

Zdzisław Kopacz¹⁾, Cezary Specht²⁾

POLSKI SYSTEM DGPS — GENEZA: 1991-1993

POLISH DGPS SYSTEM — ORIGIN: 1991-1993

STRESZCZENIE W 2014 roku mija dwudziesta rocznica uruchomienia na polskim wybrzeżu systemu różnicowego GPS (*Differential Global Positioning System*) stanowiącego główny element osłony radionawigacyjnej akwenów morskich RP. Cztery lata od uruchomienia pierwszej stacji referencyjnej DGPS na świecie i niepełna trzy lata od pierwszej tego typu instalacji w Europie Polska dysponowała najnowocześniejszym rozwiązaniem pozycyjnym w nawigacji morskiej. W artykule, pierwszym z serii publikacji dotyczących polskiego systemu DGPS, zaprezentowano krajowe jednostki naukowe, które przyczyniły się do realizacji tego projektu, podstawy teoretyczne metody różnicowej DGPS, model matematyczny wyznaczania współrzędnych pozycji wraz z dyskusją błędów i genezę systemów DGPS na świecie. Zamierzeniem autorów jest również próba oceny realizowanych działań badawczych z perspektywy dwudziestu lat, gdy dysponuje się większą wiedzą i doświadczeniem oraz nieporównywalnymi narzędziami.

Słowa kluczowe:

osłona radionawigacyjna akwenów morskich RP, polski system DGPS, nawigacja, geneza.

ABSTRACT The year 2014 marks the 25th anniversary of the commencement of the Differential Global Positioning System on the Polish coast, which is the main element of radio-navigation support in the Polish maritime areas. It must be emphasized that it was only four years after the first DGPS station in the world was started and less than three years after the first installations of this kind were started in Europe Poland enjoyed the most modern positioning solution in marine navigation. This paper, the first in a series of publications relating to the Polish DGPS system, presents national research centers which have significantly contributed to implementing this project. It also includes theoretical fundamentals of the differential method used in DGPS, a mathematical model for fixing position data together with a discussion concerning errors as well as the origins of DGPS systems in the world. It is the authors' intention to evaluate research projects conducted during the last twenty years, drawing on significantly greater knowledge and experience and incomparable tools.

Keywords:

radio-navigation support in Polish maritime areas, Polish DGPS system, navigation, origin.

DOI: 10.5604/0860889X.1119443

¹⁾ Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego, 81-103 Gdynia, ul. J. Śmidowicza 69; e-mail: z.kopacz@amw.gdynia.pl

²⁾ Akademia Morska w Gdyni, Wydział Nawigacyjny, 81-225 Gdynia, ul. Morska 81-87, e-mail: c.specht@geodezja.pl

WSTĘP

Artykuł stanowi początek serii spójnych tematycznie publikacji naukowych, których zadaniem jest opisanie wkładu zespołu naukowego Instytutu Nawigacji i Hydrografii Morskiej Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni kierowanego przez profesora Zdzisława Kopacza w projektowanie, testowanie oraz uruchomienie systemu DGPS na polskim wybrzeżu. Ogromny zakres tych prac nie został dotychczas opisany w publikacjach naukowych, stąd zamiarem autorów jest udokumentowanie tego trudnego, jak na owe czasy, przedsięwzięcia.

Wkład naukowy Akademii Marynarki Wojennej oraz Urzędu Morskiego w Gdyni, Urzędu Morskiego w Szczecinie, Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie (zespół prof. Stanisława Oszcza-ka), wspólnie z ówczesną Wyższą Szkołą Morską w Gdyni (dr inż. Jarosław Cydejko) oraz ówczesną Wyższą Szkołą Morską w Szczecinie (zespół profesorów Andrzeja Banachowicza i Adama Wolskiego oraz mgr. inż. Ryszarda Bobera), w dwudziestoletnią historię systemu DGPS zostanie przedstawiony w kolejnych publikacjach obejmujących genezę (1991–1994), koncepcję (1994), architekturę i instalację (1995), kalibrację i testowanie (1995–1997) oraz modernizację (1998–2012).

Należy w tym miejscu wspomnieć imieniem o osobistym zaangażowaniu panów: inż. Wojciecha Drozda, mgr. inż. Marka Ledóchowskiego, mgr. inż. Marka Dziewickiego oraz Jarosława Mrzygłoda

INTRODUCTION

This paper is the first in a series of scientific publications whose main aim is to describe the contribution of the scientific team at the Institute of Marine Navigation and Hydrography, at the Naval Academy, Gdynia, headed by Prof. Zdzisław Kopacz, dedicated to designing, testing and establishing the DGPS system on the Polish coast. The enormous scope of this work has not, so far, been described in scientific publications. Therefore the authors' intention is to document this difficult, for those times, undertaking.

The scientific contribution of the Naval Academy and the Maritime Office in Gdynia, the Maritime Office in Szczecin, Agriculture and Technology Academy in Olsztyn (a team headed by Prof. Stanisław Oszczak) together with the Higher Maritime School (Dr Eng. Jarosław Cydejko) and the then Higher Maritime School in Szczecin (a team headed by prof. Andrzej Banachowicz and Prof. Adam Wolski, as well as Ryszard Bober, MSc) to the 20-year-long history of the DGPS system will be presented in successive publications comprising origin (1991–1994), concept (1994), architecture and installation (1995), calibration and testing (1995–1997) and modernization (1998–2012).

It is necessary to mention here the individual dedication demonstrated by Wojciech Drozd BSc and Marek Ledóchowski BSc, Marek Dziewicki MSc, Jarosław Mrzygłód MSc as well as Dr Eng. Michał Kaczmarek from the

z Urzędu Morskiego w Gdyni, a także pana dr. inż. Michała Kaczmarka z Urzędu Morskiego w Szczecinie, którym zawdzięczamy realizację techniczną (wystawienie i uruchomienie) instalacji DGPS oraz udział w większości badań i utrzymanie systemu w bieżącej sprawności.

Inspiracją napisania niniejszego artykułu było uświadomienie sobie, że w Internecie nie można odnaleźć praktycznie żadnych informacji o systemach radionawigacyjnych takich jak AD-2 (uruchomiony przez Politechnikę Gdańską na Zatoce Gdańskiej w latach siedemdziesiątych) czy SYLEDIS (uruchomiony przez AMW na Zatoce Pomorskiej w latach dziewięćdziesiątych XX wieku). Również o będącym na etapie likwidacji systemie MW Jemiołuszka, w który znaczący wkład włożyło Centrum Techniki Morskiej, można odnaleźć jedynie pojedyncze publikacje, jak np. [1]. Wspomniane przedsięwzięcia z zakresu radionawigacji w Polsce to duże projekty narodowe o charakterze badawczo-wdrożeniowym wpływające w sposób istotny na polską gospodarkę morską. Również w powszechnie dostępnej elektronicznej literaturze nie można odnaleźć informacji o istnieniu Biura Hydrograficznego Rzeczypospolitej Polskiej (1991–1994) — państwowej morskiej służbie hydrograficznej i oznakowania nawigacyjnego powołanej ustawą [28], dzięki której uruchomiono procedury administracyjne w celu wystawienia systemu DGPS na polskim wybrzeżu. Nie sposób pominąć osobistego wkładu ówczesnego dyrektora BHRP mgr. inż. Apoloniusza Łysejki, współautora wstępnej

Maritime Office in Szczecin to whom we owe the technical realization (installation and start up) of the DGPS as well as participation in most investigations and maintaining the system in working order.

The inspiration to write this paper was the realization, that it is practically almost impossible to find, on the Internet, any information relating to radio-navigation systems such as AD-2 (started by Gdańsk University of Technology, in the Bay of Gdańsk in the 1970s) or SLEDIS (started by NA, in the Pomeranian Bay in nineties). The Jemiołuszka system, which is being removed from service, developed by Centrum Techniki Morskiej (Marine R&D Center) can be read about in very few articles, e.g. [1]. The efforts mentioned relating to radio-navigation in Poland have stemmed from big national R&D projects having substantial effect on the Polish maritime industry. Neither is it possible to find any information, in electronic literature, about the existence of the Hydrographic Bureau of the Republic of Poland (1991–1994) — state maritime hydrographic and navigational marking service established by Law [28], whose activity resulted in starting administrative procedures aimed at installing a DGPS system on the Polish coast. It is impossible to omit the individual contribution made by Apoloniusz Łysejko MSc, then director of HB RP, co-author of the initial concept which finally led to implementing the project developed by Prof. Zdzisław Kopacz [16].

koncepcji systemu [13], którego determinacja doprowadziła do wdrożenia opracowanego przez zespół prof. Zdzisława Kopacza [16] projektu.

Wybór „Zeszytów Naukowych Akademii Marynarki Wojennej” dla wspomnianej serii artykułów nie jest przypadkowy, bowiem to AMW była uczelnią wiodącą w realizacji planowania, budowy i modernizacji systemu DGPS przez wiele lat. Nie bez znaczenia jest też fakt, że przywołany periodyk jest w Internecie w otwartym dostępie i wszyscy zainteresowani mogą swobodnie korzystać z publikowanych w nim artykułów. To szczególnie ważne dla studentów i pracowników naukowych.

Opis realizowanych przedsięwzięć badawczych z perspektywy dwudziestu lat daje możliwość spojrzenia na zagadnienie ze znacząco szerszego kontekstu, popartego nieporównywalną wiedzą i większym doświadczeniem, których na etapie realizacji koncepcji w 1994 roku zespół nie posiadał. Wydaje się, iż dodatkową wartością tej serii monotematycznych artykułów, poza zebraniem pozycji bibliograficznych związanych z systemem DGPS w „jednym miejscu”, będzie próba oceny poszczególnych osiągnięć z punktu widzenia aktualnego poziomu wiedzy. Należy podkreślić, iż w momencie przygotowywania koncepcji polskiego systemu DGPS na świecie dostępnych było jedynie kilka publikacji naukowych dotyczących tego typu rozwiązań wdrożonych w USA, Finlandii i Szwecji. Najtrafniej podjęte wyzwanie opisał w przedmowie do [16] kierownik projektu prof. Zdzisław Kopacz:

Choosing ‘Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej’ (Scientific Journal of the Polish Naval Academy) for the series of articles mentioned is not accidental, as NA has been the lead school in planning, developing and modernizing the DGPS system for many years. The fact that this journal is available on the Internet and access to articles published in it is open to all who are interested without any limitations, is also significant. This is important especially for students and researchers.

The account of the research efforts from the perspective of twenty years offers an opportunity to look at this issue in a broader context, supported by incomparable knowledge and greater experience which the team of 1994 did not have at the stage of realizing the concept. It seems that apart from gathering bibliography items relating to the DGPS system in one place, the attempt to evaluate the particular achievements as compared with the present level of knowledge will be of extra added value. It should be underscored that when the Polish concept of a DGPS system was being prepared very few scientific publications were available in the world regarding already implemented solutions in the USA, Finland and Sweden. The most accurate account of the challenges confronted was given in the preface to [16] by project manager Prof. Zdzisław Kopacz:

‘(...) Attractive problems for the team of workers, solved from the navigational

„(...) Atrakcyjna tematyka dla zespołu wykonawców, rozwiązywana z nawigacyjnego punktu widzenia dla całego wybrzeża, dostarczyła wiele nowych zagadnień do rozważenia. Przyjęte kryteria i sposób ich przedstawienia w rozdziale drugim występuje po raz pierwszy w pracach wykonanych w Polsce. Jest on spotykany wcześniej w krajach o większym zaangażowaniu na morzu, ale ze względu na światowy charakter nawigacji i żeglugi nie mógł być rozwiązywany przez zespół z pominięciem norm ogólnie przyjętych przez IALA oraz IMO. Tematyka wdrożenia i wykorzystywania systemu DGPS jest aktualnie na etapie początkowym i niewątpliwie wiele poglądów będzie w przyszłości weryfikowanych przez praktykę”.

Bardzo istotnym elementem umożliwiającym rozwój naukowy polskiego środowiska związanego z nawigacją satelitarną, a w szczególności polskim systemem DGPS, były projekty badawcze finansowane przez nieistniejący dziś Komitet Badań Naukowych. Ich wpływ na badania charakterystyk tego systemu należy uznać za decydujący, bowiem umożliwiał finansowanie realizacji kosztownych pomiarów morskich i lądowych. Projekty badawcze finansowane ze środków publicznych bezpośrednio związane z polskim systemem DGPS wymieniono poniżej:

1. *Ostona radionawigacyjna obszarów morskich RP*, projekt celowy Komitetu Badań Naukowych, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, 1995–1996, kierownik projektu: dr Z. Kopacz, prof. AMW.

point of view for the whole coast, delivered several new issues to consider. The criteria adopted and the way it was presented appears in the second chapter, for the first time in projects realized in Poland. The problems were dealt with earlier in countries with a bigger commitment to maritime activities, but due to the world-wide character of navigation and shipping they could not be solved with disregard to general standards adopted by IALA and IMO. The issues concerned with implementation and employment of the DGPS system are at the moment at the initial stage and there is no doubt several views will be verified through practice in the future’.

Research projects financed by the Scientific Research Committee (SCR), which no longer exists, were very important in allowing Polish researchers connected with satellite navigation, especially with the Polish DGPS, to progress scientifically. Their influence on investigation of the characteristics of the whole system must be regarded as decisive, as the projects made it possible to finance costly marine and land measurements. The research projects financed from public sources relating directly to the Polish DGPS are mentioned below:

1. *Radio-navigational screen of the Polish maritime regions*, SCR supported Project, Naval Academy, Gdynia, 1995-1996, project manager: Dr Z. Kopacz, Prof. NA.
2. *Analysis of availability and reliability of GPS differential systems*, SCR

2. *Analiza dostępności i niezawodności systemów różnicowych GPS*, projekt badawczy KBN, nr 8 T12E02521, realizowany w latach 2000–2002, kierownik projektu: dr inż. C. Specht.
 3. *Monitorowanie ruchu okrętów na akwenie morskim na przykładzie Zatoki Gdańskiej*, projekt badawczy KBN, nr 9 T12C112 14, realizowany w latach 1999–2001, kierownik projektu: dr hab. inż. A. Felski.
 4. *Analiza możliwości podniesienia dokładności i niezawodności pozycji w morskich aplikacjach systemu DGNSS przy wykorzystaniu sieciowych aplikacji różnicowych*, projekt badawczy KBN, Wyższa Szkoła Morska w Gdyni, realizowany w latach 2000–2002, kierownik projektu: dr inż. J. Cydejko.
 5. *Badanie charakterystyk niezawodnościowych wyznaczeń współrzędnych pozycji różnicowych metod GPS*, projekt badawczy KBN, nr 4T12C06427, realizowany w latach 2004–2007, kierownik projektu: dr hab. inż. C. Specht.
- supported project, No 8 T12E02521, realized 2000-2002, project manager: Dr Eng. C. Specht.
3. *Monitoring vessel traffic in a maritime region based on the Bay of Gdańsk*, SCR supported project, No 9 T12C112 14, realized 1999-2001, project manager: Dr Eng. A. Felski.
 4. *Analysis of increasing position accuracy and reliability in DGNSS maritime applications using network differential applications*, SCR supported project, the Higher Maritime School, realized 2000-2002, project manager: Dr Eng. J. Cydejko.
 5. *Investigations of reliability characteristics of fixing position using GPS differential methods*, SCR supported project, No 4T12C06427, realized 2000-2002, project manager: Dr Eng. C. Specht.

W wyniku tych projektów zrealizowano w Polsce między innymi trzy rozprawy doktorskie dotyczące bezpośrednio badań nad polskim systemem DGPS [8, 18, 24] oraz jedną habilitacyjną [25], a także dziesiątki prac inżynierskich i magisterskich napisanych przede wszystkim w trzech akademiach morskich.

ISTOTA RÓŻNICOWEJ METODY POMIARU W NAWIGACJI SATELITARNEJ

W polskiej literaturze metrologicznej pojęciu metoda pomiaru nadaje się różny sens [21]. Wiąże się ją niejednokrotnie

As a result of these projects, among others, three doctoral theses were completed directly relating to studies on the Polish DGPS system [8, 18, 24] and one post-doctoral thesis [25] as well as tens of BSc and MSc papers written mostly in the three marine academies.

THE NATURE OF DIFFERENTIAL METHOD FOR MEASUREMENTS IN SATELLITE NAVIGATION

The notion of measurement method in Polish literature is assigned different meanings [21]. Frequently it is associated with the measurement principle of using a certain physical phenomenon (e.g. mechanical method, electrical method, chemical method, etc.), and in

z zasadą pomiaru wykorzystującą określone zjawisko fizyczne (np. metody: mechaniczne, elektryczne, chemiczne itp.), w innych — z warunkami, w jakich dokonywany jest pomiar (metody: wzorcowa, laboratoryjna, warsztatowa). Gdy za kryterium podziału metod pomiaru przyjmiemy zasadę porównywania, według której dokonujemy pomiaru, metody pomiarów podzielić można na bezwzględne lub porównawcze [9]. Bezwzględne metody pomiaru (np. czasu, częstotliwości, masy), realizowane za pomocą wzorca, są niezmiernie trudne, często wymagające uwzględnienia szeregu czynników zewnętrznych pod postacią poprawek. Ten typ metod realizowany jest najczęściej przez instytuty oraz centra metrologiczne, przez co ma ograniczone zastosowanie praktyczne. Alternatywną metodą pomiarową w stosunku do pomiaru bezwzględnego jest metoda porównawcza, polegająca na porównaniu mierzonej wartości ze znaną wartością tej samej wielkości [9]. Wśród metod porównawczych wyróżnia się kilka odmian (m.in. odchyłkową, zerową, podstawienia), z których jedna nosi nazwę metody różnicowej. Jest to technika polegająca na pomiarze niewielkiej różnicy między mierzoną a znaną wartością tej samej wielkości. Wykorzystując różnicową metodę pomiaru, oceniamy związek pomiędzy identycznym oddziaływaniem czynników na błędy pomiaru oraz na mierzoną i znaną wartość, przez co aparatura badawcza i proces pomiarowy mogą zostać znacznie uproszczone.

Pierwsze elementy pomiaru różnicowego w radionawigacji wykorzystano

other cases with conditions under which a measurement is conducted (e.g. standard method, laboratory technique, workshop method, etc.). When, the comparison principle used to make a measurement is assumed as the criterion for classification of measurement methods, the measurement methods can be divided into absolute or comparative [9]. The absolute measurement methods (e.g. time, frequency, mass), conducted using a standard, are extremely difficult, often requiring taking into account several external factors in the form of corrections. These methods are often employed by metrological institutes and centers, which is why they have limited practical application. A measurement method alternative for absolute measurement is the comparative method, which involves comparing the measured value with the known value of the same magnitude [9]. Among the comparative methods there are some varieties (e.g. deviation, zero, substitution). One of them is referred to as the differential method. This is a technique based on measuring a small difference between the quantity measured and the quantity known of the same magnitude. Using the differential method of measurement evaluates the relationship between the identical action of factors on the measurement errors and on the quantity measured and the quantity known, which is why the measuring equipment and the measurement process can be simplified.

The first elements in the differential measurement in radio-navigation were

w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku do korekty sterowania pracą stacji brzegowych systemu Loran. W nawigacji pierwszym wdrożonym systemem wykorzystującym pomiar różnicowy była różnicowa Omega, której pierwsze stacje referencyjne zostały uruchomione na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych. Stacje rozlokowane w Stanach Zjednoczonych oraz Europie zachodniej (Francja, Hiszpania, Portugalia) zapewniały zasięg 200–300 Mm, dzięki czemu poza nawigacją morską wykorzystywane były również w lotnictwie cywilnym [14]. To rozwiązanie pozwoliło, by dokładność systemu została zwiększona z około 5 Mm do około 1 Mm (dla odległości 100 Mm od stacji referencyjnej).

Głównym założeniem, na którym opiera się istota nawigacyjnego systemu różnicowego, jest stałość błędów mierzonego parametru nawigacyjnego występująca w zasięgu działania stacji odniesienia. Stąd przyjmując, że istnieje rzeczywista wartość liczbowa χ_0 wielkości mierzonej χ określanej w nawigacji morskiej parametrem nawigacyjnym, stwierdza się, iż każdy pomiar obarczony jest błędem (uchybem) pomiaru. W rozważanym przypadku ogólnym błąd bezwzględny pomiaru parametru nawigacyjnego δ_i zdefiniujemy jako

$$\delta_i = \chi_i - \chi_0 \text{ dla / for } i = 1, 2, 3, \dots, n \text{ przy / for } n \in N, \quad (1)$$

gdzie:

where:

N — zbiór liczb naturalnych / the set of counting numbers.

employed in the 1950s to correct the performance of Loran shore stations. As for navigation, the first system implemented which employed the differential measurement was the differential Omega whose first reference stations were started up between the 1980s and 1990s. The stations installed in the United States and Western Europe (France, Spain, Portugal) offered the range of 200–300 Nm, which is why, apart from marine navigation, they were also used in civil aviation [14]. This solution allowed the system accuracy to increase from 5 Nm to approximately 1 Nm (for the range of 100 Nm from a reference station).

The main assumption, on which the differential system is based, is the constancy of error of a navigational parameter measured within the range of the reference station. Hence, assuming that there exists a real numerical value χ_0 of the quantity measured χ , referred to in navigation as the marine navigational parameter, it is stated that each measurement is encumbered with a measurement error (deviation). In the general case considered, we define the absolute navigational error measurement δ_i as

Dla systemów wykorzystywanych w nawigacji pomiar wartości δ_i realizowany jest na stacji referencyjnej, co w odniesieniu do systemu różnicowego GPS (DGPS) zapiszemy

For systems employed in navigation the measurement of the magnitude δ_i is done in a reference station, which for the differential system GPS (DGPS), we will write as

$$\delta_\rho = \rho_i - R_0, \quad (2)$$

gdzie:

where:

δ_ρ — błędy pomiaru pseudoodległości wyznaczone przez stację referencyjną systemu DGPS /

errors in measurement of pseudo ranges fixed by a reference station DGPS;

ρ_i — wartości mierzonej pseudoodległości (parametru nawigacyjnego) / magnitudes of a measured pseudo range (navigational parameter);

R_0 — wartości poprawne odległości geometrycznej (DGPS) / correct magnitudes of geometric ranges (DGPS).

W oparciu o wyznaczone wartości błędów poszczególnych pomiarów stacja referencyjna DGPS wyznacza wartość poprawek w postaci

Based on the error magnitudes determined in the particular measurements the reference station DGPS determines the magnitudes of corrections in the form

$$\delta_\rho = -PRC_\rho, \quad (3)$$

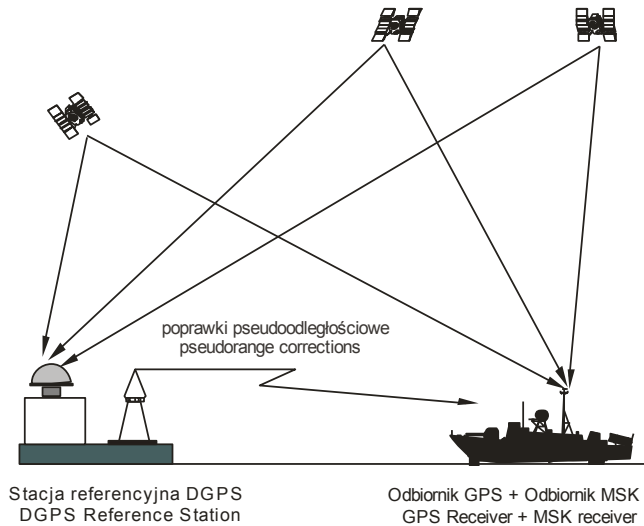
gdzie:

where:

PRC_ρ — poprawka pseudoodległościowa w systemie DGPS / pseudo range correction in the DGPS system.

Na rysunku 1. przedstawiono zasadę pracy systemu DGPS polegającą na przesyłaniu poprawek różnicowych pomiędzy stacją referencyjną a odbiornikiem użytkownika. Odbiornik użytkownika wyposażony jest dodatkowo w odbiornik poprawek (MSK).

Figure 1 presents the principle operation of a DGPS system, which involves transmitting differential corrections between a reference station and a user's receiver. The user's receiver is additionally equipped with a minimum shift key receiver (MSK).



Rys. 1. Istota metody różnicowej DGPS zakresu LF/MF

Fig. 1. The nature of the differential method in an LF/MF DGPS

Źródło / Source: A. Felski, C. Specht, *Pewne aspekty optymalizacji wykorzystania systemów DGPS na Bałtyku Południowym*, 'Zeszyty Naukowe AMW', 1995, No 3 [Some aspects of employment optimisation of DGPS systems in the Southern Baltic — available in the Polish].

GENEZA SYSTEMU DGPS NA ŚWIECIE

Proklamacją prezydenta USA Ronalda Reagana z 1984 roku system GPS został udostępniony użytkownikom cywilnym, otwierając tym samym nowe możliwości jego zastosowania w wielu dziedzinach nauki i techniki, jak również nawigacji morskiej. Ze względu na niską dokładność systemu (początkowo ok. 500 m) Biuro Badań i Rozwoju Straży Granicznej USA (*US Coast Guard Office of Research and Development* — USCGOR&D) rozpoczęło pracę nad systemem radionawigacyjnym GPS w wersji różnicowej określanym mianem różnicowego globalnego systemu pozycyjnego (*Differential Global Positioning System* — DGPS). Pierwsze próby tego systemu przeprowadzono jeszcze w 1980 roku na poligonie Yuma Proving Ground w Arizonie [24].

THE ORIGIN OF THE DGPS SYSTEM IN THE WORLD

Following the decision by Ronald Reagan made in 1984 the DGPS system was made accessible to civil users, opening the way to new opportunities of employing the system in many fields of science and technology, and in marine navigation. Due to the low accuracy of the system (initially approx. 500 m) the US Coast Guard Office of Research and Development (USCGOR&D) began to work on a radio-navigation system GPS in the differential version referred to as Differential Global Positioning System (DGPS). The first trials of the system were carried out in 1980 at the Yuma Proving Ground in Arizona [24].

W 1983 roku USCGOR&D oraz Centrum Systemów Transportowych (*Transportation Systems Center* — TSC) rozpoczęły pracę nad ustaleniem podstawowych założeń dla nowo powstającego systemu. Badania objęły różne metody określania poprawek, wybór częstotliwości oraz formatu transmisji telemetrycznych, jak również degradację wartości poprawki w funkcji odległości od stacji referencyjnej. Pomiary dowiodły, że transmisje poprawek różnicowych mogą zwiększyć dokładność określenia pozycji do około 14 m ($p = 0.95$) oraz pracy systemu w standardowym serwisie pozycyjnym systemu GPS (*Standard Positioning Service* — SPS).

W 1983 roku Instytut Nawigacji Stanów Zjednoczonych (*U.S. Institute of Navigation* — USION) wystąpił do Radiotechnicznej Komisji ds. Służb Morskich (*Radio Technical Commission for Maritime Service* — RTCM) o sporządzenie zaleceń dotyczących transmisji różnicowych dla użytkowników systemu GPS. RTCM, będąc organizacją doradczą (założoną w 1947 r.), mandatoryjnie zobowiązana do poszukiwania rozwiązań technicznych i instytucjonalnych odnoszących się do telekomunikacji morskiej, w listopadzie 1983 roku powołała Komitet Specjalny 104 (*Special Committee 104* — SC-104) w celu ustalenia struktury oraz formatu przesyłania danych w ramach systemu DGPS. Komitet opracował ponadto wytyczne dotyczące zalecanych pasm telekomunikacyjnych dla przesyłania depesz pomiędzy stacją referencyjną DGPS a użytkownikami systemu GPS. Ustalono zalecenia, które umożliwiły wdrożenie transmisji różnicowych,

In 1983 USCGOR&D and the Transportation Systems Center (TSC) began to work on establishing the underlying assumptions for the new system being developed. The study focused on various methods for fixing corrections, selecting frequency, and the telemetric transmission format, as well as the degradation of correction magnitude in the function of range from a reference station. The measurements proved that transmissions of differential corrections can increase position fixing accuracy up to approx. 14m ($p = 0.95$) and the system performance in Standard Positioning Service (SPS) of the GPS system.

In 1983 the U.S. Institute of Navigation (USION) submitted a request to the Radio Technical Commission for Maritime Service (RTCM) to work out recommendations for users of GPS relating to differential transmissions. RTCM, being an advisory organization (established in 1947) and having mandatory obligations to search for technical and organizational solutions relating to maritime telecommunications. They set up a Special Committee 104 (SC-104) in 1983 to establish the structure and format of transmitting data within the DGPS system. The Committee additionally worked out recommendations concerning recommended telecommunication bands for transmitting messages between a reference DGPS station and users of the GPS system. Recommendations containing definitions of elements and data units, the minimum time interval between transmissions, the size of data segments,

zawierające definicje elementów i jednostek danych, minimalny przedział czasowy pomiędzy transmisjami, rozmiar segmentu danych, ich protokoły, zasięg i rozdzielenie. Podczas opracowywania standardu utrzymywano ciągłą konsultację z Radiotechniczną Komisją ds. Aeronautyki (*Radio Technical Commission for Aeronautics* — RTCA) oraz innymi zainteresowanymi organizacjami, mając na uwadze wykorzystanie powyższego nie tylko dla zastosowań różnicowych GPS. Dla realizacji projektu powołano trzy grupy robocze. Grupa Robocza ds. Danych i Formatu ustaliła formę ostateczną większości depesz. Niektóre typy depesz zostały ustalone prowizorycznie, bowiem zakładano, że ich wykorzystanie przez użytkownika nie będzie możliwe w najbliższych latach. Grupa Robocza ds. Komunikacji określiła pasma radionawigacyjne i telekomunikacyjne, które mogą być użyte dla transmisji różnicowych GPS. W szczególności zwrócono uwagę na zakres częstotliwości, w którym pracują radiolatarnie morskie, bowiem jego wykorzystanie wydawało się najbardziej obiecujące. Grupa Robocza ds. Transmisji Pseudosatelitarnych (ang. *pseudolite*) zajęła się koncepcją przesyłania poprawek różnicowych z wykorzystaniem pasma częstotliwości GPS z naziemnych stacji. Koncepcja ta pojawiła się w momencie braku pełnej konstelacji satelitów systemu GPS, choć aktualnie nabrała nowego znaczenia w ramach globalnego nawigacyjnego systemu satelitarnego (*Global Navigation Satellite System* — GNSS) [24].

Przeprowadzone na szeroką skalę pomiary stacjonarne na poligonie w Arizonie

their protocols, range, and separation were formulated. This made it possible to implement differential transmissions. When developing this standard, the Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA) and other interested organizations were consulted on a continuous basis, paying attention not only to the differential applications of GPS. Three work groups were set up to realize the project. The Data Formats Working Group worked out the form for most of the messages. Some types of messages had provisional character as it was assumed that their use will not be possible in the near future. The Communication Working Group determined the radio-navigation and telecommunication bands which could be used for GPS differential transmissions. Special attention was focused on the frequency range, used by radio beacons, as its use seemed to be the most promising. The Pseudolite Transmission Working Group was involved in the concept of transmitting differential corrections using the GPS frequency band from land-based stations. This concept turned up during a moment of absence of a full constellation of satellites in the GPS system, but now it has come into prominence in the Global Navigation Satellite System (GNSS) [24].

Wide-scale land-based measurements performed at an exercise range in Arizona in January and the Autumn of 1984 with support of laser systems that showed the transmission of errors relating to measured pseudo ranges was much more effective as compared with errors in position coordinates

w styczniu i jesienią 1984 roku przy wspomaganii systemami laserowymi wykazały, że transmisja poprawek dotyczących zmierzonych pseudoodległości jest o wiele bardziej efektywna w stosunku do poprawek współrzędnych pozycyjnych ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$), a badania potwierdziły wysoką dokładność systemu, przewyższającą dokładność systemu GPS dla użytkowników pracujących w serwisie PPS. W listopadzie 1985 roku, po przeprowadzeniu testów polowych, SC-104 opublikował wstępne zalecenia. Po próbach w 1986 roku ustanowił, że w celu kompensacji wpływu SA na dokładność wyznaczenia pozycji niezbędne jest transmitowanie poprawek pseudoodległościowych (*Pseudo Range Corrections* — PRC) z minimalną prędkością 50 bodów, jak również zalecił zakres częstotliwości: 283,5–325 kHz odpowiadający wymaganiom systemu oraz ustanowieniom międzynarodowym dotyczącym przedziału częstotliwości.

Wiosną tego samego roku, w ramach projektu „Diffstar”, w Norwegii przeprowadzono próby systemu DGPS czasu rzeczywistego (*Real Time*) w oparciu o sieć radiolatarni systemu Consol (320 kHz). W wyniku badań potwierdzono celowość wykorzystywania PRC dla transmisji telemetrycznych, uzyskano dokładność określenia pozycji 1 m oraz stwierdzono brak znacznej degradacji PRC wraz z odległością od stacji referencyjnej. Pewne wnioski z badań systemu „Diffstar” mogą budzić uzasadnione wątpliwości, lecz na podkreślenie zasługuje szeroki rozmiar przedsięwzięcia [24].

($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$), and the investigations proved the high accuracy of the system, which exceeded the GPS system accuracy for users working in PPS service. In November, 1985 after field tests, SC-104 published the results. After trials, which were performed in 1986, SC-104 stated that in order to compensate for SA influence on position fixing accuracy it is necessary to transmit Pseudo Range Corrections (PRC) with the minimum speed of 50 bods. It also recommended the frequency range: 283,5–325 kHz corresponding to the system requirements and the international regulations relating to the frequency range.

In the Spring, of the same year, under a project named ‘Diffstar’, trials of a Real Time DGPS system were performed in Norway, based on a network of radio beacons Consol (320 kHz). As a result of these trials the usefulness of using PRC for telemetric transmission was confirmed. The position fixing accuracy obtained was 1m and absence of substantial degradation of PRC was recorded with regard to the range from a reference station. Some conclusions from the investigations of the ‘Diffstar’ system can provoke justifiable doubts, however the scope of the work done is worth emphasizing [24].

In April, May and August, 1987 TSC and USCGR&D performed trials of the DGPS system based on the standard transmission RTCM SC-104. These trials proved that the DGPS was able to meet the requirements set for a radio-navigation system supporting approaches to American ports in accordance with

W kwietniu, maju i sierpniu 1987 roku TSC i USCGR&D przeprowadziły próby systemu DGPS w oparciu o standard transmisji RTCM SC-104. Badania udowodniły, że DGPS może spełniać wymagania stawiane systemowi radionawigacyjnemu zabezpieczającemu podejścia do portów amerykańskich zgodnie z Federalnym Planem Radionawigacyjnym z dokładnością 8–20 m ($p = 0.95$) i potwierdziły zalety zastosowanego standardu transmisji. Badania przeprowadzono na jednostce o bardzo dużej dynamice (maks. prędkość 20 w), w związku z czym należało uznać otrzymane wyniki za wysoce zadowalające.

W 1989 roku przeprowadzono próbę systemu DGPS w oparciu o pasmo LF/MF i radiolatarnię morską Montauk Point zlokalizowaną na wyspie Long Island (USA), a 15 sierpnia 1990 roku rozpoczęła ona pracę ciągłą jako pierwszy na świecie system DGPS publicznego dostępu. Równoległe z pracami w USA, na początku 1991 roku, firma Magnavox zainstalowała w Skandynawii pierwszy w Europie system radiolatarni transmitujących dane w ramach DGPS. Wszedł on do pracy w kwietniu tegoż roku. System został rozwinięty w oparciu o międzynarodowe standardy przyjęte przez IALA w związku z kontraktem zawartym z Morską Administracją Szwecji (*Swedish Maritime Administration* — SMA) i Fińskim Towarzystwem Nawigacji (*Finnish Board of Navigation* — FBN). Fińska radiolarnia zlokalizowana została 50 km na SE od Helsinek na stacji pilotowej przylądka Porkkala i znalazła się pod kontrolą FBN dzięki linii telefonicznej z Helsinek. Szwedzką

the Federal Radio-navigation Plan with an accuracy of 8–20 m ($p = 0.95$), and confirmed the high qualities of the transmission standard used. A vessel of very large dynamics (maximum speed 20 knots) was used to perform the trials, therefore the results obtained had to be considered highly satisfactory.

In 1989 a trial of the DGPS system was performed based on LF/MF band and a radio Beacon Montauk Point installed on Long Island (USA), and on 15 August, 1990 it started its continuous operation as the first in the world publically accessible DGPS system. Together with the work in the USA, at the beginning of 1991, the firm Magnavox installed in Scandinavia the first system of radio beacons transmitting data within the DGPS in Europe, and it started to operate in April that year. The system was developed using international standards adopted by IALA in connection with a contract with the Swedish Maritime Administration (SMA) and the Finnish Board of Navigation (FBN). The Finnish radio beacon was installed 50km south east of Helsinki on a pilot station on Porkkala Cape and was under supervision of the FBN, owing to the telephone line connection with Helsinki. The Swedish radio beacon was installed on the light-house Almagrundet 80 km east of Stockholm and it is controlled from Norkopping, using cell phone communication. Several tests that the system underwent proved its enormous usefulness in supporting ferries travelling between Stockholm and Helsinki, a passage

radiolatarnię zamontowano na latarni Almagrundet 80 km na E od Sztokholmu, a kontrolowana jest z Norkopping z wykorzystaniem telefonii komórkowej. Testy, którym został poddany ten system, potwierdziły jego ogromną przydatność w nawigacyjnym zabezpieczeniu przejścia promów na trasie Sztokholm — Helsinki, które jest wyjątkowo trudne pod względem nawigacyjnym [13].

Uruchomienie pierwszych systemów DGPS w USA i Skandynawii oraz wyniki testów spowodowały, że standard RTCM SC-104 stał się najpowszechniejszym wzorcem dla transmisji różnicowych GPS. Dynamiczny rozwój technik DGPS w ostatnich kilku latach spowodował, że poza nielicznymi typami odbiorników GPS każdy może współpracować z odbiornikiem stacji referencyjnej DGPS, gdzie dane transmitowane są zgodnie z zaleceniami RTCM. W ciągu kilku lat obowiązywania wersji 2.0 standardu (od stycznia 1990 r.) RTCM SC-104 uznał za konieczne wprowadzenie zmian i w styczniu 1994 roku ukazała się wersja 2.1. Podstawowy format informacji nie został zmieniony, lecz standard uzupełniono o kilka typów informacji wspierających zastosowania kinematyczne w czasie rzeczywistym [13].

Równoległe z rozwojem systemu DGPS zakresu LF/MF prowadzono próby nad jego wykorzystaniem w oparciu o sieć stacji referencyjnych, skupiając się na analizie błędów, zwłaszcza możliwościach ich modelowania na rozległych obszarach lądowych i morskich. Techniczną realizacją analiz było stworzenie systemu DGPS rozległych obszarów

which is very difficult from the navigational point of view [13].

The start up of the first DGPS systems in the USA and Scandinavia as well as satisfactory results of the first tests led to RTCM SC-104 becoming the most common format for GPS differential data transmission in the world. As a result of this dynamic progress in DGPS technologies in recent years practically every GPS receiver (with a few exceptions) have been able to cooperate with a receiver of a DGPS reference station where data is transmitted in accordance with the RTCM recommendations. After a few years of using 2.0 standard (from January, 1990) RTCM SC-104 decided to introduce some changes and in January, 1994 the 2.1 version turned up. The basic data format was not changed but the standard was supplemented with a few types of data supporting kinematic applications in real time [13].

Together with the progress in the LF/MF DGPS system, attempts were made to base its use on a set of references stations, focusing on error analysis, and especially on possibilities of modelling them in vast land and maritime areas. As a result of the technical realization of these analyses the Wide Area DGPS (WADGPS) was developed, where geostationary satellites 'Inmarsat' (1.6 GHz) are used for telemetric transmissions, obtaining coverage of vast areas with the accuracy of approx. 10 m ($p = 0.95$). Systems based on a network of reference stations and communication satellites are the major

(*Wide Area DGPS* — WADGPS), gdzie dla transmisji telemetrycznych wykorzystano satelity geostacjonarne „Inmarsat” (1.6 GHz). Uzyskano pokrycie znacznych obszarów z dokładnością współrzędnych pozycji około 10 m ($p = 0.95$). Systemy oparte na sieci stacji referencyjnych i satelitach telekomunikacyjnych to dziś zasadniczy kierunek wykorzystania systemu DGPS w nawigacji morskiej, lecz ograniczony ceną terminalu łączności satelitarnej i serwisu.

Dokonując krótkiego rysu historycznego, trudno nie wspomnieć o systemach wykorzystujących inne zakresy częstotliwości rozwijane równolegle. Próby nad systemami w zakresie VHF prowadzono już w 1987 roku. W nieistniejących dziś systemach firmy Sercel zakresów HF (2 MHz) i UHF (406-470 MHz) uwagę zwracała odmienność stosowania produkcyjnego standardu transmisji danych.

Do 2013 roku wystawiono ponad dwieście osiemdziesiąt stacji referencyjnych DGPS transmitujących poprawki dla użytkowników morskich [15], z których 83% ma możliwość weryfikacji aktualnego statusu pracy i przesyłania tej informacji do użytkowników w trybie on-line.

MODEL MATEMATYCZNY WYZNACZENIA POZYCJI W DGPS

Rozważmy klasyczne rozwiązanie systemu różnicowego GPS, w którym stacja referencyjna GPS znajduje się w punkcie A o znanych współrzędnych, mierząc pseudoodległość do satelitów znajdujących się ponad założoną wysokością topocentryczną. Pseudoodległość zmierzona w tym punkcie do i -tego satelity wyznaczoną w momencie t_0 można wyrazić jako

direction in using the DGPS system in marine navigation, but it is limited by the price of a communication terminal and service.

Giving this short historical account it is impossible not to mention systems using other frequency ranges, being developed at the same time. Attempts focused on VHF systems were made as early as 1987. The HF (2 MHz) and UHF (406-470 MHz) systems, which do not exist any longer, made by the firm Sercel attracted attention due to being different and the use of the producer-own-developed data transmission standard.

By 2013 more than eighty DGPS reference stations had been installed, transmitting corrections to maritime users [15], of which 83% were able to verify (monitor) the current work status and transmit this data to user on-line.

A MATHEMATICAL MODEL FOR FIXING POSITION IN DGPS

Let us consider a classic solution to a GPS differential system in which the GPS reference station is placed at point A of known coordinates, measuring the pseudo range from satellites placed over the assumed topocentric altitude. The pseudo range measured at this point from the i -th satellite, determined at the moment t_0 can be expressed as

$$\rho_i^A(t_0) = R_A^i(t_0) + c\delta_o^A(t_0) - c\delta_s^i(t_0) + \xi_i^A(t_0) + \tau_i^A(t_0), \quad (4)$$

gdzie:

where:

- $\rho_i^A(t_0)$ — pseudoodległość zmierzona w punkcie A do i -tego satelity, wyznaczona w oparciu o pomiary kodowe GPS / pseudo range measured at point A to the i -th satellite, determined using GPS code measurements;
- $R_A^i(t_0)$ — odległość geometryczna pomiędzy odbiornikiem referencyjnym GPS a i -tym satelitą w punkcie A (stacja referencyjna) / geometric range between a GPS reference receiver and the i -th satellite at point A (reference station);
- $\delta_s^i(t_0)$ — błąd zegara i -tego satelity / clock error in the i -th satellite;
- $\delta_o^A(t_0)$ — błąd zegara odbiornika referencyjnego GPS (w punkcie A) / clock error in the GPS reference receiver (at point A);
- $\xi_i^A(t_0)$ — błędy wynikające z niestabilności ruchu i -tego satelity po orbicie określone w punkcie A / errors resulted from instability of the i -th satellite's movement over the orbit determined at point A;
- $\tau_i^A(t_0)$ — błędy pomiaru pseudoodległości wynikające z warunków propagacyjnych sygnału (jonosferyczny, troposferyczny) i -tego satelity w punkcie A / errors in pseudo range measurement resulted from signal propagation conditions (ionosphere, troposphere-related) of the i -th satellite at point A.

W kolejnym kroku odbiornik DGPS stacji referencyjnej wyznacza współrzędne kartezjańskie satelity na moment obserwacji t_0 . Ponieważ współrzędne anteny GPS stacji referencyjnej zostały precyzyjnie określone, geometryczną odległość pomiędzy satelitą a anteną odbiornika referencyjnego GPS zapiszemy jako

In the next step the DGPS receiver of the reference station determines satellite Cartesian coordinates for the moment of observation t_0 . As the GPS antenna coordinates were accurately determined, we will write the geometric range between the satellite and the antenna as

$$R_A^i(t_0) = \sqrt{[x_s^i(t_0) - x_{RS}]^2 + [y_s^i(t_0) - y_{RS}]^2 + [z_s^i(t_0) - z_{RS}]^2}, \quad (5)$$

gdzie:

where:

- $x_s^i(t_0), y_s^i(t_0), z_s^i(t_0)$ — współrzędne kartezjańskie i -tego satelity w momencie t_0 / Cartesian coordinates of the i -th satellite at the moment t_0 ;
- x_{RS}, y_{RS}, z_{RS} — współrzędne kartezjańskie anteny odbiornika GPS stacji referencyjnej / Cartesian coordinates of the GPS reference receiver antenna.

Błąd pomiaru pseudoodległości $\delta_A^i(t_0)$ w momencie t_0 do i -tego satelity w punkcie A jest różnicą pomiędzy wartością zmierzoną (pseudoodległością) a wartością rzeczywistą (odległością geometryczną):

The error in pseudo range measurement $\delta_A^i(t_0)$ at the moment t_0 to the i -th satellite is a difference between the measured magnitude (pseudo range) and the real magnitude (geometric range):

$$\delta_A^i(t_0) = \rho_i^A(t_0) - R_A^i(t_0). \quad (6)$$

Przyjmując *a priori* stałość błędów systemu różnicowego na określonym obszarze, będącą podstawowym warunkiem istoty tego typu pomiarów, wnioskujemy, że pomiar pseudoodległości dokonany w innym punkcie tego obszaru w momencie t_0 do i -tego satelity będzie obciążony tym samym błędem. Stąd wyznaczmy poprawkę różnicową w postaci

Assuming *a priori* constancy of errors in a differential system in a given area, being the fundamental condition of the nature of these measurements, we conclude that a pseudo range measurement performed in another point of this area at the moment t_0 to the i th satellite will be encumbered with the same error. Hence we determine the differential correction in the form

$$PRC_{C/A}^i(t_0) = R_A^i(t_0) - \rho_i^A(t_0), \quad (7)$$

gdzie:

where:

$PRC_{C/A}^i(t_0)$ — poprawka pseudoodległościowa do i -tego satelity w momencie t_0 w pomiarach kodowych /
correction in pseudo range to i -th satellite at the moment t_0 in code measurements.

Podstawiając (4) do (7), otrzymamy

Substituting (4) for (7), we will receive

$$PRC_{C/A}^i(t_0) = R_A^i(t_0) - \left[R_A^i(t_0) + c\delta_o^A(t_0) - c\delta_s^i(t_0) + \xi_i^A(t_0) + \tau_i^A(t_0) \right], \quad (8)$$

a stąd postać ostateczną poprawki pseudoodległościowej:

and hence the final form of the pseudo range correction:

$$PRC_{C/A}^i(t_0) = c\delta_s^i(t_0) - c\delta_o^A(t_0) - \xi_i^A(t_0) - \tau_i^A(t_0). \quad (9)$$

Pseudoodległościowa poprawka w pomiarach kodowych uwzględnia cztery kategorie błędów: zegara odbiornika referencyjnego GPS, zegara satelity, położenia satelity na orbicie oraz pomiaru pseudoodległości wynikającego z propagacji sygnału. Wyznaczona w systemie DGPS poprawka pseudoodległościowa, ze względu na opóźnienie związane z transmisją telemetryczną, wymaga przypisania jej wartości do konkretnego momentu czasu (t_0) oraz wyznaczenia parametru zwanego szybkością zmiany poprawki pseudoodległościowej (*Range Rate Correction* — RRC), będącego prognozowaną wielkością zmian *PRC* w czasie. Poprawka pseudoodległościowa po stronie odbiornika systemu w momencie czasu t dla depech RTCM nr 1 i 9–3 ma postać:

$$PRC_{C/A}^i(t) = PRC_{C/A}^i(t_0) + RRC_{C/A}^i(t - t_0). \quad (10)$$

Jednocześnie na moment czasu t odbiornik użytkownika systemu DGPS wyznacza pseudoodległość do i -tego satelity, którą zapiszemy jako

$$\rho_i^B(t) = R_B^i(t) + c\delta_o^B(t) - c\delta_s^i(t) + \xi_i^B(t) + \tau_i^B(t), \quad (11)$$

gdzie:

$\rho_i^B(t)$ — pseudoodległość do i -tego satelity zmierzona przez użytkownika /
pseudo range to the i -th satellite measured by the user;

$R_B^i(t)$ — odległość geometryczna pomiędzy odbiornikiem użytkownika systemu a i -tym satelitą /
geometric range between the user's receiver of the system and the i -th satellite;

$\delta_o^B(t)$ — błąd zegara odbiornika użytkownika systemu /
clock error in the system user's receiver;

The pseudo range correction in code measurements takes into account four categories of errors: relating to the clock in a GPS reference receiver, satellite clock, satellite position in the orbit and pseudo range measurement resulted from signal propagation. The pseudo range correction determined in the DGPS system, due to the delay relating to telemetric transmission, requires assigning it a magnitude for a specific moment in time (t_0) and determining a parameter called Range Rate Correction (RRC), being a forecast magnitude of change in RRC in time. The pseudo range correction on the receiver's side at the moment t for RTCM messages no 1 and 9–3 has the form:

At the same time at the moment t the user's DGPS system receiver determines the pseudorange to the i -th satellite, which we will write as

$\xi_i^B(t)$ — błędy wynikające z niestabilności ruchu i -tego satelity po orbicie określone przez użytkownika / errors resulted from instability of the i -th satellite's movement over the orbit determined by the user;

$\tau_i^B(t_0)$ — błędy pomiaru pseudoodległości użytkownika wynikające z warunków propagacyjnych sygnału (jonosferyczny, troposferyczny) i -tego satelity / errors in user's pseudo range measurements resulted from signal propagation conditions (ionosphere, troposphere-related) of the i -th satellite.

Odbiornik użytkownika do wyznaczonej pseudoodległości $\rho_i^B(t)$ do i -tego satelity dodaje wartość poprawki pseudoodległościowej określoną przez stację referencyjną, otrzymując pseudoodległość skorygowaną postaci

The user's receiver adds the pseudo range correction value determined by the reference station to the determined pseudo range $\rho_i^B(t)$ to the i -th satellite, obtaining the corrected pseudo range in the form

$$\rho_i^B(t)_{DGPS} = \rho_i^B(t) + PRC_{C/A}^i(t). \quad (12)$$

Pseudoodległości różnicowe $\rho_i^B(t)_{DGPS}$ po podstawieniu do zależności (10) i (11) przyjmują postać:

The differential pseudo ranges $\rho_i^B(t)_{DGPS}$ after being substituted for (10) and (11) assume the form:

$$\rho_i^B(t)_{DGPS} = R_B^i(t) + c\delta_o^B(t) - c\delta_s^i(t) + \xi_i^B(t) + \tau_i^B(t) + PRC_{C/A}^i(t_0) + RRC_{C/A}^i(t - t_0). \quad (13)$$

W oparciu o zależność (9) wartości poprawek na moment czasu t przyjmują postać

Based on the dependence (9) the value of corrections at the time moment t assume the form

$$PRC_{C/A}^i(t) = c\delta_s^i(t) - c\delta_o^A(t) - \xi_i^A(t) - \tau_i^A(t), \quad (14)$$

a po podstawieniu do (13) otrzymamy

and after substituting for (13) we will obtain

$$\rho_i^B(t)_{DGPS} = R_B^i(t) + c\delta_o^B(t) - c\delta_s^i(t) + \xi_i^B(t) + \tau_i^B(t) + c\delta_s^i(t) - c\delta_o^A(t) - \xi_i^A(t) - \tau_i^A(t). \quad (15)$$

Po pogrupowaniu postać ostateczna przedstawia się jako

$$\rho_i^B(t)_{DGPS} = R_B^i(t) + [c\delta_o^B(t) - c\delta_o^A(t)] + [\xi_i^B(t) - \xi_i^A(t)] + [\tau_i^B(t) - \tau_i^A(t)]. \quad (16)$$

Stosując proces różnicowania pomiarów kodowych GPS, błąd zegara satelity $\delta_s^i(t)$ zostaje wyeliminowany, bowiem jest on identyczny w tych samych momentach czasu zarówno dla stacji referencyjnej DGPS, jak i użytkownika. Przyjmując również, iż odbiornik stacji referencyjnej i użytkownika wykorzystują ten sam zestaw danych orbitalnych satelitów GPS, można uznać, że

$$\xi_i^B(t) - \xi_i^A(t) \rightarrow 0. \quad (17)$$

Z przedstawionej zależności (16) przy uwzględnieniu (17) wynika, że na dokładność określenia pozycji z wykorzystaniem różnych technik telemetrycznych wpływ mają następujące czynniki:

- błędy wynikające z czynnika $[c\delta_o^B(t) - c\delta_o^A(t)]$ związane z różnicą pomiędzy chwilowymi odchyłkami błędów zegarów odbiorników referencyjnego oraz pomiarowego;
- błędy wynikające z czynnika $[\tau_i^B(t) - \tau_i^A(t)]$ pochodzące od odmiennych trajektorii propagacji sygnałów w jonosferze i w troposferze pomiędzy satelitą a odbiornikami stacji referencyjnej i pomiarowym;
- błędy wynikające z poprawności oszacowania przez stację referencyjną wartości $RRC_\varphi^i(t - t_0)$ zależności (10), bezpośrednio związane z metodą emisji poprawek pseudoodległościowych.

After grouping the final form is as follows

Using the process of differentiating GPS code measurements, the satellite clock error $\delta_s^i(t)$ is eliminated, as it is identical at the same time moments both for the DGPS reference station and the user. Assuming also that the reference station's receiver and the user's receiver use the same set of data from the orbital GPS satellites, it can be assumed that

It follows from the dependence (16) taking into account (17) that the position fixing accuracy, using various telemetry techniques, is affected by the following factors:

- errors resulted from the factor $[c\delta_o^B(t) - c\delta_o^A(t)]$ connected with the difference between instantaneous deviations in clock errors in reference and measuring receivers;
- errors resulted from to the factor $[\tau_i^B(t) - \tau_i^A(t)]$ coming from different signal propagation trajectories in ionosphere and troposphere between the satellite and receivers of the referential station and the measuring receiver;
- errors resulted from the assessment accuracy of the magnitude $RRC_\varphi^i(t - t_0)$ of the dependence (10) made by the reference station, directly connected with the method used to emit pseudo range corrections.

W odniesieniu do systemów DGPS wykorzystujących łącze telemetryczne zakresu częstotliwości radiowych 283,5–325 kHz w połowie lat dziewięćdziesiątych przeprowadzono szereg kampanii pomiarowych mających na celu oszacowanie dekorelacji przestrzennej i czasowej poprawek GPS (tabela 1.).

As for the DGPS systems using a telemetric link within 283,5–325 kHz radio range, in mid 1990s a series of measurement campaigns were carried out aimed at assessing the spatial and time de-correlation of GPS errors (table 1).

Tabela 1. Błędy DGPS wynikające z dekorelacji przestrzenno-czasowej poprawek
Table 1. DGPS errors resulted from spatial-time de-correlation of corrections

Źródło błędu Error source	GPS wartość błędu GPS position error (ft)	Wartość błędu w funkcji odległości od stacji odniesienia DGPS DGPS position error as a function of the distance from reference stations				
		0 Mm (ft)	100 Mm (ft)	500 Mm (ft)	1000 Mm (ft)	2000 Mm (ft)
Segment kosmiczny — błąd zegara Space segment — clock error	10	0	0	0	0	0
Segment kontrolny — błąd efemeryd Control segment — ephemeris error	9	0	0.3	1.5	3	6
Segment kontrolny/SA Control segment/SA	90	0	0	0	0	0
Opóźnienie jonosferyczne Ionospheric delay	27	0	7.2	16	21	27
Opóźnienie troposferyczne Tropospheric delay	6	0	6	6	6	6
Segment użytkownika/szumy odbiornika User segment/receiver noise level	30	3	3	3	3	3
Segment użytkownika/wielodrogowość User segment/multipath	10	0	0	0	0	0
UERE	100	3	9.8	17.4	22.2	28.5
2dRMS (HDOP = 1,5)	300	9	30	52	66	86

Źródło / Source: A. Brown, *Extended Differential GPS, 'Navigation', 1989, No 3.*

Należy zauważyć, iż podane w tabeli 1. wartości odnoszą się do stanu systemu GPS oraz DGPS z początku lat dziewięćdziesiątych, gdy dokładność GPS wynosiła w płaszczyźnie horyzontalnej 100 m, $p = 0,95$ [27]. Badania polskiego systemu DGPS prowadzone na akwenu Zatoki Gdańskiej w latach 1994–2008 [7, 10, 11, 23, 24] oraz analogiczne pomiary realizowane na akwenu Zatoki

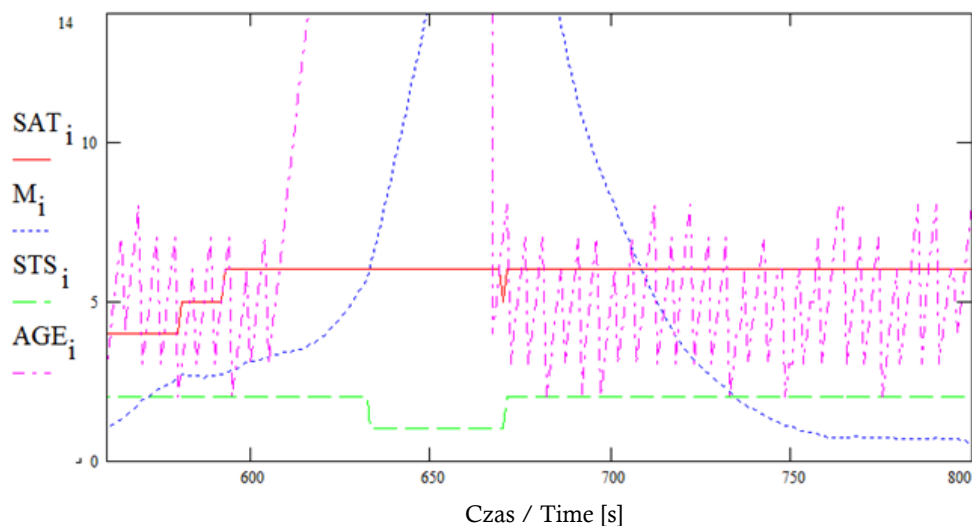
It must be noted that the values given in table 1 refer to the condition of the GPS system and the DGPS system from the beginning of 1990s, when the GPS accuracy was in the horizontal plane 100m, $p = 0,95$ [27]. Investigations of the Polish DGPS system performed in the Bay of Gdańsk in 1994–2008 [7, 10, 11, 23, 24] and analogical measurements performed in the Pomeranian

Pomorskiej [2, 3, 4] wykazały możliwość osiągania przez system dokładności od 2 m ($p = 0,95$) przy stacji referencyjnej DGPS do 5 m ($p = 0,95$) na granicy strefy działania. Jednakże przeprowadzone w tym samym punkcie pomiary w 2009 roku [26], w oparciu o zmodernizowaną infrastrukturę techniczną stacji referencyjnej, wykazały znaczny wzrost dokładności — 0,68 m ($p = 0,95$). To zagadnienie zostanie szczegółowo omówione w kolejnych częściach serii publikacji dotyczących polskiego systemu DGPS.

Zasadniczym czynnikiem decydującym o dokładności określenia pozycji w systemie DGPS jest wiek poprawek, będący czasem od wypracowania korekty pseudoodległości na stacji referencyjnej do momentu uwzględnienia jej w wyznaczeniu współrzędnych. Istotę wpływu tego parametru na dokładność określenia współrzędnych pozycji przedstawiono na rysunku 2. Wzrost wieku danych (AGE) spowodował wzrost błędu określenia pozycji (M), czego konsekwencją była zmiana trybu pracy odbiornika (STS) z opcji DGPS na GPS. Nie miało to żadnego związku z funkcjonowaniem systemu GPS, bowiem liczba satelitów użytych dla określenia pozycji (SAT) utrzymywała się na stałym poziomie 6. Należy zauważyć, iż utrata depech RTCM (zawierających poprawki pseudoodlegściowe do satelitów GPS) prowadzi do wzrostu wieku danych, co w dalszej konsekwencji powoduje wzrost błędu określenia pozycji.

Bay [2, 3, 4] showed a possibility for the system to reach the accuracy from 2 m ($p = 0,95$) near the DGPS reference station to 5m ($p = 0,95$) on the border of the operation zone. Measurements performed at the same point in 2006 [26], based on modernized technical infrastructure of the reference station showed meaningful increase in accuracy — 0,68 m ($p = 0,95$). This issue will be discussed in detail in successive parts of the publication series relating to the Polish DGPS system.

The basic factor deciding the accuracy in position fixing in a DGPS system is the age of corrections, being the time elapsed from determining the pseudo range correction in the reference station to the moment it is taken into account in determining coordinates. The influence of this parameter on the accuracy in determining position coordinates is presented in figure 2. The increase in the data age (AGE) brought about the increase in the position fixing error (M), the consequence of which was a change in the work mode of the receiver (STS) from the DGPS option to the GPS option. This did not have any connection with the performance of the GPS system as the number of satellites used to fix the position (SAT) remained at the constant level of 6. It must be noted that loss of RTCM messages (containing pseudo range corrections to the GPS satellites) leads to increase in data age, which further causes increase in position fixing error.



Rys. 2. Wpływ wieku danych na błąd określenia pozycji; rejestracja stacji odniesienia DGPS Hammerodde w Jarosławcu — odbiornik MX-300/M51R, wartości: liczba śledzonych satelitów — SAT, błąd pozycji — M ($p = 0,95$) [m], tryb pracy odbiornika — STS (0 — brak GPS i DGPS, — praca w systemie GPS, 2 — praca w systemie DGPS), wiek danych — AGE [s] jako funkcje czasu

Fig. 2. Influence of data age on error in position fixing; recording in the Hammerodde DGPS in Jarosławiec — receiver MX-300/M51R, magnitudes: number of followed satellites — SAT, position error — M ($p = 0,95$) [m], GPS receiver status — STS (0 — absence of GPS or DGPS, work in GPS, 2 — work in DGPS), data age — AGE [s] as functions of time

Źródło / Source: C. Specht, *Analiza wielokryterialna systemu DGPS w aspekcie osłony radionawigacyjnej Bałtyku Południowego, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 1997* [Multi-criterion analysis of the DGPS system in the context of the radio-navigation screen in the Southern Baltic — available in the Polish].

PODSUMOWANIE

W artykule opisano podstawy teoretyczne różnicowego systemu GPS pracującego w oparciu o system stacji referencyjnych — głównego systemu wyznaczania położenia we współczesnej nawigacji morskiej. Należy szczególnie podkreślić, iż zaledwie cztery lata po pierwszym uruchomieniu w świecie polska administracja morska pojęła się trudnego zadania wystawienia takiej instalacji na polskim wybrzeżu. Niniejszy artykuł stanowi pierwszy z serii publikacji poświęconych polskiemu systemowi DGPS.

CONCLUSION

The article presents the theoretical fundamentals of the differential GPS system based on a system of reference stations. It should be emphasized that, it was only four years after the first installation that the Polish administration made difficult efforts to install the same one on the Polish coast. It is the first article in the series of publications dedicated to the Polish DGPS system.

In the authors' opinion the expertise earned by the team from IN & MH

Zdaniem autorów doświadczenie i wiedza zespołu INiHM na temat technologii satelitarnych GPS zdobyte podczas prac nad polskim systemem DGPS pozwoliły po blisko dwudziestu latach realizować projekty badawcze w ramach konkursów Europejskiej Agencji Kosmicznej. Stąd na przykład w latach 2009–2012 pod kierownictwem prof. Andrzeja Felskiego zrealizowano pierwszy taki projekt pt. *Formalny model szacowania dostępności pomiarów systemem EGNOS ze zdefiniowanym poziomem dokładności* [12], nie wspominając o kolejnych krajowych pracach badawczych związanych z radionawigacją (Syledis) oraz znakowaniem nawigacyjnym.

regarding GPS satellite technologies during the work on the Polish DGPS system made it possible, after twenty years, to carry out research projects under competition-based programs of the European Space Agency. Hence, e.g. between 2009 and 2012 the first project *A formal model for assessing EGNOS measurements availability with a defined accuracy level* [12], managed by Prof. Felski, was realized, not to mention successive national research projects relating to radio-navigation (Syledis) or navigational marking.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Banachowicz A., Kamiński R., *Analysis Accuracy Integrated Position of Hyperbolic System Jemiołuszka and Satellite Navigation System GPS*, 12th International Conference on Geoinformatics Geospatial Information Research, Bridging the Pacific and Atlantic, Gävle, Sweden, 7–9 June 2004.
- [2] Banachowicz A., Bober R., Wolski A., Banachowicz G., *Statistical Research into GPS and DGPS Measurements in West Pomerania in the Years 1996–2004*, 'Reports on Geodesy', 2005, No 2(73), pp. 331–335.
- [3] Banachowicz A., Bober R., Banachowicz G., Wolski A., *Spatial Accuracy of GPS/ DGPS Position in a Fairway*, 'Reports on Geodesy', 2005, No 2(73), pp. 337–341.
- [4] Banachowicz A., Bober R., Wolski A., Dołgopółow A., Kozłowski Z., *Application of a DGPS System for Rubble Mound Movement Assessment in Kanał Piastowski*, 'Annual of Navigation', 2006, No 11.
- [5] Banachowicz A., Wolski A., Banachowicz G., *Integration of the short-range hyperbolic system Jemiołuszka and DGPS*, 'Journal of KONBiN' 2008, No 4, pp. 5–24.
- [6] Brown A., *Extended Differential GPS*, 'Navigation', 1989, No 3.
- [7] Cydejko J., *Static Accuracy of Maritime DGPS at Selected Points in Polish Responsibility Zone*, [in:] *Nawigacyjno-hydrograficzne zabezpieczenie działań na obszarach morskich RP [Navigational and hydrographic protection activities in marine areas of Poland]*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 1996.
- [8] Cydejko J., *Analiza metod różnicowych DNSS w aspekcie ich przydatności do wyznaczania pozycji dla potrzeb nawigacji morskiej*, Akademia Rolniczo-Techniczna, Olsztyn 1999 [Analysis of differential methods DNSS for their usefulness in position fixing in marine navigation — available in the Polish].
- [9] Dudziewicz J., *Pomiary teletransmisyjne*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1975 [Telemetric measurements — available in the Polish].
- [10] Felski A., Specht C., *Pewne aspekty optymalizacji wykorzystania systemów DGPS na Bałtyku Południowym*, 'Zeszyty Naukowe AMW', 1995, No 3 [Some aspects of employment optimisation of DGPS systems in the Southern Baltic — available in the Polish].

- [11] Felski A., Specht C., *Systemy DGPS Bałtyku Południowego*, 'Przegląd Morski', 1996, No 1 [DGPS systems in the Southern Baltic — available in the Polish].
- [12] Felski A., *Formalny model szacowania dostępności pomiarów systemem EGNOS ze zdefiniowanym poziomem dokładności*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2012 [A formal model for assessing EGNOS measurements availability with a defined accuracy level — available in the Polish].
- [13] Hallmann U., Łysejko A., *A proposed DGPS Marine Radio beacon System for the Republic of Poland*, Gdynia 1994.
- [14] Januszewski J., *Naziemne systemy radionawigacyjne*, Studium Doskonalenia Kadr S.C. Wyższej Szkoły Morskiej, Gdynia 1997 [Land-based radio-navigation systems — available in the Polish].
- [15] Januszewski J., *Satellite navigation systems applications, the main utilization limits for maritime users*, 'Scientific Journals Maritime University of Szczecin', 2013, No 36(108), pp. 70–75.
- [16] Kopacz Z., Dziewicki M., Fic Z., Specht C., *Kryteria wyboru stacji referencyjnych DGPS dla wybrzeża polskiego*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 1994 [Criteria for selecting DGPS stations for the Polish coast — available in the Polish].
- [17] Kopacz Z., Specht C., *DGPS w osłonie transportu do portów Zatoki Gdańskiej*, Seminarium z okazji światowego dnia morza, Gdańsk 1996, pp. 85–103 [DGPS in protection of transport to ports in the Bay of Gdańsk — available in the Polish].
- [18] Król A., *Wykorzystanie sieciowych obserwacji różnicowych w morskich aplikacjach systemu DGPS*, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn 2004 [Using network differentia observations in maritime applications of the DGPS system — available in the Polish].
- [19] Nitner H., Dyrz C., Specht C., *Wymagania stawiane radionawigacyjnym systemom pozycyjnym*, 'Przegląd Hydrograficzny', 2012, No 7, pp. 15–35 [Requirements set for radio-navigation positioning systems — available in the Polish].
- [20] Nitner H., Specht C., *Systemy radionawigacyjne — definicje i klasyfikacje*, 'Przegląd Hydrograficzny' 2012, No 7, pp. 1–13 [Radio-navigation systems — definitions and classifications — available in the Polish].
- [21] Obalski J., *Podstawy metrologii*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1966 [Fundamentals of metrology — available in the Polish].
- [22] Polska norma: *Metrologia, nazwy i określenia, PN-71/N-02050*, Wydawnictwo Normalizacyjne, 1971 [Metrology, Names and Terms — available in the Polish].
- [23] Specht C., *Polskie systemy DGPS jako element osłony radionawigacyjnej Bałtyku Południowego*, 'Zeszyty Naukowe AMW', 1997, No 2 [Polish DGPS systems as an element in the radio-navigation screen of the Southern Baltic — available in the Polish].
- [24] Specht C., *Analiza wielokryterialna systemu DGPS w aspekcie osłony radionawigacyjnej Bałtyku Południowego*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 1997 [Multi-criterion analysis of the DGPS system in the context of the radio-/navigation screen in the Southern Baltic — available in the Polish].
- [25] Specht C., *Availability, Reliability and Continuity Model of Differential GPS Transmission*, 'Annual of Navigation', 2003, No 5.
- [26] Specht C., *Accuracy and Coverage of the Modernized Polish Maritime Differential GPS*, 'Advanced in Space Research', 2011, Vol. 47, Issue 2, Elsevier Ltd. All, pp. 221–228.
- [27] *Standard Positioning Service, Signal Specification, Global Positioning System (GPS)*, Department of Defence, Positioning/Navigation Executive Committee, November 1993.
- [28] *Ustawa o państwowej morskiej służbie hydrograficznej i oznakowania nawigacyjnego*, Dz.U. 1991, nr 32, poz. 132 [The Law on state maritime hydrographic service and navigation marking — available in the Polish].