

# Systemy dla Internetu Rzeczy (1)

## Zestaw CC2650 SensorTag

Internet Rzeczy jest obecnie najbardziej rozwijającą branżą elektroniki. Jest wiele definicji IoT, ale minimalna definicja może być taka: Internet Rzeczy to sieć obiektów fizycznych (rzeczy) połączonych z Internetem. Połączenie może być bezprzewodowe lub przewodowe, bezpośrednie lub pośrednie. Typowo, obiekt jest przyłączony bezprzewodowo do bramki i dopiero dalej do Internetu. Zestaw CC2650 SensorTag firmy Texas Instruments umożliwia szybkie i łatwe prototypowanie bezprzewodowego węzła IoT.

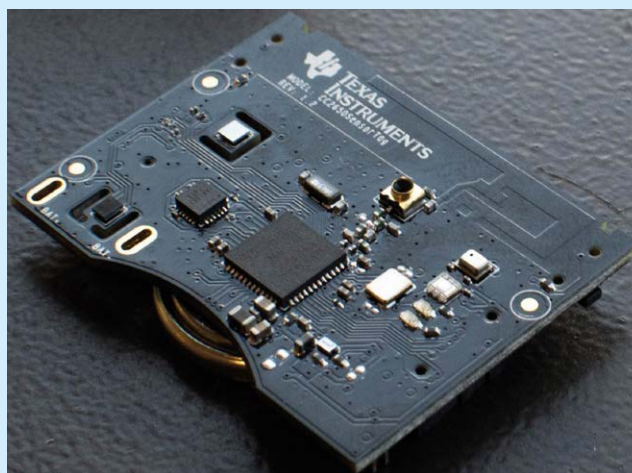
W skład zestawu **CC2650 SensorTag** wchodzi układ scalony CC2650 obsługujący 4 standardy komunikacji bezprzewodowej. Zestaw zawiera wiele czujników MEMS. Zainstalowane oprogramowanie z użyciem komunikacji Bluetooth Smart (LE) pozwala na połączenie z aplikacjami działającymi na smartfonach lub tabletach z systemem operacyjnym Android lub iOS. Dołączenie do chmury obliczeniowej zajmuje mniej niż 3 minuty. Przy transmisji danych pomiarowych ze wszystkich czujników co 1 sekundę czas pracy zestawu na jednej baterii CR2032 wynosi ponad rok.

Jest to pierwszy odcinek kursu „Systemy dla Internetu Rzeczy”. Zawiera on opis budowy zestawu CC2650 SensorTag. Opis użytkowania aplikacji *DEMO*, zaprogramowanej w każdym fabrycznym zestawie, zostanie zamieszczony w następnym odcinku. W kolejnych odcinkach kursu zostaną przedstawione moduły rozszerzeń DevPack, system operacyjny czasu rzeczywistego TI-RTOS, programowanie układu CC2650 w środowisku Code Composer Studio i wiele innych praktycznych zagadnień.

W zestawie CC2650 SensorTag zastosowano układ scalony CC2650 [1]. Ten wielostandardowy układ obsługuje komunikację w paśmie 2,4 GHz w standardzie Bluetooth Smart, 6LoWPAN, ZigBee oraz ZigBee RF4CE. Układ CC2650 jest typu SOC i zawiera trzy sprzętowe rdzenie użytkowe: ARM Cortex-M3 (48 MHz), ARM Cortex-M0 – który steruje sekcją radiową oraz specjalizowany rdzeń Sensor Controller (bardzo małej mocy) do obsługi modułów peryferyjnych. Stabilną pracę układu zapewniają dwa rezonatory kwarcowe: 24 MHz oraz 32,768 kHz.

Układ wyróżnia się bardzo małym poborem mocy. Przy napięciu zasilającym 3 V pobiera: MCU 61  $\mu$ A/MHz, RX 5,9 mA, TX 6,1 mA (0 dBm)/9,1 mA (+5 dBm). Prądy dla uśpienia układu są bardzo niskie: stan standby 1  $\mu$ A (pracuje RTC Running i podtrzymanie zawartości RAM/CPU), stan Shutdown 100 nA (wybudzanie zdarzeniem zewnętrznym).

Zmiana standardu komunikacyjnego obsługiwanego przez zestaw CC2650 SensorTag odbywa się poprzez wymianę (załadowanie) nowego oprogramowania, w tym również bezpośrednio poprzez połączenie bezprzewodowe [2].



### Więcej informacji:

Zestaw CC2650 SensorTag podczas testów przeprowadzanych przez użytkowników portalu element14 zdobył pierwsze miejsce na liście najbardziej popularnych zestawów IoT [3].

Nazwa SensorTag nie jest unikalna. Jest kilka produktów firmy Texas Instruments o tej samej nazwie. Pierwszy był zestaw CC2541 SensorTag, potem w roku 2015 zestaw CC2650 SensorTag. Na końcu roku 2016 pojawił się zestaw CC1350 SensorTag. A jest jeszcze zapowiadany Wi-Fi SensorTag.

### Dokumentacja

Dotarcie do opisów zestawu CC2650 SensorTag następcza pewne kłopoty. Istnieje strona produktu *SimpleLink Bluetooth low energy/Multi-standard SensorTag CC2650STK* [2]. Na niej można znaleźć schemat elektryczny zestawu [4] oraz wykaz elementów [5]. Jednak dostępne dokumenty dotyczą tylko jednej wersji zestawu (np. Rev 1.3.0 Thursday, April 16, 2015). Autorowi artykułu nie jest znany sposób na uzyskanie dokumentacji starszych wersji zestawu.

Na stronie produktu [2] znajdziemy odnośniki do plików z różnymi przydatnymi opisami. Nie ma odnośnika do pliku z opisem zestawu (User Guide). Jest za to odnośnik do krótkiego opisu *CC2650 SensorTag Quick Start Guide* [6]. Wewnątrz niego znajdziemy wskazówkę, że więcej informacji można

znaleźć pod adresem <http://www.ti.com/sensortag> I to jest dobre miejsce. Otwierana jest strona „IoT made easy” [7]. Można na niej znaleźć bardzo dużo informacji.

Najbardziej poszukiwany odnośnik znajduje się na samym końcu strony produktu [2] i kieruje do strony TI Wiki *SensorTag2015* [8]. Tam znajdziemy sporo użytecznych informacji oraz upragniony link do strony *CC2650 SensorTag User's Guide* [9]. Jest to jedyny dokładny opis zestawu CC2650 SensorTag, dosyć często aktualizowany. Jednak nie zawiera on opisu budowy elektroniki. Pomimo że zestaw CC2650 SensorTag jest w sprzedaży od ponad roku, to dalej na tej stronie są miejsca z informacją, że opis nie jest kompletny.

A jednak udało się znaleźć w witrynie TI opis techniczny zestawu CC2650 SensorTag. Jest to strona projektu *SimpleLink multi-standard CC2650 SensorTag kit reference design TIDC-CC2650STK-SENSORTAG* [10], a na niej odnośnik do krótkiego opisu sprzętowego oraz wyników badań *Multi-Standard CC2650 SensorTag Design Guide* (TIDU862) [11]. Na portalu społecznościowym *TI E2E Community* znajduje się bardzo przydatna strona *CC2640/CC2650 Getting Started and FAQ* [22]. Jest ona często aktualizowana i zawiera odpowiedzi na najczęściej zadawane pytania.

## Budowa zestawu

Cała elektronika zestawu CC2650 SensorTag mieści się na jednej wielowarstwowej płytce drukowanej [11]. Płytkę jest umieszczona w dwuczęściowej obudowie plastikowej z wieloma otworami. Dodatkowo w zestawie jest udostępniona czerwona silikonowa obudowa zakładana na pudełko plastikowe (rysunek 1). Jest ona pomyślana jako element pozwalający na dołączenie zestawu SensorTag do kółka od kluczy. Jednak praktyka pokazuje, że plastikowa obudowa z płytką drukowaną dosyć łatwo wypada z obudowy silikonowej.

Na górnej powierzchni płytki umieszczona jest dioda LED czerwona i zielona (rysunek 2). Dodatkowo, znajduje się tam gniazdko mikroSMA pozwalające na dołączenie przewodu anteny zewnętrznej. Dla dolnej powierzchni płytki najwięcej miejsca zajmuje uchwyt na standardową baterię CR2032 (rysunek 3). Po obu stronach płytki zamontowane są przyciski dla użytkownika. Zamontowane jest też gniazdko do dołączenia debugera standardu JTAG. Drugie zamontowane tam gniazdko służy do dołączania modułów rozszerzeń DevPack.

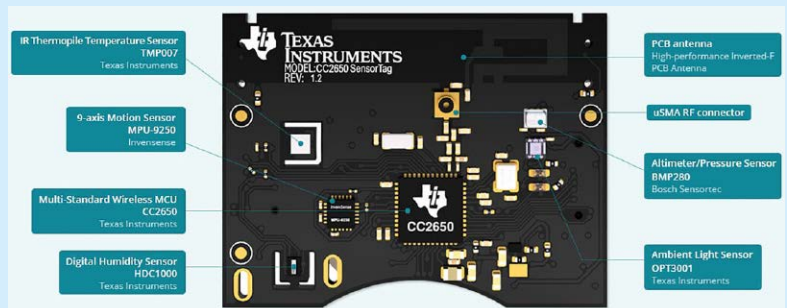
## Czujniki

Zestaw CC2650 SensorTag zawiera wiele czujników MEMS (rys. 2 i 3):

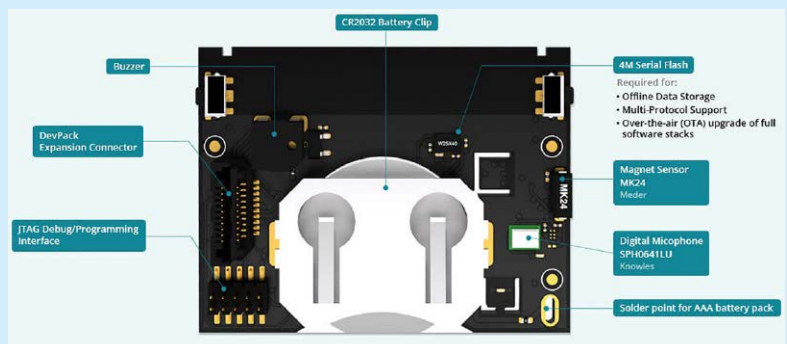
- Czujnik bezdotykowego pomiaru temperatury TMP007 (Texas Instruments).
- 9-osiowy (akcelerometr, żyroskop, kompas) czujnik ruchu MPU-9250 (InvenSense).



Rysunek 1. Zestaw CC2650 SensorTag w obudowie plastikowej i pokrowcu silikonowym [7]



Rysunek 2. Elementy rozmieszczone na górnej powierzchni płytki drukowanej zestawu CC2650 SensorTag [7]



Rysunek 3. Elementy rozmieszczone na dolnej powierzchni płytki drukowanej zestawu CC2650 SensorTag [7]

- Czujnik ciśnienia atmosferycznego BMP280 (Bosch).
  - Czujnik oświetlenia otoczenia i podczerwieni OPT3001 (Texas Instruments).
  - Czujnik wilgotności HDC1000 (Texas Instruments).
  - Mikrofon cyfrowy SPH0641LU4H (Knowles).
  - Czujnik magnetyczny (stycznik) MK24-A-3 (Meder).
- Dodatkowo, na płytce znajdziemy następujące dodatkowe elementy:

- Brzęczyk akustyczny HCS0503B (Shen Zhen Tianer Technology, 4 kHz).
  - Diody LED: zielona i czerwona.
  - Pamięć SPI Flash 512 kB W25X40CLUX (Winbond Electronics).
  - Dwa przyciski: lewy (User) i prawy (Power).
  - Pojemnik na baterię CR2032 lub CR2025.
  - Złącze rozszerzenia dla modułów DevPack z sygnałami wyprowadzeń I/O procesora.
  - Standardowe złącze debugera JTAG (typu XS110).
- Zasilanie płytki odbywa się napięciem z zakresu 1,8...3,8 V, typowo 3 V z baterii lub 3,3 V ze złącza DevPack. Wymiary płytki to 5 cm×6,7 cm×1,4 cm.

Wszystkie układy scalone czujników są dołączone do układu CC2650 poprzez interfejs I<sup>2</sup>C. Na zakładce *Teardown* strony *SensorTag2015* [7] znajduje się lista układów cyfrowych czujników zastosowanych w zestawie CC2650 SensorTag. Dla każdego układu podany jest jego krótki opis, odnośniki do strony produktu i dokumentu opisu oraz tabela poleceń GATT (do obsługi z użyciem komunikacji standardu Bluetooth Low Energy. Kolejne dokładne informacje zamieszczone są na stronie *CC2650 SensorTag User's Guide* [9].

### Przyciski

Przycisk SW1 (BUTTON1, Power, prawy) jest dołączony jednym końcem do masy i drugim do rezystora szeregowego 270 Ω oraz do wyprowadzenia DIO\_4 (nóżka 9) układu CC2650. Jeśli wyprowadzenie jest skonfigurowane jako wejście, to przyciśnięcie SW1 powoduje wymuszenie na nim niskiego poziomu logicznego. Przycisk SW2 (BUTTON2, User, lewy) jest tak samo dołączony jednym końcem do masy oraz drugim do rezystora szeregowego 270 Ω oraz wyprowadzenia DIO\_0 (nóżka 5) układu CC2650. Rezystancje szeregowo są na tyle duże, że przy skonfigurowaniu wyprowadzeń układu CC2650 jako wyjścia przyciśnięcie przycisku nie spowoduje uszkodzenia.

### Diody LED

Sygnal z wyprowadzenia DIO\_10 (nóżka 16) jest dołączony do diody czerwonej LED1 (CR1) i przez rezystor 680 Ω do masy. Sygnal z wyprowadzenia DIO\_15 (nóżka 21) jest dołączony do diody zielonej LED2 (CR3) i przez rezystor 680 Ω do masy.

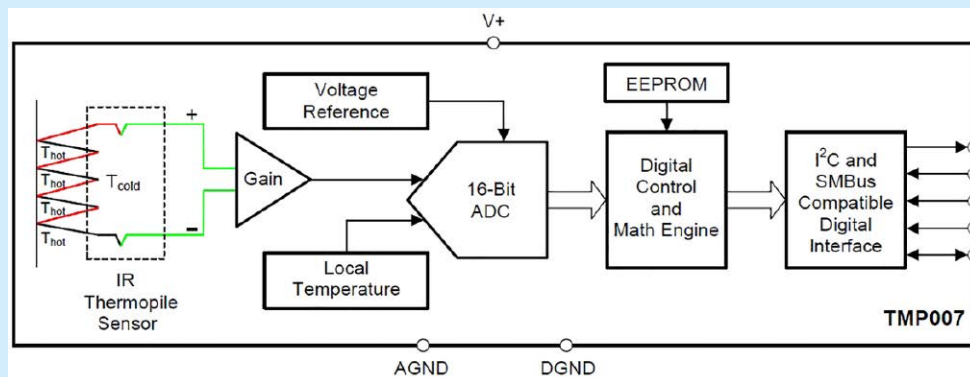
### Zasilanie

Płytkę zestawu CC2650 SensorTag jest zasilana napięciem 3 V (typ.) z baterii CR2032. Jednak po dołączeniu zewnętrznego modułu rozszerzeń DevPack (np. Debug DevPack) układ przełącznika elektronicznego TPS22910 przełącza źródło zasilania na wyprowadzenie 9 (VDD\_OUT) złącza rozszerzeń J2. Wtedy zasilanie kompletu CC2650 SensorTag + Debug DevPack jest dostarczane ze złącza USB modułu Debug DevPack.

### 9-osiowy czujnik ruchu MPU-9250

Najciekawszym układem scalonym zestawu CC2650 SensorTag jest scalony czujnik ruchu MPU9250 (InvenSense), który zawiera w jednej obudowie: 3-osiowy akcelerometr, 3-osiowy żyroskop, 3-osiowy kompas (magnetometr) oraz procesor DMP (Digital Motion Processor) i termometr cyfrowy [12]. Układ komunikuje się z systemem procesorowym z użyciem interfejsu SPI lub I<sup>2</sup>C.

Czujnik ma małe wymiary 3 mm × 3 mm × 1 mm. Napięcie zasilania 2,4...3,6 V przy poborze prądu 8 μA (tryb uśpienia całego układu). Układ wytrzymuje udar do 10 000 g, gdzie g – przyspieszenie ziemskie normalne.



Rysunek 4. Czujnik pomiaru bezdotykowego temperatury TMP007 [13]

**Żyroskop** został zrealizowany w technologii MEMS i charakteryzuje się następującymi cechami:

- Trzy osie X, Y, Z.
- Trzy przetworniki A/C 16 bitów, osobno dla każdego kanału, umożliwiające jednoczesne próbkowanie.
- Wybierany, kalibrowany fabrycznie zakres: ±250, ±500, ±1000 oraz ±2000‰.
- Programowalny cyfrowy filtr dolnoprzepustowy.
- Wbudowany układ do wykonywania testu działania, sterowany programowo.

**Akcelerometr** został zrealizowany w technologii MEMS i charakteryzuje się następującymi cechami:

- Trzy osie X, Y, Z.
- Trzy przetworniki A/C 16 bitów, osobno dla każdego kanału, umożliwiające jednoczesne próbkowanie.
- 4 wybieralne zakresy: ±2 g, ±4 g, ±8 g oraz ±16 g.
- Detekcja orientacji i stuku.
- Programowalny cyfrowy filtr dolnoprzepustowy.
- Wbudowany układ do wykonywania testu działania, sterowany programowo.

**Kompas** został zrealizowany w technologii monolitycznej z wykorzystaniem efektu Halla i charakteryzuje się następującymi cechami:

- Trzy osie X, Y, Z.
- Trzy przetworniki A/C, osobno dla każdego kanału, umożliwiające jednoczesne próbkowanie.
- Rozdzielczość danych wynosi dla próbkowania 14-bitowego 0,6 μT na LSB, dla 16-bitowego 15 μT na LSB.
- Zakres pomiarowy: ±4800 μT.
- Programowalny cyfrowy filtr dolnoprzepustowy.
- Wbudowany układ z wewnętrznym źródłem magnetycznym do wykonywania testu działania sterowany programowo.

**Procesor DMP** (Digital Motion Processor) – wbudowany w układ procesor typu DSP. Wykonuje łączenie synchronicznie próbkowanych danych ze wszystkich czujników oraz cyfrowego pomiaru temperatury do postaci pakietu danych zapisywanych do pamięci FIFO (512 B). Procesor wykonuje oprogramowanie firmowe MotionFusion oraz oprogramowanie kalibracyjne pracujące w czasie pomiarów. Umożliwia to wyeliminowanie błędów rozsynchrozowania czasowego danych oraz dryftu długoterminowego. Wejście synchronizacji FSYNC pozwala na wykorzystanie MPU-9250 w układach stabilizacji obrazu i modułach GPS.

## Czujnik bezdotykowego pomiaru temperatury TMP007

Kolejny ciekawy układ na płytce to scalony czujnik bezdotykowego pomiaru temperatury TMP007 (Texas Instruments) [13]. Jest to udane rozwinięcie czujnika TMP006. Układ wykonuje pośredni oraz bezpośredni pomiar temperatury za pomocą detekcji promieniowania podczerwonego.

Czujnik temperatury obiektu używa termostosu (thermopile) do absorbowania energii w zakresie podczerwieni ( $4\ \mu\text{m}$  do  $16\ \mu\text{m}$ ) emitowanej przez obiekt podlegający pomiarowi (rysunek 4). Termostos generuje napięcie proporcjonalne do różnicy temperatury pomiędzy złączem gorącym i złączem zimnym (odniesienia). Pomiar temperatury odniesienia jest wykonywany przez wbudowany w strukturę układu scalony czujnik półprzewodnikowy. Termostos mierzy temperaturę obiektów w zakresie  $-40\dots+125^\circ\text{C}$ .

Czujnik ma małe wymiary  $1,9\ \text{mm} \times 1,9\ \text{mm} \times 0,625\ \text{mm}$ . Typowe zasilanie mieści się w zakresie  $2,5\dots5,5\ \text{V}$  przy poborze prądu  $0,5\ \mu\text{A}$  (tryb uśpienia) i  $240\ \mu\text{A}$  (tryb pomiaru ciągłego). Układ TMP007 ma interfejs I<sup>2</sup>C pracujący w trybach *fast* (400 kHz) oraz *high-speed* (do 2,5 MHz).

## Czujnik wilgotności HDC1000

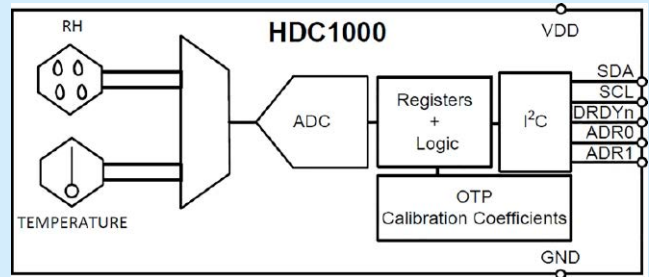
Scalony czujnik wilgotności HDC1000 (Texas Instruments) wykonuje cyfrowe pomiary względnej wilgotności powietrza oraz pomiar temperatury [14]. Pomiary są wykonywane z zastosowaniem nowej technologii czujnika pojemnościowego (rysunek 5). Element pomiarowy jest umieszczony bezpośrednio na powierzchni dolnej ściany obudowy, co pozwala uzyskać bardzo mały rozmiar oraz odporność na kurz i zabrudzenia. Obecnie zaleca się do nowych projektów stosowanie układu HDC1010 lub HDC1080.

## Czujnik ciśnienia atmosferycznego BMP280

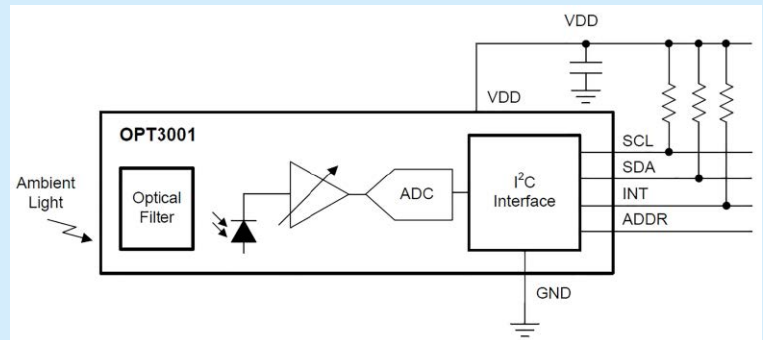
Scalony czujnik ciśnienia atmosferycznego BMP280 (Bosch) wykonuje pomiar barometryczny [15]. Układ jest zrealizowany z czujnikiem piezoceramicznym, co zapewnia wysoką rozdzielczość, liniowość i długoterminową stabilność termiczną. Układ zawiera wewnętrzny przetwornik analogowo-cyfrowy z układem cyfrowym sterowania z pamięcią EEPROM do zapisu danych kalibracyjnych do kompensowania offsetu, wpływu temperatury i innych zależności na wartość pomiaru.

Układ może pracować w jednym z trzech trybów, co pozwala na dobranie poboru mocy, czasu przetwarzania i dokładności (nadpróbkowanie) przetwarzania. Charakteryzuje się zakresem pracy  $300\dots110\ \text{hPa}$  (odpowiednik wysokości  $9000\dots500\ \text{m}$  nad poziomem morza) oraz bardzo dobrą dokładnością  $\pm 0,12\ \text{hPa}$  (odpowiednik  $\pm 1\ \text{m}$ ) i rozdzielczością  $\pm 1\ \text{hPa}$ . Pomiar temperatury jest wykonywany z dokładnością  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  i rozdzielczością  $0,01^\circ\text{C}$  (16 bitów).

Czujnik ma małe wymiary  $2\ \text{mm} \times 2,5\ \text{mm} \times 0,95\ \text{mm}$  i metalową obudowę LGA8. Typowe zasilanie to  $2,5\ \text{V}$  ( $1,62\dots3,6\ \text{V}$ ) przy poborze prądu  $2,7\ \mu\text{A}$  w trybie standardowym dla pracy



Rysunek 5. Czujnik wilgotności HDC1000 [14]



Rysunek 6. Czujnik oświetlenia otoczenia OPT3001 [16]

1 pomiar/s. Układ BMP280 ma interfejs I<sup>2</sup>C pracujący w trybie *fast* (400 kHz), *high-speed* (do 3,4 MHz) oraz SPI (3 lub 4 sygnały, do 10 MHz).

## Czujnik oświetlenia otoczenia OPT3001

Scalony czujnik oświetlenia otoczenia OPT3001 (Texas Instruments) wykonuje pomiar poziomego oświetlenia [16]. Charakterystyka spektralna czujnika jest zbliżona do charakterystyki ludzkiego oka. Układ wykazuje bardzo dobre tłumienia podczerwieni. Wbudowana automatyka pomiaru umożliwia uzyskanie zakres pomiarowego od  $0,01\ \text{lx}$  do  $83\ \text{klx}$ . Odpowiada to 23-bitowemu zakresowi dynamiki pomiarowej. Układ OPT3001 wyposażono w interfejs I<sup>2</sup>C pracujący w trybie *fast* (400 kHz, rysunek 6).

## Mikrofon cyfrowy SPH0641LU4H (Knowles)

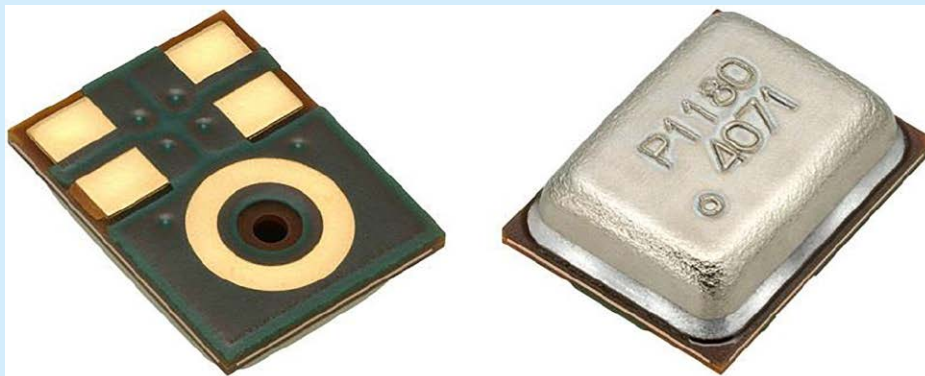
Cyfrowy mikrofon SPH0641LM4H-1 (Knowles) jest miniaturowym układem MEMS składającym się z czujnika akustycznego, niskoszumowe bufora wejściowego oraz przetwornika sigma-delta [17]. Układ charakteryzuje się dużym odstępem do szumu 64 dB, niewielkim poborem prądu  $230\ \mu\text{A}$  w trybie Low-Power, dookólną charakterystyką kierunkową i dobrym ekranowaniem zaburzeń radiowych (rysunek 7).

## Antena

Na płytce drukowanej zestawu CC2650 SensorTag wykonano powierzchniowo antenę 2,5 GHz (typu Inverted-F). Jej zaletą jest niska cena oraz dobra jakość (po dokładnym zweryfikowaniu działania kolejnych wersji płytki drukowanej). Podczas normalnej pracy antena PCB jest dołączona do wyprowadzeń sekcji radiowej układu CC2650 poprzez miniaturowe, koncentryczne gniazdko/przełącznik mikroSMA typu MS-156HF (Hirose). Po włożeniu wtyczki (4 mm) do gniazdka antena PCB jest odłączana od sekcji radiowej, a poprzez kabel koncentryczny jest dołączana antena zewnętrzna.

## Złącze rozszerzeń DevPack

Złącze zainstalowane na płytce umożliwia dołączenie modułów rozszerzeń w standardzie DevPack. Obecnie są dostępne moduły debugera (Debug DevPack), LCD (Watch DevPack) oraz LED (LED Audio DevPack). Płytkę modułu DevPack jest mocowana na złączu rozszerzeń znajdującym się na dolnej powierzchni płytki zestawu CC2650 SensorTag. Nie trzeba nawet zdejmować plastikowej obudowy.



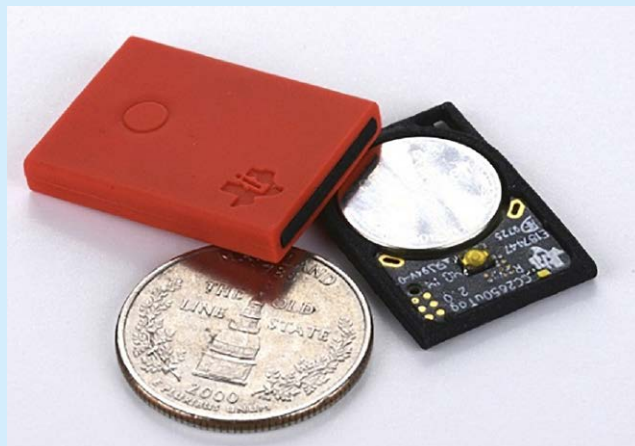
Rysunek 7. Mikrofon cyfrowy SPH0641LU4H [17]

## Program demo

Oprogramowanie zainstalowane firmowo na zestawie CC2650 SensorTag pozwala na połączenie z aplikacjami działającymi na smartfonach i tabletach z systemem operacyjnym Android lub iOS. Stosowana jest komunikacja z użyciem standardu Bluetooth Smart (LE) [6].

Jeśli korzystamy z tabletu iPad, należy z App Store pobrać darmową aplikację *SensorTag*. Następnie należy włączyć radio Bluetooth na tablecie. Aplikacja *SensorTag* po uruchomieniu szybko znajdzie włączony zestaw Sensor Tag. Często wtedy pojawia się informacja, że został wykryty stary FirmWare i proponowane jest wykonanie jego aktualizacji (poprzez łącze radiowe). Typowo aktualizacja przebiega szybko. Po zakończeniu aktualizacji jest wyświetlana informacja o konieczności przyciśnięcia przycisku i odczekaniu 10 sekund.

Zestaw CC2650 SensorTag po włączeniu wysyła rozgłoszanie z interwałem 100 ms, co jest sygnalizowane błyskaniem zielonej diody LED co 1 sekundę. Rozgłoszanie może być zatrzymane/wznowione po naciśnięciu prawego przycisku (Power – rys. 1). W celu oszczędzania baterii rozgłoszanie jest wykonywane maksymalnie przez 120 sekund. Po naciśnięciu przycisku „Power” zestaw *SensorTag* musi wysyłać rozgłoszanie, aby został wykryty przez urządzenie centralne (np. smartfon



Rysunek 8. Projekt MicroTag [20]

lub tablet). Urządzenie centralne może połączyć się tylko z zestawem *SensorTag*, który wysyła rozgłoszanie. Po zestawieniu połączenia czujniki zestawu CC2650 SensorTag są konfigurowane w celu wykonywania pomiarów.

Po wybraniu w aplikacji *SensorTag* odpowiedniego zestawu CC2650 SensorTag dostępnych jest wiele funkcji, w tym podgląd sygnału czujników. Można podglądać w czasie rzeczywistym stan wielu sygnałów. Można również konfigurować czujniki, czytać stan przycisków i przełącznika magnetycznego

## Bibliografia:

1. CC2650 SimpleLink multi-standard 2.4 GHz ultra-low power wireless MCU (<https://goo.gl/x8iYus>)
2. SimpleLink Bluetooth low energy/Multi-standard SensorTag CC2650STK (<https://goo.gl/gqmB09>)
3. Top 5 Internet of Things (IoT) RoadTests (<https://goo.gl/YRxD9G>)
4. CC2650 SensorTag Schematic (Rev. A) SWRR134 21 Apr 2016 (<https://goo.gl/OAH3RI>)
5. CC2650 SensorTag BOM (Rev. A) SWRR135 21 Apr 2016 (<https://goo.gl/V0iSt7>)
6. CC2650 SensorTag Quick Start Guide (Rev. A) SWRU410 16 Feb 2016 (<https://goo.gl/NSi3Jp>)
7. IoT made easy <https://goo.gl/RhNLis>
8. SensorTag2015 (TI WIKI) <https://goo.gl/6AO1gy>
9. CC2650 SensorTag User's Guide (<https://goo.gl/7NvdwA>)
10. SimpleLink multi-standard CC2650 SensorTag kit reference design, TIDC-CC2650STK-SENSORTAG (<https://goo.gl/XD4LUo>)
11. Multi-Standard CC2650 SensorTag Design Guide, TIDU862 <https://goo.gl/wyLmOg>
12. MPU-9250 Product Specification Revision 1.0 (Datasheet <https://goo.gl/puKjML>)
13. TMP007 Infrared Thermopile Sensor with Integrated Math Engine (<https://goo.gl/KCRZMw>)
14. HDC1000 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor (<https://goo.gl/M6UTyp>)
15. BMP280 Barometric Pressure Sensor (<https://goo.gl/w95sWV>)
16. OPT3001 Ambient Light Sensor (ALS, <https://goo.gl/Cx0eO7>)
17. Digital Zero-Height SiSonic™ Microphone With Multiple Performance Modes (<https://goo.gl/J9y7Cd>)
18. TI CC2650STK SimpleLink™ IoT SensorTag – Review (<https://goo.gl/8ckpiF>)
19. SimpleLink Academy (<https://goo.gl/Vsf3ov>)
20. SimpleLink CC2650 uTag or Microtag – Ultra-compact Bluetooth Smart Reference Design, TIDC-CC2650-UTAG (<https://goo.gl/1Vp1X1>)
21. CC2650 uTag (Micro-Tag) – Ultra-Compact Bluetooth Smart Design Guide, TIDUB25 (<https://goo.gl/5R3HXl>)
22. CC2640/CC2650 Getting Started and FAQ, 2016 Oct 31 (<https://goo.gl/81qHBm>)

oraz włączać/wyłączać diody LED i brzęczyk. Sygnały czujników ruchu można (również w czasie rzeczywistym) oglądać w obrazowaniu trójwymiarowym. Ciekawy przykład pracy zestawu CC2650 SensorTag z tabletem iPad można zobaczyć na filmie [18].

Używając urządzenia z systemem operacyjnym Android, należy aplikację Smart Tag pobrać darmowo z *Google play*. Dalej działanie powinno być podobne jak dla systemu iOS.

### Programowanie zestawu CC2650 SensorTag

Programowanie zestawu CC2650 SensorTag nie jest proste. Aplikacja dla trójrdzeniowego układu SOC pracującego na bieżąco z komunikacją bezprzewodową wymaga zastosowania systemu operacyjnego czasu rzeczywistego oraz bardzo zaawansowanych bibliotek i sterowników.

Aby umożliwić programowanie i debugowanie kodu, należy do zestawu CC2650 SensorTag dołączyć moduł Debugger-DevPack. Następnie połączyć debugger z komputerem kablem USB. Programować można w języku C w środowisku programowym Code Composer Studio (CCS – Texas Instruments) lub IAR ARM. Środowisko CCS można pobrać darmowo ze strony Texas Instruments. Z modułem DebuggerDevPack pracuje on bez ograniczeń. Zagadnienia te zostaną omówione w następnych odcinkach kursu.

### Warsztaty SimpleLink Academy

Bardzo ciekawą pomocą dla każdego, to zaczyna pracować z procesorami rodziny CC13xx/CC26xx, są ćwiczenia warsztatowe *SimpleLink Academy* [19]. Dostępnych jest wiele ćwiczeń z dokładnym opisem oraz kodem źródłowym. Dla wielu ćwiczeń jest udostępniony zapis wideo.

### TI Designs

Texas Instruments udostępnia wiele kompletnych projektów sprzętowo-programowych z różnych dziedzin od nazwą TI Designs. Jest ich obecnie (listopad 2016) ponad 2373. Wiele z nich jest wdrażanych do produkcji przez TI i dostępnych do kupienia, ale sporo nie jest. A są tam bardzo ciekawe opracowania z układem CC2650, np.: TIDA-00374, TIDA-00650, TIDA-00666, TIDA-00756, TIDA-00759. Jest jednak duży kłopot w znalezieniu pasującego projektu, np. do zestawu SensorTag. Witryna TI nie udostępnia odpowiednich mechanizmów porządkowania/wyszukiwania.

### MicroTag

Ciekawy projekt bardzo małego urządzenia (16×9 mm) o nazwie uTag (MicroTag) z układem scalonym CC2650 można znaleźć na stronie *SimpleLink CC2650 uTag or Microtag – Ultra-compact Bluetooth Smart Reference Design* [20]. Zawiera on niewiele elementów, jak: układ scalony CC2650, bateria CR1620, czujnik temperatury TMP102 (TI), trzyosiowy akcelerometr KX022-1020 (Kionix), miniaturowa (0402) antena SMD (chip), kwarc 24 MHz (2016) oraz 6-nóżkowe złącze debuggera µJTAG [21]. Czas pracy urządzenia z jednej baterii przy wysyłaniu danych co 1 sekundę wynosi 3 miesiące (**rysunek 8**).

HENRYK A. KOWALSKI  
KOWALSKI@II.PW.EDU.PL

# ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA

## teraz zawsze z Tobą w wersji mobilnej



m.ep.com.pl