

소프트웨어 라디오 시스템을 위한 전력 관리 기법

(Power Management for Software Radio Systems)

구본철[†] 박학봉^{**}
(Boncheol Gu) (Xuefeng Piao)

허준영^{***} 전광일^{****}
(Junyoung Heo) (Gwangil Jeon)

조유근^{*****}
(Yookun Cho)

요약 소프트웨어 라디오는 기존에 특화된 하드웨어 칩으로 구현되던 무선 통신 프로토콜을 소프트웨어로 구현하여 실행하는 기술이다. 새로운 프로토콜의 적용과 기존 프로토콜의 수정이 동적인 프로그래밍만으로 가능해지기 때문에 무선 통신 기술의 새로운 패러다임의 변화를 가져왔다. 하지만, 소프트웨어 라디오 시스템은 범용 프로세서와 통신 하드웨어를 동시에 장착하고 있기 때문에 그만큼 전력 소모가 크다. 본 논문에서는 이러한 소프트웨어 라디오 시스템을 위한 전력 관리 기법인 복합 변조/전압 스케일링 기법을 제안한다. 그리고 제안된 기법의 전력 절감 효과를 수치적인 결과를 통해 분석한다. 결과적으로 복합 변조/전

압 스케일링 기법은 주어진 데이터 전송률을 충족시키면서 무선 통신의 변조 레벨과 프로세서의 전압을 효율적으로 조절하여 전력 소모를 최소화시킨다.

키워드 : 소프트웨어 라디오, 전력 관리 기법, 동적 전압 스케일링, 동적 변조 스케일링

Abstract Software defined radio(SDR) technology implements wireless communication protocols as software instead of dedicated hardware. SDR enables reconfiguration of wireless communication protocols without expensive hardware modification. However, as the SDR systems are equipped with additional programmable processors, they suffer significant power dissipation. This paper proposes a novel power management technique for SDR systems, called the combined modulation and voltage scaling (CMVS). Numerical analyses were performed to evaluate the effectiveness of CMVS. The results show that CMVS minimizes power dissipation while satisfying the given data transfer rate.

Key words : Software Radio, Power Management, Dynamic Voltage Scaling, Dynamic Modulation Scaling

1. 서론

소프트웨어 라디오(software-defined radio: SDR) 기술은 무선 통신 프로토콜을 특화된 하드웨어를 통해 구현하지 않고 소프트웨어로 구현하는 기술이다[1,2]. 기존에 특화된 하드웨어에서 구현되던 통신 프로토콜의 신호 처리 작업이 소프트웨어 라디오 기술에서는 프로그래밍 가능한 프로세서에서 실행 가능한 소프트웨어의 형태로 구현된다. 그렇기 때문에, 새로운 프로토콜의 적용은 최소한의 하드웨어 변경과 소프트웨어의 설치만으로 이루어지고 기존 프로토콜의 수정은 동적인 프로그래밍을 통한 소프트웨어의 변경으로 가능해진다. 소프트웨어 라디오 기술에 의해 등장한 새로운 패러다임은 통신 프로토콜의 관리에 큰 변화를 가져왔으며, 차세대 무선 통신의 핵심 기술로서 주목 받고 있다.

하지만, 소프트웨어 라디오 시스템은 범용 프로세서와 통신 하드웨어를 동시에 장착하고 있기 때문에 그만큼 전력 소모가 크다. 본 고에서는 소프트웨어 라디오 시스템을 실용적으로 운용하기 위해서 효율적인 전력 관리 기법을 제안한다. 제안하는 복합 변조/전압 스케일링(Combined Modulation and Voltage Scaling: CMVS)은 소프트웨어 라디오 시스템과 같이 컴퓨팅 시스템의 특성과 통신 시스템의 특성이 혼재하는 시스템에 효과적으로 적용 가능하다. 구체적으로, 주어진 데이터 전송률을 충족시키면서 무선 통신의 변조 레벨과 프로세서의 전압을 효율적으로 조절하여 전력 소모를 최소화시킨다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절은 관련 연구로

· 본 연구는 2010년도 한성대학교 교내연구비 지원과제임
· 이 논문은 2010 한국컴퓨터종합학술대회에서 '소프트웨어 라디오 시스템을 위한 전력 관리 기법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

[†] 학생회원 : 삼성전자

begu@os.snu.ac.kr

^{**} 비회원 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부

hbpark@os.snu.ac.kr

^{***} 종신회원 : 한성대학교 컴퓨터공학과 교수

jiyeo@hansung.ac.kr

(Corresponding author)

^{****} 종신회원 : 한국산업기술대학교 컴퓨터공학과 교수

gijeon@kpu.ac.kr

^{*****} 종신회원 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수

cho@cse.snu.ac.kr

논문접수 : 2010년 8월 11일

심사완료 : 2010년 10월 5일

서 동적 전압 스케일링과 동적 변조 스케일링을 소개한다. 3절은 소프트웨어 라디오 시스템을 위한 전력 관리 기법인 복합 변조/전압 스케일링을 제안한다. 4절은 제안된 기법의 수치적인 결과를 통해 성능을 분석한다. 마지막으로, 5절에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

장치의 성능을 저하하지 않고 전력소모를 줄이는 가장 간단한 방법은 장치가 사용 중이지 않을 때는 장치의 전원을 차단시키는 것이다. 하지만, 단지 장치의 전원을 차단하는 대신, 장치의 특성 인자를 조절함으로써 보다 효과적으로 소모 전력을 감소시키는 획기적인 방법이 제안되었다. 바로 동적 전압 스케일링과 동적 변조 스케일링이다.

2.1 동적 전압 스케일링

동적 전압 스케일링(Dynamic Voltage Scaling: DVS)은 시스템의 성능을 저해하지 않는 범위에서 전압을 최대한 낮춤으로서 전력 소모를 줄이는 기법이다[3]. 수식 (1)은 프로세서의 전력 소모의 대부분을 차지하는 동적 전력(dynamic power)과 전압, 클럭 주파수 간의 관계를 보여준다.

$$\text{Dynamic power} = C_S \cdot V^2 \cdot f \quad (1)$$

여기서 C_S 는 매 클럭 마다 전환되는 실질적인 커패시턴스이고, V 는 전압, f 는 스위칭 클럭 주파수이다. 이 관계에 따르면, 프로세서의 소모 전력은 전압의 제곱에 비례하기 때문에 전압을 낮춤으로서 전력 소모를 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 일반적으로 전압을 낮추면 클럭 주파수도 낮아지기 때문에 작업 처리 속도도 느려진다. 그러므로 동적 전압 스케일링은 작업 처리 데드라인을 만족시키는 한도 내에서 전압을 최대한 낮춤으로써 전력 소모를 줄인다[4].

2.1 동적 변조 스케일링

동적 전압 스케일링이 회로 이론을 통하여 만들어진 전력 소모 모델을 활용한 기법이라면 동적 변조 스케일링(Dynamic Modulation Scaling: DMS)은 통신 이론을 기반으로 만들어진 디지털 무선 통신 시스템의 전력 소모 모델을 활용한다[5]. 디지털 무선 통신 시스템에서 비트 단위 데이터는 심볼이라고 부르는 독립된 형태를 갖는 파형으로 변환된다. 시스템이 생성하는 파형의 종류의 가지 수에 따라 하나의 심볼이 포함할 수 있는 데이터의 비트 수가 정해지는데, 이를 변조 레벨(modulation level)이라고 부르며 심볼 당 비트수로 표현한다. 이러한 시스템에서의 전력 소모는 식 (2)의 전기 회로 전력과 식 (3)의 송신 전력의 합으로 정의된다[6].

$$\text{Electronics power} = C_H \cdot \frac{R_b}{b} \quad (2)$$

$$\text{Transmit power} = C_T \cdot S(b) \cdot \frac{R_b}{b} \quad (3)$$

여기서 C_T , C_H 는 각 전력 소모 수식에서 시스템 특성값을 상수로 근사 시킨 값이며, b 는 변조 레벨, R_b 는 평균 비트 전송률, $S(b)$ 는 표 1에 표기된 스케일링 함수이다. 수식을 살펴보면 디지털 무선 통신 시스템의 전력 소모는 변조 레벨과 평균 비트 전송률에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그리고, 평균 비트 전송률에 역을 취함으로써 한 비트의 평균 전송 시간을 산출해낸다. 최종적으로 동적 변조 스케일링은 평균 비트 전송 시간이 주어진 조건을 만족시키는 범위 내에서 전력 소모를 최소화하는 변조 레벨을 찾는다.

표 1 변조 방식에 따른 스케일링 함수 $S(b)$ [6]

변조방식	$S(b)$
2^b -QAM	$2^b - 1$
2^b -PSK	$\sin(\frac{\pi}{2^b})^{-2}$
2^b -PAM	$\frac{2^{2b}-1}{3}$

3. 소프트웨어 라디오 시스템을 위한 전력 관리 기법

일반적으로 DVS는 컴퓨팅 시스템에서 적용될 수 있는 기법이고, DMS는 디지털 통신 시스템에서 적용될 수 있는 기법이다. 하지만 소프트웨어 라디오 시스템은 컴퓨팅 시스템에서 신호 처리를 수행하고 안테나를 통해 전파를 송수신하는 무선 통신 시스템으로서 DVS와 DMS를 동시에 적용할 수 있다. 이 절에서는 DVS와 DMS가 소프트웨어 라디오 시스템에 가져오는 효과를 분석하고 이를 토대로 효과적으로 전력을 감소시킬 수 있는 복합 변조/전압 스케일링을 제안한다.

3.1 시스템 모델

이상적인 소프트웨어 라디오 시스템의 구성은 안테나와 아날로그 디지털 변환기(ADC), 디지털 아날로그 변환기(DAC) 그리고 컴퓨팅 프로세서로 이루어진다. 전용 하드웨어로 구현되던 필터링, 변조/복조와 같은 신호 처리 작업은 각각 웨이브폼 소프트웨어로 구현되어 컴퓨팅 프로세서에서 실행된다. 하지만, 현실적인 하드웨어 기술의 한계로 일부 신호 처리 작업은 여전히 하드웨어로 구현되어 있다. 그림 1은 이러한 소프트웨어 라디오 시스템의 구조를 보여준다.

소프트웨어 신호 처리를 위한 컴퓨팅 프로세서, 하드웨어 신호 처리를 위한 RF 프론트엔드(front-end), 그리고 증폭기를 포함한 안테나는 시스템 전력 소모의 대

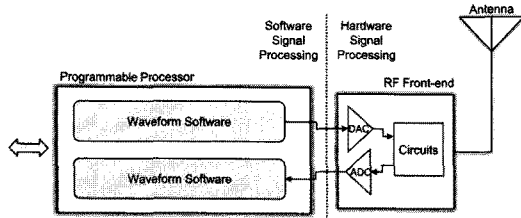


그림 1 소프트웨어 라디오 시스템의 구성

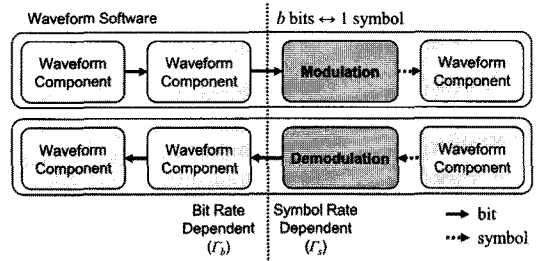


그림 2 웨이브폼 소프트웨어의 구성

부분을 차지하고 있으며, 각각을 P_S, P_H, P_T 로 표기한다. 결국, 소프트웨어 라디오 시스템의 총 전력 소모 P 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = P_S + P_H + P_T \quad (4)$$

P_H, P_T 는 각각 식 (2)와 식 (3)에 의해 구할 수 있지만 P_S 는 변조 레벨과 전압으로 표현되며 앞으로 더 자세히 다룰 것이다. 최종적으로 우리는 주어진 비트 전송률을 만족(동시에 평균 비트 전송시간을 제약)시키면서 전력 소모를 최소화하는 변조 레벨을 구할 것이다. 본 절에서 사용한 표기는 표 2에 요약되어 있다.

3.2 복합 변조/전압 스케일링

소프트웨어 라디오 시스템에서 하나의 프로토콜은 하나의 웨이브폼 소프트웨어로 구현된다. 웨이브폼 소프트웨어는 프로세서에서 주기적으로 실행되는 작업으로서 한 주기 동안의 실행 시간 T_W 와 한 주기 동안의 비트 단위의 데이터 처리량 k 를 정의할 수 있다. 주기의 길이 T_P 는 주어진 비트 처리율 R_b 에 따라 가변적으로 정해지며, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_P = \frac{k}{R_b} \quad (5)$$

표 2 표기

표기	정의
R_b	비트 처리율 (단위 시간당 처리 비트수)
R_s	심볼 처리율 (단위 시간당 처리 심볼수)
P	전체 시스템의 소모 전력 ($= P_S + P_H + P_T$)
P_S	소프트웨어 신호처리의 소모 전력
P_S'	변조 스케일링이 적용된 P_S
P_H	하드웨어 신호처리의 소모 전력
P_T	전파 송수신의 소모 전력
C_H	R_b 와 P_H 와의 관계를 나타내는 에너지 상수
C_T	R_b 와 P_T 와의 관계를 나타내는 에너지 상수
C_S	프로세서의 실질적인 커패시턴스
f	프로세서의 최대 클럭 주파수
V	프로세서의 클럭이 f 일 때의 공급 전력
P_{Smax}	프로세서의 처리속도가 최대일 때 소모 전력
b	모듈레이션 레벨 (심볼당 비트수)
Γ_b	비트 전송을 위한 웨이브폼 컴포넌트 집합
Γ_s	심볼 전송을 위한 웨이브폼 컴포넌트 집합
T_W	웨이브폼 소프트웨어의 실행 시간 ($= T_b + T_s$)
k	T_W 동안 처리하는 비트 수
T_P	웨이브폼 소프트웨어의 실행 주기 ($= d/R_b$)
T_b	Γ_b 의 실행 시간
T_s	Γ_s 의 실행 시간
T_W'	변조 스케일링을 적용 후 T_W
U_W	프로세서 사용률 ($= T_W/T_P$)
α	T_s 의 비율 ($= T_s/T_W$)
γ	$= 1 - \alpha + \alpha/b$

하나의 웨이브폼 소프트웨어는 다수의 웨이브폼 컴포넌트로 구성되며, 각각의 웨이브폼 컴포넌트는 필터링, 코딩/디코딩, 변조/복조와 같은 고유의 신호 처리 작업을 반복적으로 수행한다. 입출력 데이터 타입으로는 비트와 심볼을 사용하는데, 그림 2에서 볼 수 있듯이 내부적으로 변조와 복조를 기준으로 데이터 타입이 변경된다. 정확히 말하면, 변조를 통해서 변조 레벨 b 단위의 비트가 하나의 심볼로 변경되고 복조에서는 하나의 심볼이 b 개의 비트데이터를 생성한다. 그러므로, R_s 와 R_b 사이에는 식 (6)의 관계가 성립한다.

$$R_s = \frac{R_b}{b} \quad (6)$$

변조를 제외한 대부분의 웨이브폼 컴포넌트는 입력 데이터의 타입에 따라 실행 시간이 R_b 에 정비례하거나 또는 R_s 에 정비례한다. 변조의 경우 비트 단위의 데이터를 입력 받지만 실제 신호 처리는 변조 레벨 b 크기만큼 심볼 단위로 묶어서 수행되기 때문에 출력 단위인 심볼의 처리량에 따라 실행 시간이 결정된다. 이렇게 실행 시간이 R_b 또는 R_s 에 정비례하는지에 따라 비트 전송률에 의존적인 웨이브폼 컴포넌트와 심볼 전송률에 의존적인 웨이브폼 컴포넌트로 분류할 수 있으며, 각각의 집합을 Γ_b 와 Γ_s 로 표기한다. 예를 들어, 소스 코딩이나 채널 코딩은 Γ_b 에 속하며 변조/복조는 Γ_s 에 속한다.

소프트웨어 라디오 시스템에서 변조 스케일링은 웨이브폼 소프트웨어의 실행 시간에 영향을 미치며 동시에 전력 소모의 변화를 가져온다. T_P 동안 Γ_b 가 실행된 시간과 Γ_s 가 실행된 시간을 각각 T_b, T_s 라고 표기하자. 만약 R_b 의 값을 고정시키고 변조 레벨 b 를 증가시키면 식 (6)에 따라 R_s 는 b 에 반비례하여 감소한다. 그리고 T_s 도 b 에 반비례하여 감소한다. 그러므로, T_s 가 차지하는 비율 $\alpha(=T_s/T_W)$ 를 정의하면, 단축된 웨이브폼 소프트웨어의 실행 시간 T_W' 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_W' = T_b + \frac{T_s}{b} = (1 - \alpha)T_W + \frac{\alpha T_W}{b}$$

$$= \left(1 - \alpha + \frac{\alpha}{b}\right) T_W = \gamma T_W$$

웨이브폼 소프트웨어의 실행 시간이 단축되면 그 시

간단한 프로세서를 정지(shut-down)시킬 수 있고 전력 소모는 감소한다. 그러므로 변조 스케일링을 적용한 프로세서의 전력소모는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_S' = P_{Smax} \cdot \frac{\gamma T_W}{T_P} = P_{Smax} \cdot \gamma U_W$$

여기서 P_{Smax} 와 U_W 는 각각 프로세서의 처리속도가 최대일 때의 소모 전력(= $C_S \cdot V^2 \cdot f$)과 웨이브폼 소프트웨어의 프로세서 사용률(= T_W/T_P)이다.

변조 스케일링으로 단축된 웨이브폼 소프트웨어의 실행 시간을 전압 스케일링하면 P_S 를 더욱 감소시킬 수 있다. 전압 스케일링은 두 단계로 적용될 수 있는데, 첫 번째로 웨이브폼 소프트웨어에 주어진 U_W 를 초과하지 않는 범위에서 수행하는 부분 전압 스케일링과 두 번째로 프로세서의 남은 사용률을 모두 사용하는 최대 전압 스케일링이 있다. 여기서 프로세서의 전압과 클럭 주파수가 정비례한다고 가정하도록 한다. 부분 전압 스케일링은 클럭 주파수를 $\gamma (<1)$ 배로 낮추므로 전체적인 소모 전력은 γ^2 배로 줄어든다. 최대 전압 스케일링의 경우, 클럭 주파수가 γU_W 배로 낮아지므로 전체적인 소모 전력의 변화는 $(\gamma U_W)^2$ 배로 줄어든다. 그림 3은 복합 변조 전압 스케일링이 P_S 에 미치는 영향을 보여준다. 정리하면, 변조 스케일링을 적용하면 P_S 는 γ 배로 줄어들고, 추가로 부분 또는 최대 전압 스케일링을 적용함으로써 각각 γ^3 , $(\gamma^3 U_W^2)$ 의 절감 효과를 얻을 수 있다. 복합 변조 전압 스케일링을 적용한 뒤의 P_S 는 다음과 같다.

$$P_S = P_{Smax} \cdot (\gamma U_W)^3 \tag{7}$$

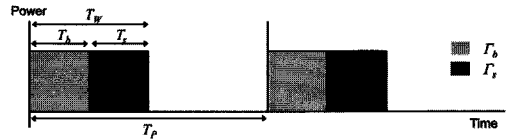
마지막으로 식 (1), (2), (3), (4), (5), (7)을 이용하여 복합 변조 전압 스케일링을 적용한 전체 시스템의 소모 전력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P &= P_H + P_T + P_S \\ &= C_H \cdot \frac{R_b}{b} + C_T \cdot S(b) \cdot \frac{R_b}{b} \\ &\quad + C_S \cdot V^2 \cdot f \left\{ \left(1 - \alpha + \frac{\alpha}{b} \right) \frac{T_W R_b}{k} \right\}^3 \end{aligned} \tag{8}$$

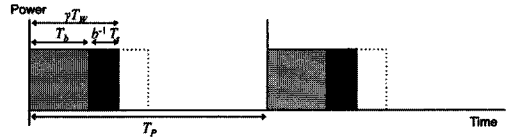
단위 시간당 비트 처리율 R_b 이 요구사항으로 주어졌을 때 에너지 소모를 최소화하는 변조 레벨은 식 (8)을 최소화시키는 자연수 b 를 찾는 최적화 문제를 이용하여 구할 수 있다.

4. 수치적 결과

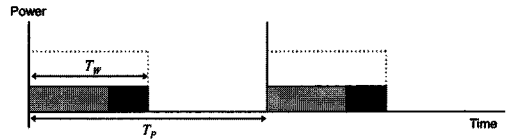
본 절에서는 지금까지 분석한 결과를 토대로 수치적인 예를 살펴본다. 웨이브폼 소프트웨어는 QAM 변조를 사용하며 1 ms의 실행 시간마다 8192 비트의 데이터를 처리하는 상황을 가정하였다. 상수 인자의 값으로 C_H 와 C_T 는 [6]에서 P_{Smax} 는 [7]에서 차용하였다. 그림 4는 요구 비트 처리율 R_b 와 변조 레벨 b 에 따른 장치의 소모



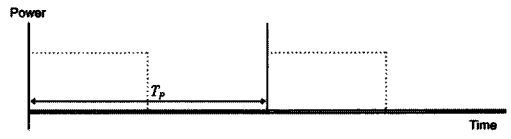
(a) 기본 스케일링, $P_S = P_{Smax} \cdot U_W$



(b) 변조 스케일링, $P_S = P_{Smax} \cdot \gamma U_W$



(c) 변조 스케일링 + 부분 전압 스케일링, $P_S = P_{Smax} \cdot \gamma^3 U_W$



(d) 변조 스케일링 + 최대 전압 스케일링, $P_S = P_{Smax} \cdot (\gamma U_W)^3$

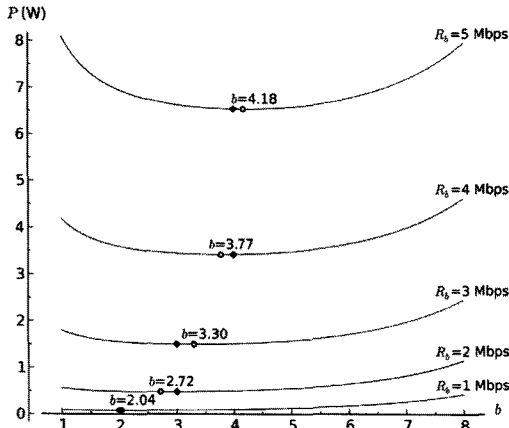
그림 3 복합 변조/전압 스케일링

표 3 계산에 사용한 상수 값

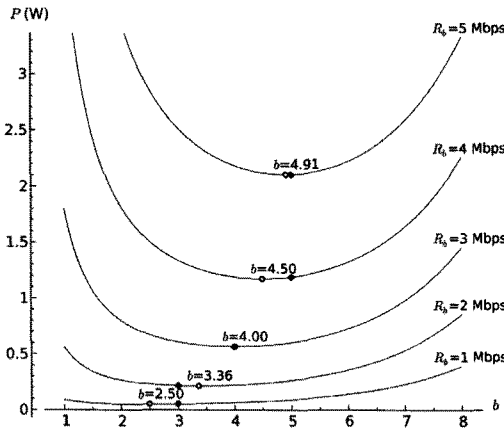
C_H	15 nJ
C_T	12 nJ
P_{Smax}	85 W
T_W	1 ms
k	8192 bits

전력을 보여준다. 고정된 인자 값은 모두 표 3에 정리하였으며, 가변적인 인자 값은 명시적으로 그림에 표기하였다.

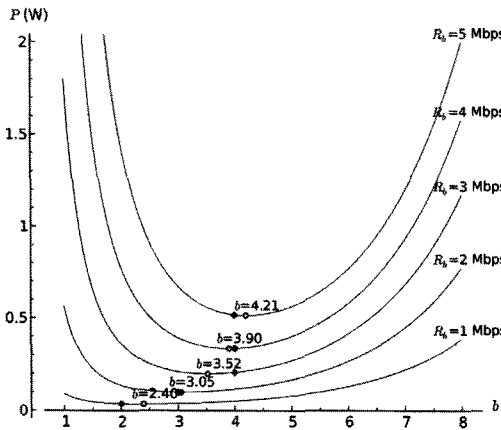
각각의 그래프는 전력 소모를 최소화하는 이상적인 변조 레벨을 원으로 표시하고 실제로 적용 가능한 변조 레벨을 검은 색 마름모로 표시하였다. 그래프의 결과를 통해서 알 수 있는 사실은 다음과 같다. 첫 번째, 모든 경우에서 R_b 의 값이 클수록 전력 소모는 증가한다. 이는 동일한 프로토콜을 사용할 경우 높은 처리율을 달성하기 위해서는 보다 많은 에너지를 필요로 함을 나타내는 당연한 결과이다. 두 번째, R_b 의 값이 클수록 최적 변조 레벨의 값이 증가함을 알 수 있다. 하지만, 최적 변조 레벨이 너무 크면 P_T 로 소모되는 에너지의 증가폭이 P_H 와 P_S 의 감소폭을 압도하기 때문에 전체적인 전력 소모가 증가한다. 세 번째, α 의 값이 클수록 CMVS



(a) $\alpha = 0.1$



(b) $\alpha = 0.5$



(c) $\alpha = 0.9$

그림 4 복합 변조/전압 스케일링의 전력소모변화

를 적용함으로써 얻을 수 있는 에너지 감소비율이 크다. 이는 변조 스케일링으로 줄일 수 있는 웨이브폼 컴포넌트

의 비율이 클수록 T_W 의 감소폭이 크고, 그만큼 전압 스케일링으로 얻을 수 있는 P_S 의 감소폭도 크기 때문이다.

5. 결론 및 향후 연구

무선 통신 게이트웨이를 이동 통신 환경에서 전력 소모를 절감할 수 있는 복합 변조/전압 스케일링 기법을 제안하였다. 수치적인 결과 분석을 수행하고 웨이브폼 소프트웨어와 장치 환경 인자에 따라 전력 소모가 어떻게 변화하는지 분석하였다. 그 결과 복합 변조/전압 스케일링은 소프트웨어 라디오 시스템에 효과적으로 적용 가능함을 확인하였다. 하지만, 본 논문에 포함된 연구 결과의 많은 부분이 여전히 개선의 여지가 많이 남아 있다. 제안된 기법은 본질적으로 불확실할 수 밖에 없는 무선 통신 환경의 많은 인자들을 상수값으로 가정하였다. 만약 이러한 환경 인자를 적극적인 외부 환경과의 피드백을 통해서 보다 정확하게 반영한다면 더욱 효율적인 전력 관리가 가능하다. 예를 들어, 이동 속도 또는 네트워크의 무선 신호 세기가 무선 환경을 분석할 때 효과적으로 사용될 수 있을 것이다. 추후 연구로서 이러한 점을 반영하여 주변 환경에 보다 적응성 있게 동작하는 전력 관리 기법의 개발이 필요하다.

참고 문헌

- [1] M. Sadiku and C. Akjuobi, "Software-defined radio: a brief overview," *Potentials, IEEE*, vol.23, no.4, pp.14-15, 2004.
- [2] A. Kaul, "Software defined radio: The transition from defense to commercial markets," in *Proceedings of the Proceeding of the SDR Technical Conference and Product Exposition, 2007*.
- [3] A. P. Chandrakasan, S. Sheng, and R. W. Brodersen, "Low-power CMOS digital design," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol.27, no.4, pp.473- 484, 1992.
- [4] K. Govil, E. Chan, and H. Wasserman, "Comparing algorithm for dynamic speed-setting of a low-power CPU," in *Proceedings of the 1st annual international conference on Mobile computing and networking*, ACM New York, NY, USA, 1995, pp.13-25.
- [5] C. Schurgers, O. Aberthorne, and M. Srivastava, "Modulation scaling for energy aware communication systems," in *Proceedings of the 2001 international symposium on Low power electronics and design*, ACM New York, NY, USA, 2001, pp. 96-99.
- [6] C. Schurgers, V. Raghunathan, and M. B. Srivastava, "Power management for energy-aware communication systems," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, vol.2, no.3, pp.431-447, 2003.
- [7] "List of CPU power dissipation," [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_CPU_power_dissipation.