

산업용 IoT에 이용하기 위한 무선 메시 네트워크 프로토콜의 선택

산업용 IoT에 이용되는 다양한 애플리케이션들의 공통된 요구사항은, WSN이 저전력으로 작동되면서 유선과 같은 수준의 신뢰성을 달성해야 할 뿐만 아니라 다양한 네트워크 형태, 크기, 데이터 속도로 그렇게 할 수 있어야 한다는 것이다.

글/Ross Yu, Product Marketing Manager, Dust Networks Product Group
Linear Technology

산업용 IoT(사물 인터넷)의 가장 큰 강점은 무선 센서 네트워크(wireless sensor network: WSN)를 통해서 수집된 실제적인 데이터를 활용해서 효율을 향상시키고 업무 절차를 간소화할 수 있다는 것이다. WSN에 대한 수요는 다방면에 걸쳐서 일어나고 있으며, 건물, 도심지 거리, 산업 플랜트, 터널과 교량, 주행하는 자동차, 송유관이나 기상 관측소 같은 원격지 위치를 비롯한 모든 영역에 센서들이 설치되고 있다. 산업용 IoT에 이용되는 이와 같은 애플리케이션들에서 공통된 요구사항은, WSN이 저전력으로 작동되면서 유선과 같은 수준의 신뢰성을 달성해야 할 뿐만 아니라 다양한 네트워크 형태, 크기, 데이터 속도로 그렇게 할 수 있어야 한다는 것이다.

무선 메시 네트워크가 갈수록 더 널리 도입되고 있는데, 이것은 무선 메시 네트워크가 노드에서 노드로 메시지를 전달함으로써 비교적 저전력 무선을 이용해서 넓은 범위를 커버할 수 있고 대체 경로와 채널을 이용해서 간섭을 피함으로써 높은 신뢰성을 유지할 수 있기 때문이다. 특히 이러한 한 기법이 TSCH(Time Synchronized Channel Hopping) 메시 네트워크이다. 이 기술은 Linear Technology의 Dust Networks에서 선구자적으로 개발한 것이자 WirelessHART 산업 표준의 토대를 이루고 있는 것으로서, 산업용 IoT에 이용하기 위해서 요구되는 성능을 제공하는 것으로 현장에서 입증되고 있다. TSCH 네

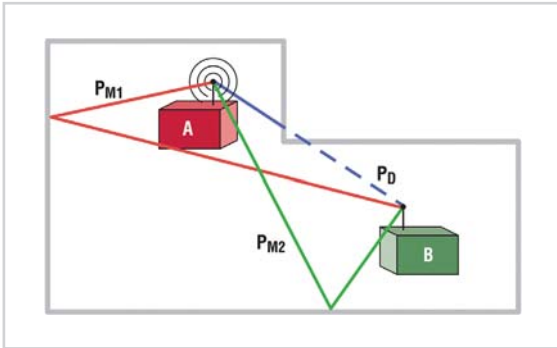
트워크는 통상적으로 99.999퍼센트 이상의 데이터 신뢰성을 달성하며, 라우팅 노드를 비롯해서 모든 무선 노드들이 소형 리튬 배터리를 사용해서 수 년에 이르는 배터리 수명을 달성할 수 있다. 다양한 메시 네트워크들이 유사한 명칭의 네트워킹 기법을 채택하고 있으나(‘주파수 민첩성’ 대 ‘채널 호핑’, ‘sleepy’ 대 ‘시간 동기화’ 메시 등등) 성능 수준은 천차만별일 수 있다. 그러므로 무선 네트워킹을 세부적으로 더 깊이 들어가보면 이러한 프로토콜 차원의 선택들이 WSN의 성능과 애플리케이션에 대한 네트워크의 전반적인 적합성에 심대하게 영향을 미칠 수 있다는 것을 알 수 있다.

무선 센서 네트워크의 당면 과제

무선(wireless)은 특성적으로 신뢰성이 떨어지므로, 신뢰성을 떨어트리는 요인이 무엇인지 이해하고 이러한 점들을 통신 시스템으로 고려해 넣어야 한다. 유선 통신에서는 케이블링에 의해서 통신 신호가 외부 세계로부터 보호되는 것과 달리, RF는 공중으로 전달되고 주변 환경과 상호작용을 일으킬 수 있다. 그러므로 다른 RF 송신 소스가 동적인 간섭을 일으킬 수 있다.

그런데 이보다도 훨씬 더 흔히 발생하는 문제는 멀티패스 페이딩(multipath fading)이라고 하는 현상이다. 멀티

그림 1. 멀티패스 페이딩 - 리시버(B)에서 무선 신호의 강도는 직접 경로(P_0)에 의해서 영향을 받을 뿐만 아니라 반사(P_{M1} 과 P_{M2})에 의해서도 영향을 받는다. 이들 반사 신호는 다른 위상으로 도착하고 심각한 페이딩을 일으킬 수 있다.



패스 페이딩은 자신의 신호가 주변 표면에 반사되어 다른 위상으로 도착함으로써 RF 메시지가 감쇠되는 것이다(그림 1). 휴대전화 사용자들은 일상적으로 멀티패스 페이딩을 경험할 수 있다. 예를 들어서 어느 한 지점에서는 전화기가 신호 강도가 불량했다가 단 몇 센티미터만 움직이더라도 이 현상이 개선되는 것을 경험해 봤을 것이다. 멀티패스 효과는 시간이 경과함에 따라서 변화한다. 인근의 반사 표면(사람, 자동차, 문 등)이 통상적으로 계속해서 움직이고 있을 것이기 때문이다. 그럼으로써 어떤 RF 채널이든 시간의 경과에 따라서 신호 품질이 크게 변동적일 것이다.

설상가상으로 문제를 더 복잡하게 하는 점은, 멀티패스 페이딩은 예측할 수가 없다는 것이다. 원칙적으로는 멀티패스 페이딩을 겪는 가운데서 채널의 성능을 알기 위해서는(다시 말해서 측정할 수 있기 위해서는) 네트워크가 어떤 한 채널로 동적으로 전송해야 할 것이다. 그러므로 사용되고 있지 않은 채널로 단순하게 수동적 신호 강도 측정(RSSI)을 하는 것은 동적 간섭을 검출하는 데는 유용할 수 있으나 멀티패스 페이딩을 겪는 가운데서 그 채널의 적합성을 예측하는 것은 할 수 없다.

하지만 다행스러운 점은 멀티패스 페이딩은 각기 RF 채널에 각기 다르게 영향을 미치고 시간의 경과에 따라서 변화하므로 채널 호핑을 해서 주파수 변화가 일어나게 함으로써 멀티패스 페이딩으로 인한 부정적 영향을 최소화할 수 있다는 것이다. WSN 프로토콜의 까다로운 점은 넓은 범위의 네트워크에 걸쳐서 다중 홉을 이용해서 채널 호핑을 할 수 있게 하는 것이다.

WSN에 이용되는 주요 기법들

이러한 제약이 존재하는 가운데서 각기 다른 WSN이 어떻게 동작하는지 이해하기 위해서 무선 메시 네트워크에서 주파수 변화를 지원하고 저전력을 달성하기 위해서 이용되고 있는 주요 기법들에 대해서 살펴보자.

단일 채널 WSN과 채널 민첩성(Single Channel WSNs and Channel Agility)

단순 구현 무선 메시 네트워크에서 일반적인 기법은 모든 노드를 단일 채널로 동작하게 하는 것이다. 한 RF 채널만 이용하므로 원칙적으로 한 시점에 한 장치만 전송할 수 있다. 그렇기는 하나 구현하기가 상대적으로 단순하다는 점에서 네트워크 스택 개발자들이 흔히 단일 채널 동작을 선택하고 있으며 그러면 WSN으로 주파수 변화가 거의 불가능하다.

채널에 대한 동적인 RF 간섭에 대응하기 위해서 어떤 단일 채널 WSN은 채널 민첩성(channel agility)이라고 하는 메커니즘을 사용하기도 한다. 이 기법은 네트워크가 모든 노드들로 동작 채널을 변경하게 하는 메시지를 브로드캐스트하는 것이다. 하지만 채널 민첩성 네트워크라 하더라도 시간적으로 어느 한 시점에서 이 네트워크는 여전히 한 단일 채널로만 동작한다. 채널 민첩성을 사용할 때는 어떤 한 채널이 전체 네트워크에 다 좋을 것이라고 간주하는 것이나 마찬가지다. 하지만 멀티패스 페이딩 효과로 인해서 실제 데이터를 보면 어떤 RF 채널이든 네트워크 수명 동안의 어느 시점에는 심각한 경로 저하를 일으킬 수 있고 그럼으로써 수 분 또는 수 시간에 이르는 시간 간격 동안에 노드들이 통신 끊김이 일어날 수 있다(박스 기사 참조: '멀티패스 페이딩이 무선 통신에 미치는 영향'). 채널 민첩성을 이용하는 네트워크는 동적 간섭을 피해서 채널을 변경할 수는 있으나 여전히 단일 채널로 동작하는 것이므로 이 네트워크는 멀티패스 페이딩의 해로운 효과에 여전히 취약하다고 할 수 있다.

네트워크 전체 슬립 전환에 의한 듀티 사이클링

(Duty Cycling by Network-Wide Sleeping)

저전력 동작을 위해서는, 무선 센서 네트워크들은 일종의 듀티 사이클링을 실시해서 동적 동작(송신, 수신 등,

이러한 동작은 통상적으로 수 밀리암페어의 전력 소모에 소모되는 시간 비율은 최소화하고 저전력 슬립 모드(통상적으로 1mA 미만)로 소모되는 시간 비율은 극대화할 수 있다. 또 어떤 무선 센서 네트워크에서는 전체 네트워크 슬립 기법('sleepy' 메쉬라고 함)을 이용해서 네트워크 내의 모든 노드들을 상당한 시간 간격 동안 저전력 슬립 상태로 전환하고 거의 같은 시간에 웨이크업해서 네트워크 트래픽을 전송/수신/포워드하도록 한다. 이 기법을 이용하는 네트워크에서는 쉬는 간격에는 네트워크 전체가 통신을 할 수 없게 된다. 예를 들어서 어떤 WSN을 한 시간에 한 번만 웨이크업시켜서 통신한다면 이 네트워크는 이 시간 동안에는 경보 메시지를 전송할 수도 없고 컨트롤러로부터 메시지를 수신해서 연결된 경고 표시등에 불이 들어오게 할 수도 없다. 전체 네트워크 슬립 기법을 이용할 때는 또 WSN이 실제 동작 조건에 대처하는 능력에 어떻게 영향을 미칠 것인지도 중요하게 고려해야 한다. 그러한 상당히 긴 슬립 간격 동안에 주변 RF 환경은 계속해서 역동적으로 움직이고 변화할 것이기 때문이다. 네트워크 슬립 동안에 사용할 수 없게 된 신호 경로는 네트워크가 웨이크업해야만 수리할 수 있다. 더욱 더 문제가 되는 것은, 슬립 네트워크는 대체적으로 단일 채널 네트워크일 가능성이 크므로 동작 간격 시에 네트워크로 더더욱 스트레스를 가하고 통신 불안정성의 위험성을 가중시킬 수 있다는 것이다.

전체 네트워크 슬립 기법을 이용할 때의 또 다른 문제점은 전체 네트워크 슬립 기법을 이용하면 사용자가 애플리케이션에 필요로 하는 것보다 더 낮은 데이터 속도를 받아들여야만 한다는 것이다(그러므로 더 적은 데이터만을 이용할 수 있다). 이러한 절충은 바람직하지 않다. WSN의 주된 목적은, 데이터를 신뢰할 수 있게 전달하고 이 정보를 활용해서 노후화된 모터의 성능 저하라든지 소매점에서 구형 냉장 장비의 순환적 전력 소비 증가와 같은 동작 상의 변화와 비효율을 보여줌으로써 사용자 시스템에 대해 더 깊이 있는 통찰을 얻을 수 있게 하는 것이기 때문이다. WSN이 제공하는 데이터가 네트워크 상의 제약 때문에 산발적일 때는 WSN으로부터 얻을 수 있는 데이터 활용과 통찰이 제한될 것이고 모니터링/제어 시스템의 전반적인 가치 제안을 떨어뜨릴 것이다.

시간 동기화 채널 호핑 메쉬 네트워크

TSCH(Time Synchronized Channel Hopping) 메쉬 네트워크는 멀티 홉 네트워크로 엄격한 시간 동기화를 이용해서 통신과 주파수 채널 활용을 엄밀하게 증대한다. TSCH 네트워크에서는 각기 노드들이 네트워크 상에서 수십 마이크로초 이내로 정확한 공통적 시간 틀을 공유한다. 각기 노드가 인접 노드들과 타이밍 오프셋 정보를 교환해서 시간 동기화를 유지한다. 시간 슬롯으로 네트워크 통신을 증대하고 이 시간 슬롯에 개별 패킷 송신/수신 기회를 스케줄링한다. 이는 다시 말해서 각기 시간 슬롯이 송신 노드가 웨이크업하고, 패킷을 전송하고, 수신 노드로부터 링크 층 응답을 수신하기에 충분할 만큼 길다는 뜻이다(7.5ms 등). TSCH에서는 네트워크 트래픽을 역동적으로 스케줄링할 수 있다. 그럼으로써 쌍 단위 채널 호핑, 충실한 경로 및 주파수 변화, 저전력 패킷 교환, 고 가용성 듀티 사이클링을 가능하게 한다.

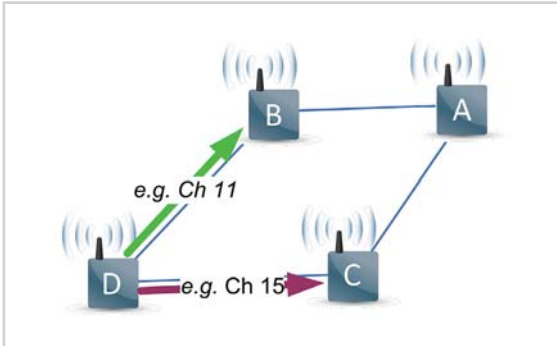
쌍 단위 채널 호핑(Pair-Wise Channel Hopping)

시간 동기화는 모든 트랜스미터-리시버 쌍으로 채널 호핑을 가능하게 하므로 주파수 변화를 가능하게 한다. TSCH 네트워크에서는 모든 패킷 교환 채널이 불가피한 RF 간섭과 페이딩을 피하기 위해서 호핑을 할 수 있다. 뿐만 아니라 각기 다른 장치 쌍 사이에 각기 다른 채널로 다중의 전송이 동시에 이루어질 수 있으므로 네트워크 대역폭을 높이도록 한다. 예를 들어서 IEEE 802.15.4 2.4GHz 무선 규격으로 15개 채널을 이용할 수 있다. 이 ISM 대역이 전세계적으로 보편적으로 이용되기 때문에 이 규격이 WSN 구현에 널리 채택되고 있다. 그러므로 단일 채널 802.15.4 WSN과 비교해서 TSCH 네트워크는 최대 15배의 대역폭을 이용할 수 있는 것이다.

충실한 경로 및 주파수 변화(Full Path and Frequency Diversity)

각각의 장치는 중복적 경로를 이용함으로써 간섭, 물리적 장애물, 멀티패스 페이딩 등으로 인한 통신 중단을 극복할 수 있다. 어떤 한 패킷 전송이 어떤 한 경로로 실패하면 자동으로 그 다음으로 이용할 수 있는 경로와 다른 RF 채널로 재시도를 한다(그림 2 참조). 각기 재시도

그림 2. 경로 변화와 주파수 변화 - 노드 D는 '녹색' 화살표 경로로 통신이 실패하면 다른 채널과 다른 경로를 이용해서 '보라색' 화살표 경로로 재시도를 한다.



(시간 변화)에 대해서 경로 변화와 주파수 변화가 이루어 지도록 함으로써 단일 채널 시스템에 비해서 각 재시도에 대해서 성공 가능성을 높일 수 있다.

저전력 패킷 교환 (Low-Power Packet Exchange)

TSCH를 이용함으로써 스케줄링된 통신 간격 사이에 노드들을 극저전력 슬립 모드로 전환할 수 있다. 각기 장치는 패킷을 전송하거나 인접 장치로부터 패킷이 들어오는지 청취할 때만 동작 상태가 된다. 또한 더욱 더 중요한 점으로서, 각기 노드가 자신이 언제 웨이크업하도록 스케줄링되어 있는지 알고 있으므로 각기 노드를 인접 노드들로부터 정보를 릴레이하는 데 항상 이용할 수 있다. 그럼으로써 TSCH 네트워크는 흔히 1퍼센트 미만의 듀티 사이클로도 네트워크를 전체적으로 이용할 수 있게 유지할 수 있다. 뿐만 아니라 각기 패킷 처리를 스케줄링 함으로써 TSCH 네트워크에서는 네트워크 내부적 패킷 충돌이 일어나지 않는다. 그럼으로써 해로운 RF 자가 간섭을 일으키지 않고서 네트워크의 집적도를 높이며 확장 가능하게 한다.

고가용성 듀티 사이클링 (High Availability Duty Cycling)

전체 네트워크 듀티 사이클링 네트워크와 달리, TSCH 네트워크에서는 개별 노드들이 패킷을 전송해야 하거나 패킷이 들어오는지 청취해야 할 때만 트랜시버를 웨이크업할 수 있다. TSCH 네트워크는 개별 트랜시미터-리시버 교환 단위의 작은 트래픽 상태 별로 네트워크 트래픽을 스케줄링 할 수 있으므로 네트워크 전체적으로

서로 다른 성격의 데이터 트래픽을 간편하게 수용할 수 있다. 예를 들어서 탱크 수위 센서는 한 시간에 한 번만 전송하면 되고 그 외의 구역에서는 압력/유속 센서가 수 초에 한 번씩 보고한다면 TSCH 네트워크는 데이터 트래픽들을 신뢰할 수 있게 지원하기 위해서 필요한 만큼의 빈도로 노드들(그리고 이의 부모 노드 혹은 상위 노드)을 웨이크업 할 수 있다.

TSCH와 저전력 하드웨어를 결합했을 때의 강점

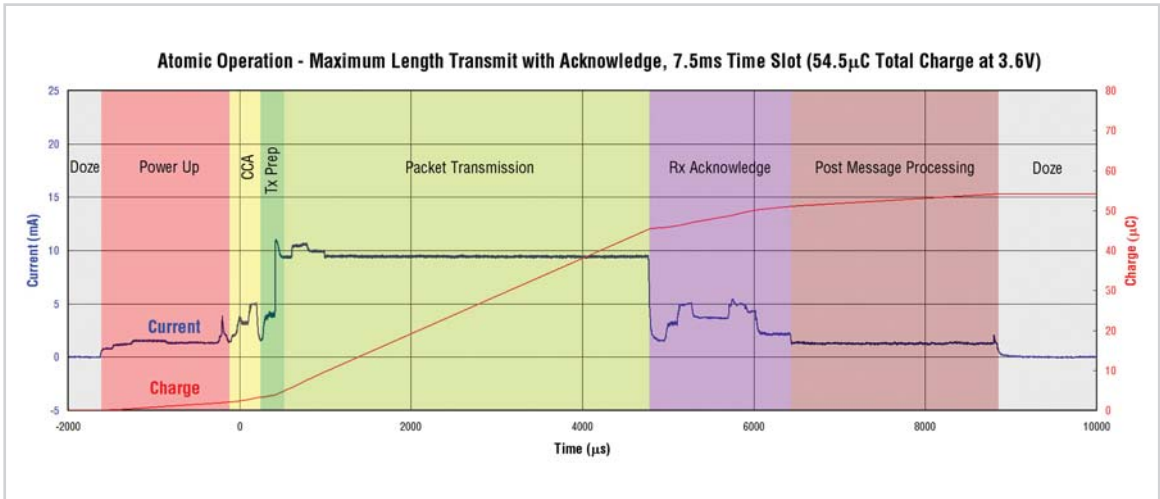
802.15.4 트랜시버는 지난 십여 년에 걸쳐서 송신, 수신, 슬립 등과 같은 동작 시의 동작 전류가 꾸준히 낮아졌다. 예를 들어서 Linear Technology의 LTC5800-IPM은 +8dBm 송신 전력과 수신을 위하여 4.5mA~9.5mA를 소모하는데, 이것은 이전 세대 802.15.4 트랜시버에 비해서 3~5배 낮은 것이다. 피크 전류 소비를 낮추는 것은 좋은 출발점인 것은 당연하지만, 패킷을 전송하는 데 소요되는 에너지는 그 걸리는 시간만큼 소모하는 전하 양의 함수이다. 전류 소모를 오실로스코프로 측정하고 시간에 걸쳐서 표시한다면(그림 3), 패킷을 전송하는 데 소요되는 에너지는 곡선 하단의 면적으로 나타낼 수 있을 것이며 그러므로 피크 전류에 의해서만 아니라 각각의 동작이 얼마나 긴 시간 동안 지속하느냐에 의해서도 영향을 받는다. LTC5800-IPM은 3.6V 전원 전압을 이용해서 단 54.5µC 전하만으로(196.2µJ의 에너지 = 3.6V x 54.5µC) 성공적인 패킷 전송/응답을 실시함으로써 최적화된 패킷 교환을 가능하게 한다.

저전력을 달성하기 위한 시스템 차원의 접근법

무선 센서 네트워크에서 에너지가 어떻게 소모되는지에 대해서 좀 더 전체론적인 관점을 취함으로써, 낮은 전력 소모를 달성하는 문제는 데이터 트래픽뿐만 아니라 패킷을 전송하기 위해서 소요되는 에너지와 한 노드에서 다른 노드로 패킷을 성공적으로 전송하기 위해서 필요한 재 시도 횟수의 함수라는 것을 알 수 있다.

$$Average\ Energy = f \left(\left(\frac{Num\ Packets}{Period\ of\ Time} \right) \times \left(\frac{Energy\ per\ Packet}{per\ Packet} \right) \times \left(\frac{Num\ Retries\ to\ Successfully\ Send\ A\ Packet}{to\ Successfully\ Send\ A\ Packet} \right) \right)$$

그림 3. TSCH 최적화 하드웨어의 이점. 이 그림에서는 패킷을 전송하고 링크 층 응답을 수신할 때의 전류 소모를 보여준다. Linear Technology의 LTC5800-IPM 같은 TSCH 최적화 하드웨어를 이용하면 개별 처리에 소요되는 에너지를 54.5 μ C까지 낮출 수 있다.



패킷당 에너지에 중점을 두고 모든 재시도에 대해서 시간, 경로, 주파수 변화를 활용할 수 있는 네트워킹 프로토콜을 채택함으로써(그림으로써 패킷을 전송하기 위해서 평균적으로 필요한 재시도 횟수 감소) 애플리케이션 차원의 희생을 필요로 하지 않고 시스템 전반에 걸쳐서 효율을 향상시킴으로써 낮은 전류 소모를 달성할 수 있다. TSCH 네트워크에서는 통신 스케줄을 매우 높은 수준으로 구성할 수 있으며 애플리케이션의 필요에 따라서 통신 시간 슬롯을 자동으로 할당한다.

TSCH 네트워크를 낮은 데이터 속도로 구성함으로써 필요한 전력을 최소화할 수 있으며 필요한 전력을 자연에서 얻는 방식의 Energy Harvesting 소자도 사용할 수 있게 된다. 이 동일한 TSCH 네트워크를 산업용 플랜트에서와 같이 서로 다른 보고 빈도를 지원하도록 구성할 수도 있다. 예를 들어서 산업용 플랜트에서는 느리게 변화하는 변수(탱크 수위 등)와 좀더 빠르게 변화하는 변수(파이프 내의 유속)를 모두 이용할 수 있다. TSCH 네트워크는 네트워크 상의 해당 부분의 필요에 따라서 시간 슬롯을 자동으로 할당할 수 있다. 그러므로 TSCH 네트워크는 사용자가 네트워크의 필요에 따라서 애플리케이션을 맞춤화해야 하는 것이 아니라, 다양한 유형의 애플리케이션의 필요에 따라서 적합하게 TSCH 네트워크를 맞춤화할 수 있다.

산업용 IoT로 다양한 애플리케이션 가능

TSCH는 WirelessHART(IEC62591) 등의 산업용 무선 표준에서 토대적인 역할을 하고 있으며, IEEE802.15.4e를 비롯한 새로운 인터넷 프로토콜(Internet Protocol) 기반 무선 센서 네트워크 표준을 가능하게 하는 핵심적인 요소로 활약하고 있다. 또한 IETF 6TiSCH 그룹에서는 TSCH 링크 층을 표준화하기 위한 작업을 진행하고 있다. 그러므로 TSCH는 앞으로도 계속해서 연관 표준들로 도입될 것이며 더욱 더 넓은 범위로 확대될 것이다.

TSCH 네트워크는 이미 산업용 프로세스 모니터링, 울타리 보안, 데이터 센터 에너지 효율, 대도시 스마트 주차 솔루션 등과 같이 다양한 분야의 까다로운 애플리케이션들로 수년의 배터리 수명과 99.999퍼센트 이상의 데이터 신뢰성을 달성하는 것으로 입증되고 있다. 고도로 구상가능성이 높고 신뢰성이 뛰어난 저전력 무선 네트워크를 가능하게 함으로써 TSCH 네트워크는 산업용 IoT에 이용하기에 이상적으로 적합하다. **SM**

멀티패스 페이딩이 무선 통신에 미치는 영향

멀티패스 페이딩은 주변 환경의 모든 물체의 위치와 특성에 따라서 종속적이며 실제 상황에서는 어떻게 될 것인지 예측하기가 불가능하다. 한 가지 다행스러운 점은 **그림 A1**에서 보는 것과 같은 지형도가 주파수에 따라서 변화한다는 것이다. 다시 말해서 어떤 패킷을 멀티패스 페이딩 때문에 수신하지 못하게 되었을 때는 다른 주파수로 전송하면 성공 확률을 높일 수 있다는 것이다.

주변 환경의 물체들은 정지되어 있지 않으므로 멀티패스 현상은 시간에 따라서 변화한다. 예를 들어서 자동차가 지나가거나 문을 열고 닫을 수 있다. **그림 A2**에서는 26일의 기간에 걸쳐서 2개 산업용 센서 사이에 어떤 한 무선 경로에 대해서 이 시스템에 이용된 16개 채널 각각의 패킷 전달 비율(packet delivery ratio)을 보여주고 있다. 주중과 주말에 분명한 사이클이 있다는 것을 알 수 있다. 특정한 시점에 어떤 채널은 양호하고(높은 전달 비율), 어떤 채널은 불량하고, 또 어떤 채널은 지극히 변동적이다. 17번 채널은 전반적으로는 양호한데, 적어도 한 지점에서는 제로 전달 비율이라는 것을 알 수 있다. 네트워크 상의 각기 경로가 질적으로 유사한 동작을 나타내지만 채널 성능은 각기 고유하며 따라서 어느 한 채널이 네트워크의 어느 위치에서나 효과적인 것은 아니라는 것을 알 수 있다.

그러므로 간섭과 멀티패스 페이딩을 극복하기 위해서는 채널 변화와 경로 변화를 잘 활용하는 것이 신뢰할 수 있는 무선 시스템을 구축하기 위한 열쇠이다.

그림 A1. 멀티패스 페이딩 때문에 리시버를 단 몇 센티미터만 옮기더라도 링크 품질이 크게 달라질 수 있다.

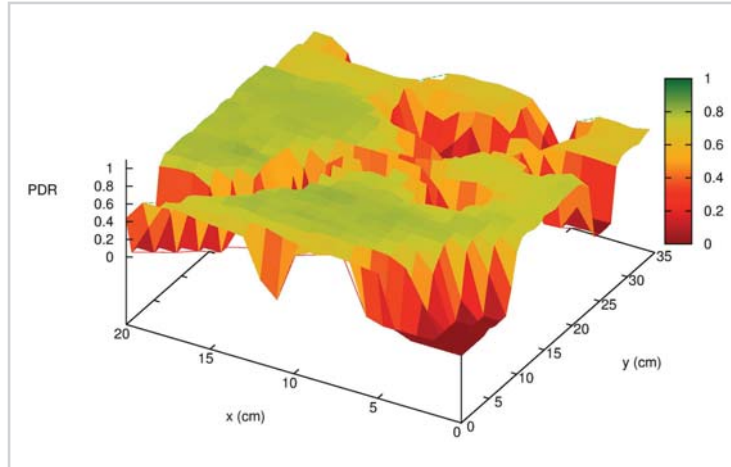


그림 A2. 시간의 경과에 따른 무선 링크 층의 패킷 전달 비율(packet delivery ratio)

