

Artykuł recenzowany: Wpływ zakłóceń na pomiary GPS

GPS KONTRA ZAGŁUSZANIE

STRESZCZENIE: Wpływ zakłóceń na pomiary GPS. Czasami wykonanie pomiaru GPS jest z niewiadomych przyczyn niemożliwe lub otrzymane wyniki bardzo mocno odbiegają od zakładanych dokładności. Powodów najczęściej doszukujemy się w czynnikach zewnętrznych. Analizując różne przypadki wadliwych pomiarów, można stwierdzić, że najczęstszą przyczyną problemów są zakłócenia elektromagnetyczne. Oczywiście jest, że nie wszystkie i nie zawsze oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego powodują zanik lub degradację częstotliwości nadawanych przez GNSS. Dlatego Zespół Centrum Geomatyki Stosowanej wykonał szereg badań, których efekty zostały opisane w tym artykule. Generalizując, wpływ zewnętrznych pól magnetycznych można podzielić na dwie grupy: tzw. częstotliwości harmonicznych (których oddziaływanie może w określonych warunkach wpływać na odbiór sygnałów GPS) i celowe zakłócenia przy wykorzystaniu dostępnych w handlu urządzeń do eliminowania sygnałów GPS.

ABSTRACT: Influence of interferences on GPS measurements. Using GPS receivers we come across various problems related to the measurement accuracy. There are cases where the measurement procedures are hard to follow or a measurement is almost impossible and the results are far from being precise/perfect. The reasons of measurement failure might be different, but they are usually caused by the external factors. We may assume that the most possible explanation is the electromagnetic disturbance, but we should also remember that electromagnetic influence is not always the reason of GNSS frequencies fading and degrading. The Centre of Applied Geomatics has done a series of research and the results are described in this article. The influence of external electromagnetic field might be divided into two classes: harmonic frequency (which may, in certain environment, influence the GPS signals) and so called disturbance on purpose (which is obtained through the use of available disturbance equipment to eliminate GPS signals).

MARIUSZ FIGURSKI
MARCIN SZOŁUCHA
PIOTR MIELNIK
MARCIN GAŁUSZKIEWICZ
MACIEJ WRONA
PIOTR SZYMAŃSKI

W środkach masowego przekazu napotkać można informacje dotyczące problemów z użytkowaniem systemu GPS. Donoszą o nich np. kierowcy i żeglarze. Czy zawsze wynikają one ze złej eksploatacji urządzeń odbiorczych? Otóż nie. Okazuje się, że jedną z przyczyn problemów nawigacyjnych mogą być zakłócenia generowane przez źródła naturalne związane z ośrodkiem propagacji, a także promie-

niowanie radiowe (np. z radarów lub retransmiterów telefonii komórkowej) lub inne promieniowanie. Coraz częściej powodem kłopotów są też – pojawiające się również w Polsce – urządzenia skutecznie zakłócające działanie systemu GPS, popularnie zwane „zakłócaczami” lub „zagłuszaczami”. Są one powszechnie dostępne na portalach internetowych i sklepach w postaci małych pudełek o zasilaniu bateryjnym. Generują sygnały radiowe w zakresie częstotliwości pracy GPS o znacznie większej mocy niż sygnał docierający z satelity, powodując jego całkowity zanik. Zasięg działania takiego urządzenia jest niewielki, bo ok. 12 m, ale można znaleźć ich mocniejsze odpowiedniki działające w promieniu nawet kilkuset metrów.

Praktycznie żaden odbiornik w sąsiedztwie takiego źródła zakłóceń nie pracuje poprawnie i dotyczy to zarówno instrumentów nawigacyjnych, geodezyjnych, jak i instalowanych na stacjach referencyjnych. W dobie powszechnego wykorzystywania w pomiarach geodezyjnych systemu ASG-EUPOS uruchomienie źródła zakłóceń w pobliżu stacji referencyjnej spowoduje jej wyłączenie lub, co gorsza, zafałszowanie informacji. Mając na uwadze powyższe problemy, Centrum Geomatyki Stosowanej WAT od 2009 roku prowadzi badania dotyczące wpływu źródeł zakłóceń aktywnych na pomiary geodezyjne GNSS oraz metod ich wykrywania.

● WRAŻLIWOŚĆ SYGNAŁU GPS NA ZAKŁÓCENIA

Konstrukcyjnie urządzenie GPS przypomina zwykłe radio, które może odbierać jednocześnie dwie częstotliwości. Dlatego ciągłość i integralność uzyskiwanych wyników jest ściśle powiązana z jakością sygnału elektromagnetycznego odbieranego przez antenę odbiornika. Przeciętny użytkownik systemu GNSS (Global Navigation Satellite Systems) nie zastanawia się w codziennej pracy nad problemem mocy sygnału, który nadawany jest z odległości ok. 22 000 km przez satelity zasilane jedynie bateriami słonecznymi. Sygnał wygenerowany na każdym z nich musi pokonać wiele warstw atmosfery ziemskiej charakteryzujących się odmiennymi warunkami fizycznymi, które tłumią ten sygnał, a w skrajnych przypadkach uniemożliwiają jego pomiar.

Wielkości podawane w literaturze jako poziom sygnału odbieranego przez anteny GPS mogą zadziwić, jeżeli porównamy je z tradycyjnymi jednostkami fizycznymi. W technice radiowej poziom mocy sygnału jest określany z wykorzystaniem jednostki, jaką jest wat (W). Tabela 1 zawiera

TABELA 1. POZIOM SYGNAŁU W SYSTEMIE GPS [5]

Częstotliwość	Minimalny poziom sygnału		Maksymalny poziom sygnału	
	P	C/A	P	C/A
L1	-163 dBW	-160 dBW	-155 dBW	-153 dBW
L2	-166 dBW	-166 dBW	-158 dBW	-156 dBW

poziom mocy sygnałów L1 i L2 gwarantowany przez satelity GPS (wartości przy założeniu tłumienia całej atmosfery na poziomie 0,6 dBW). Przypomnijmy, że dBW to logarytmiczna jednostka mocy odniesiona do wata. Wartość -160 dBW odpowiada wielkości 0,0000000000000001 W (10^{-16} W). Odbiornik może utracić dane z satelitów z powodu sygnałów zakłócających, które często mają moc kilka rzędów większą niż minimalna odbierana przez odbiornik GPS. Ponadto dla prawidłowego odbioru sygnału GPS w przypadku śledzenia wymaga się od 6 do 10 dBW więcej na margines dla stosunku nośnej do szumu [3].

Mechanizmy zakłócające sygnał GPS można podzielić na naturalne, przypadkowe oraz celowe. Zakłócenia naturalne i przypadkowe powodują głównie efekty jonosferyczne, troposferyczne, ale również interferencje fal wtórnych, niezamierzone emisje sygnału na częstotliwościach radiowych lub blokowanie sygnału. Celowe zakłócenie sygnału obejmuje mechanizmy: *jammingu* (zagłuszenia), *spoofingu* (fałszowania) oraz *meaconingu* (zakłócenia i retransmisji). Jak widać, istnieje wiele możliwości zablokowania odbioru sygnałów z systemów nawigacji satelitarnej poprzez świadome lub nieświadome działanie osób czy instytucji.

● ZAKŁÓCENIA PROPAGACYJNE

Wpływ ośrodka propagacji na pomiar satelitarne analizuje się niezależnie dla dwóch warstw atmosfery o odmiennych własnościach fizykochemicznych, tj. troposfery i jonosfery. Tłumienie sygnału radiowego transmitowanego z satelity jest sumą tłumienia podstawowego L_0 w wolnej przestrzeni oraz tłumienia dodatkowego L_d zależnego od zjawisk propagacyjnych zachodzących w atmosferze ziemskiej, które z kolei jest sumą składników pochodzących od tłumienia troposfery i jonosfery [13]. Wpływ tych zjawisk redukuje się poprzez poprawki wyznaczone na podstawie jednego z kilku dostępnych modeli atmosfery.

Zjawiska propagacyjne zachodzące w części niezjonizowanej atmosfery, tzn. w troposferze (do kilkudziesięciu kilometrów nad Ziemią), mogące wpływać na

jakość sygnału satelitarnego to refrakcja troposferyczna i tłumienie troposferyczne. W praktyce wartości błędów refrakcji nie są duże przy założeniu, że obserwacje prowadzi się powyżej 5 stopni nad horyzontem i nie występują fluktuacje ośrodka będące wynikiem turbulencji mas powietrza. W przeciwnym razie należy uwzględnić fluktuacje refrakcji w funkcji czasu i przestrzeni powodujące rozpraszanie fali radiowej, zmiany jej amplitudy i fazy, a w konsekwencji – zmiany geometryczne trajektorii rozchodzenia się fali. Efekty te wzrastają wprost proporcjonalnie do częstotliwości. Głównym źródłem tłumienia troposferycznego są opady i gazy atmosferyczne. W pomiarach GNSS wpływ troposfery jest modelowany na podstawie danych meteorologicznych lub numerycznych modeli pogody. W zaawansowanych analizach wpływ troposfery, traktowany jako poprawka troposferyczna, jest rozkładany na dwie części: hydrostatyczną i moką. Pierwsza z nich zależy głównie od temperatury i ciśnienia i stanowi aż 90% całkowitej refrakcji. Pozostałe 10% to część mokra zależna od pary wodnej.

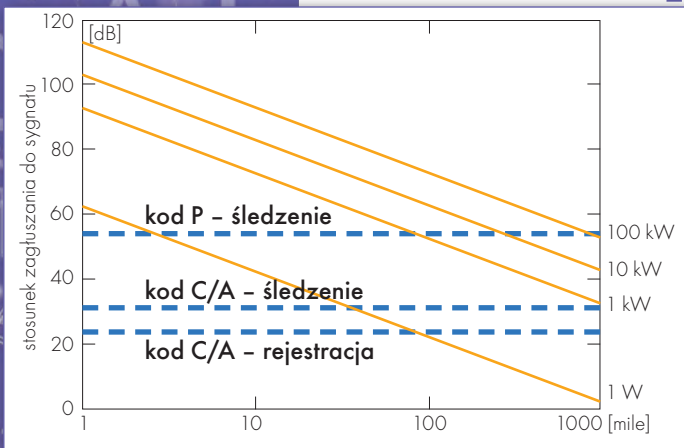
Drugą z omawianych warstw jest jonosfera, która rozciąga się od wysokości kilkudziesięciu kilometrów nad powierzchnią Ziemi do ok. 1000 km. Jest ona ośrodkiem zjonizowanym, gdzie przyczyną występowania zjawiska refrakcji jest zmiana gęstości elektronowej wraz z wysokością i związany z tym rozkład przenikalności elektrycznej, co wskazuje, że zjawisko refrakcji jest zależne od częstotliwości nadawanego sygnału. Dla zakresu częstotliwości pracy GPS maksymalna refrakcja i tłumienie sygnału powodowanego przez jonosferę zachodzi na wysokości ok. 350 km nad Ziemią. Refrakcja jonosferyczna jest funkcją aktywności słonecznej. W minimum cyklu aktywności słonecznej jej wpływ na fale radiowe w jonosferze jest niewielki, ale wzrasta bardzo mocno w okolicach maksimum, któremu towarzyszą burze jonosferyczne. Na obecnym poziomie wiedzy występowania burz nie można przewidywać i prognozować, nie można więc ich też poprawnie modelować. W praktyce w okolicach maksimum aktywności słonecznej refrakcja jonosfe-

PRZYDATNE DEFINICJE [1]

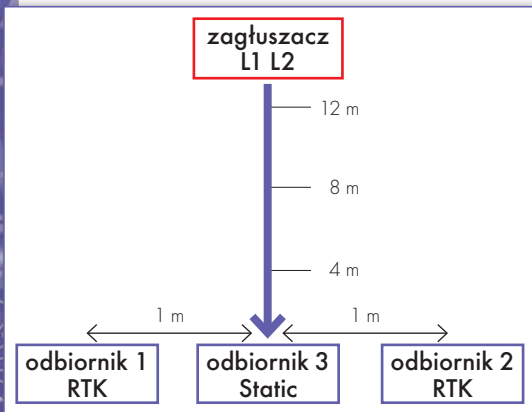
- **Szum (Noise)**. Niepożądany sygnał, który można podzielić na trzy zasadnicze kategorie: tło, modulacja, szum zakłócający.
- **Tło i szumy rezystancyjne (szumy termiczne, Johnsona – Background or Thermal Noise)**. Szum tła jest nieodłącznym składnikiem szumu systemu. Szum termiczny generowany jest przede wszystkim w pierwszym wzmacniaczu odbiornika.
- **Szum modulowany (Modulated Noise)**. Niepożądany sygnał, który wchodzi do systemu i oddziałuje na sygnał, używając systemu jego generowania i powodując niepożądane zmiany w jego jakości.
- **Szum zakłócający (Interference Noise)**. Działa na tej samej częstotliwości co sygnał właściwy i może go maskować (lub przeraścić) jako część pożądanego sygnału.
- **Źródła zakłóceń (Interference Source)**. Urządzenie elektroniczne, które emituje zakłócenia elektromagnetyczne.
- **Zakłócenia niezamierzone (Unintentional Interferences)**. Wszelkie nadajniki radiowe są potencjalnym źródłem zakłóceń GPS, o ile mają wystarczającą moc.
- **Zakłócenia zamierzone (Intentional Interferences)**. Różnego rodzaju zakłócenia taktycznie skierowane na odbiór sygnału GPS, które obejmują zagłuszenie, fałszowanie sygnału źródłowego oraz zakłócenie i ponowne nadawanie sygnału.
- **Zagłuszenie (Jamming)**. Świadomy akt transmisji, generowanie sygnału w tym samym paśmie co sygnał GPS.
- **Fałszowanie sygnału (Spoofing)**. Wiąże się z transmisją, wydawałoby się, legalnego sygnału, który jednak jest sygnałem fałszywym. Wyróżnić można dwie techniki prób oszukania odbiornika GPS: ● fałszowanie sygnału GPS, który odbierany jest przez odbiornik jako rzeczywisty i na jego podstawie wyznaczana jest błędna pozycja; ● przesyłanie informacji, że prawidłowy sygnał jest rzekomo fałszywy, co prowadzi do sytuacji, iż odbiornik interpretuje rzeczywisty sygnał jako błędny.
- **Zakłócenie i ponowne nadawanie sygnału (Meaconing)**. Zakłócenie i ponowne, opóźnione nadawanie sygnału na tej samej częstotliwości.

ryczna powoduje najwięcej błędów zarówno w pomiarach względnych, jak i bezwzględnych.

Do grupy błędów ośrodka można zaliczyć również wielodrożność sygnału polegającą na tym, że do odbiornika jednocześnie dociera fala bezpośrednio z satelity i fala odbita od przeszkody terenowej, które są między sobą przesunięte w fazie. Jedyną możliwością wyeliminowania tego błędu jest wybór miejsca pomiaru pozbawionego przeszkód terenowych, co w warunkach Polski jest czasami trudne do zrealizowania.



Rys. 1. Zależność mocy urządzenia zagłuszającego i stosunku mocy zagłuszania do sygnału użytecznego w funkcji odległości zagłuszacza od odbiornika GPS [4]



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

● NIEZAMIERZONE ZAKŁÓCENIA SYGNAŁAMI NA CZĘSTOTLIWOŚCIACH RADIOWYCH

Zagrożenie ingerencją w sygnał GPS stwarzają nadajniki radiowe, które emitują sygnał w paśmie L1. Obecne systemy, na które należy zwrócić uwagę, to VHF (sygnały radiowe wysokiej częstotliwości), kanały telewizyjne, szczególnie

urządzenia osobiste, jak np. telefony komórkowe. W przypadku częstotliwości L2 większe zagrożenie zakłóceniami istnieje głównie ze strony systemów radarowych [1, 3]. Wszystkie wymienione źródła nie wpływają bezpośrednio na częstotliwości L1 czy L2, ale ich pochodne mogą powodować lokalne zakłócenie funkcjonowania GPS objawiające się zupełnym zanikiem sygnałów nawigacyjnych.

● ZAKŁÓCENIA ZAMIERZONE

W związku z dynamicznym rozwojem różnego rodzaju systemów wojskowych, zaawansowanej broni i jednoczesnym uzależnieniem techniki od GNSS rozwijane są również mechanizmy zakłócenia oraz przeciwdziałania zakłóceniom. W przypadku GPS uprawnieni użytkownicy mogą korzystać z szyfrowanego kodu P(Y) nadawanego na obu częstotliwościach L1 i L2, jednak w większości współczesnych odbiorników stosowany jest jedynie sygnał C/A modulowany na częstotliwości L1 [3].

Z uwagi na militarny charakter GPS jego właściciel prowadzi politykę ewentualnego ograniczenia dostępu do sygnału dla przeciwników przy jednoczesnej możliwości wykorzystania go przez siły własne i sojusznicze (bez zbędnego zakłócenia lub uniemożliwienia korzystania przez odbiorców cywilnych poza rejonem konfliktu). Prowadzone są działania mające na celu rozwój systemów zakłóceń GPS i przeciwdziałania im pod nazwą NAVWAR (Navigation Warfare – działania wojenne w obszarze nawigacji). Ponadto niezamierzone lub naturalne za-

klócenia, takie jak efekty jonosferyczne czy przypadkowe RF, mogą stanowić tło do celowego zakłócenia systemu [3].

● MOC SYGNAŁU ZAGŁUSZAJĄCEGO

Szacuje się, że w określonych warunkach pomiarowych urządzenie zakłócające o mocy 1 W może spowodować całkowite zagłuszenie sygnału GPS w promieniu 10 km i utrudnić jego śledzenie w promieniu 85 km. W przypadku spoofingu nadajnik o podobnej mocy będzie skuteczny w promieniu 350 km, czyli de facto w promieniu ograniczonym horyzontem. Dokładny zakres działania i wymagana moc sygnału zagłuszającego zależą od: jego rodzaju (CW, szerokopasmowy itp.), wysokości, na jakiej znajduje się urządzenie zakłócające, promieniowania anteny, geometrii pomiędzy anteną GPS, satelitą i urządzeniem zakłócającym, ukształtowania terenu czy jakości odbiornika. Na rysunku 1 przedstawiono zależność pomiędzy mocą nadajnika zagłuszającego sygnał a wartością stosunku mocy zagłuszenia do sygnału w zależności od odległości urządzenia zagłuszającego od odbiornika GPS. Na wykresie poziomą przerywaną linią zaznaczono minimalny poziom stosunku sygnału zagłuszającego do sygnału użytecznego dla kodu C/A w przypadku rejestracji i śledzenia oraz dla kodu P w przypadku śledzenia.

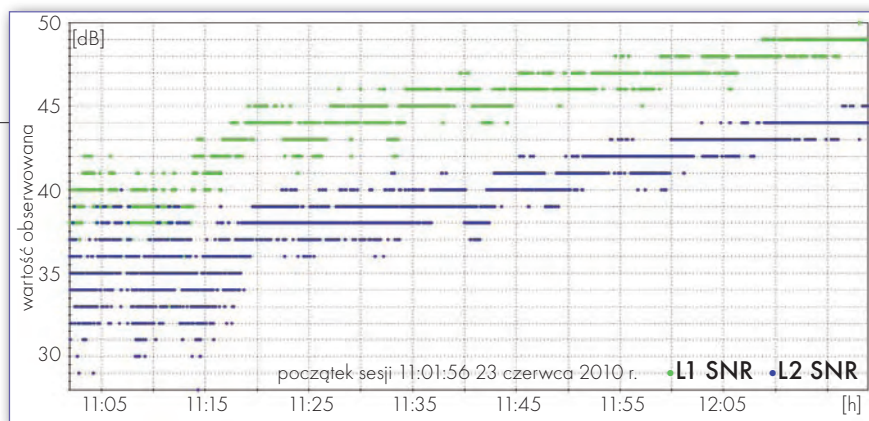
Jeżeli sygnał zagłuszający jest tego samego rodzaju co rozproszone widmo sygnału GPS, to przy tej samej mocy urządzenia zagłuszającego znacznie zwiększa się obszar jego skutecznego działania. Sygnały zakłócające mogą być generowane ze stosunkowo tanich urządzeń. W tabeli 2 podano potencjalne źródła zagłuszenia wraz z typem zakłóceń.

● WPŁYW SYGNAŁU ZAGŁUSZAJĄCEGO NA ODBIÓR SYGNAŁU GPS

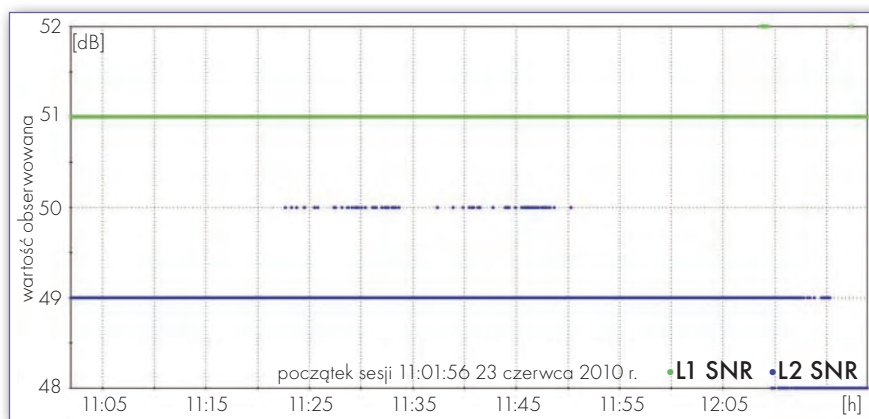
Geodeci, wykonując prace pomiarowe z wykorzystaniem obserwacji satelitarnych GPS, niejednokrotnie nie zdają sobie sprawy z różnorodności zakłóceń odbieranych sygnałów. Autorzy, analizując różne sytuacje występujące w czasie pomiarów satelitarnych GPS z wykorzystaniem techniki RTK, zauważyli istotne niewyjaśnione zakłócenia obserwacji występujące np. na terenach zurbanizowanych lub w okolicach lotnisk, które nie były wynikiem działania naturalnych źródeł degradujących sygnał nadawany przez satelity. Obserwacje te były stymulatorem wykonania badań w zakresie odporności na zakłóce-

TABELA 2. TYPY ZAKŁÓCEŃ I ICH ŹRÓDŁA [1, 2]

Zakłócenie	Źródło
Szerokopasmowe Gaussa	Zamierzony szum zakłócający
Szerokopasmowa modulacja fazowa lub częstotliwościowa	Telewizyjny nadajnik częstotliwości harmonicznych lub kierunkowe transmitery w zakresie bliskim mikrofal ustawione w kierunku odbiorników GPS
Szerokopasmowe widmo rozproszone	Zamierzone rozproszone widmo zakłóceń lub bliskie pola pseudolitów
Szerokopasmowe impulsy	Transmisja radarowa
Wąskopasmowa modulacja fazowa lub częstotliwościowa	Nadajniki częstotliwości harmonicznych AM lub CB
Wąskopasmowe omiatanie falą ciągłą	Zamierzone zakłócenie falą ciągłą lub zakłócenie częstotliwościami harmonicznymi FM
Wąskopasmowa fala ciągła	Zamierzone zakłócenie falą ciągłą lub w pobliżu pasma niemodulowanej fali nośnej



Rys. 3. Stacja WAT1: SNR dla częstotliwości L1 i L2, SV 27



Rys. 4. Stacja WAT1: SNR dla częstotliwości L1 i L2, SV 28

nia kilku wybranych odbiorników GNSS powszechnie stosowanych w pomiarach geodezyjnych. Do testów użyte zostały odbiorniki dwuczęstotliwościowe: dwa pracujące w trybie RTK z włączoną opcją rejestracji źródłowych obserwacji oraz jeden pracujący w trybie Fast Static. Jako odbiornik referencyjny wykorzystano stację referencyjną WAT1 oddaloną od pola testowego o około 300 m, będącą poza zasięgiem urządzeń zagłuszających, co potwierdziło badanie poligonu pomiarowego analizatorem widma pracującym w przedziale częstotliwości systemu GPS. Jako źródło zagłuszania wykorzystano dwa niezależne „urządzenia zagłuszające” pracujące na częstotliwości L1 i L2 o mocy 140 mW każde, co w praktyce przekłada się na zasięg skutecznego pogorszenia jakości sygnału w odległości maks. ok. 12 m od źródła. Urządzenia emitowały sygnał w paśmie o szerokości 1450-1600 MHz z częstotliwością środkową 1575,42 MHz dla L1 i 1150-1300 MHz i częstotliwością środkową 1227,60 MHz dla L2. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.

Testy przeprowadzono w trzech seriach, ustawiając źródło sygnału zakłócającego w odległości odpowiednio 12, 8 i 4 m od zestawu odbiorników. W każdej serii wykonano pomiar rzeczywisty, pomiar z zakłócaniem oddzielnie dla częstotliwości L1 i L2 oraz z jednoczesnym zakłócaniem obu częstotliwości L1+L2.

Pomiędzy realizacją każdej z faz danej serii wykonano 2-minutowe pomiary bez użycia urządzeń zakłócających.

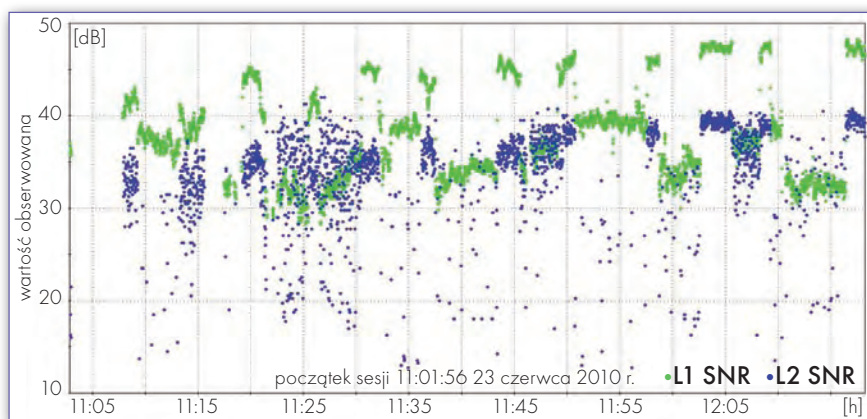
Dla każdego z odbiorników wybrano po dwa satelity obserwowane przez cały czas testów (SV 27 i SV 28), kierując

się analizą kąta ich elewacji nad horyzontem. W pierwszym przypadku rejestracja sygnału rozpoczęła się od wysokości ok. 10° nad horyzontem do około 40°, w drugim natomiast satelita prawie przez cały okres pomiaru był na wysokości w przedziale 60-70°. Na rysunkach 3 i 4 pokazane zostały odpowiadające im zmiany stosunku sygnału do szumu (SNR) obserwowane na stacji referencyjnej WAT1 uznane za wzorcowe ze względu na brak oddziaływania sygnału zakłócającego.

W przypadku odbioru niezakłóconego sygnału jego poziom zależy od wysokości topocentrycznej satelity oraz oczywiście od częstotliwości. Dla obserwowanych satelitów przedstawia się to następująco:

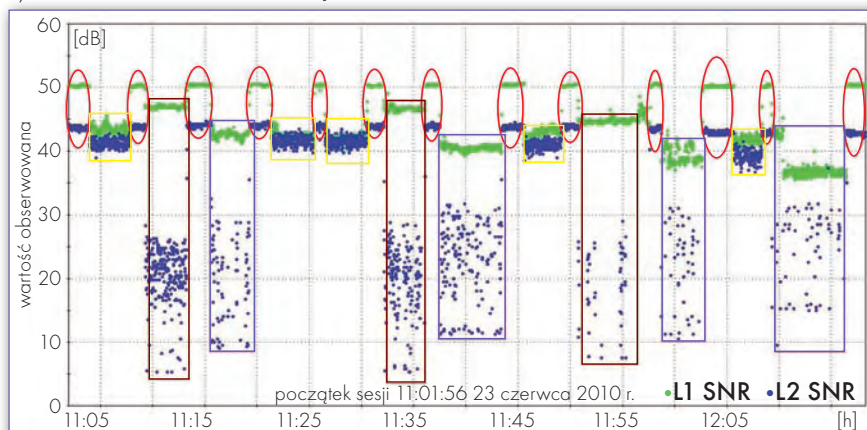
- SV 27 – L1 SNR od 38 do 50 dB,
L2 SNR od 32 do 44 dB,
- SV 28 – L1 SNR od 51 do 52 dB,
L2 SNR od 48 do 50 dB.

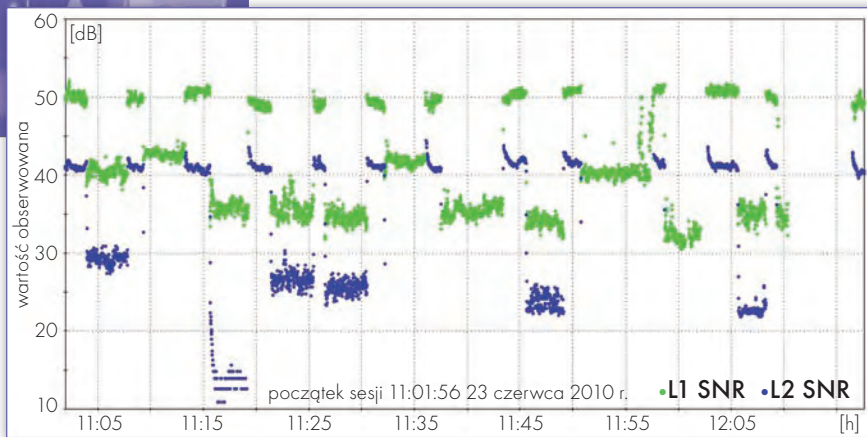
Na rysunkach 5 oraz 6 przedstawiono wartości SNR dla odbiornika nr 1 pracującego w trybie RTK z wykorzystaniem poprawek dystrybuowanych przez ASG-EUPOS i rejestracją surowych obserwacji. Wyraźnie widoczne są zmiany jakości sygnału spowodowane propagacją sygnału zakłócającego w poszczególnych przedziałach czasowych. W przypadku satelity SV 27 znacznie niższe wartości



Rys. 5. Odbiornik nr 1: SNR dla częstotliwości L1 i L2, SV 27

Rys. 6. Odbiornik nr 1: SNR dla częstotliwości L1 i L2, SV 28





Rys. 7. Odbiornik nr 3: SNR dla częstotliwości L1 i L2, SV 28

wyjściowe parametru SNR przekładają się na większy wpływ sygnału zakłócającego na odbierany sygnał. Obserwowane spadki wartości stosunku sygnału do szumu dla satelity SV 28 (rys. 6) wyraźnie powiązane są z poszczególnymi fazami przeprowadzonego eksperymentu. Na rysunku kolorem czerwonym (elipsy) zaznaczono pomiar bez wpływu sygnału zakłócającego, kolorem żółtym z włączonym urządzeniem emitującym sygnał w paśmie L1, kolorem brązowym – zakłócanie na częstotliwości L2 oraz kolorem fioletowym jednoczesne zakłócanie w paśmie L1 i L2.

Rysunek 7 przedstawia stosunek sygnału do szumów dla odbiornika nr 3 pracującego w tym samym czasie w trybie Fast Static i satelity SV 28. Zaobserwować można, że w zależności od typu odbiornika oraz typu anteny sygnał zakłócający różnie wpływa na rejestrowany sygnał użyteczny.

Na kolejnych rysunkach (8 i 9) przedstawiono zmiany współrzędnych płaskich x i y (w układzie 2000 strefa 7) w odniesieniu do wartości średniej wyznaczonej na podstawie serii pomiarów niezakłóconych dla jednego z odbiorników. Na rysunku 8 przedstawione są odchylenia w przypadku pomiarów RTK. Oś rzędnych opisuje czas pomiaru (w sekundach GPS), oś odciętych wartość odchylenia od pozycji uznanej za referencyjną (w metrach). Warto podkreślić fakt, iż odbiornik rejestrował dane w zasadzie w całym okresie pomiarów bez względu na rodzaj zakłócania. Jednakże widoczne są również znaczne odchylenia wyznaczonej pozycji ze względu na sygnał zakłócający. Dla porównania, na rysunku 9 przedstawiono odchylenia pozycji wyznaczonej w postprocesingu metodą kinematyczną na podstawie danych zarejestrowanych podczas pomiaru RTK tego samego odbiornika. Współrzędne obliczono z interwałem 1 s, a więc takim samym jak w przypadku pomiarów RTK. Widoczne na rysunku 9 nieciągłości pozycji wynikają z faktu degradacji sygnału użytecznego pod wpływem sygnału zakłócającego.

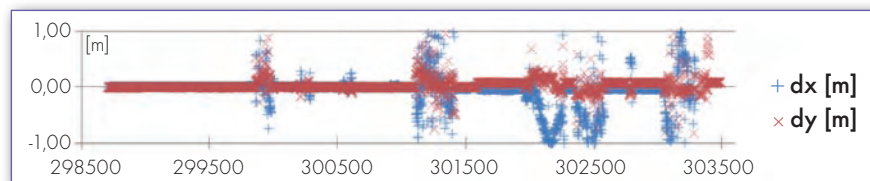
W celu oceny wpływu zakłóceń autorzy wykonali pomiary testowe z użyciem analizatora widma AARONIA AG HF-6065 V4 wraz z oprogramowaniem Aaronia Lcs Analyzer. Urządzenie to umożliwia analizę jakościową widma sygnału GPS na częstotliwościach L1 oraz L2. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wykres widma dla sygnału L1 zagłuszanego przy użyciu wcześniej opisanego urządzenia. Rysunek 10 pokazuje wartość odbieranej mocy sygnału GPS w zależności od częstotliwości. Wyraźnie widać wpływ sygnału zagłuszanego, który degraduje rzeczywisty sygnał GPS, uniemożliwiając jego poprawne śledzenie i rejestrowanie przez odbiornik. Na rys. 11 pokazano zmianę mocy sygnału dla określonego pasma częstotliwości w czasie. Oś rzęd-

nych zgodna jest z osią częstotliwości na rys. 10, oś odciętych pokazuje zmianę w czasie. Na podstawie barwy możemy określić moc sygnału w danym momencie dla danej częstotliwości.

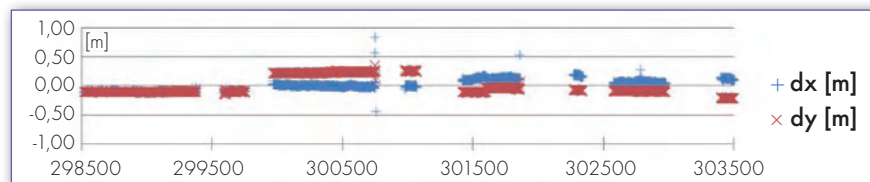
● POMIARY WIDMA CZĘSTOTLIWOŚCI DLA STACJI REFERENCYJNEJ

Według autorów istotnym elementem w procesie planowania lokalizacji stacji referencyjnych powinno być określenie możliwości występowania zakłóceń sygnału GPS w interesującym nas obszarze działania odbiornika. Pomiar widma sygnału umożliwia również ocenę wpływu ewentualnych zakłóceń na jakość odbioru sygnału na częstotliwościach L1 i L2.

W ramach współpracy z Instytutem Geofizyki PAN zespół z Centrum Geomatyki Stosowanej WAT wykonał pomiary widma częstotliwościowego dla planowanej lokalizacji stacji monitoringu geodynamicznego. Do analizy jakości widma częstotliwościowego wykorzystano wspomniany analizator AARONIA AG HF-6065 V4. Do odbioru sygnału zastosowano dwuczęstotliwościową aktywną antenę firmy Trimble (Zephyr Geodetic), odbiornik GPS L1L2 Trimble 5700



Rys. 8. Zmiany współrzędnych dx i dy dla pomiarów RTK

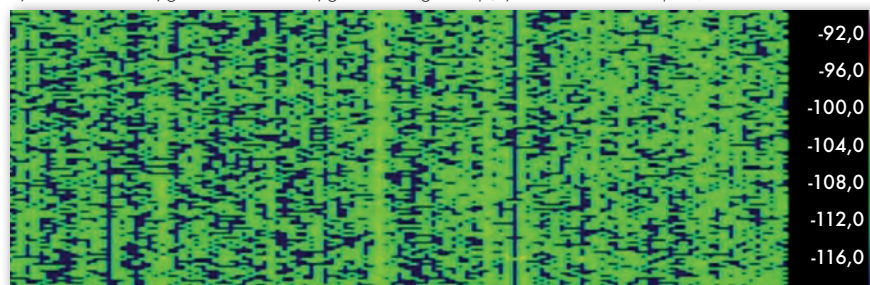


Rys. 9. Zmiany współrzędnych dx i dy dla pomiarów kinematycznych



Rys. 10. Widmo sygnału L1 wraz z sygnałem zagłuszanym (moc dla danej częstotliwości)

Rys. 11. Widmo sygnału L1 wraz z sygnałem zagłuszanym (moc dla danej częstotliwości w czasie)



oraz dzielnik sygnału. Założono, że tłumienie toru pomiarowego wynosiło 0 dB. Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na rysunkach 12 i 13. Pomiar dla częstotliwości GPS L1 (częstotliwość nośna 1575,42 MHz) przeprowadzono w przedziale od 1565,43 MHz do 1585,42 MHz (rys. 12).

Wykres na rysunku 13 przedstawia pomiar ciąglego sygnału trwający ok. 3 minut, na którym pokazano widmo sygnału GPS na częstotliwości L1. Oś rzędnych jest zgodna z osią częstotliwości na rys. 12, oś odciętych opisuje czas pomiaru. Kolorem oznaczona jest moc sygnału dla danej częstotliwości w danym momencie czasu wyrażona w dBm. Na rys. 12 oraz 13 widoczna jest charakterystyczna forma sygnału GPS. Bardzo wyraźnie zaznaczają się na wykresie „listki” na częstotliwościach 1572 MHz, 1576 MHz, 1582 MHz.

Pomiar dla częstotliwości GPS L2 (częstotliwość nośna 1227,6 MHz) wykonano dla przedziału od 1217,6 MHz do 1237,6 MHz (rys. 14). Struktura sygnału nie jest tu tak wyraźna jak w przypadku analogicznego wykresu odnoszącego się do badania częstotliwości GPS L1. Wynika to z działania wzmacniacza wysokoczęstotliwościowego w antenie odbiorczej i bramki próbkującej przetwornika analogowo-cyfrowego analizatora. Jednak mimo to można wyróżnić poszczególne „listki” widma. Nie widać również żadnych oznak innych urządzeń pracujących na zbliżonych częstotliwościach wpływających na jakość odbieranego sygnału dla nośnej L2.

Odstęp mocy sygnału od mocy szumu (S/N) w obydwu przypadkach wynosi 22 dBm i mieści się w normie opisanej Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification. Jedynym zjawiskiem wzbudzającym niepokój był przypadek spadku mocy sygnału o 3 dBW dla częstotliwości powyżej 1,2 GHz wynikający z właściwości dzielnika sygnałowego i/lub kabla doprowadzającego sygnał.

● **PODSUMOWANIE**
Zakłócenie jest zamierzonym lub niezamierzonym sygnałem, który wprost interferuje z sygnałem w paśmie częstotliwości L1 lub L2. GPS posiada pewne wewnętrzne mechanizmy, które w istotny sposób zwiększają jego odporność na zakłócenia. Jednym z nich jest wybór transmisji sygnału opartego na technice rozpraszania widma w systemach szerokopasmowych za pomocą ciągów kodowych (DSSS – Direct Sequence Spread). Jest to proces modulacji sygnału z kluczkowaniem bezpośrednim danych przez ciąg pseudoprzypadkowy, do którego należy odporność na zakłócenia. Jednym z elementów procesu modernizacji syste-

mu GPS jest włączenie dodatkowej częstotliwości sygnału, która będzie w związku z większą mocą lepiej przystosowana do przeciwdziałania zakłóceniom. Obecnie wiele systemów wyznaczania pozycji, nawigacyjnych oraz służby czasu opartych jest na systemie GPS i jednym z ważniejszych zadań jest ochrona integralności, dostępu, wykrywanie zakłóceń oraz lokalizacja ich źródeł, a także przeciwdziałanie tym zakłóceniom.

DR HAB. INŻ. MARIUSZ FIGURSKI

MGR INŻ. MARCIN SZOŁUCHA

MGR INŻ. PIOTR MIELNIK

MGR INŻ. MARCIN GAŁUSZKIEWICZ

MGR INŻ. MACIEJ WRONA

INŻ. PIOTR SZYMAŃSKI

(Wszyscy: Centrum Geomatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna; tylko Piotr Mielnik – Instytut Radioelektroniki WEL, WAT)

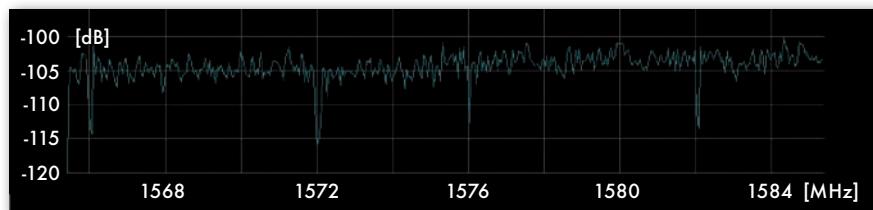
RECENZENT

PROF. DR HAB. IRENEUSZ WINNICKI

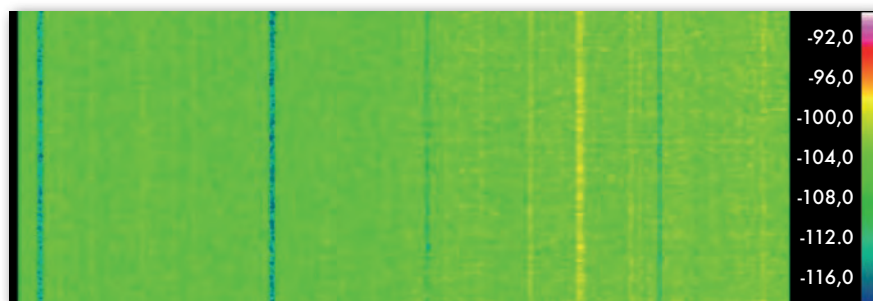
(dziekan Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT)

Literatura:

1. Asghar Tabatabaei Balaei, 2007: Detection, characterization and mitigation of interference in receivers for global navigation satellite systems, The University of New South Wales;
2. Glenn D. MacGougan, 2003: High Sensitivity GPS Performance Analysis in Degraded Signal Environments, The University of Calgary;
3. John A. Volpe, 2001: Vulnerability assessment of the transportation infrastructure relying on the global positioning system, National Transportation Systems Center;
4. Anthony Abbott, 2007: Antijamming and GPS for Critical Military Applications, Department of Defense, 2002;
5. C. Specht, 2007: System GPS;
6. B. Motella, S. Savasta, D. Margaria, F. Davis, 2010: Method to Assess Robustness of GPS C/A Code in Presence of CW Interferences, International Journal of Navigation and Observation;
7. Hui Hu, Na Wei, 2009: A Study of GPS Jamming and Anti-jamming, 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System;
8. Alison Brown, Dale Reynolds: Jammer and interference location system - design and initial test results, NAVSYS Corporation;
9. Gregory D. Rash: GPS Jamming in a Laboratory Environment, Naval Air Warfare Center Weapons Division (NAWCWPNS)/China Lake;
10. J. Knight, Ch. Cahn, S. Nair, 2007: A New Anti-Jamming Method for GNSS Receivers;
11. S. Basker, A. Grant, P. Williams, N. Ward, 2008: The Impact of GPS Jamming on the Safety of Navigation, Presented to the Civil GPS Service Interface Committee, Savannah GA, 15 September;
12. NAVSTAR Global Positioning System Interface Specification IS-GPS-200 Revision D, 2004;
13. H. Wven, P. Yih-Ru Huang, J. Dyer, A. Archinal, J. Fagan, 2003: Countermeasures for GPS signal spoofing, The University of Oklahoma;
14. R.J. Katulski, 2009: Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej.



Rys. 12. Widmo mocy sygnału GPS L1 (moc dla danej częstotliwości)



Rys. 13. Widmo sygnału GPS L1 (moc dla danej częstotliwości w czasie)

Rys. 14. Widmo sygnału GPS L2 (moc dla danej częstotliwości)

