

Andrzej Uznański<sup>1</sup>

## TECHNIKI SATELITARNE W NOWOCZESNYCH TECHNOLOGIACH POMIARÓW GEODEZYJNYCH NA TERENACH KOLEJOWYCH<sup>2</sup>

### Streszczenie

*Budowa nowych oraz utrzymanie istniejących linii kolejowych, a także modernizacje nawierzchni kolejowych, polegające na przystosowaniu ich do wyższych parametrów techniczno-eksploatacyjnych stawiają wysokie wymagania wykonawcom robót geodezyjnych. Rozwój technik pomiarowych pozwala na opracowywanie nowych technologii realizacji pomiarów geodezyjnych. W pracy przedstawiono techniki pomiarów satelitarnych oraz istotę synergicznego wykorzystania ich wraz z pomiarami naziemnymi w geodezyjnej obsłudze inwestycji o charakterze liniowym. Wskazano również na zagrożenia dla jakości wyników pomiarów satelitarnych, czy wręcz przeciwwskazania dla wykorzystywania na terenach kolejowych najnowszej techniki satelitarnych sieciowych pomiarów kinematycznych w czasie rzeczywistym. Zagadnienie jakości pomiarów geodezyjnych nabiera szczególnego znaczenia przy realizacji odcinków kolei dużych prędkości.*

**Słowa kluczowe:** pomiary satelitarne, pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym, sieciowe pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym

### 1. Wprowadzenie

Na Kongresie Kolejowym, który odbył się 7.11.2011 roku, Prezes Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Zbigniew Szafranski stwierdził, że kolej musi nadążać za nowoczesnymi technologiami [11]. Rozwój technologiczny następuje we wszystkich branżach, także w geodezji.

---

<sup>1</sup> dr inż., Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: andrzej.uznanski@agh.edu.pl

<sup>2</sup> Praca wykonana w ramach badań statutowych, umowa nr 11.11.150.005

Pomiary geodezyjne znacząco rozwinęły wykorzystywane instrumentarium, począwszy od zaawansowanych technologicznie niwelatorów kodowych i precyzyjnych tachymetrów elektronicznych poprzez dokładne geodezyjne odbiorniki satelitarne po skanery naziemne i lotnicze. Nowoczesne instrumenty geodezyjne pozwalają na osiągnięcie dokładniejszych wyników pomiarów, a także na istotne zmiany w technologiach prowadzonych pomiarów. Obszarem szczególnie interesującym wypadającym w tym aspekcie są tereny kolejowe ze swoją specyfiką - wymogami wysokiej dokładności wyników pomiarów oraz liniowym charakterem obiektu. Każda technika wnosi swoje zalety w branżę, ale nie należy zapominać o ograniczeniach, czy też wymogach poprawnego jej wykorzystania. Połączenie różnych technik pomiarów geodezyjnych umożliwi osiągnięcie produktu dokładnego i efektywnego ekonomicznie, także pod względem czasu realizacji zadania. Wynikiem dostrzeżenia możliwości postępu w geodezji kolejowej jest m.in. zlecenie prac badawczych, a także aktualnie nadal trwające prace na nową instrukcją branżową D-19 o organizacji i wykonaniu pomiarów w geodezji kolejowej [1]. Celem opracowania jest przedstawienie satelitarnych technik pomiarowych z praktycznego punktu widzenia oraz technologicznych aspektów prowadzenia pomiarów geodezyjnych na terenach kolejowych.

## **2. Charakterystyka satelitarnych technik pomiarowych**

Przedstawienie charakterystyk satelitarnych technik pomiarów geodezyjnych, które są aktualnie dostępne, pozwoli na wybór odpowiedniej z nich dla konkretnego zadania pomiarowego, przy czym cel pomiaru jest w opracowaniu drugorzędny, a istotna jest możliwość osiągnięcia dokładności oraz ważne dla pomiaru satelitarnego aspekty. Wynikiem pomiaru odbiornikiem GNSS są zawsze współrzędne punktu mierzonego, obliczone w postprocessingu lub w czasie quasi-rzeczywistym. Natomiast realizacja pomiaru służącego wyznaczeniu skrajni, czy też wyznaczeniu wysokości u podnóża nasypu lub na krawędzi wykopu (wg D-19 z dokładnością do 10 cm), może decydować o wyborze odpowiedniej techniki pomiarów satelitarnych. Dlatego rozważania nie będą prowadzone z punktu widzenia rodzaju robót geodezyjnych, a rodzaju satelitarnych technik pomiarowych.

## 2.1. Czynniki determinujące dokładność pomiarów satelitar-nych

W poniższym wzorze o charakterze pogładowym, przedstawiającym równanie obserwacji pseudoodległości obliczanej z pomiarów kodowych i fazowych wyraźnie widać, jakie czynniki wpływają na dokładność pozycjonowania w oparciu o nawigacyjne sygnały satelitarne. Indeksy wskazują związek danego czynnika z odbiornikiem GNSS, satelitami, wielkościami mierzonymi lub częstotliwościami nośnymi:

$$PR_{s,i}^j = \left| \vec{R}_i^j \right| + \delta t^j + \delta d_s^j + \frac{\vec{R}_i^j}{\left| \vec{R}_i^j \right|} \delta \sigma^j + \delta S_{f,i}^j + \delta I_{f,i}^j + \delta T_i^j + \delta M_{s,i}^j + \delta A_{f,i}^j + \delta d_{s,i} + \delta t_i + \lambda_s^j N_{s,i}^j + \epsilon_{s,i}^j \quad (1)$$

gdzie:

i, j, s, f - wskaźniki odpowiednio: odbiornika GNSS, satelity, sygnału (kod P, kod C/A, częstotliwości fal L1, L2)

$\vec{R}_i^j$  - wektor odległości między anteną odbiornika GNSS i anteną satelity

$\delta t^j$  - błąd zegara satelity

$\delta d_s^j$  - opóźnienie sygnału związane z przetwarzaniem przez układy odbiornika

$\delta \sigma^j$  - wektor błędu orbity satelity

$\delta S_{f,i}^j$  - błąd położenia centrum fazowego anteny satelity (PCV)

$\delta I_{f,i}^j$  - refrakcja jonosferyczna

$\delta T_i^j$  - refrakcja troposferyczna

$\delta M_{s,i}^j$  - efekt wielodrożności sygnałów satelitarnych

$\delta A_{f,i}^j$  - błąd położenia centrum fazowego anteny GNSS odbiornika satelitarnego (Phase Center Variations oraz Phase Center Offset)

$\delta d_{s,i}$  - opóźnienie sygnału związane z przetwarzaniem przez układy odbiornika

$\delta t_i$  - błąd zegara odbiornika GNSS

$\lambda_s^j$  - długość fali nośnej

$N_{s,i}^j$  - nieoznaczoności pomiarów fazowych

$\epsilon_{s,i}^j$  - błędy losowe pomiaru

Na dokładność wyznaczonych współrzędnych punktów ma więc wpływ wiele bardzo różnorodnych czynników. W literaturze funkcjonuje pojęcie budżetu błędów, który określa ilościowo wpływ poszczególnych czynników na wyniki pomiarów. Przytaczanie tych wartości, często kilkumetrowych, nie ma jednakże sensu, gdyż jedynymi pomiarami, które powinny być dopuszczone do wykorzystywania na terenach kolejowych, są pomiary względne. W pomiarach tego typu, w celu ograniczenia wpływu wymienionych czynników na dokładność wyznaczanych współrzędnych punktów stosowany jest algorytm obliczeniowy, którego podstawą jest trzykrotne różnicowanie równań obserwacyjnych. Różnicowanie równań obserwacyjnych całkowicie eliminuje błędy zegarów satelitów i odbiorników oraz opóźnień „sprzętowych”  $\delta d_s^l$  oraz  $\delta d_{s,i}$ . Dzięki tej technice obliczeniowej pozostałe źródła błędów też mają mniejszy wpływ na obniżenie dokładności współrzędnych punktu.

Realizacja pomiarów satelitarnych powinna mieć na uwadze możliwość eliminacji bądź istotnego ograniczania wpływu czynników powodujących błędy w wynikach pomiarów. Brak gruntownej znajomości problematyki pomiarów satelitarnych może prowadzić do wyników obarczonych dużymi błędami, których można było uniknąć. Przykładowo w przypadku jednego z odbiorników satelitarnych zintegrowanych z anteną GNSS można w prosty sposób spowodować w pomiarze wektora błąd na poziomie nawet 6-8 mm wyłącznie z tytułu tak banalnej czynności jak ustawienia anten nad mierzonymi punktami.

## **2.2. Pomiary statyczne**

Pomiary satelitarne realizowane procedurą statyczną umożliwiają obliczanie najdokładniejszych z możliwych tymi technikami współrzędnych punktów, praktycznie na poziomie pojedynczych milimetrów. Należą one do względnych metod satelitarnego wyznaczania pozycji w postprocessingu, z czego wynika konieczność opracowania obserwacji z minimum dwóch równocześnie rejestrujących sygnał satelitarny odbiorników GNSS w celu wyznaczenia współrzędnych jednego punktu. O ile technicznie możliwe jest wykonywanie pomiarów sieci punktów w ramach sesji statycznych z wykorzystaniem minimum 2 odbiorników, które w każdej sesji wyznaczają składowe tylko jednego wektora, to rozsądnym minimum są 4 satelitarne odbiorniki GNSS, za pomocą których w każdej sesji zostanie wyznaczonych 6 wekto-

rów. Poniższy wzór umożliwia obliczenie liczby mierzonych wektorów  $w$  przy pomiarze  $r$  odbiornikami GNSS, w których wyznaczanych jest  $(r-1)$  wektorów niezależnych:

$$w = \frac{r(r-1)}{2} \quad (2)$$

Liczbę sesji  $s$  koniecznych do wyznaczenia współrzędnych  $n$  punktów, przy  $m$  odbiornikach mierzących ten sam punkt w kolejnej sesji określa zależność:

$$s = \frac{n-m}{r-m} \quad (3)$$

W trakcie takich pomiarów jest wyznaczanych  $s(r-1)$  niezależnych wektorów oraz  $(s-1)(m-1)$  podwójnie wyznaczonych niezależnych wektorów.

Podstawowym parametrem statycznego pomiaru satelitarnego jest czas jego trwania. Pozostałe parametry pomiarów statycznych to: czas rejestracji obserwacji i minimalna wysokość horyzontalna satelitów. Czas trwania sesji statycznej jest zależny głównie od długości wektora, którego składowe zostaną obliczone z zarejestrowanych obserwacji. W przypadku skrócenia czasu trwania rejestracji nawigacyjnych sygnałów satelitarnych poniżej godziny można mówić o szybkich pomiarach statycznych, których czas trwania może wynosić zaledwie kilka minut. W literaturze źródłowej można znaleźć wskazówki dotyczące czasu trwania sesji statycznej w funkcji długości wektora. Mają one zawsze charakter orientacyjny.

Podstawowym problemem wykonawstwa geodezyjnego jest nie brać pod uwagę, iż o ile odległość między punktami mierzonymi wynosi zazwyczaj 2-3 km, to długości wektorów nawiązujących do stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS wynoszą już kilkadziesiąt kilometrów. W określaniu czasu trwania sesji pomiarowej możemy mówić o czasie planowanym i rzeczywistym, ponieważ w tym względzie należy wziąć pod uwagę także zakłócenia nawigacyjnych sygnałów satelitarnych oraz almanach systemów satelitarnych wykorzystywanych w pozycjonowaniu punktów w aspekcie współczynników DOP (Dilution of Precision).

### **2.3. Pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym**

#### 2.3.1. Pomiary RTK GPS

Pomiary statyczne przedstawione w poprzednim punkcie umożliwiają jedynie inventaryzację. Pomiary realizacyjne stały się możliwe do wykonania w pomiarach kinematycznych w czasie rzeczywistym (Real Time Kinematic Global Positioning System) dzięki zastosowaniu modemów radiowych i przeniesieniu procesu przetwarzania obserwacji na współrzędne punktów z komputera do odbiornika GNSS. Podstawowym założeniem pomiarów RTK GPS jest obliczanie współrzędnych punktów bezpośrednio w terenie w jednym z dwóch trybów. Kilkusekundowe pomiary w trybie stop&go stosowane są do wyznaczania współrzędnych punktów, natomiast ciągle pomiary RTK GPS (ang. true kinematic, dynamic, continuous) umożliwiają wyznaczanie trajektorii poruszającego się obiektu z częstotliwością nawet co 0.05 s.

Pomiary RTK GPS muszą być przeprowadzane dwoma odbiornikami. Jeden pełni rolę stacji referencyjnej (REF), a drugi, określany mianem odbiornika ruchomego (ROV), wykorzystywany jest do wyznaczania współrzędnych punktów. Antena GNSS stacji REF musi być ustawiona nad punktem o znanych i wprowadzonych do pamięci odbiornika satelitarnego współrzędnych. Zadaniem stacji REF jest transmisja tych współrzędnych oraz obserwacji odebranych z satelitów lub korekcji do nich. Odbiornik ruchomy wyznacza współrzędne punktów na podstawie danych odebranych przez modem radiowy ze stacji referencyjnej oraz przez własną antenę GNSS.

O ile z praktycznego punktu widzenia tematu opracowania pomiary statyczne nie są limitowane odległością między odbiornikami satelitarnymi, to pomiary RTK GPS mają takie ograniczenie do ok. 10-15 km. Wynika ono z dwóch powodów:

- dokładności wyników pomiarów, przy założeniu, że powinna być ona nie gorsza niż pojedyncze cm (możliwe, ale nie gwarantowane jest uzyskanie dokładności na poziomie subcentymetrowym),
- zasięgu modemu radiowego UHF.

Teoretyczny zasięg modemu radiowego pracującego w zakresie VHF lub UHF jest określony wzorem wg [2]:

$$d = 3.57\sqrt{k}(\sqrt{h_{REF}} + \sqrt{h_{ROV}}) \quad (4)$$

gdzie:

- h - wysokość anteny nadawczej i odbiorczej nad uśrednioną powierzchnią terenu;
- k - współczynnik zależny od krzywizny Ziemi oraz refrakcji atmosferycznej, dla którego w klimacie umiarkowanym przyjmuje się wartość 1.33.

Zakładając wysokość anten na poziomie 2 m otrzymamy maksymalną odległość między odbiornikiem referencyjnym i ruchomym na poziomie 11,6 km. W rzeczywistości taki zasięg jest bardzo trudny do osiągnięcia i w praktyce wynosi kilka kilometrów (2-5 km). Zazwyczaj moc modemu radiowego będzie wynosić do 1 W. Wzmocnienie mocy nadawczej modemu stacji referencyjnej zazwyczaj nie przyniesie zwiększenia zasięgu odbioru danych ze stacji referencyjnej. Podstawowym czynnikiem limitującym odległość między odbiornikami satelitarnymi w pomiarach RTK GPS będzie topografia terenu (wzniesienia, drzewa, budynki, itp.).

Ograniczenie odległości między odbiornikami w aspekcie dokładności wyników pomiarów związane jest ze wzrostem wartości niektórych z błędów wraz z odległością między odbiornikami. Należą do nich refrakcja jonosferyczna o charakterze dyspersyjnym oraz refrakcja troposferyczna i błędy orbit satelitów o charakterze geometrycznym.

### 2.3.2. Pomiar RTN

Sieciowe pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym (Real Time Network) wykorzystują infrastrukturę operatora systemu stacji referencyjnych. W Polsce operatorem takiego systemu o nazwie ASG-EU-POS jest GUGiK. Ideą pomiarów RTN jest możliwość wyznaczania pozycji przez użytkownika, który dysponuje tylko jednym odbiornikiem GNSS, a odległość od najbliższej stacji referencyjnej wynosi do nawet kilkudziesięciu kilometrów. Pomiar RTN są również pomiarami względnymi, odniesionymi do fizycznych stacji referencyjnych, które tworzą na danym obszarze sieć punktów odniesienia.

Z ograniczeniami pomiarów RTK GPS poradzono sobie w sieciowych pomiarach RTN w pewnym sensie. Zastrzeżenie wynika z:

- aktualnie niższej dokładności wyników pomiarów niż to miało miejsce w pomiarach RTK GPS, ale przy istotnym zwiększeniu odległości między odbiornikami satelitarnymi,

- mniejszej niezawodności wyników pomiarów RTN, częściej i istotnej różnicy między precyzją i dokładnością wyników pomiarów [6],
- braku możliwości prowadzenia pomiarów RTN na obszarach bez pokrycia sygnałem GSM, gdyż modem UHF zastępuje w tych pomiarach modem GSM.

Możliwość zwiększenie odległości między odbiornikami w pomiarach RTN uzyskano poprzez poniższe techniki przedstawione szerzej m.in. w [4]:

- liniowe modelowanie błędów zależnych od odległości (Flächenkorrekturparameter),
- generowanie obserwacji dla wirtualnych stacji referencyjnych (Virtual Reference Station),
- ideę stacji pomocniczych MAC (Master Auxiliary Concept).

W Polsce zaprojektowano system ASG-EUPOS tak, aby odległość odbiornika ruchomego nie była większa od najbliższej stacji referencyjnej niż 35 km, co powinno umożliwić wyznaczanie pozycji punktów z dokładnością do 3 cm sytuacyjnie i do 5 cm wysokościowo. Odstępstwa od założonej w projekcie odległości między odbiornikami satelitarnymi występują sporadycznie, przy założeniu funkcjonowania wszystkich stacji referencyjnych w planowanych lokalizacjach.

### **3. Synergizm technik pomiarowych**

#### **3.1. *Naziemne techniki pomiarów geodezyjnych***

W przypadku rozsądnego wykorzystania zalet różnych technik pomiarowych oraz eliminacji bądź dążenia do ograniczenia ich mankamentów można otrzymać rozwiązanie synergiczne, determinujące aktualną technologię pomiarów geodezyjnych. Tytułowe satelitarne techniki pomiarowe realizowane przedstawionymi metodami pomiarów satelitarnych mogą być wspierane naziemnymi technikami pomiarowymi, a także lotniczymi np. w przypadku systemu LIDAR. W przypadku lotniczego czy też naziemnego skaningu laserowego satelitarne techniki pomiarowe pełnią rolę podstawową, dając georeferencję dla laserowych technik pomiarowych. Ze względu na popularność rozwiązań i objętość opracowania rozważania będą dotyczyć wyłącznie osiągnięcia synergii poprzez łączne stosowanie z pomiarami satelitarnymi naziemnych pomiarów tachymetrycznych i niwelacyjnych.



Naziemne techniki pomiarowe bazują na pomiarze odległości, kierunków i przewyższeń między punktami. W tych technikach możliwe jest laboratoryjne określenie dokładności wyznaczania wartości wielkości mierzonych przez instrumenty, korzystając np. z interferometru lub specjalnych urządzeń, jak np. TPM-2, którego dokładność wynosi dla pomiarów kąta poziomego  $0.058''$  i  $0.091''$  dla kąta pionowego. W celu zapewnienia niezawodności pomiarów w teodolicie może być zastosowany np. poczwórny system pomiaru kąta i bardzo wysoka częstotliwość pomiarów np. 5 000/s. Polowe metody określania dokładności instrumentów, także satelitarnych, mogą być wyznaczone zgodnie z serią norm ISO 17123-1 ÷ ISO 17123-8.

Instrumenty klasy przemysłowej umożliwiają osiąganie najwyższych dokładności, np. 0,25 mm, ale dla odległości do 35 m. Pomiaru terenowe przeprowadzane aktualnie instrumentami najwyższej klasy umożliwiają osiąganie dokładności pomiaru odległości na poziomie  $(0,6 \text{ mm} \div 1,0 \text{ mm}) + 1 \text{ ppm}$ , a kierunków z dokładnością  $0.5''$ . Błąd przewyższenia podawany jest w mm/km podwójnej niwelacji i możliwe jest osiągnięcie przy stosowaniu łąt inwarowych błędu na poziomie 0,3 mm/km. Zdecydowana większość firm geodezyjnych nie dysponuje tak dokładnymi i drogimi instrumentami. Najczęściej spotykane są instrumenty mierzące odległości z dokładnością 2-3 mm, a kąty z dokładnością  $2'' - 3''$ .

Reasumując, pomiary technikami naziemnymi mogą być bardzo dokładne i przede wszystkim wielkości mierzone przez instrumenty są określane znacznie bardziej niezawodnie i wiarygodnie.

W naziemnych technikach pomiarowych problemy pojawiają się zazwyczaj nie w pojedynczym pomiarze, ale w pomiarach na większych obszarach, w których występuje propagacja błędów, szczególnie niekorzystna dla obiektów liniowych. W pomiarach na liniach kolejowych szczególnym czynnikiem wzrostu błędów jest refrakcja i wibracja powietrza nad torami. Ten czynnik może wręcz zupełnie uniemożliwić wykonywanie dokładnych pomiarów przez instrument. Konieczne jest też zapewnienie wizur między mierzonymi punktami, co często istotnie wydłuża czas trwania pomiarów.

Pomiary naziemne są limitowane długością celowej tachymetru, zazwyczaj kilkaset metrów i niwelatora, przeciętnie kilkadziesiąt metrów. Ich zwiększanie powoduje spadek dokładności. Relatywnie

duża jest liczba stanowisk instrumentu. Pojawia się kwestia centrowania powtarzanego wielokrotnie.

W pomiarach geodezyjnych wymagane jest nawiązanie się do punktów osnowy geodezyjnej. Ze względu na ograniczoną długość celowych instrumentów naziemnych, pomiar dowiązujący do punktów osnowy może być czasochłonny i przez to kosztowny. Następuje też spadek dokładności wraz ze wzrostem odległości obszaru pomiarów od punktów osnowy. Zagęszczanie punktów osnowy zwiększa koszty inwestycji poprzez cenę znaku geodezyjnego, koszt jego stabilizacji i pomiar wyznaczający współrzędne punktów osnowy oraz opracowanie wyników obserwacji. Często czynnikiem bardzo istotnie obniżającym dokładność wyników pomiarów aktualnych, mimo należytej staranności ich wykonywania, jest niezachowanie stałości przez punkty ziemne osnowy geodezyjnej.

### **3.2. Zalety i ograniczenia pomiarów satelitarnych**

Jak wspomniano w poprzednim podpunkcie pomiary geodezyjne wymagają nawiązania ich do punktów osnowy. W przypadku pomiarów satelitarnych osnowę możemy rozpatrywać jako osnowę dynamiczną w postaci satelitów, także w postaci naziemnych stacji referencyjnych z pracującymi permanentnie odbiornikami satelitarnymi, których położenie jest monitorowane. Ponadto odbiornik referencyjny można ustawić nad punktem klasycznej osnowy geodezyjnej.

Pomiary satelitarne umożliwiają osiąganie wysokich dokładności przy dużych odległościach między punktami kosztem wydłużania czasu trwania pomiaru. W pomiarach naziemnych konieczne byłoby zastosowanie konstrukcji geometrycznej, w której będzie następowała propagacja błędów istotnie zmniejszająca dokładność wyników pomiarów. Im większa odległość między punktami, tym bardziej bezkonkurencyjna staje się metoda statyczna pomiarów satelitarnych. Dzięki temu nie jest wymagana gęsta sieć punktów osnowy geodezyjnej

Punkty mierzone technikami satelitarnymi nie muszą mieć wzajemnych wizur, ale konieczny jest odkryty horyzont wokół punktu, gdyż konieczne są wizury do satelitów. Dodatkowo obiekty znajdujące się wokół mierzonego satelitarne punktu mogą powodować zakłócenia nawigacyjnych sygnałów satelitarnych. Antena GNSS musi zostać ustawiona nad mierzonym punktem, podczas gdy istnieją tachymetry bezreflektorowe nie wymagające sygnalizacji celu. Ten man-

kament pomiarów satelitarnych można łatwo zniwelować podłączając do odbiornika satelitarnego ręczny dalmierz typu Disto. Mankament pomiarów satelitarnych w stosunku do pomiarów naziemnych jest ich dużo większa czułość na warunki atmosferyczne realizacji pomiaru w sensie refrakcji jonosferycznej i troposferycznej. Dalmierz tachymetru mierzy odległość najczęściej do setek metrów w generalnie jednorodnej warstwie powietrza, podczas gdy sygnał satelitarny pokonuje dystans ok. 20 200 000 m w bardzo zróżnicowanych ośrodkach. Ten aspekt pomiarów satelitarnych uwidacznia się szczególnie w pomiarach RTK GPS i RTN ze względu na bardzo krótki czas ich trwania. Realizacja pomiarów RTK GPS, a zwłaszcza RTN, które może wykonywać jedna osoba, będzie najczęściej tańsza niż pomiarów naziemnych. Ogólnie przyjętą relacją w pomiarach satelitarnych jest ok. dwukrotnie mniejsza dokładność wyznaczania wysokości punktów w stosunku do ich współrzędnych sytuacyjnych. W praktyce występuje też większa częstotliwość otrzymywania pomiarów odstających dla wysokości punktów. Z tych powodów pomiarów RTK GPS i RTN nie powinno się stosować do wyznaczania wysokości punktów. Nawet niwelacją techniczną często będzie można osiągnąć dokładniejsze wyniki pomiarów.

#### **4. Aspekty technologiczne pomiarów geodezyjnych na obszarach kolejowych**

Opracowanie niniejsze o charakterze teoretycznym ma solidne podstawy w praktyce dokładnych pomiarów na terenach kolejowych, także o charakterze kontrolnym. Możliwe jest spotkanie się z dużymi błędami na wielu etapach realizacji w ramach jednej inwestycji.

Zasygnalizowane w poprzednim punkcie zalety i ograniczenia technik pomiarów geodezyjnych zawsze powinny być uwzględniane w projektach i realizacji pomiarów. Problem z odpowiednią jakością sięgać może bardzo głęboko, począwszy od niekorzystnej lokalizacji punktów w aspekcie planowanej techniki pomiarowej, przez złe wykonawstwo punktów geodezyjnych uniemożliwiające stabilne ustawienie instrumentu na bardzo solidnym kolumnowym znaku (rura zalana betonem), a i sam znak może być źle posadowiony (np. przy nastawni w Brzesku), przez co nie można zachować stałości położenia

mimo, że sam w sobie jest bardzo solidnej konstrukcji. Stwierdzono, że uwzględnianie w planach pomiarowych tylko zalet satelitarnych technik pomiarowych może doprowadzić do znaczącego obniżenia jakości wyników pomiarów geodezyjnych. Własne pomiary kontrolne na jednym z modernizowanych odcinków przyniosły 5-krotny wzrost dokładności wyznaczonych współrzędnych kontrolowanych punktów osnowy w porównaniu z innym pomiarem satelitarnym.

Synergizm łącznego zastosowania satelitarnych i naziemnych technik pomiarowych jest najwyraźniej widoczny w technologii projektowania i pomiaru punktów osnowy kolejowej. Ze względu na liniowy charakter terenów kolejowych osnowa geodezyjna zawsze będzie miała kształt ciągu poligonowego, choć przy dłuższych ciągach zalecane będzie stosowanie bardziej czasochłonnej, a przez to i droższej konstrukcji w postaci łańcucha trójkątów. W technikach naziemnych w przypadku ciągów poligonowych następuje bardzo niekorzystna propagacja błędów poprzecznych. Z tego powodu konieczne jest wykorzystanie sesji statycznych satelitarnych technik pomiarowych w celu wzmocnienia konstrukcji mierzonej tachymetrem. Aktualnie osnowa na terenach kolejowych powinna składać się z par punktów osnowy podstawowej lokalizowanych co ok. 2,0–2,5 km, których współrzędne są wyznaczone z satelitarnych obserwacji statycznych. Między punktami osnowy podstawowej powinny być lokalizowane punkty osnowy szczegółowej, których współrzędne są obliczane z pomiarów wykonywanych tachymetrem. Odległości między punktami sąsiednimi, niezależnie czy to będą punkty osnowy podstawowej, czy też szczegółowej powinny być rzędu 200–250 m. Wyznaczanie współrzędnych punktów osnowy szczegółowej z obserwacji statycznych będzie nieopłacalne, a zastosowanie szybkich i tanich pomiarów RTN jest niedopuszczalne, gdyż spowoduje istotny spadek dokładności wraz z możliwością jeszcze bardziej istotnego obniżenia niezawodności wyników pomiarów. Pomiary kontrolne wykazały też, że stosowanie szybkich sesji statycznych może powodować kilkukrotny spadek dokładności wyznaczanych współrzędnych punktów w stosunku do pomiarów naziemnych i sesji statycznych. Należy podkreślić, że przeciętne błędy współrzędnych sytuacyjnych wykazane w operacji z pomiarów satelitarnych wyniosły 1 mm, a dla wysokości 2 mm. Natomiast pomiar kontrolny oparty na sesjach statycznych i pomiarze precyzyjnym tachymetrem elektronicznym wykazał błędy położenia sytuacyjnego punktów na

poziomie kilkudziesięciu milimetrów (max. 47 mm). Z pomiaru kontrolnego uzyskano wyniki 5-krotnie dokładniejsze na wszystkich kontrolowanych punktach.

Pomiary sytuacyjno-wysokościowe są mniej wymagające pod względem dokładności niż pomiary osnów geodezyjnych. W przypadku braku punktów osnowy bardzo istotnym atutem pomiarów satelitarnych będzie możliwość szybkiego wyznaczenia współrzędnych dwóch punktów osnowy, w oparciu o które możliwe będzie wykonanie pomiarów tachymetrycznych.

## 5. Podsumowanie

Rozważania nt. satelitarnych technik pomiarów geodezyjnych ograniczono ze względów praktycznych do metod statycznych umożliwiających uzyskiwanie najwyższych dokładności wyników pomiarów oraz pomiarów kinematycznych w czasie rzeczywistym RTK GPS oraz ich odmiany sieciowej RTN, która jest aktualnie najpopularniejszą techniką pomiarową.

Ze względu na około 1 800 km aktualnie modernizowanych linii kolejowych najistotniejszym wydaje się zagadnienie osnów geodezyjnych na obszarach kolejowych. Projekty kolei dużych prędkości zwiększają istotność zagadnienia ze względu na wymóg wysokiej jakości wyników pomiarów geodezyjnych. Inne pomiary nie wydają się aktualnie aż tak newralgiczne. Dużym atutem jest wprowadzenie do obligatoryjnego stosowania od 18.01.2012 r. [8] projektu znaku osnowy dwufunkcyjnej, który przystaje do nowoczesnych i przede wszystkim dokładnych technik realizacji pomiarów geodezyjnych.

Satelitarne pomiary statyczne nie są atrakcyjne dla wykonawców pomiarów geodezyjnych, gdyż są czasochłonne. Jednakże tylko one umożliwiają uzyskiwanie najwyższych dokładności i jednorodności w tym względzie osnów geodezyjnych na dużych obszarach. W pomiarach RTK GPS i RTN należy wyraźnie oddzielać dokładność wyznaczania współrzędnych sytuacyjnych od wysokości punktów z powodu istotnego zróżnicowania, także pod względem niezawodności wyników pomiarów. Obecnie największą popularnością cieszą się pomiary RTN. O ile dla pomiarów RTK GPS można by wskazać obszary porównywalnej dokładności w stosunku do pomiarów naziemnych, o tyle pomiary

RTN zazwyczaj będą ustępowały im pola w przypadku współrzędnych sytuacyjnych i zawsze w przypadku wysokości. Wyniki pomiarów testowych [7] wskazują, że stosowanie pomiarów RTN do wyznaczania wysokości punktów zdecydowanie nie jest zalecane. Ponadto problemem charakterystycznym dla pomiarów RTN jest trudna do oszacowania dokładność, dla której można jedynie określić przedział najprawdopodobniej uzyskanej wartości z przedziału 1 – 3 cm, przy często bardzo wysokiej precyzji pomiarów na poziomie pojedynczych milimetrów. Pojęcia precyzji, dokładności i niezawodności pomiarów geodezyjnych zostały przedstawione m.in. w [6]. Ten efekt może łatwo wprowadzić w błąd wykonawcę pomiarów geodezyjnych, który wysoką precyzję pomiarów zinterpretuje jako ich wysoką dokładność. Bardzo niebezpieczne dla jakości wyników pomiarów, przede wszystkim satelitarnych, jest wykonywanie ich przez osoby merytorycznie do tego nie przygotowane, co jest możliwe, gdyż obsługa odbiornika GNSS jest absolutnie banalna, ale zupełnie niewystarczająca. Niestety także osoby posiadające jakąś wiedzę w problematyce, ale dążące do zwiększenia efektywności pomiarów kosztem zaniedbywania ich ograniczeń, zazwyczaj otrzymają wyniki niedokładne, co wskazały wykonane pomiary kontrolne. W konkretnym przypadku właściwie zaprojektowany i wykonany pomiar przyniósł pięciokrotne zwiększenie dokładności wyników.

Dobrze opracowana instrukcja D-19 mogłaby narzucić wykonawcom prawidłowe sposoby i warunki realizacji pomiarów geodezyjnych na terenach kolejowych w bardzo istotnym dla kolei w Polsce momencie.

Łączne wykorzystanie naziemnych oraz satelitarnych techniki pomiarowych przy odpowiedniej wiedzy i doświadczeniu może zaowocować bardzo dokładnymi i efektywnymi technologiami pomiarów.

## **Bibliografia**

- [1] Instrukcja o organizacji i wykonaniu pomiarów w geodezji kolejowej D-19. Załącznik do Zarządzenia Nr 144 Zarządu PKP z dn. 23 października 2000.
- [2] Langley R.: *RTK GPS*. GPSWorld 9 (9), s.70–76. 1998.
- [3] Uznański A.: *Estymacja precyzji i dokładności wyników RTN w odniesieniu do sieci ASG-EUPOS*. Zeszyty Naukowo-Tech-

- niczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej. Oddział w Krakowie. Z. 149, s. 595–610, Kraków, 2009.
- [4] Uznański A.: *Satelitarne techniki pomiarowe*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej. Oddział w Krakowie. Z. 149, s. 611–618. Kraków, 2009.
- [5] Uznański A.: *Analysis of RTN measurement results referring to ASG-EUPOS network*. Geomatics and Environmental Engineering, vol. 4 no. 1/1 s. 153–161. Kraków, 2010.
- [6] Uznański A.: *Niezawodność pomiarów geodezyjnych w zintegrowanej osnowie kolejowej*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej. Oddział w Krakowie. Z. 154, s. 619–632. Kraków, 2010.
- [7] Uznański A.: *Niwelacja satelitarna RTK GPS i RTN*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej. Oddział w Krakowie. Z. 154. s. 633–650. Kraków, 2010.
- [8] Wytyczne dla osadzania znaków regulacji osi toru na konstrukcjach wsporczych (słupach) sieci trakcyjnej Ig-6. Załącznik do zarządzenia Nr 24/2011 zarządu PKP PLK S.A. z dn. 18 lipca 2011 r.
- [9] Wübbena, G.: *Zur Modellierung von GNSS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*. Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Festschrift Prof. G. Seeber zum 60. Geburtstag, Nr. 239, s. 143–155. Hannover 2001.
- [10] [www.asgeupos.pl](http://www.asgeupos.pl)
- [11] [www.plk-inwestycje.pl/informacje-prasowe/](http://www.plk-inwestycje.pl/informacje-prasowe/)

## **SATELLITE TECHNIC IN MODERN TECHNOLOGIES OF GEODESIC SURVEY AT RAILWAY AREAS**

### ***Summary***

*The construction of a new railway track and maintenance of existing ones as well as railway superstructure modernisation relying on their adjustment to higher technical and operational parameters cause high requirements for executors of geodesic survey. The measurement technic development allows to elaborate some new technologies of geodesic survey. The technic of satellite measurement and the essence of their synergic usage together with ground survey in geodesic service of linear investment have been presented. The threats for the quality of the results of satellite survey and even the contraindications for the usage of modern satellite network technics in real time on the railway areas have been given. The problem of geodesic survey quality seems to be especially essential while high speed railway tracks execution.*

**Keywords:** *satellite measurement, kinematic measurements in real time, network kinematic measurements in real time*