

Moduły nawigacji satelitarnej jako referencyjne źródło czasu w aplikacjach z ograniczonym źródłem energii

Streszczenie. W artykule przedstawiono podsumowanie parametrów współczesnych, komercyjnie dostępnych modułów nawigacji satelitarnej oraz przeanalizowano możliwość ich wykorzystania do synchronizacji czasu w bezprzewodowych sieciach czujników lub urządzeniach typu IoT. Szczególny nacisk położono na porównanie z sieciowymi protokołami synchronizacji czasu oraz analizę zużycia energii przez moduły.

Abstract. In the paper authors summarize parameters of modern, commercially available satellite navigation modules and their potential to be used as time reference source in wireless sensor networks or IoT devices. In particular comparison to network time synchronization protocols and analysis of modules' power consumption is made. **Parameters of modern, commercially available satellite navigation modules**

Słowa kluczowe: nawigacja satelitarna, synchronizacja czasu, bezprzewodowe sieci czujników, internet rzeczy

Keywords: satellite navigation, time synchronization, wireless sensor networks, Internet of Things

Wstęp

Systemy nawigacji satelitarnej GNSS (z ang. Global Navigation Satellite Systems) pełnią rolę globalnego dostawcy usług pozycjonowania i synchronizacji czasu. Dostęp do sygnału satelitarnego na całym świecie możliwy jest dzięki powstaniu kilku niezależnych systemów, pokrywających swoim zasięgiem większość powierzchni Ziemi. Jednocześnie współczesne odbiorniki GNSS stały się powszechnie dostępne i niedrogie, znajdując zastosowanie w coraz większej liczbie obszarów techniki.

Jednym z największych ograniczeń z jakim borykają się projektanci bezprzewodowych sieci czujników lub urządzeń typu IoT (z ang. Internet of Things) są nadal źródła energii. W procesie projektowania urządzenia zasilanego bateryjnie budżet energetyczny musi być ostrożnie kalkulowany, aby zapewnić odpowiedni czas życia urządzenia lub zwiększyć okresy między koniecznymi serwisami.

W takich systemach, w zależności od wymagań stawianych dokładności i precyzji wyznaczania czasu, synchronizacja pomiędzy węzłami sieci może być realizowana za pomocą zegarów czasu rzeczywistego (z ang. Real Time Clocks, RTC), sieciowych protokołów synchronizacji czasu bądź z wykorzystaniem modułów GNSS.

W niniejszym artykule autorzy podsumowują obecny stan wiedzy dotyczący protokołów synchronizacji czasu w sieciach bezprzewodowych, analizują parametry współczesnych modułów GNSS oraz starają się odpowiedzieć na pytanie, czy wspomniane moduły mogą zostać użyte jako źródło czasu w urządzeniach zasilanych bateryjnie.

Źródła czasu i częstotliwości

Klasyczna cyfrowa metoda pomiaru czasu polega na zliczaniu liczby okresów oscylacji źródła o znanej wartości częstotliwości. W urządzeniach wbudowanych wykorzystuje się do tego przeważnie oscylatory kwarcowe oraz układy RTC zintegrowane z mikrokontrolerem lub w postaci oddzielnych układów scalonych. Stabilność oraz precyzja wyznaczania czasu w takim rozwiązaniu jest zdefiniowana przez rodzaj zastosowanego oscylatora. W tabeli 1 przedstawiono parametry najbardziej typowych rozwiązań [1] - [5]. Zarówno początkowe odchylenie częstotliwości zegara od nominalnej częstotliwości jak i zmianę tego odchylenia względem temperatury określa się za pomocą jednostki ppm (z ang. parts per milion).

Tabela 1. Typowe parametry źródeł częstotliwości

Oscylator	Odchylenie początkowe [ppm]	Dryft [ppm]	Moc pobierana
LF RC, kalibrowany	250	50	5 [μW]
LF XO, komp. temp.	3	10	1,15 [μW]
HF XO, MCU Idle	10	10	<1 [mW]
HF TCXO	2	<1	6,6 [mW]
MCXO	<0,03	<0,1	40 [mW]
OCXO (typowo)	<0,02	<0,05	<200 [mW]
CSAC	<0,001	<0,001	<120 [mW]

Wraz ze wzrostem częstotliwości (rozdzielczości) i poprawą jej stabilności następuje wzrost poboru mocy przez źródło. Dla nadania kontekstu prezentowanym liczbom należy wziąć po uwagę typowe wartości pojemności popularnych źródeł energii i estymowany czas życia w odniesieniu do pożądanej - założonej przez projektanta - dokładności wyznaczania czasu w urządzeniu.

Popularne baterie alkaliczne o rozmiarze AA posiadają pojemności rzędu od 2 do 3 Wh, przyjmując maksymalną wartość jako odniesienie, można porównać poszczególne rozwiązania jeżeli chodzi o czas życia. W tabeli 2 przyjęto, że układ zegara jest jedynym elementem systemu, co oczywiście nie jest nigdy prawdą, ale jest to element, który musi być stale włączony. W związku z tym jego udział w ogólnym bilansie energetycznym jest stały i liniowo dodaje się do energii pobieranej przez całe urządzenie. W prezentowanym scenariuszu odchylenie skali czasu zakłada pojedynczą synchronizację zegara na początku pracy, nieprzerwane działanie urządzenia i odniesione jest do jednego dnia.

Tabela 2. Czas życia i osiągnięta dokładność wyznaczania czasu

Oscylator	Czas życia [dni]	Odchylenie [x/dzień]
LF RC, kalibrowany	>>100 tys	4,32 s
LF XO, komp. temp.	>>100 tys	0,864 s
HF XO, MCU Idle	125	0,864 s
HF TCXO	19	86 ms
MCXO	3,125	8 ms
OCXO	0,625	4 ms
CSAC	1,25	<10 μs

Z tabeli 2 wynika, że zaostrenie wymagań na stabilność źródła w takim scenariuszu nieodzownie łączy się z koniecznością zwiększenia pojemności baterii lub akumulatora. Duże znaczenie ma też częstotliwość wyjściowa, ponieważ zużycie energii przez oscylator jest zależne od jej kwadratu. Warto zwrócić uwagę na scalony

oscylator atomowy CSAC (z ang. Chip Scale Atomic Clock), którego parametry przewyższają rozwiązania oparte o oscylatory OCXO. Jest to nowatorskie rozwiązanie, którego cena jest jednak wygórowana, przez co ogranicza to możliwość jego stosowania do aplikacji szczególnego przeznaczenia.

Zarówno w przewodowych jak i bezprzewodowych sieciach teletransmisyjnych rozwiązaniem problemu niestabilnych lub energochłonnych źródeł częstotliwości jest zastosowanie synchronizacji czasu za pomocą protokołów sieciowych.

Protokoły synchronizacji czasu

Problem synchronizacji czasu w bezprzewodowych sieciach czujników (z ang. Wireless Sensor Networks, WSN) został obszernie opisany np. w [6]. W pracach [7], [8] autorzy opisują i porównują najbardziej popularne metody synchronizacji czasu takie jak RBS, TPSN i FTSP. Dalsze usprawnienia tych metod proponowane są w [9 - 13]. Istnieją także liczne prace adaptujące protokół IEEE1588, znany głównie z sieci typu Ethernet.

Wszystkie przywołane prace dotyczą sieci WSN jednak pomijają takie aspekty jak:

- duża rozległość sieci (rzędu dziesiątek km),
- sieci o bardzo niskiej prędkości transmisji,
- sieci z asymetrycznym pasmem,
- zatłoczenie pasm ISM,
- koszt transmisji pakietów.

Aspekty te stają się istotne podczas analizy nowych technik komunikacji bezprzewodowej np. Sigfox [14]. Sieć ta zorganizowana jest w technologii gwiazdy, odległości do węzłów sieci mogą sięgać nawet 40 km a urządzenia mogą pobierać dane tylko cztery razy dziennie w paczkach po osiem bajtów. Utrzymanie precyzyjnej synchronizacji czasu w węzłach w takiej sieci za pomocą protokołów sieciowych byłoby utrudnione lub wymagało bardzo stabilnych lokalnych źródeł częstotliwości. Duże odległości do węzłów sieci powodują także powstawanie opóźnień rzędu setek mikrosekund. Opóźnienia te są niedeterministyczne a więc dodatkowo potrzebują dwukierunkowej transmisji do ich eliminacji [9], czego ta sieć nie może zapewnić.

Innym przykładem, w którym wspomniany aspekt kosztów transmisji danych gra znaczącą rolę, może być sieć czujników oparta na sieci NBloT (z ang. Narrow Band Internet of Things) [14]. W tej sieci operatorzy infrastruktury pobierają opłaty za pracę w paśmie licencjonowanym, a więc ciągła, częsta wymiana wiadomości może dyskwalifikować rozwiązanie oparte o protokoły sieciowe ze względu na generowane koszty.

W tabeli 3 zestawiono osiągnięcia w synchronizacji czasu raportowane w pracach [9], [10], [13], [15], [16].

Tabela 3. Możliwości protokołów synchronizacji czasu

Protokół	Średnie odchylenie [µs]	Maks. odchylenie [µs]	Okres Synchronizacji [s]
RBS	29,1	93	b.d.
TPSN	16,9	44	b.d.
FTSP	1,48	6,48	30
VHT FTSP	0,125	0,645	10
CheepSync	8	40	0,1
PulseSync	0,93	1,93	1
TATS	0,21	0,46	1

Badania wskazują na możliwość osiągnięcia synchronizacji nawet na poziomie sub-mikrosekundowym bez znacznego zmniejszania okresu synchronizacji [13]. Wynik ten udało się osiągnąć jednak dzięki bezpośredniej komunikacji pomiędzy węzłami sieci, co w przypadku

większości standardowych sieci opartych na technologii gwiazdy (Zigbee, Zwave, Bluetooth itp.) nie jest bezpośrednio możliwe lub wymaga znacznych modyfikacji protokołu. Osiągnięcie takiej dokładności wymaga także analiz statystycznych lokalnych zegarów stosowanych w urządzeniach oraz wsparcia sprzętowego w procesorze, w związku z tym dodatkowo komplikuje proces projektowania całego systemu pomiarowego.

Koszt energetyczny związany z utrzymaniem synchronizacji na raportowanym poziomie jest w praktyce niemożliwy do porównania pomiędzy protokołami. Mnogość platform sprzętowych, na których prowadzone są badania nie pozwala na jednoznaczną ocenę, które z powyższych rozwiązań jest najbardziej optymalne pod kątem zużycia energii. W [13] autorzy raportują możliwość pracy urządzeń z poborem mocy poniżej 1 mW.

Systemy nawigacji satelitarnej

Dostarczenie precyzyjnego sygnału czasu do wszystkich węzłów sieci jednocześnie jest możliwe dzięki zastosowaniu technologii satelitarnej. Wspólna referencja czasu pozwala na swobodne planowanie sieci czujników bez ograniczeń związanych z czasem propagacji sygnału, kosztami transmisji dodatkowych danych czy narzutem pracy nad protokołem komunikacyjnym.

Wszystkie systemy GNSS (GPS, Galileo, itp.) opierają się na zasadzie pomiaru czasu przelotu sygnału od satelity do urządzenia końcowego. W związku z tym do poprawnego wyznaczenia pozycji wymagają dokładnej informacji o czasie zarówno po stronie satelity jak i odbiornika, są więc w praktyce także systemami synchronizacji czasu. Typowe komercyjne odbiorniki GNSS o standardowej precyzji – np. U-blox NEO-M8N czy LEA-6T - posiadają wyjście 1 PPS (z ang. 1 Pulse Per Second), którego synchronizacja ze skalą czasu np. UTC jest na poziomie od 20 do 30 ns RMS (tab. 2). W idealnych warunkach i stosując odpowiednią kompensację błędów możliwe jest osiągnięcie odchylenia 15 ns RMS [17], czyli 0,015 ppm, co odpowiada parametrom dobrych oscylatorów stabilizowanych temperaturowo OCXO (tab. 2).

Tabela 4. Dokładność sygnału 1PPS modułów U-blox [18]

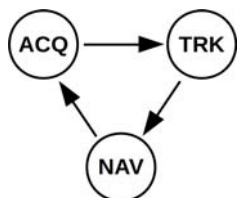
Moduł	Odchylenie RMS [ns]	Pobór mocy [mW]
LEA-M8T	20	63
NEO-M8N	30	69
LEA-6T	15	b.d.

Mimo postępującej miniaturyzacji i nowoczesnych technologii półprzewodnikowych, zużycie energii w odbiornikach GNSS jest nadal znaczące. W trybie pracy ciągłej urządzenia pobierają moc od 90 do 150 mW. Dodatkowo, w niektórych przypadkach należy doliczyć moc przeznaczoną na zasilanie zewnętrznego wzmacniacza antenowego. Obniżenie energochłonności uzyskuje się wprowadzając tzw. przerywany (z ang. intermittent) lub inaczej - cykliczny tryb pracy.

Tryb pracy cyklicznej w modułach GNSS

W czasie normalnej pracy w trybie ciągłym moduły GNSS utrzymują stałą synchronizację z sygnałem satelitarnym, wyznaczając pozycję z zadany wcześniej okresem, np. co 1 s. W ustalonych odstępach następuje ponowne skanowanie próbek wejściowych w poszukiwaniu nowych lub lepszych, potencjalnych źródeł synchronizacji. Procesor przetwarzający informacje jest stale uruchomiony.

W zależności od producenta tryby przerywane różnią się nieco implementacją, jednak w najprostszych przypadkach (tj. stała, dobra widoczność nieba) zasadą jest praca w zamkniętej pętli trzech stanów (rys. 1).



Rys.1. Maszyna stanów w module GNSS.

W stanie ACQ (ang.: acquisition) moduł synchronizuje się z sygnałem satelitarnym, w trybie TRK (ang.: tracking) utrzymuje chwilowo tę synchronizację i wyznacza na jej podstawie swoją pozycję. W stanie NAV (ang.: navigation) przetwarzane są dane pobrane z sygnału i ewentualnie prowadzona jest wymiana danych na liniach komunikacyjnych.

W większości przypadków analizowanych trybów przerywanych, ich sukces opiera się na redukcji aktywności w stanie NAV. Zarówno w modułach Telit czy U-blox stosuje się tryby pracy (GNSS Low Power, SMART GNSS, PSMCT), w których oprogramowanie dostosowuje wykorzystanie zasobów modułu do parametrów odbieranych sygnałów i zapewnia znaczną redukcję poboru mocy zapewniając jakość wyznaczania pozycji podobną do trybów ciągłych. Tryby te najczęściej opierają się na zaprzestaniu (lub ograniczeniu) ciągłej synchronizacji sygnałów, bez wyłączenia całego modułu. Zapewniają obniżenie poboru mocy od 60 do 75% w stosunku do trybu ciągłego, ale przy okresach nieaktywności powyżej kilku sekund nie uzyskuje się dalszej redukcji. Możliwe jest tylko poprzez całkowite wyłączenie odbiornika w całym lub maksymalnie możliwym czasie trwania stanu NAV. Tryby HPR (Telit) oraz PSMOO (U-blox) działają na tej właśnie zasadzie i dla okresów nieaktywności przekraczających kilkadziesiąt sekund charakteryzują się redukcją poboru mocy nawet do poziomu poniżej 10 mW.

Dokładność pozycjonowania podczas pracy cyklicznej

Poprawne wyznaczenie pozycji (i czasu) możliwe jest po zsynchronizowaniu pętli fazowej (dla nośnej) i pętli cyfrowej (dla kodu) na etapie stanu ACQ. Szybkość i jakość tej synchronizacji w dużej mierze zależy od wiedzy jaką „posiada” moduł o satelitach będących w zasięgu widoczności anteny, ich pozycji na orbicie i aktualnym czasie. Poprawna estymacja warunków początkowych dla pętli fazowej pozwala na szybsze odnalezienie sygnału satelity odchylonego od nominalnej częstotliwości przez efekt Dopplera. Wiedza o aktualnym czasie i przybliżonej pozycji pozwala z kolei szybciej zsynchronizować właściwy kod modulujący dla satelity. W przypadku pierwszego startu modułu, czas pierwszej akwizycji jest związany głównie z przeszukiwaniem tej przestrzeni kodowo-częstotliwościowej.

W trybach przerywanych - ze względu na wspomnianą zasadę działania – następuje zatrzymanie śledzenia sygnałów satelitarnych. Efektem okresowej utraty synchronizacji jest gorsza jakość reaktywacji i ponownej estymacji położenia odbiornika, wynikająca z nieaktualnych parametrów wejściowych dla ponownego startu pętli synchronizacyjnych. Teoretyczną analizę traktującą to zagadnienie można znaleźć w [20], [21]. Efektem wymienionych wyżej zależności jest ograniczenie dokładności wyznaczania czasu w trybach przerywanych.

W dalszej części artykułu autorzy zakładają, że błąd wyznaczenia pozycji jest równoznaczny z błędem wyznaczania czasu (przeliczany z uwzględnieniem prędkości światła) i może być używany zamiennie. Uzasadnienie dla tego założenia można znaleźć w podstawowej literaturze dotyczącej nawigacji GNSS.

Tabela 5 przedstawia wyniki dla pomiarów pozycjonowania modułów U-blox z rodziny M8, przeliczone na wartości błędu wyznaczania czasu [19]. Niekompletny opis testu utrudnia jednoznaczne porównanie wyników, niemniej wskazuje, iż pomimo długich okresów nieaktywności – a więc dużej redukcji zużycia energii - błąd wyznaczania czasu można utrzymać nadal na poziomie ok. 100 ns.

Tabela 5. Dokładność wyznaczania czasu w trybie przerywanym

Nazwa testu	Okres wyzn. [s]	Pobór prądu* [mA]	Błąd poz. (średnia) [m]	Błąd wyzn. czasu [ns]
London 1	9	18	32	107
Zurich, PSMOO	15	12	5	17
Korea w/ Tunnels, PSMCT	27	13	5	17
London 2	43	9	40	133
Korea Teheran, 10s/60s	60	9	40	133
Korea, PSMOO	8	13,5	4,39	15

*brak danych co do napięcia zasilania

W tabeli 6 przedstawiono podobne zestawienie dla nowej rodziny układów scalonych pracującej w trybie SUPER-E [22]. Uzyskanie poboru mocy <10 mW wiąże się ze znacznym wzrostem wartości błędu wyznaczania czasu, jednak jest to nadal poniżej 1 ppm.

W obu przedstawionych przypadkach celem badań producentów było wskazanie na jakość pozycjonowania w scenariuszu mobilnym, przez co konfiguracja i sposób testowania nie jest referencyjny np. dla aplikacji stacjonarnych.

Tabela 6. Osiągi modułu M8230-CT w trybie SUPER-E

Nazwa trybu	Pobór mocy [mW]	Błąd poz. (średnia) [m]	Błąd wyzn. czasu [ns]
Tryb ciągły, 1s, podmiejski	60	15	50
Super-E, 1s, podmiejski	18	15	50
Tryb ciągły, 1s, miasto	60	25	83
Super-E, 1s, miasto	20	27	90
Super-E, 10s, miasto	8,5	35	117
Super-E, 60s, miasto	10	239	797

Tabela 7. Osiągi modułu Telit SE868-V3 (z LNA)

Nazwa trybu, okres odświeżania pozycji	Pobór mocy [mW]	Błąd pozycji (CEP*) [m]	Błąd wyzn. czasu [ns]
Tryb ciągły, 1s	75,6	1,2	4
Smart GNSS 1, 1s	54	b.d.	b.d.
High Power Reduction, 1s	18	17,2	57
High Power Reduction, 30s	3	b.d.	b.d.
High Power Reduction, 60s	2	b.d.	b.d.

* CEP – ang.: Circular Error Probable

Tabela 8. Osiągi modułu Telit SE871 (bez LNA)

Nazwa trybu, okres odświeżania pozycji	Pobór mocy [mW]	Błąd poz. (CEP) [m]	Błąd wyzn. czasu [ns]
Tryb ciągły, 1s	66	2,5	8
Smart GNSS 1, 1s	43	20,5	68
High Power Reduction, 1s	30	b.d.	b.d.
High Power Reduction, 30s	13	b.d.	b.d.
High Power Reduction, 60s	6,6	b.d.	b.d.

Dla porównania autorzy przeanalizowali także dokumentację modułów firmy Telit [23], [24]. W raportach nie podano szczegółowych danych liczbowych, można jedynie wnioskować, że potencjalnie możliwa jest praca modułów z poborem mocy nawet poniżej 5 mW przy

zachowaniu porównywalnej do trybu ciągłego jakości pozycjonowania. W tabelach 7 oraz 8 zebrano wartości poboru mocy dwóch analizowanych modułów pracujących w trybach przerywanych.

Analizując przedstawione dane należy zwrócić uwagę na aspekt związany z długimi okresami uśpienia lub wyłączenia modułów w urządzeniach o wysokich wymaganiach na stabilność w wewnętrznej skali czasu. Np. podczas uśpienia przez 60 s, źródło o stabilności 1 ppm może wprowadzić błąd 60 μ s jeżeli nie zastosuje się kalibracji oraz analizy statystycznej dryftu zegara.

Nowe techniki satelitarnej synchronizacji czasu

W ostatnim czasie na popularności zyskują nowe techniki nawigacji satelitarnej oparte na systemach pracujących na niskich orbitach (z ang. Low Earth Orbit, LEO). Firma Satelles uruchomiła usługę rozsiewania sygnału czasu oraz pozycjonowania bazując na sieci Iridium, służącej głównie do komunikacji. Sama zasada działania jest podobna do „klasycznych” systemów, jednak wyróżnia ją kilka cech wynikających z pracy na niskiej orbicie. Sygnał radiowy z systemów działających na LEO może być nawet 1000-krotnie silniejszy niż np. GPS, umożliwiając nawigację w warunkach zasłoniętego sygnału, w budynkach czy pod dachami. Także zakłócenie tego sygnału jest trudniejsze. Satelity poruszają się z dużo większą prędkością, tworząc bardziej dynamiczną konstelację, co z kolei przekłada się na lepsze geometrycznie warunki wyznaczania pozycji. Ostatecznie sieć składa się z ponad 66 satelitów, co zdecydowanie poprawia odporność całego systemu na awarię jednego z nich [25].

Podsumowanie i kierunki dalszych prac

Dane prezentowane w artykule wskazują na potrzebę dokładniejszej analizy wpływu trybów przerywanych na jakość wyznaczania czasu w modułach GNSS. Zmniejszenie poboru mocy podczas pracy w takich trybach jest oczywiste, jednak autorzy zauważają brak prac związanych z możliwością zredukowania wymagań na precyzję sygnału 1 PPS w celu uzyskania dalszej redukcji poboru mocy. Analiza ta może mieć znaczenie dla urządzeń IoT, w których nie ma wymagań na utrzymanie sub-mikrosekundowej dokładności czasu. Brak jest także rozwiązań, w obecnie dostępnych modułach GNSS, dających projektantowi systemu możliwość narzucenia parametrów jakości pozycjonowania *a priori* i wynikającą z tego możliwość optymalizacji zużycia energii.

Dalsze prace w zakresie tej tematyki będą obejmować analizy i modyfikacje istniejących algorytmów pętli fazowych i kodowych w odbiornikach GNSS, opracowanie modeli poboru energii przez moduły z uwzględnieniem wymagań na stabilność i precyzję sygnału zegarowego, implementację nowych technik synchronizacji czasu opartych o systemy satelitarne LEO.

Autorzy: mgr inż. Oskar Mężyk, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: o.mezyk@imej.uz.zgora.pl;

dr inż. Michał Doligalski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: m.doligalski@imej.uz.zgora.pl

dr hab. inż. Ryszard Rybski, prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: r.rybski@imej.uz.zgora.pl;

LITERATURA

- [1] Nordic Semiconductors, “nRF52832 - Product Specification v1.4”, 2017
- [2] Microchip, App. Note. AT031055, Rev.42251A, 2014
- [3] Microsemi, “Temperature Compensated Crystal Oscillator”, VT-803 datasheet, June 2018
- [4] Microsemi, “Microprocessor Controlled Crystal Oscillator. High precision.”, MX-503 datasheet, Rev. 08/2017
- [5] Microsemi, “Quantum™ SA.45s CSAC Chip Scale Atomic Clock”, datasheet
- [6] Dargie W., Poellabauer Ch., Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice, 2011, Wiley
- [7] Lasassmeh S. M., Conrad J. M., Time synchronization in wireless sensor networks: A survey, *Proceedings of the IEEE SoutheastCon*, 2010, pp. 242-245
- [8] Rhee I. K., Lee J., Kim J., Serpedin E., Wu Y. C., Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks: An Overview, *Sensors*, 9 (2009), p. 56–85
- [9] Lim R., Maag B., Thiele L., Time-of-Flight Aware Time Synchronization for Wireless Embedded Systems, *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks, EWSN 2016*
- [10] Sabarish S., Misra P., Gill G. S., Warrior J., Cheepsync: a time synchronization service for resource constrained bluetooth LE advertisers, *IEEE Communications Magazine*, vol. 54 (2016), no. 1, pp. 136-143
- [11] Tavares Bruscato L., Heimfarth T, Pignaton de Freitas E., Enhancing Time Synchronization Support in Wireless Sensor Networks, *Sensors*, vol. 12 (2017), 2957
- [12] Lenzen C., Sommer P., Wattenhofer R., PulseSync: An Efficient and Scalable Clock Synchronization Protocol, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 23 (2015), no. 3, pp. 717-727
- [13] Schmid T., Dutta P., Srivastava M. B., High-resolution, low-power time synchronization an oxymoron no more, *Proceedings of the 9th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 2010
- [14] Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F., A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, *ICT Express*, 2018
- [15] Ganeriwal S., Kumar R., Srivastava M. B., Timing-sync protocol for sensor networks, *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, 2003, pp. 138-149
- [16] Maróti M., Kusy B., Simon G., Lédeczi Á., The flooding time synchronization protocol, *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2004, p. 39–49
- [17] U-blox, App.Note GPS.G6-X-11007
- [18] U-blox, “NEO/LEA-M8T u-blox M8 concurrent GNSS timing modules”, datasheet, UBX-15025193-R03
- [19] U-blox, App.Note UBX-13005162
- [20] Bellad V., Petovello M. G., Lachapelle G., Characterization of Tracking and Position Errors in GNSS Receivers with Intermittent Tracking, *Proceedings of ION GNSS+*, 2014, pp. 2698-2712.
- [21] Chung-Liang Ch., The Effect of Intermittent Signal on the Performance of Code Tracking Loop in GNSS Receivers, *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2011
- [22] U-blox, Portables: The challenge of low power and good GNSS performance, white paper, UBX-17023276-R01, 2017
- [23] Telit, App. Note 80000NT11639A Rev. 0, 2017
- [24] Telit, App. Note 80000NT11640A Rev. 0, 2017
- [25] Lawrence D. et al., Innovation: Navigation from LEO, <http://gpsworld.com/innovation-navigation-from-leo>, 11.09.2018