

PORÓWNANIE REGULARNOŚCI PRÓBKOWANIA PRZETWORNIKÓW ANALOGOWO-CYFROWYCH STOSOWANYCH W AKCELEROMETRACH WYBRANYCH URZĄDZEŃ MOBILNYCH

Grzegorz SIEKLUCKI¹, Andrzej BIEN², Sylwester SOBIERAJ³, Józef GROMBA⁴

1. AGH w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej tel.:607-280-696 e-mail: sieklo@agh.edu.pl
2. AGH w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej tel.:502-657-962 e-mail: abien@agh.edu.pl
3. AGH w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej tel.:793-922-505 e-mail: sobieraj2@gmail.com
4. AGH w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej tel.:799-252-469e-mail: jgro@agh.edu.pl

Streszczenie: Praca dotyczy porównania regularności próbkowania trójosiowych czujników przyspieszenia w popularnych smartphonach, przedstawiono zestawienie czujników niektórych telefonów. Podstawowym analizowanym parametrem jest stabilność częstotliwości próbkowania w zależności od używanego systemu operacyjnego i producenta urządzenia. Analizę prowadzono tak by wybrane smartphony były wyposażone w różne czujniki pomiarowe - akcelerometry. Zaprezentowano przykład zastosowania pomiarowego - porównawczy pomiar drogowy.

Słowa kluczowe: akcelerometr, MEMS, IMU, Android, iOS, częstotliwość próbkowania, rejestracja ruchu pojazdów.

1. WPROWADZENIE

Początki akcelerometrów sięgają 1920 roku. To wtedy po raz pierwszy wykonano pomiary przyspieszeń. Od tego momentu zaczęto rozwijać i udoskonalać rozwiązania technologiczne do produkcji akcelerometrów. Przemysł motoryzacyjny stał się pierwszym komercyjnym rynkiem czujników przyspieszeń (poduszki powietrzne). W latach 1991-1994 firma Analog Devices sprzedała pierwszą serię czujników marce Saab [3]. W 1999 roku zaproponowano diagnostykę amortyzatorów samochodowych przy użyciu analogowego czujnika ADXL05 [6]. Rozwój technologii produkcji akcelerometrów, chęć poprawy niezawodności pracy urządzeń oraz ograniczenie kosztów produkcji doprowadziły do stworzenia urządzeń nazwanych jako MEMS (ang. Micro-Electro-Mechanical-System).

Układy MEMS są to zminiaturyzowane urządzenia elektromechaniczne, które łączą elektroniczne i mechaniczne elementy wykonane w mikrometrowych rozmiarach [1, 2].

W wyniku miniaturyzacji, malejących kosztów produkcji oraz ciągłego rozwoju elektroniki w 2006 roku zastosowano po raz pierwszy trójosiowy czujnik MEMS w konsolach do gier Nintendo Wii (podwykonawca: Foxconn, a MEMS wyprodukowany przez InvenSense), a także smartphonach, co zapoczątkowało stosowanie układów MEMS w życiu codziennym [3].

Obecnie układy MEMS stosowane w smartphonach posiadają zintegrowane akcelerometry i żyroskopy oraz filtry antyaliasingowe, multipleksery analogowe, przetworniki analogowo-cyfrowe, układy transmisji danych I²C lub SPI [1]. Nowsze rozwiązania, szczególnie firm STMicroelectronics, Bosch i InvenSense zawierają dodatkowo: równoległe przetwarzanie analogowo-cyfrowe, programowane filtry cyfrowe, a nawet 32 bitowy programowany rdzeń Cortex M0. Rozwiązania takie są również wykorzystywane do mechanicznej stabilizacji obiektywu aparatu w smartphonie lub aparacie fotograficznym. Takie układy MEMS nazywane są inercjalnymi układami pomiarowymi (IMU - Inertial Measurement Unit) [5].

Celem artykułu jest przedstawienie możliwości użycia w eksperymentach i właściwości pomiarowych akcelerometrów zainstalowanych w telefonach. Oznacza to określenie przydatności w pomiarach urządzeń, którymi dysponuje obecnie prawie każdy człowiek i nie ma świadomości ich możliwości. Podsumowując, kupując smartphone jesteśmy właścicielami m.in. trójosiowego akcelerometru, który możemy wykorzystać nie tylko w grach i zabawach smartphonem..., ale korzystając z dostępnych aplikacji możemy wykonać pomiary przyspieszeń, które zostaną zarejestrowane w telefonie, następnie przesłane przez pocztę e-mail i ostatecznie przetworzone "offline" w komputerze PC (np. z wykorzystaniem darmowego oprogramowania Octave, SciLab). Powyższe rozwiązanie wydaje się być najprostszym oraz najszybszym z możliwych gdyż nie wymaga parowania z innymi urządzeniami, zaś dostęp do sieci internetowej posiada praktycznie każdy użytkownik. Dodatkowo, podejście takie nie wymaga projektowania i wykonania układu elektronicznego, programu akwizycji i przetwarzania sygnałów. Wykorzystując akcelerometry w smartphonach należy zwracać szczególną uwagę na częstotliwość próbkowania, która niestety zwykle jest zmienna w sposób niezależny od użytkownika.

Tabela 1. Dane techniczne smartphone'ów zastosowanych podczas pomiarów.

TELEFON	iPhone 4s	ASUS Fonepad K004	SONY XPERIA E1	SAMSUNG GALAXY Grand Prime	HUAWEI P8 Lite	HUAWEI HONOR 8
data premiery	październik 2011	luty 2013	styczeń 2014	wrzesień 2014	kwiecień 2015	lipiec 2016
system operacyjny	iOS 9.3.5	Android 4.1.2	Android 4.4.2	Android 5.0.2	Android 6.0 EMUI 4.0	Android 7.0 EMUI 5.0
procesor	Apple A5	Intel Atom Z2460	Qualcomm MSM8210	Qualcomm Snapdragon 410	Hisilicon Kirin 620	Hisilicon Kirin 950
liczba rdzeni, częstotliwość	2x1GHz Cortex-A9	1x1.2GHz	2x1.20GHz Cortex-A7	4x1.20GHz Cortex-A53	8x1.20GHz Cortex-A53	4x2.30GHz 4x1.8GHz Cortex A72, A53
RAM	512 MB	1GB	512 MB	1 GB	2GB	4 GB
MEMS (accelerometr)	STM LIS331DLH	Kionix KXTJ9	Bosch BMA250E	Bosch BMC150	Kionix KX023	STM LSM330
Dokumentacja na stronie	www.st.com	www.kionix.com	www.bosch-sensortec.com	www.bosch-sensortec.com	www.kionix.com	www.st.com
max f_s [kHz]	1 kHz	1.6kHz	1kHz	1kHz	1.6kHz	1.6kHz
rozdzielczość	12 bit	12bit	10 bit	12bit	14bit	14 bit
Mux. analog.	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	TAK
Zakres akcelerometru	$\pm 2/\pm 4/\pm 8g$	$\pm 2/\pm 4/\pm 8g$	$\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16g$	$\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16g$	$\pm 2/\pm 4/\pm 8g$	$\pm 2/\pm 4/\pm 6/\pm 8/\pm 16g$
Zakres w telefonie	$\pm 2g$	$\pm 2g$	$\pm 2g$	$\pm 4g$	$\pm 4g$	$\pm 8g$

Przedstawione w artykule podejście zwraca uwagę na możliwości wykorzystania wyposażenia obecnych telefonów w pomiarach ruchu obiektów, np. pojazdów.

2. AKCELEROMETRY STOSOWANE W SMARTPHONE'ACH

Większość z obecnie produkowanych oraz użytkowanych na co dzień smartphone'ów posiada wbudowane akcelerometry 3-osiowe, które ze względu na swoją mobilność oraz stworzone aplikacje (np. Physics Toolbox Sensor Suite, Sensor Kinetics Pro) umożliwiają przeprowadzenie w łatwy sposób technicznych pomiarów przyspieszeń, a następnie przesłania wyników w formacie *.csv za pośrednictwem poczty elektronicznej. Niestety zapis danych – struktura pliku zależy od systemu operacyjnego smartphone'u (przykład 1).

Przykład 1: Porównanie formatu zapisu sygnałów w różnych systemach operacyjnych dla oprogramowania Physics Toolbox Sensor Suite

iOS:
 $x_times_g, y_times_g, z_times_g, g_meas, T, timeInterval, Date$
 0.061325, -0.217880, -1.034195, 1.058675, 138183.691599, 2001-01-02 15:2
 0.063446, -0.210693, -1.004120, 1.027946, 138183.680535, 2001-01-02 15:2
 0.060913, -0.219162, -0.992508, 1.018241, 138183.669427, 2001-01-02 15:2

Android:
 $time, gFx, gFy, gFz, TgF$
 0.0050; 0.0186; 0.2883; 0.9547; 0.997
 0.0060; 0.0254; 0.2863; 0.9528; 0.995
 0.0160; 0.0166; 0.2814; 0.9567; 0.997
 0.0250; 0.0137; 0.2844; 0.9635; 1.005
 0.0390; 0.0235; 0.2922; 0.9596; 1.003

Zapis liczb dla obu rozważanych systemów jest inny (część dziesiętna jest oddzielona kropką lub przecinkiem).

Zaznaczono również różny sposób zapisu czasu i w przypadku systemu iOS jest to czas systemowy zapisany z dokładnością $10^{-6}s$, a w przypadku systemu Android czas pomiaru zapisany z dokładnością $10^{-3}s$. Oznacza to inny sposób wczytywania zarejestrowanych plików *.csv.

W przypadku oprogramowania Sensor Kinetics Pro zapis czasu jest identyczny, tzn. tak jak dla systemu Android.

W zależności od producenta oraz modelu telefonu instalowane są akcelerometry różnych koncernów elektronicznych, o różnorodnych parametrach i rozwiązaniach technologicznych (tabela 1). Jednymi z najistotniejszych parametrów akcelerometrów są: zakres mierzonych przyspieszeń, rozdzielczość przetwornika oraz maksymalna częstotliwość próbkowania f_s , które wpływają na dokładność pomiarów i ich użyteczność w eksperymentach. Ważną rolę pełni również proces przetwarzania mierzonych sygnałów. Większość MEMS wyposażona jest w multiplekser analogowy, w wyniku czego mierzony sygnał jest multipleksowany (3 osie), co w rzeczywistości oznacza, że wartości przyspieszenia dla poszczególnych osi są przesunięte w czasie o czas konwersji A/C, wprowadzając opóźnienia o nieznannej wartości [1].

Należy również podkreślić, że na jakość przetwarzania sygnałów wpływa zainstalowany system operacyjny oraz nakładka systemowa.

Ze względu na fakt iż większość udziału w rynku smartphone'ów przypada systemowi Android, za którym plasuje się iOS, do pomiarów zastosowano telefony z oprogramowaniem obu producentów. Dodatkowo telefony zróżnicowano ze względu na datę premiery, aby zaobserwować czy rozwój technologiczny i zastosowane podzespoły znacząco wpływają na jakość pomiarów. Zastosowane do badań smartphone'y zostały zestawione w tabeli 1 wraz z danymi technicznymi poszczególnych modeli. **Informacje o zainstalowanych akcelerometrach**

uzyskano przy zastosowaniu aplikacji Sensors Multitool (Android) oraz strony www.iFixit.com (iOS). Natomiast szczegółowe informacje dotyczące zastosowanych akcelerometrów zapisano na podstawie dokumentacji technicznych dostępnych na stronie producenta.

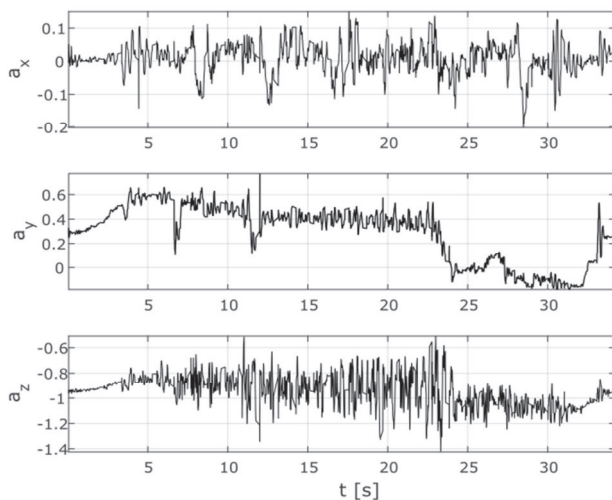
3. OCENA REGULARNOŚCI PRÓBKOWANIA NA PRZYKŁADZIE POMIARU DROGOWEGO

Dla oceny przydatności pomiarowej przeprowadzono eksperymenty, które opisano poniżej.

Wszystkie pomiary zostały poprzedzone kalibracją (za wzorzec przyjęto przyspieszenie ziemskie $g = 9,81\text{m/s}^2$), dla której wykorzystano wcześniej określoną i wypoziomowaną płaską powierzchnię (płyta plexi), a następnie określono błędy pomiaru przyspieszenia urządzenia mobilnego. W pomiarach ruchu pojazdu wykorzystano oprogramowanie Physics Toolbox Sensor Suite (oprogramowanie dla obu systemów operacyjnych), gdzie dla iPhone'a ustawiono częstotliwość próbkowania równą 100Hz, a dla smartphonów z systemem Android: najszybszą częstotliwość próbkowania.

W rozważaniach zastosowano zamiennie dwa pojęcia tj. częstotliwość próbkowania i okres próbkowania. Częstotliwość próbkowania jest wielkością ustawianą przez zastosowane oprogramowanie, natomiast okres próbkowania jest istotny przy przetwarzaniu danych.

W ramach porównawczych badań dokonano kilku przejazdów różnymi samochodami i dokonano rejestracji przyspieszeń [4] z wykorzystaniem sześciu telefonów. Przykładowy pomiar z Sony Xperia E1 został przedstawiony na rysunku 1. Podczas pomiarów samochód poruszał się po poziomej powierzchni asfaltowej z maksymalnym możliwym przyspieszeniem. Ruch prostoliniowy odbywał się wzdłuż osi Y (widoczne są chwile przełączania biegów: bieg 1 do około 6,6 s, bieg 2. do 11,4 s, bieg 3. do 22,9 s, a następnie hamowanie i zatrzymanie pojazdu w 33,6 s).



Rys. 1. Przykładowy pomiar z wykorzystaniem akcelerometru z telefonu Sony Xperia E1 - jednostką przyspieszenia jest 1g

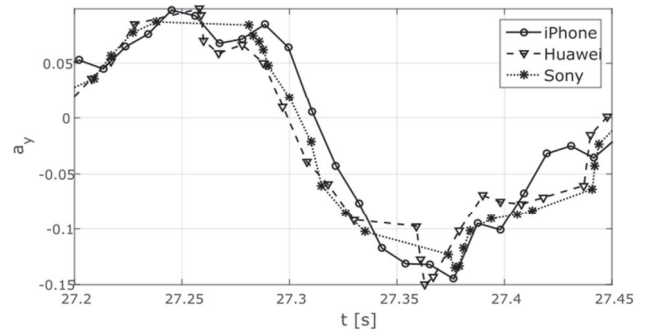
Dla wybranych smartphonów: iPhone 4s, Huawei Honor 8 oraz Sony Xperia E1 przedstawiono porównanie procesu próbkowania (rys. 2), dla pozostałych badanych urządzeń przebiegi były zbliżone. Zaprezentowane przebiegi przyspieszenia, charakteryzują się nierównomiernym okresem próbkowania.

Przedstawione wyniki, świadczą o nierównomierniej częstotliwości próbkowania w wykorzystanych systemach operacyjnych (oprogramowanie: Physics Toolbox Sensor). Wizualizacja okresu próbkowania została przedstawiona na rysunku 3, gdzie naniesiona została wartość średnia T_{pa} , względem której wyznaczono drgania okresu próbkowania (N liczba próbek w zarejestrowanym przebiegu):

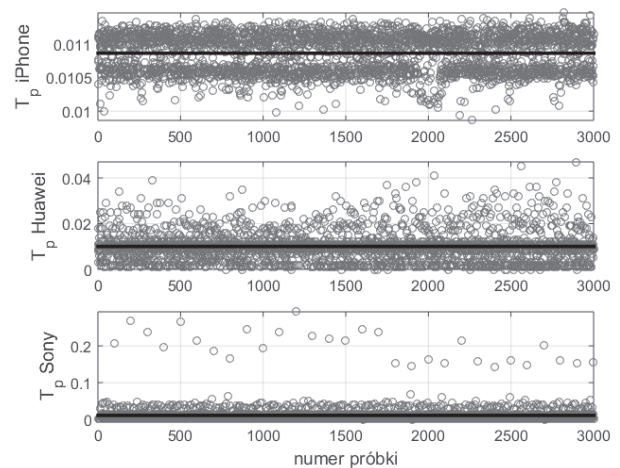
$$e(k) = T_{pa} - T_p(k) \quad (1)$$

$$\|e\|_{\infty} = \max_k(|e(k)|) \quad (2)$$

$$\|e\|_2 = \frac{\sqrt{\sum e(k)^2}}{T_{pa} \cdot N} \cdot 100\% \quad (3)$$



Rys. 2. Porównanie przetwarzania sygnału przyspieszenia



Rys. 3. Zmienność okresu próbkowania sygnałów T_p [s]

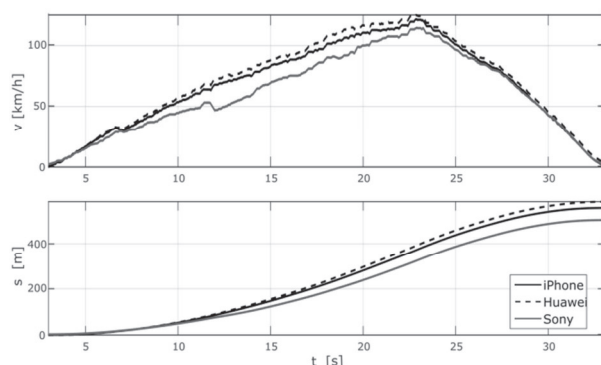
W tabeli 2 zamieszczono zestawienie błędów okresu próbkowania dla poszczególnych telefonów. Nierównomierne próbkowanie może prowadzić do utraty cennych informacji z mierzonego sygnału, dlatego nawet w procesie całkowania [7] (wyznaczenie prędkości i drogi) pojawią się różnice pomiędzy poszczególnymi smartphonami (rys. 4).

Tabela 1. Drgania czasu próbkowania poszczególnych telefonów

Model telefonu	$\ e\ _{\infty}$	$\ e\ _2$
iPhone 4s	0,001s	2,3%
Asus Fonepad K004	0,6s	125%
Sony Xperia E1	0,28s	83%
Samsung Galaxy Grand Prime	0,039s	56%
Huawei P8 Lite	0,044s	53%
Huawei Honor 8	0,037s	40%

Przedstawione na rysunku 4 wyniki przetwarzania sygnałów prezentują (sygnały były przetwarzane metodami zmiennokrokowymi [7]):

- przebieg prędkości v , który w każdym przypadku rozpoczyna i kończy się na wartości 0 km/h - oznacza to poprawną, tzn. powtarzalną pracę MEMS oraz oprogramowania procesorów aplikacji lub procesorów „sensor hub”, ale różnice w uzyskanych przebiegach wynikają z dokładności pomiarowej i regularności próbkowania całego urządzenia mobilnego,
- wyznaczenie przebytej drogi, które prowadzi do kumulacji błędów, oznacza to, że uzyskane wyniki mają charakter przybliżony.



Rys. 4. Porównanie odtworzenia prędkości i drogi pojazdu

Powyższe wnioski są wynikiem analizy rejestracji czterech przejazdów różnych marek samochodów. Porównując dane telefonów z tabeli 1 z wynikami z tabeli 2 można stwierdzić, że dla systemu Android:

- rozmiar pamięci RAM nie ma znaczenia na regularność próbkowania,
- częstotliwość pracy oraz liczba rdzeni procesorów wpływa na polepszenie procesu próbkowania.

Natomiast dla urządzeń mobilnych z systemem iOS, stabilność częstotliwości próbkowania zmienia się nieznacznie w zależności od typu urządzenia.

4. PODSUMOWANIE

Zagadnienie omówione w artykule dotyczyło zastosowania smartphone'ów oraz standardowych aplikacji do wykonania pomiarów przyspieszeń.

W pracy zaprezentowano parametry wybranych akcelerometrów wykorzystywanych w smartphone'ach. Szczególny nacisk położono na analizę okresu próbkowania.

Na podstawie przeprowadzonych badań pomiarowych, zestawienia smartphone'ów oraz po dokonaniu analizy i możliwości zastosowań różnych aplikacji nasuwają się następujące wnioski:

1. Układy MEMS zainstalowane w smartphone'ach pozwalają na przeprowadzenie pomiaru i jego rejestrację, w celu późniejszego przetwarzania, np. przy pomocy komputerów PC.
2. MEMS stosowane w telefonach stanowią jedne z nowocześniejszych rozwiązań w tej dziedzinie.
3. Okres próbkowania zarejestrowanych przebiegów zawsze jest zmienny, nie ma znaczenia ani system operacyjny ani telefon, dlatego należy wykorzystywać zmiennokrokowe metody przetwarzania sygnałów.
4. Smartphone'y z systemem iOS pozwalają bardziej precyzyjne (co 1Hz) ustawienie częstotliwości próbkowania. Charakteryzują się również mniejszymi błędami próbkowania.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Jones T. B., Nenadic N. G.: Electromechanics and MEMS. Cambridge Univ. Press, 2013, str. 298-371.
2. Andrejašič M.: MEMS Accelerometers, Seminar - University of Ljubljana, Faculty for mathematics and physics, March 2013.
3. Chang L.: The MEMS Motion Sensor Perspectives. http://www.memscentral.com/Secondlayer/mems_motion_sensor_perspectives-1.htm
4. Han H. Yu J., Zhu H., Chen Y., Yang J., Zhu Y., Xue G., Li M.: SenSpeed: Sensing Driving Conditions to Estimate Vehicle Speed in Urban Environments. *IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conf. on Computer Communications*, Toronto, 2014, str. 727-735
5. Woodman O. J.: An introduction to inertial navigation. Tech. Report, Univ. of Cambridge, n. 696, 08.2007.
6. Bień A., Musiał P., Sieklucki G.: Diagnostyka amortyzatora samochodowego na podstawie sygnału przyspieszenia karoserii, *Pomiary Automatyka Kontrola*, R. 45, nr 1, 1999, str. 20-23.
7. Sieklucki G., Bień A., Gromba J., Sobieraj S.: Metoda określenia ruchu pojazdu na podstawie obserwacji przyspieszeń. *MKM'2017, Zeszyty Naukowe Wyd. Elektrot. i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 54* (przyjęty do druku)

A COMPARISON OF SAMPLE TIME REGULARITY IN ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTERS USED IN ACCELEROMETERS FOR SELECTED MOBILE DEVICES

The work is a description of metrological properties and their comparison for triaxial acceleration sensors (MEMS - Micro-Electro-Mechanical System, IMU - Inertial Measurement Unit) in popular and modern smartphones. A comparison of the components of some phones is presented. The stability of the sampling time is the basic parameter which is analyzed. Sampling time in analog-to-digital converters (inside MEMS units) depends on the operating system of smartphone and its components (processor, RAM) which are used in its construction. The analysis was performed in order to select smartphones which are equipped with different measuring systems - MEMS accelerometers. The Android and iOS operating systems are used in research. The comparative road measurement is presented as an example of measuring application with smartphones. Physics Toolbox Sensor Suite software (free software for iOS and Android) used in the measurement of a vehicle motion. Results for 3D acceleration signals processing with variable sampling time are presented and compared for different smartphones.

Keywords: accelerometers, MEMS, IMU, Android, iOS, sampling frequency, vehicle motion .