소프트웨어 라디오 시스템을 위한 전력 관리 기법

구본철 ○ 박학봉* 허준영** 전광일*** 조유근*

○*서울대학교 전기컴퓨터공학부 **한성대학교 컴퓨터공학부 ***한국산업기술대학교 컴퓨터공학과

bcgu@os.snu.ac.kr, hbpark@os.snu.ac.kr, jyheo@hansung.ac.kr, gijeon@kpu.ac.kr, cho@cse.snu.ac.kr

Power Management for Software Radio Systems

Boncheol Gu○ Xuefeng Piao* Junyoung Heo** Gwangil Jeon*** Yookun Cho*

○*School of Computer Science and Engineering, Seoul National University

**Department of Computer Engineering, Hansung University

***Department of Computer Engineering, Korea Polytechnic University

1. 서 론

소프트웨어 라디오 (software-defined radio: SDR) 기술[1]은 무선 통신 프로토콜을 소프트웨어로 구현하는 기술이다. 기존에 특화된 하드웨어에서 구현되던 무선 통신 프로토콜의 신호 처리 작업이 소프트웨어 라디오 기술에서는 프로그래밍 가능한 프로세서에서 실행 가능한 소프트웨어의 형태로 구현된다. 그렇기 때문에, 새로운 프로토콜의 적용은 최소한의 하드웨어 변경과 소프트웨어 설치만으로 이루어지고 기존 프로토콜의 변경은 동적인 프로그래밍을 통한 소프트웨어의 재구성만으로 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.

2. 본 론

소프트웨어 라디오 시스템 [1]의 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. 즉, 소프트웨어 라디오 시스템의 전력 소모는 소프트웨어 신호 처리를 위한 컴퓨팅 프로세서, 하드웨어 신호 처리를 위한 RF 프론트엔드 (front-end), 그리고 증폭기를 포함한 안테나에서 대부분 발생하며, 각각을 P_S, P_H P_T로 표기한다. 결국, 소프트웨어 라디오 시스템의 총 전력 소모는 이들의 총합이며 P 로 표기한다. 최종적으로 우리는 주어진 비트 전송률을 만족(동시에 평균 비트 전송시간을 제약)시키면서 전력 소모를 최소화하는 변조 레벨을 구할 것이다.

소프트웨어 라디오 시스템에서 하나의 프로토콜은 하나의 웨이브폼 소프트웨어로 구현된다. 웨이브폼 소프트웨어는 프로세서에서 주기적으로 실행되는 작업으로서 한 주기 동안의 실행 시간 T_W와 한 주기 동안의 비트 단위의 데이터 처리량 k를 정의할 수 있다. 주기의 길이 T_P는 주어진 비트 처리율 R_b에 따라 가변적으로 정해지며, 그 값은 k/R_b 이다. 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, 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, $R_s = R_b/b$이다.

변조를 제외한 대부분의 웨이브폼 컴포넌트는 입력 데이터의 타입에 따라 실행 시간이 R_b에 정비례하거나 또는 R_s에 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_s에 정비례하는지에 따라 비트 전송률에 의존적인 웨이브폼 컴포넌트와 심볼 전송률에 의존적인 웨이브폼 컴포넌트로 분류할 수 있으며, 각각의 집합을 Γ_b와 Γ_s로 표기한다. 예를 들어, 소스 코딩이나 채널 코딩은 Γ_b에 속하며 변조/복조는 Γ_s에 속한다.

소프트웨어 라디오 시스템에서 변조 스케일링 [2]은 웨이브폼 소프트웨어의 실행 시간에 영향을 미치며 동시에 전력 소모의 변화를 가져온다. T_P동안 Γ_b가 실행된 시간과 Γ_s가 실행된 시간을 각각 T_b, T_s라고 표기하자. 만약 R_b의 값을 고정시키고 변조 레벨 b 를 증가시키면 R_s는 b 에 반비례하여 감소한다. 그리고 T_s도 b 에 반비례하여 감소한다. 그러므로, T_s가 차지하는 비율 α $(= T_s/T_W)$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 시간만큼 프로세서를 정지(shut−down)시킬 수 있고 전력 소모는 감소한다. 그러므로 변조 스케일링을 적용한 프로세서의 전력소모는 $P_S' = P_{Smax} \cdot \frac{\gamma T_W}{T_P} = P_{Smax} \cdot \gamma U_W$ 이다. 여기서 P_{Smax}와 U_W는 각각 프로세서의 처리속도가 최대일 때의 소모 전력과 웨이브폼 소프트웨어의 프로세서 사용률$(= T_W/T_P)$이다.

변조 스케일링으로 단축된 웨이브폼 소프트웨어의 실행 시간을 전압 스케일링 [3]하면 P_S를 더욱 감소시킬 수 있다. 전압 스케일링은 두 단계로 적용될 수 있는데, 첫 번째로 웨이브폼 소프트웨어에 주어진 U_W를 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 γ 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. 정리하면, 변조 스케일링을 적용하면 P_S는 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_S는 $P_{Smax}(\gamma U_W)^3$이다.

P_H와 P_T 은 [2]에 의하여 구할 수 있으며, QAM 변조를 사용할 경우 각각 $P_H = C_H \cdot R_b \cdot b^{-1}$ 이고 $P_T = C_T \cdot (2^b - 1) \cdot R_b \cdot b^{-1}$ 이다. 최종적으로 복합 변조/전압 스케일링을 적용한 전체 시스템의 소모 전력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = P_H + P_T + P_S = C_H \cdot \frac{R_b}{b} + C_T \cdot (2^b - 1) \cdot \frac{R_b}{b} + C_S \cdot V^2 \cdot f \left\{ \left(1 - \alpha + \frac{\alpha}{b}\right) \frac{T_W R_b}{k} \right\}^3$$

단위 시간당 비트 처리율 R_b가 요구사항으로 주어졌을 때 에너지 소모를 최소화하는 변조 레벨은 P 를 최소화시키는 자연수 b 를 찾는 최적화 문제를 이용하여 구할 수 있다.

3. 결 론

소프트웨어 라디오 시스템의 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.

참고문헌

[1] J. Mitola, "The software radio architecture," *IEEE Communications Magazine*, vol. 33, no. 5, pp. 26-38, 1995.

[2]C. Schurgers, V. Raghunathan, and M. B. Srivastava, "Power Management for energy-aware communications systems," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 431-447, 2003.

[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.