

Mariusz Specht

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
80-233 Gdańsk, ul. G. Narutowicza 11/12
e-mail: mariuszspecht1992@gmail.com

**WOJSKOWE ODBIORNIKI GPS
Z MODUŁEM SAASM —
WPROWADZENIE DO ZAGADNIENIA**

STRESZCZENIE

W 2008 roku Departament Obrony USA opublikował dokument *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*, w którym zawarto wymagania w zakresie dokładności, dostępności, niezawodności, wiarygodności oraz strefy działania serwisu wojskowego GPS (*Precise Positioning Service* — PPS). Dotychczasowe odbiorniki tego serwisu, aby dokonywać precyzyjnych pomiarów odległości, musiały przeprowadzić proces synchronizacji z serwisem cywilnym (*Standard Positioning Service* — SPS). Na początku XXI wieku opracowano nową metodę synchronizacji sygnałów serwisu PPS z pominięciem SPS, stąd pojawiły się nowe odbiorniki (*Selective Availability Anti-Spoofing Module* — SAASM) realizujące tę funkcję. W artykule zaprezentowano wymagania nawigacyjne dla serwisu SPS dotyczące dokładności określenia współrzędnych pozycji oraz przedstawiono wprowadzenie teoretyczne dotyczące wykorzystania modułów SAASM.

Słowa kluczowe:

precyzyjny serwis pozycyjny, standardowy serwis pozycyjny, moduł SAASM.

WSTĘP

Wśród użytkowników systemu GPS istnieje szereg domniemań i mitów dotyczących precyzyjnego serwisu pozycyjnego. Wynikają one z niezmiernie małej liczby publikacji w tym zakresie, przy jednoczesnym braku literatury polskojęzycznej. W artykule przedstawiono kilka faktów dotyczących tej „magicznej” problematyki.

Siły Powietrzne Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej (*The United States Air Force*) są odpowiedzialne za projektowanie, rozwój, nadzór, działanie i modernizację systemu GPS. Dowódca Strategicznego Dowództwa Stanów Zjednoczonych (*Commander of United States Strategic Command — USSTRATCOM*) kieruje systemem za pomocą 50. Skrzydła Powietrznego (*50th Space Wing*) oraz 2. Eskadry Operacji Kosmicznych (*2nd Space Operations Squadron*) stacjonującej w Bazie Sił Powietrznych Schriever, Colorado. System GPS jest pod bieżącym nadzorem Skrzydła Globalnych Systemów Pozycyjnych (*Global Positioning Systems Wing — GPSW*) znajdującego się w Centrum Systemów Kosmicznych i Rakietowych (*Space and Missile Systems Center*) w Bazie Sił Powietrznych w Los Angeles, California [2].

Opublikowany w styczniu 2007 roku standard PPS określa charakterystyki sygnału (*Signal in Space — SIS*) adresowane do autoryzowanych użytkowników. W zakresie przeznaczenia serwisu szczególną uwagę należy zwrócić na wykorzystanie sygnałów wojskowych przez systemy przyrządowego podejścia do lądowania (*Instrument Flight Rules — IFR*). W lotnictwie cywilnym nie odnajdujemy dziś bezpośrednio takiej analogii względem sygnałów SPS.

Zgodnie z omawianym dokumentem precyzyjny serwis pozycyjny to serwis pozycyjny i czasu przeznaczony dla użytkowników militarnych GPS, oparty na transmisji sygnałów na częstotliwościach L1 i L2. Użytkownicy autoryzowani mogą wykorzystywać PPS dzięki dostępowi do tzw. „kluczy kryptograficznych” umożliwiających pełne dekodowanie depeszy nawigacyjnej oraz synchronizacji kodów pseudoprzypadkowych P i Y. Dokumentem definiującymi strukturę sygnałową dla kodu C/A jest ICD-GPS-200 [5] oraz dla kodów P i Y publikacje tajne o tytułach [2]:

- ICD-GPS-224 (S) Navstar GPS Selective Availability and Anti-Spoof Current Revision Receiver Design Requirements;
- ICD-GPS-225 (S) Navstar GPS Selective Availability and Anti-Spoof Current Revision Host Application Equipment Design Requirements for Precise Positioning Service Security Module.

Charakterystyki eksploatacyjne w zakresie dokładności wyznaczenia współrzędnych pozycji i czasu zdefiniowano w PPS, odnosząc się do następujących zmiennych:

- dokładności pomiaru pseudoodległości, reprezentowanej przez błąd pomiaru odległości użytkownika (*User Range Error* — URE);
- pochodnej URE względem czasu, reprezentowanej przez szybkość zmiany błędu pomiaru odległości użytkownika (*User Range Rate Error* — URRE);
- drugiej pochodnej URRE względem czasu, reprezentowanej przez pochodną szybkości zmiany błędu pomiaru odległości użytkownika (*User Range Rate Rate Error* — URRRE);
- błędu wyznaczenia czasu UTC, reprezentowanego przez wartość przesunięcia czasu UTC wyznaczonego przez PPS względem UTC (*UTC Offset Error* — UTCOE).

PRECYZYJNY SERWIS POZYCYJNY GPS

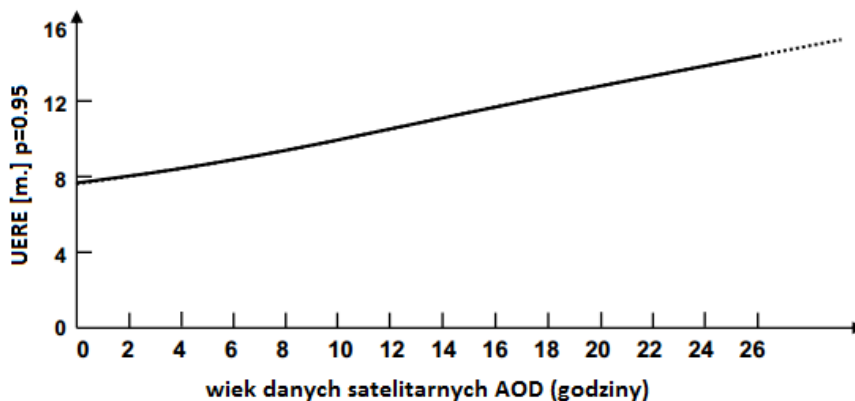
Publikacja dokumentu [2] spowodowała upublicznienie charakterystyk nawigacyjnych precyzyjnego serwisu pozycyjnego GPS, które jeszcze do niedawna uważano za niejawne. Należy zauważyć, że struktura dokumentu [2] jest identyczna jak publikacji odnoszącej się do serwisu SPS [3]. Najistotniejszą zmienną opisującą pozycyjne serwisy satelitarne jest błąd pomiaru pseudoodległości po stronie użytkownika.

Aktualne charakterystyki błędu pomiaru odległości przez użytkownika PPS zestawiono w tabeli 1. Odniesiono się w niej do parametru AOD (*Age of Data*), będącego wiekiem danych satelitarnych. Dane te są wypracowywane przez segment kontrolny systemu i dotyczą między innymi prognozowanych parametrów ruchu satelity. Nietrudno się domyślić, że w miarę upływu czasu ulegają one stopniowej dezaktualizacji (aż do ponownej aktualizacji przez segment kontrolny, średnio co 6–10 h). Przyjęcie wartości AOD = 0 (sekund) oznacza, że minimalny błąd pomiaru pseudoodległości wynoszący 2.6 m występuje dla aktualnych (niezdegradowanych upływem czasu) parametrów. Na rysunku 1. zaprezentowano zmianę dobową wielkości estymowanego błędu pomiaru odległości użytkownika (UERE) w funkcji wartości AOD, przy założeniu, że segment kontrolny tylko jeden raz skorygował dane satelitarne. Jednocześnie należy podkreślić, że poniższe dane zakładają wysoką stabilność zegarów atomowych satelitów, stanowiących istotny element w prognozowaniu położenia satelitów na moment obserwacji (pomiaru).

Tabela 1. Błędy pomiaru pseudoodległości użytkownika (URE) serwisu PPS systemu GPS

Typ odbiornika	Standard dokładności SIS	Warunki i ograniczenia
Dwu- częstotliwościowy P(Y)	<ul style="list-style-type: none"> – 5.9 m (95%), uśredniona globalnie, normalne warunki pracy dla typowych danych satelitarnych AOD – 2.6 m (95%), uśredniona globalnie, normalne warunki pracy dla danych satelitarnych AOD = 0 – 11.8 m (95%), uśredniona globalnie, normalne warunki pracy dla dowolnych danych satelitarnych AOD 	<ul style="list-style-type: none"> – dla dowolnego satelity będącego w stanie zdatności oznaczonego w depeszy nawigacyjnej GPS
Jedno- częstotliwościowy P(Y)	<ul style="list-style-type: none"> – 6.3 m (95%), uśredniona globalnie, normalne warunki pracy dla typowych danych satelitarnych AOD – 5.4 m (95%), uśredniona globalnie, normalne warunki pracy dla danych satelitarnych AOD = 0 – 12.6 m (95%), uśredniona globalnie, normalne warunki pracy dla dowolnych danych satelitarnych AOD 	<ul style="list-style-type: none"> – dla dowolnego satelity będącego w stanie zdatności oznaczonego w depeszy nawigacyjnej GPS – zaniedbując modelowanie błędów opóźnienia jonosferycznego – uwzględniając korektę opóźnienia grupowego sygnałów L1

Źródło: *Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard 1st Edition, United States of America Department of Defense, February 2007, s. 22.*



Rys. 1. Zmiana dobowa wartości UERE w funkcji AOD dla pojedynczej aktualizacji danych satelitarnych w ciągu doby; dane dla stabilnego zegara satelitarnego

Źródło: *Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard 1st Edition, United States of America Department of Defense, February 2007, s. A-8.*

Kolejną z charakterystyk PPS jest szybkość zmiany błędu pomiaru odległości użytkownika (URRE) informująca o typowej dla tego systemu zamienności błędu pomiaru odległości. Wartość ta jest istotna między innymi z punktu widzenia wykorzystywania wersji różnicowych, dla których korekty przesyłane są przez linie telemetryczne o niskiej przepustowości. W poniższej tabeli zaprezentowano prognozowane wartości tego parametru.

Tabela 2. Błędy szybkości zmiany błędu pomiaru odległości użytkownika — URRE serwisu PPS systemu GPS

Typ odbiornika	Standard dokładności SIS	Warunki i ograniczenia
Dwu-częstotliwościowy P(Y)	– 0.006 m/s (95%), uśredniona globalnie w czasie 3 s, w normalnych warunkach pracy, dla dowolnych danych satelitarnych AOD	– dla dowolnego satelity będącego w stanie zdatności oznaczonego w depeszy nawigacyjnej GPS – zaniedbując wszystkie składowe błędy pomiaru pseudoodległości z depeszy nawigacyjnej – zaniedbując model opóźnienia jonosferycznego

Źródło: *Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard, 1st Edition, United States of America Department of Defense, February 2007, s. 23.*

Trzeci z parametrów, URRRE zostanie pominięty ze względu na jego bardzo złożoną interpretację — praktycznie nieużyteczną z poziomu użytkownika. Bardzo istotnym, wręcz kluczowym parametrem serwisu PPS jest dokładność wyznaczenia czasu UTC. W poniższej tabeli przedstawiono wspomniane charakterystyki odniesione do obserwacji pochodzących z Obserwatorium Astronomicznego Marynarki Wojennej USA (UTC OE).

Tabela 3. Błędy wyznaczenia czasu UTC — UTC OE serwisu PPS systemu GPS

Typ odbiornika	Standard dokładności SIS	Warunki i ograniczenia
Dwu-częstotliwościowy P(Y)	– ≤ 40 nsec (95%), uśredniona globalnie, w normalnych warunkach pracy, dla dowolnych danych satelitarnych AOD	– dla dowolnego satelity będącego w stanie zdatności oznaczonego w depeszy nawigacyjnej GPS

Źródło: *Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard 1st Edition, United States of America Department of Defense, February 2007, s. 24.*

Wyznaczenie dokładności transferu czasu serwisu PPS względem UTC (USNO) odbywa się w oparciu o poniższą zależność:

$$UUTCE = \sqrt{\left(\frac{UERE \cdot TDOP}{c}\right)^2 + UTCOE^2}, \quad (1)$$

gdzie:

UUTCE — błąd średni (RMS) pomiaru czasu użytkownika względem UTC (USNO);

TDOP — wartość współczynnika TDOP;

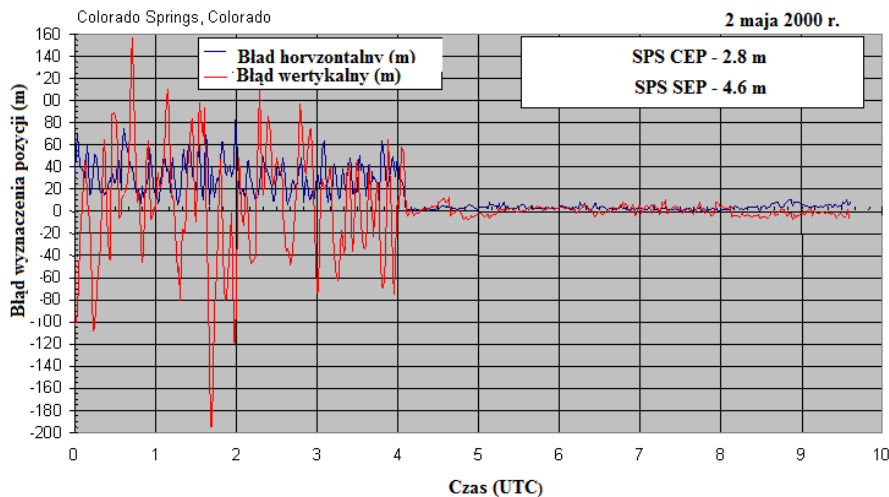
UTC OE — błąd (RMS) przesunięcia czasów UTC (USNO).

Źródło: Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard 1st Edition, United States of America Department of Defense, February 2007, s. B4.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ODBIORNIKÓW SAASM

Rynek użytkowników cywilnych systemu GPS oparty na serwisie SPS oraz dostępie do częstotliwości L1 i kodzie C/A szacowany jest na około 10 mld USD. Stany Zjednoczone biorą również pod uwagę, że część z urządzeń GPS może znajdować się w rękach potencjalnych przeciwników. Z tego względu niezbędne było rozwiązanie istotnego dylematu ograniczenia możliwości aplikowania technologii GPS przeciwko właścicielowi systemu i jego sojusznikom. Rozwiązaniem stała się selektywna dostępność (SA) stosowana względem użytkowników cywilnych, ograniczająca możliwości systemu (dokładność pozycji i czasu), zaimplementowana w GPS od momentu jego powstania. Wzrost zapotrzebowania użytkowników cywilnych na wysokoprecyzyjny serwis SPS spowodował jednak wyłączenie tej techniki kryptograficznej 2 maja 2000 r. [6].

W tej sytuacji koniecznością stało się wypracowanie nowej strategii kontroli nad parametrami nawigacyjnymi odbiorników oferowanych użytkownikom cywilnym, celem zabezpieczenia USA przed świadczeniem serwisu pozycyjnego potencjalnym przeciwnikom. Mankamentem technologii opartej na SA był jej globalny zakres zastosowania, co oznacza, że jako skrajne rozwiązanie jawiło się całkowite wyłączenie sygnałów SPS na zagrożonym obszarze. Skutkiem takiego działania byłoby jednoczesne pozbawienie serwisu pozycyjnego niepożądanych użytkowników, czyli tych, którym dostawca serwisu SPS chciałby uniemożliwić rozwiązania pozycyjne i czasu.



Rys. 2. Moment wyłączenia selektywnej dostępności w systemie GPS

Źródło: *Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard, 1st Edition, United States of America Department of Defense, February 2007, s. 23.*

Rozwiązanie tradycyjne stosowane do początku XXI wieku w odbiornikach wojskowych PPS polegało na konieczności śledzenia sygnałów C/A, które dzięki informacji zawartej w depeszy nawigacyjnej umożliwiało uzyskanie śledzenia sygnałów PPS — kodu P(Y) [5]. Oczywiście koniecznym warunkiem było posiadanie tzw. kluczy kryptograficznych przez odbiornik PPS. Przy braku sygnałów C/A armia USA pozbawiona była możliwości wykorzystania sygnałów PPS, co skutkowało brakiem możliwości wykorzystania precyzyjnie sterowanego uzbrojenia. Należało więc przystąpić do skonstruowania odbiorników PPS, które bezpośrednio, z pominięciem sygnałów C/A, uzyskiwałyby synchronizację z kodami wojskowymi (P/Y).

Rozwiązaniem tego problemu było wprowadzenie tajnych sprzętowych kluczy kryptograficznych o ściśle ograniczonej dystrybucji. Należy podkreślić, iż zagadnienie kontroli ich dystrybucji uznano za problem szczególnej rangi, bowiem nie jest wykluczone, że mogłyby trafić w niepowołane ręce i niewłaściwie wykorzystane stanowić przez pewien okres zagrożenie [1]. Nowe, zastosowane od początku XXI wieku rozwiązanie opiera się na wprowadzeniu nowego typu odbiorników, tzw. modułów SAASM (*Selective Availability Anti-Spoofing Module*) umożliwiających pominięcie konieczności synchronizacji sygnałów PPS w oparciu o uprzedni odbiór sygnałów SPS (rys. 3.). W ten sposób dzięki nowatorskim rozwiązaniom

sprzętowo-programowym odbiorniki PPS mają możliwość bezpośredniej synchronizacji z kodem P(Y).



Rys. 3. Odbiornik SAASM EGR-2500™ firmy ITT Exelis

Źródło: materiał reklamowy firmy ITT Exelis.

Proces produkcji oraz dystrybucji odbiorników SAASM podlega ściślemu nadzorowi przez Departament Obrony USA. Po wykonaniu modułu odbiornik SAASM przesyłany jest do niejawnego ośrodka celem uzupełnienia o oprogramowanie kryptograficzne (*Key Data Processor* — KDP) [1]. W dalszej kolejności wraca on do producenta i poddawany jest produkcyjnym testom odbiorczym. O dystrybucji modułów do użytkowników końcowych decyduje Połączone Biuro Projektu GPS (*Join Program Office* — JPO). Pozyskanie takiego odbiornika wymaga zaliczenia danego państwa do grupy sojuszniczej (militarnej) Stanów Zjednoczonych określonego (wysokiego) poziomu.

Odbiorniki SAASM wykorzystują dwa typy kluczy kryptograficznych umożliwiających detekcję „przekłamanych sygnałów GPS” oraz usuwanie selektywnej dostępności [4]. Dodatkowego wyjaśnienia wymaga użycie nietechnicznego terminu „przekłamanych sygnałów GPS”. Zauważmy, że GPS jako system militarny stosowany jest w systemach uzbrojenia wykorzystywanych w konfliktach zbrojnych do sterowania pociskami, nawigacji samolotów bojowych, okrętów, wozów bojowych. Ponadto dostarcza on sygnałów synchronizacyjnych dla systemów łączności wojskowej i rozpoznania (swój-obcy). Z tego względu istnieje uzasadniona obawa, że strona przeciwna podejmie działania zmierzające do wprowadzenia w błąd, przekłamania lub zakłócenia sygnałów PPS.

ZAKOŃCZENIE

W artykule zaprezentowano:

1. Wybrane charakterystyki nawigacyjne serwisu PPS odniesione do dokładności wyznaczenia pseudoodległości.
2. Omówiono istotę modułów SAASM jako nowego podejścia do wykorzystania sygnałów GPS w ramach serwisu PPS.
3. Zaprezentowano wybrane aplikacje modułów SAASM.

Artykuł przygotowano pod nadzorem merytorycznym profesora C. Spechta.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Callaghan S., Fruehauf H., *SAASM and Direct P(Y) Signal Acquisition*, 'The Journal of Defense Software Engineering', June 2003.
- [2] *Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard 1st Edition*, United States of America Department of Defense, February 2007.
- [3] *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard 4th Edition*, United States of America Department of Defense, September 2008.
- [4] Holm R., *Why convert to a SAASM-based Global Positioning System? Military Embedded Systems*, July 2006.
- [5] Specht C., *System GPS*, seria Biblioteka Nawigacji, Bernardinum, Pelplin 2007.
- [6] *Statement by the President regarding the United States decision on the Global Positioning System accuracy*, Office of the Press Secretary, White House Press Release, 1 May 2000.

THE MILITARY GPS RECEIVERS WITH SAASM — PROBLEM INTRODUCTION

ABSTRACT

In 2008 the United States Department of Defense published a document about *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard* in which there are the requirements in terms of accuracy, availability, reliability, trustworthiness and coverage of the military GPS service (*Precise Positioning Service — PPS*). Current receivers of this service had to track the synchronization with the civilian GPS service (*Standard Positioning Service — SSP*) in order to make precise distance measurements. At the beginning of the 21st century there was elaborated a new method to synchronize signals of PPS excluding SPS hence they appeared new receivers (*Selective Availability Anti-spoofing Module — SAASM*) which perform this function. In the article there were presented the navigational requirements for PPS service and there were submitted the introduction to solutions of SAASM modules used in military applications.

Keywords:

Precise Positioning Service, Standard Positioning Service, SAASM.