

NOWOCZESNE I KLASYCZNE GEODEZYJNE TECHNIKI POMIAROWE NA OBSZARACH KOLEJOWYCH

Andrzej Uznański

dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, e-mail: auznan@agh.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono nowoczesne geodezyjne techniki pomiarowe, które są lub mogą być stosowane na obszarach kolejowych. Zamieszczono także informacje dotyczące technik klasycznych z uwzględnieniem aktualnych możliwości technicznych nowoczesnych instrumentów pomiarowych. W opracowaniu ujęto najczęściej stosowane metody pomiarów: satelitarnych, niwelacyjnych, tachymetrycznych oraz skaning laserowy. Techniki pomiarowe zostały opisane z ujęciem ich charakterystyki, procedury realizacji pomiaru, instrumentów pomiarowych z charakterystyką dokładnościową, rodzaju wyników pomiaru, ich możliwości oraz ograniczeń z uwzględnieniem potencjalnych zalet i wad każdej techniki pomiarowej. Problematyka może być pomocna w optymalnym, a czasem nawet wręcz poprawnym doborze geodezyjnych technik pomiarowych, będących częścią podstawą do realizacji prac modernizacyjnych na obszarach kolejowych. Opracowanie o tematyce geodezyjnej adresowane jest do osób z branży kolejowej, które zawodowo nie są związane bezpośrednio z geodezją, ale korzystają z jej usług i produktów.

Słowa kluczowe: pomiary satelitarne, RTK GPS, RTN, niwelator kodowy, tachymetr elektroniczny, tachymetr skanujący, skaning laserowy

1. Wprowadzenie

Prace modernizacyjne, rewitalizacyjne, naprawy główne, naprawy bieżące oraz służące utrzymaniu ciągłej eksploatacji infrastruktury kolejowej wymagają obsługi geodezyjnej. Ze względu na nieustanny postęp technologiczny, m.in. w budowie instrumentów, dotychczasowe techniki pomiarowe są modyfikowane, pojawiają się nowe technologie pomiarowe, nowe sposoby na uzyskanie standardowych produktów geodezyjnych takich jak mapy lub, w postaci elementarnej, współrzędne punktów. Przepisy, które obok funkcji regulującej, mogą być również wskazówką i pomocą w wyborze sposobu realizacji pomiaru, zazwyczaj nie nadążają za pojawiającymi się możliwościami technicznymi.

O doborze rozwiązania pomiarowego decyduje w pierwszym rzędzie wymóg uzyskania żądanej jakości wyników. Dopiero kolejnym czynnikiem powinna być jego efektywność, w której podstawową rolę odgrywa czasochłonność pomiaru i jego opracowania. W przypadku każdego zadania pomiarowego wykonawca będzie dążył do maksymalnej efektywności zastosowanego rozwiązania technicznego

i technologicznego. Nierzadko pojawi się konflikt z wymogami jakościowymi inwestora. Przy braku odpowiednich przepisów istotna może się okazać znajomość podstawowych informacji o geodezyjnych technikach pomiarowych, aby inwestor mógł postawić wykonawcy rozsądne wymogi umowne, np. w zakresie sposobu realizacji zadania.

W pracy przedstawiono podstawową charakterystykę najczęściej stosowanych przez wykonawców rodzajów pomiarów na obszarach kolejowych.

2. Satelitarne metody pomiarowe

Istotą satelitarnych metod pomiarowych jest wykorzystanie sygnałów emitowanych przez sztuczne satelity Ziemi do wyznaczenia pozycji anteny satelitarnej zestawu pomiarowego wykonawcy. Nadal podstawowym systemem nawigacji satelitarnej jest amerykański system NAVSTAR GPS, choć odbiorniki satelitarne już w standardzie mają możliwość wyznaczenia pozycji z wykorzystaniem także sygnałów satelitów rosyjskiego systemu GLONASS. Większość odbiorników satelitarnych jest przystosowana do odbioru sygnałów także z systemów typu SBAS (Satellite Based Augmentation System), Galileo, czy chińskiego Compassa. Od strony teoretycznej, ale także o znaczeniu praktycznym, pomiary satelitarne można podzielić ze względu na tryb opracowania obserwacji. Kryterium to można uznać za kluczowe, gdyż na jego podstawie można dostrzec najistotniejsze cechy metod pomiarów satelitarnych i różnice między nimi. Obserwacje zarejestrowane w trakcie pomiarów satelitarnych mogą być opracowane [8]:

- w postprocessingu, czyli po wykonanych pomiarach, w specjalistycznym oprogramowaniu komputera, do którego pamięci skopiowano dane z wszystkich odbiorników satelitarnych biorących udział w pomiarze,
- w czasie rzeczywistym, czyli w terenie, bezpośrednio po wykonanym pomiarze, przez odbiornik satelitarne użytkownika, do którego przesłane zostały dane referencyjne.

Do pomiarów opracowywanych w postprocessingu należą **pomiary statyczne i szybkie statyczne**. Pomiary kinematyczne również mogą być opracowywane w postprocessingu, ale w praktyce nie opracowuje się ich w ten sposób. Umowną granicą między pomiarami statycznymi i szybkimi statycznymi może być czas ich trwania przyjęty na poziomie 1 godziny. W rzeczywistości różnica wynika z wykorzystanego do wyznaczenia pozycji algorytmu obliczeniowego. Ponadto, ze względu na czas trwania pomiaru, szybkie pomiary statyczne mają ograniczenie, co do długości wektorów, które powinny być obliczane na ich podstawie, aby uzyskać dokładność centymetrową lub lepszą. Nie można podać jednoznacznie maksymalnej długości wektora, którego wyznaczenie pozwoli na obliczenie współrzędnych punktu przy ściśle zadanej dokładności, gdyż jest to zagadnienie złożone i zależne od zmiennych warunków atmosferycznych oraz otoczenia punktu, a także może zależeć od użytego sprzętu pomiarowego i programu obliczeniowego. Kluczowe

w tym przypadku jest doświadczenie geodety. Natomiast czas trwania pomiaru statycznego będzie często podstawowym źródłem szukania oszczędności przez wykonawcę.

Procedura pomiarów statycznych jest prosta i wymaga ustawienia anteny satelitarnej nad punktem, którego współrzędne chcemy wyznaczyć. Czas pomiaru jest funkcją długości wektora, który będzie obliczany w postprocessingu oraz warunków pomiaru (stanu atmosfery, horyzontu wokół punktu). Ze względu na alternatywę w postaci znacznie bardziej ekonomicznych, ale i mniej dokładnych pomiarów w czasie rzeczywistym, pomiary statyczne stosowane są wyłącznie do wyznaczania współrzędnych punktów osnów geodezyjnych. W tym przypadku wykonawca powinien dysponować minimum 3 odbiornikami satelitarnymi. Optymalna liczba będzie zależała od konkretnego przypadku pomiaru, jakości projektu satelitarnych sesji statycznych i zazwyczaj znajdzie się w przedziale od 5 do 9 odbiorników satelitarnych.

Pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym określane są najczęściej angielskim akronimem RTK GPS (Real Time Kinematic). Ich rozwój zaowocował sieciowymi pomiarami RTK GPS, określanymi akronimem RTN (Real Time Network). W przypadku pomiarów RTK GPS i RTN uzyskanie wyniku przez odbiornik satelitarny wykonawcy w terenie, bezpośrednio po pomiarze, warunkowane jest odbiorem danych referencyjnych. W przypadku pomiarów RTK GPS ich źródłem jest drugi odbiornik satelitarny, którego antena satelitarna ustawiona jest nad punktem o znanych współrzędnych. Transmisja danych w tych pomiarach odbywa się zazwyczaj za pomocą modemów UHF, choć możliwe jest zastosowanie również modemów GSM. Praktyczna różnica między modemami tkwi w określaniu ich zasięgu. Dla modemów GSM zależy on od zasięgu operatora, którego karta SIM jest wykorzystywana do pomiarów. Dla modemów UHF kluczowa jest topografia terenu, a zasięg zazwyczaj wynosi do kilku kilometrów.

W pomiarach RTN dane pochodzą z Castera protokołu Ntrip, czyli z komputera danego systemu stacji referencyjnych. Dostęp do danych możliwy jest wyłącznie przez internet, stąd konieczność korzystania w praktyce z modemów GSM i usługi GPRS.

Procedura pomiarów kinematycznych w czasie rzeczywistym może być zrealizowana w dwóch trybach pomiarowych: stop&go oraz ciągłym.

Pomiary stop&go sprowadzają się do ustawienia nieruchomo anteny satelitarnej zamocowanej na tyczce pomiarowej nad punktem na czas od jednej do zazwyczaj kilku epok pomiarowych. Epoka pomiarowa w zasadzie zawsze trwa 1 s. Wykonawca podaje kryterium zakończenia pomiaru i odbiornik automatycznie kończy pomiar po jego spełnieniu lub sam decyduje manualnie o momencie jego zakończenia. W celu zwiększenia wiarygodności wyników, pomiar powinien trwać kilka epok, choć formalnie może trwać 1 epokę. Po wyznaczeniu pozycji punktu można przejść na kolejny punkt i wykonać kolejny pomiar.

W trybie ciągłym kolejne pomiary są wykonywane, a wynik zapisywany przez odbiornik automatycznie po spełnieniu zadanego przez użytkownika kryterium. Kryterium tym może być czas, odległość lub różnica wysokości. Pozycja wyznacza-

na jest z zestawu obserwacji kodowych i fazowych wykonanych w każdej epoce pomiarowej spełniającej kryterium. W trybie ciągłym nie można uzyskać uśredniania wyniku, ponieważ pomiar trwa 1 epokę. Pomiar taki jest więc mniej wiarygodny i może też być mniej dokładny, choćby z powodu trudniejszych do spełnienia w ruchu warunków geometrycznych, jak poziomość, prostopadłość, równoległość. Epoka pomiarowa w trybie ciągłym trwa standardowo 1 sekundę. Jednakże w przypadku pomiarów z własną stacją referencyjną możliwe jest częstsze i szybsze wyznaczanie pozycji, np. co 0,05 s przez odbiornik 20 Hz, gdyż zależy tylko od taktowania zegarów odbiorników satelitarnych: referencyjnego i ruchomego.

Odbiorniki satelitarne muszą być klasy geodezyjnej, tzn. umożliwiać wyznaczanie pozycji punktu na poziomie co najmniej subdecymetrowym. Geodezyjne odbiorniki satelitarne są produkowane w trzech odmianach: z przeznaczeniem wyłącznie do pomiarów na stacjach referencyjnych, do pomiarów w czasie rzeczywistym (zazwyczaj funkcje związane z pomiarem statycznym są blokowane programowo przez producenta) i najczęściej spotykane „uniwersalne”, którymi można przeprowadzić pomiary statyczne i w czasie rzeczywistym. Aktualnie prawie wszystkie odbiorniki satelitarne wykorzystywane w praktyce geodezyjnej są zintegrowane w jednej obudowie z anteną satelitarną. Korzystnym dla jakości wyników pomiarów satelitarnych jest, aby odbiorniki były dwuczęstotliwościowe, zwłaszcza aktualnie, przy wzmożonej aktywności Słońca. Możliwość odbioru sygnałów systemu GLONASS zazwyczaj nie jest konieczna, ale może być pomocna w uzyskaniu rozwiązania w przypadku istotnych przesłoneń horyzontu wokół punktów.

Wynikiem pomiarów satelitarnych, obliczanym na podstawie zarejestrowanych obserwacji kodów i faz fal nośnych sygnałów satelitarnych, są składowe wektory między parami punktów, na których pomiar był wykonany równocześnie. Pierwszym wnioskiem z powyższego sformułowania jest wymóg realizacji pomiaru geodezyjnego (w przeciwieństwie do niedokładnego pomiaru nawigacyjnego) minimum dwoma odbiornikami satelitarnymi. Jeden z nich może być częścią systemu naziemnych stacji referencyjnych np. ASG-EUPOS, mSPP itp., a drugi będzie odbiornikiem wykonawcy. Kolejnym wnioskiem jest stwierdzenie, że do obliczenia współrzędnych punktów konieczne są dane referencyjne. Dodanie do nich składowych wektorów obliczonych z pomiaru umożliwia wyznaczenie dokładnej pozycji punktu. Wynika z tego również wprost, że jakość wyniku może zależeć także od danych referencyjnych, na które wykonawca nie ma wpływu.

Dokładność wyników pomiarów satelitarnych zależy od trybu ich opracowania. Pomiar statyczny umożliwia najdokładniejsze z możliwych, satelitarne wyznaczenie współrzędnych punktu na poziomie nawet pojedynczych milimetrów. Na podstawie licznych pomiarów można stwierdzić, że dokładność wyznaczenia odległości między dwoma punktami może sięgnąć wartości nawet poniżej milimetra. Nie mniej dokładność pomiarów satelitarnych jest bardzo trudna do faktycznego oszacowania. Parametrem, za pomocą którego opisuje się jakość wyznaczonych współrzędnych punktu jest precyzja.

Producenci odbiorników satelitarnych podają w specyfikacji technicznej precyzję danego modelu w różnych trybach pomiarowych. Przy czym zawsze występuje

rozdzielenie precyzji pozycji poziomej i wysokości, gdyż wysokości są wyznaczane zawsze mniej precyzyjnie, najczęściej ok. dwukrotnie. Na wartość błędu średniego kwadratowego (ang. rms – root mean square) opisującego precyzję pomiaru składa się część stała oraz część zależna od długości mierzonego wektora, podawana w ppm (part per milion). Podawane aktualnie przez producentów wartości dla precyzji pomiaru zazwyczaj wynoszą dla pozycji poziomej $3 \text{ mm} +$ (od 0.1 ppm do 0.5 ppm). Dla wysokości występuje dodatkowo zróżnicowanie na pomiary statyczne precyzyjne (długie sesje): $3.5 \text{ mm} + 0.4 \text{ ppm}$ oraz pomiary statyczne i szybkie statyczne: $5 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$.

Dla pomiarów RTK GPS podawana przez producentów precyzja wyników pomiarów wynosi zazwyczaj: dla pozycji poziomej $8 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$, a dla wysokości $15 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$.

Oprogramowanie do postprocessingu i wyrównania obserwacji satelitarnych oblicza odchylenia standardowe współrzędnych punktów, które również są miarami precyzji. Ich wartości często wynoszą dla pozycji poziomej poniżej 1 mm , a dla wysokości do 2 mm .

W przypadku pomiarów RTK GPS oraz RTN odbiornik wykonawcy cały czas oblicza aktualną wartość parametru precyzji i wyświetla ją na ekranie kontrolera. Zależnie od producenta precyzja może być określana wartością błędu średniego kwadratowego lub np. współczynnikiem CQ (odbiorniki firmy Leica). Wyświetlana wartość parametru precyzji najczęściej będzie na poziomie od 0.5 cm do 2.0 cm dla pomiarów RTK GPS oraz od 1.0 cm do 3.0 cm dla pomiarów RTN. Niektórzy producenci umożliwiają wybór definicji parametru precyzji pomiaru (pozycja pozioma, pozycja przestrzenna), inni producenci stosują parametr dotyczący tylko pozycji poziomej i wówczas wykonawca ma podawane mniejsze wartości błędów niż w przypadku pozycji przestrzennej.

Dla pomiarów RTK GPS precyzja pomiaru będzie najczęściej wyższa, niż w pomiarach RTN. Ponadto w pomiarach RTN wiarygodność wyznaczanych wysokości jest znacznie niższa, niż w pomiarach RTK GPS, a jej błędy mogą sięgać decymetra.

W pomiarach RTK GPS i RTN można mówić o precyzji wyznaczonej pozycji punktu nie tylko tej obliczanej i wyświetlanej przez odbiornik dla danego pomiaru. W trybie stop&go w przypadku powtarzania pomiaru jednego punktu odbiornik policzy odchylenia standardowe. W takiej sytuacji widoczna jest wyraźnie wrażliwość pomiarów w czasie rzeczywistym na aktywność Słońca. Aktualnie tak analizowana precyzja może sięgnąć centymetra. Natomiast przy niskiej aktywności jonosfery była często na poziomie 1 mm .

Zaletą statycznych pomiarów satelitarnych, stosowanych do wyznaczania współrzędnych punktów osnów geodezyjnych, jest wysoka dokładność wyników. Na obszarach kolejowych szczególne znaczenie, ze względu na ich liniowy charakter, ma także jednorodność dokładnościowa wyników pomiarów satelitarnych na dużych obszarach. Alternatywą dla pomiarów satelitarnych jest klasyczna konstrukcja ciągu poligonowego, która charakteryzuje się silną propagacją błędów, szczególnie w kierunku poprzecznym.

Zaletą pomiarów kinematycznych w czasie rzeczywistym jest ich bezkonkurencyjna efektywność, szczególnie w zakresie czasochłonności pomiarów, stąd ich duża popularność wśród wykonawców. Niestety z tego powodu zdarzają się sytuacje stosowania takich pomiarów, mimo nie spełniania przez nie wymogów co do jakości wyników stawianych przez inwestora.

Ponadto specyfika wszystkich pomiarów satelitarnych nie wymaga wizur między mierzonymi punktami.

Wada pomiarów satelitarnych związana jest z problematyką estymacji dokładności wyników pomiarów [9]. W zasadzie można rozważać tylko precyzję pomiarów, której poświęcono powyżej relatywnie obszerny fragment punktu. Niestety można go podsumować krótko, że wszelkie wartości są zazwyczaj nierealnie optymistyczne. Szczególnym błędem jest opieranie się na nich w pomiarach RTK GPS i RTN, gdyż wartości te mogą być traktowane tylko orientacyjnie.

W przypadku pomiarów statycznych ich opłacalność często jest widoczna dopiero przez pryzmat wymaganej wysokiej jakości wyników pomiarów, gdyż same w sobie mogą być dość czasochłonne, a przez to kosztowne, zwłaszcza, że niezawodny pomiar wymaga także większej liczby odbiorników satelitarnych.

W miejsce braku wizur między punktami pojawia się konieczność odkrytego horyzontu wokół punktów, aby możliwy był odbiór sygnałów satelitarnych. Na obszarach kolejowych nierzadko będzie można to uznać za wadę, a przynajmniej za istotne ograniczenie w możliwości wykorzystania pomiarów satelitarnych. Najczęściej wykonawcy nie przykładają do tego czynnika zbyt dużej wagi, o ile ich odbiorniki są w stanie odebrać sygnały z przynajmniej 5 satelitów. Natomiast istotne przesłonięcia horyzontu wokół punktów pogarszają geometrię zadania, a zakłócenia sygnałów satelitarnych wpływają na jakość wyznaczonej pozycji punktu.

3. Klasyczne naziemne metody pomiarów

Do klasycznych metod pomiarowych należy niwelacja geometryczna oraz tachymetria. Niwelacja geometryczna związana jest wyłącznie z pomiarami wysokościowymi, choć aktualnie niwelatory umożliwiają pomiar kierunku, a nawet odległości. Są to jednak funkcje marginalne w takim instrumencie. Najnowsze rozwiązania pomiarowe opierają się na instrumentach elektronicznych: niwelatorach kodowych oraz tachymetrach elektronicznych. W obydwu przypadkach podstawowe znaczenie dla dokładności wyników pomiarów ma klasa instrumentów pomiarowych, a mniejsze konstrukcje geometryczne służące uzyskaniu rozwiązania.

3.1. *Niwelacja geometryczna*

Procedura pomiaru w niwelacji geometrycznej polega na ustawieniu niwelatora w dowolnym, korzystnym dla pomiaru miejscu, wstępnym spoziomowaniu do zakresu działania układu kompensatora, który automatycznie będzie poziomo-

wał oś celową niwelatora i doprowadzeniu w pole widzenia lunety kolejno dwóch ustawionych pionowo łąt z podziałami kodowymi. Niwelator kodowy sam wykona odczyty i wyznaczy na ich podstawie przewyższenie między punktami, na których ustawiono łąty. Dopuszczalna odległość instrumentu od łąty zazwyczaj nie przekracza 30 m– 40 m i wskazane jest, aby odległości niwelatora do obydwu łąt na danym stanowisku były zbliżone do siebie (pomiar odległości wykonywany przez niwelator może być bardzo pomocny dla spełnienia tego warunku). Niwelator wykonuje zdjęcie fragmentu łąty kodowej za pomocą matrycy światłoczułej (najczęściej CCD lub CMOS) i porównuje zarejestrowany obraz z zapisanym w pamięci wzorem kodu całej łąty. W ten sposób bardzo szybko oblicza wysokość osi celowej oraz przewyższenie, a nawet wysokość mierzonego punktu. Z zasady pomiaru wynika, że możliwość wyznaczenia wysokości punktów warunkowana jest dostępem do reperów, czyli punktów osnowy o znanych wysokościach. Pomiary niwelacyjne realizowane są w ciągach niwelacyjnych, aby było możliwe przeniesienie wysokości z reperu na mierzone punkty poprzez pomiary przewyższeń między kolejnymi punktami w ciągu. Ważne jest, aby pomiar ciągu zakończyć na reperze.

Niwelator oraz łąty muszą być dobrane do rodzaju niwelacji. Niwelacja geometryczna w zależności od wymagań dokładnościowych może być precyzyjna (I klasa o dopuszczalnym błędzie ± 1 mm/1 km ciągu, II klasa o błędzie ± 2 mm/1 km ciągu), techniczna reperów (III i IV klasa, o błędach odpowiednio ± 4 mm/1 km i ± 10 mm/1 km ciągu) lub techniczna (V klasa z dopuszczalnym błędem ± 20 mm/1 km). Niwelatory precyzyjne umożliwiają wyznaczanie wysokości przy podwójnej niwelacji i łątach inwarowych z odchyleniem standardowym już od 0.3 mm/1 km.

Oprogramowanie niwelatorów kodowych umożliwia wybór jednej z kilku procedur pomiarowych, bieżącej kontroli jakości pomiaru przez obliczanie odchylenia standardowego z kilku odczytów do łąty oraz wyrównanie ciągu niwelacyjnego metodą najmniejszych kwadratów. Należy zwrócić uwagę, że kontrola poprawności odczytów polega na analizie stabilności ustawienia łąty. Jeśli łąta jest ustawiona stabilnie, ale nie pionowo, niwelator nie będzie miał podstaw do kwestionowania odczytu.

Można wspomnieć przy okazji przedstawiania niwelatorów kodowych, że istnieją również niwelatory laserowe. Służą one jednak tylko do zadania płaszczyzny: poziomej lub nachylonej o jednym lub dwu spadkach.

Wynikiem niwelacji geometrycznej są przewyższenia między sąsiednimi punktami w ciągu niwelacyjnym. Na ich podstawie obliczane są wysokości wszystkich punktów. Nie ma informacji o sytuacyjnym położeniu punktów.

Zaletą tej techniki pomiarowej jest bezkonkurencyjna dokładność i niezawodność wyników. Odpowiednim sprzętem można osiągnąć dokładność nawet submilimetrową. Kolejna istotna zaleta wynika z automatyzmu działania niwelatora kodowego, dzięki czemu pomiar jest szybszy i wyeliminowane są błędy popełniane przez obserwatora przy odczycie i ewentualnie jego zapisie. Ponadto możliwość wyrównania obserwacji przez instrument umożliwia odpowiednią reakcję już w terenie.

Wadą niwelatorów kodowych są problemy z wykonaniem pomiaru przy bardzo silnym nasłonecznieniu łąty i/lub nierównomiernym jej oświetleniu (naturalnym lub sztucznym). Ponadto musi być wyraźnie widoczny fragment łąty o długości min. 30 cm. Na możliwość wykonywania odczytów mają też wpływ warunki zewnętrzne wykonywania pomiaru, takie jak turbulencja powietrza i drgania kompensatora wywołane silnym wiatrem. Nie są to jednak czynniki problematyczne tylko w przypadku niwelatorów kodowych, a w każdym przypadku niwelacji geometrycznej.

3.2. Tachymetria

Pomiar tachymetryczny polega na wyznaczeniu współrzędnych przestrzennych punktów mierzonych na podstawie pomiaru odległości, kierunków poziomych i kątów pionowych. Generalnie klasyczny pomiar tachymetryczny służy bezpośredniemu wyznaczeniu współrzędnych metodą biegunową. Tu ma znaczenie szersze i ogólne. Traktowany jest jako każdy pomiar wykonany tachymetrem elektronicznym.

Procedura pomiaru tachymetrem elektronicznym może rozpoczynać się od kalibracji polegającej na wyznaczeniu błędów instrumentalnych i wprowadzeniu poprawek, które będą je kompensowały w trakcie pomiarów. W praktyce kalibracja jest wykonywana sporadycznie. Pomiar tachymetrem rozpoczyna się od scentrowania i spoziomowania instrumentu nad punktem osnowy, mierzonym lub w korzystnym miejscu w przypadku konstrukcji geometrycznej wcięcia wstecz. Tachymetr wymaga zorientowania kręgu poziomego, do czego służy wycelowanie na pryzmat ustawiony nad punktem osnowy, co związane jest z wizurą **na dany punkt**. Przed pojawieniem się pomiarów satelitarnych, do wyznaczenia współrzędnych punktów osnowy na obszarach kolejowych konieczne było stosowanie bardzo słabej geometrycznie konstrukcji z silną propagacją błędów, szczególnie w kierunku poprzecznym, w postaci ciągu poligonowego. Aktualnie pomiary w ciągach poligonowych są wzmocnione poprzez pomiary satelitarne punktów podstawowej poziomej osnowy geodezyjnej.

Tachymetry elektroniczne mogą być różnej klasy w zależności od precyzji realizacji pomiaru odległości, kierunku poziomego i kąta pionowego. Generalnie klasa instrumentu jest kluczowym parametrem dla jakości wyników pomiarów, choć może nie mieć żadnego znaczenia w przypadku przeprowadzania pomiarów w warunkach silnej wibracji powietrza, co jest bardzo częstym zjawiskiem na obszarach kolejowych. Tachymetry elektroniczne najwyższej klasy potrafią zmierzyć odległość do pryzmatu z dokładnością $0.6 \text{ mm} \div 1.0 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$, wykonać odczyt kierunku poziomego i kąta pionowego z dokładnością $0.5'' \div 1.0''$. Dokładność pomiaru instrumentów klasy średniej charakteryzuje się dokładnościami odpowiednio $2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ oraz od $2''$ do $3''$, a niższej odpowiednio $3 \text{ mm} \div 5 \text{ mm} + 3 \text{ ppm}$ oraz $5'' \div 7''$. Możliwe są również pomiary bezlustrowe, których dokładność zależy od powierzchni odbijającej, czego producenci nie uwzględniają w specyfikacjach technicznych. Wyniki badań pomiarów bezlustro-

wych do powierzchni syntetycznych zostały przedstawione w [1]. W zależności od powierzchni, **różnice w wynikach pomiarów** mogą sięgać kilkunastu milimetrów mimo, że producent określa precyzję pomiaru na np. $3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$.

W przypadku pomiarów na obszarach kolejowych bardzo często występują silne wibracje powietrza. Zjawisko to związane jest z nasłonecznieniem podtorza i może być wyeliminowane poprzez pomiary nocne. W takiej sytuacji bardzo pomocną funkcją tachymetru elektronicznego jest ATR (Automatic Target Recognition), czyli systemu automatycznego celowania do pryzmatu dalmierczego. Innymi przydatnymi funkcjami są: śledzenie pryzmatu i jego wyszukiwanie. Są rozwiązania pozwalające nawet na identyfikację pryzmatu przez tachymetr elektroniczny.

Istotnym etapem w rozwoju tachymetrów elektronicznych było pojawienie się w nich funkcji skanowania i fotografowania celu. Tachymetry skanujące trybie skanowania mogą pomierzyć od kilku, kilkunastu punktów na sekundę lub nawet do 1000 punktów na sekundę. Dokładność pomiaru może być porównywalna do dokładności pomiaru skanerami laserowymi, ale są też instrumenty, które umożliwiają ok. dwukrotnie dokładniejszy pomiar w stosunku do skanerów laserowych (z wyjątkiem optycznych skanerów triangulacyjnych).

Rozpatrując wady i zalety tachymetrów elektronicznych można kwestię ująć i w ten sposób, że cena jest rozwiązaniem potencjalnych mankamentów. Droższe rozwiązania wiążą się z wyższą klasą instrumentu i bogatszym oprogramowaniem wewnętrznym. O ile niwelatora kodowego nie można porównywać z tachymetrem elektronicznym, to tachymetr nie może się równać z precyzyjnym niwelatorem kodowym w zakresie pomiarów wysokościowych niezależnie od klasy instrumentu. Nie dorówna też szybkością pomiaru skanerom laserowym, ale może zaferować za to dokładniejsze wyniki pomiarów.

Czasem istotnym mankamentem technologii pomiarowej może być konieczność zapewnienia wizur ze stanowiska instrumentu na sąsiednie punkty.

4. Laserowy skaning naziemny

Skaning laserowy jest relatywnie najnowszą geodezyjną techniką pomiarową, która w Polsce zdobyła sporą popularność, zważywszy na kilkusetmilionowy koszt instrumentu. Nie należy jednak popularności mylić z powszechnością, a rozumieć, jako próby wykorzystania skaningu laserowego do wszelkich możliwych zastosowań, łącznie z naziemną inwentaryzacją drzewostanów. W zależności od lokalizacji skanera laserowego technika pomiarowa określana jest jako skaning [6]:

- satelitarny (ang. SLS - Satellite Laser Scanning),
- lotniczy (ang. ALS - Airborne Laser Scanning),
- naziemny (ang. TLS - Terrestrial Laser Scanning).

Punkt poświęcony będzie skaningowi naziemnemu, gdyż jest on najbardziej dostępny dla geodetów. Naziemny skaning laserowy może być stacjonarny lub

mobilny. W przypadku obszarów kolejowych o charakterze liniowym to rozróżnienie dla skaningu naziemnego jest istotne.

Procedura pomiarowa jest w pełni automatyczna, można zdefiniować zakres obszaru skanowania. W celu dokładnego połączenia danych w przypadku pomiaru wielostanowiskowego konieczne jest odpowiednie rozmieszczenie tarcz celowniczych, które stanowią punkty referencyjne w opracowaniu obserwacji. Skanery wyznaczają współrzędne wszystkich punktów, od których odbije się wiązka lasera, metodą biegunową, czyli na podstawie pomiaru odległości oraz kąta poziomego i pionowego. Idea wyznaczania współrzędnych punktów jest analogiczna do wykorzystywanej od lat w tachymetrach elektronicznych, ale przy nieporównywalnie większej szybkości pomiaru.

Skanery laserowe ze względu na zasadę pomiaru odległości dzieli się w zasadzie na impulsowe i fazowe. Obok metody elektrycznej pomiaru odległości istnieje jeszcze metoda optyczna i możemy mówić także o skanerach triangulacyjnych. Ten podział ma znaczenie podstawowe i praktyczne, gdyż metoda pomiaru odległości determinuje prędkość, dokładność oraz zasięg pomiaru. Istotne jest więc dobranie odpowiedniego instrumentu do swoich potrzeb, gdyż nie ma jednego, najlepszego.

Producenci skanerów laserowych mają różne sposoby podawania danych technicznych [10,11,12,13,14]. Porównawcze zestawienie tabelaryczne informacji musiałoby być opatrzone odnośnikami z wyjaśnieniami specyfiki danego parametru, a porównanie na pierwszy rzut oka mogłoby być mylące. Z tego powodu zrezygnowano z zestawienia tabelarycznego, podając przykładowe wartości lub ich najczęstsze zakresy dla poszczególnych parametrów.

Precyzja pomiaru jest podstawowym parametrem skanera laserowego. Jest ona podawana przez producentów dla zadanej odległości, gdyż wraz z jej wzrostem spada. Przyjmowana jest najczęściej odległość 50 m i/lub 100 m. Parametr dotyczy pomiaru odległości oraz pozycji przestrzennej punktu. Precyzja pomiaru odległości jest zawsze wyższa niż precyzja przestrzennej pozycji punktu, która uwzględnia oprócz precyzji pomiaru odległości także precyzję pomiaru kątów. Należy mieć na uwadze, że skaner wykonuje pomiary metodą biegunową wyznaczając współrzędne x , y , z każdego z pomierzonych punktów. Bardzo sporadycznie można znaleźć w specyfikacjach technicznych skanerów informację o dokładności pomiaru. Czasem producenci zastrzegają, że jakość wyników dotyczy, najczęściej enigmatycznych «warunków testowych producenta» lub «laboratoryjnych». Z tego powodu istotne znaczenie mają własne pomiary testowe użytkownika danego skanera w znanych mu warunkach pomiaru i charakterystyce obiektu. Precyzja pomiaru odległości może być na poziomie 3 mm ÷ 5 mm/50 m. Dla pozycji przestrzennej punktu precyzja zazwyczaj nie będzie lepsza od 6 mm/50 m. Część producentów podaje tylko precyzję pomiaru odległości. Czasem pojawia się parametr szumu odległościowego, który jest zazwyczaj na poziomie 2 mm/50 m. Można to uznać za pewien wybieg, jeśli nie podano innego parametru jakości pomiaru, gdyż szum odległościowy opisuje odchylenie standardowe zeskanowanych punktów względem powierzchni modelowej.

Zasięg, podawany zazwyczaj w zależności od własności odbijających obiektu, wyrażanej w procentach wiązki emitowanej przez laser. Przy tym parametrze pojawia się pojęcie refleksyjności. Refleksyjność zwierciadlana powierzchni definiowana jest jako stosunek mocy wiązki odbitej do mocy wiązki padającej, natomiast refleksyjność dyfuzyjna definiowana jest jako stosunek mocy wiązki rozproszonej do mocy wiązki padającej. Refleksyjność zależy od rodzaju materiału, od nierówności powierzchni i ich pochylenia [7]. Znaczenie ma więc wybór lokalizacji stanowisk instrumentu w zależności od cech skanowanych obiektów. Należy zwrócić uwagę, że refleksyjność zależy nie tylko od właściwości skanowanego obiektu, ale również od długości fali zastosowanej w danym modelu skanera. Skanery działają głównie w obszarze spektrum widzialnego (400 nm – 700 nm), ale występują też instrumenty działające w bliskiej podczerwieni (700 nm – 1000 nm) i podczerwieni (> 1000 nm). Ze względu na ograniczenie tematyki skaningu do skanerów naziemnych zjawisko ekstynkcji atmosferycznej można pominąć. Zasięg skanerów impulsowych może wynosić kilkaset metrów, a nawet kilka kilometrów, ale kosztem obniżającej się dokładności pomiaru. Zasięg dalmierzy fazowych wynosi w zasadzie do 100 m. Możliwy jest pomiar do dwukrotnie większych odległości, ale dokładność może nie być konkurencyjna w porównaniu do skanerów impulsowych.

Rozdzielczość jest zdolnością skanera do wykrywania, rozróżniania, pomiaru i zapisu przestrzennych informacji o szczegółach obiektu [2]. Rozdzielczość odległościowa jest definiowana jako minimalna różnica w odległości, która jest możliwa do wykrycia przez skaner. Bezpośredni wpływ na nią mają: precyzja pomiaru, rozbieżność wiązki lasera oraz stosunek mocy sygnału do wielkości szumu pomiarowego. Rozdzielczość kątowa może być definiowana jako rozmiar najmniejszego elementu jaki jest rozróżnialny na powierzchni. Ten rodzaj rozdzielczości jest istotny dla szczegółowości wizualizacji danych, a zależy od średnicy plamki lasera oraz gęstości skanowania, którą można wybrać w opcjach instrumentu. Rozdzielczość kątowa będzie malała ze wzrostem odległości od obiektu. Przykładowo, dla 0.01 stopnia będzie wynosiła dla odległości 10 m, 100 m, 1000 m odpowiednio 0.002 m, 0.017 m, 0.174 m.

Pole widzenia, definiujące maksymalny obszar, który może być poddany pomiarowi ze stanowiska skanera. Różnice w wartościach występują tylko dla kąta pionowego, przykładowo (kat poziomy \times kat pionowy): $360^{\circ} \times 320^{\circ}$, $360^{\circ} \times 80^{\circ}$.

Prędkość skanowania, podawana w punktach na sekundę, mieści się w zakresie od kilku tysięcy do nawet ponad 1 miliona pomierzonych punktów na sekundę.

Średnica plamki lasera, która podawana przy określonej odległości do skanowanego obiektu, gdyż zwiększa się ze wzrostem odległości, ponieważ wiązka lasera jest rozbieżna. Przykładowo dla 10 m średnica plamki lasera będzie się zawierała w zakresie od 0.6 mm do 3.2 mm. Parametr ten jest skorelowany z rozdzielczością i dokładnością pomiaru. Należy nadmienić, że na rozdzielczość skanów może mieć wpływ średnica plamki lasera, ale nie jest ona przez jej wielkość ograniczona. Zakładając, że przy jakiejś odległości do obiektu średnica plamki lasera wynosi aż 20 mm, to możliwe jest uzyskanie precyzji na poziomie 2 – 5 mm.

Temperatura pracy, która standardowo jest wymagana dodatnia, co ogranicza sezonowo możliwości pomiarowe tą techniką. Może to być istotne ograniczenie w przypadku planu monitoringu okresowego danego obiektu. Nie mniej są instrumenty mogące pracować w temperaturze do -20°C lub mogące pracować w krótkim okresie czasu w temperaturach ujemnych, np. skaner pracujący w temperaturze od 0°C w sposób ciągły może wykonywać pomiary: $-20^{\circ}\text{C}/30$ min. lub $-40^{\circ}\text{C}/10$ min.

Wynikiem pomiaru skanerem laserowym jest duży zbiór punktów w układzie lokalnym stanowiska skanera oraz parametr intensywności odbicia, czyli albedo. Aby dobrze zrozumieć możliwości skaningu laserowego, można go porównać do zrobienia zdjęcia. Pomierzony zostanie tylko obiekt najbliższy stanowisku skanera na danym kierunku przestrzennym.

Zaletami naziemnego skaningu laserowego są:

- automatyczna procedura pomiarowa, eliminująca błędy osobowe,
- kompleksowość i szczegółowość pomiaru inwentaryzacyjnego,
- bezkonkurencyjna szybkość pomiaru tak dużej liczby punktów,
- niezależność od pory dnia (możliwość prowadzenia pomiarów w nocy),
- pomiar zdalny, nie wymagający sygnalizowania punktów pomiarowych, ani bezpośredniego dostępu do obiektu (wysoka temperatura, napięcie elektryczne itp.)

Wadami naziemnego skaningu laserowego mogą być lub są:

- wysoki koszt instrumentu i oprogramowania do opracowania wyników pomiarów,
- bardzo duże zbiory danych, miliony punktów z pomiarów,
- czasochłonne opracowanie,
- brak możliwości wykonania pomiaru w deszczu, śniegu, we mgle, dużej wilgotności powietrza,
- zależność możliwości realizacji pomiaru i jakości wyników od rodzaju obiektu (kształt, materiał, kolor, wilgotność) [4],
- występowanie martwych pól z powodu pomiaru najbliższego obiektu na danym kierunku,
- brak uniwersalnych rozwiązań sprzętowych, np. wolny pomiar skanerów impulsowych oraz ograniczony zasięg szybkich skanerów fazowych,
- dla większości instrumentów wymóg dodatniej temperatury pomiaru,
- często krótki czas pracy na baterii wewnętrznej ciężkiego skanera,
- spadek dokładności pomiaru wraz ze wzrostem odległości do mierzonego obiektu.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono podstawową charakterystykę technik pomiarowych, które są najczęściej stosowane na terenach kolejowych. Nie ujęto specyficznych technologii pomiarowych wynikających z zastosowania dodatkowych rozwiązań

technicznych, np. w postaci wózków pomiarowych. Celem pracy było przedstawienie osobom niezwiązanym z geodezją, ale korzystającym z jej usług, możliwości stosowania technik pomiarów geodezyjnych na obszarach kolejowych. Starano się zwrócić uwagę na parametry jakości pomiarów, gdyż one w pierwszym rzędzie powinny decydować o wyborze techniki pomiarowej. Ogromne zaawansowanie technicznie i technologiczne w budowie instrumentów pomiarowych nie powinno przesłaniać ich słabszych stron i wymogów, co do warunków realizacji pomiaru.

Podstawową zaletą statycznych pomiarów satelitarnych jest homogeniczność dokładności wyników pomiarów na dużych obszarach. Satelitarne pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym RTK GPS i RTN są najbardziej efektywnym rozwiązaniem pomiarowym w geodezji, ale ustępują dokładnością i niezawodnością klasycznym pomiarem naziemnym. Każdy rodzaj pomiaru satelitarnego wymaga odkrytego horyzontu wokół mierzonych punktów. Utrudniona jest też ocena rzeczywistej jakości wyników pomiarów satelitarnych. Aktualnie najpopularniejsze z satelitarnych metod pomiarowych są pomiary RTN. Jednak bardziej dokładne i bardziej niezawodne wyniki można nadal uzyskać z pomiarów RTK GPS. Najdokładniejsze wysokości można wyznaczyć precyzyjnymi niwelatorami kodowymi. Współrzędne poziome najdokładniej można wyznaczyć tachymetrem elektronicznym, dobierając klasę instrumentu do żądanej dokładności. Pomiary inwentaryzacyjne o dużej szczegółowości wymagają zastosowania skanerów laserowych, a w przypadku większych wymagań co do dokładności wyników, ale kosztem szybkości pomiaru, można zastosować tachymetry skanujące. Skanery laserowe mogą wykonywać pomiary przeciętnie 1000 razy szybciej niż tachymetry elektroniczne. Zasięg dokładnego, kilkumilimetrowego pomiaru skanerem laserowym będzie ograniczony do odległości 50 m lub w najlepszym przypadku 100 m, dla tachymetru może przekraczać kilometr. Tachymetr wykonuje pomiar po wycelowaniu na przyrząd dalmierzy lub po prostu cel. Natomiast skaner laserowy wykonuje pomiary automatycznie z zdaną rozdzielczością kątową. Jeśli wykonawcę interesuje pomiar konkretnego punktu, to nie ma pewności, że akurat zostanie on pomierzony, zwłaszcza przy większych odległościach, dla których odległości między mierzonymi punktami mogą sięgać centymetrów.

Bibliografia

1. Lenda G., Marmol U., Dokładność dalmierzy bezzwierciadlanych dla pomiaru obiektów wykonanych z materiałów syntetycznych. Pomiary, Automatyka, Kontrola. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, Sekcja metrologii, Polskie Stowarzyszenie Pomiarów Automatyki i Robotyki POLSPAR, vol. 56 nr 11, 2010.
2. Lichti D., A resolution measure for terrestrial laser scanners. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 3, 2004.

3. Schulz T., Ingensand H., Terrestrial laser scanning – investigations and applications for high precision scanning. Proceeding of the FIG Working Week-The Olympic Spirit in Surveying, Ateny, Grecja 2004.
4. Schulz T., Ingensand H., Influencing variables, precision and accuracy of terrestrial laser scanners. INGENEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratysława, Słowacja 2004.
5. Schulz, T., Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. Doctoral Thesis, ETH Zurich 2007.
6. Shan J., Toth C., Topographic Laser Ranging and Scanning, Principles and Processing, CRC Press, 2009.
7. Szopa M., Zygmunt M., Mierczyk J., Metoda korekcji charakterystyk odbiciowych wybranych materiałów naturalnych i sztucznych w skanerze laserowym średniego zasięgu. Biuletyn WAT, vol. LXIII, nr 1, Warszawa 2009.
8. Uznański A., Satelitarne techniki pomiarowe. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej. Oddział w Krakowie, z. 149, Kraków 2009.
9. Uznański A., Niezawodność pomiarów geodezyjnych w zintegrowanej osnowie kolejowej. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej, Oddział w Krakowie, z. 154, Kraków 2010.
10. <http://www.faro.com/products/3d-surveying/laser-scanner-faro-focus-3d/overview>
11. http://www.leica-geosystems.pl/pl/Skanery-laserowe-3D-HDS_5570.htm
12. <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/>
13. <http://www.trimble.com/3d-laser-scanning/index.aspx>
14. <http://www.zf-laser.com/Products.laserscanner.0.html?&L=1>