

# 주파수 성분을 이용한 TR-UWB 시스템의 성능분석

장동현\* · 양훈기\*\*

광운대학교

Performance analysis of TR-UWB systems using Frequency-components

Dong-heon Jang\* · Hoon-gee Yang\*\*

Kwangwoon University

E-mail : honeyaura@kw.ac.kr\* · hgyang@kw.ac.kr\*\*

## 요 약

본 논문에서는 기준 펄스와 데이터 펄스로 구성된 TR(Transmitted-reference) 신호를 전송하는 TR-UWB 시스템에서 시간 영역의 수신 신호를 주파수 영역의 신호로 변환하는 과정을 거쳐서 얻어낸 주파수 성분을 수신기에서 상관연산을 통해서 신호대잡음비를 개선하는 TR-UWB 시스템을 제안한다. 또한, TR-UWB 신호의 복소수 성분, 주파수 변환 특성을 이용한 이론적인 분석을 통해 시스템 성능을 유도하고 기존 시스템과의 성능을 비교분석한다. 모의 실험을 통해 제시한 TR-UWB 시스템에 의해 성능이 개선됨을 검증한다.

## ABSTRACT

This paper introduces a new TR-UWB system, using frequency-domain components of UWB pulses. This is achieved by separating converted frequency-components into real and imaginary parts, and both parts are correlated and effectively combined. We make an analysis that the new scheme improves performance compared with a conventional by complex correlation computing. The simulation results confirmed that the proposed scheme has better performance than existing system.

## 키워드

Transmitted-Reference UWB system, frequency component, correlation

## 1. 서 론

초광대역(Ultra-Wideband, UWB) 통신 시스템은 매우 짧은 시간에 해당하는 펄스를 사용함으로써 넓은 주파수 대역폭을 이용하는 통신시스템이다. 다른 통신 시스템에 비해 높은 데이터 전송률, 시스템의 저전력화 및 저복잡도 등의 이점을 가지고 있다. 나노초 단위의 매우 짧은 펄스를 통해 수GHz에 달하는 대역폭으로 기존의 다른 통신 시스템과의 간섭을 거의 일으키지 않으면서 수백 Mbps의 데이터 전송이 가능하기 때문에 WPAN 및 위치추적 등 다양한 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있다. [1][2]

"본 연구결과물은 「2005 산업자원부 성장동력산업」의 「유비쿼터스 홈 네트워크 범용 칩입대용 시스템 개발사업」의 지원과 2007년도 「서울시 산학연 협력사업」의 「나노IP/SoC설계기술혁신사업단」의 지원으로 수행 되었음"

UWB 시스템은 analog-to-digital converter(ADC)와 같은 디지털 구현에 있어서 짧은 폭의 펄스로 인해 구현의 어려움이 있다. UWB 펄스를 위한 고속의 ADC는 높은 전력, 복잡한 시스템, 고비용을 요구하기 때문에 UWB 통신의 장점이 사라지게 된다. 이를 극복하기 위해 UWB 신호를 주파수 영역의 신호로 전개 하여 신호 처리하는 기술이 제안되었다. [3][4]

본 논문은 기존 TR-UWB 시스템의 성능을 개선하고 시스템의 디지털 구현의 어려움을 극복하고자 주파수영역의 신호를 활용한 새로운 구조의 TR UWB 시스템에 관한 것이다. 2장에서는 Transmitted-Reference 신호의 의미와 시스템의 동작에 대하여 다루고, 3장에서는 새로운 구조의 TR-UWB 시스템에 대하여 소개하고 기존시스템과 제안하는 시스템의 성능을 이론적으로 분석한다. 5장에서는 모의 실험을 통해 시스템의 성능을 검증하고, 마지막의 결론으로 끝을 맺는다.

## II. Transmitted-Reference UWB

UWB 시스템의 데이터 변복조 방식 중 하나인 TR(transmitted-reference) 방식은 데이터 신호와 참조신호가 하나의 심볼을 이루어 전송되어 수신기에서 자기상관을 통해 데이터가 복원되는 기법이다. 송신기에서 보내는 TR신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = \sum_{i=0}^{T-1} [g_R(t-iT_p) + g_D(t-iT_p)] \quad (1)$$

여기서  $g_R(t), g_D(t)$ 는 각각 기준펄스와 데이터 펄스이고 펄스 모델은 UWB 시스템에서 주로 사용되는 2차 미분된 가우시안 신호이다.  $T_p$ 는 심볼간의 시간간격을 의미한다. 데이터펄스인  $g_D(t)$ 는  $d_i g_R(t-T_d)$ 로 나타낼 수 있고  $d_i$ 은  $\{\pm 1\}$ 의 e 데이터정보를 의미한다.

송신기에서 보내진 신호  $s(t)$ 가 다중경로 채널을 통과한 후 잡음이 더해져 수신된 수신 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = s(t) * h(t) + w(t) \quad (2)$$

여기서 \*는 컨볼루션,  $h(t)$ 는 채널 임펄스 응답,  $w(t)$ 는 평균이 0이고 PSD(power spectral density)가  $N_0/2$ 인 AWGN(additive white gaussian noise)이다.

TR-UWB 시스템의 수신단에서 데이터정보를 복원하기 위해 심볼을 구성하는  $g_R(t)$ 와  $g_D(t)$ 를 상관(correlation)시키는데  $g_R(t)$ 를  $T_d$ 만큼 시간지연시킨 후 상관과정을 갖는다. 상관기(correlator) 출력  $z$ 는 다음과 같다.

$$z = \int g_R(t-T_d)g_D(t)dt \quad (3)$$

수식 유도의 편의를 위해  $g_R(t-T_d)$ 를  $g_S(t)$ 라고 한다. 식 (3)을 통해 얻은  $z$ 에 대해서 다음과 같은 판정방법(decision rule)을 적용하여 데이터 정보  $\hat{d}_i$ 을 복원한다.

$$\hat{d}_i = \begin{cases} +1 & (z > 0) \\ -1 & (z < 0) \end{cases} \quad (4)$$

## III. 새로운 TR-UWB 시스템 및 성능분석

본 논문은 시간영역의 신호를 주파수 영역의 신호로 변환하여 그 주파수 성분을 활용하여 시스템을 분석한다. 시간영역의 에너지와 그에 해당하는 주파수 영역의 에너지는 같다는 Parseval 정리를 이용하여 식 (3)을 다음과 같이 나타낸다.

$$z = \int G_S(f)G_D^*(f)df \quad (5)$$

$$= d_i \int |G_S(f)|^2 df$$

여기서  $G_S(f)$ 와  $G_D(f)$ 는 각각 시간 지연된 기준펄스  $g_S(t)$ 와 데이터 펄스  $g_D(t)$ 의 푸리에 변환이고  $G_S(f)$ 와  $G_D(f)$ 간의 켈레곱으로 인하여 수신기의 상관연산 결과  $z$ 는 오직 실수값을 갖음을 알 수 있다.

AWGN 채널에서, 수신기에 도달하는 수신신호를 주파수 변환 블록을 통과하여 주파수 성분으로 변환되는데, 수신기에서  $T_d$ 만큼 시간지연된 기준펄스  $g_S(t)$ 와 데이터펄스  $g_D(t)$ 의  $f=f_n$ 에서 갖는 주파수 성분  $r_{S_n}$ 과  $r_{D_n}$ 은 다음과 같다.

$$r_{S_n} = (a_{S_n} + jb_{S_n}) + (p_{S_n} + jq_{S_n}) \quad (6)$$

$$r_{D_n} = (a_{D_n} + jb_{D_n}) + (p_{D_n} + jq_{D_n}) \quad (7)$$

여기서 기준펄스가  $f=f_n$ 에서 갖는 주파수 성분  $G_S(f_n)$ 은  $a_{S_n} + jb_{S_n}$ 이고,  $p_{S_n} + jq_{S_n}$ 은 기준펄스에 더해진 잡음의 주파수 성분을 의미한다. 마찬가지로 데이터펄스의 주파수 성분  $G_D(f_n)$ 은  $a_{D_n} + jb_{D_n}$ 이고 잡음성분은  $p_{D_n} + jq_{D_n}$ 이다. 이때  $\Delta f = 1/T_p$ 의 관계가 있으며, 식 (6)과 (7)을 이용하여 식 (5)를 표현하면 다음과 같다.

$$z = \sum_{n=0}^{N-1} r_{S_n} r_{D_n}^* \quad (8)$$

식 (8)에 의한 결과  $z$ 는 식 (5)에서의 마찬가지로 실수값만을 갖는다. 이때 데이터복원을 위한 판정방법은 다음의 식 (9)를 적용한다.

$$\hat{d}_i = \begin{cases} +1 & (\text{Re}[z] > 0) \\ -1 & (\text{Re}[z] < 0) \end{cases} \quad (9)$$

주파수 성분을 이용한 TR-UWB 시스템에서 상관기 출력 결과의 실수 성분  $\text{Re}[z]$ 를 분석하면 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Re}[z] = \text{Re} \left[ \sum_n r_{S_n} r_{D_n}^* \right] \quad (10)$$

실수값만 갖는 식 (10)의 결과는  $r_{D_n}$ 과  $r_{S_n}$ 의 복소 성분을 실수와 허수로 구분하여 상관시킴으로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Re}[z] = \sum_n \text{Re}[r_{S_n}] \text{Re}[r_{D_n}] + \sum_n \text{Im}[r_{S_n}] \text{Im}[r_{D_n}] \quad (11)$$

여기서  $r_{D_n}$ 과  $r_{S_n}$ 의 실수 성분간의 상관연산인

$\sum Re[r_{S_n}]Re[r_{D_n}]$ 을 랜덤변수  $X$ 로 정의하고, 이를  $\alpha + w_x$ 로 나타낸다.  $\alpha$ 는  $\sum a_{S_n}a_{D_n}$ 이며 랜덤변수  $X$ 의 평균을 의미하고, AWGN에 의한 잡음 성분  $w_x$ 는  $\sum [a_{S_n}p_{D_n} + a_{D_n}p_{S_n} + p_{S_n}p_{D_n}]$ 으로 나타낼 수 있다. 또한,  $r_{D_n}$ 과  $r_{S_n}$ 의 허수부 간의 상관 결과인  $\sum Im[r_{S_n}]Im[r_{D_n}]$ 을 랜덤변수  $Y$ 로 정의하고  $Y = \beta + w_y$ 로 표현한다. 이때  $Y$ 의 기대값  $\beta$ 는  $\sum b_{S_n}b_{D_n}$ 이고 잡음에 의한 성분  $w_y$ 는  $\sum [b_{S_n}q_{D_n} + b_{D_n}q_{S_n} + q_{S_n}q_{D_n}]$ 이 된다. 데이터 값이 1인 경우,  $Re[z]$ 는 다음과 같이 랜덤변수  $X, Y$ 의 인수로 나타낼 수 있다.

$$Re[z] = \alpha + \beta + w_x + w_y \quad (12)$$

$w_x$ 와  $w_y$ 는 AWGN의 성질에 의해서 서로 독립적(independent)이며 기대값은 0이 된다. 따라서  $Re[z]$ 의 평균과 분산은 다음과 같다.

$$E[Re[z]] = \alpha + \beta \quad (13)$$

$$Var[Re[z]] = E[(w_x + w_y)^2] = V_X + V_Y \quad (14)$$

$w_x$ 와  $w_y$ 는 서로 독립적이기 때문에 분산은 각각  $V_X$ 와  $V_Y$ 로 구분할 수 있고, 잡음 성분의 실수 및 허수 부분의 기대값이 0이기 때문에  $V_X$ 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$V_X \approx \sum_n (a_{S_n}^2)E[p_{D_n}^2] + \sum_n (a_{D_n}^2)E[p_{S_n}^2] + \sum_n E[p_{S_n}^2]E[p_{D_n}^2] \quad (15)$$

여기서  $E[p_{S_n}^2]$ 과  $E[p_{D_n}^2]$ 이 주파수 축에서  $f = f_n$ 에서 고르게 분포되기 때문에 상수  $V_p$ 로 정의하고  $V_X$ 를 식 (16)과 같이 표현한다.

$$V_X \approx \sum_n (a_{S_n}^2 V_p + a_{D_n}^2 V_p) + NV_p^2 \quad (16)$$

여기서  $N$ 은 주파수 성분의 개수를 의미하고, 주파수 변환기에서 주파수 샘플링 간격이 작을수록  $N$ 은 커지게 된다.  $a_{S_n}$ 과  $a_{D_n}$ 은 시간축 상에서는 시간지연 된 만큼의 차이가 있지만 주파수 축상에서는 같은 값을 갖고, 랜덤변수  $X$ 의 기대값  $E[X]$ 는  $E[\sum a_{S_n}^2]$ 이라 할 수 있으므로  $w_x$ 의 분산  $V_X$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$V_X = 2\alpha V_p + NV_p^2 \quad (17)$$

$w_y$ 의 분산  $V_Y$ 는 식 (15), (16)과 같은 과정을

통해서 얻을 수 있으며 일정한 값을 갖는  $E[q_{S_n}^2]$ 과  $E[q_{D_n}^2]$ 을  $V_q$ 로 가정하면  $V_Y$ 는 다음과 같다.

$$V_Y = 2\beta V_q + NV_q^2 \quad (18)$$

식 (17),(18)을 이용하여 식 (14)를 표현하면 다음과 같다.

$$Var[Re[z]] = 2\alpha V_p + NV_p^2 + 2\beta V_q + NV_q^2 \quad (19)$$

식 (13),(19)는 주파수 성분을 활용한 기존 TR-UWB 시스템의 성능분석을 위해 랜덤변수  $X$ 와  $Y$ 를 정의하여  $X+Y$ 를 충분통계량으로 활용하였다. 이를 시스템  $A$ 라고 명명하고 복조단의 신호대잡음비  $SNR_A$ 는 다음과 같다.

$$SNR_A = \frac{(\alpha + \beta)^2}{(2\alpha V_p + NV_p^2) + (2\beta V_q + NV_q^2)} \quad (20)$$

랜덤변수  $X$ 와  $Y$ 를 좌표  $(X, Y)$ 로 하는 새로운 구조의 TR-UWB 수신기를 시스템  $B$ 라고 하면, 좌표  $(X, Y)$ 의 메시지점은 데이터값에 따라서 신호공간도에서  $\pm(\alpha, \beta)$ 에 위치하게 되는데, 시스템  $B$ 는 두 메시지점을  $\theta$ 만큼 회전시켜 신호공간도의  $x$ 축에 위치하게 한다. 그 결과 메시지점은  $\pm(\alpha_1, 0)$ 이라는 새로운 위치에 존재하고 판정경계는  $x$ 축에서 0을 기준으로 데이터값을 복원한다. 여기서  $\alpha_1$ 과  $\theta$ 는 각각 다음과 같다.

$$\alpha_1 = \alpha \cos \theta + \beta \sin \theta \quad (21)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\beta}{\alpha} \quad (22)$$

수신단 상관기를 거친 후 메시지점을 회전시킨 새로운 수신단의 출력  $z_B$ 는 다음과 같다.

$$z_B = X \cos \theta + Y \sin \theta \quad (23)$$

시스템  $B$ 에 의한 결과  $z_B$ 의 평균 및 분산은 식 (13), (19)와 같이 구할 수 있다.

$$E[z_B] = \sqrt{\left(\sum_n a_{S_n}a_{D_n}\right)^2 + \left(\sum_n b_{S_n}b_{D_n}\right)^2} \quad (24)$$

$$Var[z_B] = (2\alpha V_p + NV_p^2) \cos^2 \theta + (2\beta V_q + NV_q^2) \sin^2 \theta \quad (25)$$

따라서 좌표  $(X, Y)$ 를 사용하는 시스템  $B$ 의 복조기 후단에서의  $SNR_B$ 는 다음과 같다.

$$SNR_B = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\left\{ (2\alpha V_p + NV_p^2) \cos^2 \theta + (2\beta V_q + NV_q^2) \sin^2 \theta \right\}} \quad (26)$$

기존 시스템 A와 새로운 시스템 B 사이의 성능을 비교하기 위해  $SNR_B$ 를  $SNR_A$ 로 나누어 SNR의 비(ratio)  $\Gamma$ 를 구한다.  $\Gamma$ 가 1보다 클수록 시스템 B의 성능이 우수하고, SNR의 비  $\Gamma$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\Gamma = \frac{V_x + V_y}{(1 + \sin 2\theta)(V_x \cos^2 \theta + V_y \sin^2 \theta)} \quad (27)$$

시스템 B의 회전각  $\theta$ 의 값이  $45^\circ$ 일 경우 두 시스템의 성능은 동일하지만,  $\theta$ 값이  $0^\circ$ 와  $90^\circ$ 인 경우의 SNR 비  $\Gamma$ 를 주파수 성분의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\Gamma_{\theta=0^\circ} = \frac{2(\sum a_{sn}^2 + \sum b_{sn}^2 + N)}{2\sum a_{sn}^2 + NV_p} \quad (28)$$

$$\Gamma_{\theta=90^\circ} = \frac{2(\sum a_{sn}^2 + \sum b_{sn}^2 + N)}{2\sum b_{sn}^2 + NV_q} \quad (29)$$

주파수 성분의 개수  $N$ 이  $\sum a_{sn}$ 과 비례관계에 있기 때문에 식 (28)과 (29)의 값은 1보다 크게 되어 결과적으로 시스템 B의 성능이 우수한 것을 알 수 있다. 따라서  $\theta$ 의 변화에 따른 SNR의 비  $\Gamma$ 는 1보다 크다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 모의 실험

본 논문에서 제시한 시스템의 성능분석을 위해 IEEE 802.15.3a 다중 경로 채널 모델 CM1을 이용하여 모의 실험을 진행하였다.  $T_p$ 는 5nsec이고, 주파수 샘플 간격  $\Delta f$ 는 200MHz가 된다. UWB 펄스는 10dB 대역폭이 약 1.5GHz인 2차 미분된 가우시안 펄스를 사용하였다.

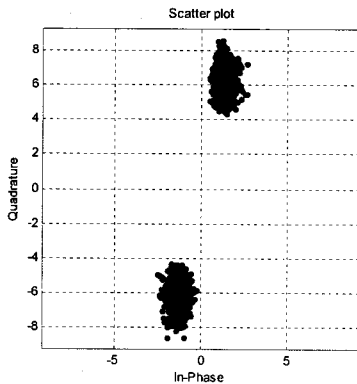


그림 2. 시스템 B의 산점도

그림 2는 다중경로 채널 통과후 잡음이 더해진 시스템 B의 메시지점을 산점도로 나타낸 것으로 데이터값이 1일 때  $\theta$ 는  $77^\circ$ 의 값을 갖는다. 좌표  $(X, Y)$ 의 신호들을  $\theta$ 만큼 시계방향으로 회전시켜 데이터값을 복원하게 된다. 그림 3은 그림 2와 같은 조건에서의 BER 성능을 나타낸 것으로 시스템 B의 성능이 기존의 시스템보다 우수함을 알 수 있다.

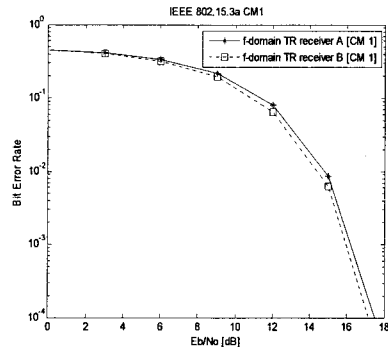


그림 3. BER 성능

#### V. 결론

본 논문에서는 TR-UWB 시스템의 주파수 성분을 이용하여 TR을 구성하는 기준펄스와 데이터펄스를 실수부와 허수부로 분리하여 수신단의 상관기 출력에서 최대의 신호대잡음비를 얻는 시스템을 제안하였다. 또한, 시스템의 성능에 관계된 주파수 성분 개수, 회전각  $\theta$ 를 토대로 이론적으로 성능을 분석하였다. 모의 실험을 통해 제시한 시스템이 다중경로 채널에서 주파수 기반의 TR-UWB 시스템의 성능을 개선함을 검증하였다.

#### 참고문헌

- [1] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple access communications," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 48, no. 4, pp. 679-691, Apr. 2000.
- [2] Tony Q. S. Quek and M. Z. Win, "Analysis of UWB transmitted-reference communication systems in dense multipath channels," *Journal on Sel. Areas in Comm.*, Vol. 23, No. 9, Sept. 2005.
- [3] H.-J. Lee, D. S. Ha, and H.-S. Lee, "A frequency-domain approach for all-digital CMOS ultra wideband receivers," in *Proc. IEEE Ultra Wideband Syst. Technol. Conf.*, Reston, VA, pp. 86-90, Nov. 2003.
- [4] S. Hoyos and B. M. Sadler, "Frequency-domain implementation of the transmitted-reference ultra-wideband receiver," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, Part 2, pp. 1745 - 1753, Jun. 2006.