

mgr inż. Jan Macheta*

dr inż. Łukasz Krzak*

dr inż. Cezary Worek*

*AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Wydział Informatyki, Elektroniki

i Telekomunikacji Katedra Elektroniki

al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

mgr inż. Mateusz Kubaszek*

mgr inż. Szymon Zawora**

**Zamel Sp. z o.o.

ul. Zielona 27, 43-200 Pszczyna

Synchroniczna, niskomocowa bezprzewodowa sieć sensorowa do monitorowania przemysłowych procesów produkcyjnych

Słowa kluczowe: IIoT, IoT, 6TiSCH, komunikacja radiowa, Internet Rzeczy.

STRESZCZENIE

Połączenie stosu sieciowego natywnie wspierającego warstwę sieciową IPv6 ze standardem IEEE 802.15.4-TSCH (ang. *Time Slotted Channel Hopping*) pozwoliło na budowę niezawodnej, niskomocowej sieci bezprzewodowej dopasowanej do zapotrzebowań IIoT (ang. *Industrial Internet of Things*). Wykorzystany stos komunikacyjny jest obecnie obiektem standaryzacji przez grupę roboczą IETF 6TiSCH. W artykule przedstawiono najważniejsze cechy tego standardu oraz opisano sposób jego adaptacji do wymagań środowiska przemysłowego, w którym praca w paśmie sub-GHz niesie wiele korzyści, w porównaniu do pasma 2,4 GHz. Przedstawiono również dwa rodzaje modułów radiowych dopasowanych do różnych potrzeb aplikacyjnych, mogących znaleźć zastosowanie w monitorowaniu procesów produkcyjnych i zużycia mediów.

1. WPROWADZENIE

Rosnące potrzeby związane z optymalizacją procesów produkcyjnych wymagają stosowania nowych rozwiązań w obszarze zdalnego dostępu do urządzeń pomiarowych i wykonawczych. Rynek aplikacji przemysłowych jest obecnie jednym z głównych odbiorców technologii tzw. Internetu Rzeczy i na jego potrzeby opracowywane są specjalne rozwiązania. Obejmują one m.in. nowe metody łączności bezprzewodowej, stanowiące pomost łączący elementy z grupy OT (ang. *Operational Technology*) [1], monitorujące i sterujące pracą fizycznych podzespołów wykorzystywanych w procesach przemysłowych z rozwiązaniami IT (ang. *Informational Technology*), odpowiedzialnymi za agregację, obróbkę i prezentację danych, niejednokrotnie połączonych z zaawansowanym wnioskowaniem. Obie te grupy odróżnia kontekst wykorzystania - OT stanowi narzędzia wykonawcze, natomiast IT kwalifikujemy do narzędzi zarządczych. Obecne rozwiązania IT w zakresie komunikacji bazują na protokole IP (ang. *Internet Protocol*), który w postaci warstwy transportowej TCP/IP, stał się standardem komunikacyjnym tworzącym współczesny Internet. Niestety, jego wykorzystanie w szerokiej gamie urządzeń OT jest trudne, ze względu na bariery techniczne i ekonomiczne. Powoduje to widoczną segmentację, która znacząco utrudnia integrację usług. Poziomy OT i IT najczęściej komunikują się dziś przez różnego rodzaju

bramy i punkty dostępowe, dokonujące translacji protokołów i danych aplikacyjnych. Ich skuteczna fuzja może zaistnieć dzięki adaptacji przez technologie OT protokołu IP [2], przy czym w zastosowaniach przemysłowych wymagana jest wysoka niezawodność i jakość komunikacji (*QoS* - ang. *Quality of Service*) oraz deterministyczne działanie [3]. Wdrażane rozwiązanie musi być też skalowalne, gdyż doskonalenie procesów produkcyjnych idzie w parze z rosnącą liczbą komunikujących się ze sobą urządzeń, co nie może skutkować degradacją funkcji komunikacyjnych. Sam proces instalacji nowych systemów musi być też w dużej mierze zautomatyzowany a zestawianie połączeń bezprzewodowych oparte na zasadach samoorganizacji. Istotnym wymogiem jest również zapewnienie możliwie dużego zasięgu łączności.

W niniejszym artykule przedstawiono rozwiązanie sieci bezprzewodowej spełniającej ww. wymagania IIoT [4]. Opiera się ono na autorskiej platformie sprzętowej, w postaci wysokiej jakości modułów radiowych oraz adaptacji do potrzeb przemysłowych nowego stosu komunikacyjnego, opracowywanego obecnie przez organizację IETF o nazwie 6TiSCH. Stos ten integruje warstwę TSCH zgodną z IEEE802.15.4, działającą w paśmie 863-870 MHz oraz warstwę 6LoWPAN, która natywnie wspiera komunikację IPv6 w sieciach LLN (ang. *Low-Power and Lossy Networks*). Rozwiązanie to tworzy niezawodną, niskomocową łączność przystosowaną do monitorowania przemysłowych procesów produkcyjnych.

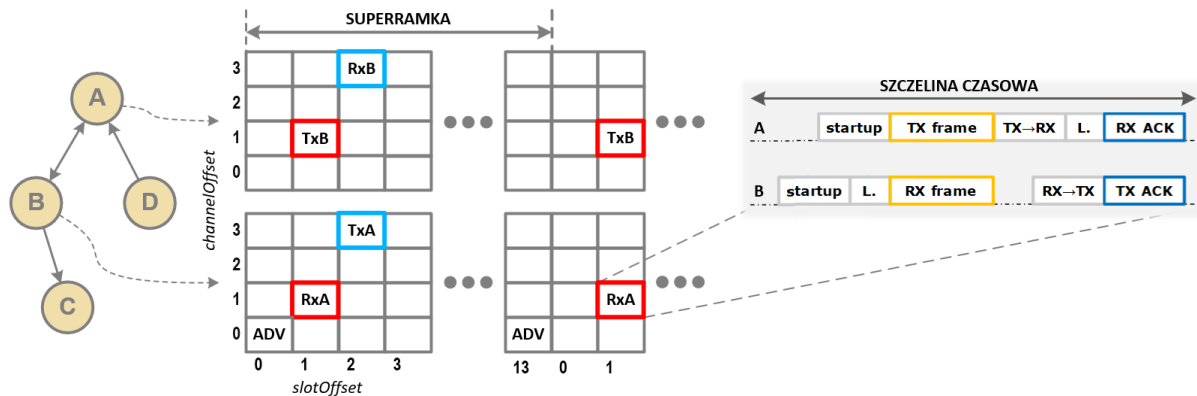
2. ISTNIEJĄCE ROZWIĄZANIA

Temat standaryzacji sieci LLN jest od kilku lat podejmowany zarówno przez organizacje standaryzujące, m.in. IETF oraz IEEE, jak również konsorcja korporacyjne. Poza wykorzystaniem technologii komunikacyjnych opracowanych z myślą o rynku konsumenckim, jak np. WiFi, LTE czy Bluetooth, istnieje kilka komercyjnych stosów sieciowych, lepiej dopasowanych do potrzeb przemysłowych. Wśród nich wymienić należy WirelessHART, ISA100.11a, Thread oraz ZigBee. Bazują one na standardzie IEEE 802.15.4, definiującym warstwę fizyczną (PHY, ang. *Physical Layer*) pracującą z przepływnością 250 kb/s w 16 kanałach w paśmie 2,4 GHz oraz warstwę dostępu do kanału (MAC, ang. *Medium Access Control*), umożliwiającą łączność w sieciach o topologii kratowej. ISA100.11a oraz Thread posługują się natywnie protokołem IPv6, podczas gdy WirelessHART oraz ZigBee narzucają własne warstwy transportowe i interfejs dla aplikacji. Zasadnicza różnica między nimi wpływająca na niezawodność sieci uwidacznia się już w sposobie dostępu do kanału radiowego. Thread oraz ZigBee wykorzystują dostęp oportunistyczny CSMA/CA (ang. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*). Jego główną wadą jest utrudnione skalowanie - w przypadku dużej gęstości aktywnie komunikujących się urządzeń, kolizje pakietów i retransmisje narastają lawinowo. WirelessHART oraz ISA100.11a wykorzystują wielodostęp w trybie TDMA (ang. *Time-Division Multiple Access*), silnie redukujący kolizje pakietów w sieci. Z punktu widzenia zasięgu wszystkie ww. standardy posiadają dodatkowo jedną wadę - oferują łączność tylko w paśmie 2,4 GHz, co ze względu na uzyskiwane krótkie zasięgi łączności i niską zdolność do penetracji przeszkód sygnałem radiowym stanowi jedną z istotnych barier ich stosowania w środowisku przemysłowym.

3. SIECI TSCH I STOS 6TiSCH

Rosnące wymagania dotyczące niezawodności, zwłaszcza w systemach przemysłowych, doprowadziły do opracowania nowej warstwy MAC opartej na technikach TDMA oraz FDMA [5]. TSCH (ang. *Time Slotted Channel Hopping*), który jest połączeniem synchronicznego szczelinowania czasowego oraz pseudolosowego wyboru kanału na każdą

kolejną transmisję pakietów, okazał się być odporny na wąskopasmowe zakłócenia i zaniki związane z efektem wielodrogowości [6], a tym samym dobrze dopasowany do pracy w środowisku przemysłowym. Ideę rozwiązania przedstawiono na Rys. 1. W sieciach TSCH węzły działają we wspólnej domenie czasowej. Synchronizacja zachodzi podczas każdej interakcji dwóch węzłów, między którymi istnieje relacja rodzic-potomek. Wszystkie węzły sieci działają według wspólnego harmonogramu, w danej szczelinie czasowej węzeł może nadawać, odbierać lub mieć wyłączony interfejs radiowy.



Rys. 1 Schemat prezentujący alokację zasobów w sieciach TSCH.

Pobór energii w sieciach TSCH jest silnie związany z okresem aktywności układu radiowego oraz koordynacją transmisji w sieci kratowej. Redukcja domeny kolizyjnej i rezerwacja ilości szczelin, odpowiadająca zapotrzebowaniom aplikacyjnym, pozwala zminimalizować zużycie energii [7]. Można wymienić wiele przykładów potwierdzających sukces sieci kratowych opartych na technice TSCH w przemyśle metalurgicznym, petrochemicznym, chemicznym, morskim oraz w aplikacjach monitorująco-sterujących [8][9][10]. Postępująca integracja sieci LLN z siecią Internet jest ważnym kierunkiem rozwoju, pozwalającym budować aplikacje w oparciu o sprawdzone technologie internetowe, takie jak stos TCP/IP. Prace w tym kierunku zostały podjęte przez dwie grupy robocze IETF 6LoWPAN i 6TiSCH. Zestawienie opracowanych stosów w standardzie ISO/OSI zostało zaprezentowane na Rys. 2. Natywne wsparcie dla TCP/IP w sieciach typu LLN jest rozwiązaniem pożądanym w IIoT, które w niedalekiej przyszłości ma szansę zdeklasować obecnie stosowane standardy komunikacyjne, oferując większą interoperacyjność.

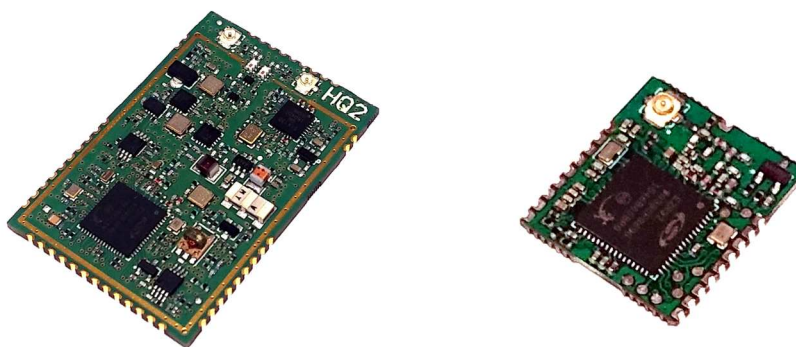
Standard IEEE 802.15.4-TSCH zdefiniował warstwę PHY oraz MAC, bez rozwiązywania kwestii przydzielania zasobów łącza. Powołana w tym celu grupa robocza 6TiSCH zaproponowała tzw. konfigurację minimalną (podstawowy mechanizm asocjacji węzłów i utrzymania połączenia) oraz interfejs planisty rezerwującego zasoby łącza (6top/6P). Planista tworzy harmonogram komunikacji węzłów, przyporządkowując im odpowiednie wartości *slotOffset* oraz *channelOffset* (Rys. 1). Można wyróżnić dwie podstawowe grupy algorytmów planisty, rozproszone oraz centralne z elementem PCE (ang. *Path Computation Entity*). Tematyka badań planisty jest obecnie poruszana w wielu publikacjach [11]. 6TiSCH WG proponuje bazowy algorytm rozproszony nazywany MSF (ang. *Minimal Scheduling Function*). Każdy węzeł, zaczynając od koordynatora sieci, wysyła pakiety typu "beacon" z arbitralnie przyjętymi liczbami *slotOffset* i *channelOffset* determinującymi szczelinę rozgłaszającą oraz z pozostałymi parametrami MAC. Są one jednakowe dla całej sieci. Wspólna szczelina pozwala na inicjowanie komunikacji warstwom wyższym, takim jak RPL ROLL (ang. *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) i 6top/6P. Ze względu na ograniczone zasoby sprzętowe, podstawową konfiguracją

trasowania jest budowanie ścieżki w koordynatorze, tzw. *source routing*. W sieci 6TiSCH każdy węzeł może brać udział w trasowaniu pakietów będąc zasilanym bateryjnie.

	Klasyczny stos sieciowy	6LoWPAN	6TiSCH
warstwa aplikacji	HTTP FTP SSH itd.	CoAP MQTT	CoAP MQTT
warstwa transportowa	TCP UDP	UDP	UDP
warstwa sieciowa	IPv4 IPv6 ICMP RIP OSPF BGP	IPv6 ROLL ICMPv6 (dostosowany)	IPv6 ROLL ICMPv6 (dostosowany)
warstwa adaptacyjna		6LoWPAN	6LoWPAN
planista (Logical Link Control)			6top/6TiSCH
warstwa łącza danych	IEEE 802.3 MAC IEEE 802.11 MAC	IEEE 802.15.4 MAC	IEEE 802.15.4e MAC
warstwa fizyczna	IEEE 802.3 PHY IEEE 802.11 PHY	IEEE 802.15.4 PHY	IEEE 802.15.4 PHY

Rys. 2 Porównanie klasycznego stosu sieciowego, stosu 6LoWPAN i 6TiSCH w modelu ISO/OSI.

4. OPRACOWANA PLATFORMA SPRZĘTOWA



Rys. 3. Zdjęcia opracowanych modułów radiowych: *High Quality* (po lewej) i *Low-Cost* (po prawej).

W ramach prac opracowano dwie nowe platformy sprzętowe, kompatybilne ze stosem 6TiSCH, w postaci modułów radiowych mogących znaleźć zastosowanie w różnego typu produktach. Pierwszy z nich, moduł *Low-Cost*, to kompaktowy układ dedykowany do aplikacji wrażliwych kosztowo oraz produktów zasilanych bateryjnie. Drugi, moduł *High Quality*, opracowano z myślą o wyższej niezawodności (spełnia tzw. klasę 1 odbiornika wg ETSI) i aplikacjach specjalnych, bądź budowie krytycznej infrastruktury sieciowej. Oba moduły bazują na układach EZR32WG330F256R69G firmy Silicon Labs, które integrują dobrej jakości układ radiowy pracujący w zakresie sub-GHz oraz mikrokontroler z rdzeniem ARM Cortex-M4. Oba moduły zbadano na zgodność z wymaganiami dyrektywy RED, w tym kompatybilnością ze standardem ETSI 300 220 w pełnym zakresie temperatur pracy. Zdjęcia modułów przedstawiono na Rys. 3, natomiast podstawowe parametry zestawiono w tabeli 1. Moduł *High Quality* jest ponadto wyposażony w tzw. mechanizm antenna diversity, służący do automatycznego wyboru anteny (jednej z dwóch) o silniejszym sygnale. Korzyści z systemu antenna diversity w omawianym paśmie zostały przedstawione w [12].

Tabela 1. Zestawienie parametrów opracowanych modułów radiowych.

Parametr	<i>High Quality</i>	<i>Low-Cost</i>
Klasa odbiornika wg ETSI	ETSI Class 1	ETSI Class 1.5
Graniczna czułość (15% PER)	-107 dBm	-100dBm

Moc nadawcza	+13 dBm	+13 dBm
Pasmo pracy	863 MHz - 870 MHz	863 MHz - 870 MHz
Zakres temperatur pracy	-10st.C...+55st.C	-10st.C...+55st.C
Wymiary	33 mm x 49 mm	18 mm x 20 mm
Interfejsy I/O	GPIO, U(S)ART, SPI, I2C, ADC, DAC, Timer	

5. ADAPTACJA STOSU 6TiSCH DO WYMAGAŃ IIOT

Uruchomienie stosu 6TiSCH na ww. platformach sprzętowych wymagało znacznych prac adaptacyjnych. Aby spełnić wysokie wymagania dot. zasięgu łączności, niskiej wrażliwości na przeszkody na drodze propagacji sygnału radiowego, a także odporności na zakłócenia ze strony innych systemów zdecydowano się na wykorzystanie warstwy fizycznej standardu IEEE 802.15.4 w trybie SUN PHY Operation Mode #1, pracującej z przepływnością 50 kb/s. Wykorzystuje ona 69 kanałów o szerokości 100 kHz w paśmie 863 MHz - 870 MHz. Z zastosowaniem nowej warstwy fizycznej wiązało się wyznaczenie i przetestowanie nowych parametrów czasowych warstwy łącza (transmisja w szczeliny czasowej, synchronizacja i usypianie). Wyznaczona długość pojedynczej szczeliny czasowej wyniosła 35 ms.

Prezentowane rozwiązanie oparto na projekcie OpenWSN, który jest projektem o otwartym kodzie źródłowym, implementującym tryb TSCH oraz protokoły 6LoWPAN, 6top/6P i UDP. Oprogramowanie to zostało przeportowane na opisaną wyżej platformę sprzętową i zamknięte w postaci użytecznej biblioteki. Finalny stos komunikacyjny posiada interfejs aplikacyjny zgodny z Berkeley Socket Abstraction, a każdy węzeł identyfikowany jest przez unikalny adres IPv6. Aplikacje komunikują się przez gniazda korzystając z warstwy transportowej UDP. Kompatybilność warstwy transportowej sprawia, że aplikacja po stronie węzła sieci 6TiSCH nie różni się od tych implementowanych na hostach korzystających z klasycznego stosu sieciowego.

W ramach prac opracowano także model poboru energii pozwalającego wyznaczyć podstawowe parametry energetyczne i czasowe węzłów sieci. Wykonano szereg pomiarów mających na celu sparametryzowanie modelu i uzasadnienie możliwości pracy na zasilaniu bateryjnym. Przy bardzo dużej aktywności węzła, tj. zakładając iż moduł komunikuje się ze swoim rodzicem, do którego trasuje ramki od 3 potomków, w sieci obecny jest ruch utrzymaniowy, a pakiety z danymi są generowane co około 10 sekund przez każdy węzeł, czas pracy modułu Low-Cost wynosi 65 dni na każdy 1000 mAh ładunku. Przyjmując, że liczba szczelin czasowych w superramce wynosi 53 (dając okres sieci wynoszący 1,855 s) oraz ograniczając liczbę kanałów dla szczeliny rozgłaszającej do 3, czas dołączenia węzła wynosi średnio 92 sekund. Parametry te mogą ulec poprawie na etapie dalszych prac nad algorytmem planisty.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono rezultat budowy niskomocowej platformy komunikacyjnej do monitorowania przemysłowych procesów produkcyjnych w oparciu o aktualnie opracowywany standard 6TiSCH, zaadaptowany do pracy w środowisku przemysłowym. Zaproponowano dwa komplementarne wykonania wysokiej klasy modułów radiowych, działające w atrakcyjnym ze względu na walory radiowe paśmie 863-870 MHz. Ich parametry potwierdzono testami typu pre-compliance na zgodność z normami ETSI. Zaprezentowano także główne cechy systemu radiowego pracującego z wielodostępem w trybie TSCH. Finalne rozwiązanie ma duże szanse znaleźć zastosowanie w produktach z segmentu automatyki przemysłowej i opomiarowania mediów.

PODZIĘKOWANIA

Praca powstała w ramach projektu „Innowacyjny system niskoenergetycznej, radiowej sieci sensorowej dedykowanej dla środowisk przemysłowych i komercyjnych, wspierający usługi monitorowania procesów produkcyjnych i optymalizacji zużycia mediów”, współfinansowanego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014-2020, oś priorytetowa 1. Nowoczesna gospodarka, Działanie 1.2. Badania, rozwój i innowacje w przedsiębiorstwach, nr umowy UDA-RPSL.01.02.00-24-0664/16-00.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.R. Palattella, P. Thubert, X. Vilajosana, T. Wattenye, Q. Wang, T. Engel, „6TiSCH Wireless Industrial Networks: Determinism Meets IPv6“, *Internet of Things, Smart Sensors, Measurement and Instrumentation 9*, s.111-141, 2014
- [2] G. Gaillard, D. Barthel, F. Theoleyre, F. Valois, “Service Level Agreements for Wireless Sensor Networks: a WSN Operator’s Point of View”, *IEEE/IFIP NOMS – Network Operations and Management Symposium, Poland*, 2014.
- [3] D. Dujovne, T. Watteyne, X. Vilajosana, P. Thubert, „6TiSCH: Deterministic IP-Enabled Industrial Internet (of Things)“, *IEEE Communications Magazine - Communications Standards Supplement*, pp. 36-41, 2014.
- [4] M. R. Palattella, N. Accettura, X. Vilajosana, T. Watteyne, „Standardized Protocol Stack for the Internet of (Important) Things“, *IEEE Communications Survey & Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1389-1406, 2013
- [5] K. S. J. Pister, L. Doherty, „TSMP: Time Synchronized Mesh Protocol“, *Internal Symposium on Distributed Sensor Networks, DSN*, 2008
- [6] T. Watteyne, A. Mehta, K. Pister, “Reliability through frequency diversity: Why channel hopping makes sense”, *Proceedings of ACM Symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks (PEWASUN)*, 2009, pp. 116–123
- [7] I. Juc, O. Alphand, R. Guizzetti, M. Favre, A. Duda “Energy Consumption and Performance of IEEE 802.15.4e TSCH and DSME”, *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Apr 2016.
- [8] Endress+Hauser, “First Applications of WirelessHART Networks in the Steel Industry”, Endress+Hauser, Tech. Rep., August 2010.
- [9] Endress+Hauser, “Monitoring System of the Farm Storage Tank at Grupo Petroquimico Beta (GPB), Coatzacoalcos, Mexico”, Endress+Hauser, Tech. Rep., July 2012.
- [10] K. Minamizato, H. Furuya, N. Tanaka, T. Yamaguchi, “ Verification of Characteristics of Wireless Instruments installed in Plant Facilities”, *Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., LTD, Japan*, 2015.
- [11] R.T. Hermeto, A. Gallais, F. Theoleyre, “Scheduling for IEEE802.15.4-TSCH and Slow Channel Hopping MAC in Low Power Industrial Wireless Networks: A Survey”, *Computer Communications*, 2017.
- [12] M. Kubaszek, J. Macheta, M. Zapart, Ł. Krzak, C. Worek, “Evaluation of Antenna Diversity Scheme for 868MHz Narrowband Communication Systems”, *International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSES)*, 2018.

mgr inż. Jan Macheta*

dr inż. Łukasz Krzak*

dr inż. Cezary Worek*

*AGH University of Science and Technology
Faculty of Computer Science, Electronics
and Telecommunications, Department of Electronics
al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 Krakow

mgr inż. Mateusz Kubaszek*

mgr inż. Szymon Zawora**

**Zamel Sp. z o.o.
ul. Zielona 27, 43-200 Pszczyna

Synchronous, low-power wireless sensor network for monitoring of industrial production processes

Key words: IIoT, IoT, 6TiSCH, radiocommunication, Internet of Things.

ABSTRACT

The fusion of a network stack natively supporting the IPv6 network layer with the IEEE 802.15.4-TSCH (Time Slotted Channel Hopping) standard enabled a reliable low-power wireless network stack suitable for to the needs of IIoT (Industrial Internet of Things). The incorporated network stack is currently being standardized by the IETF 6TiSCH working group. The article presents the key characteristics of the standard and its adaptation to the industrial requirements, in which the ability to operate in sub-GHz bands outperforms the 2.4 GHz band. The article also presents two radio modules suited for various application requirements, that can be used in monitoring of industrial production processes and media usage.

Fig. 1. TSCH resource allocation scheme.

Fig. 2. Comparison of the classical network stack, 6LoWPAN stack and 6TiSCH using the ISO/OSI model.

Fig. 3. Pictures of the *High Quality* module (left) and the *Low-Cost* module (right).

Tab. 1. Parameters overview of designed modules.