \end{aligned} \quad (11)$$

식 (9)의 듀오바이너리 프리코더와 식 (11)의 듀오바이너리 프리코더를 결합하면 SOQPSK-TG 신호는 식 (12)와 같이 MSK 프리코더와 이중 듀오바이너리 프리코더를 갖는 완전응답 연속위상변조 신호로 근사된다. 식 (12)의 근사 프리코더 $\alpha_{DD,n} \in \{0, \pm 0.5, \pm 1\}$ 은 상관 MSK의 일종인 TFM의 프리코더와 일치한다. 따라서 SOQPSK-TG 신호는 TFM 신호의 특성을 나타내며, 특히 8PSK와 유사한 성상도를 갖는다[5].

$$\begin{aligned} \alpha_{DD,n} &= \frac{1}{2}(\alpha_{DMSK,n} + \alpha_{DMSK,n-1}) \\ &= \frac{1}{4}\alpha_{M,n} + \frac{1}{2}\alpha_{M,n-1} + \frac{1}{4}\alpha_{M,n-2} \end{aligned} \quad (12)$$

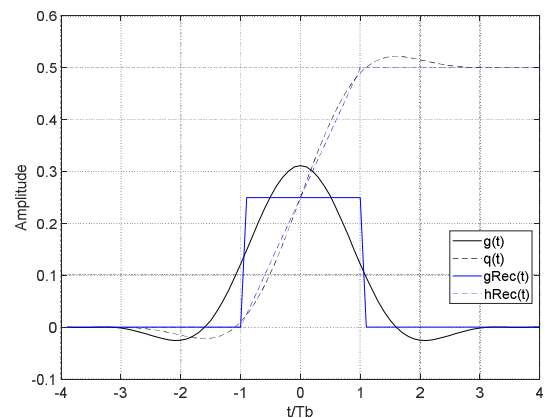


Fig. 3. Approximation of frequency pulse and phase pulse in the SOQPSK-TG

결국 SOQPSK-TG는 식 (13)과 같이 이중 듀오바이너리 MSK(DDMSK)로 근사된다.

$$\phi_{TG}(t;\alpha) = \pi \alpha_{DD,n} q_{MIL}(t-nT) \quad (13)$$

2.3 DDMSK의 주파수 파형 필터 모델링

식 (13)의 근사 SOQPSK-TG는 SOQPSK-MIL에 비해 주파수 효율이 우수하지만 여전히 부엽 특성이 SOQPSK-TG에 미치지 못한다[10]. 따라서 본 논문에서는 Fig. 4의 주파수 파형 필터 $h(t)$ 를 설계하여 이중 듀오바이너리 프리코더를 갖는 파형성형 MSK(DDMSK-TG)로 SOQPSK-TG를 모델링한다.

SOQPSK-TG의 주파수 파형 $g_{TG}(t)$ 를 $g_{Rec}(t)$ 로 근사하면 듀오바이너리 프리코더가 되므로, 식 (14)와 같이 듀오바이너리 신호와 미지의 주파수 파형 $h(t)$ 의 컨벌루션으로 $g_{TG}(t)$ 를 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} g_{TG}(t) &= \frac{1}{2}(\delta(t) + \delta(t-T)) * h(t) \\ &= \frac{1}{2}(h(t) + h(t-T)) \end{aligned} \quad (14)$$

본 논문에서는 $h(t)$ 가 $g_{TG}(t)$ 와 같은 파형 특성을 갖는다고 가정하고, 식 (6)의 계수를 조정하여 $g_{mTG}(t) = \frac{1}{2}(h_{TG}(t) + h_{TG}(t-T))$ 를 계산한 후 적분제곱오차 $e = \int |g_{TG}(t) - g_{mTG}(t)|^2 dt < 1$ 가 최소화되도록 $h_{TG}(t)$ 를 결정하였다. 위와 같은 과정을 거쳐 도출한 $h_{TG}(t)$ 의 설정값은 $\rho = 0.4$, $B = 0.85$, $T_1 = 1.25$, $T_2 = 0.75$ 이고, 이때 $g_{TG}(t)$ 와의 적분제곱오차 $e \approx 1.4 \times 10^{-4}$ 이다. $h_{TG}(t)$ 로부터 합성한 주파수 파형 $g_{mTG}(t)$ 와 $g_{TG}(t)$ 를 비교하면 주엽은 거의 일치하지만, 부엽의 파형에서 오차가 발생한다. $g_{mTG}(t)$ 의 부엽 특성을 개선하기 위해 시행착오법으로 $h_{TG}(t)$ 의 부엽 파형을 미세조정 하면서 주파수 파형의 적분제곱오차가 개선되도록 주파수 파형을 찾고, 사인합 커브피팅하여 근사식 $h_{fit}(t)$ 를 도출하였다. 적분제곱오차 $e \approx 5 \times 10^{-5}$ 인 개선된 파형 $g_{fit}(t)$ 를 갖는 $h_{fit}(t)$ 는 Fig. 5 및 식 (15)와 같다.

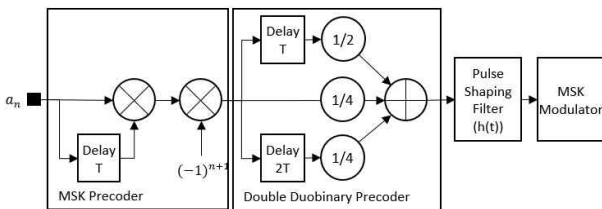


Fig. 4. Double duobinary MSK modeling of the SOQPSK-TG

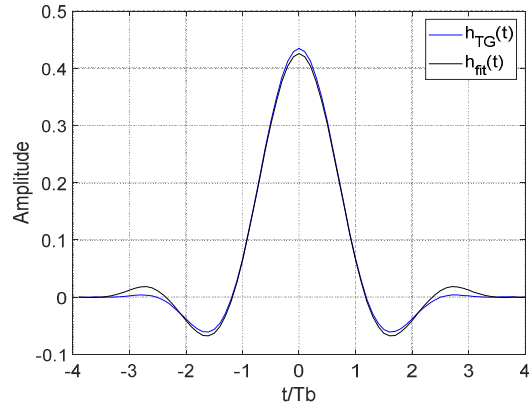


Fig. 5. Modified frequency pulse filter

$$h_{fit}(t) = \begin{cases} \sum_{n=1}^5 a_n \sin(b_n \cdot t + c_n), & -4T_b < t < 4T_b \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (15)$$

여기서 $a_1 = 0.08959$, $b_1 = 0.03215$, $c_1 = -0.03639$
 $a_2 = 0.078$, $b_2 = 0.1257$, $c_2 = 1.567$
 $a_3 = 0.04989$, $b_3 = 0.06917$, $c_3 = -1.889$
 $a_4 = 0.03109$, $b_4 = 0.198$, $c_4 = -2.044$
 $a_5 = 0.002454$, $b_5 = 0.2748$, $c_5 = 0.4009$

Figure 6은 주파수 파형 $g_{TG}(t)$ 의 SOQPSK-TG 파형과 주파수 파형 $h_{fit}(t)$ 의 이중 듀오바이너리 MSK 파형을 비교한 그림으로서 두 신호가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 한편 식 (12)의 이중 듀오바이너리 프리코더 $\alpha_{DD,n}$ 과 $h_{fit}(t)$ 을 결합하여 새로운 주파수 파형 필터 $g_{DD}(t)$ 를 구하면 식 (16)과 같다.

$$g_{DD}(t) = \frac{1}{4} \{ \delta(t) + 2\delta(t-T) + \delta(t-2T) \} * h_{fit}(t) \quad (16)$$

$$\phi_{TG}(t;\alpha) = \pi \sum \alpha_{M,n} q_{DD}(t-nT) \quad (17)$$

결국, SOQPSK-TG 신호는 식 (17)과 같이 주파수 파형 $g_{DD}(t)$ 를 갖는 MSK-TG로 간단하게 모델링된다. Fig. 7은 본 논문에서 제시한 이중 듀오바이너리

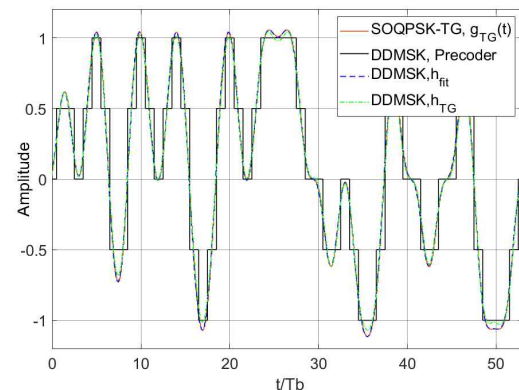


Fig. 6. Comparison of frequency pulse filter outputs

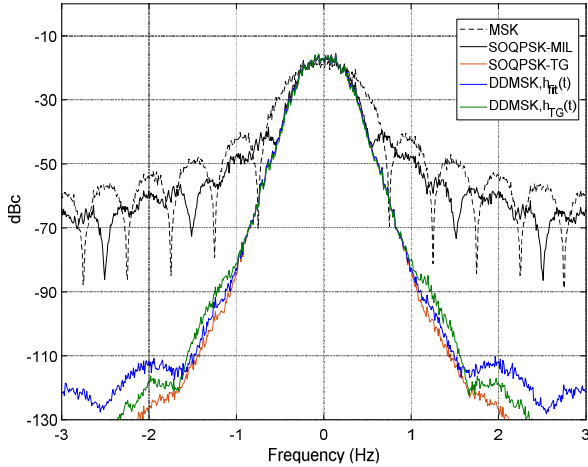


Fig. 7. Spectrum comparison

MSK-TG와 SOQPSK-TG 신호의 스펙트럼을 비교한 그림이다. -110 dBc까지 주파수 대역폭 특성이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

2.4 DDMSK-TG의 최적 수신성능 비교

이중 듀오바이너리 MSK-TG 신호로 근사된 SOQPSK-TG 신호의 수신성능은 전송신호의 최소 유클리디안 거리로부터 계산할 수 있다[7,9].

$$d_{\min}^2 = \min_{\substack{\alpha, \beta \\ \alpha_0 \neq \beta_0}} \left\{ \frac{1}{2E_b} \int_0^{NT} [s_{rx}(t, \alpha) - s_{tx}(t, \beta)]^2 dt \right\} \quad (18)$$

식 (18)로부터 SOQPSK-TG 최적검출기의 최소 유클리디안 거리를 계산할 때 데이터 1비트 오류가 SOQPSK 프리코더에 의해 3비트 동안 영향을 미치게 되어 $N=3$ 이 된다. 송수신 데이터열에서 1비트의 오류가 발생했을 때 나타나는 오류패턴은 참고문헌[7]에 의해 [1 0 1], [1 2 1] 두 가지 패턴을 가지므로 각각의 오류 데이터과 본 논문에서 제시한 $g_{mTG}(t)$, $g_{fit}(t)$ 파형으로 두 신호간의 최소 유클리디안 거리를 구하면 Table 1과 같다. 이 값으로부터 최적수신기의 비트오율의 하한을 구하면 식 (19)와 같다. Fig. 8에서 보면 SOQPSK-TG와 $g_{fit}(t)$ 의 이중 듀오바이너리 MSK-TG 신호의 성능이 일치한다.

$$P_e \geq \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{d_{101} \frac{E_b}{N_0}}\right) + \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{d_{121} \frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (19)$$

Table 1. Minimum distance

	d_{101}	d_{121}
$g_{TG}(t)$	1.6	2.58
$g_{mTG}(t)$	1.563	2.615
$g_{fit}(t)$	1.596	2.580

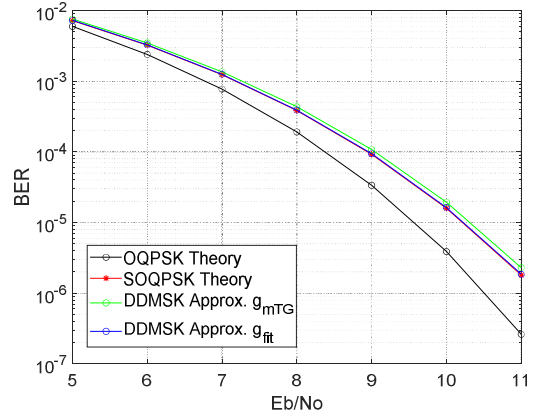


Fig. 8. Theoretical BER performance

이와 같이 본 논문에서 모델링한 주파수 파형 $h_{fit}(t)$ 를 갖는 이중 듀오바이너리 MSK-TG 신호와 SOQPSK-TG 신호의 시간영역 신호 파형, 주파수영역 스펙트럼 대역폭 및 최적 이론성능을 비교하였고, 두 신호가 잘 일치함을 확인하였다.

2.5 SOQPSK-TG IQ-검출기의 필터 설계

OQPSK 신호의 최적검출기는 적분-덤프 필터(I&D) 검출기이다. 하지만 OQPSK 신호로 표현된 MSK 신호는 식 (20) $p(t-T_b)$ 의 하프사인 파형으로 파형 성형한 신호가 되어 IQ-검출기의 검출 필터로 코사인 필터를 적용하는 것이 유리하다. 한편 SOQPSK-MIL 신호는 변조지수 $h_p \in \{0, 0.5\}$ 이므로 Fig. 9(a)와 같이 지연된 하프사인 파형으로 표현된다. 반면에 SOQPSK-TG 신호를 근사한 이중 듀오바이너리 MSK 신호는 프리코더 출력 $\alpha_{DD,n}$ 에 의해 nT_b 마다 변조지수 $h_{p,n} \in \{0, 0.25, 0.5\}$ 가 선택적으로 변하므로 식 (20)의 코사인 파형을 결합하면 Fig. 9(b)와 같이 표현된다.

$$p(t, h_{p,n}) = \cos\left(\frac{\pi h_{p,n} t}{T_b}\right) \quad (20)$$

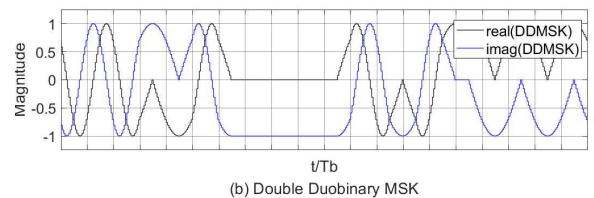
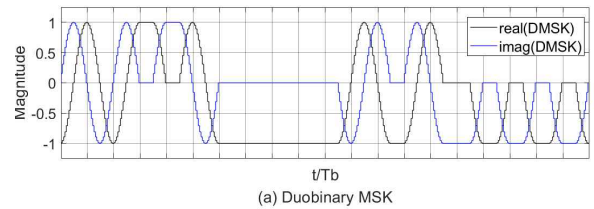


Fig. 9. Correlative MSK signal waveform

이와 같이 SOQPSK-TG 신호가 2개의 변조지수로 근사 모델링되므로 $2T_b$ 의 길이를 갖는 SOQPSK-TG 검출 필터의 파형을 식 (21)과 같이 각각 $h_p = 0.25$, $h_p = 0.5$ 의 코사인 파형을 평균하여 계산하였다.

$$p_{rx}(t) = \frac{1}{2} \left\{ \cos\left(\frac{\pi}{2T_b}t\right) + \cos\left(\frac{\pi}{4T_b}t\right) \right\}, |t| < T_b \quad (21)$$

Figure 10은 본 논문에서 제안한 코사인 합 필터의 파형이다. Fig. 11은 AWGN 채널에서 동기식 OQPSK IQ-검출기를 사용하여 SOQPSK-TG 신호를 수신할 때 수신기의 검출 필터별 비트 오류율 Matlab으로 모의 실험한 결과이다. 가장 일반적으로 사용하는 적분-덤프 필터의 성능에 비해, 코사인 필터를 사용했을 때 수신 성능이 개선됨을 확인할 수 있다. 비트 오류 10^{-4} 구간에서 적분-덤프 필터와 비교하면, 코사인 필터가 0.5 dB, 코사인 합 필터가 0.6 dB 성능이 개선되어 본 논문에서 제시한 코사인 합 필터의 수신 성능이 약 0.1 dB 우수하다.

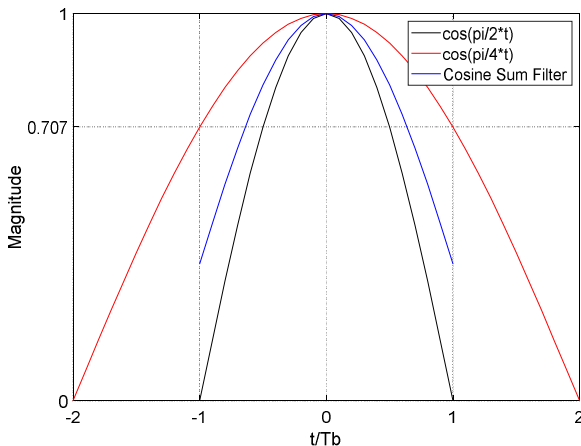


Fig. 10. Cosine sum filter

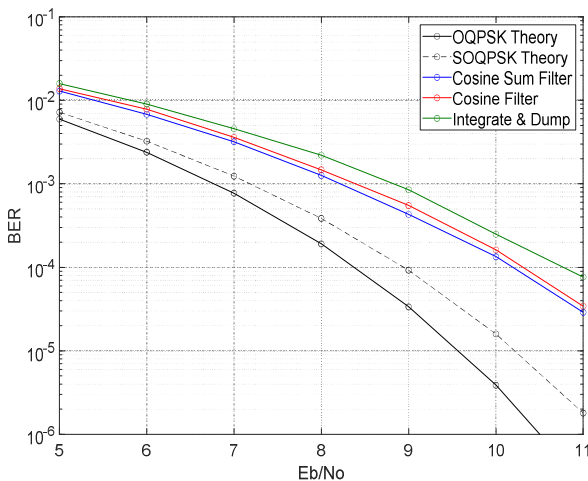


Fig. 11. BER performance

III. 결 론

SOQPSK-TG는 듀오바이너리 프리코더와 주파수 파형 필터를 동시에 사용하여 변조 신호의 대역폭을 효과적으로 제한한다. 본 논문에서는 약 $2T_b$ 의 위상천이구간을 갖는 SOQPSK-TG의 주파수 파형 필터를 선형 근사하여 듀오바이너리 프리코더와 약 $1T_b$ 의 위상천이 구간을 갖는 수정 주파수 파형 필터로 모델링하였다. 그리고 기존 프리코더의 듀오바이너리 프리코더와 결합하여 SOQPSK-TG를 이중 듀오바이너리 MSK-TG로 모델링 하였다. 새로운 이중 듀오바이너리 MSK-TG를 상관 MSK의 일종인 TFM과 비교하였을 때, 두 신호의 프리코더가 일치하고 단지 주파수 파형 필터가 나이키스트 필터 조건을 만족하지 못하였다. 이와 같은 결과로부터 SOQPSK-TG가 TFM의 특성을 갖으며, SOQPSK-TG의 위상천이 특성이 이중 듀오바이너리 프리코더로 모델링되어 프리코더만으로 위상천이 특성을 파악할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서 모델링한 수정 주파수 파형을 적용한 이중 듀오바이너리 MSK-TG와 SOQPSK-TG의 시간 영역 파형, 주파수 영역 스펙트럼 대역폭 및 최적 수신성능을 모두 비교하였고, 두 신호가 거의 일치하여 모델링 결과가 우수함을 확인하였다. 이와 같은 결과를 바탕으로 이중 듀오바이너리 프리코더와 수정 주파수 파형 필터를 결합하면 등가 주파수 파형 필터를 갖는 MSK로 SOQPSK-TG 송신기를 간단하게 구현할 수 있다. 또한 이중 듀오바이너리 프리코더에 의해 변조지수가 변화하는 특징을 반영하여 IQ-검출기의 검출 필터를 코사인 합 필터로 구현하였을 때 기존 코사인 필터 대비 0.1 dB 수신 성능이 개선됨을 확인하였다.

References

- 1) Range Commanders Council Telemetry Group, IRIG Standard 106-17 : Telemetry Standards, 2017.
- 2) Hill, T., "An Enhanced, Constant Envelope, Interoperable Shaped Offset QPSK (SOQPSK) Waveform For Improved Spectral Efficiency," *International Telemetry Conference Proceedings*, Oct. 2000.
- 3) Simon, M. K., *Bandwidth-Efficient Digital Modulation with Application to Deep-Space Communications*, JPL Publication 00-17, 2001
- 4) Othman, R., Louët, Y. and Skrzypczack, A., "Analysis of Duobinary Encoding for CPM Signals," *32nd URSI GASS*, 19-26, 2017.
- 5) Jager, F. and Dekker, C., "Tamed Frequency Modulation, A Novel Method to Achieve Spectrum

Economy in Digital Transmission," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-26, No. 5, May 1978.

6) Chung, K. S., "Generalized Tamed Frequency Modulation and Its Application for Mobile Radio Communications," *IEEE Journal of Selected Areas in Comm*, Vol. SAC-2, No. 4, July 1984.

7) Geoghegan, M., "Implementation and performance results for trellis detection of SOQPSK," *International Telemetry Conference Proceedings*, October 2001.

8) Xingwen D., Song, J., Chen, M. and Lu, M.,

"A Modified OQPSK Detection for SOQPSK-TG in Aeronautical Telemetry," *International Telemetry Conference*, October 2014

9) Anderson, J. B., Aulin, T. and Sundberg, C. E., *Digital Phase Modulation*, Plenum Press, New York, 1986.

10) Kim, K. H. and Eun, C. S., "Shaped Offset QPSK signal modeling using Double Duobinary Encoding," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, July 2021.