

무선 통신 시스템의 전력 모델을 이용한 비트당 최소 에너지

Minimum Energy Per Bit by Power Model in the Wireless Transceiver System

최재훈 · 조병각 · 백광훈 · 유흥균

Jae-Hoon Choi · Byung Gak Jo · Gwang Hoon Baek · Heung-Gyoon Ryu

요 약

본 논문은 RF power model과 주파수 대역의 특성을 이용한 비트 당 에너지와 전송량과의 관계를 시스템 대역폭의 변화에 따라 분석한 논문이다. 기존에 제안된 RF power model은 각각의 디바이스의 소모 전력을 수치적으로 표현한 것이다. 이 전력 모델에 고려된 요소는 시스템의 전송 대역과 PAR, 데이터 전송량, 변조 레벨, 전송, 전송 거리 등이다. 본 논문에서는 이러한 영향을 고려하여 RF power model과 주파수 대역의 특성을 이용한 비트 당 에너지와 전송량의 관계를 시스템 대역폭의 변화에 따라 분석하였다. Shannon capacity 공식과 신호의 SNR에 대한 식, 그리고 RF power model의 소모 전력을 이용하여 해당 주파수에서의 소모 전력을 구하고, Gbps급 데이터 속도에 따른 비트 당 에너지의 최소 값을 찾기 위한 시뮬레이션을 진행하였다.

Abstract

In this paper, we analyze the relationship between energy per bit and the data rate with the variation of the system bandwidth. A existing power model is mathematical model to express power consumption of each device. In this paper, we have to investigate the system level energy model for the RF front-end of a wireless transceiver. Also, the effects of the signal bandwidth, PAR, date rate, modulation level, transmission distance, specific attenuation of frequency band, and the signal center frequency on the RF front-end energy consumption and system capacity are considered. Eventually, we analyze the relationship between energy per bit and the data rate with the variation of the system bandwidth so that we simulate the minimum energy per bit in the several Gbps data rate using Shannon capacity theory.

Key words : Power Model, Power Consumption, Energy Per Bit

I. 서 론

저전력 무선 통신 시스템의 설계는 연구자들에게 지속적으로 큰 관심을 끌고 있는 분야이다. 최근에는 저전력 무선 통신 시스템을 설계하기 위한 접근 방법들이 제안되었으며, 그 방법으로는 변조 방식에 변화를 주는 방식^{[1]~[3]}, 멀티-홉 방식과^[4] 스케줄링을 통한 방식이 있다^[5]. 이러한 접근 방식은 디지털 파

트에서의 전력 소모에 초점을 맞추고 있는 것이 대부분이다. 그러나 무선 통신 시스템에서의 전력 소모는 대부분 RF 파트에서 발생하게 된다. 그 예로, Intersil의 PRISM II 칩셋을 기반으로 하는 IEEE 802.11b 무선 랜 카드의 경우 RF front-end에서의 전력 소모가 75 %에 달한다. 그런 이유로, 무선 통신 시스템을 설계할 때 RF 파트의 정확한 전력 소모를 예측하여 시스템을 설계하기 위해 RF 파트의 전력

「본 연구는 2011년도 국방과학연구소의 위탁연구비 지원에 의해 수행되었다(계약번호 UD110028ED).」

충북대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20110818-089

· 교신저자 : 유흥균(e-mail : ecomm@cbu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 11월 21일

모델이 필요하다.

최근 RF 송수신기의 전력 모델이 제안되었다^[6]. 이 제안된 모델은 송신기와 수신기의 각각의 장치들을 모델링하였으며, RF 전력 모델을 이용하여 시스템의 품질을 분석하였다. 그러나, 이 논문에서 사용된 모델은 거리에 따른 자유 공간 손실만이 고려되었으며, 주파수 대역의 특성이 반영되어 있지 않다. 또한, 시스템의 capacity에 대한 분석이 없이 단지 시스템의 BER 특성과 PAR 특성만을 분석하였다.

또한 무선 송수신기의 에너지 효율을 나타내기 위한 방식으로, 통신 방식에 의한 전력 소모와 송수신기의 전력 효율을 이용한 방식이 제안되었다^[7]. 이 방식은 서로 다른 변조 방식에 대하여 에너지 효율을 비교하기 위한 기준점을 제시하였으나, 전력 모델을 이용한 비트당 에너지에 대한 부분은 거론하지 않았다.

따라서 본 논문에서는 신호의 대역폭과 PAR, 전송량, 변조 레벨, 송신 거리, 주파수 대역의 특성을 고려하여 RF front-end에서의 에너지 소모와 시스템의 capacity에 대해 1~60 GHz의 주파수 대역에 대해 분석하였다. 이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 이 논문에서 사용한 RF 전력 모델에 대해 서술하며, 3장에서는 주파수 대역에 따른 시스템의 capacity에 대해 분석한다. 마지막으로 4장에서 시스템의 capacity와 신호의 대역에 따른 시스템의 전체 에너지 소모에 대해 알아본다.

II. 전력 소모 모델

2-1 송신기와 수신기 모델

그림 1과 2는 시스템의 모델링에 사용된 무선 송신기와 수신기의 구조를 나타낸다^[6]. 송신기는 DAC와 filter, mixer, RF synthesizer, PA, RF filter로 이루어져 있으며, 수신기는 band select filter와 mixer, RF synthesizer, LNA, baseband amplifier, baseband filter, ADC로 이루어져 있다. 송신기와 수신기의 동작 상태는 3가지로 나뉘게 되며, (1) Active state : 신호를 전송하거나 신호를 수신, (2) Sleep state : 신호를 전송하거나 수신하고 있지 않는 상태, (3) Transient state : active state에서 sleep state 혹은 sleep state에서 active state로 변화하는 상태로 구분한다. 따라서 시

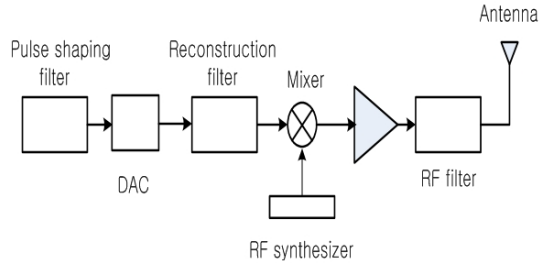


그림 1. 송신기 블록도.

Fig. 1. Basic block diagram of the transmitter.

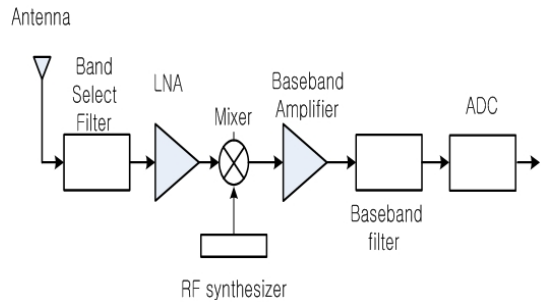


그림 2. 수신기 블록도

Fig. 2. Basic block diagram of the receiver.

스템의 전체적인 에너지 소모는 다음과 같이 정할 수 있다^[6].

$$E_{total} = P_{active} T_{active} + P_{sleep} T_{sleep} + P_{transient} T_{transient} \quad (1)$$

Active state에서의 파워 소모가 가장 크기 때문에, 이 논문에서는 active state에서의 전력 소모만을 고려한다. 따라서 송신 에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다^[9].

$$E_{active} = (P_{PA} + 2P_{mix} + 2P_{FS} + P_{LNA} + P_{filter} + P_{BA} + P_{DAC} + P_{ADC}) T_{active} \quad (2)$$

P_{PA} 는 PA의 전력 소모, P_{mix} 는 mixer의 전력 소모, P_{FS} 는 frequency synthesizer의 전력 소모, P_{LNA} 는 LNA의 전력 소모, P_{filter} 는 filter의 전력 소모이며, P_{BA} 는 baseband amplifier의 전력 소모를 나타낸다.

2-2 전력 모델

이 절에서는 1절에서의 송신기와 수신기 모델의 각 장치들의 전력 소모 모델에 대해 서술한다. 이 논문에서는 기존의 RF 전력 모델을 사용한다^[6].

DAC의 전력 모델은 PAR(Peak-to-average ratio), SQNR(Signal-to-Quantization-Noise Ratio), 신호의 대역에 의한 수학적 모델로 표현할 수 있다.

$$P_{DAC} = V_{dd} \cdot I_0 \cdot \left(2^{\frac{SQNR(dB)+PAR(dB)-4.77dB}{6.02}} - 1 \right) + 0.5 \cdot \frac{SQNR(dB)+PAR(dB)-4.77dB}{6.02} \cdot C_p \cdot OSR \cdot B \cdot V_{dd}^2 \quad (3)$$

Analog filter의 전력 소모는 식 (4)와 같이 정의할 수 있다^[9].

$$P_{filter} = n \cdot kT \cdot Q \cdot f_0 \cdot SNR^2 \quad (4)$$

n 은 filter의 topology에 의해 결정되는 상수이며, Q 는 op-Amp의 RC와 상호 콘덕턴스 C에 의해 변화하는 quality factor, SNR은 filter의 signal-to-noise ratio이다.

또한, integer-N PLL frequency synthesizer의 전력 소모는 다음과 같이 추정된다^[6].

$$P_{pll} = b_1 \cdot C_1 \cdot V_{dd}^2 \cdot F_{LO} + b_2 \cdot C_2 \cdot V_{dd}^2 \cdot F_{ref} \quad (5)$$

C_1 과 C_2 은 RF 회로의 총 parasitic capacitance를 나타내며, F_{ref} 은 reference 주파수, V_{dd} 는 공급 전압이다. VCO의 소모 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$P_{VCO} = R \cdot I_{pk}^2 = C \frac{R}{L} V_{pk}^2 = RC^2 \omega_c^2 V_{pk}^2 = \frac{R}{L^2 \omega_c^2} V_{pk}^2 \quad (6)$$

V_{pk} 는 peak 시의 전압이며, I_{pk} 는 tank 회로의 전류를 나타낸다. 주어진 저항 값과 inductance의 증가에 따라 효율은 증가하게 된다. MQAM 변조 시스템의 경우 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$S_\phi = NEF \cdot \frac{k \cdot T}{2 \cdot P_{sig}} \cdot \frac{\omega_c^2}{Q^2 \Delta \omega^2} \quad (7)$$

$$P_{VCO} = C \cdot \left(\frac{R}{L} \right)^3 \cdot NEF \cdot \frac{k \cdot T}{S_\phi} \cdot \frac{1}{(\Delta \omega)^2} \quad (8)$$

NEF는 발진기에서의 noise excess factor, Q 는 LC 탱크의 quality factor, P_{sig} 는 신호 파형의 파워, $\Delta \omega$ 는 중심 주파수의 주파수 오프셋을 나타낸다.

Mixer의 전력 소모 모델은 noise figure NF 와 gain K 로 표현할 수 있다^[8].

$$P_{mixer} = k_{mixer} \cdot K / NF \quad (9)$$

LNA는 수신기에서의 noise figure의 영향을 받게 된다. 따라서 noise figure NF 와 gain A 의 식으로 표현할 수 있다^[9].

$$P_{LNA} = k_{LNA} \cdot A / NF \quad (10)$$

Class A PA의 효율은 출력 파워의 RM에 비례하게 된다^[9].

$$\eta = \frac{P_{rms}}{P_{PA}} = \frac{P_{out}}{P_{out_max}} \cdot K = \frac{K}{PAR} \quad (11)$$

따라서 PA의 소모 전력은 다음과 같이 유도되며,

$$P_{PA} = \frac{P_{rms}}{K} \cdot PAR \quad (12)$$

PA의 전력 모델은 식 (13)으로 나타낼 수 있다^[6].

$$P_{PA} = \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot d^2 \cdot L}{3G_r G_i \lambda^2 \cdot K} (2^b - 1) \cdot N \cdot \left(Q^{-1} \left(\frac{1}{4} \left(1 - \frac{1}{2^{b/2}} \right)^{-1} SER \right) \right)^2 PAR \quad (13)$$

G_r 과 G_i 는 각각 송신기와 수신기의 안테나 이득을 나타내며, d 는 송신 거리, L 은 시스템 손실, λ 은 반송파의 파장을 나타낸다. 위의 식 (13)은 M-

표 1. RF 전력 소모^[6]
Table 1. RF power consumption^[6].

	Power model function	PAR=10 dB
PA	P (PAR, d, b, SER)	246 mW
Mixer	P (K, NF)	30.3 mW
F.S	P (ω_c , F_{LO} , F_{ref})	67.5 mW
LNA	P (A, NF)	20 mW
ADC	P (PAR, SNR, f)	5.85 mW
DAC	P (PAR, SNR)	2.43 mW
Filter	P (SNR, f)	5 mW
BA	P (B, α_{BA})	5 mW

QAM에 의한 수식으로 다른 변조 방식을 사용하는 시스템의 경우 Q함수가 변경되어야 한다.

III. 시스템 용량

이 절에서는 시스템의 capacity에 채널 환경이 미치는 영향에 대해 서술한다. ITU-R 채널 모델(ITU-R 676-1)중에서 대기에 의한 감소 모델(dry-air)과 수증기에 의한 감소 모델(water vapor)을 사용하였다. 또한, Shannon capacity 수식을 이용하여 주파수 대역의 변화에 따른 시스템의 capacity 변화를 시뮬레이션 하였다.

3-1 신호 감쇄 모델

대기에 의한 신호 감쇄 모델은 지표면(기압=1,013 hPa) 15 °C의 환경에서 다음과 같이 나타낼 수 있다^[10].

$$\gamma_{dry} = \left\{ 7.19 \times 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.50} \right\} f^2 10^{-3} \text{ dB/km}$$

for $f < 57 \text{ GHz}$. (14)

또한, 수증기에 의한 신호 감쇄 모델은 지표면(기압 = 1,013 hPa) 15 °C의 환경에서 다음과 같이 나타낼 수 있다^[10].

$$\gamma_w = \left\{ 0.050 + 0.0021\rho + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f - 183.3)^2 + 9.0} + \frac{8.9}{(f - 325.4)^2 + 26.3} \right\} f^2 \rho 10^{-4} \text{ dB/km}$$

for $f < 350 \text{ GHz}$ (15)

f 는 GHz 단위의 신호 주파수를 의미하며, ρ 는 대기 중의 수증기 밀도를 나타낸다(g/m^3).

그림 3은 식 (14)와 (15)를 이용하여 시뮬레이션 한 결과이다. 1~50 GHz 범위의 주파수에서는 큰 전력 감쇄가 일어나지 않으나, 50~60 GHz에서 dry air에 의한 감쇄가 크게 일어나는 것을 확인할 수 있다.

3-2 시스템 용량

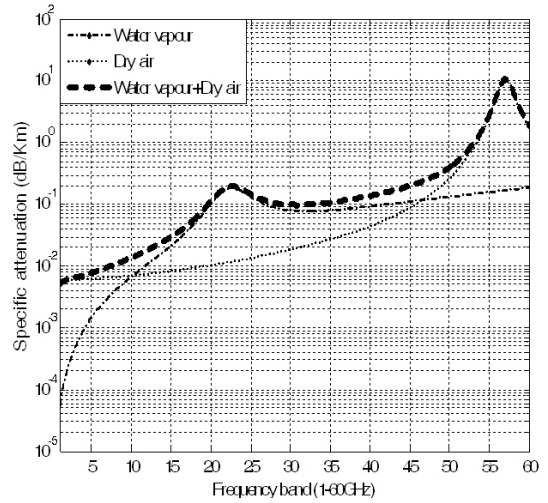


그림 3. 대기와 수증기에 의한 신호 감쇄(1~60 GHz 주파수 대역)

Fig. 3. Specific attenuation - dry air and water vapour condition(1~60 GHz frequency band).

수신기에서의 SNR은 수신 신호의 파워와 시스템의 noise floor에 의해 결정된다. 따라서 변조기에 입력되는 신호의 SNR은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[11].

$$SNR_{dem} = \frac{SNR_r}{F} = \frac{P_{out} \cdot G_r \cdot G_t}{PL \cdot F \cdot KTB} \quad (16)$$

PL 은 자유 공간에 의한 신호의 감쇄이며, F 는 noise factor를 나타낸다. 식 (13)은 자유 공간 감쇄만이 존재하는 환경에서의 SNR을 나타낸다. 따라서, 식 (13)에 식 (14)와 (15)의 감쇄 모델을 포함하여 식 (17)로 표현할 수 있다.

$$SNR_{dem} = \frac{SNR_r}{F} = \frac{P_{out} \cdot G_r \cdot G_t}{PL \cdot F \cdot KTB \cdot L_{sp}} \quad (17)$$

L_{sp} 는 식 (13)과 (14)로 표현되는 대기와 수증기에 의한 신호 감쇄이다.

$$C = B \log_2(SNR + 1). \quad (18)$$

식 (18)은 Shannon의 채널 용량에 대한 공식으로, 식 (17)에서 유도한 변조기의 SNR을 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 이 식은 주파수 대역에 따른 주파수 특성의 변화가 포함된 시스템의 용량을 나타낸다.

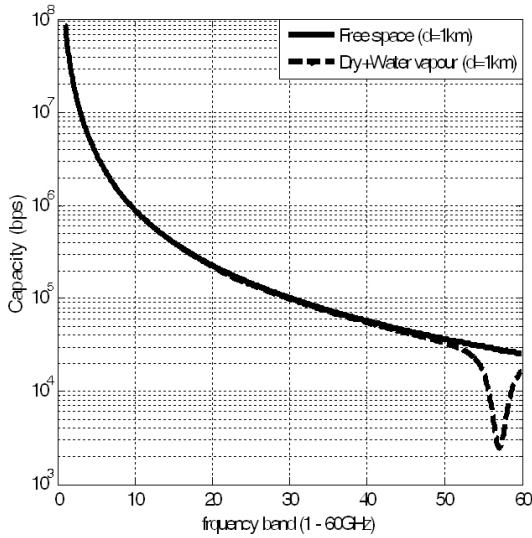


그림 4. 시스템 용량
Fig. 4. System capacity using Shannon capacity.

$$C = B \log_2 (SNR_{dem} + 1). \quad (19)$$

그림 4는 주파수 대역의 변화에 따른 시스템 capacity의 변화를 시뮬레이션한 결과이다. 송신 거리 $d=1$ km, 출력 신호의 전력 P_{out} 은 10 dBm, noise factor=6 dB, 대역폭은 1.5 GHz이며, 수신기와 송신기의 안테나 이득은 1이다. 이 결과에서 시스템의 용량은 주파수 대역이 증가함에 따라 감소하는 것을 볼 수 있으며, 53~60 GHz 사이에 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 3에서 볼 수 있듯이 53~60 GHz 대역에서 dry air에 의한 신호 감쇄가 심하게 발생하기 때문에 나타나는 현상이며, 자유 공간에 의한 신호 감쇄는 주파수 대역이 높아질수록 증가하게 된다.

IV. 전력 소모와 비트당 최소 에너지

이 절에서는 주파수 대역에 따른 시스템의 전력 소모를 2절에서 서술한 RF 전력 모델을 사용하여 계산하고 비트당 최소 에너지 E_b 를 찾기 위한 시스템 모델을 제안한다.

테이블 2는 ADC와 PA의 전력 모델의 parameter를 나타낸 것이다. 2절에서 알아 본 것과 같이 주파수 대역의 변화에 의해 전력 소모가 변화하는 것은 PA와 ADC, 그리고 filter이다. 이 3가지 전력 모델 중에

표 2. PA의 ADC 시뮬레이션 파라미터
Table 2. PA and ADC simulation parameter.

	Parameter		Parameter
Bandwidth	20 MHz	SER	10^{-4}
Frequency band	1~60 GHz	G_r	1
Distance	1 km	G_t	1
Modulation	QPSK, 16QAM	Loss	0.8
Noise power	-101 dBm	V_dd	3 V
Roll-off factor	0.2	L_min	0.4 um

서는 PA의 전력 소모가 가장 크며, 변조 레벨이 변화하게 되면 소모 전력 또한 변화하게 된다^[6].

본 논문에서는 송신기와 수신기의 3가지 동작 상태 중, active 상태만을 고려했기 때문에 시스템의 전체 전력 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{total} = 2P_{mixer} + 2P_{FS} + P_{LNA} + P_{filter} + P_{BA} + P_{PA} + P_{ADC} + P_{DAC}. \quad (20)$$

그림 5는 주파수의 대역과 변조 레벨의 변화에 따른 시스템의 총 전력 소모를 시뮬레이션한 결과이다. 신호의 중심 주파수가 동일할 경우, 변조 레벨에 의해 전력 소모가 변화하는 것을 볼 수 있다. 이것은 변조 레벨의 증가에 의한 PAR과 요구되는 SNR 값이 증가하여 PA의 전력 소모가 증가하였기 때문이다.

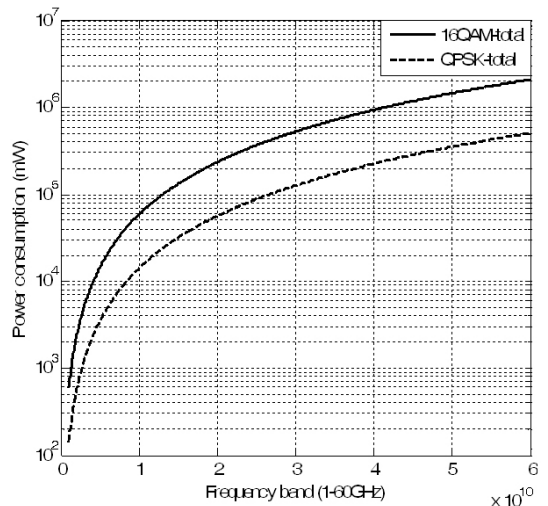


그림 5. 시스템의 총 전력 소모량
Fig. 5. System total power consumption using RF power model.

식 (17)에서 유도한 SNR 식과 식 (19)의 Shannon capacity 공식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SNR_{dem} = 2^{\frac{\varepsilon \cdot R}{B}} - 1 = \frac{P_{out} \cdot G_r \cdot G_t}{KTB \cdot PL \cdot F \cdot L_{sp}} \quad (21)$$

ε 은 $\varepsilon \geq 1$ 의 상수이며, 이 논문에서는 1로 가정한다.

식 (21)을 송신 전력의 식으로 변형하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = \frac{KTB \cdot PL \cdot F \cdot L_{sp}}{G_r \cdot G_t} \cdot \left(2^{\frac{\varepsilon \cdot R}{B}} - 1 \right) \quad (22)$$

따라서, 시스템의 총 에너지 소모는 식 (23)으로 정리된다.

$$E_{tot} = \left(\frac{P_{out}}{\eta} + P_{mixer} + P_{FS} + P_{filter} + P_{DAC} \right) \cdot T_i + P_r \cdot T_r \quad (23)$$

P_r 은 수신기에서의 전력 소모를 나타내며, LNA, BA, mixer, frequency synthesizer, filter, base-band amplifier, ADC의 전력 소모이다. P_r 은 2절에서의 RF 모델에 의해 계산된 전력 소모 427.73 mW로 시뮬레이션 하였으며, 이는 60 GHz 대역에서의 전력 소모이다.

$$P_r = P_{mixer} + P_{FS} + P_{LNA} + P_{filter} + P_{BA} + P_{ADC} \quad (24)$$

송신기와 수신기의 동작 시간을 고려한 시스템의 전체적인 전력 소모는 식 (25)로 표현되며,

$$P_{tot} = E_{tot} \cdot \frac{1}{T_i + T_r} \quad (25)$$

그에 따른 비트당 에너지 E_b 는 식 (26)로 정리할 수 있다.

$$E_b = P_{tot} \cdot \frac{1}{R_b} \quad (26)$$

식 (23)~(26)를 정리하면, E_b 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_b = \left[\frac{KTB \cdot PL \cdot F \cdot L_{sp}}{G_r \cdot G_t \cdot \eta} \cdot \left(2^{\frac{\varepsilon \cdot R}{B}} - 1 \right) \cdot T_i + P_r \cdot T_r \right] \cdot \frac{1}{T_i + T_r} \cdot \frac{1}{R_b} \quad (27)$$

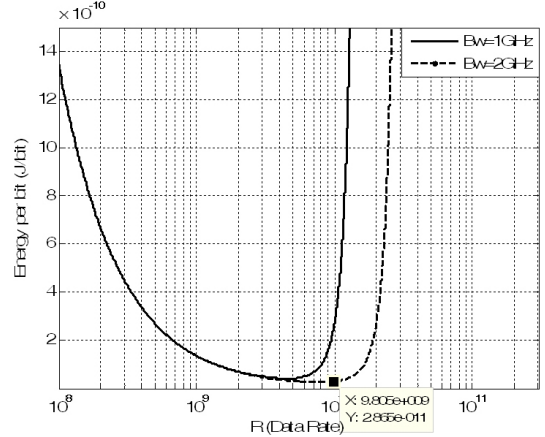


그림 6. 비트당 에너지
Fig. 6. Energy per bit.

그림 6은 data rate R 의 변화에 따른 비트당 에너지를 시뮬레이션할 결과이다. 중심 주파수는 60 GHz이며, $P_{out} / \eta = 20$ mW, 송신 거리는 20 m, $\varepsilon = 1$, $\eta = 5\%$, $F = 12.6$ 이다. $R < 5$ Gbps에서의 비트당 에너지는 1 GHz와 2 GHz의 주파수 대역에서 동일한 것을 알 수 있다. 그러나 5 Gbps 이상의 data rate에서는 1 GHz의 주파수 대역을 사용하는 시스템의 비트당 에너지가 2 GHz의 대역폭을 사용하는 시스템에 비해 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 Shannon capacity의 식에 의하여 비트당 에너지는 $2^{\frac{\varepsilon \cdot R}{B}}$ 에 의하여 증가하기 때문이며, 대역폭이 클수록 시스템의 용량도 증가할 뿐만 아니라, 비트당 에너지도 감소시킬 수 있다. 또한, 한계치의 data rate를 넘어서는 경우 비트당 소모 에너지가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 Shannon capacity에 의해 제한되는 전송 용량을 넘어서게 되기 때문에 급격한 전력 소모를 보이게 되는 것이다.

V. 결 론

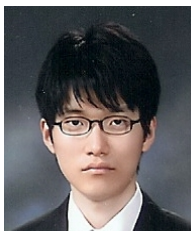
본 논문은 기존의 RF 전력 모델을 이용하여, 신호의 대역, PAR, Symbol rate, 변조 레벨, 전송 거리, 주파수의 감쇄 특성, 반송파의 주파수 대역이 RF front-end의 전력 소모에 미치는 영향에 대해 1~60 GHz의 주파수 대역에 대해 분석하였다. 또한, 신호의 대역이 비트당 에너지에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 시스템의 전력 소모는 이미 알려졌듯이

주파수의 대역이 증가함에 따라 증가하기 때문에 시스템의 전송 거리를 고정하였을 경우, 주파수의 대역이 올라 갈수록 시스템의 전력 소모는 증가하게 되며, 시스템의 capacity는 감소하게 된다. 그러나 IV에서 알아보았듯이 신호의 대역폭은 데이터 전송량은 물론이며, 비트당 에너지에도 큰 영향을 미치게 되는 것을 알 수 있다. 따라서, 전송 신호의 대역폭 확보가 비교적 용이한 높은 주파수 대역에서의 전송이 주파수에 의한 신호 감쇄가 크다고 하여도 근거리의 대용량 전송에 유리하다.

참 고 문 헌

- [1] D. K. Kim, H. S. Lee, "Phase-silence-shift-keying for power-efficient modulator", *IEICE Trans. Communication.*, vol. E92-B, no. 6, Jun. 2009.
- [2] J. Y. Oh, J. K. Kim, H. S. Lee, S. S. Choi, and D. S. Ha, "Phase rotation shift keying for low power and high performance WBAN in-body systems", in *Proc. Information and Communication Technology Convergence. ICTC 2010.*, Nov. 2010.
- [3] J. H. Choi, H. G. Ryu, "A QAPM(Quadrature Amplitude Position Modulation) for low power consumption communication", *Wireless Pervasive Computing, 2011 ISWPC'2011*, Feb. 2011.
- [4] R. Ramanathan, R. Rosales-Hain, "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment", in *Proc. IEEE INFOCOM 2000.*, Mar. 2000.
- [5] Weilan Huang, K. B. Letaief, "Cross-layer scheduling and power control combined with adaptive modulation for wireless ad hoc networks" in *Proc. Global Telecommunications Conference, GLOBECOM'2005*, Dec. 2005.
- [6] Ye Li, Bertan Bakkaloglu, "A system level energy model and energy-quality evaluation for integrated transceiver front-ends", *IEEE Trans. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 15. no. 1, pp. 90-103, Jan. 2007.
- [7] Andrew Y. Wang, Charles G. Sodini, "On the energy efficiency of wireless transceivers", in *Proc. IEEE ICC'2006*, Jun. 2006.
- [8] P. Wambacq, G. Vandersteen, and S. Donnay, et al., "Higher-level simulation and power modeling of mixed-signal front-ends for digital communications", in *Proc. IEEE ICECS*, pp. 525-528, 1999.
- [9] G. Hanington, P. F. Chen, P. M. Asbeck, and L. E. Larson, "High-efficiency power amplifier using dynamic power-supply voltage for CDMA applications", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 8, pp. 1471-1476, Aug. 1999.
- [10] ITU-Rec. 676-1, "Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1~350 GHz", 1992.
- [11] Xia Li, Peter Baltus, D. Milosevic, Wei Deng, P. Van Zeijl, N. Bird, and A. van Roermund, "Wireless wire-the 60 Ghz ultra-low power radio system", in *Proc. Radio and Wireless Symposium. RWS' 2009*, Jan. 2009.

최 재 훈



2010년 2월: 충북대학교 전기전자 컴퓨터공학부 (공학사)
 2010년 3월~현재: 충북대학교 전자 공학과 석사과정
 [주 관심분야] 무선 통신 시스템, 인체통신 시스템

조 병 각



2000년 2월: 아주대학교 전기전자 공학부 (공학사)
 2002년 2월: 아주대학교 전기전자 공학부 (공학석사)
 2002년 1월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 [주 관심분야] 위성 통신 시스템, 모뎀

백 광 훈



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
1990년 1월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 위성 통신 시스템, 네트워크, 모뎀

트위크, 모뎀

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 교수
2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
2002년: 한국전자과학회 학술상 수상
2008년: ICWMC 2008 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상

[주 관심분야] 무선 통신 시스템, 위성 통신, B3G/4G 이동 통신 시스템, 통신 회로 설계 및 통신 신호 처리