
타이밍 지터를 고려한 UWB 통신 시스템 용량 계산

박장우*

Calculation of UWB Communication System Capacity with Timing Jitter

Jangwoo Park*

요 약

UWB(Ultra-Wide Bandwidth) 통신 시스템은 멀티미디어 정보와 같은 대량, 고속 통신을 요구하는 추세에 부합하는 통신 방식으로 많은 관심을 받고 있다. UWB 통신 방식에서 중요한 특징은 시간 영역에서 매우 폭이 좁은 펄스를 사용하여 정보를 전송하며, 펄스의 위치를 변조시키는 PPM(Pulse Position Modulation)을 사용하는 점이다. 따라서, 송신기와 수신기의 타이밍 지터(timing jitter)는 매우 중요한 역할을 하며, 이들 지터가 UWB 통신 시스템에 미치는 영향을 정확히 해석하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 지터의 영향을 해석하는 방법을 제시하였다. 이때 본 논문에서 계산한 것은 M-진 PPM UWB 통신 시스템 용량(capacity)이다. 또한, 다중 사용자 환경에서 지터의 영향도 함께 해석하였다.

ABSTRACT

An UWB communication system are a promising communication technique suitable for the current trends, which are requesting communication methods with the high throughputs and very high speed. A key feature of UWB communication systems is the very narrow pulse used in transmitting the data and PPM(Pulse Position Modulation) for modulating the data. So, the timing accuracy is very important. It is very important to accurately analyze the effect of the timing jitter on the performance of UWB communication systems. In this paper, the methods of analyzing the timing jitter effects on UWB communication systems are introduced. In particular, the channel capacities with timing jitter are calculated including the multiuser access interference.

키워드

UWB, PPM, Time Hopping, Timing Jitter, Capacity, Monte-Carlo

1. 서 론

UWB 통신 시스템은 고속, 대용량의 데이터를 전송할 수 있는 특성 갖고 있다. 따라서 멀티미디어 정보의 전송이 중요성을 더해가고 있는 요즘

UWB 통신 시스템은 새로운 대안으로 중요성이 증가하고 있으며, 연구도 활발히 이루어지고 있다. UWB 통신 시스템은 시간 영역에서 매우 좁은 폭의 펄스를 이용하는 것으로 낮은 전력 스펙트럼 밀도, 매우 높은 다중 사용자 수용능력, 그리고 다중

경로 간섭에 강한 특성들을 갖는다.

UWB 통신 시스템의 연구는 주로 이진[1], 혹은 M-진 변조[2]를 사용하는 다중 사용자 환경 관한 것이며, 변조 방식으로는 펄스 위치 변조(Pulse Position Modulation:PPM)을 사용한다. 그리고 다중 경로 환경에서의 해석[3] 및 협대역 간섭의 존재 하에서 UWB 통신 시스템의 특성 분석[4]에 중점을 두고 연구가 이루어지고 있다.

한편, UWB 통신시스템에서 중요한 것 중 하나는 타이밍 지터[5]이다. 특히, 매우 좁은 폭의 펄스를 사용하는 UWB-PPM 시스템의 경우 송, 수신기의 클럭의 정확성은 매우 중요하다. 따라서 송·수신기에서 타이밍 클럭의 지터는 전체 시스템의 성능을 저해하는 원인이다. 그러나, 이와 같은 클럭의 불안정성이 전체 시스템에 미치는 영향을 연구한 결과는 거의 찾아 볼 수 없다[5]. 단지 최근 UWB 시스템에 적절한 저전력의 안정한 클럭에 관한 연구 결과가 있으며[6], 발표된 지터의 값은 10ps 정도이었다. 이와 같은 값은 일반적인 UWB 펄스의 폭(대략 1ns)이나 변조 파라미터, 펄스 반복 주기 등에 비하여 매우 작은 값이지만, 실제로 이들 작은 지터의 값이 실제의 특성에 미치는 영향을 조사하는 것은 의미 있는 연구이다.

따라서 본 본문에서는 UWB 통신 시스템에서 타이밍 지터가 전체 특성에 미치는 영향을 연구한다. 특히 시스템의 성능을 평가하는 성능지수로 시스템 용량(capacity)를 선택하였고 지터가 시스템 용량에 미치는 영향을 조사하였다.

II. UWB 통신 시스템 모델

이 논문에서는 TH M-진 PPM 시스템을 고려한다. N_u 명의 동시 사용자가 존재하는 것으로 가정하였으며, 각각의 송신 신호는 다음과 같다.

$$s_i^{(v)}(t) = \sqrt{E_b} \sum_{j=0}^{N_s-1} p(t - iT_f - c_i^{(v)}T_c - \delta d_{i,j}^{(v)} + \epsilon_i^t) \quad (1)$$

여기에서 $p(t)$ 는 시간 폭 T_b 를 갖는 UWB 펄스이고 에너지는 1로 정규화 되었다고 가정한다. T_f 는 펄스 반복 시간이다. $c_i^{(v)}$ 는 시간 도약을 위한 의사 랜덤 코드로써 각 사용자들에게 고유하게 할당되었다. T_c 는 펄스의 도약 시간을 결정하는 값으로 각 주기적인 펄스에 $c_i^{(v)}T_c$ 만큼의 추가적인

시간 편이를 발생시킨다. PPM 시간 편이는 $\delta d_{i,j}^{(v)}$ 에 의하여 결정된다. 이때, 모든 i 에 대하여

$$d_{i,j}^{(v)} = j \quad j=0, 1, 2, \dots, M-1 \quad \forall i \quad (2)$$

을 만족한다. 따라서 $\delta d_{i,j}^{(v)} = j\delta$ 이다. 이때, δ 는 $(M-1)\delta < T_f$ 를 만족한다. 직교 PPM 시스템을 고려하기 때문에 $\delta > T_b$ 이다. 일정한 T_f 를 사용하는 경우, 심벌율은 $R_s = 1/N_s T_f$ 이다. 이때, N_s 는 하나의 심벌을 구성하는 펄스의 개수이다. 송신기에서 발생하는 타이밍 지터는 ϵ_i^t 로 고려하고, ϵ_i^t 는 평균이 영이고 분산이 $\sigma_{\epsilon_i^t}^2$ 인 정규 랜덤 변수라고 가정한다[1].

전송된 신호의 검출을 위해 상관 수신기를 사용한다. 즉, 수신기는 수신한 신호를 M 개의 템플릿 신호와 한 심벌 주기 동안 상관시킴으로써 전송된 심벌을 식별하게 된다. 모든 사용자들로부터 수신된 신호는 다음식과 같다.

$$r(t) = \sum_{v=1}^{N_t} \alpha_v s^{(v)}(t - \tau_v) + n(t) \quad (3)$$

τ_v 는 v 번째 사용자와 관련된 시간 지연을 표시하며, α_v 는 v 번째 사용자의 채널 전파 감쇠를 표시한다. 이후의 모든 v 에 대하여 $\alpha_v = \alpha$ 라고 가정한다. 그리고 $n(t)$ 는 평균이 영인 AWGN이고 $N_0/2$ 의 전력 스펙트럼 밀도를 갖는다.

해석을 간단히 하기 위하여, 첫 번째 사용자의 신호를 수신한다고 가정한다. 따라서 수신기는 사용자 1과 완전히 동기 되어 있다. 즉, τ_1 을 알고 있으며, 시간 도약 PN 열, $c_i^{(1)}$ 도 수신기에서 알려져 있다. 이와 같은 M-진 직교 수신기에서 템플릿 신호는 다음 식과 같이 주어진다.

$$v_m^{(1)}(t) = \sum_{j=0}^{N_s-1} p(t - jT_f - c_j^{(1)}T_c - \delta_m - \epsilon_j^t) \quad (4)$$

이때, $\delta_m = m\delta$, $m=0, 1, \dots, M-1$. 또한, ϵ_j^t 는 수신기의 타이밍 지터를 표시하는 랜덤 변수이다. 식(1)과 (4)에서 보듯이 송신기와 수신기의 지터가 고려되었다. 그러나 이어지는 해석에는 수신기에 상대적인 송신기의 지터를 전체의 링크 지터

로 가정한다(즉, $\epsilon_j^r=0$). 또한 $N_s=1$ 이라고 가정하며, 따라서 $T_s=T_f$ 이며, 정보 심벌 당 에너지 E_s 도 펄스의 에너지 E_p 와 같다.

위의 가정을 고려하여 각 상관기의 출력을 구하면 다음과 같다. 이때 각 상관기의 출력은 $(i+1)T_f$ 에서 표본화한다.

$$y_m = \int_{iT_f}^{(i+1)T_f} r(t)v_m^{(1)}(t-iT_f) dt = \alpha\sqrt{E_p}D_m + n_I + n_0 \quad (5)$$

식(5)의 첫 항은 정보와 관련된 항으로

$$D_m \equiv \gamma(\delta d_j - \delta_m + \epsilon_j^t) \quad (6)$$

이다. 여기서 $\gamma(\epsilon)$ 은 $p(t)$ 의 자기 상관 함수이다.

$$\gamma(\epsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t-\epsilon)p(t) dt \quad (7)$$

만일 $\epsilon > T_p$ 이면, $\gamma(\epsilon)=0$. 여기에서는 직교 PPM을 고려하기 때문에 식(6)은 다음과 같다.

$$D_m = \begin{cases} \gamma(\epsilon^t) & \text{when } m=j \\ 0 & \text{when } m \neq j \end{cases} \quad (8)$$

이때, 모든 ϵ_i^t 는 통계적으로 동일하다고 생각하여 첨자 i 는 생략한다. n_I 와 n_0 는 각각 MAI(multiple access interference) 와 AWGN을 의미하며 식(9)과 (10)에 나타내었다.

$$n_I = \sum_{\nu=2}^{N_t} \alpha_{\nu} \sqrt{E_p} \gamma(\Delta) \quad (9)$$

$$n_0 = \int_{iT_f}^{(i+1)T_f} n(t)v_m^{(1)}(t-iT_f) dt \quad (10)$$

여기에서 Δ 는 사용자 1과 ν 사이의 시간 불일치를 의미한다.

$$\Delta = \Delta_{no} + \epsilon_i^{(\nu)} \quad (11)$$

$$= [c_i^{(\nu)} - c_i^{(1)}] T_c + [\delta d_i^{(\nu)} - \delta_m] + [\tau_{\nu} - \tau_1] + \epsilon_i^{(\nu)}$$

식 (11)의 통계적 성질을 고찰하자. 우선 지터를 제외한 변수 즉, Δ_{no} 에 대하여 생각하자. 첫째, $c_i^{(\nu)}T_c$ 는 모든 ν 에 대하여 서로 독립적이며, 동일하게 분포된(i.i.d.) 균일 랜덤 변수이다. 각 사용자는 균일하게 분포된 데이터 소스를 갖고 있으며, 따라서 M-진 심볼의 확률은 $1/M$ 이다. 또한 모든 사용자들에 해당하는 데이터들은 서로 독립적인 이라고 가정하며 이에 해당하는 시간 차이, $\delta d_i^{(\nu)}$ 역시 i.i.d. 인 랜덤 변수이다. 셋째, 시간 지연 τ_{ν} 도 프레임 구간 내에서 i.i.d. 인 균일 랜덤 변수이다. 따라서, MAI 계산에 사용되는 펄스들 같은 프레임 내에 존재하여야 하며 시간 차 Δ_{no} 는 구간 $[-T_f, T_f]$ 에서 균일한 랜덤 변수라고 가정할 수 있다.

이상의 가정을 염두에 두고 $\Delta = \Delta_{no} + \epsilon_i^{(\nu)}$ 의 통계적 성질을 고려하자. 이때 Δ_{no} 와 ϵ_i^t 는 서로 독립적이라고 가정한다. Δ_{no} 는 구간 $[-T_f, T_f]$ 에서 균일한 랜덤 변수이고, ϵ_i^t 는 평균이 영이고 σ_{ϵ}^2 의 분산을 갖는 정규 분포이기 때문에 두 랜덤 변수의 합인 Δ 의 확률 밀도 함수는

$$f(\Delta) = \frac{1}{4T_f} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{\Delta - T_f}{\sqrt{2}\sigma_{jit}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{\Delta + T_f}{\sqrt{2}\sigma_{jit}}\right) \right] \approx 1/2T_f \quad -T_f \leq \Delta \leq T_f \quad (12)$$

이 된다. 즉, Δ 에 미치는 지터의 영향은 극히 작기 때문에 Δ 는 구간 $[-T_f, T_f]$ 에서 균일한 랜덤 변수로 취급할 수 있다.

따라서 상관기의 출력 y_{ν} 는 서로 독립적인 가우시안 랜덤 변수라고 가정하고 이때, 평균값과 분산은 다음과 같다.

$$E[y_m] = \begin{cases} \alpha\sqrt{E_p}E_c[D_m] + E_{\Delta}[n_I] & \text{signal} \\ E_{\Delta}[n_I] & \text{no signal} \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{Var}[y_m] = \begin{cases} \alpha^2 E_p \sigma_{D_m}^2 + \sigma_j^2 + N_0/2 & \text{signal} \\ \sigma_j^2 + N_0/2 & \text{no signal} \end{cases} \quad (14)$$

III. 다중 사용자 UWB 시스템의 용량 계산.

이 논문에서 사용할 파형은 일반적인 형태의 가우시안 모노 사이클이고 식(15)와 같다[4].

$$p(t) = A_g \left[1 - \left(\frac{t}{\sigma} - 3.5 \right)^2 \right] e^{-0.5 \left(\frac{t}{\sigma} - 3.5 \right)^2} \quad (15)$$

여기에서 σ 는 펄스의 폭을 결정하는 파라미터이고 $T_p = 7\sigma$ 이다, 이때 펄스폭 T_p 는 전체 에너지중 99% 이상을 포함하도록 결정하였다. A_g 는 $p(t)$ 의 에너지를 1로 정규화하기 위한 값이다.

또한 $\int_{-\infty}^{\infty} p(t) dt = 0$ 을 만족한다. 식(15)의 상관함수는 다음과 같이 계산된다.

$$\chi(\tau) = \left[1 - \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)^4 \right] \exp \left[- \left(\frac{\tau}{2\sigma} \right)^2 \right] \quad (16)$$

식(13)와 (14)를 계산하자. D_m 의 평균값과 분산은 식 (17), (18)과 같이 계산된다.

$$E[D_m] = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(\epsilon^i) f(\epsilon^i) d\epsilon^i \quad (17)$$

$$\sigma_{D_m}^2 = \alpha_1^2 E_p \{ E[\chi(\epsilon^i)^2] - E[D_m]^2 \} \quad (18)$$

또한 다중 사용자 간섭, n_I 은 $E[n_I] = 0$ 이며, 분산은 식(19)와 같다.

$$\sigma_j^2 = \sum_{j=1}^{N_s} \alpha_j^2 E_p \sigma_a^2 \quad (19)$$

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{2T_f} \int_{-\infty}^{\infty} \gamma^2(\tau) d\tau \quad (20)$$

이상의 결과를 이용하여 SNR(신호 대 잡음비)을

$$C(\rho_0, \rho_+) = \log_2 M - E_{v|x_1} \log_2 \sum_{j=1}^M \exp \left[\frac{\rho_+}{\rho_0 + \rho_+} \sqrt{\rho_0} (v_j - v_1) + \frac{\rho_0}{\rho_0 + \rho_+} \frac{(v_j^2 - v_1^2)}{2} \right] \quad (23)$$

계산하면 다음과 같다.

$$\rho_t = \frac{E[D_m]^2}{\sigma_{D_m}^2 + (N_u - 1)\sigma_a^2 + N_0/2E_p} \quad (21)$$

PPM 용량 계산을 위하여 그림 1과 같은 통신 시스템을 고려하자[7]. k-bit의 정보 소스의 출력

$U = \{U_1, \dots, U_k\}$ 는 M-진 PPM 변조기를 통하여 $M (= 2^k)$ 개의 심볼 $X = \{X_1, \dots, X_M\}$ 로 변환된다. 즉, X 는 U 의 함수이기 때문에, 채널의 출력 Y 를 분석함으로써 입력 U 에 관한 정보의 평균 비트 $I(Y; X)$ 를 구할 수 있다. 이때 $I(Y; X)$ 는 Y 와 X 사이의 상호 정보량이다. 특정 채널 상에서 PPM 변조의 용량은 신뢰성 있게 전송될 수 있는 정보의 최대량을 의미하며

$C = \max_{p(X)} I(Y; X)$ 로 주어진다. 직교신호의 대칭성 때문에 용량은 동등한 확률 분포를 갖는 M-진 정보원의 경우 얻어질 수 있다(즉, $p(X = \mathbf{x}) = 1/M, \forall \mathbf{x} \in \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$).

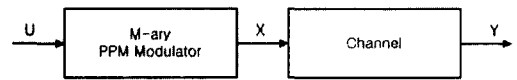


그림 1 PPM 용량 계산을 위한 모델
Fig. 1 Model for PPM capacity calculation

전송된 신호가 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_i$ 인 경우 수신된 벡터 \mathbf{y} 의 성분은 다음 식과 같이 주어지는 Gaussian 랜덤 변수이다.

$$y_j \text{ is } \begin{cases} N(m_1, \sigma_1^2) & \text{signal} \\ N(m_0, \sigma_0^2) & \text{no signal} \end{cases} \quad (22)$$

식(22)에 사용된 결과는 표 1과 같다. PPM 신호의 대칭성을 이용하여, 채널 용량을 계산하면[7] 식(23)과 같다. 여기에서 $E_{v|x_1}$ 는 \mathbf{x}_1 이 송신된 경우 평균값을 의미한다.

$$v_j \text{ is } \begin{cases} N\left(\sqrt{\rho_0}, \frac{\rho_0 + \rho_+}{\rho_+}\right) & \text{if } j=1 \\ N(0, 1) & \text{if } j \neq 1 \end{cases} \quad (24)$$

이때,

$$\rho_0 = (m_1 - m_0)^2 / \sigma_0^2$$

$$\rho_+ = (m_1 - m_0)^2 / (\sigma_1^2 - \sigma_0^2)$$

이고, ρ_+ 는 순수한 지터 성분에 의한 잉여 SNR을 나타내고 있다. $\rho_+ \rightarrow \infty$ 인 경우, ρ_0 는 지터의 영향을 무시한 경우의 SNR이 된다. 일반적으로, 식(23)은 해석적으로 계산할 수 없기 때문에 Monte-Carlo(MC) 시뮬레이션을 통하여 구한다.

표 1 식 (22)에 사용된 수식
Table 1. The formula used in eq. (22)

y_j	신호 존재	신호 부재
평균	$m_1 = \frac{\alpha\sqrt{E_p}E_s[D_m]}{E_d[n_i]}$	$\sigma_1^2 = \alpha^2 E_p \sigma_{D_m}^2 + \sigma_I^2 + N_0/2$
분산	$m_0 = E_d[n_i]$	$\sigma_0^2 = \sigma_I^2 + N_0/2$

IV. 결과 검토

이번 장에서 모든 계산은 표 2의 값을 사용하였다. 그림 2는 AWGN 채널 환경에서 256PPM 시스템의 용량을 MC 시뮬레이션을 통하여 계산하였다. 이때 여러 RMS 지터 값을 파라미터로 하였다. 또한 x축의 비트 SNR은 최소 비트 SNR을 사용하였다. 여기서 최소 비트 SNR은 각 채널에 대하여 $\rho_b = \rho_0/2C$ 로 정의한다. 이때 C 는 용량이다. 그림 2에서 지터가 고려되지 않으면, 일반적인 AWGN 환경의 결과와 같고 이때 그림에서 보듯이 대략 -1.57dB에서 장벽 임계치(brick-wall threshold)가 얻어진다. RMS 지터가 존재하는 경우 최소 비트 SNR에 따른 용량은 지터가 없는 경우에 접근한다. 그러나 고정된 비트 SNR에서 지터가 존재함에 따라서 채널용량이 감소하게 된다.

그림 3은 RMS 지터에 따른 용량을 사용자의 수 (N_u) 및 심벌당 비트의 수(k)를 파라미터로 하여 계산하였다. 이때, $E_p/N_0 = 15dB$, 그리고 $T_f = 500T_b$ 로 하였다. 이때, $T_f/T_b = 500$ 이다.

단일 사용자의 경우, 이진(k=1) 혹은 4-PPM (k=2)와 같이 k가 작을 때, RMS 지터가 작으면 지터의 영향은 작다. 그러나 RMS 지터의 값이 커지게 되면, 타이밍 지터는 UWB 시스템에 매우 큰 영향을 미치게 되며, 이에 따라 RMS 지터에 의해 용량의 감소는 급격히 진행된다. 이러한 현상은 동시 사용자의 수가 커지면 더욱 심화된다. 또한, 사용자의 수가 1인 경우와 200인 경우를 비교하면, 사용자의 수가 증가할수록 지터는 더욱 나쁜 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 심벌 당 비트(k)의 값이 클수록 더욱 심하다.

표 2 계산에 사용된 parameter
Table 2. Parameters used in the calculation

이름	기호	값
펄스 폭	T_b	0.7ns
펄스폭 파라미터	σ	0.1ns
펄스 반폭 주기	T_f	$500T_b$
펄스 반복 횟수	N_s	1

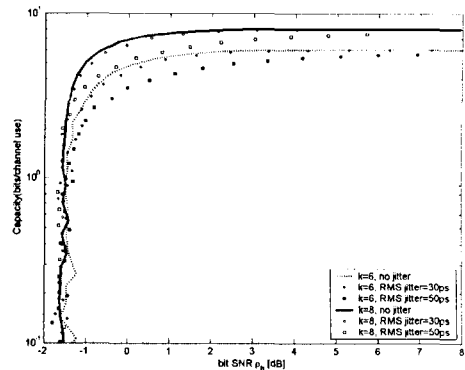


그림 2 AWGN 채널 환경에서 256PPM 용량
Fig. 2 256PPM capacity on the AWGN channel.

그림 4은 집합적인 개념의 용량을 나타내었다 (즉, $N_u C$ 를 그린 것이다). 이때, RMS 지터는 30ps 이다(수신기, 송신기, 그리고 트래킹 지터를 각각 10ps 로 가정). 그림에서 보듯이 사용자의 수가 증가함에 따라서 거의 일정한 값으로 수렴함을 볼 수 있다. 그리고 지터의 영향은 사용자의 수가 많을수록 더욱 심각해지며, k(bits/symbol)값이 증가함에 따라서 더욱 용량을 감소시키는 경향이 있다. 즉 동시 사용자의 수가 많을수록 UWB 통신 시

스택의 지터를 줄여주는 것이 필요하며, 이들을 효과적으로 묘사하고 이들 영향을 줄일 수 있는 방법의 고안이 필요하다.

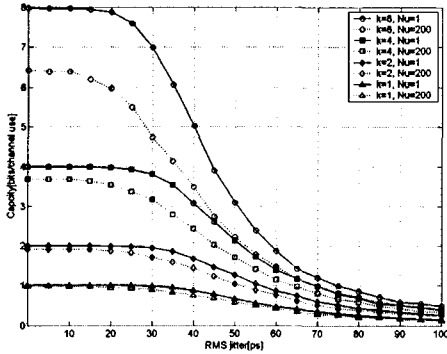


그림 3 RMS 지터에 따른 UWB M-PPM 통신 시스템의 용량 계산
Fig. 3 Capacity of M-PPM UWB communication system with RMS jitter.

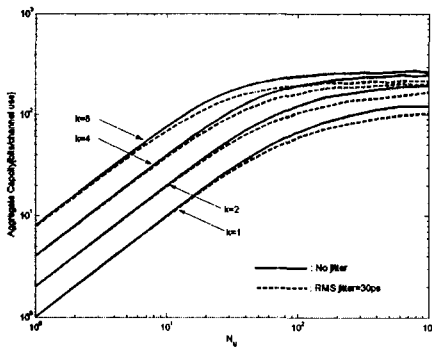


그림 4 사용자 수에 따른 용량계산
Fig. 4 The capacity with the number of users

IV. 결 론

이 논문에서는 타이밍 지터를 고려한 TH-PPM UWB 통신 시스템에서 채널 용량을 계산하였다. 다중 사용자 환경 및 AWGN 잡음 채널을 고려하였으며, 타이밍 지터는 평균이 영인 정규 분포를 갖는 것으로 고려하였다. 이들의 조건을 고려한 UWB 통신 시스템의 용량을 계산하는 방법을 제시하였고 그 계산 방법을 설명하였다. 또한, 이들을

고려한 용량 계산 결과를 설명하였다. 전체적으로 보면, 타이밍 지터는 심볼당 비트의 수($k, M=2^k$)가 증가할수록 더욱 큰 영향을 미치며, 동시 사용자의 수가 증가할수록 보다 심한 영향을 미치게 된다. 또한, 사용자수의 증가는 현재 발표된 UWB 시스템을 위한 클록 지터를 고려한 경우에 상당한 성능의 감소를 초래할 것이라는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] M.Z. Win, R.A. Scholtz, "Ultra-wide bandwidth Time-Hopping Spread Spectrum Impulse Radio for Wireless Multiple-Access Communications," IEEE Trans. on Comm, Vol 48, pp.679-691, 2000.
- [2] F. Ramirez-Mireles, "Performance of Ultrawideband SSMA using Time Hopping and M-ary PPM, IEEE J. on Sel. Areas in Comm., Vol.19, pp.1186-1196, 2001.
- [3] J.D. Choi, W.E. Stark, "Performance of Ultra-Wideband Communications with Suboptimal Receivers in Multipath Channels," IEEE J. on Sel. Areas in Comm., Vol.20, pp.1754-1766, 2002.
- [4] L. Zhao, A.H. Haimovich, "Performance of Ultra-Wideband Communications in the Presence of Interference," IEEE J. on Sel. Areas in Comm., Vol.20, pp.1684-1691, 2002.
- [5] W. M. Lovelace, J.K. Townsend, "The Effects of Timing Jitter and Tracking on the Performance of Impulse Radio," IEEE J. on Sel. Areas in Comm., Vol.20, pp.1646-1651, 2002
- [6] D. Rowe, B. Pollack, J.Pulver, W. Chon, P.Jett, L. Pullerton, L. Larson, "A Si/SiGe HBT Timing Generator IC for High-Bandwidth Impulse Radio Application, Proc. IEEE 1999, CICC, pp.221-224, 1999
- [7] S. Dolinar, D. Divsalar, J.Hamkins, F.Pollara, "Capacity of Pulse-Position Modulation(PPM) on Gaussian and Webb Channels," TMO Process Report 42-142, Aug. 15, pp.1-31, 2000.

저자소개



박장우(Jangwoo Park)

1987.2 한양대 전자공학과(공학사)

1989.3 한양대 대학원 전자공학과(공학석사)

1993.8 한양대 대학원 전자공학과(공학박사)

현재 : 순천대학교 정보통신공학부 부교수

관심분야:UWB 통신 시스템, 통신 시스템 ASIC.