

2026 VLSI Review

KAIST 전기및전자공학부 석박사통합과정 이동윤

Session 26 UWB, IoT, RF Enablers

2026 IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits의 Session 26은 UWB, IoT, RF Enablers라는 주제로 총 4편의 논문이 발표되었다. 이 세션의 논문들은 저전력 무선 연결과 그 구성 회로를 다루며, 스마트폰이나 wearable 기기와 직접 통신해야 하는 IoT 태그, VR/AR 기기와 뇌-컴퓨터 인터페이스 (BCI, brain-computer interface)를 위한 초저전력 고속 링크, 차량용 UWB 레이더처럼 기존 무선 규격 위에 새로운 기능을 엮는 응용까지 폭이 넓다. 26-3은 switched-capacitor 디지털 PA의 캐패시터 어레이 사이에 인덕터를 삽입해 고조파 충전 전류를 억제하는 SLCPA 구조로, 6 dB power back-off에서 Class-B 대비 1.29배의 효율을 얻고 DPD 없이 100 MSymbol/s 256-QAM (800 Mb/s) 신호를 지원한다. 26-4는 IEEE 802.15.4z 호환 IR-UWB SoC에 FIR 필터 기반 self-interference cancellation (평균 27 dB)을 넣어 TX/RX가 안테나를 공유하는 full-duplex 레이더 동작을 가능하게 하고, 실제 차량에서 아동 감지 (child presence detection)를 시연했다. 본 기사에서는 이 가운데 기존 변조 방식과 통신 구조의 전제 자체를 바꾼 두 편, 즉 펄스의 상승 에지를 위상 기준으로 삼아 PLL과 preamble 없이 PSK를 IR-UWB에 결합한 26-1과, 급전 주파수와 backscatter 주파수를 다른 대역으로 분리해 self-jammer를 제거하고 배터리 없는 AoA 위치 추정과 Wi-Fi 표준 mask 준수를 동시에 달성한 26-2에 집중하여 서술한다.

#26-1 VR/AR wearable과 implantable BCI는 수 Gb/s의 데이터율을 수 mW 이하의 전력으로 전송해야 하는 상충된 요구를 갖는다. Impulse-radio UWB (IR-UWB)는 짧은 펄스만 간헐적으로 내보내는 방식이라 이 조건에 적합하며, 최근에는 펄스 하나에 pulse-position modulation (PPM), pulse-width modulation (PWM), frequency-shift keying (FSK) 등 여러 변조를 동시에 실어 변조 차수를 높이는 hybrid modulation이 데이터율과 에너지 효율을 함께 끌어올리는 방향으로 자리 잡았다. 그런데 변조 방식 가운데 phase-shift keying (PSK)만은 hybrid에 결합하기 어려웠다. 기존 PSK는 연속파 시스템을 전제로 만들어져 위상 기준을 유지하기 위한 PLL과 상시 동작하는 LO, 그리고 preamble 기반 동기화 필요하고, 펄스가 간헐적으로만 존재하는 IR-UWB 환경에서는 펄스 사이에 위상 잡음이 누적되어 동기가 자주 깨진다. 게다가 위상이 바뀌면 펄스 파형 자체가 달라지므로 PPM이나 PWM과 직교하게 결합하기도 어렵다.

논문이 제안하는 edge-reference differential PSK (ER-DPSK)는 이 문제를 펄스 자체에 기준을 심는 방식으로 푼다. 각 펄스는 먼저 동일한 형태의 기준 에지 (reference edge)를

만들고, 그 뒤에 원하는 위상만큼 지연된 꼬리를 붙인다. 하나의 펄스 안에 기준 정보와 위상 정보가 함께 담기므로 별도의 위상 기준을 외부에서 유지할 필요가 없다. 에지의 타이밍 정확도가 곧 성능이므로 펄스는 급한 상승과 완만한 꼬리를 갖는 비대칭 형태로 설계되어 에지 위치가 안정적으로 잡히도록 했다. 데이터는 인접한 두 펄스의 위상 차이에 실리는 차동 구조라, 에지 검출 과정에서 생기는 타이밍 오프셋이 자동으로 상쇄되고 펄스마다 위상이 새로 정렬되므로 위상 잡음이 누적되지 않는다. 기준 에지와 포락선이 위상과 무관하게 동일하다는 점 때문에 PPM, PWM과의 구조적 호환성도 확보되어, PSK를 hybrid modulation의 한 축으로 넣을 수 있게 된다.

구현에서는 ER-DPSK를 직교 위상 4개를 쓰는 ER-DQPSK로 만들어 펄스당 2비트를 싣고, 여기에 digitalized multi-pulse-position modulation (DMPPM), PWM, FSK를 결합했다. 250 MHz 클럭 한 주기 (4 ns)에 ER-DQPSK 4비트, DMPPM 3비트, PWM 4비트, FSK 2비트, 합계 13비트가 실려 3.25 Gb/s가 된다. 핵심 회로는 ring oscillator를 pre-charge하여 위상 노드를 정렬해 두었다가 먼저 기준 에지를 내보내고 그다음 선택된 위상의 꼬리가 이어지도록 하는 ER-DQPSK 컨트롤러와 pulse shaper이며, 어떤 위상을 고르든 항상 같은 기준 에지가 나오도록 보장한다.

[그림 1]은 기존 UWB PSK와 제안 ER-DPSK의 개념을 비교한 것이다. 기존 방식에서는 펄스 열 안에 무엇이 0°인지 알려 주는 기준이 없어 수신단이 preamble과 PLL에 의존해야 하지만, 제안 방식에서는 모든 펄스가 자신의 기준 에지를 갖고 그 뒤에 0°, 90°, 180°, 270°의 위상 정보가 따라온다. 수신단은 에지를 검출하고 그 에지에 맞춰 하향 변환한 뒤 인접 펄스 간 위상 차이를 미분하는 것만으로 데이터를 복원할 수 있다.

송신기는 28 nm FD-SOI로 구현되어 0.018 mm²의 면적을 차지하며, 6.1~8.6 GHz 대역에서 FCC spectral mask를 만족한다. 3.25 Gb/s에서 소비 전력은 2.41 mW로 에너지 효율은 0.74 pJ/bit이고, 논문은 이를 3 Gb/s급 IR-UWB 송신기로는 처음으로 1 pJ/bit 아래로 내려간 결과로 제시한다. 비교 대상인 최근 hybrid IR-UWB 송신기들이 1.66~2.54 Gb/s에서 1.2~5.8 pJ/bit인 것과 대비된다. 3 dBi 안테나와 오실로스코프로 무선 측정한 결과 3.25 Gb/s에서 BER 10⁻³ 기준 50 cm의 통신 거리를 얻었고, 에지 검출 문턱을 피크 진폭의 5%만큼 바꿀 때 비대칭 펄스의 에지 타이밍 편차는 DMPPM에서 4.7 ps, PWM에서 9.7 ps로 삼각 펄스 (14.0 ps, 29.0 ps)의 약 3분의 1이었다. 연속파를 전제로 한 PSK를 펄스 기반 시스템에 맞게 다시 정의하여 PLL과 preamble을 없앤 발상은, BCI와 wearable을 위한 초저전력 고속 링크에서 변조 차수를 높이는 새로운 길을 열었다고 볼 수 있다.

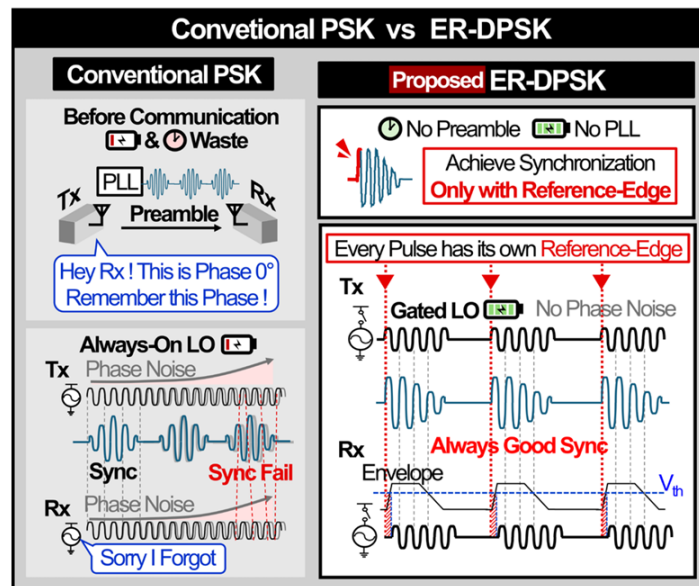


Fig. 3. Conventional PSK vs. ER-DPSK: Preamble-Based PLL Synchronization with Phase Drift vs. Reference-Edge-Based Per-Pulse Synchronization, Providing Always-Good Synchronization

[그림 1] 논문 26-1에서 제안하는 edge-reference DPSK의 개념: 위상 기준이 없는 기존 UWB PSK와, 모든 펄스가 기준 에지와 위상 정보를 함께 갖는 ER-DPSK의 비교

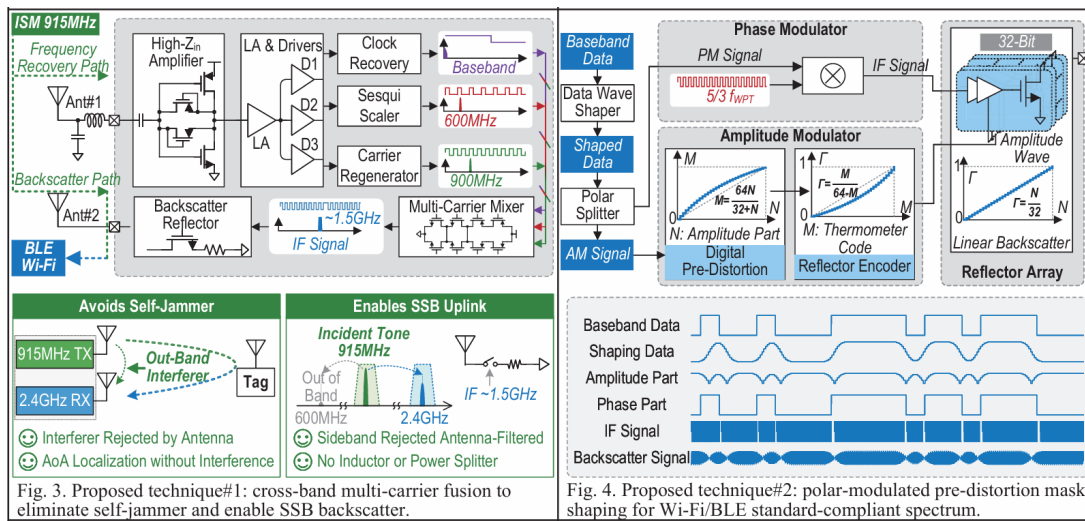
#26-2 스마트폰과 직접 통신하는 배터리 없는 IoT 태그는 두 가지 방향으로 연구되어 왔다. 무선 전력으로 충전한 뒤 능동 송신기로 표준 패킷을 보내는 방식은 Wi-Fi/BLE 표준을 그대로 만족하지만 mW급 전력 때문에 충전 시간이 길어 패킷 전송률이 매우 낮고, 들어오는 반송파를 반사시켜 변조하는 backscatter 방식은 μW 급 전력으로 높은 패킷 전송률을 내지만 세 가지 한계를 안고 있었다. 반사 신호와 급전 반송파가 같은 대역에 있어 강한 self-jammer가 수신 품질을 떨어뜨리고, 위치 추정에는 multipath에 취약한 RSSI에만 의존하며, 반사기 스위치 어레이의 비선형성 때문에 스펙트럼이 넓게 퍼져 BLE mask는 만족해도 Wi-Fi 표준 mask는 만족하기 어려웠다.

논문의 첫 번째 기법은 급전과 backscatter를 다른 대역으로 분리하는 cross-band multi-carrier fusion이다. 태그는 915 MHz ISM 대역의 급전 신호로 에너지를 수확하고, 같은 신호에 실린 5G-NR 포락선을 Manchester 디코딩하여 채널 할당과 태그 ID를 받는다. 업링크에서는 수확한 915 MHz 기준 주파수로부터 sesqui scaler와 carrier regenerator로 $2/3 f_{\text{WPT}}$ 와 f_{WPT} 를 만들고, 이를 baseband와 함께 multi-carrier mixer에 넣어 약 1.5 GHz의 IF 신호를 합성한다. 반사기 어레이가 입사한 915 MHz 반송파를 이 IF로 변조해 반사하면 2.4 GHz 대역에 BLE/Wi-Fi 업링크가 만들어지고, 약 610 MHz에 생기는 image와 불필요한 혼변조 성분은 이중 대역 안테나의 정합 회로가 걸러낸다. 입사파와 반사파가 서로 다른 대역에 놓이므로 고 Q 필터 없이 self-jammer를 제거할 수 있고, 인덕터 같은 큰 수동 소자 없이 단측파대 (SSB) backscatter가 구현되며, 반사 신호가 깨끗해진 덕분에 배터리 없는 태그로는 처음으로 angle-of-arrival (AoA) 위치 추정이 가능해진다.

두 번째 기법은 Wi-Fi 표준 mask를 맞추기 위한 polar-modulated pre-distortion mask shaping이다. baseband 데이터를 디지털로 파형 정형한 뒤 위상 (PM) 성분과 진폭 (AM) 성분으로 나누고, PM 성분은 $5/3 f_{WPT}$ 반송파와 섞어 IF 신호를 만들며, AM 성분은 디지털 영역에서 미리 왜곡을 보정한 뒤 thermometer 코드로 변환해 32비트 선형 반사기 어레이를 구동한다. 반사기 어레이에서 PM과 AM이 다시 합쳐지면 정형된 스펙트럼의 backscatter 신호가 나오고, 이 방식으로 업링크의 고조파가 억제되어 Wi-Fi와 BLE 두 표준의 mask를 모두 만족한다.

[그림 2]는 cross-band multi-carrier fusion의 구성과 효과를 보인다. 915 MHz 급전 톤에서 주파수 복원 경로가 IF 반송파를 만들고 backscatter 경로가 이를 반사하는 구조로, 대역 밖의 급전 톤이 안테나 단에서 거부되어 self-jammer 없이 AoA 위치 추정이 가능해지는 것과, 원치 않는 측파대가 안테나에서 걸려져 전력 분배기 없이 SSB 업링크가 되는 것을 함께 보여 준다.

태그 칩은 65 nm CMOS로 구현되어 0.798 mm^2 를 차지한다. 915 MHz 30 dBm 급전원 아래에서 9 m 떨어진 스마트폰이 태그가 backscatter한 Wi-Fi와 BLE 패킷을 수신해 화면에 표시하는 것을 시연했고, 스마트폰 측에서 over-the-air로 측정한 2.4 GHz 반송파의 위상 잡음은 1 MHz 오프셋에서 -111 dBc/Hz 였다. cross-band 반사 스펙트럼에서 원하는 측파대는 image보다 32 dB 이상 강해 32 dB 이상의 image rejection을 보였고, 세 개의 태그를 무선 급전한 상태에서 AoA 기지국이 BLE 패킷으로 $\pm 10 \text{ cm}$ 이내의 실시간 위치 추정과 이동 추적을 수행했다. polar pre-distortion을 적용하면 backscatter 계수의 INL이 6.70 LSB에서 2.92 LSB로 줄고 Wi-Fi 스펙트럼이 표준 mask 안에 들어온다. 전력은 수확 단계 27 nW, 다운링크 단계 1.2 μW , 업링크 단계 215 μW 이며 다운링크 54 kb/s, 업링크 1 Mb/s이다. 비교 대상인 기존 스마트폰 호환 배터리 없는 태그들이 모두 in-band backscatter로 image rejection이 사실상 0 dB이고 self-jammer가 존재하며 Wi-Fi mask를 만족하지 못하거나 검증하지 않은 것과 비교하면, cross-band 구조와 AoA 위치 추정, Wi-Fi mask 준수는 이 논문이 처음 보인 항목들이다. 급전은 스마트폰이 아닌 별도의 915 MHz 급전원이 담당하므로 실제 배치에서는 급전 인프라가 필요하다는 점을 감안해야 하지만, 급전과 통신의 대역을 분리한다는 하나의 결정이 self-jammer, 위치 추정, 표준 mask라는 서로 다른 세 문제를 동시에 풀어낸 점에서 backscatter 태그의 설계 공간을 넓힌 논문이라 볼 수 있다.



[그림 2] 논문 26-2에서 제안하는 cross-band multi-carrier fusion 기법: 915 MHz 급전 톤과 2.4 GHz backscatter 업링크의 대역 분리를 통한 self-jammer 제거와 SSB 업링크 구현

저자정보



이동윤 석박사통합과정 대학원생

- 소속 : KAIST
- 연구분야 : Body-Channel-Communication Transceiver
Design for Body-Area Network in Biomedical Application
- 이메일 : dongyoon.lee@kaist.ac.kr
- 홈페이지 : <https://impact.kaist.ac.kr>