

Wzorcowe sygnały czasu i częstotliwości

Dominik Łoniewski, Wojciech Skonieczny,
Andrzej Stachnik

Szczegółowo omówiono zagadnienia utrzymania na poziomie najwyższej dokładności jednolitego w skali światowej czasu, a także system rozsyłania sygnałów czasu w sieciach informatycznych. Zaprezentowano związane z tą tematyką badania prowadzone w Instytucie Łączności oraz przedstawiono uzyskane rezultaty.

radiokomunikacja, sygnały wzorcowe, dystrybucja sygnałów czasu, serwery czasu, NTP, GPS, UTC

Wprowadzenie

Już od zarania dziejów listy i dokumenty opatrywano datą. Dokładność określenia czasu nie powinna stwarzać wątpliwości co do kolejności wymiany pism między korespondentami. Początkowo rolę taką pełniły stemple czasowe dzienne używane w placówkach pocztowych, z biegiem lat uzupełnione godziną. Telegraf wymagał już podawania czasu z dokładnością do jednej minuty. Prawdziwy przełom nastąpił z chwilą uruchomienia sieci komputerowych, obejmujących swym zasięgiem znaczne obszary naszego globu, oferujących coraz więcej usług, np. opłaty rachunków, zakupy w sklepach internetowych itd. Liczba dokonywanych w ten sposób transakcji, a więc i liczba przesyłanych danych jest ogromna. Po każdej z nich zostaje ślad w postaci wpisu w plikach logów serwerów, czy też dziennikach transakcji baz danych.

Stempel czasowy, którym jest opatrzona każda transakcja, zawiera datę oraz godzinę zapisu. Dane te, oprócz znaczenia dokumentacyjnego, umożliwiają kontrolowanie rzetelności przeprowadzanych transakcji. Przykładowo, kursy dewizowe czy wartość akcji albo też opłaty celne ulegają zmianom i zdarza się, że realizacja transakcji o jedną sekundę wcześniej lub później może w znaczącym stopniu rzutować na jej wartość. Dzięki wpisom, w przypadkach włamań do systemu lub awarii, można odtworzyć prawie w całości bazy danych, czy wreszcie dostarczyć klientowi ścisły wykaz dokonywanych operacji bez angażowania w to wielkich środków.

Niezbędnym czynnikiem, który umożliwia nadawanie poprawnych stempli czasowych i utrzymanie w założonych granicach błędów wskazań czasu, zgodnego z obowiązującym w kraju czasem urzędowym, jest ujednoczenie (synchronizacja) czasu wskazywanego przez zegary wszystkich serwerów oraz komputerów, na których są uruchamiane i dokumentowane wspomniane usługi.

Wzajemna synchronizacja serwerów jest potrzebna nie tylko do funkcjonowania tego typu usług, ale stanowi również niezbędny element uwiarygodniający niektórych metod autoryzacji użytkownika przez system, np. sieciowy system informacji NIS+ (*Network Information System+*) firmy Sun Microsystems, usług DNS (*Domain Name Service*) oraz implementacji systemów wykorzystujących cyfrowe klucze i certyfikaty, czyli tzw. usługi zaufanej strony trzeciej TTP (*Third Trusted Party*).

Międzynarodowy czas skoordynowany UTC

W celu utrzymania jednolitego czasu wskazywanego przez wszystkie na świecie zegary stało się niezbędne przeprowadzenie koordynacji (uzgodnienia) czasu wskazywanego przez grupę najwyższej klasy zegarów atomowych, a następnie wdrożenie sprawnego sposobu przesyłania znaczników czasu, aby ustalić wskazania poszczególnych zegarów.

Obecnie do znakowania zdarzeń jest używany międzynarodowy czas skoordynowany UTC (*Universal Time Coordinated*). W poszczególnych państwach do przybliżenia czasu urzędowego do czasu astronomicznego jest stosowany czas strefowy UTC, różniący się od międzynarodowego czasu UTC o określoną, całkowitą liczbę godzin. W części państw czas strefowy występuje w odmianie letniej i zimowej. Zgodnie z dawniejszym nazewnictwem, czas UTC bywa niekiedy nazywany nieprecyzyjnie jako czas Greenwich, obydwie bowiem czasy są związane ze strefą czasową otaczającą zerowy południk ziemski.

W ciągu ostatnich dziesięcioleci odstąpiono od wyznaczania czasu na podstawie zjawisk astronomicznych. Prowadzona od 1958 r. skala międzynarodowego czasu atomowego TAI (*International Atomic Time*) wykorzystuje drgania wytwarzane przez wzorce atomowe. Obecnie podstawę do wyznaczenia czasu TAI stanowią dane z kilkudziesięciu specjalistycznych laboratoriów utrzymania czasu i częstotliwości, wyposażonych łącznie w około 240 wzorców atomowych, głównie cezowych. Do liczby tej zalicza się również wzorce cezowe Instytutu Łączności. Czas atomowy jest dokładniejszy od czasu astronomicznego i pozwala zaobserwować wydłużanie roku wywołane zwalnianiem ruchu obrotowego Ziemi oraz niejednorodności tego ruchu. Na skutek występowania tego typu zjawisk po kilku latach obserwacji powstała znacząca już różnica między czasem atomowym i astronomicznym, co było niedopuszczalne z uwagi na potrzeby klasycznej nawigacji opartej na wyznaczaniu położenia ciał niebieskich. Z tych względów do powszechnego użytku został wprowadzony czas UTC, stanowiący pomost między czasem astronomicznym a czasem atomowym TAI. Przeprowadzanie procedur obliczeniowych związanych z czasem UTC i oficjalne reprezentowanie tego czasu należy do zadań Międzynarodowego Biura Miar BIMP (*Bureau International des Poids et Mesures*) w Sèvres pod Paryżem. Dokładność względna czasu TAI (również czasu UTC jako czasu pochodnego) jest szacowana na $\pm 1 \cdot 10^{-14}$, co odpowiada błędowi 1 s na 3 000 000 lat. Przedziały czasu (odcinki czasu) odpowiadające 1 s czasu UTC i czasu atomowego TAI są równe.

Definicja jednostki czasu – sekundy – jest oparta na zliczaniu drgań elektromagnetycznych promieniowania powstającego podczas zmiany stanu energetycznego atomu cezu ^{133}Cs . Odpowiada jej 9 192 631 770 okresów tego promieniowania. Jeśli różnica między czasem UTC a czasem astronomicznym przekroczy wartość 0,9 s, wówczas czas UTC jest korygowany o 1 s. Sekundy wykraczające poza zwyczajną rachubę czasu są określane mianem sekund przestępnych (*leap*) przez analogię do dodatkowych dni (29 lutego) w latach przestępnych kalendarza gregoriańskiego. Skale czasu UTC i TAI różnią się więc o całkowitą liczbę sekund. Obecnie różnica ta wynosi 32 s. W ostatnim dziesięcioleciu sekundy przestępne były początkowo dodawane co półtora roku, jednak obecnie proces narastania różnicy między czasem UTC a TAI uległ zahamowaniu i potrzeba dodania sekundy przestępnej wystąpiła ostatnio w dniu 31.12.1998 r. Terminu, w którym stanie się konieczne wprowadzenie sekund przestępnych, nie można wcześniej przewidzieć, co stanowi niedogodność naliczania czasu UTC. Astronomiczne metody wyznaczania pozycji geograficznej są stosowane coraz rzadziej, zatem instytucje międzynarodowe odpowiedzialne za utrzymanie jednolitego w skali globalnej czasu rozważają odejście od metody wykorzystującej wprowadzanie sekund przestępnych.

Opisane właściwości czasu UTC świadczą, że czas UTC nie ma odwzorowania fizycznego, a więc nie istnieje zegar wskazujący czas UTC. Ze względu na korespondencyjny sposób ustalania tego czasu bywa on nazywany **czasem papierowym**.

Sygnały wzorcowe

Wskazania działających na podstawie wzorców atomowych zegarów (zwanymi zegarami atomowymi) najwyższej klasy na ogół porównuje się i ustala różnice między nimi. Dane te wykorzystuje się do korygowania wskazań tych zegarów. Jednak korekcję wskazań zegarów wchodzących w skład tej grupy przeprowadza się bardzo rzadko. Na podstawie wskazań wyselekcjonowanej grupy zegarów atomowych ustala się czas atomowy UTC.

Porównania zegarów znajdujących się na najwyższym szczeblu hierarchii systemu wyznaczania czasu w skali światowej, biorących udział w wyznaczaniu czasu TAI i UTC, są wykonywane za pomocą specjalistycznych i zunifikowanych metod. Metody te, wykorzystujące sygnały przesyłane za pośrednictwem sztucznych satelitów, zostaną szczegółowo omówione w dalszej części artykułu. W zastosowaniach nieprofesjonalnych do dokładnego transferu sygnałów i odtworzenia czasu UTC w dowolnym miejscu globu są obecnie najczęściej wykorzystywane sygnały radiowe, emitowane przez amerykański, satelitarny system nawigacyjny NAVSTAR, znany powszechnie jako GPS (*Global Positioning System*).

System nawigacyjny GPS

Podstawowym zadaniem systemu GPS jest określenie położenia geograficznego odbiornika na podstawie sygnałów odebranych z krążących wokół Ziemi satelitów. Położenie wylicza się, uwzględniając odległości kilku satelitów od anteny odbiornika. Odległość poszczególnych satelitów jest wyznaczana na podstawie pomiaru czasu propagacji fal radiowych na drodze od satelity do odbiornika. Niezbędne informacje do przeprowadzenia obliczeń o bieżącym położeniu każdego z satelitów GPS są zawarte w odbieranych z tych satelitów blokach danych, czyli w tzw. depeszach nawigacyjnych.

Pomiar położenia z dużą dokładnością, wynoszącą ± 17 m, wymaga bardzo dużej współbieżności i dokładności zegarów umieszczonych na pokładach każdego z satelitów GPS. Większość odbiorników GPS ma możliwość dodatkowego wykorzystania tej cennej właściwości systemu i – oprócz danych o położeniu – uzyskania na wyjściu odbiornika precyzyjnych sygnałów czasu. Sygnały te tworzą ciąg znaczników czasu w postaci impulsów powtarzających się co 1 sekundę (1 pps – *1 pulse per second*). Ze względu na dużą zgodność chwili wystąpienia impulsu jednosekundowego odbiornika z chwilą rozpoczęcia sekundy skali czasu GPS (tj. z błędem nie przekraczającym $0,1 \mu\text{s}$) sygnał ten jest powszechnie zwany „sekundą GPS”. Do każdego impulsu jest przypisany opis, zawierający informację o pełnej dacie w formacie *rrmmdd ggmms*, dostępny za pośrednictwem interfejsu szeregowego odbiornika GPS.

Podstawowe parametry systemu GPS zestawiono w tabl. 1.

Instytucją zajmującą się bezpośrednio administrowaniem i utrzymaniem systemu jest obserwatorium floty USA USNO (*United States Naval Observatory*). Skala czasu całego systemu GPS jest utrzymywana i korygowana przez tę instytucję z dokładnością ± 20 ns. Dla zobrazowania zaplecza technicznego związanego z prowadzoną przez USNO działalnością warto wspomnieć, że z wymienionej już liczby 240 wzorców atomowych, stanowiących podstawę do wyznaczania czasu UTC, blisko 80 należy do USNO.

Tabl. 1. Podstawowe parametry systemu GPS

Lp.	Parametry	Wartości
1	Całkowita liczba satelitów	24 (do 32 maks.)
2	Liczba satelitów widocznych przez odbiornik	$5 \div 8$
3	Odległości orbit od Ziemi	19 100 km
4	Częstotliwości nośne sygnałów GPS	$L_1 = 1\,575,42$ MHz i $L_2 = 1\,227,6$ MHz
5	Technika modulacji	Widmo rozproszone
6	Sygnał czasu	1 imp/s (1 pps)
7	Dokładność skali czasu systemu	± 20 ns
8	Dokładność sygnału czasu odbiornika	± 50 ns

Trzeba pamiętać, że system GPS – pomimo niewątpliwych zalet, np. dużej precyzji sygnałów czasu, powszechnej dostępności i niedrogości oprzyrządowania – został zbudowany głównie na użytek floty Stanów Zjednoczonych i jego administrator jest z nią instytucjonalnie związany. Takie przyporządkowanie nadaje najwyższy priorytet militarnym zadaniom systemu GPS i dlatego administrator nie zapewnia nieautoryzowanym użytkownikom GPS gwarancji ciągłości dostępu. W przypadku zagrożenia bezpieczeństwa Stanów Zjednoczonych sygnały GPS mogą być bez ostrzeżenia zakodowane, zmniejszając dokładność uzyskiwanych sygnałów czasu^① bądź też całkowicie uniemożliwiając korzystanie z systemu. W dobie nasilonych działań terrorystycznych i lokalnych konfliktów zbrojnych nie można wykluczyć zakłócenia sygnałów GPS z naziemnych lub satelitarnych stacji zakłócających. Należy również pamiętać, że korzystanie z sygnałów GPS nie stanowi dodatkowego uwiarygodnienia w sensie prawnym dla tworzonych sygnałów czasu używanych następnie do celów dokumentacyjnych (stempli czasowych). Nieformalne uwiarygodnienie skali czasu GPS pod względem metrologicznym wynika z prowadzonych przez Obserwatorium Paryskie OP (*Observatoire de Paris*) wspólnie z BIPM systematycznych pomiarów zgodności skal czasu GPS i UTC oraz publikowanych dobowych wartości różnic między obydwoma skalami czasu w comiesięcznych biuletynach tych instytucji. Z wieloletnich danych pomiarowych wynika, że różnica ta nie przekracza ± 20 ns.

Inne źródła sygnałów wzorcowych

Ze względu na mniejszą niezawodność znacznie rzadziej jest stosowany do transferu czasu system GLONASS – rosyjski (postradziecki) odpowiednik systemu GPS.

Poza systemami GPS i GLONASS są wykorzystywane inne precyzyjne źródła sygnałów wzorcowych (referencyjnych), takie jak: atomowe wzorce cezowe pojedyncze i zbiorowe, dysponujące dokładnością 10^{-12} i większą, mazery wodorowe i fontanny cezowe (10^{-15}) oraz wzorce atomowe wykorzystujące inne pierwiastki, np. rtęć (10^{-18}). Badania nad tymi ostatnio wymienionymi wzorcami są prowadzone w Denver (Colorado). Na najwyższym poziomie hierarchicznym w klasyfikacji serwerów czasu znajduje się zegar *Master Clock* (MC), opisany w dalszej części artykułu.

W krajach europejskich zegary mogą być także synchronizowane sygnałem DCF77 z nadajnika w Mainflingen koło Frankfurtu nad Menem (w Niemczech) lub brytyjskiej stacji MSF. W Polsce

^① System ograniczonego dostępu SA (*Selective Availability*) był stosowany przez kilka lat, do dn. 1.05.2000 r.

fala nośna 225 kHz Programu I, emitowana przez nadajnik długofalowy w Solcu Kujawskim, jest synchronizowana wzorcami atomowymi i stanowi Krajową Częstotliwość Wzorcową.

Transfer znaków czasu

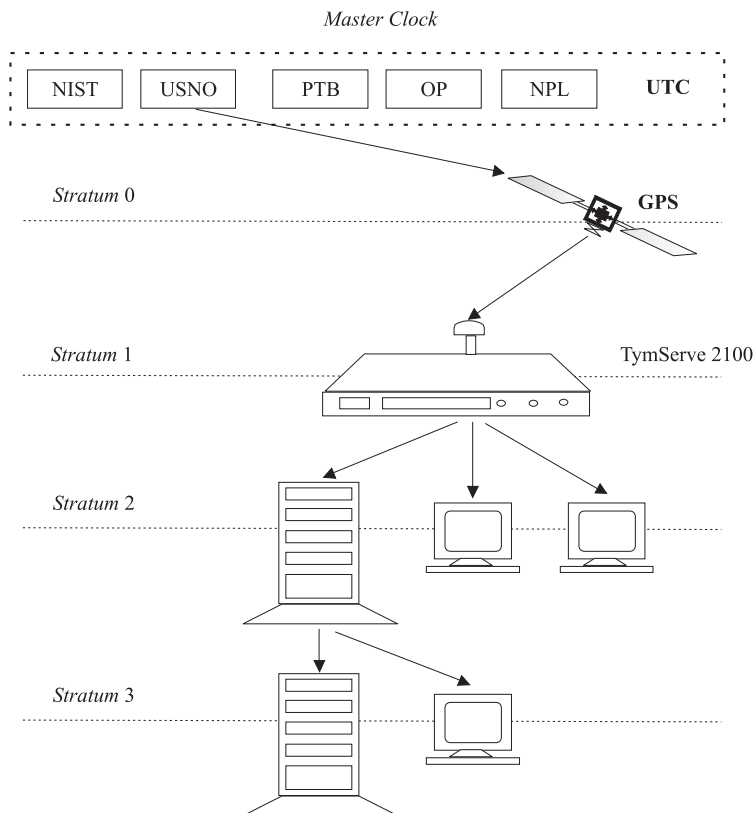
W zależności od potrzeb przesyłanie znaków czasu odbywa się na kilku poziomach dokładności i wiarygodności. Do czynników podlegających zróżnicowaniu należą uciążliwość i koszty pomiaru. Na najwyższym poziomie, wśród użytkowników zegarów cezowych, bardzo popularna i nie wymagająca kosztownego sprzętu jest metoda komparacyjna wykorzystująca jednoczesną widoczność (CV – *Common View*) jednego lub wielu satelitów systemu GPS. Polega ona na pomiarze odstępu czasu między impulsem 1 pps z odbiornika GPS a impulsem 1 pps skali czasu badanego zegara (wzorca) cezowego. Takie pomiary prowadzone jednocześnie w wielu laboratoriach umożliwiają eliminację błędów skali czasu GPS [2]. Metodę tę wykorzystano też w Instytucie Łączności (IŁ) do porównania skal czasu wzorców cezowych: IŁ, CBR-TP SA, GUM i AOS w Borowcu. W ostatnich latach IŁ rozpoczął, łącznie z innymi ośrodkami w Polsce, prace nad określaniem polskiej i międzynarodowej skali czasu UTC. Do zunifikowania formy zapisu i wymiany danych pomiarowych został opracowany, przez Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN) we współpracy z BIPM, program pomiarowy oparty na quasi-wielokanałowej metodzie *Common View* [3].

Obecnie najbardziej precyzyjną metodą porównywania skal czasu najwyższej klasy zegarów atomowych jest metoda dwudrożna TWSTFT (*Two Way Satellite Time and Frequency Transfer*), polegająca na przesyłaniu za pośrednictwem satelity komunikacyjnego znaczników czasu lub sygnału częstotliwości wzorcowej z jednego ośrodka do drugiego i z powrotem. Taki system porównania eliminuje wiele czynników niekorzystnie wpływających na dokładność pomiaru, np. niestabilność położenia satelity, efekt Dopplera, niejednorodność jonosfery, troposfery i inne [3]. Oprócz pomiaru i porównania skal czasu oddalonych znacznie zegarów można również synchronizować odległe wzorce niższej klasy, np. rubidowe. Metoda jest jednak dość kosztowna ze względu na konieczność wyposażenia ośrodków badań w dwukierunkowe stacje satelitarne, wielokanałowe modemy szerokopasmowe oraz dostęp do mazerów wodorowych na czas kalibracji urządzeń. Do prowadzenia pomiarów jest konieczne ponadto wydzierżawienie dwukierunkowego łącza satelitarnego.

Utrzymanie jednolitego czasu w sieciach informatycznych

Zegary najlepszych laboratoriów, takich jak USNO, NIST (*National Institute of Standards and Technology*), PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*), NPL (*National Physical Laboratory*) oraz OP, zajmują się utrzymaniem czasu i częstotliwości, współuczestniczą w wyznaczaniu czasu UTC oraz tworzą łącznie zegar główny odniesienia zwany *Master Clock* (rys. 1). Wzorce cezowe Instytutu Łączności mogą być również zaliczone do tej grupy, gdyż nabyły prawo uczestniczenia w tworzeniu czasu UTC. Z zegara *Master Clock* jest synchronizowany system GPS, który dla sieci informatycznych może być uważany jako serwer czasu najwyższej hierarchicznie grupy, określanej jako poziom 0 (*Stratum 0*).

Na dokładność wskazania czasu przez zegar systemowy komputera, podobnie zresztą jak przez jakikolwiek inny zegar, mają wpływ dwa czynniki. Pierwszy to stałość i dokładność częstotliwości drgań generatora systemowego. W komputerze jest nim niskiej klasy oscylator kwarcowy. Drugim czynnikiem jest dokładność ustawienia w zegarze czasu początkowego, a to można dokonać tylko przez wprowadzenie zewnętrznej informacji o czasie bieżącym.



Rys. 1. Hierarchia wzorców czasu

Możliwe są zatem dwa podstawowe sposoby utrzymywania przez zegar małego błędu wskazań czasu bieżącego. Pierwszy polega na zastosowaniu generatorów systemowych o bardzo dużej dokładności częstotliwości wytwarzanych sygnałów, dzięki czemu nie wymagają one częstej kontroli i korekcji wskazywanego czasu, a drugi – na zastosowaniu seryjnych oscylatorów kwarcowych i częstym korygowaniu sygnałów czasu zegara własnego sygnałami zegara odniesienia (wzorcowego).

Wzorce czasu

Przesyłanie sygnałów czasu w zamkniętych lub otwartych sieciach informatycznych odbywa się sztafetowo, od serwera z wyższej hierarchicznie warstwy do serwera lub komputera z niższej hierarchicznie warstwy, w strukturze o kształcie odwróconego drzewa. Oprócz wymienionej już warstwy *Stratum 0*, wyróżnia się trzy niższe hierarchicznie warstwy oznaczone od *Stratum 1* do *Stratum 3*. Urządzenia pracujące w każdej z tych warstw mogą pełnić rolę zarówno źródła sygnałów czasu dla warstw niższych, jak i końcowego klienta całego systemu. W drugim przypadku są ostatnim elementem drzewa w ścieżce od korzenia, czyli tzw. „liściami” drzewa. Na ogół nie ma ograniczeń co do korzystania z przesyłania sygnałów czasu bezpośrednio z serwerów znajdujących się w wyższych

warstwach hierarchicznych, jednak są wówczas mniejsze możliwości zweryfikowania dróg przesyłania sygnałów czasu, a niejednokrotnie również wiarygodnej identyfikacji źródła.

Należy pamiętać, że podczas przesyłania sygnały czasu podlegają opóźnieniom pozwalającym na odtworzenie w komputerze czasu systemowego z ograniczoną dokładnością. Ze względu na stosowanie w komputerach systemów przerwań, możliwości dokładnego znakowania zdarzeń są ograniczone i nie przekraczają $0,001 \div 0,01$ s.

Do rozsyłania sygnałów czasu w realizowanych sieciach komputerowych służą serwery czasu pracujące w warstwie *Stratum* 1. Najczęściej wykorzystują one sygnały radiowe emitowane przez satelitarny system nawigacyjny GPS.

Protokół NTP

Do uzgadniania czasu wskazywanego przez zegary systemowe komputerów jest wykorzystywany w sieciach wyspecjalizowany protokół NTP (*Network Time Protocol*). Pakiety NTP korzystają z tych samych dróg przesyłania co pakiety zawierające informacje użytkowe.

Protokół NTP jest obowiązującym standardem. Założenia dotyczące jego architektury zostały szczegółowo opisane m.in. w [24, 25]. Format ramki czwartej wersji protokołu NTP przedstawiono na rys. 2.

LI	VN	Mode	Stratum	Pool	Precision
<i>Root Delay</i>					
<i>Root Dispersion</i>					
<i>Reference Identifier</i>					
<i>Reference Timestamp (64)</i>					
<i>Orginate Timestamp (64)</i>					
<i>Receive Timestamp (64)</i>					
<i>Transmit Timestamp (64)</i>					
<i>Key Identifier (optional) (32)</i>					
<i>Message Digest (optional) (128)</i>					

Rys. 2. Format pakietu NTPv4

Natomiast w tabl. 2 objaśniono znaczenie poszczególnych pól tego protokołu. Wszystkie urządzenia używające NTP do synchronizacji swoich zegarów wymieniają między sobą komunikaty w zaprezen-

Tabl. 2. Opis znaczenia pól pakietu protokołu NTP

Symbol	Znaczenie
LI (<i>Leap Indicator</i>)	2-bitowy kod ostrzegający o liczbie sekund, które muszą być dodane/odjęte do/od ostatniej minuty; kolejne wartości oznaczają: 0 – brak alarmu 1 – ostatnia minuta ma 61 sekund 2 – ostatnia minuta ma 59 sekund 3 – brak synchronizacji
VN (<i>Version Number</i>)	3-bitowe pole podające numer wersji protokołu
Mode	8-bitowe pole określające tryb działania: 0 – zarezerwowane 1 – symetryczny aktywny 2 – symetryczny pasywny 3 – klient 4 – serwer 5 – <i>broadcast</i> 6 – zarezerwowane dla komunikatów kontrolnych 7 – zarezerwowane do prywatnego użytku
Stratum	8-bitowe pole określające poziom w hierarchii lokalnego zegara 0 – nieznan/niedostępny 1 – główne źródło, np. odbiornik GPS 2 ÷ 15 – kolejne poziomy hierarchii 16 ÷ 255 – zarezerwowane
Pool Interval	Pole określające maksymalną liczbę sekund między kolejnymi, odebranymi pakietami
Precision	Dokładność lokalnego zegara
Root Delay	Czas, w sekundach, określający czas potrzebny pakietowi na dotarcie i powrót (<i>roundtrip time</i>) do głównego źródła
Root Dispersion	Nominalny błąd, w sekundach, w stosunku do głównego źródła odniesienia
Reference Identifier	32-bitowe pole identyfikujące poszczególne źródła odniesienia, np. dla urządzeń pracujących w Stratum 2 jest to ostatni otrzymany stempel czasu od źródła odniesienia; urządzenia z warstwy Stratum 1 ustawiają w tym polu jedną z wartości zdefiniowanych w [25]
Reference Timestamp	Czas ostatniej korekty lokalnego zegara
Originate Timestamp	Czas wysłania ostatniego zapytania do serwera
Receive Timestamp	Czas otrzymania zapytania przez serwer
Transmit Timestamp	Czas wysłania odpowiedzi przez serwer
Authenticator	Opcjonalnie; jeśli jest używany mechanizm autoryzacji, ma identyfikator klucza; w polu <i>Message Digest</i> jest zawarty wówczas kod MAC (<i>Message Authentication Code</i>), jego format zdefiniowano w [24, dodatek C]

towanej postaci. W dalszej części artykułu krótko opisano działanie mechanizmu synchronizacji przy użyciu tego protokołu.

Oprogramowanie potrzebne do uruchomienia NTP jest bezpłatne i dostępne dla wszystkich (*Open Source*) m.in. na stronie internetowej <http://www.eecis.udel.edu/mills/ntp>. Szczegółowa dokumentacja umożliwia samodzielną konfigurację pracy urządzenia w trybie klienta lub serwera w zależności od potrzeb. Bezpłatne oprogramowanie dostępne w sieci Internet powinno zadowolić większość użytkowników. Dotyczy to zwłaszcza systemu Windows, gdyż w przypadku systemów UNIX wszelkie narzędzia niezbędne do uruchomienia czy monitorowania usługi synchronizacji czasu są dostarczane wraz z systemem, często łącznie ze źródłami, zarówno do skonfigurowania klienta synchronizującego się z wzorcem czasu lub serwerem, jak i do konfiguracji serwera.

Zasada działania NTP jest dosyć prosta. Wszystkie urządzenia korzystające z usługi synchronizacji za pomocą tego protokołu są przydzielone do jednej z czterech warstw, określającej poziom w hierarchii źródeł synchronizacji czasu lub inaczej „odległość” od wzorców czasu. Poglądowo przedstawiono to na rys. 1. Na poziomie najwyższym (*Stratum 0*) znajdują się ogólnie znane i dostępne serwery czasu oraz system GPS. Niektóre są używane przez siły zbrojne (np. USA), nie są więc dostępne dla użytkowników cywilnych. Komunikują się one bezpośrednio z wzorcami czasu, sklasyfikowanymi w grupie *Master Clock*, znajdującymi w USNO, NIST oraz innych laboratoriach (rys. 1), w celu ewentualnej korekcji swoich wzorców i grup wzorców cezowych.

W tabl. 3 zamieszczono listę serwerów rekomendowanych przez NIST. Dodatkowo adresy serwerów czasu pracujących na poziomie *Stratum 1* i *Stratum 2* można znaleźć na stronach internetowych: <http://www.eecis.udel.edu/~mills/ntp/clock1.htm>, <http://www.eecis.udel.edu/~mills/ntp/clock2.htm>. Udostępniają one publicznie usługę synchronizacji czasu. Natomiast wzorce czasu, z którymi one same się synchronizują, podano w ich opisach. Serwerem tego typu jest również serwer w IŁ.

Tabl. 3. Serwery czasu zalecane przez NIST

Nazwa	Adres IP	Lokalizacja
time-a.nist.gov	129.6.15.28	NIST, Gaithersburg, Maryland
time-b.nist.gov	129.6.15.29	NIST, Gaithersburg, Maryland
time-a.timefreq.bldrdoc.gov	132.163.4.101	NIST, Boulder, Colorado
time-b.timefreq.bldrdoc.gov	132.163.4.102	NIST, Boulder, Colorado
time-c.timefreq.bldrdoc.gov	132.163.4.103	NIST, Boulder, Colorado
utcnist.colorado.edu	128.138.140.44	University of Colorado, Boulder
time.nist.gov	192.43.244.18	NCAR, Boulder, Colorado
time-nw.nist.gov	131.107.1.10	Microsoft, Redmond, Washington
nistl.dc.certifiedtime.com	216.200.93.8	Abovnet, N.Y. Virginia
nistl.datum.com	209.0.72.7	Datum, San Jose, California
nistl.nyc.certifiedtime.com	208.184.49.129	Abovnet, New York City
nistl.sjc.certifiedtime.com	207.126.103.202	Abovnet, San Jose, California

Źródła czasu pracujące na najwyższym poziomie hierarchii (*Stratum 0*) wyznaczają czas z dokładnością do nanosekund oraz dodatkowo mogą synchronizować się między sobą. Najczęściej jednak synchronizują się z wyznaczonym, uznanym za wiarygodne, źródłem czasu.

Dla autorów protokołu NTP najważniejsza była możliwość synchronizacji urządzeń pracujących w danym segmencie sieci z dowolnym serwerem znajdującym się poza nią (np. w Europie za pomocą systemu DCF77). Niecelowe wydaje się synchronizowanie zegarów urządzeń, bez możliwości sprawdzenia poprawności wskazań z zewnętrznym, niezależnym źródłem. Urządzenia końcowe, np. takie, z którymi już bezpośrednio komunikują się stacje robocze użytkowników oraz pozostałe serwery, obliczają przesunięcie w stosunku do UTC na podstawie informacji o strefie czasowej, w jakiej się znajdują, a następnie rozsyłają informację o czasie lokalnym. Jeśli odebrana przez nie informacja będzie nieprawdziwa, wówczas wskazywany przez nie czas również będzie niewłaściwy.

Urządzenia pracujące w warstwach niższych (*Stratum 2, 3, 4*) synchronizują się ze źródłami pracującymi w warstwie położonej bezpośrednio nad nią. Mogą to być np., tak jak w przypadku IŁ, serwery komunikujące się bezpośrednio z uruchomionym serwerem czasu *Stratum 1*. Ograniczenia dotyczące liczby warstw, czy też inaczej odległości od wzorców czasu, wynikają z możliwości powstawania błędów w trakcie przesyłania informacji o czasie przez sieci oraz czasu potrzebnego na wzajemną komunikację między urządzeniami. Teoretycznie może być 15 warstw, ale praktycznie stosowane i implementowane są 4 warstwy.

Każdy klient NTP powinien określić najbliższy i najlepszy dla niego serwer udostępniający synchronizację czasu. Jednak nie zawsze jest to najkorzystniejszy rodzaj konfiguracji. Ze względu na możliwość awarii czy brak możliwości zsynchronizowania się z serwerem, lepiej jest synchronizować dane urządzenie z kilkoma źródłami. Zalecane jest korzystanie z co najmniej trzech serwerów. W przypadku gdy wszystkie dają te same wskazania, protokół NTP sam dokona wyboru najlepszego źródła na podstawie:

- informacji, w której warstwie pracuje dane urządzenie;
- najmniejszego opóźnienia w komunikacji z danym urządzeniem;
- zakładanej precyzji.

Można wyróżnić trzy tryby konfiguracji urządzenia korzystającego z protokołu NTP. Pierwszy z nich zakłada, że urządzenie oprócz tego, że będzie synchronizowało się z wybranym wzorcem, będzie też umożliwiało innym urządzeniom synchronizację z nim (*unicast mode*). Jest to jakby tryb serwera, dzięki któremu w przypadku, np. kilku redundantnych urządzeń można mieć gwarancję stałej dostępności któregośkolwiek. Drugi tryb powoduje odpytywanie serwera lub serwerów czasu przez klientów (*multicast mode*). Konfiguracja ta jest dość często spotykana. Jej główną wadą jest niepotrzebne generowanie ruchu w sieci i obciążanie serwera, natomiast zaletą – szybszy start procesu klienta bez czekania na komunikaty rozsyłane przez serwer, co ma istotne znaczenie w momencie uruchamiania urządzenia, np. stacji roboczej. W ten sposób są skonfigurowane serwery w sieci IŁ, które wysyłają zapytania do serwera czasu. Trzeci tryb pracy klienta (*anycast mode*) powoduje wysłanie zapytania do grupy urządzeń (komunikat *multicast*) lub do wszystkich urządzeń w segmencie sieci (komunikat *broadcast*) i oczekiwanie na pierwszą, dowolną odpowiedź.

Każdy z tych trybów pracy jest przystosowany do innych potrzeb. Pierwszy z nich znajdzie na pewno zastosowanie w dużych sieciach, gdzie są wymagane: dokładny czas i gwarancja, że zawsze będzie

dostępne jedno źródło czasu, z którym klienci będą mogli się synchronizować. Drugi i trzeci tryb są stosowane przez większość użytkowników, a ich wybór zależy wyłącznie od lokalnych potrzeb.

Dla niektórych usług synchronizacja czasu jest bardzo istotna, NTP oferuje zatem mechanizmy zabezpieczające przed modyfikowaniem wskazań zegarów przez strony trzecie (TTP). Można wówczas określić, z jakich sieci i adresów, będą rozpatrywane pakiety przy ustalaniu czasu i czy pakiety mają zawierać sumy kontrolne generowane przez algorytm MD5 lub DES.

Serwer czasu Instytutu Łączności

W Instytucie Łączności zainstalowano serwer czasu TymServe™ 2100 firmy Datum. Jest on synchronizowany sygnałem z odbiornika GPS. Taki sposób synchronizacji klasyfikuje serwer jako *Stratum 1*. Serwer ten jest urządzeniem samodzielnym (*stand-alone*), które może rozprowadzać dokładny czas w sieciach TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), w tym również w sieci Internet, stosując protokół NTP. Sygnał 1 s (1 pps) z wyjścia odbiornika GPS jest użyty do synchronizacji podstawowej częstotliwości serwera, tj. 10 MHz, która jest następnie wykorzystana do generacji czasu i daty. W tabl. 4 zamieszczono podstawowe dane techniczne serwera czasu TymServe 2100.

Tabl. 4. Dane techniczne serwera czasu TymServe 2100

Interfejs sieciowy: – Ethernet 10Base T – TP (<i>Time Protocol</i> – protokół czasu)	IEE 802.3 NTP ver. 2 i 3 [23, 24] SNTP ver. 2 [23] Time Protocol [24] Daytime Protocol [24]
Połączenie szeregowo: – port A – port B	} DTE DCE RS 232, 9600 Baud, 8-N-1
Dokładność ustawienia czasu: – w sieci Internet – zegara wewnętrznego	1 ÷ 10 ms Lepsza niż 10 μs wzgl. UTC, GPS
Odbiornik GPS: – liczba kanałów – częstotliwość	6 1,575 GHz, C/A Code (<i>Coarse/Acquisition Code</i> – kod zgrubny, cywilny)
Wejścia	1 pps (antena GPS)
Wyjścia	1 pps, 10 MHz

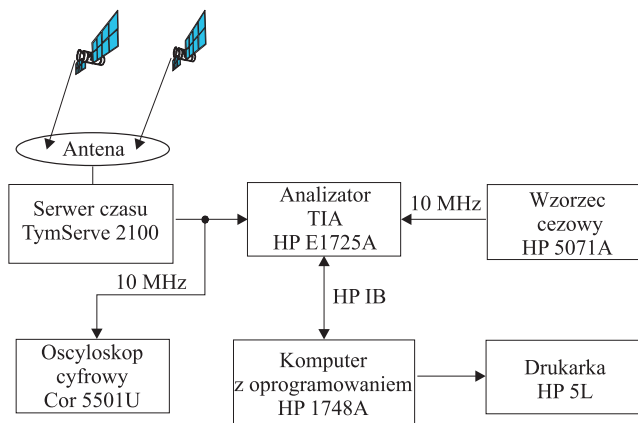
Badania parametrów jakościowych serwera czasu II

Metoda wykorzystująca pomiar fluktuacji fazy sygnału generatora podstawy czasu

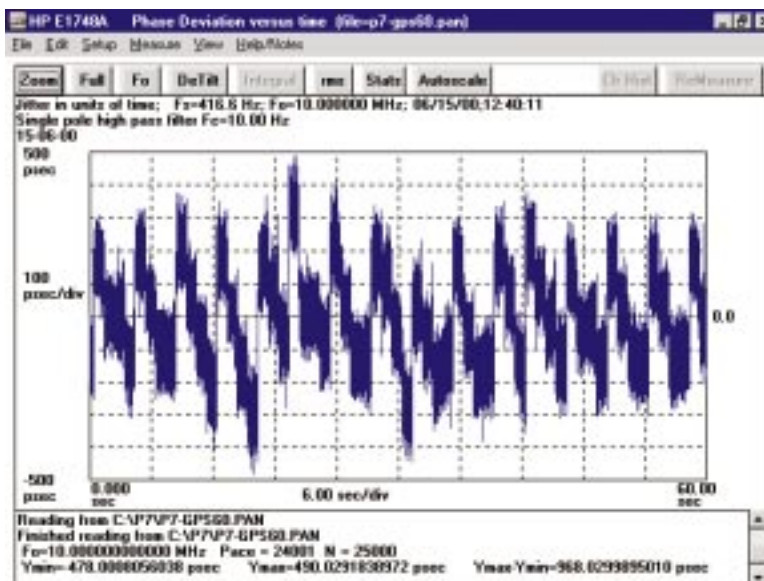
W telekomunikacji przyjęto, że do obiektywnej oceny jakości sygnałów wytwarzanych przez generatory synchronizowane, a do takiej klasy urządzeń należy również serwer TymServe 2100, są stosowane odpowiednie metody oparte na analizie danych statystycznych. Metody te umożliwiają ocenę stopnia pewności synchronizacji badanego urządzenia względem sygnału odniesienia (w tym przypadku sygnałów GPS) oraz ocenę poziomu szumów samoistnych zastosowanego w urządzeniu generatora. W serwerze zastosowano generator podstawy czasu wytwarzający sygnał o częstotliwości 10 MHz, który jest doprowadzony do gniazda kontrolnego BNC.

Według producentów pobrany z serwera sygnał 10 MHz o bardzo dużej dokładności częstotliwości może być wykorzystany do synchronizacji cyfrowych central abonenckich i lokalnych, dostępowych sieci teletransmisyjnych oraz do niektórych celów metrologicznych. Sygnały tego typu nie mogą być jednak przesyłane za pośrednictwem sieci informatycznych, a więc niemożliwy jest ich bezpośredni pomiar w miejscach oddalonych od serwera o więcej niż kilkadziesiąt metrów. W trakcie badań przeprowadzono pomiar szybkozmiennych fluktuacji fazy sygnału (*jitter*) i wolnozmiennych fluktuacji fazy sygnału (*wander*), tych ostatnich wyrażonych jako TIE (*Time Interval Error* – błąd przedziału czasu), ADEV (*Allan Deviation* – odchylenie Allana) i TDEV (*Time Deviation* – odchylenie czasu). Zestaw urządzeń do tych pomiarów pokazano na rys. 3. Natomiast wyniki pomiarów szybkozmiennych fluktuacji fazy sygnału wyjściowego (*jitter*) przedstawiono na rys. 4. Wartość międzyszczytowa fluktuacji wynosi ok. 968 ps. Wyniki pomiaru wolnozmiennych fluktuacji fazy sygnału wyjściowego (*wander*), wyrażone w TIE, zaprezentowano na rys. 5, w ADEV – na rys. 6, a w TDEV – na rys. 7. Fluktuacje TIE nie przekraczają 407 ns.

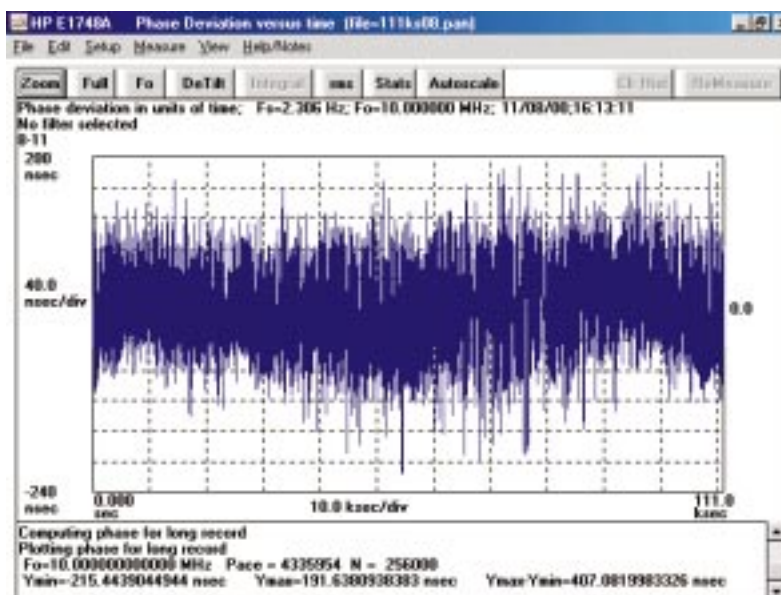
W zakresie generacji sygnałów wzorcowych serwer TymServe 2100 odpowiada generatorom sygnałów taktujących, sklasyfikowanych w telekomunikacji jako źródło sygnałów synchronizacyjnych dla węzłów sieci SSU (*Synchronous Supply Unit*). Wyniki pomiaru fluktuacji sygnałów serwera



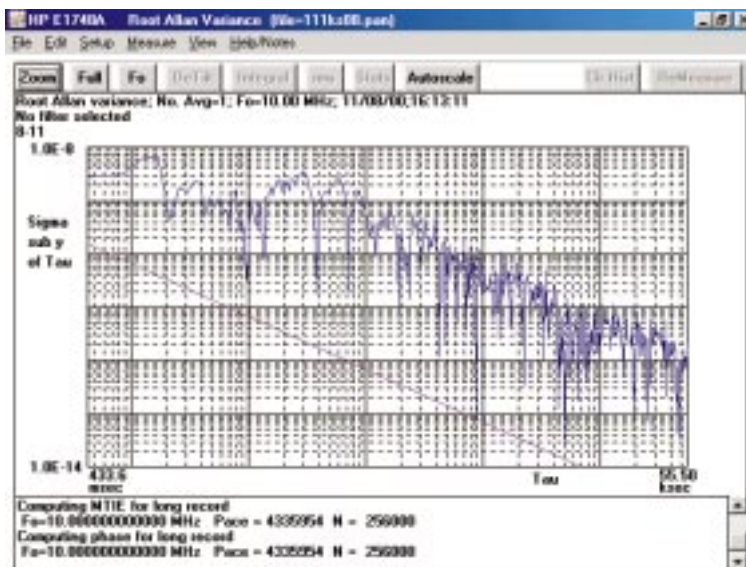
Rys. 3. Układ do pomiaru szybkozmiennych i wolnozmiennych fluktuacji fazy sygnału serwera czasu metodą wykorzystującą pomiar fluktuacji fazy sygnału generatora podstawy czasu



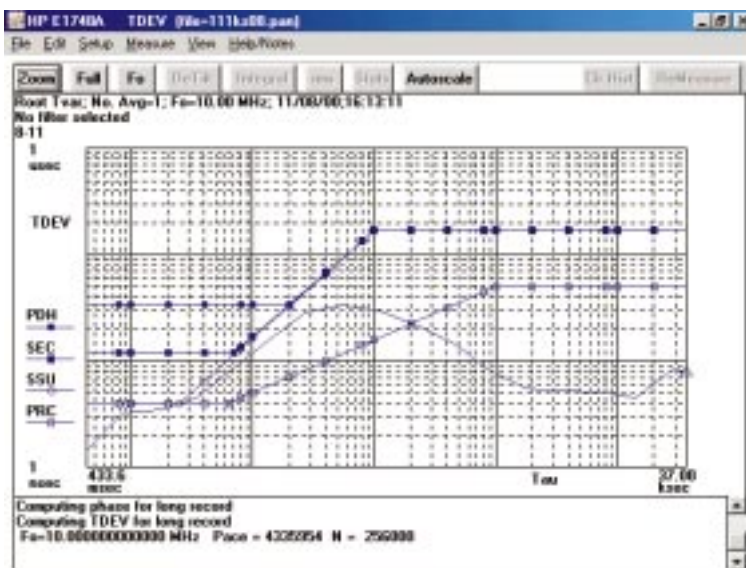
Rys. 4. Szybkozmiennne fluktuacje fazy sygnału 10 MHz



Rys. 5. Wolnozmiennne fluktuacje fazy sygnału 10 MHz, wyrażone w TIE



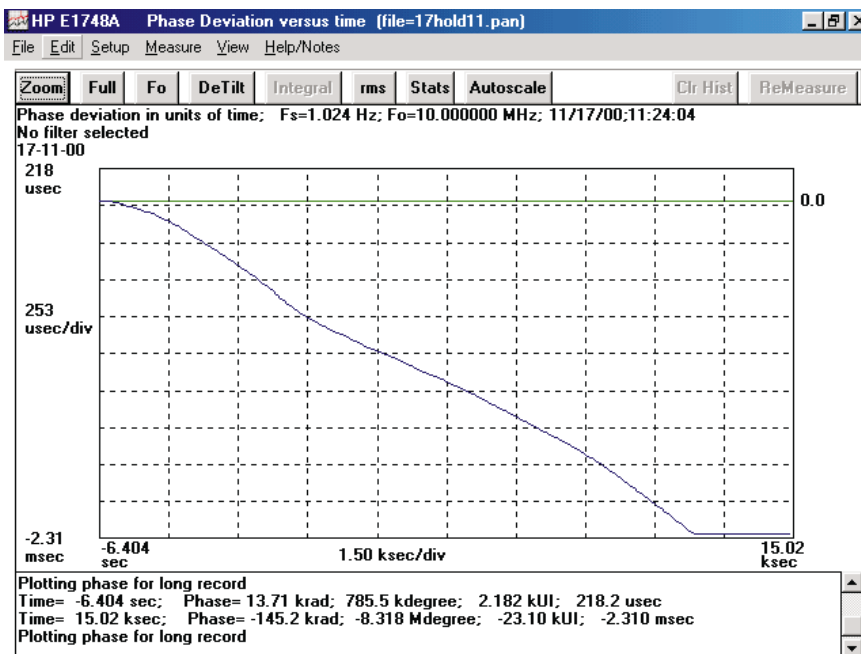
Rys. 6. Wolnozmiennie fluktuacje fazy sygnału 10 MHz, wyrażone w postaci odchylenia Allana



Rys. 7. Wolnozmiennie fluktuacje fazy sygnału 10 MHz, wyrażone w postaci TDEV

wyrażone w TDEV mieszczą się w dopuszczalnych granicach, określonych przez normy ETSI [5 ÷ 11] dla klasy wszystkich źródeł sygnałów telekomunikacyjnych SDH (*Synchronous Digital Hierarchy* – synchroniczna hierarchia zwielokrotnienia) i PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy* – plezjochroniczna hierarchia zwielokrotnienia), podlegających synchronizacji w odniesieniu do źródła nadrzędnego, tj. SSU i SEC (*Synchronous Equipment Clock* – zegar wewnętrzny urządzeń SDH). Nie spełniają one jednak wymogów stawianych zegarom pierwotnym PRC (*Primary Reference Clock*), dla których źródłem są wzorce atomowe, charakteryzujące się dużą stabilnością i czystością spektralną wytwarzanych sygnałów [5 ÷ 11, 14 ÷ 18].

Na rys. 8 przedstawiono zmianę fazy sygnału 10 MHz po odłączeniu anteny od odbiornika na ok. 3,5 godz. i przejściu oscylatora wewnętrznego serwera w tryb pracy z podtrzymaniem (*holdover*). Tryb pracy z podtrzymaniem jest trybem niesynchronicznym, wykorzystującym jednak nastawy układu regulacji częstotliwości generatora kwarcowego, które ustaliły się w okresie synchronicznej pracy generatora, przed przzerwaniem dostępu do sygnału synchronizującego. Przejście serwera w stan pracy z podtrzymaniem spowodowało zmianę fazy o 2,3 ms, co odpowiada względnemu odchyleniu częstotliwości o $1,8 \cdot 10^{-7}$.



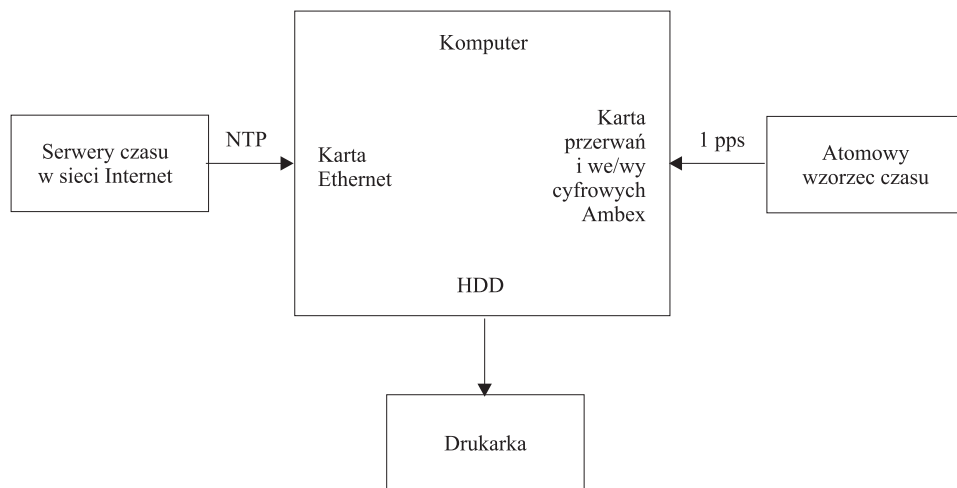
Rys. 8. Zmiana fazy sygnału 10 MHz po odłączeniu anteny od odbiornika na okres kilku godzin i przejściu serwera w tryb pracy z podtrzymaniem

Metoda wykorzystująca pomiar dokładności czasu systemowego korygowanego komputera

Omówioną poprzednio metodę pomiarową stosuje się, jeśli jest bezpośredni dostęp do serwera. Można wówczas wprawdzie uzyskać informacje o jakości sygnału oscylatora wykorzystywanego do

generacji w serwerze sygnałów czasu, nie można jednak konkretnie wyznaczyć wartości i charakteru fluktuacji czasu systemowego komputera mierzonych względem czasu UTC.

Do bezpośredniego pomiaru błędu czasu zegara systemowego komputera opracowano inną metodę, realizowaną przez układ urządzeń przedstawiony na rys. 9. W układzie tym czas zegara systemowego komputera, synchronizowanego z serwera czasu przez sieć Internet, porównuje się z czasem lokalnego wzorca cezowego. Pomiar odpowiada warunkom rzeczywistym. Na ogół trudno jest rozdzielić błąd sumaryczny na dwa składniki: pierwszy – spowodowany przez serwer czasu i drugi – wnoszony przez sprzężony z serwerem komputer. Dla użytkownika (klienta NTP), który styka się z błędem sumarycznym, podział ten nie ma praktycznego znaczenia. Na wartość błędu ma wpływ liczba ogniw sieci, w których przesyłana w formie pakietu informacja może być składowana, a tym samym może podlegać opóźnieniom. Z tego względu, dla celów porównawczych, oprócz serwera IŁ badaniami w pierwszej grupie objęto również serwery czasu dostępne za pośrednictwem sieci Internet, tj. INRIA z Francji (IP: 192.93.2.20), MIT z USA (18.26.4.105) i OS-PAN z Borowca (150.254.183.15), a w drugiej grupie serwery: USNO, NIST i PTB.



Rys. 9. Układ do pomiarów dokładności czasu systemowego komputera synchronizowanego przez sieć Internet

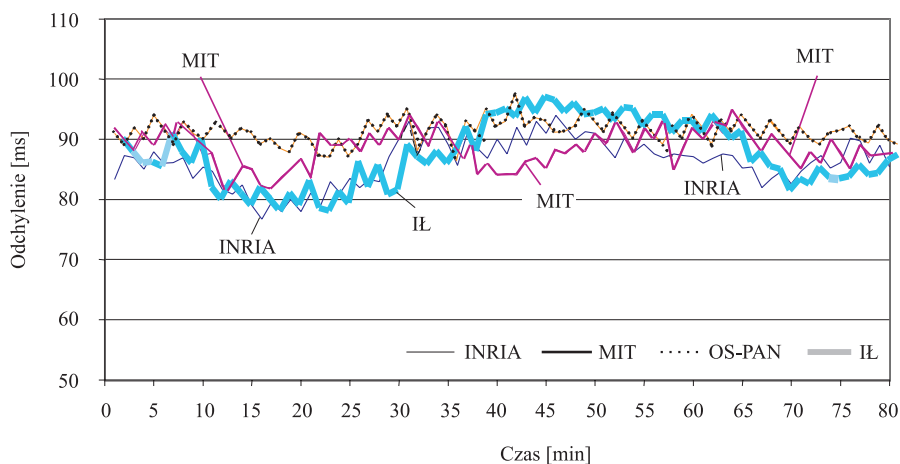
W przedstawionym na rys. 9 układzie można porównać czas badanego serwera z czasem wzorca atomowego w sposób pośredni przez korekcję czasu zegara systemowego komputera sygnałem serwera, a następnie porównanie tego czasu z sygnałem wzorca cezowego. Komputer komunikuje się z badanymi serwerami czasu za pośrednictwem sieci Internet. Niezbędne informacje są wymieniane z wykorzystaniem protokołów NTP. Jednocześnie na wejście zainstalowanej w komputerze karty interfejsu równoległego jest wprowadzany z wzorca cezowego ciąg impulsów, stanowiących znaczniki czasu (1 pps). Impuls wprowadzony do karty interfejsu inicjuje przerwanie, w ramach obsługi którego jest odczytywany i notowany na dysku twardym czas systemowy związany z tym przerwaniem. W stosowanym komputerze, podobnie jak w większości komputerów klasy PC, wartość czasu systemowego jest modyfikowana co ok. $1/18$ s ($0,05 \div 0,06$ ms).

Wykorzystywany do synchronizacji komputera program *AboutTime* umożliwia ustawienie interwału dokonywania korekcji czasu, a ponadto pozostawia zapis parametrów transmisji i błędów dostrojenia szacowanych przez badany serwer. W tabl. 5 przedstawiono fragment zapisu uzyskanego dla serwera IŁ.

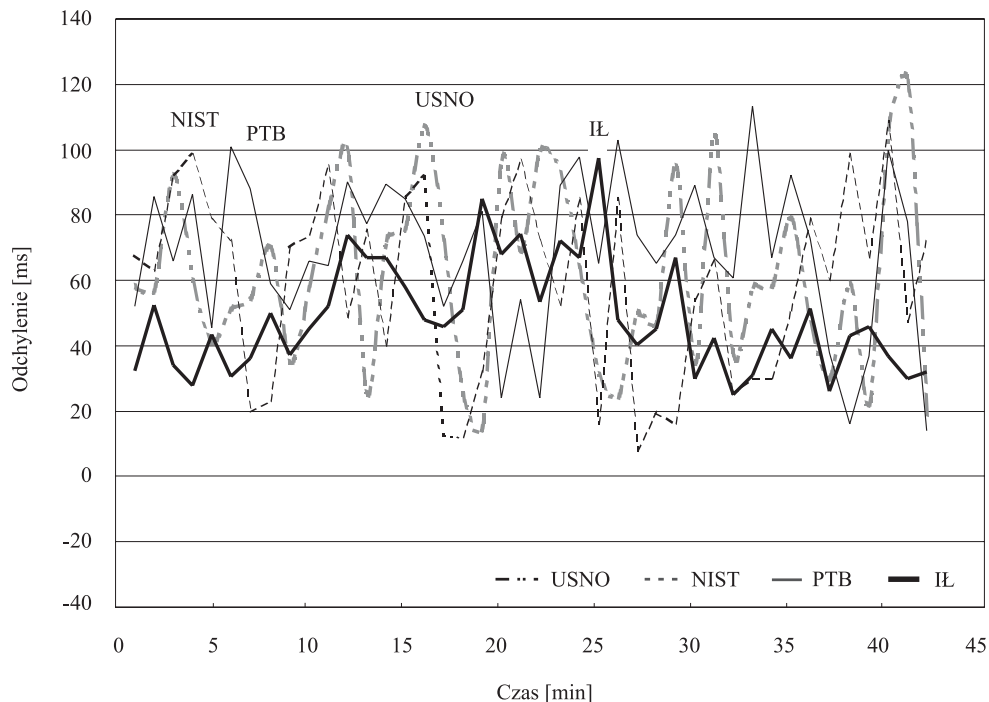
Tabl. 5. Fragment zapisu towarzyszącego pomiarom serwera czasu IŁ

09/12/2001 03:17:38	New time: Wednesday, September 12, 2001 03:17:38.
09/12/2001 03:27:38	Connecting to itl.waw.pl using SNTP.
09/12/2001 03:27:38	Resolved address for itl.waw.pl (172.16.7.42).
09/12/2001 03:27:38	Received time (ping 50 ms), error 22 ms.
09/12/2001 03:27:38	New time: Wednesday, September 12, 2001 03:27:38.
09/12/2001 03:37:38	Connecting to itl.waw.pl using SNTP.
09/12/2001 03:37:38	Resolved address for itl.waw.pl (172.16.7.42).
09/12/2001 03:37:38	Received time (ping 60 ms), error 34 ms.
09/12/2001 03:37:38	New time: Wednesday, September 12, 2001 03:37:38.
09/12/2001 03:47:38	Connecting to itl.waw.pl using SNTP.
09/12/2001 03:47:38	Resolved address for itl.waw.pl (172.16.7.42).

Wyniki pomiarów serwerów z pierwszej grupy zestawiono na rys. 10, natomiast z drugiej grupy – na rys. 11. Wyniki wielu serii pomiarowych tak dobrano, że w pierwszej grupie zaprezentowano minimalne odchylenia, natomiast w drugiej grupie podano wyniki o dużych wahaniami czasu.



Rys. 10. Zestawienie przebiegów synchronizacji komputera przez serwery czasu: INRIA, MIT, OS-PAN i IŁ



Rys. 11. Zestawienie przebiegów synchronizacji komputera przez serwery czasu: USNO, NIST, PTB i IŁ

Wnioski

Przeprowadzone badania miały wskazać, w jakim stopniu są wiarygodne znaki czasu nadawane zdarzeniom za pośrednictwem komputerów, stosujących protokoły NTP do wymiany informacji z serwerami czasu pełniącymi rolę wzorców czasu.

W materiałach firmowych i w literaturze są podawane zbyt optymistyczne dane dotyczące dokładności odtworzenia czasu wzorcowego w komputerze. Bierze się to zapewne z niezrozumienia istoty odtwarzania czasu w komputerach w zestawieniu z potrzebami użytkowników. Przedstawiciele firm i służb informatycznych operują na ogół wartością średnią błędu czasu wskazywanego przez zegar komputera lub wartością średniokwadratową (skuteczną). Na skutek synchronizacji zegarów wartość średnia błędów wskazań czasu jest bliska zera, podobnie mała (rzędu pojedynczych milisekund) jest wartość błędów średniokwadratowych. Nie występuje więc charakterystyczne dla zegarów niesynchronizowanych narastanie błędów wskazań czasu, najczęściej w dużym stopniu proporcjonalne do czasu obserwacji. W pierwszym przybliżeniu jest to zależność liniowa, potocznie określana wyrażeniem, że „zegar spieszy się” lub „późni”, np. 1 minutę na dobę.

Użytkownika interesuje jednak nie wartość średnia, lecz maksymalna wartość błędów, z którą może się spotkać. Na podstawie omówionych w artykule badań eksperymentalnych można stwierdzić, że wyniki pomiarów dokładności dostrojenia zegarów systemowych komputerów do serwerów czasu (rys. 9 i 10) wykazują, że jest ona mniejsza niż deklarowana przez producentów serwerów. Dla

zainstalowanego w IŁ serwera TymServe™ 2100 firma Datum podaje dokładność dostrojenia od 1 do 10 ms. Na dokładność pomiaru ma wpływ nie tylko czas obsługi przerwania i dokładność odczytu części sekundy w wybranym systemie operacyjnym, ale również i jakość sieci oraz obciążenie kanałów łączących komputer z serwerem. Pomijając rozrzut wyników pomiarów dochodzący dla badanych serwerów do 20 ms przy dogodnych warunkach (rys. 9) i do 80 ms przy mniej korzystnych (rys. 10), nie stwierdzono tendencji do stałego odchylenia czasu wskazywanego przez zegary systemowe komputerów synchronizowanych przez serwery od czasu reprezentowanego przez wzorzec atomowy. Oznacza to, że synchronizacja komputerów względem serwerów, rozpatrywana jako proces długoterminowy, jest poprawna i nie budzi zastrzeżeń.

Należy wspomnieć, że konfiguracja serwera lub klienta NTP jest prosta. Korzyści, jakie może przynieść synchronizacja czasu użytkownika, są doceniane najczęściej dopiero w momentach awarii urządzeń lub uruchomienia programu rejestracji danych o niewłaściwej porze, np. o 5 min za późno lub za wcześnie w stosunku do programu realizowanego przez inne urządzenie. W ostatnim przypadku może wystąpić utrata cennych danych i niewykonanie spodziewanego odświeżenia wersji plików realizowanego projektu.

O tym, że problem synchronizacji czasu jest bardzo istotny, wiedzą również producenci systemów wykorzystywanych do profesjonalnych zastosowań. Od pewnego czasu dołączają oni oprogramowanie NTP do wersji instalacyjnych swoich produktów lub umieszczają inicjację procesu synchronizacji w skryptach startowych, jak np. Solaris od wersji 2.6. Podobnie postępują twórcy dystrybucji Linuxa, np. Debiana.

Zastosowane w Instytucie Łączności metody pomiarowe umożliwiają dostateczną kontrolę pracy stosowanych obecnie w sieciach serwerów czasu, a także ocenę jakości serwerów czasu nowej konstrukcji i urządzeń pracujących już w sieciach informatycznych. Wykorzystanie wzorca cezowego Instytutu Łączności – kontrolowanego z innymi wzorcami krajowymi i zagranicznymi – jako odniesienia do serwera czasu Instytutu Łączności stanowi ważny element uwiarygodnienia uzyskanych wyników.

Zdaniem Autorów, w przyszłych konstrukcjach zegarów systemowych komputerów powinny być wprowadzone mechanizmy, umożliwiające lokalną, samoczynną korekcję częstotliwości generatorów kwarcowych wytwarzających sygnał podstawy czasu zegara, a więc minimalizację jego spieszenia się lub opóźnienia. Dopiero takie rozwiązanie niezależnie od dokładności przypisywaną zdarzeniom do celów dokumentacyjnych znaków czasu (stempli czasowych) od stopnia obciążenia i niezawodności działania sieci informatycznych wykorzystywanych do przesyłania sygnałów czasu. Dla nowych potrzeb i rozwiązań powinny być opracowane nowe metody pomiarowe weryfikujące jakość stempli czasowych nadawanych dokumentom, a zatem podjęte badania powinny być kontynuowane.

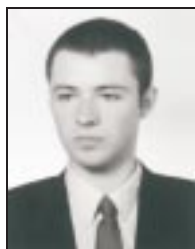
Bibliografia

- [1] Allan D. W., Ashby N., Hodge C. C.: *The Science of Timekeeping*. Application Note 1289, Hewlett-Packard, June 1997, http://www.allanstime.com/Publications/DWA/Science_Timekeeping/TheScienceOfTimekeeping.pdf
- [2] *Badania nad synchronizacją oraz normalizacją zasad synchronizacji krajowych systemów telekomunikacyjnych*. Warszawa, Instytut Łączności, 1998
- [3] *Badania w dziedzinie wytwarzania i przesyłania sygnałów wzorcowych czasu i częstotliwości, informacji o czasie w sieciach informatycznych oraz synchronizacji systemów telekomunikacyjnych*. Warszawa, Instytut Łączności, 2001

- [4] De Jong G.: *Delay stability of the TWSTF earth station at VSL*. W: Proc. 12th EFTF, March 1998
- [5] ETSI EN 300 462-1: *Transmission and Multiplexing (TM); Generic requirements for synchronization networks; Part 1: Definitions and terminology for synchronization networks*
- [6] ETSI EN 300 462-2: *Transmission and Multiplexing (TM); Generic requirements for synchronization networks; Part 2: Synchronization network architecture*
- [7] ETSI EN 300 462-3: *Transmission and Multiplexing (TM); Generic requirements for synchronization networks; Part 3: The control of jitter and wander within synchronization networks*
- [8] ETSI EN 300 462-4: *Transmission and Multiplexing (TM); Generic requirements for synchronization networks; Part 4: Timing characteristics of slave clocks suitable for synchronization supply to Synchronous Digital Hierarchy (SDH) and Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) equipment*
- [9] ETSI EN 300 462-5: *Transmission and Multiplexing (TM); Generic requirements for synchronization networks; Part 5: Timing characteristics of slave clocks suitable for operation in Synchronous Digital Hierarchy (SDH) equipment*
- [10] ETSI EN 300 462-6: *Transmission and Multiplexing (TM); Generic requirements for synchronization networks; Part 6: Timing characteristics of primary reference clocks*
- [11] ETSI EN 300 462-7-1 (draft): *Transmission and Multiplexing (TM); Generic requirements for synchronization networks; Part 7-1: Timing characteristics of slave clocks suitable for synchronization supply to equipment in local node applications*
- [12] *Global Positioning System. Standard Positioning Service – Signal Specification*. 2nd ed. June 1995, <http://www.gpskorea.co.kr/Download/gpssignalspecanex.pdf>
- [13] *HP E1725B Time Interval Analyzer with HP E1748A Analysis Software*. Hewlett-Packard, Dec. 1995
- [14] ITU-T Rec. G.703: *Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces*
- [15] ITU-T Rec. G.810: *Definition and terminology for synchronous networks*
- [16] ITU-T Rec. G.811: *Timing requirements at the output of primary reference clocks suitable for plesiochronous operation of international digital links*
- [17] ITU-T Rec. G.812: *Timing requirements at the output of primary reference clocks suitable for plesiochronous operation of international links*
- [18] ITU-T Rec. G.813: *Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC)*
- [19] ITU-T Rec. G.823: *The control of jitter and wander within digital networks which are based on the 2048 kbit/s hierarchy*
- [20] ITU-T Rec. G.825: *The control of jitter and wander within digital networks which are based on the Synchronous Digital Hierarchy (SDH)*
- [21] Kirchner D.: *Two-way time transfer via communication satellites*. Proc. IEEE, 1991, vol. 79, no. 7
- [22] Lewandowski W., Azoubib J., Klepczyński W.: *GPS: primary tool for time transfer*. Proc. IEEE, 1999, vol. 87, no. 1
- [23] Mills D. L.: *Network Time Protocol (Version 2); Specification and Implementation*. RFC-1119, Network Working Group, Sept. 1989, <http://www.cis.ohio-state.edu/cgi-bin/rfc/rfc1119.html>
- [24] Mills D. L.: *Network Time Protocol (Version 3); Specification, Implementation and Analysis*. RFC-1305, Network Working Group, March 1992, <http://www.cis.ohio-state.edu/cgi-bin/rfc/rfc1305.html>

- [25] Mills D. L.: *Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4 for IPv4, IPv6 and OSI*. RFC-2030, Network Working Group, Oct. 1996, <http://www.cis.ohio-state.edu/cgi-bin/rfc/rfc2030.html>
- [26] Postel J., Harrenstien K.: *Time Protocol*. RFC-868, Network Working Group. May 1983, <http://www.faqs.org/rfcs/rfc868.html>
- [27] Stefański A., Skonieczny W.: *GPS – powszechnie dostępne źródło czasu*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 2001, nr 11, s. 755–763
- [28] Wormley's S.: *Global Positioning System (GPS)*. Resources at ISU, <http://www.cnde.iastate.edu/staff/swormley/gps/gps.html>

Dominik Łoniewski



Mgr inż. Dominik Łoniewski (1977) – absolwent Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej (2002); pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 2000); zainteresowania naukowe: bezpieczeństwo sieci komputerowych, sieciowe systemy informacyjne.
e-mail: D.Loniewski@itl.waw.pl

Wojciech Skonieczny



Mgr inż. Wojciech Skonieczny (1935) – absolwent Wydziału Łączności Politechniki Warszawskiej (1961); długoletni pracownik naukowy Instytutu Łączności w Warszawie (od 1955); zainteresowania naukowe: badania jonosferyczne, zagadnienia propagacji mikrofal i wpływu parametrów meteorologicznych na tę propagację, synchronizacja urządzeń transmisyjnych i centralowych (szczególnie w systemach SDH), technika sieci ATM.
e-mail: W.Skonieczny@itl.waw.pl

Andrzej Stachnik



Mgr inż. Andrzej Stachnik (1944) – absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1968); długoletni pracownik naukowy Instytutu Łączności w Warszawie (od 1968); autor licznych publikacji naukowych; współautor wielu patentów; zainteresowania naukowe: systemy przesyłania sygnałów wzorcowych częstotliwości i czasu, synchronizacja sieci telekomunikacyjnych.
e-mail: A.Stachnik@itl.waw.pl