

mmWave 레이더 센서를 이용해 가정에서 사용할 수 있는 다중 환자 비접촉식 생명 징후 센서 구축

Greg Peake

Field Applications Engineer

Matthieu Chevrier

Field Applications Engineer

머리말

인체의 활력 징후는 보통 역사적으로 심전도와 산소 포화도 센서의 조합을 통해 심장 및 호흡수를 보고하기 위해 환자의 신체에 대한 유선 연결에 의존해 온 모니터링 시스템을 통해 측정합니다. 이러한 센서는 신생아, 종종 화상 환자, 간질 환자, 또는 정신과 병동의 환자의 경우 계속 접촉을 유지하기 어려울 수 있습니다. 이동이 잦은 환자의 경우 환자가 집 주변을 이동할 때 활력 징후를 모니터링하는 것이 어려울 수 있습니다.

밀리미터파(mmWave) 레이더 센서는 환자의 가슴에서도 매우 미세한 움직임을 감지할 수 있습니다. 흉부 움직임은 호흡(기본 주파수)과 심박수 운동(추가 고조파)의 영향을 받기 때문에 흉부 움직임을 미세하게 측정하면 비접촉식으로 활력 징후를 측정할 수 있습니다.

이 기능의 주요 원동력은 센서가 주파수 변조 연속파(FMCW) 감지와 다중 입력, 다중 출력(MIMO) 안테나 레이더 시스템의 조합을 통해 환자 흉부의 위치와 속도를 감지하는 기능입니다.

또한 센서는 침대에서의 움직임을 감지하고, 간병인에게 욕창 발생 가능성을 알려거나, 노인 부부처럼 환자 여러 명을 한 번에 모니터링할 수도 있습니다. 또한, mmWave 센서는 사람이 넘어지면 이를 감지하고 간병인에게 실시간으로 알릴 수 있습니다.

통합의 중요성

FMCW 시스템에서 정확하고 반복 가능한 측정을 보장하기 위한 매개 변수 중 하나는 처프 램프 선형성입니다. 모놀리식 마이크로파 집적 회로에 전체 아날로그 체인을 통

합하면 설계 간 변동이 줄어들 뿐만 아니라 수명과 온도에 대한 효과적인 모니터링 및 교정을 수행할 수 있기 때문에 전체 측정 선형성을 높이는 데 도움이 됩니다.

그림 1에서 TI(텍사스 인스트루먼트) IWR6843의 블록 다이어그램을 보면 송신기-수신기 섹션에 대한 유일한 외부 구성 요소가 표준 40MHz 크리스탈이라는 것을 알 수 있습니다. 이 외부 40MHz 크리스탈 외에도 IWR6843은 다음과 같은 완벽한 송신기-수신기 통합을 제공합니다.

- 램프 생성기.
- 분수 위상 고정 루프.
- 20GHz VCO(전압 제어 오실레이터)는 외부로 라우팅될 때(또는 외부 소스에서 선택될 때) 여러 프런트 엔드를 동기화하고 훨씬 더 큰 가상 안테나에서 코히어런트 샘플링을 지원합니다.

또한 IWR6843은 송신기 및 수신기를 위한 전체 RF(무선 주파수) 체인을 포함합니다. 예를 들어:

- 소프트웨어 프로그래밍 가능 전력 증폭기로, 여러 레벨의 송신 전력을 지원하여 링크 버짓을 환경 및 RF 규정에 맞게 조정할 때 유연성을 극대화할 수 있습니다.
- 빔스티어링 용도로 동적 프로그래밍이 가능한 위상 시프터.
- 저잡음 증폭기는 전력 증폭기와 함께 프로그래밍할 때 링크 버짓 미세 조정을 지원합니다.
- 믹서는 처프를 송수신하여 IF(중간 주파수)를 생성합니다.
- IF 아날로그 필터.
- 최대 25MHz의 샘플링 주파수를 제공하는 ADC(아날로그-디지털 컨버터).

전체 RF 체인을 MMIC 시스템 온 칩에 통합하면 기능 안전에 필요한 수준의 진단 기능을 사용할 수 있습니다.

IWR6843의 완전한 디지털 신호 체인 처리 통합은 다음과 같은 이점을 제공합니다.

- 16비트 범위, 도플러(Doppler) 또는 AOA(도착 각도) FFT(고속 푸리에 변환) 및 기존 레이더 신호 처리 중 CFAR(일정 오경보율)을 지원하는 레이더 하드웨어 가속기입니다.
- 완전히 프로그래밍 가능한 600MHz 디지털 신호 프로세서로, 사용자 정의 신호 처리가 가능합니다.

- 클러스터링, 추적 및 애플리케이션 수준 코드 용도로 완전히 프로그래밍 가능한 200MHz Arm® Cortex®-R4F 마이크로컨트롤러입니다.

IWR6843의 변형인 IWR6843AOP는 다이 레벨 통합 외에도 패키지에 안테나와 함께 제공되어 공간 제약이 있는 응용 제품이나 RF 신호의 PCB 라우팅이 어려운 경우 추가 통합을 제공하고 인쇄 회로 기판(PCB) 면적을 줄여줍니다.

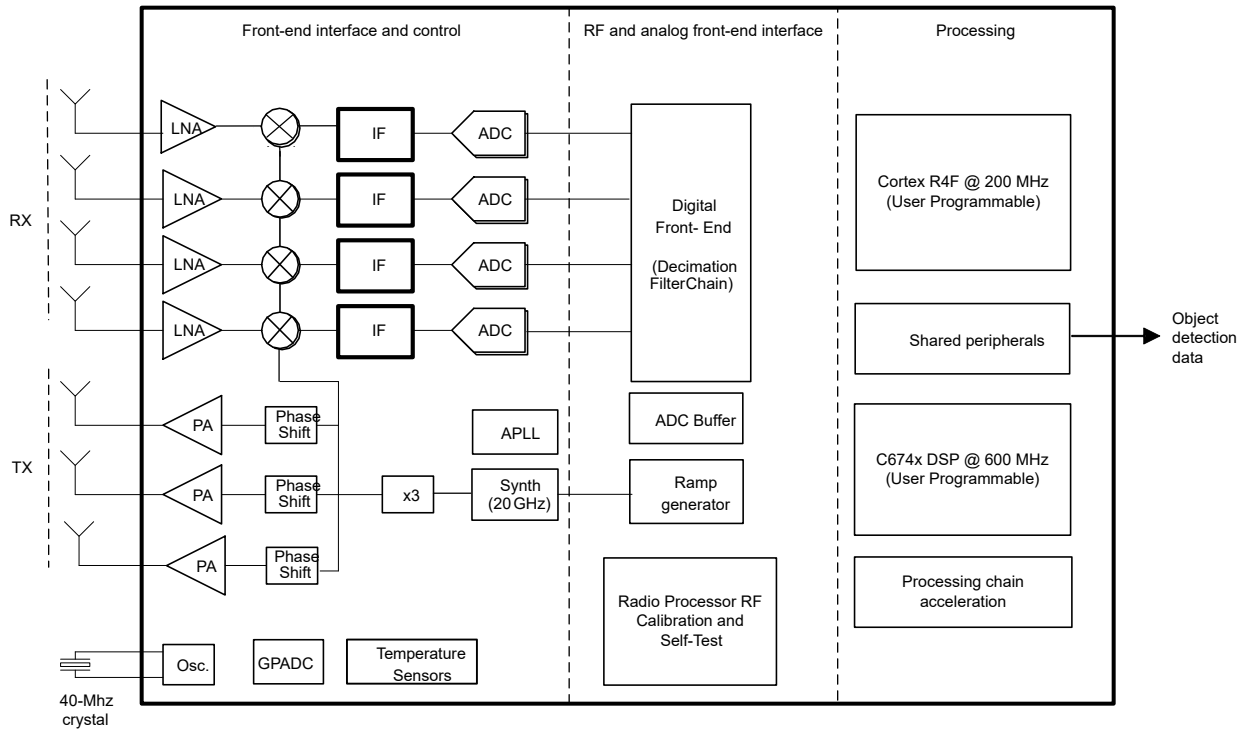


그림 1. IWR6843 블록 다이어그램.

FMCW

FMCW는 거리를 측정할 때 넓은 범위와 높은 정확도를 달성하기 위해 가장 간단한 변조 방식을 제공합니다. 또한 FMCW는 반경 방향 치수(레이더와 타겟 사이의 선)에서 속도 측정을 위한 평균값을 제공합니다(자동차의 움직임 같은 고속, 또는 호흡하는 동안 가슴이 오르락내리락하는 것과 같은 저속). 이러한 작은 움직임을 추적하는 것을 보통 도플러(Doppler) 또는 마이크로 도플러(micro-Doppler) 검출(감지)이라고 합니다.

처프

처프(chirp)는 FMCW에서 사용되는 변조를 말합니다. 순간 주파수 $f(t)$ 는 시간에 따라 선형적으로 변하기 때문에 이것은 선형 주파수 처프입니다. 전송된 처프와 수신된 처프 사이의 주파수 차이는 비행 시간(목표물에 도달하고 돌아오는 데 걸리는 시간)에 정비례하기 때문에 목표물까지의 거리에 정비례합니다.

방정식 1에서는 전송 파형 진폭을 다음과 같이 표현합니다.

$$Y_T(t) = A_T \times \sin(2\pi \times (F_0 + K \times t) \times t) \quad (1)$$

여기서 K 는 전송 주파수가 시간 단위로 증가하는 기울기(IWR6843의 경우 이 값은 0에서 250MHz/μs 사이일 수 있음), A_T 는 신호가 전송되는 진폭(송신 전력)이며, f_0 은 처프가 시작될 때 전송되는 최저 주파수(57GHz 또는 60GHz, 선택한 VCO에 따라 다름)입니다.

방정식 2에서는 수신 파형 진폭을 다음과 같이 표현합니다.

$$Y_R(t) = A_R \times \sin(2 \times \pi \times (F_0 + K \times (t - \delta)) \times (t - \delta) \quad (2)$$

여기서, $\delta = \frac{2 \times d}{v}$ (비행 시간의 두 배), d 는 대상까지의 거리이고 v 는 매질에 있는 빛의 천명도입니다.

믹서

믹서는 전송 및 수신 신호 간의 주파수 차이를 곱합니다(**방정식 3**).

$$Y_M = Y_T \times Y_R \quad (3)$$

기본 삼각법 규칙에 따라 믹서의 결과물은 두 사인값의 합입니다. 하나는 주파수가 f_{TX} 와 f_{RX} 간의 차이이고, 다른 하나는 이들의 합입니다.

믹서의 결과물을 저역 통과 필터에 통과시키면 주파수가 송신기와 수신기의 차이인 IF 신호가 복구됩니다.

방정식 4은(는) 제곱-합계 공식을 다음과 같이 표현합니다.

$$\begin{aligned} \sin(x) \text{를 위한 직렬 전압 레퍼런스} & \times \sin(Y) & (4) \\ \text{)를 위한 직렬 전압 레퍼런스} & = \frac{1}{2} \times (\cos(x - Y) \\ \text{)를 위한 직렬 전압 레퍼런스} & + \cos(x + Y) \\ \text{)를 위한 직렬 전압 레퍼런스} & \text{)를 위한 직렬 전압 레퍼런스} \end{aligned}$$

믹서의 결과물은 저역 통과 필터를 통과하여 송신기와 수신기의 차이값인 IF를 생성합니다(따라서 비행 시간에 정비례하는 양).

방정식 5은(는) 그 결과인 IF 신호입니다.

$$Y_{IF} = \cos\left(2\pi \left[-f_0\delta - 2 \times K \times \delta \times t + K \times \delta^2\right] \quad (5)$$

ADC는 신호를 디지털화합니다. 신호의 주파수는 처프의 주파수보다 훨씬 낮기 때문에 일반 ADC를 쉽게 통과할 수 있습니다. 예를 들어, IWR6843에서 ADC의 최대 샘플링 주파수는 25MHz입니다.

방정식 5을(를) 보면 흥부 움직임으로 심장 및 호흡수를 측정하는 데 사용되는 도플러 요소가 어디에서 나오는지 분명하게 확인할 수 있습니다.

FFT 및 피크 감지

일단 신호가 관련 정보만 전달하면(y_{IF} 주파수는 비행 시간 이미지임) 신호는 범위 FFT를 거친 다음 CFAR 또는 임계값 알고리즘을 통과합니다.

그림 2은(는) 여러 안테나 간의 비행 시간 차이를 보여줍니다.

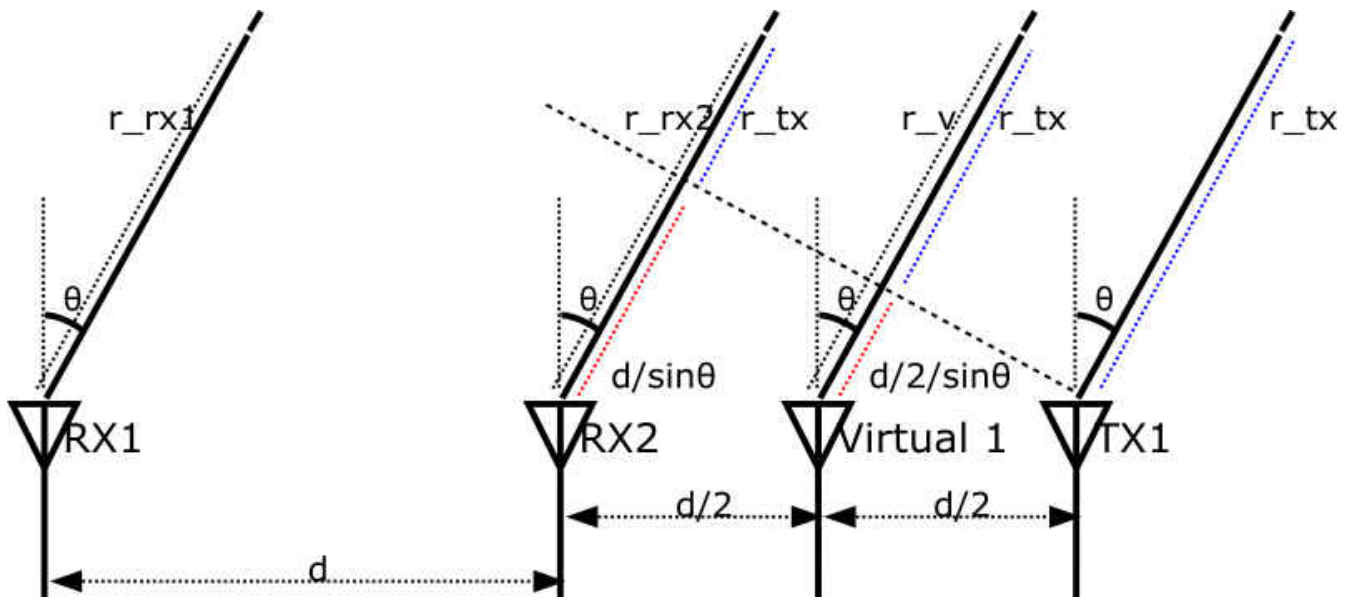


그림 2. 각 수신 안테나에 대한 위상 증가를 보여주는 MIMO 그림.

높은 수준에서 도달 각도는 각 수신 안테나에서 측정된 비행 시간의 차이에서 파생됩니다.

수학 차원에서는 각 안테나에서 방정식 6은(는) 스티어링 벡터를 다음과 같이 정의합니다.

$$a(\theta) = \begin{bmatrix} e^{j \times 2\pi \times d \times \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} e^{j \times 2\pi \times d \times 2 \times \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} e^{j \times 2\pi \times d \times 3 \times \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} \\ \dots e^{j \times 2\pi \times d \times N \times \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

스티어링 벡터는 각 안테나에서 각 타겟의 신호를 결합하는 데 사용됩니다. 모든 안테나를 통해 각 타겟에서 들어오는 모든 신호의 총합을 표현하는 방정식 7에서, x_i 는 i th 안테나에 의해 수신되는 신호입니다.

$$Y(t) = a^H x(t) = \sum_1^N a_i \times x_i(t) \quad (7)$$

방정식 8은(는) 평균 전력을 다음과 같이 계산합니다.

$$P(a) = \frac{1}{L} \times \sum_1^N |Y(t)|^2 = a^H E\{x(t) \times x^H(t)\} a = a^H R a \quad (8)$$

바틀렛(Bartlett) 빔포밍 방법이라고도 하는 기존의 수신 빔포밍은 협대역 어레이를 기반으로 하는 가장 오래된 도달 방향 추정 알고리즘입니다. 이 알고리즘은 일정 방향을 기준으로 빔포머의 출력 출력을 극대화하며 방정식 9에서의 최대화 관계를 다음과 같이 표현합니다.

$$\theta_{Barlett} = \operatorname{argmax}_a [P(a)] \quad (9)$$

각 세타에 대한 $P(a(\theta))$ 를 계산하기 위해 방정식 10은 R을 다음과 같이 근사합니다.

$$R_{zz} \approx \sum_{k=0}^n X(t) \times X^H(t) \quad (10)$$

여기서 X는 신호의 매트릭스(방정식 11)입니다.

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_1(t_1) & x_1(t_2) & \dots & x_1(t_n) \\ x_1(t_1) & x_1(t_2) & \dots & x_1(t_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_M(t_1) & x_M(t_2) & \dots & x_M(t_n) \end{pmatrix} \quad (11)$$

이 방정식을 보면 MIMO 레이더가 어떻게 3차원에서 위치 도출을 가능하게 하는지 확인할 수 있습니다.

감지하려는 방향으로 빔스티어링

레이더 센서로 장면 데이터를 캡처하면 일반적으로 안테나 빔폭이 제공하는 전체 시야에서 매 프레임 기간마다 코스 스캔이 수반됩니다. 이러한 코스 스캔은 특정 물체를 추출하고 공식화해야 하는 관련성이 있거나 관련이 없는 물체, 또는 이 경우 활력 징후를 측정해야 하는 환자의 상을 캡처합니다. 환자의 위치를 파악한 후, 앞서 언급한 바와 같이 송신 빔포밍을 사용하여 빔을 집중시킬 수 있습니다.

환자가 조준에 있지 않으면 빔스티어링을 활성화 할 수 있습니다. 이 기능은 각 송신기에서 스텝 크기가 5.625°인 6

비트의 구성 가능한 위상 시프터에 의해 활성화되며, 64개의 설정을 사용해 0°부터 360°까지의 위상 변이를 커버할 수 있습니다. 위상 시프터는 각 전송 증폭기 앞에 위치하며, 주 빔의 초점 위치를 기준으로 각 전송 채널에 대해 개별적으로 프로그래밍됩니다. **그림 3**을 참조하십시오. 위상 시프터는 일반적으로 디지털 아날로그 변환기를 사용하여 증폭되기 전에 신호에 위상 변이를 생성하는 벡터 변조기를 기반으로 하는 아날로그 구조입니다.

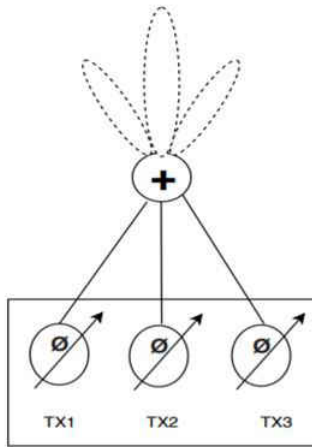


그림 3. 전송 단계에 포함된 위상 시프터.

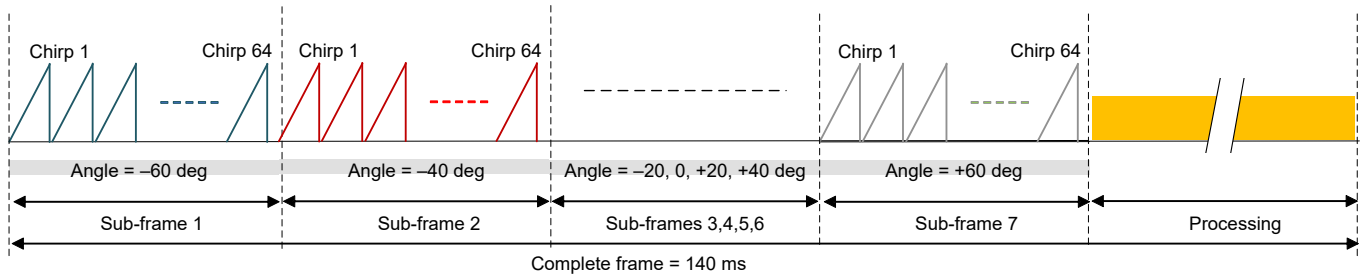


그림 4. 서브프레임마다 빔스티어링 각도를 20°씩 변경.

보정

TI mmWave 레이더 장치는 전압 및 온도 변화에 관계없이 성능을 유지하기 위해 RF 초기화 단계(Rfinit) 애플리케이션 프로그래밍 인터페이스 호출)와 런타임 중(애플리케이션 실행 중)에 부팅 시간 보정을 지원합니다. **그림 5**에서는 다음과 같은 보정 유형의 순서 지정 예가 나와 있습니다.

- 아날로그 위상 고정 루프 보정.

레이더 센서에 대해 서로 다른 방위각에 여러 개의 피사체가 있는 경우(프레임 대 프레임(일반적으로 100~200ms), 또는 서브프레임 사용 시 그보다 적은 수의 피사체가 있는 경우, 위상 시프터를 실시간으로 프로그래밍할 수 있습니다. 예를 들어, **그림 4**에서 보듯이, 빔은 서브프레임을 기준으로 -60°에서 +60°까지 20°씩 스위칭할 수 있으며, 전체 장면 스캔은 200ms 미만으로 지속됩니다. 이를 통해 한쪽 벽에서 반대편 벽까지 방을 가로질러 여러 피사체의 활력 징후를 쉽게 감지할 수 있으며, 서로 다른 각도에 있는 피사체의 위치를 파악하고 송신 빔을 이용해 순차적으로 조명을 비춥니다.

- 신시사이저 VCO.
- 로컬 진동 분포 보정.
- ADC DC 오프셋.
- IF 증폭기 고역 및 저역 통과 차단 주파수.
- 피크 감지기.
- 게인을 전송 및 수신합니다.
- 정동작 전류 불일치.
- 전송 위상 시프터.

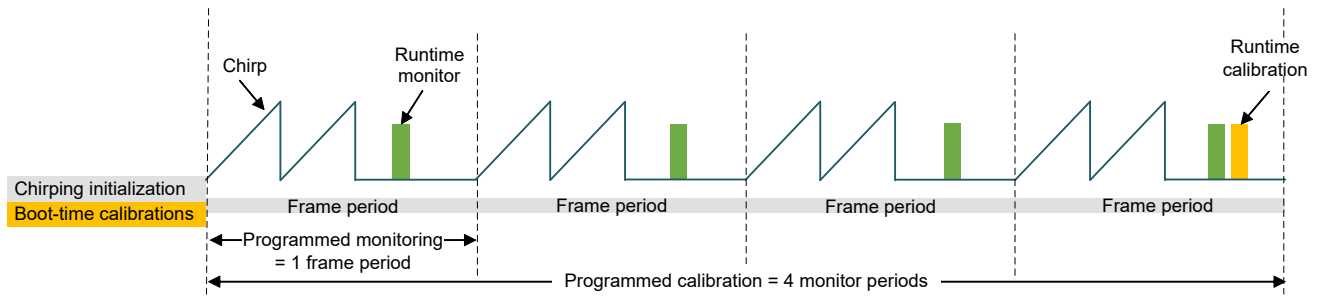


그림 5. 기능적 처핑, 모니터링 및 보정의 타이밍 순서.

그림 6은(는) 전송 및 수신 아날로그 프런트 엔드 매개 변수의 보정을 위한 RF 프런트 엔드 통합의 예를 보여줍니다. PA 출력 및 LNA 입력을 위한 전력 감지기와 루프백 경로를

사용해 전체 프런트 엔드를 지속적으로 모니터링하고 보상할 수 있습니다.

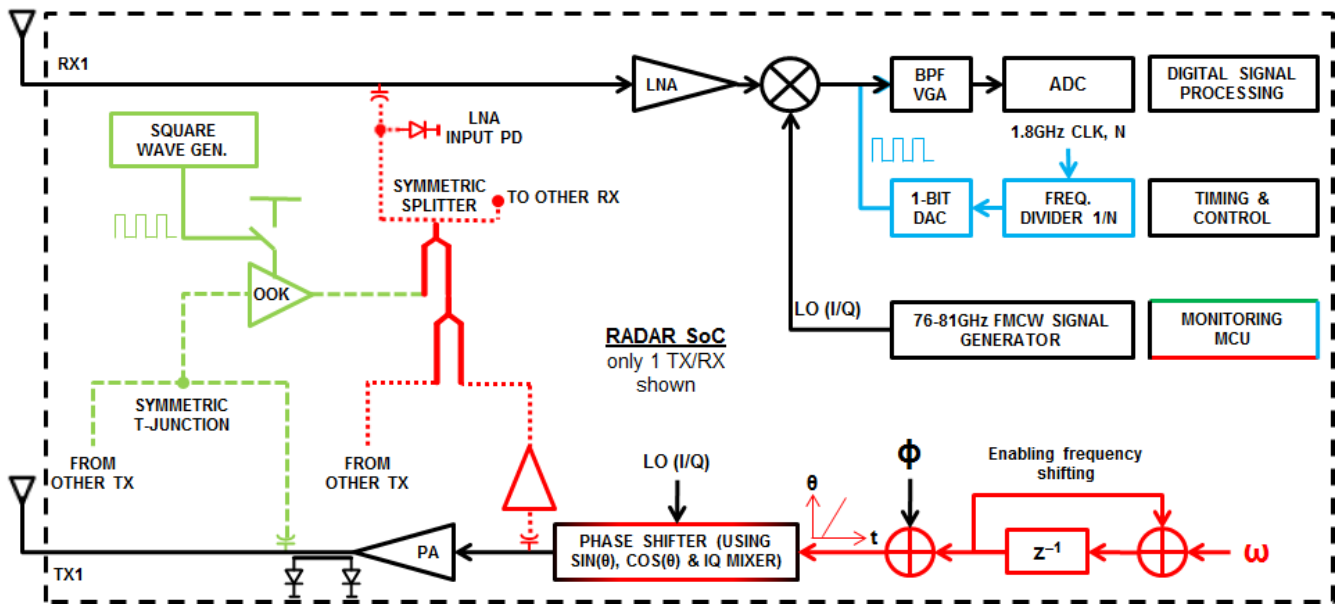


그림 6. IWR6843에 포함된 진단 및 모니터링에 대한 개요.

결론

TI mmWave 장치에는 FMCW 레이더에 필요한 높은 수준의 통합된 기능이 포함되어 있으며, 전체 프런트 엔드를 클럭하는 데 하나의 외부 40MHz 크리스털만 있으면 됩니다. 이러한 제품은 인간의 호흡 및 심박수 감지를 포함하여, 3차원에서 미세한 마이크로 도플러 동작을 감지할 수 있습니다.

여러 개의 TX 체인과 위상 시프터의 추가 통합으로 전송 빔포밍 및 빔스티어링이 가능하기 때문에, 3D 감지를 위한 MIMO 작동을 유지하면서 감소된 시야에서 SNR을 개선할 수 있습니다.

마지막으로, 모든 아날로그 구성 요소에 대한 모니터링 및 보정의 통합을 통해 장치의 수명 전반에 걸쳐 일관된 성능을 보장합니다. 이처럼 높은 수준의 아날로그 통합은 가정에서 사용할 수 있는 다중 환자 비접촉식 활력 징후 센서를 지원합니다.

관련 웹사이트

- TI Resource Explorer에서 **생명 징후 지원 가이드(Vital Signs Support Guide)**와 **인체 생명 징후 추적 사용자 가이드(Vital Signs with People Tracking User's Guide)**를 참조하십시오.
- **"TI mmWave 장치에서 기능 안전 활성화하기 (Enabling Functional Safety in TI mmWave Devices)"** 교육에서 안전 기능에 대해 알아보십시오.
- **"mmWave 생명 징후 랩(mmWave Vital Signs Lab)"** 교육 비디오를 시청하십시오.
- 텍사스 인스트루먼트, **TI의 mmWave 레이더 장치에서의 자체 보정(Self-Calibration in TI's mmWave Radar Devices)**
- 텍사스 인스트루먼트, **캐스케이드 일관성 및 위상 시프터 보정(Cascade Coherency and Phase-Shifter Calibration)**

중요 알림: 이 문서에 기술된 텍사스 인스트루먼트의 제품과 서비스는 TI의 판매 표준 약관에 의거하여 판매됩니다. TI 제품과 서비스에 대한 최신 정보를 완전히 숙지하신 후 제품을 주문해 주시기 바랍니다. TI는 애플리케이션 지원, 고객의 애플리케이션 또는 제품 설계, 소프트웨어 성능 또는 특허권 침해에 대해 책임을 지지 않습니다. 다른 모든 회사의 제품 또는 서비스에 관한 정보 공개는 TI가 승인, 보증 또는 동의한 것으로 간주되지 않습니다.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere.
모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2023, Texas Instruments Incorporated