



Jacek Januszewski*

WPŁYW NAWIGACYJNYCH SYSTEMÓW SATELITARNYCH NA EFEKTYWNOŚĆ INTELIĞENTNYCH SYSTEMÓW TRANSPORTOWYCH

Streszczenie: Nieprzerwaną informację o pozycji użytkownika zapewniają nawigacyjne systemy satelitarne (NSS). Obecnie (wrzesień 2017 r.) w pełni operacyjne są dwa systemy globalne, GPS i GLONASS, dwa kolejne, także globalne, Galileo i BeiDou są w budowie. Kilkaset milionów odbiorników tych systemów wykorzystywanych jest we wszystkich gałęziach transportu, czyli drogowym, kolejowym, morskim i lotniczym. Dokładność pozycji zależy od parametrów NSS, szerokości geograficznej użytkownika i widzialności satelitów w rejonach ograniczonych. Ostatni parametr musi być brany pod uwagę w transporcie drogowym, szczególnie w tzw. kanionach miejskich, znaczenie ma orientacja ulicy, jej szerokość oraz wysokość zabudowy. W artykule omówiono wpływ pozycji satelitarnej na efektywność inteligentnych systemów transportowych.

Wprowadzenie

Inteligentne systemy transportowe (IST) to połączenie technologii informacyjnych i komunikacyjnych z infrastrukturą, mające na celu świadczenie usług związanych z różnymi gałęziami transportu, szczególnie z transportem lądowym i zarządzaniem w nim ruchu. Realizacja zadań transportowych, w tym zarządzanie ruchem pojazdów, uwarunkowana jest nieprzerwaną znajomością, i to z odpowiednią dokładnością, bieżącej pozycji wszystkich pojazdów uczestniczących w programie. Źródłem tego rodzaju informacji mogą być, a w połowie drugiej dekady XXI w. najczęściej są, nawigacyjne systemy satelitarne (NSS) o zasięgu globalnym, umożliwiające użytkownikom w dowolnym momencie i w dowolnym punkcie na Ziemi przy nieograniczonej widzialności satelitów, określenie ich aktualnych współrzędnych w czasie rzeczywistym.

Przeprowadzone autorskie badania miały na celu udzielenie jednoznacznej odpowiedzi na takie pytania, jak:

- w jakim stopniu korzystanie z NSS uzależnione jest od szerokości geograficznej użytkownika, czy każdy z nich zapewnia nieprzerwane określanie pozycji,

* Akademia Morska w Gdyni.

- który z systemów zapewnia największą dokładność określonej pozycji,
- w jakiej mierze korzystanie z systemu w mieście uzależnione jest od parametrów ulicy i jej orientacji względem północy.

1. Nawigacyjne systemy satelitarne

Umieszczenie w latach 50. XX w. na orbicie okołoziemskiej pierwszych sztucznych satelitów Ziemi, a kilka lat później wprowadzenie na rynek atomowych wzorców czasu oraz zbudowanie w latach 70. XX w. mikroprocesorów przyczyniło się do powstania dwóch pierwszych nawigacyjnych systemów satelitarnych (NSS), w USA o nazwie Transit, a w istniejącym wówczas ZSRR o nazwie Cikada. Systemy te umożliwiały określanie pozycji zarówno użytkownika stacjonarnego, jak i przemieszczającego się w dowolnym miejscu na Ziemi niezależnie od pory doby, roku i warunków propagacyjnych, szczególnie meteorologicznych. Były to pierwsze w historii systemy satelitarne o zasięgu globalnym. Początkowo obydwa NSS przeznaczone były wyłącznie dla użytkowników wojskowych, ale niezwykle dynamicznie rozwijające się technologie oraz zmiany polityczne na świecie na przełomie lat 80. i 90. XX w. spowodowały, że w USA i w Rosji oddano do eksploatacji systemy satelitarne nowej generacji, odpowiednio w 1995 r. system GPS (Global Positioning System) i w 1996 r. system GLONASS (Global Navigation Satellite System). Systemy te, również o zasięgu globalnym, dostępne nieodpłatnie dla wszystkich użytkowników, także cywilnych, umożliwiły w dowolnym momencie bieżące i nieprzerwane określanie ich pozycji. Dlatego też systemami tymi i powstającymi w kolejnych latach ich odmianami, szczególnie różnicową oraz satelitarnymi i naziemnymi systemami wspomagającymi, zaczęli interesować się użytkownicy wielu nowych dziedzin gospodarki, w tym wszystkich gałęzi transportu, czyli drogowego, kolejowego, lotniczego i morskiego.

W lutym 2017 r. obydwa NSS były w pełni operacyjne, dwa kolejne – Galileo w Europie i BeiDou w Chinach – również globalne, były w końcowej fazie budowy. Oznacza to, że już za kilka lat, przewiduje się, że nowe systemy pełną zdolność operacyjną osiągną w 2020 r., użytkownik, dysponując odpowiednim odbiornikiem, będzie mógł korzystać równocześnie z czterech systemów.

Określanie pozycji użytkownika za pomocą NSS polega na jednoczesnym pomiarze w odbiorniku odległości do co najmniej czterech satelitów znajdujących się nad horyzontem, których współrzędne są znane. Dokładność tej pozycji uzależniona jest między innymi od liczby oraz rozmieszczenia w chwili pomiarów wszystkich wykorzystywanych satelitów. Z tego względu liczba satelitów operacyjnych każdego NSS jest tak dobrana, by wymóg ten mógł być spełniony w dowolnym momencie i dowolnym punkcie na Ziemi. O ile jednak określanie pozycji w akwenach otwartych, czyli na morzu, w powietrzu i niegórzystych te-

renach pozamiejskich, nie nastęrcza jakichkolwiek problemów, o tyle w warunkach ograniczonej widzialności satelitów, czyli w miastach, szczególnie o gęstej, wysokiej zabudowie (tzw. *urban canyon*), w terenach górzystych, w trakcie żegluga wzdłuż wysokiego brzegu czy też w kanałach, wąskich przejściach, użytkownik musi się liczyć z tym, że sygnały z niektórych satelitów mogą nie docierać do anteny jego odbiornika. W tej sytuacji otrzymana pozycja obarczona będzie większym błędem, niekiedy znacznie większym, a w skrajnym wypadku, gdy liczba satelitów zmniejszy się do trzech lub jeszcze bardziej, pozycja ta nie zostanie określona.

W tabeli 1 zestawiono parametry segmentu kosmicznego wszystkich czterech NSS, w szczególności te, które mają, czy też mogą mieć, wpływ na wykorzystywanie tychże systemów w transporcie. Do parametrów tych można zaliczyć liczbę satelitów operacyjnych i ich rozmieszczenie na orbitach, wysokość tych orbit oraz kąt ich nachylenia do płaszczyzny równika. W tabeli tej podano również, jaki procent powierzchni Ziemi widoczny jest przez jednego satelitę każdego z wskazanych NSS. To te parametry powodują, że możliwości wykorzystania danego systemu zależne są od szerokości geograficznej użytkownika. W wypadku systemów GPS i GLONASS są to parametry z dnia 18 stycznia 2017 r., zaś systemów Galileo i BeiDou – parametry konstelacji docelowych. W systemie BeiDou pod uwagę wzięto jedynie 27 satelitów znajdujących się na trzech orbitach MEO, pomijając satelity orbit GEO i IGSO, które swoim zasięgiem obejmują jedynie terytorium Chin i państw sąsiednich.

Tabela 1. Parametry segmentu kosmicznego oraz powierzchnia Ziemi leżąca w zasięgu jednego satelity systemu GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou (tylko orbity MEO)

System	Liczba orbit MEO	Liczba satelitów		Wysokość orbity (km)	Kąt inklinacji (°)	Powierzchnia Ziemi leżąca w zasięgu jednego satelity	
		na jednej orbicie	łącznie			(km ²)	% powierzchni Ziemi
GPS	6	4-6	27	20 183	55,0	193 705 518	38,0
GLONASS	3	8	24	19 100	64,8	191 117 254	37,5
Galileo	3	10	30	23 222	56,0	199 969 523	39,2
BeiDou	3	9	27	21 500	55,0	196 773 430	38,6

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: www.beidou.gov.cn, www.glonass-ianc.rsa.ru, www.gps.gov, www.gsc.europa.eu [dostęp 18.02.2017].

Celem określenia wpływu wszystkich czterech NSS na funkcjonowanie transportu, w tym również IST, przeprowadzono odpowiednie badania, wykorzystując autorski program symulacyjny. Dla siedmiu przedziałów szerokości geograficznej po 10° każdy generowano losowo 1000 współrzędnych użytkownika oraz czas z przedziału związanego z powtarzalnością konfiguracji satelitów. Pominięto przedziały 70–90°, gdyż na tych szerokościach nie są świadczone

usługi transportowe. Dla wszystkich tak wyznaczonych współrzędnych obliczono odrębnie dla każdego NSS liczbę satelitów widocznych powyżej przyjętej wysokości oraz ich wysokość topocentryczną i azymut. Obliczeń dokonano zarówno w akwencie otwartym, jak i w warunkach miejskich, zakładając, że użytkownik znajduje się na środku ulicy o znanej orientacji względem północy oraz szerokości i wysokości zabudowy po obydwu stronach.

Tabela 2. Procentowy rozkład azymutów satelitów systemów GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou (tylko orbity MEO) widocznych przez użytkownika w akwencie otwartym nad horyzontem na różnych szerokościach geograficznych φ półkuli północnej, l_s – średnia liczba satelitów widoczna nad horyzontem

φ N (°)	System	l_s	Azymut (°)							
			0–45	45–90	90–135	135–180	180–225	225–270	270–315	315–360
0–10	GPS	12,4	14,3	10,7	10,1	14,8	15,0	9,9	10,5	14,7
	GLONASS	9,0	15,6	9,8	9,4	15,3	14,7	9,1	10,1	17,0
	Galileo	9,8	14,3	10,4	10,1	15,0	14,9	10,1	10,4	14,8
	BeiDou	10,9	14,8	10,5	10,1	14,9	14,7	10,3	10,3	14,4
10–20	GPS	12,1	13,2	12,2	9,9	14,8	14,7	9,7	11,9	13,6
	GLONASS	8,7	16,8	10,8	9,7	12,8	12,1	9,6	10,8	18,2
	Galileo	9,7	14,0	11,3	10,0	14,5	14,7	9,8	11,4	14,3
	BeiDou	10,7	13,8	11,1	10,2	14,9	14,5	10,2	11,6	13,7
20–30	GPS	11,4	12,5	14,3	10,3	12,9	13,2	10,0	14,4	12,4
	GLONASS	8,5	17,3	11,8	9,7	11,1	10,6	9,6	12,0	18,3
	Galileo	9,1	13,4	13,1	10,6	12,7	12,7	10,6	13,3	13,6
	BeiDou	10,0	12,9	13,4	10,7	12,9	12,8	10,5	13,8	13,0
30–40	GPS	11,1	9,8	17,4	11,4	11,5	11,7	11,1	17,5	9,6
	GLONASS	8,7	17,5	12,5	9,6	10,2	9,9	9,8	13,3	17,6
	Galileo	8,8	10,9	16,8	11,1	12,1	11,5	11,1	16,5	11,0
	BeiDou	9,7	9,9	17,4	11,1	11,8	11,4	11,1	17,6	9,7
40–50	GPS	11,2	7,3	19,9	11,9	10,9	11,4	11,4	20,0	7,2
	GLONASS	9,2	18,2	13,4	9,0	9,3	8,9	9,7	14,0	17,4
	Galileo	9,1	8,7	19,6	11,0	10,8	10,7	11,2	19,1	8,9
	BeiDou	9,9	7,5	20,2	11,3	11,4	11,1	11,6	20,0	7,0
50–60	GPS	11,9	8,5	17,9	12,7	10,9	11,2	12,7	17,2	8,9
	GLONASS	9,6	15,0	16,2	9,3	9,0	9,3	10,2	15,9	15,0
	Galileo	9,6	10,0	17,4	11,7	10,6	11,2	12,0	17,1	10,0
	BeiDou	10,6	9,0	17,5	12,2	11,2	11,1	12,6	17,0	9,4
60–70	GPS	12,3	10,7	14,3	13,4	11,7	12,0	13,2	14,1	10,6
	GLONASS	9,7	12,9	16,1	10,9	9,8	10,2	11,5	15,5	13,1
	Galileo	9,8	11,2	14,3	12,8	11,7	12,0	12,5	14,3	11,2
	BeiDou	10,9	10,7	14,2	13,3	11,8	11,9	13,1	14,0	11,0

Źródło: Opracowanie na podstawie wyników badań własnych.

Średnią liczbę I_s satelitów systemów GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou (tylko orbity MEO) widocznych przez użytkownika w akwencie otwartym nad horyzontem na różnych szerokościach geograficznych półkuli północnej oraz procentowy rozkład azymutów tychże satelitów przedstawiono w tabeli 2. Pełen azymut (360°) podzielono na 8 przedziałów po 45° każdy. Z tabeli tej nasuwają się następujące wnioski:

- liczba I_s jest we wszystkich przedziałach największa dla systemów GPS i BeiDou, gdyż liczą one najwięcej satelitów operacyjnych, odpowiednio 31 i 27. Systemy GLONASS i Galileo liczą po 24 satelity, ale z uwagi na to, że wysokość orbit Galileo jest o ponad 3000 km wyższa, a kąt inklinacji orbit GLONASS ($64,8^\circ$) jest o blisko 10° większy, liczba I_s jest w niektórych przedziałach szerokości większa dla Galileo, w niektórych większa dla GLONASS, jeszcze w innych praktycznie taka sama;
- dla wszystkich NSS rozkład azymutów zależy od szerokości geograficznej;
- w każdym przedziale szerokości rozkład azymutów zależy od systemu, a w szczególności kąta inklinacji jego orbit. Dla systemu GLONASS kąt ten jest o około 10° większy niż w trzech pozostałych;
- w przedziale szerokości $50\text{--}60^\circ$, obejmującym terytorium Polski, liczba satelitów systemu GLONASS jest w sektorze $270\text{--}90^\circ$ zdecydowanie większa niż w pozostałych sektorach, z kolei w przedziałach $45\text{--}90^\circ$ i $270\text{--}315^\circ$ liczba satelitów GPS, BeiDou i Galileo jest większa niż dla pozostałych przedziałów.

W tabeli 3 zestawiono odsetek satelitów systemów GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou (tylko orbity MEO) widocznych przez użytkownika na różnych szerokościach geograficznych powyżej przyjętej wysokości topocentrycznej. Z tabeli tej wynika, że:

- rozkład satelitów danego NSS widzianych powyżej wysokości H zależy od szerokości geograficznej oraz kąta inklinacji jego orbit. Dlatego też rozkład ten jest dla systemu GLONASS inny niż dla trzech pozostałych NSS;
- we wszystkich przedziałach szerokości i dla wszystkich NSS liczba satelitów obserwowanych powyżej przyjętej wysokości H zmniejsza się wraz z wysokością, najszybciej na małych wysokościach H , najwolniej na największych. Prawie we wszystkich wypadkach powyżej 20° nad horyzontem widocznych jest zaledwie 40% satelitów danego NSS;
- ze względu na kąt inklinacji rozkład satelitów GLONASS w przedziale $0\text{--}10^\circ$ i na szerokościach większych niż 50° jest inny niż satelitów pozostałych NSS.

Tabela 3. Procent satelitów systemów GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou (tylko orbity MEO) widocznych przez użytkownika w akwencie otwartym powyżej wysokości topocentrycznej H na różnych szerokościach geograficznych, l_{sm} – średnia liczba satelitów widocznych nad horyzontem ($H = 0^\circ$)

Szerokość ($^\circ$)	System	l_{sm}	Wysokość topocentryczna H ($^\circ$)								
			0	10	20	30	40	50	60	70	80
0–10	GPS	12,4	100	80,6	59,9	39,0	24,9	15,0	8,4	3,6	0,8
	GLONASS	9,0	100	74,6	51,2	34,1	22,5	14,0	7,6	3,1	0,7
	Galileo	9,8	100	80,8	59,4	39,7	25,8	16,1	8,0	3,3	0,9
	BeiDou	10,9	100	81,0	63,4	39,7	25,8	15,5	8,2	3,7	0,9
10–20	GPS	12,1	100	77,5	58,7	43,6	28,0	16,6	9,0	3,5	0,8
	GLONASS	8,7	100	76,5	57,6	38,9	24,8	11,8	8,2	3,5	0,6
	Galileo	9,7	100	76,9	58,4	43,5	29,5	17,3	8,9	3,8	1,0
	BeiDou	10,7	100	77,0	58,7	43,7	29,0	16,9	9,1	4,1	1,1
20–30	GPS	11,4	100	78,4	61,6	46,6	33,7	21,3	10,9	4,3	1,1
	GLONASS	8,5	100	78,2	60,5	45,2	28,8	16,9	9,1	3,8	0,8
	Galileo	9,1	100	78,5	61,3	47,0	34,4	21,8	11,1	4,9	1,2
	BeiDou	10,0	100	78,1	61,5	46,9	34,5	21,7	11,4	5,0	1,3
30–40	GPS	11,1	100	79,6	62,5	47,6	35,5	24,6	14,7	5,7	1,3
	GLONASS	8,7	100	77,9	61,6	46,5	33,5	20,3	10,5	4,7	1,0
	Galileo	8,7	100	79,2	61,6	48,2	35,5	25,0	15,1	6,4	1,6
	BeiDou	9,7	100	79,1	62,3	48,0	35,6	25,0	15,2	6,2	1,5
40–50	GPS	11,2	100	77,9	60,6	45,9	33,7	24,4	15,2	7,9	2,2
	GLONASS	9,2	100	77,6	59,4	45,0	33,2	22,4	13,6	5,8	1,4
	Galileo	9,0	100	77,4	60,6	46,5	34,1	24,1	15,8	8,7	2,1
	BeiDou	9,9	100	77,7	60,1	45,9	34,2	24,5	15,7	8,2	2,2
50–60	GPS	11,9	100	76,1	57,1	42,3	30,4	20,9	12,5	7,0	2,4
	GLONASS	9,6	100	81,2	61,1	44,7	32,5	22,7	14,3	7,9	2,2
	Galileo	9,6	100	76,5	56,9	43,3	30,7	21,2	13,4	7,2	2,7
	BeiDou	10,6	100	75,9	56,4	42,3	30,7	21,2	13,1	6,6	2,0
60–70	GPS	12,3	100	80,0	58,0	40,5	27,1	16,9	9,0	3,3	0,8
	GLONASS	9,7	100	84,1	66,8	48,0	32,7	22,1	13,4	7,0	2,4
	Galileo	9,8	100	81,5	60,4	42,1	28,6	18,4	9,7	3,9	0,4
	BeiDou	10,9	100	80,3	58,0	40,5	27,6	17,6	9,2	3,0	0,2

Źródło: Opracowanie na podstawie wyników badań własnych.

2. Określanie pozycji w aglomeracjach miejskich

Średnią liczbę satelitów l_{sm} wszystkich czterech NSS widocznych nad horyzontem powyżej 5° przez użytkownika znajdującego się na środku ulicy dla różnych

kątów α między osią ulicy a kierunkiem północnym na północnych szerokościach 30–60°, obejmujących tę część Europy, w której świadczona jest zdecydowana większość lądowych usług transportowych¹, dla ulicy o szerokości $L = 20$ m i wysokości zabudowy $B = 10$ m przedstawiono w tabeli 4, zaś dla ulicy, dla której $L = 70$ m, a $B = 15$ m, w tabeli 5. Z tabel tych wynika, że liczba l_{sm} zależy od parametrów segmentu kosmicznego danego systemu (liczba satelitów operacyjnych, wysokość orbity i kąt jej inklinacji), szerokości geograficznej użytkownika oraz kąta α . Dla wszystkich NSS liczba ta jest najmniejsza dla $\alpha = 0^\circ$ (ulica skierowana południkowo), zaś największa, z małymi wyjątkami, dla $\alpha = 90^\circ$ (ulica skierowana równoleżnikowo).

Tabela 4. Średnia liczba satelitów l_{sm} systemów GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou (tylko orbity MEO) widocznych nad horyzontem powyżej 5° przez użytkownika znajdującego się w środku ulicy o szerokości 70 m i wysokości zabudowy 15 m dla różnych kątów α między osią ulicy a kierunkiem północnym na różnych szerokościach geograficznych półkuli północnej, l_s – średnia liczba satelitów systemu widocznych powyżej 5°

φ N (°)	System	l_s	Kąt α (°)							
			0		45		90		135	
			l_{sm}	l_{sm}/l_s (%)	l_{sm}	l_{sm}/l_s (%)	l_{sm}	l_{sm}/l_s (%)	l_{sm}	l_{sm}/l_s (%)
30–40	GPS	9,9	4,6	46,5	5,6	56,6	5,7	57,6	5,6	55,6
	GLONASS	7,7	3,7	48,0	4,2	54,5	4,0	51,9	4,2	54,5
	Galileo	7,9	3,8	48,1	4,4	55,7	4,4	55,7	4,5	57,0
	BeiDou	8,6	4,2	48,8	4,9	57,0	5,0	58,1	4,9	57,0
40–50	GPS	9,9	4,4	44,4	5,5	55,6	5,7	57,6	5,6	55,6
	GLONASS	8,1	3,8	46,9	4,4	54,3	4,3	53,1	4,4	54,3
	Galileo	7,9	3,5	44,3	4,5	57,0	4,6	58,2	4,4	55,7
	BeiDou	8,7	3,9	44,8	4,9	56,3	5,0	57,5	4,9	56,3
50–60	GPS	10,5	4,2	40,0	5,4	51,4	5,7	54,2	5,4	51,4
	GLONASS	8,7	4,4	50,6	4,4	50,6	4,5	50,6	4,4	51,7
	Galileo	8,5	3,5	41,2	4,4	51,8	4,5	52,9	4,4	51,8
	BeiDou	9,3	3,8	40,9	4,8	51,6	5,0	53,8	4,9	52,7

Źródło: Opracowanie na podstawie wyników badań własnych.

¹ J. Januszewski, *Global Navigation Satellite Systems Applications in Different Modes of Transport*, „Problemy Transportu i Logistyki” 2016, nr 2(34), s. 113–122.

Tabela 5. Średnia liczba satelitów I_{sm} systemów GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou (tylko orbity MEO) widocznych nad horyzontem powyżej 5° przez użytkownika znajdującego się na środku ulicy o szerokości 20 m i wysokości zabudowy 10 m dla różnych kątów α między osią ulicy a kierunkiem północnym na różnych szerokościach geograficznych półkuli północnej, I_s – średnia liczba satelitów systemu widocznych powyżej 5°

φN ($^\circ$)	System	I_s	Kąt α ($^\circ$)							
			0		45		90		135	
			I_{sm}	I_{sm}/I_s (%)	I_{sm}	I_{sm}/I_s (%)	I_{sm}	I_{sm}/I_s (%)	I_{sm}	I_{sm}/I_s (%)
30–40	GPS	9,9	7,5	76,8	7,9	79,8	7,9	79,8	7,9	79,8
	GLONASS	7,7	5,9	76,6	6,0	77,9	6,0	77,9	6,1	79,2
	Galileo	7,9	5,9	74,7	6,3	79,7	6,3	79,7	6,3	79,7
	BeiDou	8,6	6,5	75,6	6,9	80,2	7,0	81,4	6,9	80,2
40–50	GPS	9,9	7,3	73,7	7,9	79,8	7,9	79,8	7,8	78,8
	GLONASS	8,1	6,4	79,0	6,3	77,8	6,2	76,5	6,2	76,5
	Galileo	7,9	6,0	75,9	6,3	79,7	6,3	79,7	6,3	79,7
	BeiDou	8,7	6,4	73,6	6,9	79,3	7,0	80,4	6,9	79,3
50–60	GPS	10,5	7,9	75,2	7,9	75,2	8,0	76,2	7,9	75,2
	GLONASS	8,7	7,1	81,6	6,8	78,2	6,4	73,6	6,6	75,9
	Galileo	8,5	6,6	77,6	6,3	74,1	6,3	74,1	6,4	75,3
	BeiDou	9,3	7,0	75,3	7,0	75,3	7,0	75,3	6,9	74,2

Źródło: Opracowanie na podstawie wyników badań własnych.

Tabela 6. Średnia liczba satelitów I_s systemów GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou (tylko orbity MEO) widocznych nad horyzontem powyżej 5° przez użytkownika znajdującego się na środku ulicy o zmiennej szerokości (10–55 m) i zmiennej wysokości zabudowy (5–25 m), szerokość geograficzna 50–60, kierunek osi ulicy 0–180 $^\circ$

B (m)	System	L (m)										
		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
5	GPS	4,2	> 4									
	GLONASS	4,4										
	Galileo	4,0										
	BeiDou	3,8										5,2
15	GPS	< 4			3,7	4,3	> 4					
	GLONASS				3,6	4,4						
	Galileo				3,5	4,0						
	BeiDou				< 3	3,8						4,2
25	GPS	< 4			< 4				3,9	4,2	> 4	
	GLONASS								3,9	4,3		
	Galileo								3,7	4,0		
	BeiDou								< 3	3,8		

Źródło: Opracowanie na podstawie wyników badań własnych.

Tabela 7. Średnia liczba satelitów l_s systemów GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou (tylko orbity MEO) widocznych nad horyzontem powyżej 5° przez użytkownika znajdującego się na środku ulicy o zmiennej szerokości (10–55 m) i zmiennej wysokości zabudowy (5–25 m), szerokość geograficzna $50\text{--}60^\circ$, kierunek osi ulicy $90\text{--}270^\circ$

B (m)	System	L (m)										
		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
5	GPS	5,7	> 4									
	GLONASS	4,4										
	Galileo	5,1										
	BeiDou	5,0										
15	GPS	< 4	3,8	4,6	4	> 4						
	GLONASS	< 4			3,5							4,4
	Galileo	< 4	3,5	4,1								
	BeiDou	< 4	3,4	4,1								
25	GPS	< 4			3,8	4,3	> 4					
	GLONASS	< 4					3,9	4,3	> 4			
	Galileo	< 4				3,9	4,2	> 4				
	BeiDou	< 4				3,7	4,2					

Źródło: Opracowanie na podstawie wyników badań własnych.

Ponadto z tabel tych wynika, że na ulicy o szerokości 70 m i wysokości zabudowy 15 m pozycja może być określona ($l_{sm} \geq 4$) za pomocą każdego NSS, niezależnie od orientacji tej ulicy i szerokości geograficznej, zaś na ulicy o $L = 20$ m i $B = 10$ m o orientacji południkowej ($\alpha = 0^\circ$) l_s może być mniejsza od 4 na szerokościach $40\text{--}50^\circ$ dla wszystkich NSS z wyjątkiem systemu GPS, na szerokościach $30\text{--}40^\circ$ dla Galileo i GLONASS, zaś $50\text{--}60^\circ$ (szerokość Polski) dla Galileo i BeiDou. Dla $L = 70$ m i $B = 15$ m procent satelitów wszystkich NSS widocznych dla $\alpha = 0^\circ$ jest znacząco mniejszy niż dla pozostałych kątów α z wyjątkiem systemu GLONASS.

W tabeli 6 i 7 zestawiono średnią liczbę satelitów l_s wszystkich NSS widocznych na szerokości $50\text{--}60^\circ$ przez użytkownika na środku ulicy o zmiennej szerokości i wysokości zabudowy dla dwóch orientacji tej ulicy – odpowiednio 0° i 90° , wyróżniając przypadki, gdy l_s z 4 zmniejsza się do 3. Badania te prowadzą do dwóch zasadniczych wniosków – jedno NSS umożliwia określenie pozycji, inne zaś nie, określenie pozycji uwarunkowane jest orientacją ulicy. I tak, w przypadku ulicy o wysokości $B \leq 15$ m i szerokości $L = 20$ m określenie pozycji jest możliwe ($l_s > 4$), gdy ulica ta zorientowana jest równoleżnikowo, zaś niemożliwe ($l_s \leq 4$), gdy ułożona jest południkowo.

Przyczyną takiej sytuacji jest zbyt mała liczba widocznych satelitów. Rozwiązaniem jest zwiększenie tej liczby, ale jest to możliwe jedynie wtedy, gdy pozycja określana będzie z co najmniej dwóch NSS, a użytkownik dysponować będzie

odpowiednim odbiornikiem. Dlatego też każde kolejne pojawienie się na orbicie nowego operacyjnego satelity budowanego NSS (obecnie Galileo i BeiDou) może się przyczynić do zwiększenia dokładności pozycji, a niekiedy umożliwić jej określenie.

Podsumowanie

Zróżnicowanie liczby satelitów danego systemu widzianych w poszczególnych przedziałach azymutu na różnych szerokościach geograficznych oznacza, że użytkownik korzystający z tego systemu w obrębie miasta, oprócz szerokości geograficznej, na której ono leży, musi brać pod uwagę nie tylko szerokość ulicy, po jakiej się przemieszcza, i wysokość okalających ją domów, ale również jej orientację, czyli kąt między osią ulicy a kierunkiem wskazującym północ.

Ze względu na zmniejszającą się wraz z wysokością topocentryczną liczbą satelitów, z których sygnały mogą dotrzeć do anteny odbiornika użytkownika, pozycja określana za pomocą NSS w obrębie miasta może być obarczona znacznie większym błędem niż na akwenach otwartych, a niekiedy może nie zostać określona. Fakt ten wpływa, i to w sposób bardzo znaczący, na efektywność inteligentnych systemów transportowych.

Pod koniec drugiego dziesięciolecia XXI w. z dwóch w pełni operacyjnych NSS jedynym wykorzystywanym na świecie we wszystkich gałęziach transportu jest system GPS, grono użytkowników systemu GLONASS nadal jest bardzo nieliczne. Obecnie występujące ograniczenia w eksploatacji systemu GPS, szczególnie dotkliwe dla użytkowników transportu drogowego w wielkich aglomeracjach miejskich, mogą zostać w bardzo dużym stopniu zmniejszone, jeśli wręcz nie wyeliminowane, dopiero w momencie uruchomienia dwóch kolejnych systemów globalnych, Galileo oraz BeiDou, i pojawienia się na rynku wystarczającej liczby zintegrowanych odbiorników wielosystemowych. Zwiększenie co najmniej dwukrotnie liczby satelitów widocznych przez użytkownika w gęstej, wysokiej zabudowie zwiększy znacząco dokładność określanej pozycji i odczuwalnie skróci, a w niektórych wypadkach zredukuje do zera, przerwy w jej otrzymywaniu.

Z uwagi na to, że zarządzanie ruchem w inteligentnych systemach transportowych opiera się na informacjach pozyskiwanych z zainstalowanych w pojazdach odbiorników systemu satelitarnego nawet chwilowa awaria takiego odbiornika oznacza poważne zakłócenia prowadzące do nieciągłości w procesie sterowania ruchem. Dlatego też należy rozpatrzyć propozycję, by tak jak to ma miejsce w transporcie morskim, w którym coraz większa liczba statków ma na mostku dwa lub więcej odbiorników, dublować wyposażenie pojazdów.

Literatura

Januszewski J., *Global Navigation Satellite Systems Applications in Different Modes of Transport*, „Problemy Transportu i Logistyki” 2016, nr 2(34)

www.beidou.gov.cn

www.globalnews.ca

www.glonass-ianc.rsa.ru

www.gps.gov

www.gpsworld.com

www.gsc.europa.eu

**THE IMPACT OF SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS
ON EFFECTIVENESS OF INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS**

Summary: The uninterrupted information about user's position can be obtained from satellite navigation systems (SNS). Currently (September 2017) two global SNSs, GPS and GLONASS, are fully operational, two next, also global, Galileo and BeiDou are under construction. Several hundred million receivers of these systems are used in the world in each mode of transportation, road, rail, maritime and air. The position's accuracy depends on the parameters of SNS, user's latitude and the visibility of satellites in restricted area. Last parameter must be taken into account in road transport in urban canyon, in particular the street orientation and its dimensions, the width and height of the buildings. The impact of satellite position on the effectiveness of intelligent transportation systems are described in this paper.