

Konsekwencje wydarzenia „GPS week number rollover” w synchronizacji czasu na potrzeby gospodarki i społeczeństwa oraz w metrologii czasu i częstotliwości

The consequences of the “GPS week number rollover” event in synchronization of time for the needs of economy and society, and for time and frequency metrology

Maciej Gruszczyński, Albin Czubla (Główny Urząd Miar),
Marcin Szołucha (Wojskowa Akademia Techniczna)

W nocy z 6 na 7 kwietnia 2019 r. (z soboty na niedzielę), o godz. 2:00 czasu urzędowego nastąpiło wyzerowanie się 10-bitowego licznika numerów tygodni (przepełnienie licznika), wysyłanego w depeszy nawigacyjnej przez satelity systemu nawigacji satelitarnej GPS (Global Positioning System). Oznacza to, że po numerze tygodnia „1023” (2 do potęgi 10 minus 1), liczonego w systemie GPS w sposób ciągły od daty 22 sierpnia 1999 r., nastąpił numer „0”, który odpowiada pierwszemu tygodniowi liczonemu już od daty 7 kwietnia 2019 r. Zdarzenie takie, nazywane „GPS week number rollover”, wywoływało pewne obawy wśród przedstawicieli branży związanej z synchronizacją czasu i częstotliwości. W pewnym stopniu potwierdziły się one w rzeczywistości.

At the night from 6 to 7 April 2019 at 2:00 am (UTC), the GPS (Global Positioning System) experienced a 10-bits week counter roll over to zero (data storage overflow). This counter is included in the satellite-transmitted navigation message. In view of the above, week number “1023” (2 to the power of 10 minus 1), calculated in the GPS system continuously from 22 August 1999, is followed by the number “0”, which corresponds to the first week counted from 7 April 2019. This event is called “GPS week number rollover” and was preceded by concerns manifested among representatives of the industry associated time and frequency synchronization. Some of these fears were confirmed in reality.

Słowa kluczowe: metrologia czasu i częstotliwości, nawigacja satelitarna, synchronizacja, skale czasu.

Keywords: time and frequency metrology, satellite navigation, synchronization, timescales.

Wykorzystanie GPS na potrzeby synchronizacji czasu

System GPS wykorzystywany jest nie tylko do wyznaczania współrzędnych urządzenia odbiorczego (pozycjonowanie), ale także do synchronizacji czasu elektronicznych urządzeń, używanych jako element bardziej lub mniej złożonego systemu, wykorzystywanego przez tzw. użytkowników końcowych (end-users) systemów GNSS (Global Navigation Satellite System). Źródła częstotliwości dyscyplinowane sygnałem GPS (GPS disciplined oscillator – GPSDO) osiągają dokładność i długookresową stałość częstotliwości na poziomie 10^{-12} wartości względnej. Na każdym z satelitów GNSS znajdują się zwykle min. 3 atomowe wzorce częstotliwości przystosowane do pracy w warunkach kosmicznych, które są głównym podzespołem systemu generowania podstawowej częstotliwości fali nośnej i systemu generowania kodów nawigacyjnych. Dane telemetryczne pracy zegarów oraz częstotliwość fali nośnej są nieprzerwanie monitorowane przez

segment naziemny/kontrolny systemów GNSS, na który składa się od kilku do kilkudziesięciu stacji monitorujących. Sygnały generowane na podstawie pracy zegarów satelitów są dodatkowo obserwowane przez liczne stacje permanentne GNSS, pracujące w ramach serwisów formalnie niezależnych od danego systemu GNSS. Serwisy te wyznaczają indywidualnie dla każdego z satelitów m.in. korekty zegarów, uwzględniające dryf częstotliwości i jego zmianę, które mogą być zaimplementowane na potrzeby precyzyjnego pozycjonowania i synchronizacji czasu.

Skalą czasu, w jakiej wyznaczane są korekty zegarów amerykańskiego systemu nawigacyjnego, jest tzw. czas GPS, powiązany z lokalną realizacją skali czasu UTC, generowaną i utrzymywaną przez Obserwatorium [Astronomiczne] Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych (United States Naval Observatory) – UTC(USNO). Skala czasu GPS jest skalą ciągłą, co oznacza, że nie są wprowadzane do niej sekundy przestępne (charakteryzuje się rozbieżnością względem UTC o pewną

całkowitą liczbę sekund). Niemniej jednak, w depezbach nawigacyjnych GPS zakodowana jest informacja o aktualnej rozbieżności (integer-second offset) względem UTC(USNO) i zapowiedzi nadchodzących zmian związanych z sekundą przestępną. W efekcie układ zegara dyscyplinowanego sygnałem GPS może na wyjściu podawać sygnał, który będzie reprezentował skalę czasu UTC.

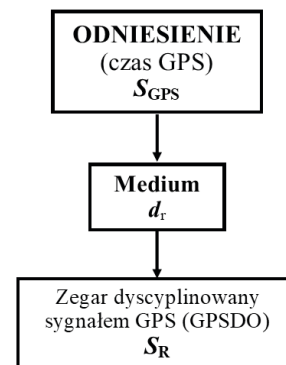
Opisana wyżej charakterystyka zegarów satelitów GNSS i sposób nadzorowania stabilności ich pracy i wyznaczania korekt do częstotliwości wpływa na zachowanie długookresowej stabilności, co przekłada się na możliwość wykorzystania satelitów nawigacyjnych nie tylko na potrzeby synchronizacji urządzeń stosowanych w gospodarce i życiu codziennym, ale także w metrologii czasu. Krajowe laboratoria czasu wykorzystują systemy GNSS do zdalnych krajowych i międzynarodowych porównań atomowych wzorców częstotliwości, odpowiedzialnych za tworzenie i utrzymywanie lokalnych realizacji uniwersalnego czasu koordynowanego UTC(k). Najnowsze algorytmy (metoda iPPP – integer Precise Point Positioning) opracowane na potrzeby transferu częstotliwości z wykorzystaniem obserwacji GNSS pozwalają na osiągnięcie stabilności rzędu 10^{-16} wartości względnej. Podczas, gdy dystrybucja czasu i częstotliwości z użyciem typowych odbiorników sygnałów GNSS, wykorzystywanych przez użytkowników końcowych, jest transferem czasu metodą jednokierunkową (one-way time transfer) – rys. 1a, to procedury zdalnych porównań wzorców atomowych opierają się na metodach obserwacji sygnałów satelitów w tych samych przedziałach czasu: widocznych nad dwoma laboratoriami jednocześnie (Common View) – obserwacje symultaniczne (rys. 1b) wszystkich satelitów widocznych rozdzielnie nad pierwszym i drugim laboratorium (All in View oraz PPP). W pierwszym z wymienionych wcześniej przypadków (rys. 1a), czas dystrybuowany przez GPS i uzyskiwany na wyjściu GPSDO jest wprawdzie powiązany ze skalą czasu UTC, ale proces dystrybucji sygnałów czasu, odbioru i dekodowania uniemożliwia użytkownikowi końcowemu wykazanie nieprzerwanego łańcucha porównań, z których wszystkie mają określone niepewności. Co za tym idzie, wykorzystanie odbiorników GPS do synchronizacji czasu bezpośrednio (samoistnie) nie zapewnia spójności pomiarowej. Uproszczony sposób wyznaczenia czasu odbiornika (rys. 1a) można zapisać w postaci:

$$S_R = S_{GPS} - d_r + d_{r(mod)} \quad (1)$$

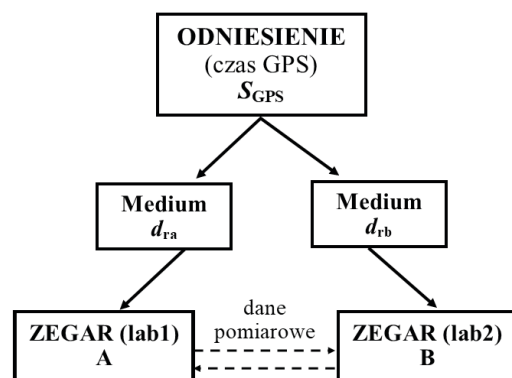
gdzie:

S_R – skala czasu odtwarzana przez odbiornik GPS,
 S_{GPS} – skala czasu realizowana na satelitach systemu GPS,
 d_r – rzeczywisty czas propagacji i przetwarzania sygnału,
 $d_{r(mod)}$ – czas propagacji i przetwarzania sygnału wg modelu przyjętego przez odbiornik.

- a) transfer czasu metodą jednokierunkową (synchronizacja odbiorników)



- b) transfer czasu metodą jednoczesnych obserwacji (metrologia czasu i częstotliwości)



Rys. 1. a) Transfer czasu metodą jednokierunkową (One Way Time Transfer) na przykładzie wykorzystania GPS do synchronizacji z czasem UTC, w typowych zastosowaniach, b) transfer czasu metodą obserwacji jednoczesnych (Common View) stosowany w metrologii czasu i częstotliwości.

Na sumaryczny błąd czasu wyznaczanego przez odbiornik GPS składają się błędy realizacji czasu systemowego GPS na poszczególnych satelitach oraz różnice pomiędzy rzeczywistym a modelowanym przez odbiornik czasem propagacji sygnałów od poszczególnych satelitów do anteny odbiornika, w tym z opóźnieniami wewnętrznymi i czasem przetwarzania sygnałów.

W przypadku jednoczesnych obserwacji realizowanych przez laboratoria czasu z wykorzystaniem GPS, wyznaczone są różnice czasu odmierzanego przez lokalny zegar i czasu GPS (rys. 1b):

$$Z_A - (S_{GPS} - d_{ra} + d_{ra(mod)}) \quad Z_B - (S_{GPS} - d_{rb} + d_{rb(mod)}) \quad (2)$$

gdzie:

Z_A i Z_B – wskazania zegara A i zegara B obserwowane jednocześnie,

d_{ra} , $d_{ra(mod)}$, d_{rb} , $d_{rb(mod)}$ – rzeczywiste i modelowane przez odbiorniki czasy propagacji i przetwarzania sygnału w obu laboratoriach.

Poprzez wymianę danych z obserwacji symultanicznych między laboratoriami i dokonanie prostych działań

algebraicznych (odejmowania), różnica czasu zegarów (A-B), znajdujących się w dwóch laboratoriach, może zostać zapisana w następujący sposób:

$$Z_A - Z_B + (S_{GPS} - S_{GPS}) + (d_{ra} - d_{ra(mod)}) - (d_{rb} - d_{rb(mod)}) \quad (3)$$

Przy czym różnica czasu systemowego GPS realizowanego przez tego samego satelitę (obserwowanego w tym samym krótkim przedziale czasu) zeruje się, a także można przyjąć, iż dla obszarów stosowalności metody Common View wartości błędów modeli $d_{ra(mod)}$ oraz $d_{rb(mod)}$ są w przybliżeniu jednakowe.

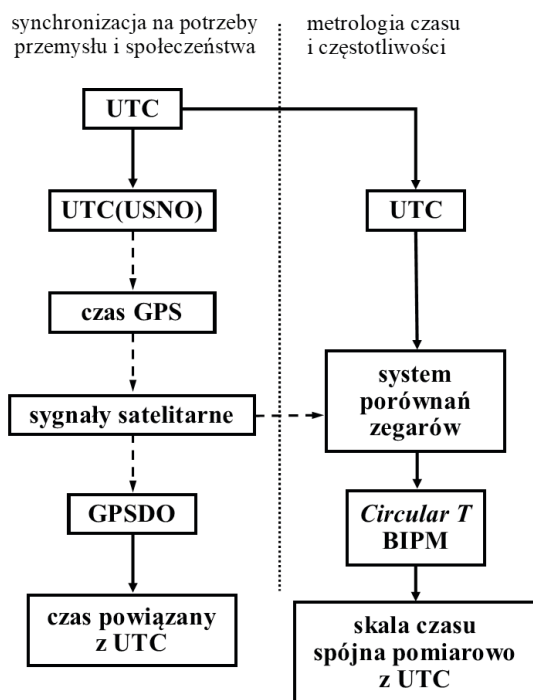
Na schemacie przedstawionym na rys. 2 po lewej stronie zobrazowany został proces generowania przez GPSDO znaczników czasu powiązanych z UTC. Linia przerywana przedstawiono etapy, dla których bardzo trudne lub niemożliwe jest, dla zewnętrznego użytkownika, określenie niepewności pomiarowej, a co za tym idzie nieosiągalne jest wykazanie spójności pomiarowej. Inaczej jest w przypadku transferu czasu z wykorzystaniem systemów GNSS na potrzeby metrologii czasu. W tym zastosowaniu różnica czasu między dwoma zegarami A i B (rys. 1b) wyznaczana jest poprzez jednoczesne obserwacje trzeciego zegara (czasu GPS), znajdującego się na satelicie, przez co porównanie skali czasu wyznaczonej przez lokalny zegar do czasu GPS staje się tylko środkiem do osiągnięcia celu, tj. zdalnego porównania skal czasu wyznaczanych przez dwa atomowe wzorce

częstotliwości. Na podstawie wzoru (3) widać, że porównanie danych „Common View” pozwala na wyeliminowanie wpływu „niedoskonałości” dystrybuowanego czasu GPS i opóźnień propagacji na wynik porównania.

Poprzez fakt, iż satelity GPS dystrybuują dostępny globalnie sygnał zawierający dokładną informację o czasie powiązonym z UTC, odtworzenie uniwersalnego czasu koordynowanego jest stosunkowo łatwe i tanie (mając na uwadze zaistniały w ostatnich latach rozwój technologii odbiorników). Co za tym idzie rozwiązania ICT (Information and Communication Technologies) stały się bardziej zależne od sygnałów GPS. Odbiorniki GPS, które umożliwiają wygenerowanie precyzyjnego znacznika czasu, stanowią element składowy złożonych systemów i obiektów, często wpisujących się w definicję infrastruktury krytycznej. Na rynku dostępne są obecnie niskokosztowe płytki deweloperskie z wbudowanym odbiornikiem GNSS, które umożliwiają implementację stabilnego wzorca częstotliwości w dowolnym rozwiązaniu systemowym. Mając na uwadze fakt, że działanie złożonego systemu (np. nawigowania i sterowania lotem samolotu pasażerskiego) zależne jest od wielu podzespołów dostarczanych przez różnych podwykonawców, często końcowy integrator (dystrybutor kompletnego systemu) posiada nie w pełni kompletną wiedzę na temat sposobu obsługi przez poszczególne podzespoły różnych nietypowych zdarzeń, wpływających niekorzystnie na działanie systemu. Przykładem takiego zdarzenia jest „GPS week number rollover” (w dalszej części artykułu „GPS rollover”), którego efekty widoczne były w zastosowaniach GPS w przemyśle i społeczeństwie oraz mogły zaistnieć w rozwiązaniach metrologicznych.

„GPS week number rollover” w teorii

Pomiary czasu są związane z koniecznością ich odniesienia do pewnych określonych zjawisk cyklicznych, powtarzalnych. System liczb, w którym ich sekwencja powtarza się po osiągnięciu pewnej wartości granicznej, nazywa się arytmetyką modularną lub arytmetyką reszt. Przykładem zastosowania arytmetyki modularnej jest używany przez nas kalendarz, w którym odmierzenie dni „zeruje się” po 365 dniach (lub 366 w przypadku roku przestępnego), a także odczyty wskazań zegara 12-godzinnego, gdzie zerowanie odbywa się po 12 godzinach. Można wyobrazić sobie sytuację, w której użytkownik analogowego zegarka z 12-godzinnym cyferblatem nie posiadałby żadnej dodatkowej informacji o bieżącej porze dnia (np. długotrwałe przebywanie w pomieszczeniu całkowicie odciętym od światła dziennego), lub o dniu tygodnia czy dacie (brak dodatkowego licznika – np. kalendarza). Pomimo, iż zegarek użytkownika byłby bardzo odkładany, co pozwoliłoby na pomiar upływu czasu zgodnie



Rys. 2. Proces dystrybuowania czasu z wykorzystaniem GPS: z lewej strony – wykorzystanie GPSDO w przemyśle i społeczeństwie, a z prawej strony – wykorzystanie dedykowanych odbiorników do transferu czasu w metrologii.

z arytmetyką liczb całkowitych, to jednokrotny odczyt wskazań zegara zgodnie z arytmetyką modularną nie pozwoliłby na jednoznaczne oznaczenie aktualnego momentu na skali czasu. Użytkownik zegarka byłby jedynie poinformowany o liczbie godzin i minut, które upłynęły od godziny 0:00, natomiast nie wiedziałby czy odczyt wskazania zegara „4:30” oznacza godzinę wpół do piątej rano czy trzydzieści minut po szesnastej, nie mówiąc o braku wiedzy na temat aktualnego dnia tygodnia czy roku.

W amerykańskim systemie GPS, podobnie jak w innych globalnych systemach nawigacji satelitarnej, do odmierzenia czasu używana jest również arytmetyka modularna. Satelity GPS obliczają i dystrybuują czas w unikalny sposób, wynikający z metody generowania kodów transmisyjnych złożonych z sekwencji zero-jedynkowych, czyli tzw. kodów (ciągów) pseudolosowych (Pseudorandom Noise – PRN).

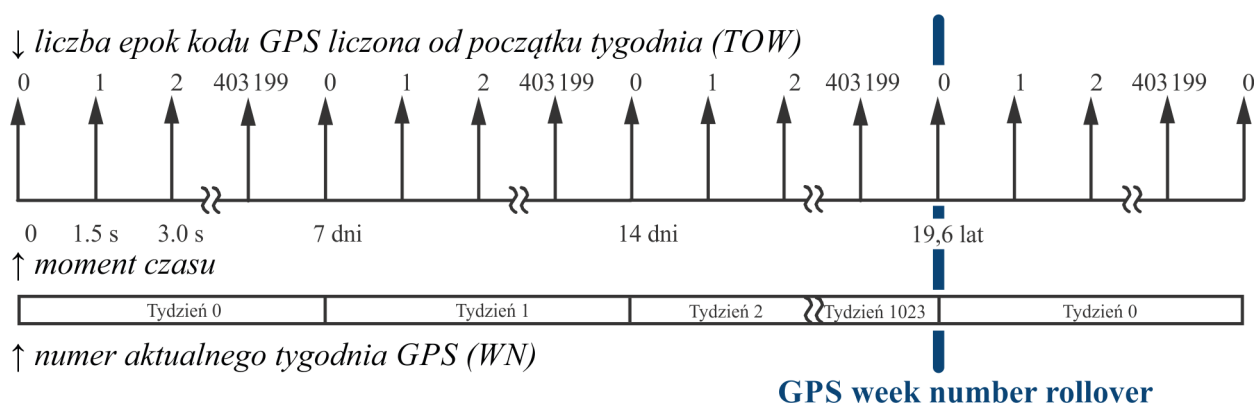
Dane nawigacyjne GPS, transmitowane w sekwencjach kodu, odnoszone są do podstawowej jednostki czasu systemu – „licznika Z” (pełny licznik Z zawiera łącznie 29 bitów). Na ten licznik składają się dwa fragmenty depeszy GPS wysyłanej z satelitów.

Liczba epok, które upłynęły od początku bieżącego tygodnia (Time of Week – TOW) transmitowana jest w formie 19-bitowego (w pełnej postaci) ciągu kodu. Licznik ten zeruje się co tydzień (wraz z zerowaniem kodu P), zawsze o północy z soboty na niedzielę i zawiera się w przedziale liczb całkowitych od 0 do 403 199. W systemie GPS epoka oznacza 1,5 sekundy, co jest pochodną szybkości generatora kodu X1 równej 10,23 MHz i liczby bitów kodu potrzebnych do utworzenia transmitowanego PRN (rys. 3). Dziesięć najbardziej znaczących bitów licznika Z określa numer aktualnego tygodnia GPS (Week Number – WN). Przeznaczona w depeszy nawigacyjnej ilość informacji, potrzebna do określenia numeru tygodnia, pozwala wyliczyć, iż największą możliwą wartością tej zmiennej jest 1023 ($2^{10}-1$). Po tej wartości licznik

tygodni GPS zeruje się. Oznacza to, że od początku obliczania czasu systemu GPS, a więc od północy z 5 na 6 stycznia 1980 r., czas GPS wyznaczany jest konsekwentnie w ok. 19,6-letnich cyklach, wywodzących się ze sposobu oznaczania epok obserwacji. Depesza nawigacyjna transmitowana przez satelity GPS nie posiada dodatkowej informacji o cyklu wyznaczenia numeru tygodnia lub o aktualnym roku.

Moment zerowania się numeru aktualnego tygodnia (zerowanie całego licznika Z) jest właśnie określane mianem „GPS week number rollover”. Takie wydarzenie w systemie GPS już miało okazję zaistnieć dwa razy: w nocy z 21 na 22 sierpnia 1999 r. oraz w nocy z 6 na 7 kwietnia 2019 r. Rozwój technologii i uzależnianie się od technik satelitarnych spowodowały, że GPS rollover z roku 2019 wiązał się z większymi konsekwencjami niż w 1999 r.

Podczas, gdy w wysyłanej przez satelity GPS depeszy nawigacyjnej nie ma dodatkowej informacji o aktualnym cyklu zliczania tygodni lub o roku kalendarzowym, odbiornik powinien posiadać dodatkową, wprowadzoną „spoza” systemu informację o pełnej dacie. Taką informację można pozyskać z zegara czasu rzeczywistego, pracującego na zapasowym źródle zasilania. Częstym jest również użycie, jako odniesienia, daty zapisanej w tzw. pamięci nieulotnej urządzenia (np. EEPROM, pamięć flash), która może być aktualizowana podczas właściwej pracy urządzenia. Wtedy, jeśli data referencyjna przechowywana w pamięci nie jest późniejsza niż jeden pełny cykl zliczania tygodni GPS, odbiornik powinien poprawnie uznać, że wyznaczana na podstawie sygnałów satelitarnych data nie może być wcześniejsza niż ostatnia zapisana w pamięci nieulotnej urządzenia. Problemy mogą pojawić się w przypadku pełnego kasowania pamięci urządzenia. Trzecim wariantem obsługi GPS rollover (obok zegara czasu rzeczywistego i wykorzystania pamięci nieulotnej) jest możliwość pozyskiwania przez odbiornik lub system, w którym wykorzystywane są sygnały GPS, wiarygodnej



Rys. 3. Odmierzanie czasu w systemie GPS (zmodyfikowano na podstawie publikacji [4])

informacji o czasie z niezależnego źródła, np. serwerów NTP, PTP lub z innych źródeł.

Jeżeli odbiornik nie posiada żadnego z wymienionych wcześniej zabezpieczeń, odniesieniem do wyznaczania niewiadomej liczby cykli obliczania numerów tygodni GPS może być zakodowana w oprogramowaniu sprzętowym odbiornika dodatkowa wewnętrzna data (nie późniejsza niż epoka powstania i kompilacji oprogramowania), opóźniająca moment wystąpienia efektu GPS rollover. Data ta może być aktualizowana w ramach instalacji aktualizacji oprogramowania. Jednak w tym przypadku odbiornik nie może poprawnie określić liczby cykli odliczania tygodni GPS, jeśli różnica między wprowadzoną datą odniesienia (ostatnią aktualizacją) a bieżącą datą wynosi 19,6 roku. Sposób obsługi GPS rollover, polegający na wyznaczeniu liczby pełnych cykli liczenia tygodni w odniesieniu do ostatniej daty zapisanej w urządzeniu (odniesienie do daty upgrade'u oprogramowania lub daty ostatniej poprawnej inicjalizacji), implikuje problem występowania efektów GPS rollover, nie tylko w momencie zerowania się licznika tygodni GPS, ale w dowolnym momencie pomiędzy zerowaniami się licznika.

„GPS week number rollover” w praktyce

Na podstawie analizy zdarzeń, które nastąpiły po 7 kwietnia 2019 r. oraz w wyniku przeprowadzonego rozpoznania przez pracowników Samodzielnego Laboratorium Czasu i Częstotliwości GUM kwestii technicznych, związanych z obsługą GPS rollover, w niniejszym rozdziale podsumowano spostrzeżenia istotne z punktu widzenia użytkowników urządzeń, które informację o czasie pozyskują z systemu GPS:

- za poprawną obsługę GPS rollover odpowiedzialne jest oprogramowanie sprzętowe (firmware) odbiornika GPS, w tym kontekście istotna jest informacja czy odbiornik pozyskuje/wykorzystuje niezależną od GPS wiarygodną informację o aktualnej dacie;
- w okresie poprzedzającym i następującym po zerowaniu się licznika Z, wielu producentów i dystrybutorów sprzętu odbierającego sygnały GPS udostępnia w różnej formie (przeważnie na stronach internetowych) informacje o obsłudze GPS rollover, wraz z instrukcjami postępowania, w zależności od posiadanego typu urządzenia;
- negatywny wpływ GPS rollover na urządzenia, wykorzystujące sygnały GPS do pozycjonowania oraz/lub nawigacji, nie powinien być (zasadniczo) odnotowany, natomiast operatorzy/użytkownicy urządzeń synchronizujących czas z czasem GPS powinni zwrócić szczególną uwagę na ten problem;
- znikomym prawdopodobieństwem wystąpienia błędu charakteryzują się odbiorniki wielosystemowe

(wykorzystujące sygnały GPS razem z Galileo, GLONASS, BeiDou);

- na większe prawdopodobieństwo wystąpienia błędu narażone są odbiorniki dawno wprowadzone na rynek lub takie, które nie były przez długi czas poddawane aktualizacji oprogramowania (w okresie kilkunastu lat);
- większe ryzyko wystąpienia problemu związanego z obsługą GPS rollover istnieje też wśród odbiorników, które zostały oprogramowane indywidualnie, z użyciem dostępnych na rynku chipsetów GPS OEM (Original Equipment Manufacturer);
- niektóre odbiorniki uzależniają prawidłowe oznaczenie czasu od daty utworzenia oprogramowania sprzętowego lub daty ostatniej aktualizacji – w takich przypadkach efekt GPS rollover może być zauważony niekoniecznie w momencie zerowania się licznika tygodni GPS;
- odbiorniki GPS i oprogramowanie dostarczone przez producentów, którzy stosują się m.in. do specyfikacji IS-GPS-200 [1], nie powinny być narażone na negatywny wpływ GPS rollover.

Departament Bezpieczeństwa Krajowego Stanów Zjednoczonych (US Department of Homeland Security) opublikował w 2018 r. dokument, stanowiący memorandum dla użytkowników wykorzystujących GPS do pozyskania informacji o czasie UTC [2]. W tym dokumencie podane zostały rekomendacje dla użytkowników GPS, odnoszące się do GPS rollover, które wskazują na konieczność:

- rozpoznania i ustalenia możliwych powiązań pomiędzy odbiorem sygnałów GPS i wykorzystaniem ich do celów synchronizacji czasu, szczególnie w przypadku operatorów/zarządzających infrastrukturą krytyczną;
- skontaktowania się z producentami posiadanych odbiorników GPS w celu:
 - określenia stopnia przystosowania posiadanych urządzeń do obsługi GPS rollover,
 - rozpoznania wymaganych działań, które powinien podjąć użytkownik/operator, żeby zapobiec ewentualnym błędom związanym z GPS rollover,
 - upewnienia się, że oprogramowanie sprzętowe odbiorników GPS jest aktualne.

W kontekście przedmiotowego wydarzenia najważniejsze zatem jest zaktualizowanie oprogramowania sprzętowego w posiadanych odbiornikach/systemach oraz kontakt z producentem lub sprawdzenie informacji na ten temat na jego stronie internetowej. Sposobem na pełne rozpoznanie zależności informacji o czasie, pozyskiwanej z odbiornika GPS od wydarzenia GPS rollover, jest

wykorzystanie symulatora sygnałów GNSS [3]. Niemniej jednak może to być uciążliwe, gdyż w Polsce takie symulatory nie są powszechne, a w przypadkach systemów bardziej złożonych, rozproszonych, czy działających w trybie ciągłym jest to bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Mając na uwadze powyższe, użycie symulatora GNSS może być traktowane jako ostateczność w przypadku braku pewności, co do ewentualności zaistnienia problemu, który mógłby wyrządzić szkody materialne oraz/ lub utratę zdrowia bądź życia ludzkiego.

Czas urzędowy i serwery czasu urzędowego: tempus1.gum.gov.pl i tempus2.gum.gov.pl są odporne na GPS rollover. Serwery NTP GUM, umożliwiające synchronizację czasu w systemach komputerowych z czasem urzędowym obowiązującym w Polsce, pozyskują znacznik czasu w sposób zabezpieczony przed wpływem zdarzenia GPS rollover. Również inne systemy pomiarowe Samodzielnego Laboratorium Czasu i Częstotliwości GUM, które m.in. wykorzystują sygnały systemu GPS do międzynarodowych porównań skal czasu, a więc pośrednio do generowania i utrzymania państwowej skali czasu UTC(PL) i czasu urzędowego, są odporne na zdarzenie GPS rollover. Status prawidłowego, względem poprawnej obsługi GPS rollover zabezpieczenia, posiadanych przez GUM odbiorników i systemów, został w I kwartale 2019 r. zweryfikowany przez pracowników Laboratorium. We współpracy z Wydziałem Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej, z wykorzystaniem symulatora sygnałów GNSS, zostały również wykonane dodatkowe niezależne analizy scenariuszy, obejmujących możliwe konsekwencje spowodowane GPS rollover (rys. 4).

„GPS week number rollover” w rzeczywistości

Wydarzenie GPS rollover z 6 kwietnia 2019 r. pozwoliło doświadczyć, jak bardzo funkcjonowanie gospodarki i życie codzienne każdego z nas jest zależne od nowoczesnych rozwiązań technologicznych, technik satelitarnych, kosmosu. Europejska Agencja ds. GNSS (GSA – European Global Navigation Satellite Systems Agency) szacuje, że tylko w obszarze profesjonalnych zastosowań urządzeń GNSS do synchronizacji czasu (telekomunikacja, energetyka, bankowość i finanse), funkcjonujących jednostek (odbiorników GNSS) było w 2019 r. ok. 2 mln w skali globalnej. Liczba ta ma wzrosnąć do prawie 3 milionów do roku 2029 [5]. Błędy związane z problematyczną obsługą GPS rollover, w zastosowaniach uznawanych powszechnie za nieprofesjonalne (np. synchronizacja czasu w automatycznych systemach sterowania, informowania o czasie lub znakowania czasem) mogą również przysporzyć wiele strat w skali globalnej, a liczba urządzeń

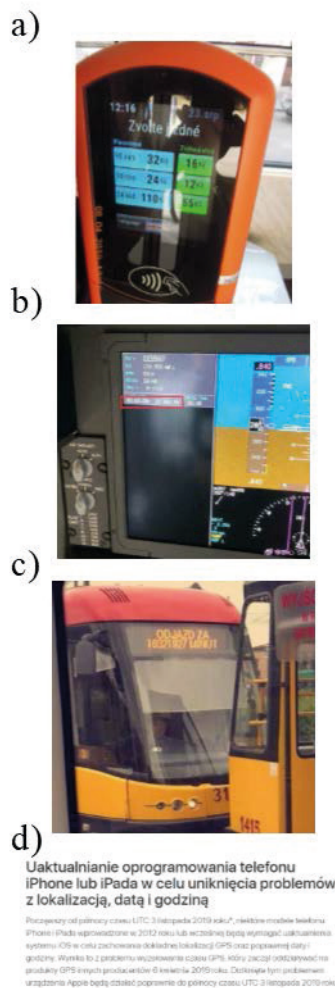


Rys. 4. Analiza scenariuszy obejmujących najbliższy GPS rollover, z wykorzystaniem symulatora sygnałów GNSS

pracujących w służbie „nieprofesjonalnych” zastosowań synchronizacji czasu GNSS w skali globalnej prawdopodobnie przewyższa liczbę 3 mln jednostek. Warto w tym miejscu nadmienić, iż pomimo uruchomienia pełnej operatywności GPS w roku 1995, dopiero wyłączenie w maju 2000 r. systemowego mechanizmu zakłócania sygnału pseudolosowym błędem (Selective Availability) wpłynęło na możliwość cywilnego wykorzystania pełni funkcjonalności systemu GPS. Wyłączenie mechanizmu zakłócania zbiegło się z dynamicznym rozwojem, miniaturyzacją i redukcją kosztów produkcji elektronicznych układów odbiorczych sygnału GPS. Wymienione wyżej czynniki przyczyniły się do dynamicznego wzrostu liczby odbiorników na rynku, w tym odbiorników wykorzystywanych do synchronizacji czasu. Należy zatem przyjąć, że w momencie pierwszego GPS rollover w 1999 r., zależność cywilnych rozwiązań IT i ICT była znacznie mniejsza od sygnałów GNSS, niż ma to miejsce aktualnie.

W sferze domniemywań pozostają powody prowadzące do sytuacji, w której trudno jest obecnie pozyskać dokumentację przypadków nieprawidłowej obsługi GPS rollover, chociaż w mediach i w ramach pracy metrologów Samodzielnego Laboratorium Czasu i Częstotliwości kilka efektów tego zdarzenia zostało potwierdzonych. Podsumowanie zawarto na zamieszczonych zdjęciach (rys. 5).

Technologie użytkowane w życiu codziennym, jak np. systemy inteligentnego zarządzania miastem (Smart City), są zależne od dostępu do wiarygodnego źródła czasu, który można przyjąć za skalę czasu odniesienia (w przypadku GPS – skala czasu UTC). Taka potrzeba istnieje w systemach i urządzeniach automatycznej dystrybucji biletów w strefach miejskiego parkowania, czy systemów sprzedaży i walidowania biletów komunikacji miejskiej. Rys. 5a przedstawia biletomat z czeskiej Pragi, który 8 kwietnia 2019 r. wyświetlał i drukował na wydawanych biletach datę wcześniejszą o 1024 tygodnie. Na rys. 5b pokazany jest jeden z ekranów kokpitu nowoczesnego samolotu pasażerskiego, który aktualnie jest w posiadaniu wielu dużych linii lotniczych, wskazujący „aktualną” datę wcześniejszą o ponad 10 lat od dnia



Rys. 5. Przykłady konsekwencji związanych ze zdarzeniem GPS rollover z roku 2019: a) biletomat w czeskiej Pradze, prezentujący na wyświetlaczu i drukujący na wydawanych biletach datę wcześniejszą o 19,6 lat od aktualnej daty (źródło: wikipedia.org), b) jeden z ekranów kokpitu pasażerskiego samolotu transatlantyckiego wskazujący „aktualną” datę wcześniejszą o 19,6 lat od daty aktualnej (źródło: Twitter – @ChinaAvReview), c) tramwaj warszawski wyświetlający czas oczekiwania na odjazd z przystanku równy w przeliczeniu 19,6 lat (źródło: joemonster.com), d) komunikat ze strony producenta smartfonów, mówiący o problemach GPS rollover, które mogą wystąpić 3.11.2019 r. (źródło: support.apple.com)

pierwszego oblotu tego samolotu i wcześniejszą o 1024 tygodnie od rzeczywistej daty aktualnej. W wyniku tego „defektu” kilkanaście maszyn zostało sprowadzonych na ziemię, a wiele lotów zostało opóźnionych lub odwołanych. Rys. 5c przedstawia zdjęcie warszawskiego tramwaju wykonane 7 kwietnia 2019 r. w godzinach porannych. Przedni wyświetlacz tramwaju pokazuje czas oczekiwania na odjazd z przystanku równy 10 321 927 minut, co w przeliczeniu daje 1024 tygodnie i 7 minut. Zrzut ekranu zamieszczony w niniejszym artykule, jako rys. 5d, obejmuje komunikat działu obsługi technicznej jednego z dużych producentów smartfonów, którego celem jest ostrzeżenie użytkowników starszych modeli urządzeń przed problemami, które mogą dotyczyć lokalizacji, daty

i godziny. Nieprawidłowości związane są z wyzerowaniem czasu GPS. Zdaniem producenta, kłopoty zaczną się pojawiać 3 listopada 2019 r., a więc mamy tutaj przykład opóźnionego skutku GPS rollover.

Opóźniony skutek GPS rollover odnosi się do sytuacji, gdy w programie obsługującym dane urządzenie, czy serię urządzeń sterowanych sygnałem GPS, uwzględniono zerowanie się licznika tygodni Z tylko do określonego momentu granicznego, zakładając że program powinien działać prawidłowo, zarówno przed wyzerowaniem się licznika Z, jak i w pewnym okresie po tym zdarzeniu. Wówczas, do daty ustalonej w pamięci program prawidłowo rozpoznaje moment ostatniego zerowania się licznika tygodni, ale po tej dacie już nie. Jeśli jest to urządzenie, do którego aktualizacji hardware’u i software’u nie ma dostępu lub dostęp jest utrudniony, to bez pozyskiwania informacji o czasie z dodatkowych źródeł efektu GPS rollover można się spodziewać w dowolnym momencie w granicznym okresie do kolejnego wyzerowania się licznika Z. Znany jest autorom niniejszego artykułu przypadek wystąpienia efektu GPS rollover w czerwcu 2018 r., czyli na ok. 10 miesięcy przed datą 6 kwietnia 2019 r.

Oznaczanie czasu w systemach GNSS i inne problemy z odmierzeniem czasu

Tabela 1 przedstawia sposób znakowania czasu w depeszach nawigacyjnych trzech systemów GNSS-GPS, Galileo oraz GLONASS. Europejski system nawigacji satelitarnej Galileo, którego pełna operacyjność jest przewidywana na 2020 r., wykorzystuje licznik 12-bitowy na oznaczenie numeru tygodnia (mod 4096 – zerowanie co ok. 78 lat). Początek czasu Galileo został określony na godzinę 0:00 UT 22 sierpnia 1999 r., a więc zaraz po pierwszym GPS rollover. Poprzez ten zabieg zachowano konsekwencję w sposobie oznaczenia numerów tygodnia z systemem GPS. Program modernizacji systemu GPS zakłada uruchomienie w 2024 r. fazy pełnej operacyjności funkcjonowania nowych rodzajów depeszy nawigacyjnej „Civil Navigation (CNAV) Message”. Numer tygodnia w tej depeszy będzie zapisany na 13-bitowym polu (zerowanie co ok. 157 lat).

Zdarza się, że przedmiotowe wydarzenie porównywane jest w mediach do „problemu roku 2000” (tzw. pluskwy milenijnej). Podobnie, jak inne błędy, wynikające z przyjętego sposobu przechowywania i przetwarzania informacji o czasie i kolejności zdarzeń w systemach informatycznych, GPS rollover jest nieprzypadkowym efektem, wynikającym z architektury systemów nawigacji satelitarnej, powtarzającym się w przypadku GPS co ok. 19,6 roku. Poniżej wymieniono wybrane usterki systemów i programów informatycznych, związane z nie do końca poprawnie zaprojektowanym oznaczaniem czasu.

Tab. 1. Znaczniki czasu stosowane w kodach nawigacyjnych trzech systemów GNSS

Nazwa systemu	Nazwa znacznika czasu	Sygnal	Liczba bitów	Zakres	Jednostki	Nazwa i początek skali czasu systemu
GPS	WN	NAV	10	[0,1023]	tygodnie	czas GPS (GPST) synchr. z UTC(USNO) początek – 0h UTC 05-06.01.1980 r.
		CNAV	13	[0,8192]	tygodnie	
	TOW	C/NAV	17	[0,100799]	6 s	
Galileo	WN	INAV, FNAV	12	[0,4095]	tygodnie	czas systemowy Galileo (GST) synchr. z TAI początek – 0h UTC 21-22.08.1999 r.
	TOW	INAV, FNAV	20	[0,604799]	1 s	
GLONASS	N4		5	[1,31]	4 lata	czas GLONASS (GLONASST) synchr. z UTC(SU) konsekwentne wprowadzanie sekund przestępnych – brak jednoznacznego początku skali czasu
	NT		11	[0,1461]	dni	
	tk		5	[0,23]	godziny	
			6	[0,59]	minuty	
		1	[0,30]	sekundy		

Rok 1970 – w latach 60. XX wieku wiele programów było pisanych z wykorzystaniem jednej cyfry z zakresu 0-9, oznaczającej rok z przedziału 1960–1969. Ta przypadłość była w szczególności istotna dla użytkowników języka COBOL. Problem obsługi tego błędu został naprawiony przed rokiem 1970, stąd konsekwencje były niezauważalne.

Rok 2000 – dwucyfrowa reprezentacja roku w systemach informatycznych mogła powodować, iż rok 20XX dowolny program mógł zinterpretować jako 19XX. Problem analogiczny do tzw. błędu roku 1900, czyli zjawiska ujawniającego się w systemach obliczania lat życia ludzi urodzonych przed rokiem 2000 i datowania urodzin po roku 2000 (np. problem z oznaczaniem numerów PESEL).

Rok 2011 – oficjalnie w Tajwanie używa się kalendarza Minguo (kalendarz tradycyjny chiński), którego pierwszy rok jest równy z 1912 rokiem kalendarza gregoriańskiego, dlatego rok 2011 jest pierwszym rokiem, zapisywanym za pomocą trzech cyfr (rok 100).

Rok 2013 – sonda kosmiczna Deep Impact, wystrzelona przez NASA 12 stycznia 2005 r., utraciła łączność z naziemną stacją kontroli lotów. Pomimo, iż stan sondy i wyczerpujący się zapas paliwa pozwalały na skierowanie w stronę jednej z planetoid i wykonanie badań, do których mogłoby dojść w 2020 r., 8 sierpnia 2013 r. wykonano ostatnie połączenie z sondą. Po ogłoszeniu oficjalnych komunikatów NASA spekulowano, iż w oprogramowaniu użyto sposobu 32-bitowego oznaczania dziesiętnych części sekundy od daty 01.01.2000. 11 sierpnia 2013 r. o godzinie 00:38:49 upłynęło dokładnie 232 jednych dziesiątych części sekundy od 1 stycznia 2000 r.

Rok 2038 – wada oprogramowania spowodowana zerowaniem się 32-bitowego licznika tzw. czasu uniksowego, tj. systemu reprezentacji czasu mierzącego liczbę sekund od początku 1970 r. UTC, czyli od chwili zwanej początkiem epoki Uniksa (Unix Epoch). 32-bitowa liczba sekund (2 147 483 647 sekund) czasu uniksowego zeruje się 19 stycznia 2038 r. o godz. 03:14:07 UTC. Taki sposób zapisu daty powoduje, że systemy uniksowe były odporne na „pluskwę milenijną”, ale pojawiają się głosy, iż z uwagi na powszechność systemów uniksowych, konsekwencje mogą być bardziej znaczące. Aktualnie podejmowane są działania prowadzące do przejścia na 64-bitową reprezentację czasu.

Literatura

- [1] “Interface Specification IS-GPS-200, Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces”, Global Positioning Systems Directorate Systems Engineering & Integration, Latest version incorporating all applicable Interface Revision Notices (IRNs), <https://www.gps.gov/technical/icwg/>
- [2] “Memorandum for U.S. owners and operators using GPS to obtain UTC time. Upcoming Global Positioning System Week Number Rollover Event.”, US Department of Homeland Security, National Cybersecurity & Communications Integration Center, National Coordinating Center for Communications, <https://ics-cert.us-cert.gov/Memorandum-US-Owners-and-Operators-Using-GPS-Obtain-UTC-Time>
- [3] “GPS Week Rollover Issue,” Edward Powers, USNO, Sept 26, 2017, CGSIC, <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2017/powers.pdf>
- [4] The GPS End-of-Week Rollover. Richard B. Langley, University of New Brunswick. GPS WORLD, November 1998.
- [5] GNSS Market Report Issue 6, European GNSS Agency, October 2019, https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/market_report_issue_6.pdf

