

논문 2007-44TC-6-9

Five-port 접합을 이용한 RF 수신기를 위한 동시 DC 오프셋 제거와 I/Q 신호 재생 알고리즘

(Unified DC Offset Cancellation and I/Q Regeneration with Carrier
Phase Recovery in Five-Port Junction based Direct Receivers)

박형철*, 임형선**, 유종원***

(Hyung Chul Park, Hyung-Sun Lim, and Jong-Won Yu)

요약

본 논문에서는 five-port 접합을 이용한 RF 수신기를 위한 새로운 동시 DC 오프셋 제거와 I/Q 신호 재생 알고리즘을 제안한다. 제안한 방법에서는 단일주파수 CW 신호를 사용하는데, 제안한 방법이 반송파 위상 오프셋에 상관없이 사용할 수 있도록 한다. 또한 제안한 방법은 추가적인 DC 오프셋 제거 기능이 필요없고, I/Q 재생 파라미터 추정시간을 크게 줄인다. 제안한 방법에서는 변조방식에 상관없이 단일주파수 CW 신호를 사용하므로, five-port 접합을 이용한 RF 수신기가 위상편이변조 (PSK) 뿐 만 아니라, 연속위상변조 (CPM)와 직교주파수다중분할 (OFDM)에도 사용될 수 있다.

Abstract

This paper presents a novel unified DC offset cancellation and I/Q regeneration for five-port junction based direct receivers. It utilizes the symmetry characteristics of the single-frequency continuous-wave (CW) signal, making it possible that the proposed method can be used regardless of carrier phase offset. The proposed method eliminates the additional DC offset cancellation and reduces the I/Q regeneration parameter estimation time. Since the proposed method employs a single-frequency CW signal independent of the modulation scheme, five-port junction based direct receivers can be used for the demodulation of orthogonal frequency-division multiplexing and continuous phase modulation as well as phase shift-keying.

Keywords : Five-port 접합, I/Q 재생, DC 오프셋, 동기복조 (coherent demodulation), 최소평균제곱 (LMS).

I. 서론

최근 급속한 반도체 관련 기술의 발전과 다양한 무선

통신 규격 등으로, 무선 통신 기지국 뿐 만 아니라 무선 통신 단말기도 다양한 무선 통신 규격을 만족하는 통신 기능들을 제공하고 있다. 이 기능들은 크게 두 가지 형태로 구현될 수 있다. 첫 번째는 각 통신 규격을 만족하는 독립된 통신 기능 블록들을 사용하는 방법이다. 두 번째는 software defined radio (SDR)와 같은 기술을 사용하여 하나의 통신 기능 블록에서 여러 가지 무선 통신 규격을 모두 만족하도록 하는 것이다. SDR 기술을 단말기에 적용하면, 전력소모, 단말기의 크기, 가격 등을 모두 줄일 수 있는 장점이 있다. SDR 관련 기술들은 여러 분야에서 활발하게 연구되고 있다. 1994년에 수동 마이크로파 부품을 사용한 six-port 접합을 이용한 RF 수신기가 발표되었다^[1]. Multi-port (five- 또는

* 정희원, 한밭대학교 정보통신컴퓨터공학부
(Hanbat National University, Dept. of Information, Communication, and Computer Engineering)

** 삼성종합기술원 Embedded systems solution Lab.
(Samsung Advanced Institute of Technology, Embedded systems solution Lab.)

*** 한국과학기술원 전자전산학과
(Korea Advanced Institute of Science and Technology, Dept. of Electrical Engineering & Computer Science)

※ 본 논문은 삼성전자 주식회사의 지원을 받아 이루어졌음.

접수일자: 2007년3월14일, 수정완료일:2007년6월7일

six-port) 접합을 이용한 RF 수신기는 능동 소자들을 사용하는 기존의 RF 수신기에 비해서 다음과 같은 장점들을 가지고 있다. 첫째, 방향성 결합기 (directional coupler), 전력분배기 (power divider)와 같은 수동 마이크로파 부품들을 사용하기 때문에 전력소모를 줄일 수 있다. 둘째, 수동 소자들이 향상된 광대역 특성을 제공한다. 특히, 두 번째 장점은 SDR 시스템을 위해서 매우 중요하다. 세 번째, 하드웨어 결점과 광대역 특성은 multi-port 접합을 보정하여 더욱 향상시킬 수 있다^{[2],[3]}. 이전 논문들이 multi-port 접합을 이용한 RF 수신기가 direct conversion receiver (DCR)임을 보였다^[4-6]. Multi-port 접합의 출력 전력 신호를 사용하여 기저대역 I, Q 채널 신호를 재생하기 위해서는 multi-port 접합을 이용한 RF 수신기의 I/Q 재생 파라미터가 정확해야 한다. 그래서 multi-port 접합을 이용한 RF 수신기를 이용하여 동기 복조를 수행하기 위해서는, DC 오프셋 제거, 반송파 위상 복원, 그리고 I/Q 재생 파라미터 추정들이 필요하다. 기존 연구에서는 앞서 언급한 기능들을 multi-port 접합을 이용한 RF 수신기에 부분적으로 적용하였다^[4-9]. 그런데, 기존 연구는 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 첫째, 기존 연구에서는 I/Q 재생 파라미터 추정 전에 DC 오프셋 제거와 반송파 위상 복원이 완료되었다고 가정한다. 둘째, 기존 연구에서는 정확한 I/Q 재생 파라미터 추정을 위해서 아주 많은 양의 송신 데이터를 필요로 한다. 특히, 이것은 수신에서 큰 시간 지연을 일으킨다. 세 번째, DC 오프셋 제거와 I/Q 재생이 순차적으로 동작하여 긴 동기화 시간을 필요로 한다. 네 번째, 기존 연구에서는 전송되는 I, Q 채널 신호가 서로 상관이 없다고 가정한다. 이것은 기존 방식을 이용하는 multi-port 접합을 이용한 RF 수신기는 위상편이변조 (PSK) 신호의 복조만이 가능함을 의미한다. 이러한 기존 연구의 문제점을 해결하고 multi-port 접합을 이용한 RF 수신기를 실용적으로 사용하기 위해서는, DC 오프셋 제거와 반송파 위상 복원을 위해서 필수적으로 필요한 기저대역 I, Q 채널 신호의 재생과정을 좀 더 살펴볼 필요가 있다. 그런데, 이것은 앞에서 기술한 기존 연구의 첫 번째 가정, 즉, 'I/Q 재생 파라미터 추정 이전에 DC 오프셋 제거와 반송파 위상 복원이 완료된다'는 가정에 모순된다. 이것은 기존 연구 결과가 실용적이지 않음을 의미한다.

본 논문은 five-port 접합을 이용한 RF 수신기를 위한 새로운 동기 DC 오프셋 제거와 I/Q 신호 재생 알고리즘을 제안한다. 이를 위해서, 제안한 방법에서는 단일

주파수 (single-frequency) continuous wave (CW) 신호를 사용하는데, 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 제안한 방법이 반송파 위상 복원과 무관하게 동작할 수 있다. 둘째, 제안한 방법이 변조 방식에 무관하게 동작할 수 있다. 그러므로 제안한 방법을 사용하는 five-port 접합을 이용한 RF 수신기는 PSK 뿐 만 아니라, 직교주파수다중분할 (OFDM) 또는 연속위상변조 (CPM) 신호의 복조에도 사용될 수 있다. 세 번째, I/Q 재생 파라미터 추정시간을 크게 단축시킬 수 있다. 네 번째, 추가적인 DC 오프셋 제거를 요구하지 않는다. II장에서는 five-port 접합을 이용한 RF 수신기를 소개한다. III장에서는 five-port 접합을 이용한 RF 수신기를 위한 동기 DC 오프셋 제거와 I/Q 신호 재생 알고리즘을 제안한다. IV장에서는 제안한 방법을 사용한 수신기의 BER 성능을 평가하고 이론적인 BER 성능과 비교한다. V장에서는 결론을 맺는다.

II. Five-port 접합을 이용한 RF 수신기

그림 1은 제안한 I/Q 재생 구조가 포함된 five-port 접합을 이용한 RF 수신기 구조도이다.

그림 1은 또한 I/Q 재생과 반송파 위상 복원의 관계를 보여준다. 즉, 반송파 위상 복원은 I/Q 재생 파라미터 추정이 완료된 후에 동작한다. 그림 1에서 변조된 송신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = m(t)e^{j\omega_c t} \tag{1}$$

여기서 ω_c 는 반송파 주파수이고, $m(t)$ 는 정보신호이다. PSK 변조와 CPM 변조 등을 포함하는 일반적인 정보신호는 다음과 같다.

$$m(t) = I_m(t) + jQ_m(t) \tag{2}$$

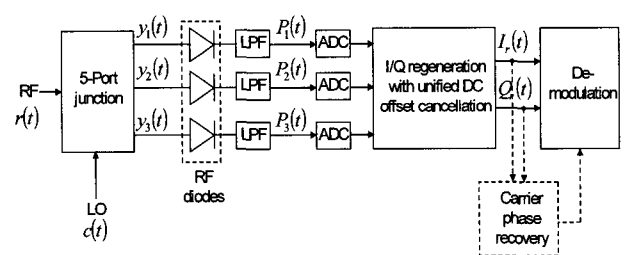


그림 1. 제안한 I/Q 재생 방법을 포함한 five-port 접합을 이용한 RF 수신기 구조도

Fig. 1. Block diagram of five-port junction based direct receiver with proposed I/Q regeneration method.

식(1)과 (2)를 사용해서, 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = s(t) + n(t) = m(t)e^{j\omega_0 t} + n(t) \quad (3)$$

여기서 $n(t)$ 는 양면 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 부가 백색가우시안잡음 (AWGN)을 나타낸다. 수신기의 LO 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c(t) = Ae^{j\omega_0 t} \quad (4)$$

여기서 ω_0 는 LO 신호의 주파수를 나타낸다. 그림 1에서 보인 바와 같이, five-port 접합을 이용한 RF 수신기에서 2 port는 수신 신호 $r(t)$ 와 LO 신호 $c(t)$ 를 각각 입력받는다. 나머지 3 port는 식(5)의 신호를 출력한다.

$$y_i(t) = \alpha_i c(t) + \beta_i r(t), \quad i=1,2,3 \quad (5)$$

여기서 α_i 와 β_i 는 복소값을 가지는 접합 파라미터이다. 식(5)는 출력신호가 $r(t)$ 와 $c(t)$ 의 선형합임을 의미한다. Five-port 접합의 출력 신호 $y_i(t)$ 는 전력 검출 다이오드와 저역통과필터(LPF)를 거친 저역통과여과된 전력신호가 된다. 특히, 전력 검출과 저역통과필터링과정에서, $r(t)$ 와 $c(t)$ 은 가법적으로 혼합되어 수신 신호 $r(t)$ 가 기저대역으로 하향 변환된다^[6].

그런데, 기존 논문에서는, I/Q 재생 과정에서 LO 신호 $c(t)$ 의 주파수와 위상이 수신 신호 $r(t)$ 의 반송파 주파수와 위상과 동일하다고 가정하였다^[4-9]. 하지만, 이 가정은 실용적이지 않다. 왜냐하면, 수신 신호 $r(t)$ 의 반송파와 LO 신호 $c(t)$ 의 주파수와 위상을 동기 시키는 반송파 위상 복원 회로가 재생된 I, Q 채널 신호를 사용하기 때문이다. 그래서 본 논문에서는 수신 신호 $r(t)$ 의 반송파와 LO 신호 $c(t)$ 의 위상은 다르다고 가정한다. 이것은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r(t) &= m(t)e^{j\omega_0 t} + n(t) \\ c(t) &= Ae^{j(\omega_0 t + \phi_0)} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 ϕ_0 는 수신 신호 $r(t)$ 의 반송파와 LO 신호 $c(t)$ 의 위상차를 나타낸다. 식(2)와 (6)을 사용해서 그림 1에 표현된 $y_i(t)$ 의 저역통과여과된 전력신호인 $P_i(t)$ 은 식(7)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} P_i(t) &= y_i(t) \cdot y_i^*(t) = [\alpha_i c(t) + \beta_i r(t)] \cdot [\alpha_i^* c^*(t) + \beta_i^* r^*(t)] \\ &= A^2 |\alpha_i|^2 + |\beta_i|^2 |m(t)|^2 + w_i(t) \\ &\quad + 2A |\alpha_i^* \beta_i| \cdot (I_m(t) \cos(\phi_0 - \phi_i) + Q_m(t) \sin(\phi_0 - \phi_i)), i=1,2,3 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 ϕ_i 는 five-port 접합의 각 출력 port에서 복소값을 가지는 접합 파라미터들의 위상차를 나타내며, 이것은 $\angle \alpha_i \beta_i$ 와 같다. 식(7)에서, $A^2 |\alpha_i|^2$ 와 $|\beta_i|^2 |m(t)|^2$ 는 각각 $c(t)$ 와 $r(t)$ 의 정류된 성분이다. 이 신호들은 모두 DC 오프셋을 가지고 있는데, 기존 논문에서는 I/Q 재생 전에 DC 오프셋은 제거된다고 가정하였다^{[4],[5]}. 본 논문에서는 일반화를 위해서, I/Q 재생 파라미터 추정 과정 중에 $P_i(t)$ 신호가 DC 오프셋을 가진다고 가정한다. 한편, 식(7)에서, 저역통과여과된 전력 신호인 $P_i(t)$ 가 송신된 I, Q 채널 정보신호의 선형 결합된 정보를 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 재생된 I, Q 채널 신호는 3 port의 저역통과여과된 전력신호의 선형결합으로 표현될 수 있다. 이것은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_r(t) &= A_{I1} P_1(t) + A_{I2} P_2(t) + A_{I3} P_3(t) \\ Q_r(t) &= A_{Q1} P_1(t) + A_{Q2} P_2(t) + A_{Q3} P_3(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 A_{Ii}, A_{Qi} ($i=1,2,3$)은 I/Q 재생 파라미터이다. 송신 신호와 재생된 I, Q 채널 신호가 동일하기 위해서는 I/Q 재생 파라미터인 A_{Ii}, A_{Qi} ($i=1,2,3$)가 정확히 추정되어야 한다.

III. Five-port 접합을 이용한 RF 수신기를 위한 동시 DC 오프셋 제거와 I/Q 신호 재생 알고리즘

[10]에서는, I/Q 재생 파라미터가 부정확하게 추정되면 재생된 I, Q 채널 신호가 송신 신호와 비교해서 왜곡된다는 것을 보였다. 그런데, 기존 방법들에서는 I/Q 재생 파라미터 추정을 위해서 서로 상관 없는 I, Q 채널 신호가 사용하였다. 하지만, 재생된 I, Q 채널 신호의 왜곡 검출에 있어서는 무상관 신호보다 단일주파수 CW 신호가 더욱 적합하다. 그 이유는, 단일주파수 CW 신호의 위상 정보는 2π 의 위상에 균일분포하기 때문이다. 그림 2는 단일주파수 CW 신호의 웨도 다이어그램이다.

그림 2에서, 위상 ϕ_a 의 신호와 위상 $\phi_a + \pi$ 의 신호

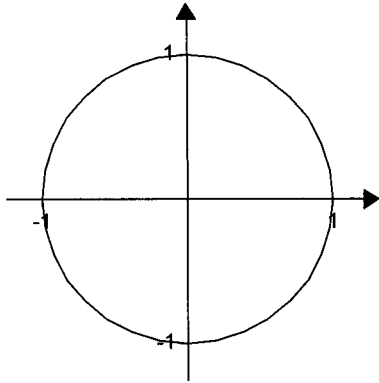


그림 2. 단일주파수 CW 신호의 궤도 다이어그램
 Fig. 2. Trajectory diagram of single-frequency CW signal.

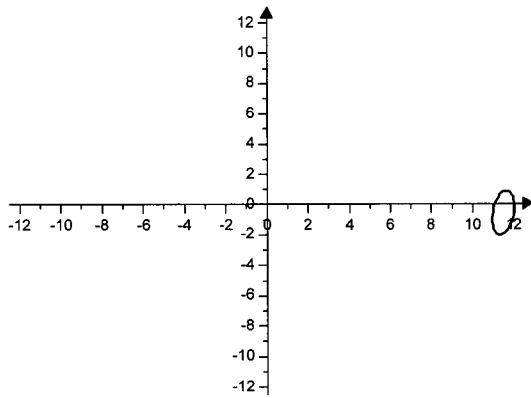


그림 3. 임의의 초기 I/Q 재생 파라미터로 재생된 I, Q 채널 신호의 궤도 다이어그램
 Fig. 3. Trajectory diagram of regenerated signal with random initial I/Q regeneration parameters.

가 원점에 대해서 대칭이다. 그러므로 위상 ϕ_a 의 송신 신호에 해당하는 수신신호에서 재생된 I, Q 채널 신호는 위상 $\phi_a + \pi$ 의 송신 신호에 해당하는 수신신호에서 재생된 I, Q 채널 신호와 서로 크기는 같고 부호는 반대이어야 한다. 이것은 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_r(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + I_r(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi} &= 0 \\ Q_r(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + Q_r(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (8)을 활용하면, 식(9)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

그림 3은 임의의 초기 I/Q 재생 파라미터로 재생된 I, Q 채널 신호의 궤도 다이어그램이다. 임의의 초기 I/Q 재생 파라미터를 사용하면 식(9)와 식(10)을 만족할 수 없다. 그림 3에서, 재생된 I, Q 채널 신호는 송신된 단일주파수 CW 신호와 비교했을 때 DC 오프셋이 있으며, 또한 왜곡되었다는 것을 알 수 있다.

만약 식(9)와 식(10)을 만족하도록 I/Q 재생 파라미터를 결정할 수 있다면, 재생된 I, Q 채널 신호는 원점에 대해서 대칭이게 된다. 여기서 주목할 것은 추가적인 DC 오프셋 제거 없이도 재생된 I, Q 채널 신호의 DC 오프셋이 제거된다는 것이다. 그런데, 식(10)을 만족시키는 I/Q 재생 파라미터의 조합은 매우 많으므로, I 채널과 Q 채널의 각 채널에서 2개의 재생 파라미터들은 임의의 초기 값으로 고정하고, 나머지 하나의 재생 파라미터를 식(10)이 만족되도록 정하면 된다. 예를 들

$$\begin{aligned} &I_r(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + I_r(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi} \\ &= A_{I1} (P_1(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_1(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi}) + \\ &A_{I2} (P_2(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_2(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi}) + A_{I3} (P_3(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_3(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi}) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} &Q_r(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + Q_r(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi} \\ &= A_{Q1} (P_1(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_1(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi}) + \\ &A_{Q2} (P_2(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_2(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi}) + A_{Q3} (P_3(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_3(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi}) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{I3,cal} &= - \frac{A_{I1} (P_1(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_1(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi}) + A_{I2} (P_2(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_2(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi})}{P_3(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_3(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi}} \\ A_{Q3,cal} &= - \frac{A_{Q1} (P_1(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_1(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi}) + A_{Q2} (P_2(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_2(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi})}{P_3(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a} + P_3(t)_{\phi_{TX}(t)=\phi_a+\pi}} \end{aligned} \quad (11)$$

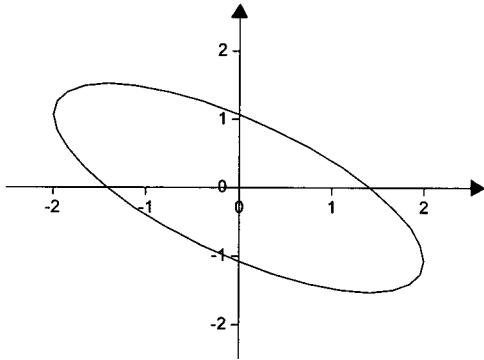


그림 4. 식(10)을 만족하는 I/Q 재생 파라미터로 재생된 I, Q 채널 신호의 궤도 다이어그램

Fig. 4. Trajectory diagram of regenerated signal with I/Q regeneration parameters satisfying(10).

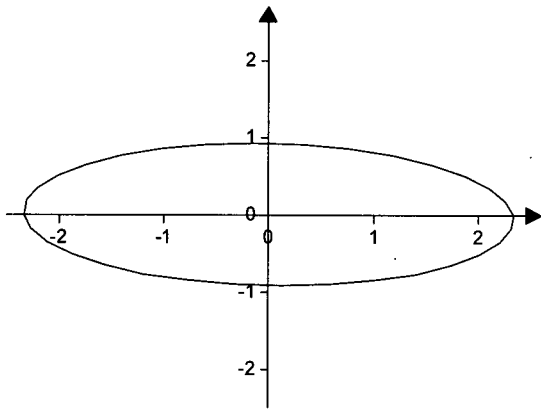


그림 5. 회전이 완료된 재생된 I, Q 채널 신호의 궤도 다이어그램

Fig. 5. Trajectory diagram of regenerated signal after the completion of rotation.

어서, $A_{I1}, A_{I2}, A_{Q1}, A_{Q2}$ 가 임의의 초기 값으로 주어졌을 때, A_{I3} 와 A_{Q3} 가 식(11)과 같으면 재생된 I, Q 채널 신호는 식(10)을 만족한다.

그림 4는 식(10)을 만족하는 I/Q 재생 파라미터로 재생된 I, Q 채널 신호의 궤도 다이어그램이다.

그림 4에서 재생된 I, Q 채널 신호는 DC 오프셋이 제거되었음을 알 수 있다. 그러나, 재생된 I, Q 채널 신호는 송신 단일주파수 CW 신호에 비해서 여전히 왜곡되어 있음을 알 수 있다. 즉, 송신 단일주파수 CW 신호의 궤도는 원인데 비해서 재생된 I, Q 채널 신호의 궤도는 타원이다. 추가적인 I/Q 재생 파라미터 추정을 위해서, I/Q 재생 파라미터를 수정하여 재생된 I, Q 채널 신호를 회전시켜서 타원의 장축이 x축과 일치하도록 할 필요가 있다. 이것은 식(12)와 같이 표현된다.

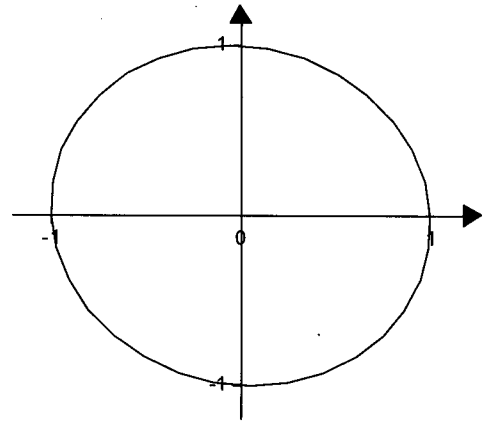


그림 6. I/Q 재생 파라미터 추정이 완료된 후의 재생된 I, Q 채널 신호의 궤도 다이어그램

Fig. 6. Trajectory diagram of regenerated signal after the completion of estimation.

$$\begin{aligned} I_{r,rotated}(t) &= [A_{I1}P_1(t) + A_{I2}P_2(t) + A_{I3,cal}P_3(t)] \cdot \cos(\theta) \\ Q_{r,rotated}(t) &= [A_{Q1}P_1(t) + A_{Q2}P_2(t) + A_{Q3,cal}P_3(t)] \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (12)$$

특히 식(12)에서, 재생된 I, Q 채널 신호는 최소평균 제곱 (LMS) 알고리즘을 이용해서 적응적으로 회전시켜 수렴 시간을 줄일 수 있다. 그림 1에서 보인 바와 같이 반송파 위상 복원은 I/Q 재생 파라미터 추정이 완료된 후에 동작하므로, 재생된 I, Q 채널 신호를 회전한다고 해서 BER 성능이 열화 되지는 않는다.

그림 5는 회전이 완료된 재생된 I, Q 채널 신호의 궤도 다이어그램이다. 그림 5에서, Q-채널 재생 신호를 조정하여 송신신호와 같이 궤도가 원이 되도록 할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 I/Q 재생 파라미터 추정이 완료된 후의 재생된 I, Q 채널 신호의 궤도 다이어그램이다. 재생된 I, Q 채널 신호의 궤도 다이어그램이 그림 2의 송신된 단일주파수 CW 신호와 같음을 알 수 있다.

IV. 성능 평가

그림 7과 그림 8은 각각 QPSK와 GMSK의 BER 성능 모의실험 결과이다. 본 논문에서는 제안한 방법이 BER 성능에 미치는 영향만을 분석하기 위해서 반송파 위상 복원과 시간 동기화 (timing synchronization)는 완벽하다고 가정한다. 그림 7과 그림 8에서 제안한 방법을 사용한 five-port 접합을 이용한 RF 수신기의 BER 성능이 이론적인 BER 성능과 일치함을 알 수 있다.

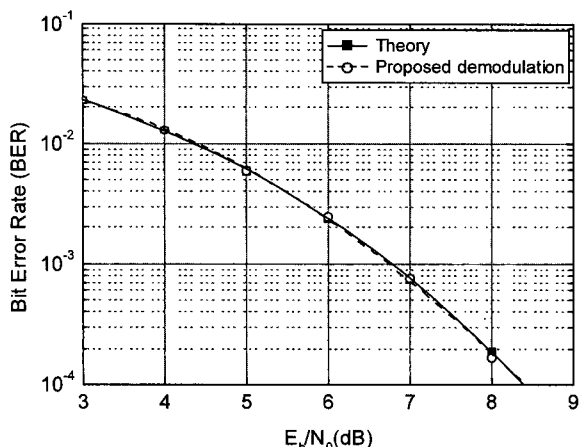


그림 7. QPSK 변조의 BER 모의실험 결과
 Fig. 7. Simulated BER performance of QPSK.

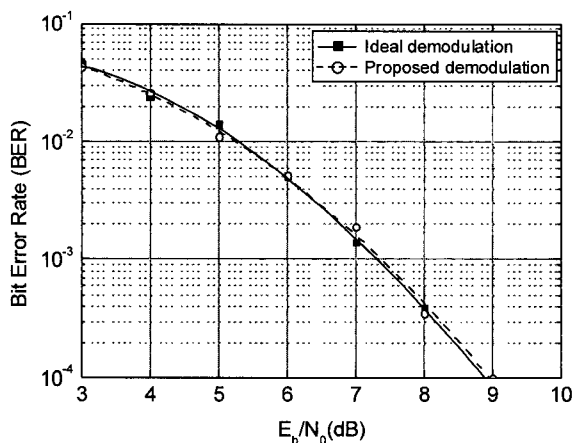


그림 8. GMSK 변조의 BER 모의실험 결과
 Fig. 8. Simulated BER performance of GMSK.

V. 결 론

이 논문은 five-port 접합을 이용한 RF 수신기를 위한 새로운 I/Q 신호 재생 알고리즘을 제안했다. 제안한 방법은 본질적으로 DC 오프셋 제거 기능이 있어서 추가적인 DC 오프셋 제거가 필요없다. 제안한 방법에서는 단일주파수 CW 신호의 DC-free, 원점에 대한 대칭, 그리고 원형 궤도 특성을 이용하였다. 모의실험 결과는 제안한 방법을 사용한 five-port 접합을 이용한 RF 수신기의 BER 성능이 이론적인 BER 성능과 동일함을 보였다.

참 고 문 헌

[1] Ji Li, R. G. Bosisio, and Ke Wu, "A Six-Port

Direct Digital Millimeter Wave Receiver," *1994 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1659-1662.

[2] G. F. Engen, "The Six-Port Reflectometer: An Alternative Network Analyzer," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, pp. 1075-1080, Dec. 1977.

[3] G. F. Engen, "Calibrating the Six-Port Reflectometer by Means of Sliding Terminations," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, pp. 951-957, Dec. 1978.

[4] X. Huang, D. Hindson, M. L's?leuc, and M. Caron, "I/Q-Channel Regeneration in 5-Port Junction based Direct Receivers," *1999 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 169-173.

[5] X. Huang, M. Caron, and D. Hindson, "Adaptive I/Q-regeneration in 5-port junction based direct receivers," in *Proc. 5th Asia-Pacific Communications Conf./4th Optoelectronic Communications Conf.*, 1999, pp. 717-720.

[6] T. Hentschel, "The Six-Port as a Communications Receiver," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, pp. 1039-1047, Mar. 2005.

[7] T. Hentschel, "A Simple IQ-Regeneration Technique for Six-port Communication Receivers," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Communication, Control and Signal Processing*, 2004, pp. 311-314.

[8] M. Mailand and H. Jentschel, "An Effort Reduced Six-Port Direct Conversion Receiver and Its Calibration," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, 2005, pp. 568-572.

[9] M. Mailand and H. Jentschel, "Compensation of DC-Offsets and RF-Self-Mixing Products in Six-Port-Based Analog Direct Receivers," in *Proc. IST Mobile and Wireless Communications Summit*, 2005.

[10] 박형철, *Universal LDR-WPAN/HDR SDR MODEM*, 연구보고서, 삼성전기주식회사, 2006.

저 자 소 개



박 형 철(정회원)

1996년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 학사

1998년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 석사

2003년 한국과학기술원
전자전산학과 박사

2003년~2005년 하이닉스반도체 선임연구원

2005년~2007년 한밭대학교 정보통신컴퓨터
공학부 전임강사

2007년~현재 한밭대학교 정보통신컴퓨터공학부
조교수

<주관심분야: 변복조 알고리즘, 통신VLSI>



임 형 선

2005년 서울시립대학교 전자전기
컴퓨터공학부 학사.

2007년 한국과학기술원
전자전산학과 석사.

2007년~현재 삼성종합기술원
연구원.

<주관심분야: RF transceiver, 안테나>



유 종 원

1992년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 학사

1994년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 석사

1998년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 박사

1995년~2000년 삼성전자

2000년~2001년 Wide Telecom

2001년~2004년 Telson, USA

2004년~2006년 한국과학기술원 전자전산학과
조교수

2006년~현재 한국과학기술원 전자전산학과
부교수

<주관심분야: RF transceiver, 안테나, wave
propagation analysis>