

KOWALECZKO Piotr¹
SULKOWSKI Jarosław²

Podatność systemu nawigacji satelitarnej gps na zakłócenia i wynikające z niej zagrożenia dla transportu

systemy nawigacyjne,
zakłócenie, zagrożenia

Streszczenie

Praca dotyczy zagadnień podatności systemu nawigacji satelitarnej GPS na różnego rodzaju zakłócenia i pokazuje w jaki sposób mogą one wpłynąć na funkcjonowanie transportu. Omówiono podstawowe zasady działania odbiorników oraz możliwości wykorzystania systemów nawigacji w transporcie. Wskazano zasadnicze zalety i wady, jakie może powodować wprowadzenie systemów nawigacyjnych do logistyki/transportu.

THE SUSCEPTIBILITY OF THE GPS NAVIGATION SYSTEMS TO INTERFERENCES AND THE THREATS RESULTING FROM USING THEM IN THE TRANSPORTATION

Abstract

This paper is devoted to the problem of the GPS navigation system susceptibility to various kind of interferences. Their influence on the transportation is determined. The main principles of working of the GPS devices are discussed. Also the possibilities, the pros and the cons of utilizing the navigation systems at the transportation and logistics domain are analyzed.

1. WSTĘP

Obecnie globalne systemy nawigacji satelitarnej (GNSS) odgrywają niezwykle ważną rolę w wielu dziedzinach działalności człowieka. Ułatwiają one życie kierowcom, pozwalają dokonać dokładnych pomiarów inżynierom, ale także umożliwiają zlokalizowanie skradzionych obiektów czy też ułatwiają wykonanie precyzyjnych operacji bojowych przez pododdziały wojska. Jednocześnie powstaje wiele problemów, które wymagają rozwiązania. Zaliczyć do nich można między innymi:

- ocenę wpływu masowego stosowania GNSS na funkcjonowanie transportu;
- określenie ograniczeń użytkowych obecnie wykorzystywanych GNSS;
- ocenę bezpieczeństwa stosowania GNSS;

Ostatni ze wskazanych problemów ma zdaniem autorów kluczowe znaczenie. Zostanie mu poświęcona znaczna część artykułu. Wstępna część pracy zawiera ogólny opis działania systemu globalnej nawigacji satelitarnej i stanowi tło, dla analiz dotyczących zagadnień odporności/podatności GNSS na zakłócenia.

Praca oparta jest na badaniach prowadzonych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych dotyczących systemu nawigacyjnego GPS.

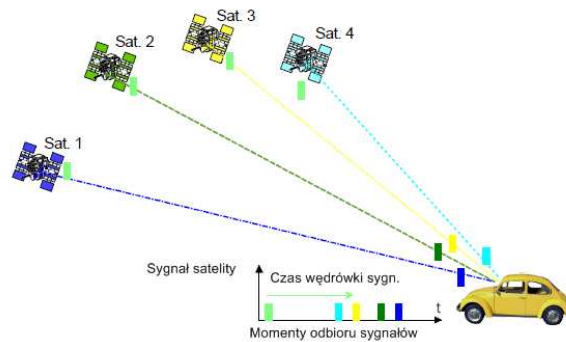
2. ZASADA DZIAŁANIA SYSTEMU GPS

2.1 Komponenty systemu GPS

System nawigacji satelitarnej GPS składa się z trzech podstawowych komponentów: komponentu użytkownika – odbiorników GPS podających pozycję, parametry nawigacyjne i czas (PNT), komponentu kosmicznego – układ 31 satelitów rozmieszczonych na 6 orbitach, oraz z komponentu naziemnego – stacji monitorujących i kontrolnych. Wyznaczanie pozycji odbiornika opiera się na pomiarze czasu propagacji odbieranych sygnałów, które nadawane są przez poszczególne satelity. Czasy te przeliczane są na odległości pomiędzy odbiornikiem i poszczególnymi satelitami. Schematycznie pokazano to na rys.1.

¹Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Integracji Systemów C4ISR; ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa, Tel. 22-6851-200, e-mail piotr.kowaleczko@itwl.pl

²Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Integracji Systemów C4ISR; ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa, Tel. 22-6851-947, e-mail jaroslaw.sulkowski@itwl.pl



Rys.1. Momenty odbioru sygnałów satelitów w zależności od odległości satelity [3]

2.2 Identyfikacja położenia odbiornika

Znając unikalny kod każdego z satelitów zawarty w emitowanym przez niego sygnale oraz czasy odebrania poszczególnych sygnałów można określić odległości między odbiornikiem a poszczególnymi satelitami. Sygnał każdego z satelitów zawiera komplet danych nawigacyjnych dotyczących wszystkich satelitów. Odbiór tych danych z pojedynczego satelity trwa 12,5 minuty. W praktyce czas ten ulega zasadniczemu skróceniu ze względu na to, że odbiornik gromadzi jednocześnie dane z kilku satelitów.

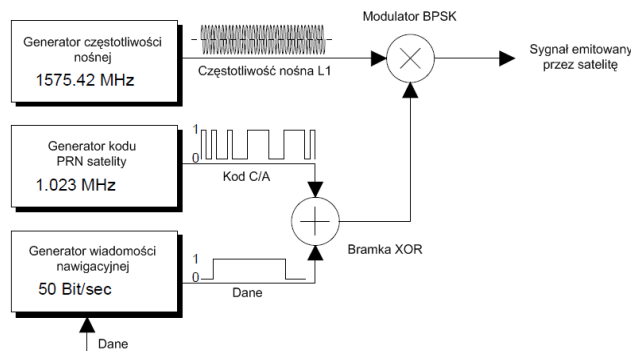
W oparciu o znajomość położenia satelitów w danej chwili oraz o pomiar odległości pomiędzy satelitami a odbiornikiem, wyliczane jest położenie odbiornika na powierzchni Ziemi. Wyliczenie polega na rozwiązaniu układu równań liniowych. Pozycja odbiornika jest zazwyczaj podawana jako wartości: długości i szerokości geograficznej oraz wysokości nad poziomem morza.

Współcześnie użytkowane odbiorniki są zazwyczaj wyposażone w mapy cyfrowe, tak aby poza współrzędnymi geograficznymi dostarczyć użytkownikowi także dodatkowe informacje dotyczące niektórych punktów odniesienia (drogi, budynki itp.)

Aby istniała możliwość wyznaczenia pozycji odbiornika, konieczne jest odebranie sygnałów emitowanych przez co najmniej trzy satelity. W tym przypadku możliwe jest ustalenie długości i szerokości geograficznej odbiornika. Aby uzyskać informację dotyczącą wysokości należy odbierać sygnał co najmniej czterech satelitów.

2.3 Identyfikacja satelity

W celu zapewnienia możliwości określenia numeru identyfikacyjnego satelity na podstawie odbieranego sygnału, wykorzystywana jest dwustanowa modulacja kluczkowania fazy fali nośnej specjalnie przygotowanym kodem modulującym PRN (Pseudo Random Noise). Kod ten dla standardowego serwisu dostarczanego przez system GPS określa się jako kod C/A. Częstotliwość generowania bitów kodu C/A wynosi 1,023 MHz, z okresem powtarzania 1023. Każdy z satelitów posiada przyporządkowany sobie ciąg kodu. Kody dla różnych satelitów generowane są w bardzo podobny do siebie sposób, jednak kody C/A poszczególnych satelitów różnią się między sobą znacząco. Wynika to z konieczności jednoznacznej identyfikacji satelity na podstawie odbieranego kodu, realizowanej poprzez układy korelacyjne porównujące kody odebrane z wzorcowymi (przechowywanymi w pamięci lub generowanymi przez odbiornik). Jeśli dwa ciągi kodowe C/A identyfikujące satelity były by skorelowane, korelacja z wzorcami kodu C/A odbiornika osiągała by wysoką wartość, co uniemożliwiałoby jednoznaczną identyfikację satelity. Wygenerowany kod satelity (po dodaniu do niego tzw. wiadomości nawigacyjnej) jest wykorzystywany do modulacji częstotliwości nośnej L1 (1575,42 MHz) systemu GPS. W ten sposób przygotowany sygnał jest wysyłany przez nadajniki satelity. Sposób generacji sygnału przedstawiony został na rys.2.



Rys.2. Schemat generowania sygnału emitowanego przez satelitę [3]

Z opisanych powyżej zasad funkcjonowania systemu GPS wynikają bezpośrednio potencjalne sposoby zakłócania takiego systemu.

3. MOŻLIWE SPOSOBY ZAKŁÓCANIA SYSTEMÓW GPS

Zakłócanie systemu GPS polega na uniemożliwieniu odbiornikowi prawidłowego określenia własnego położenia. Możliwe jest to poprzez ingerencję w sygnały, które do odbiornika docierają.

Rozpowszechnione są dwie podstawowe metody zakłócania odbiorników GPS. Są to zagłuszanie i fałszowanie sygnału. Celem tego typu działań może być, bądź to uniemożliwienie jakiegokolwiek wyznaczenia pozycji (zagłuszanie), bądź też fałszowanie informacji tak, aby współrzędne wyznaczono błędnie. W dalszej części przedstawione zostaną opisy tych dwóch metod.

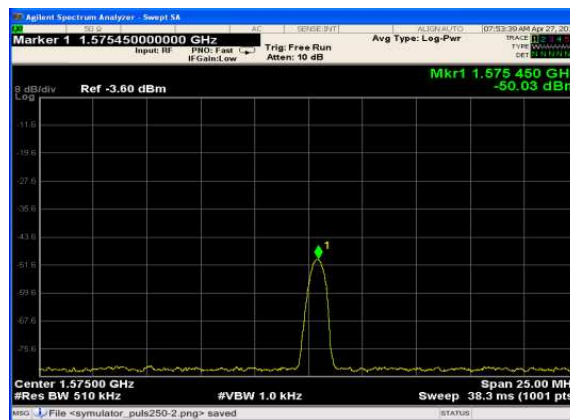
3.1 Zagłuszanie (jamming)

Celem zagłuszania jest przerwanie dostępności sygnału docierającego do odbiornika. Tego typu zakłócenia mogą spowodować uszkodzenie odbiornika, jednak ich zasadniczym celem jest uniemożliwienie dekodowania jakiegokolwiek sygnału GPS przez odbiornik.

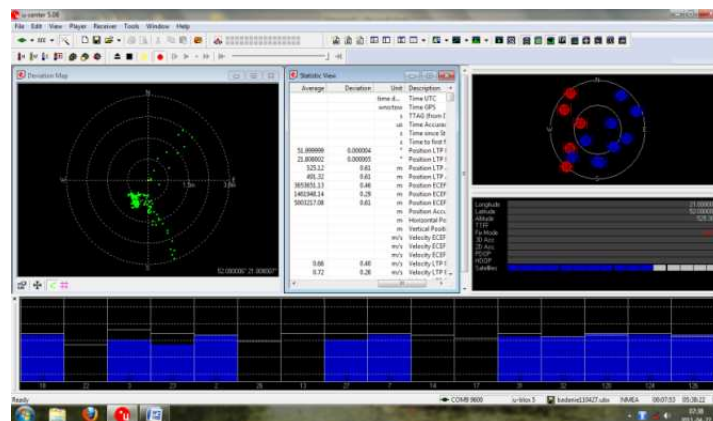
Najprostszą metodą jamming'u jest emitowanie w kierunku odbiornika GPS fali elektromagnetycznej na częstotliwości nośnej L1 (1575,42 MHz). Przeprowadzone badania pokazują, że kluczowe znaczenie dla tej metody ma to czy emitowane zakłócenia mają charakter ciągły czy impulsowy, oraz czy częstotliwość fali zakłócającej pozostaje niezmienna, czy też lekko zmienia się w czasie. Analizie poddano niżej opisane przypadki.

3.1.1 Zakłócenia ciągłe przy niezmiennej częstotliwości

W tym przypadku odbiornik wykazuje dość dużą odporność na zakłócenia. Jest to zgodne zarówno ze specyfikacją techniczną systemu jak i analizami teoretycznymi. Zakłócenia wąskopasmowe o niezmiennej częstotliwości i amplitudzie są przez odbiornik skutecznie tłumione do poziomu 40 dB stosunku sygnał/szum. Badania przeprowadzono z użyciem generatora sygnałów (źródło sygnału zakłócającego) oraz symulatora konstelacji satelitów GPS (źródło sygnałów satelitów). Widmo sygnału zakłócającego, okno aplikacji odbiornika prezentujące jego niepoprawną pracę oraz wyniki badań zamieszczono odpowiednio na rysunku 3, rysunku 4 i w tabeli 1.



Rys.3. Widmo fali elektromagnetycznej zakłócającej (stała częstotliwość i amplituda)



Rys.4. Brak możliwości ustalenia pozycji w odbiorniku GPS (niebieskie słupki - stosunek sygnał/szum dla poszczególnych satelitów)

Tab. 1. Wyniki badań wpływu zakłócania falą o stałej częstotliwości i amplitudzie

Stosunek mocy zakłócenie / sygnał [dB]	Liczba pomiarów	Liczba wyznaczonych pozycji 3D	Odchylenie standardowe zmiany stosunku sygnał / szum odbieranych satelitów [dBHz]	Wartość procentowa wyznaczeń pozycji w stosunku do liczby pomiarów [%]
18	142	142	0,15	100
28	64	64	0,24	100
38	64	64	0,28	100
48	91	0	0,8	0

3.1.2 Zakłócenia impulsowe przy niezmienniej częstotliwości

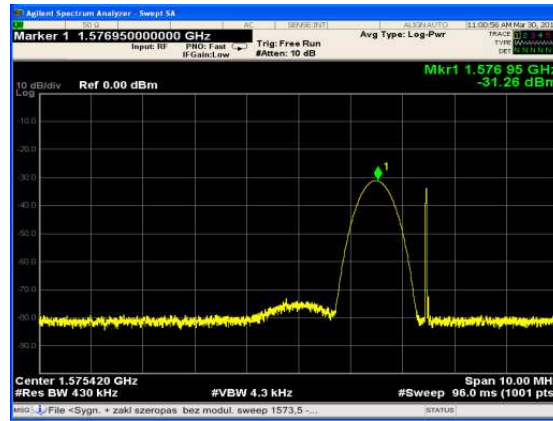
W przypadku, gdy sygnałem zakłócającym będzie fala o stałej częstotliwości, ale zmiennej w czasie amplitudzie (stuprocentowa amplitudowa modulacja symetryczna impulsowa), zarówno czas potrzebny na „wybicie” odbiornika z poprawnej pracy jak i potrzebna do tego energia, są mniejsze. Praca odbiornika zostaje zakłócona przy stosunku mocy sygnału zakłócającego do użytecznego większym już od ok. 30 dB. Potwierdzają to wyniki zamieszczone w tabeli 2. Dodatkowo, praca urządzenia w warunkach zakłócenia jest niestabilna, zmienna w czasie, z tendencją do pogarszania się (stałej utraty możliwości określenia pozycji) wraz ze wzrostem czasu ekspozycji na zakłócenie.

Tab. 2. Wyniki badań wpływu zakłócania falą o stałej częstotliwości i zmiennej amplitudzie

Czas trwania impulsu sygnału [ms]	Stosunek mocy zakłócenie / sygnał [dB]	Liczba pomiarów	Liczba wyznaczonych pozycji 3D	Odchylenie standardowe zmiany stosunku sygnał / szum odbieranych satelitów [dBHz]	Wartość procentowa wyznaczeń pozycji w stosunku do liczby pomiarów [%]
250	8	122	122	2,36	100
250	18	120	120	3,25	100
250	28	233	233	4,28	100
250	38	646	476	4,82	74
250	48	145	0	6,33	0
50	38	108	85	2,77	79
75	38	395	302	4,07	76
100	38	393	341	2,82	87
150	38	503	298	5,22	59
200	38	122	29	6,89	24
250	38	215	52	2,35	24
257	38	921	441	7,78	48
300	38	340	264	7,92	78
500	38	464	238	5,49	51

3.1.3 Zakłócenia impulsowe przy zmiennej częstotliwości

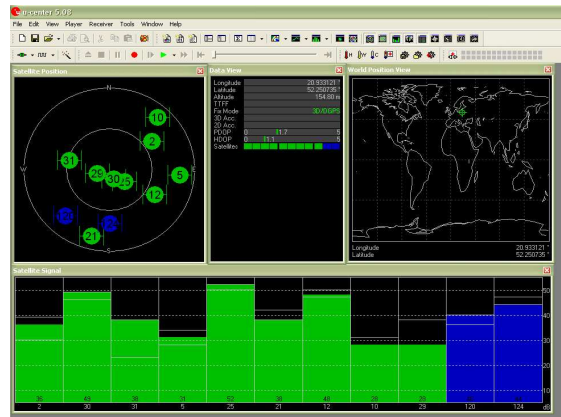
Trzeci rodzaj przeprowadzonych przez autorów badań dotyczył wpływu zakłócania sygnału GPS wąskopasmową falą ciągłą przemiatającą (o zmiennej częstotliwości środkowej). Przemiatanie odbywało się w sposób krokowy z czasem przemiatania 100 ms w zakresie 1573-1577 MHz. Widmo sygnału zakłócającego przedstawiono na rysunku 5.



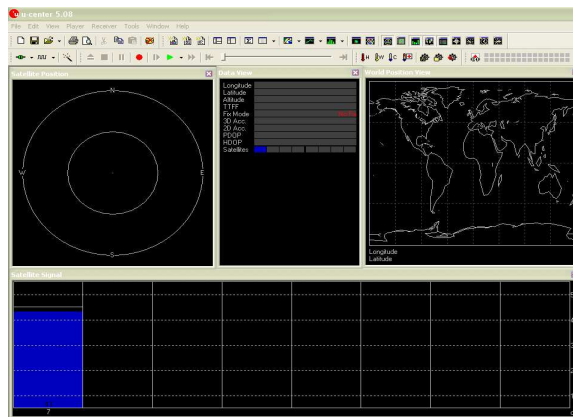
Rys.5. Widmo sygnału zakłócającego – wąskopasmowa fala ciągła przemiatająca

Włączenie zewnętrznego źródła zakłóceń spowodowało gwałtowną zmianę parametrów pracy odbiornika. Zmiana ta w początkowym czasie oddziaływania zakłóceń spowodowała skokową zmianę stosunku sygnał/szum określanego przez odbiornik, następnie utratę możliwości śledzenia sygnałów z satelitów, aż finalnie uzyskano brak odbioru sygnałów z wcześniej śledzonych satelitów. Informacja o satelitach znajdujących się w obszarze horyzontu radiowego, jak i ostatnia pozycja odbiornika były nadal przechowywane przez odbiornik. Brak odbioru sygnałów z satelitów uniemożliwił określenie pozycji własnej odbiornika. Brak odbioru sygnałów z satelitów utrzymywał się w sposób ciągły i nieprzerwany w czasie pracy zewnętrznego źródła zakłóceń.

Przeprowadzone przez autorów badania [2] wykazały, że istnieje także dość skuteczna metoda jamming’u opierająca się o fałszowanie sygnałów nadawanych przez satelity. Polega ona na wygenerowaniu odpowiedniego dla symulowanego satelity kodu C/A. Było to możliwe, ponieważ cała dokumentacja techniczna sposobu generowania kodów jest powszechnie dostępna. Przy generowaniu zdecydowano się na struktury programowalne FPGA, z uwagi na ich dość prostą budowę (w porównaniu z innymi mikrokontrolerami) i duże możliwości w zakresie generowania ciągów kodowych. Do wygenerowanych bitów kodu C/A dodawana jest informacja (wiadomość) nawigacyjna. Umożliwia to odbiór przez odbiornik danych dotyczących efemeryd i almanachów orbit, poprawek jonosferycznych i dokładnych czasów/korekt zegarów. Spreparowany w ten sposób ciąg bitów zostaje następnie podany na wejście modulatora BPSK, który moduluje nim sygnał o częstotliwości nośnej L1 (1575,42 MHz). Tak przygotowany sygnał został podany na wejście odbiornika GPS w celu sprawdzenia czy urządzenie rozpozna konkretnego satelitę. Rysunek 6 przedstawia działanie aplikacji odbiornika GPS w przypadku rzeczywistego sygnału dostarczanego do odbiornika, zaś rysunek 7 prezentuje analogiczną sytuację dla sygnału symulowanego.



Rys.6. Aplikacja odbiornika GPS po podaniu na wejście urządzenia sygnału rzeczywistego (poprawne wyznaczenie pozycji – zielone słupki sygnałów satelitów)



Rys.7. Aplikacja odbiornika GPS po podaniu na wejście urządzenia symulowanego sygnału satelity nr 7

Każdy ze słupków przyporządkowany jest konkretnemu satelicie (numer satelity pod słupkiem), jego wysokość świadczy o stosunku mocy sygnał/szum, zaś kolor informuje czy jest on wykorzystany do wyliczenia pozycji (zielony) czy też nie (niebieski). Możliwe okazało się także wygenerowanie kilku sygnałów poszczególnych satelitów jednocześnie.

Wygenerowany w ten sposób sygnał został następnie podany na antenę kierunkową i skierowany na odbiornik wyznaczający pozycję na podstawie rzeczywistego sygnału. Okazało się, że odbiornik był wytrącony z pracy przy stosunku mocy sygnał/szum sygnału zakłócającego większym od stosunku mocy sygnał/szum sygnału rzeczywistego już o 25-30 dBm. System przestawał wyznaczać poprawną pozycję po około 30 sekundach od rozpoczęcia zakłócania. Okres ten był krótszy w przypadku, gdy symulowanych było więcej satelitów, szczególnie gdy symulowane były te satelity, które były rzeczywiście odbierane przez odbiornik. Prędkość wytrącania z pracy odbiornika jest także wprost proporcjonalna do mocy sygnału zakłócającego.

W przypadku, gdy wygenerowano by sygnały co najmniej 4 satelitów (z uwzględnieniem ich opóźnień między sobą, oraz zmian częstotliwości nośnej wynikających z częstotliwości dopplerowskich) było by możliwe „przekazanie” odbiornikowi fałszywych danych powodujące wyznaczenie przez niego błędnej pozycji (spoofing) a nie tylko zwykłe wytrącenie go z pracy. Wykorzystanie wygenerowanych kodów C/A w sygnale zakłócającym pozwala ograniczyć minimalną moc sygnału zakłócającego w porównaniu do zakłócania sygnałem niemodulowanej wąskopasmowej fali nośnej o częstotliwości L1.

3.2 Fałszowanie (spoofing)

Przy tego rodzaju zakłóceniach, fałszowane zostają dane porównywane w procesie replikacji kodu GPS, co powoduje błędne wyznaczenie na ich podstawie pozycji odbiornika. Można wyróżnić trzy rodzaje oddziaływania w celu obniżenia dokładności i jakości otrzymanej pozycji:

- programowe fałszowanie kodu – do oprogramowania odbiornika zostaje wgrane tzw. złośliwe oprogramowanie (malware), które to powoduje nieprawidłowe wyznaczenie pozycji. Co więcej, odbiornik może nie wykazywać oznak niepoprawnej pracy.
- fałszowanie poprawek różnicowych – fałszowane zostają sygnały korekt przesyłanych w systemach różnicowych. Nie jest to specjalnie niebezpieczne ponieważ korekty poprawiają wyznaczoną pozycję odbiornika od 1 do 3 metrów, więc ewentualne zakłócenia mogłyby wprowadzić przekłamania tylko w takim zakresie.
- fałszowanie sygnałów nadawanych przez satelity. Odbiornik otrzymuje specjalnie spreparowane, fałszywe sygnały i interpretuje je jako prawdziwe, wyznaczając błędnie pozycję.

Tego rodzaju zakłócenia z punktu widzenia atakującego są lepsze niż zakłócenia zagłuszające, gdyż możliwe jest wytrącenie odbiornika z poprawnej pracy z użyciem znacznie mniejszej ilości potrzebnej do tego energii. Dodatkowo, w przeciwieństwie do stosunkowo łatwego do wykrycia zagłuszenia, użytkownik odbiornika może nie być w stanie stwierdzić, że urządzenie jest zakłócanie.

Przeprowadzono szereg badań [1] dotyczących możliwości zakłócania odbiornika sygnałami generowanymi przez symulator konstelacji GPS. Okazało się, że przy pracującym na rzeczywistym sygnale odbiorniku, po wprowadzeniu zakłóceń z symulatora większych już o ok. 10 dB, odbiornik przestaje pracować stabilnie, aby po chwili przejąć fałszywe sygnały i podać użytkownikowi fałszywą pozycję. Im większa jest różnica w poziomach sygnałów (rzeczywisty – zakłócający) tym szybciej następuje proces przejścia sfałszowanych danych. Warunkiem na skuteczne zakłócenie jest jednak konieczność przesyłania sygnałów dla satelitów widocznych tuż przed rozpoczęciem zakłócania. Nie jest więc możliwe fałszowanie sygnału w taki sposób, aby odbiornik działający np. w Polsce miał pod wpływem ataku zacząć wskazywać pozycję np. w Australii.

4. ZAGROŻENIA WYNIKAJĄCE Z ZASTOSOWANIA SYSTEMÓW GPS W TRANSPORCIE

Systemy nawigacji satelitarnej są obecnie jedną z podstaw funkcjonowania branży transportowej. Wyznaczając optymalną trasę przejazdu, prowadząc nią kierowcę oraz informując go o ewentualnych utrudnieniach znacząco ułatwiają i

usprawniają ich pracę. Możliwe jest precyzyjne określenie gdzie i kiedy dany pojazd się znajdował, a więc także określenie kiedy można spodziewać się dostawy produktu do adresata. Systemy nawigacji są szczególnie ważne w przypadku transportu drogą morską czy powietrzną, gdzie tak naprawdę są one podstawowym urządzeniem do wyznaczania trasy.

Kolejną możliwością oferowaną branży transportowej przez systemy GPS jest możliwość namierzenia skradzionego pojazdu lub towaru. Zamontowany w nim nadajnik korzystając z modułu GPS ustala pozycję, i wysyła ją (np. przez sieć GSM) do centrum monitoringu. Obiekt może być więc w miarę szybko odzyskany. Warunkiem jest, aby urządzenie miało możliwość odebrania sygnału i wysłania danych do centrum. Jeśli osoby przywłaszczające sobie obiekt wiedzą o istnieniu nadajnika, mogą zabezpieczyć się przed namierzeniem przez fizyczne odcięcie możliwości komunikacji np. umieszczenie pojazdu w kontenerze uniemożliwiającym odebranie sygnału GPS, lub prosty demontaż urządzenia. Opisane powyżej sposoby zagłuszania mogą stanowić dość poważne zagrożenie przy standardowym wykorzystaniu systemów nawigacyjnych.

Proste zakłócenie sygnału GPS może być spowodowane zarówno celowym działaniem (np. działaniem konkurencji), jak i przypadkowymi zakłóceniami emitowanymi na przykład przez urządzenia mechaniczne w pobliżu fabryk itp. Należy mieć na uwadze, że tego typu zakłócenia mogą (zgodnie z opisanymi wyżej wynikami badań) doprowadzić nawet do całkowitego uniemożliwienia ustalenia pozycji. To z kolei może wiązać się ze zmianą trasy przewozu (co w przypadku transportu morskiego lub powietrznego może nawet spowodować katastrofę) lub z uniemożliwieniem zlokalizowania pojazdu w bazie. Zakłócenia typu „jamming” mogą także narazić spedytora na dodatkowe koszty w przypadku, gdy systemy nawigacji wykorzystuje się w bazach przeładunkowych do określania pozycji obiektów. Możliwa jest sytuacja, gdy na przykład dźwig przetransportuje na statek nie ten kontener, który miał być na nim umieszczony.

Znacznie groźniejsze są jednak zakłócenia fałszujące (spoofing). O ile proste zakłócenie odbiorników jest od razu widoczne dla użytkownika (brak stabilności pracy), o tyle umiejętne fałszowanie sygnału jest w zasadzie niewykrywalne. Odbiornik pokazuje użytkownikowi prawidłowo wyliczoną na podstawie dostarczonych mu danych pozycję. W przypadku transportu możliwe jest więc podawanie fałszywego sygnału pojazdowi przewożącemu cenny sprzęt, skierowanie go w ustalone miejsce i dokonanie rabunku towaru. Można także znacznie opóźnić wykrycie napadu przez centrum monitoringu, poprzez wysyłanie odpowiednio spreparowanego sygnału do odbiornika. Podczas gdy ładownia pojazdu będzie okradana, odbiornik będzie wyliczał i transmitował do centrum kolejne zgodne z trasą przejazdu pozycje. W rezultacie wykrycie napadu będzie niemożliwe. Prawdopodobieństwo użycia tego typu rozwiązań przez przestępców jest jednak dość niewielkie z uwagi na bardzo duży koszt urządzeń zakłócających i ich stopień skomplikowania.

Bardzo duży wpływ na możliwość zakłócania, ma używany rodzaj odbiornika. Poziom zakłóceń wystarczający do wytrącenia z pracy jednego urządzenia może okazać się niewystarczający w przypadku innego.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zakłócenie odbiorników nawigacji satelitarnej GPS może stanowić dosyć poważne ryzyko dla systemów nawigacyjnych używanych w transporcie. O ile znacznie groźniejsze metody fałszujące są dość trudne do wykorzystania, o tyle proste metody zagłuszania mogą zostać użyte przez niepowołane osoby przy stosunkowo niskim nakładzie kosztów, mogąc spowodować poważne straty spedytorów. Bardzo dużą rolę w odporności systemu na zakłócenia ma rodzaj użytego odbiornika. Prowadzi to do konkluzji, że w przypadku wykorzystania systemów nawigacyjnych w transporcie, nie można im bezgranicznie zawierzyć. Nie powinny one być jedynym systemem wspomagającym działanie tej branży gospodarki.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Praca zbiorowa: *Wpływ spoofing'u na poprawność określania pozycji przez odbiornik GPS*, ITWL 2010
- [2] Praca zbiorowa: *Opracowanie technologii zagłuszania i przeciwdziałania celowym zakłóceniom systemów nawigacji satelitarnej GNSS*, ITWL 2011
- [3] Praca zbiorowa: *GPS Essentials of Satellite Navigation Compendium*, u-blox AG 2009