

KAZIMIERZ MIŚKIEWICZ
 ANDRZEJ NOWROT
 ANTONI WOJACZEK

Funkcjonowanie systemu RTLS w wyrobisku podziemnym

Trudne warunki środowiskowe kopalń podziemnych wymagają stosowania systemów bieżącej identyfikacji osób znajdujących się w wyrobiskach górniczych. Stosowane dotychczas w kilku kopalniach strefowe systemy lokalizacji górników umożliwiają dyspozytorowi tylko w sposób ilościowy określić stan załogi pracującej na danym poziomie czy w danym rejonie eksploatacyjnym. Nie ma on możliwości dokładnej i bieżącej lokalizacji górników znajdujących się w wyrobiskach. Stanowi to duże utrudnienie w przypadku katastrof górniczych i konieczności prowadzenia akcji ratunkowych górników zasypanych w wyrobiskach. Wielodniowe poszukiwania górników w czasie ostatniej katastrofy spowodowały potrzebę wprowadzenia w rejonach szczególnie zagrożonych systemów lokalizacji ciągłej RTLS. Artykuł omawia możliwości zastosowania systemów RTLS w kopalniach i przedstawia wybrane pierwsze doświadczenia z prób ruchowych takich systemów RTLS, jakie były prowadzone w ostatnim czasie w kilku kopalniach.

Słowa kluczowe: systemy RFID, systemy lokalizacji RTLS, radiokomunikacja w górnictwie

1. WIADOMOŚCI WSTĘPNE

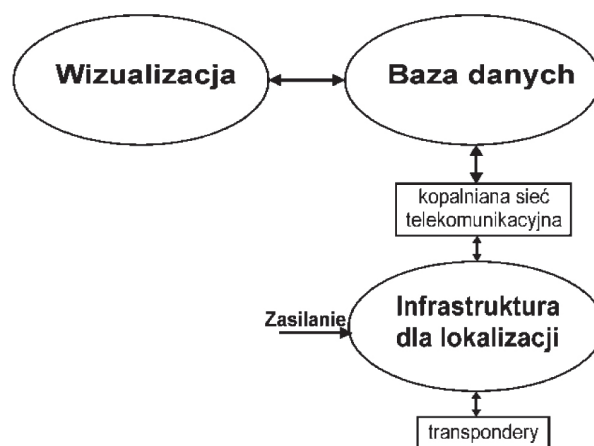
Współczesna radiokomunikacja stwarza możliwość budowy systemów lokalizacji załogi w wyrobiskach podziemnych.

Stosowane są dwa rozwiązania [1, 2]:

- Lokalizacja strefowa przy zastosowaniu techniki RFID (ang. *Radio Frequency Identification*) polegającej na bezprzewodowym (radiowym) odczycie numeru identyfikacyjnego identyfikatora (transpondera) przez czytnik. W takim rozwiązaniu wejścia do monitorowanej strefy wyposaża się w bramki zawierające czytniki RFID umożliwiające określenie kierunku ruchu identyfikatora (wejście do strefy, wyjście ze strefy). Taki system pozwala na określenie liczby górników w każdej strefie oraz czasu wejścia/wyjścia górnika do/ze strefy. Dyspozytor nie ma jednak możliwości dokładnej (bieżącej) lokalizacji górników w poszczególnych wyrobiskach monitorowanej strefy.
- RTLS – lokalizacja „dokładna” (ang. *Real Time Locating System* – system lokalizacji w czasie rzeczywistym). Pozwala ona na określenie z odpowiednią dokładnością położenia (np. współrzędnych) identyfikatora (transpondera) w monitorowanym wyrobisku (np. w strefie szczególnego zagrożenia tąpnięciami) i w określonych odstępach czasu.

Przewiduje się stosowanie systemów RTLS w strefach szczególnie niebezpiecznych, np. w tych rejonach, gdzie występują zagrożenia skojarzone. W przypadku wystąpienia niebezpiecznego zdarzenia w takim wyrobisku system RTLS umożliwia zlokalizowanie wszystkich górników, którzy znaleźli się w strefie zagrożenia na krótko przed powstaniem tego niebezpiecznego zdarzenia, np. tąpnięcia, wybuchu, zawału itp. [3, 4].

Na rysunku 1 pokazano ogólną strukturę systemu lokalizacji załogi w kopalni. Tego rodzaju strukturę mają zarówno systemy RFID, jak i RTLS [3].



Rys. 1. Struktura systemu lokalizacji załogi

W strukturze można wyróżnić:

- transpondery osobiste załogi, najczęściej aktywne, zasilane z lampy górnika,
- podziemną infrastrukturę dla lokalizacji (czytniki, bramki identyfikacyjne, zasilacze iskrobezpieczne, zewnętrzne anteny, skrzynki przyłączeniowe itp.),
- kopalnianą sieć telekomunikacyjną dołową oraz powierzchniową (miedzianą, światłowodową, lub w części radiową),
- bazę danych w serwerach systemu lokalizacji wraz z oprogramowaniem,
- oprogramowanie (oraz urządzenia) dla systemu wizualizacji.

2. SYSTEMY RTLS

2.1. Zasady funkcjonowania systemów RTLS

Systemy lokalizacji RTLS są rozwinięciem technik RFID. W takich systemach czytnik (stacjonarny) nie tylko odczytuje sygnał radiowy wysyłany przez identyfikator (ruchomy), lecz dokonuje także pomiaru pewnych parametrów odebranego sygnału radiowego, po to by system mógł obliczyć położenie identyfikatora z określoną dokładnością w chwili nadawania sygnału.

W zależności od zastosowania możemy wyróżnić systemy RTLS:

- lokalizujące identyfikatory w przestrzeni przez obliczenie trzech współrzędnych,
- lokalizujące identyfikatory na płaszczyźnie przez obliczenie dwóch współrzędnych,
- lokalizujące identyfikatory na linii (często prostej) przez obliczenie jednej współrzędnej; tego rodzaju rozwiązanie będzie stosowane w wyrobiskach korytarzowych kopalń podziemnych.

Systemy RTLS są najczęściej nazywane **systemami lokalizacji dokładnej** co oznacza, że taki system oblicza położenie identyfikatora z pewną dokładnością (z określonym błędem). Błąd lokalizacji identyfikatora zawiera składnik losowy, który jest miarą precyzji lokalizacji oraz błędem systematycznym. Na rysunku 2 pokazano interpretację składowych błędów lokalizacji identyfikatora umieszczonego na płaszczyźnie w punkcie Q_k o współrzędnych x_k, y_k .

Kolejne (w czasie następných sesji transmisyjnych) wyznaczone (obliczane) położenia identyfikatora przez czytnik określono przez P_i i pokazano na rysunku 2

jako czerwone kropki. Mają one współrzędne x_i, y_i . Środek \bar{P}_k wyznaczonych położenia identyfikatora w stosunku do czytnika ma współrzędne równe:

$$\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

$$\bar{y}_k = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2)$$

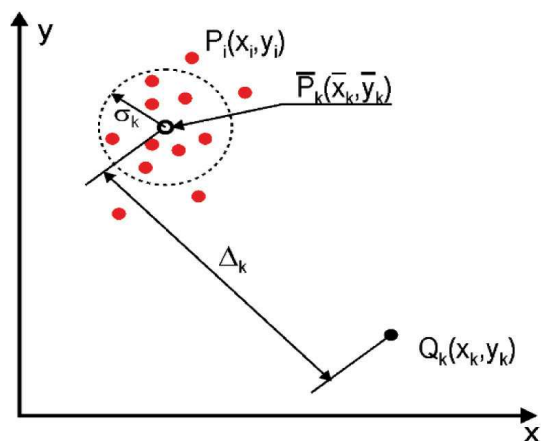
Odchylenie standardowe $\sigma_k(P_k)$ punktów P_i od środka \bar{P}_k jest określone zależnościami:

$$\sigma_x(P_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_k)^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$\sigma_y(P_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_k)^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$\sigma_k(P_k) = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (5)$$

i jest miarą precyzji lokalizacji, a także oceną rozrzutu wyników lokalizacji wokół środka lokalizacji \bar{P}_k . Miarą błędów systematycznych lokalizacji jest odległość Δ_k pomiędzy rzeczywistym położeniem identyfikatora Q_k a środkiem wyznaczonych lokalizacji \bar{P}_k .



Rys. 2. Składowe błędy lokalizacji identyfikatora [5]

Dokładność lokalizacji może być również określona przez podanie następujących parametrów [6]:

- CEP (ang. *Circular Error Probability*) – promień okręgu, o środku w pozycji rzeczywistej identyfikatora, w którym mieści się 50% obliczonych pozycji identyfikatora (tłumaczony również jako zastępczy promień błędu [7]),
- CEP70 – promień okręgu, o środku w pozycji rzeczywistej identyfikatora, w którym mieści się 70% obliczonych pozycji identyfikatora,
- R95 – promień okręgu dla 95% obliczonych pozycji identyfikatora.

2.2. Sposoby lokalizacji w systemach RTLS

Wyróżnia się następujące sposoby lokalizacji identyfikatorów na płaszczyźnie w systemach RTLS [8]:

- AOA (ang. *Angle of Arrival*) – metoda pomiaru kąta nadejścia odbieranego sygnału z identyfikatora,
- TOA (ang. *Time of Arrival*) – metoda pomiaru czasu nadejścia sygnału z identyfikatora,
- TDOA (ang. *Time Difference of Arrival*) – metoda pomiaru różnicy czasów nadejścia sygnałów z identyfikatora,
- RSS (ang. *Received Signal Strength*) – metoda pomiaru (przez czytniki) poziomu sygnału radiowego emitowanego przez identyfikator.

Spotyka się również rozwiązania hybrydowe stosujące dwie z wymienionych metod, np. AOA i TDOA (m.in. rozwiązanie firmy UBISENSE) [5].

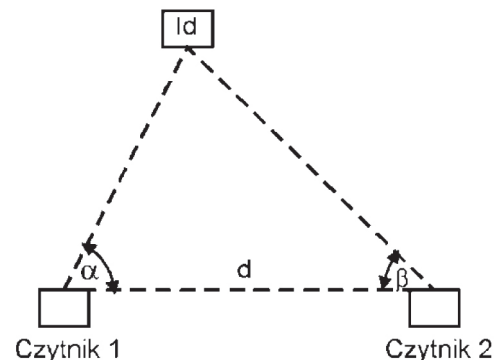
W przypadku lokalizacji identyfikatora (Id) metodą AOA stosuje się dwa czytniki ustawione w odległości d (rys. 3). Każdy czytnik jest wyposażony w antenę umożliwiającą określenie kątów α i β nadejścia sygnału z identyfikatora. Znajomość odległości d oraz kątów α i β pozwala na określenie położenia identyfikatora, wykorzystując zależności geometryczne dotyczące trójkąta.

W przypadku metody TOA stosuje się trzy czytniki (rys. 4). Czytniki dokonują pośredniego pomiaru odległości d_1 , d_2 , d_3 do identyfikatora, mierząc czas potrzebny fali elektromagnetycznej na przebycie odległości od identyfikatora do czytnika. Czas może być mierzony dwoma sposobami:

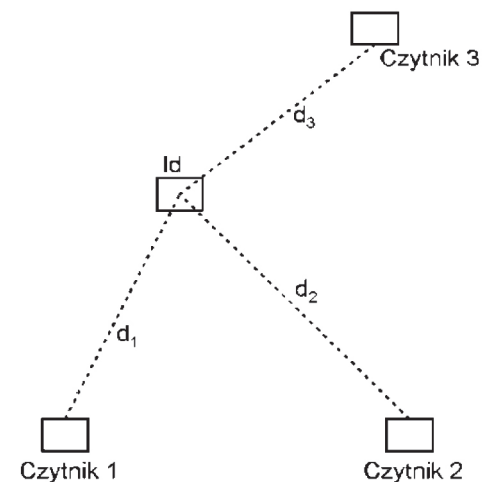
- dwukierunkowo (czytnik – Id – czytnik) z uwzględnieniem czasu realizacji odpowiedzi,
- jednokierunkowo, gdzie identyfikator wysyła sygnały w zdefiniowanych chwilach czasowych.

Ponieważ nie można zapewnić synchronizacji zegarów identyfikatora i czytników, na wynik pomiaru czasu ma wpływ nieznanne przesunięcie czasowe zegarów identyfikatora i czytnika. Przesunięcie czasowe zegarów można wyznaczyć, stosując dodatkowy czytnik (np. trzy czytniki dla lokalizacji na płaszczyźnie dwuwymiarowej lub cztery czytniki dla lokalizacji w przestrzeni) i wykorzystując pojęcie pseudoodległości (podobnie jak w systemach GPS). Znajomość odległości d_1 , d_2 , d_3 , a także położenia, czytników pozwala na określenie położenia identyfikatora przy wykorzystaniu zależności geometrycznych.

W przypadku metody TDOA stosuje się czytniki z synchronizowanymi zegarami i mierzy się różnicę czasów przyjsia sygnału z identyfikatora do dwóch czytników. W przypadku zastosowania trzech czytników różnice czasów pozwalają na określenie różnic odległości $\Delta_{12} = d_1 - d_2$, $\Delta_{23} = d_2 - d_3$. Znajomość różnic odległości pozwala na określenie położenia identyfikatora na podstawie odpowiednich zależności geometrycznych.



Rys. 3. Ilustracja metody AOA lokalizacji identyfikatora Id [3]



Rys. 4. Ilustracja metod TOA, TDOA, RSS lokalizacji położenia identyfikatora Id [3]

W przypadku metody RSS czytniki dokonują pomiaru poziomu sygnału odebranego z identyfikatora. Jeżeli znany jest model propagacji fali elektromagnetycznej (zależność poziomu sygnału od odległości), to wartość poziomu sygnału odebranego przez poszczególne czytniki pozwoli na określenie odległości d_1, d_2, d_3 oraz położenia identyfikatora. Metody obliczania położenia identyfikatora opisano w literaturze [9].

3. SYSTEM RTLS W WYROBISKU KORYTARZOWYM

3.1. Cel stosowania systemu RTLS w kopalni

Lokalizacja dokładna jest istotna w przypadku katastrof górniczych. Wtedy informacje o położeniu ludzi w chwili katastrofy pozwalają lepiej poprowadzić akcję ratowniczą. Dnia 5 maja 2018 r. w kopalni Zofiówka doszło do wstrząsu o energii 190 MJ. W wyniku wstrząsu zostało poszkodowanych siedmiu górników. Pięciu górników zginęło. Ciało ostatniego górnika znaleziono po dwunastu dniach akcji. Jednym z istotnych problemów prowadzenia tej akcji ratowniczej była lokalizacja ciał górników.

Z uwagi na kształt wyrobisk w kopalniach podziemnych możliwa jest jedynie lokalizacja identyfikatorów w osi wyrobiska bez lokalizacji w jego przekroju poprzecznym. Jest to lokalizacja jednowymiarowa (występuje tylko jedna współrzędna), tzn. położenie identyfikatora określamy jako odległość od punktu odniesienia (np. od umownego początku wyrobiska). W wyrobiskach podziemnych praktyczne zastosowanie mogą mieć dwie metody lokalizacji RTLS: metoda pomiaru różnicy czasów (TDOA) lub metoda pomiaru poziomu sygnału radiowego (RSS).

3.2. Lokalizacja przez pomiar różnicy czasów TDOA

Jak już wspomniano, metoda lokalizacji TDOA polega na tym, że transponder wysyła sygnał radiowy, który musi być odebrany przez minimum dwa czytniki (rys. 5). Mierzona jest różnica czasu odebrania tego sygnału przez te czytniki. Czas propagacji sygnału od transpondera do czytnika 1 jest równy t_1 , a czas propagacji sygnału od transpondera do czytnika 2 jest równy t_2 .

Jeżeli w wyrobisku transponder będzie znajdować się między dwoma czytnikami 1 i 2 w odległości x od czytnika 1, a odległość między czytnikami jest równa l (rys. 5), to różnica czasów Δt jest równa:

$$t_1 = \frac{x}{c} \quad (6)$$

$$t_2 = \frac{l-x}{c} \quad (7)$$

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2x-l}{c} \quad (8)$$

gdzie c – prędkość fali elektromagnetycznej.

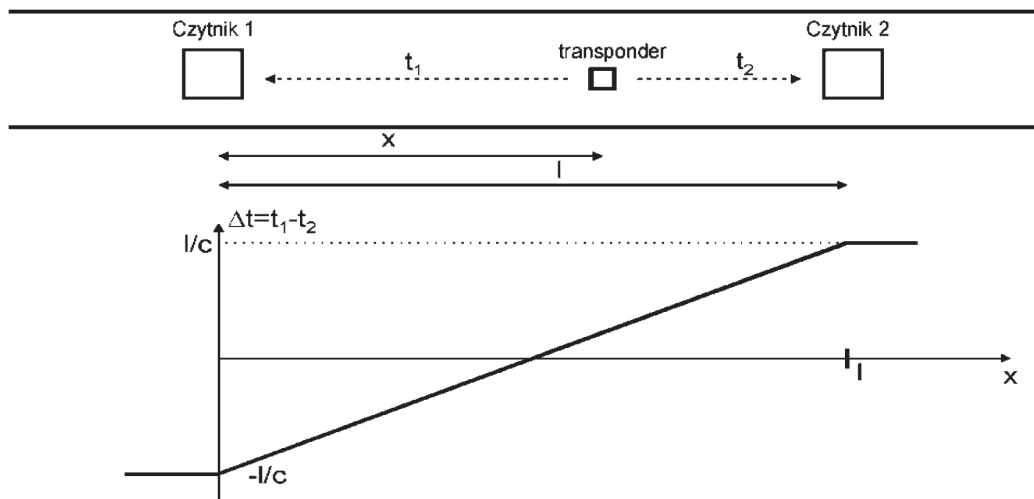
Jeżeli transponder jest w odległości większej od l od czytnika 1, to różnica czasów jest równa:

$$\Delta t = \frac{l}{c} \quad (9)$$

niezależnie od odległości x . Jeżeli transponder znajduje się na lewo od czytnika 1, to różnica czasów jest równa:

$$\Delta t = -\frac{l}{c} \quad (10)$$

niezależnie od odległości x .



Rys. 5. Ilustracja liniowej lokalizacji metodą TDOA [3]

Z tego względu, jeżeli transponder nie znajduje się pomiędzy czytnikami, to lokalizacja jego położenia metodą TDOA nie jest możliwa. Można temu zaradzić, instalując czytniki w taki sposób, by identyfikator był w zasięgu więcej niż dwóch czytników. Warunkiem zastosowania metody TDOA jest możliwość pomiaru czasu z dokładnością nanosekundową. Tak dużą dokładność pomiaru czasu można uzyskać, stosując modulację szerokopasmową CSS (ang. *chirp spread spectrum*) [3].

3.3. Lokalizacja przez pomiar poziomu sygnału radiowego RSS

Metoda lokalizacji przez pomiar poziomu sygnału radiowego RSS^1 polega na tym, że transponder wysyła sygnał radiowy, który jest odbierany przez dwa czytniki (1 oraz 2), a w systemie mierzona jest różnica poziomu sygnału transpondera (ΔRSS) odebranego przez oba te czytniki.

Na rysunku 6 pokazano możliwe usytuowania transpondera względem dwóch czytników. Dla usytuowania transpondera jak na rysunku 6a istnieją następujące zależności:

$$RSS_1(x) = RSS(x_0) - 10 \cdot n \cdot \lg \frac{x}{x_0} + \sigma SS \quad (11)$$

$$RSS_2(l-x) = RSS(x_0) - 10 \cdot n \cdot \lg \frac{l-x}{x_0} + \sigma SS \quad (12)$$

$$\Delta RSS = RSS_1(x) - RSS_2(l-x) = 10 \cdot n \cdot \lg \frac{l-x}{x} + \sigma SS \quad (13)$$

Analogicznie dla usytuowania transpondera jak na rysunku 6b² różnica poziomu sygnału transpondera (ΔRSS) odebranego przez oba te czytniki wyniesie:

$$\begin{aligned} \Delta RSS &= RSS_1(x) - RSS_2(l-x) = \\ &= 10 \cdot n \cdot \lg \frac{l-x}{-x} + \sigma SS \end{aligned} \quad (14)$$

A dla usytuowania transpondera jak na rysunku 6c będzie to:

$$\begin{aligned} \Delta RSS &= RSS_1(x) - RSS_2(x-l) = \\ &= 10 \cdot n \cdot \lg \frac{x-l}{x} + \sigma SS \end{aligned} \quad (15)$$

gdzie:

$RSS_1(x)$ – poziom sygnału radiowego zmierzony przez czytnik 1 w odległości x od identyfikatora,

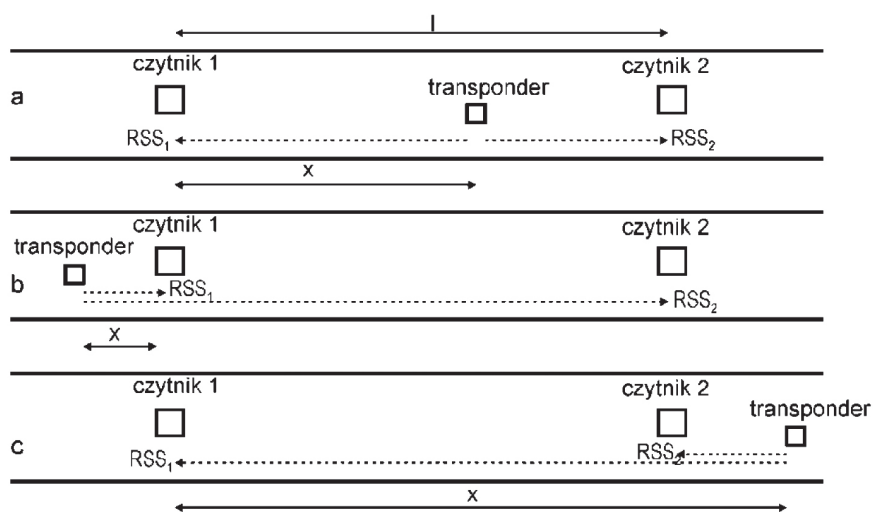
$RSS_2(l-x)$ – poziom sygnału radiowego zmierzony przez czytnik 2 w odległości $l-x$ od identyfikatora,

$RSS(x_0)$ – poziom odniesienia sygnału radiowego w odległości x_0 od identyfikatora,

n – współczynnik zależny od warunków propagacji sygnału radiowego w wyrobisku (w granicach 1,2 do 1,6),

x – współrzędna położenia identyfikatora (przyjmuje wartości dodatnie lub ujemne, gdy transponder jest z lewej strony czytnika 1 – rys. 6b),

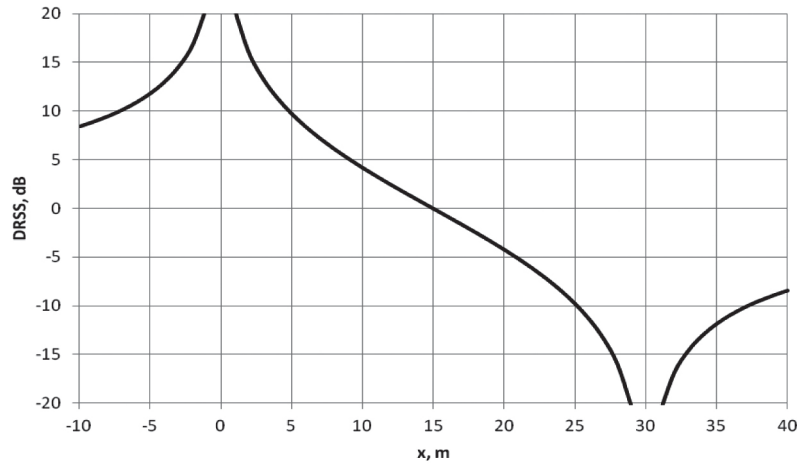
σSS – zmienna losowa o rozkładzie normalnym uwzględniająca lokalne warunki propagacji fal elektromagnetycznych (odbicia, załamania, rozproszenie).



Rys. 6. Ilustracja lokalizacji metodą pomiaru poziomu sygnału radiowego RSS [3]

¹ Niekiedy jest ona także oznaczona skrótem RSSI (ang. *Received Signal Strength Indicator*).

² W tym przypadku x ma wartość ujemną i taką należy podstawić do wzoru; poziom odniesienia „0” jest w miejscu lokalizacji czytnika 1.



Rys. 7. Przykład obliczonej zależności różnicy poziomu sygnałów radiowych ΔRSS (DRSS, dB) od położenia transpondera (x , m) [3]

Na rysunku 7 przedstawiono przykład obliczonej zależności różnicy poziomu sygnału ΔRSS od odległości x transpondera od czytników rozmieszczonych w odległości $l = 30$ m i współczynnika $n = 1,4$ przy pominięciu zmiennej losowej σSS . Z wykresu wynika, że dla pewnych wartości ΔRSS istnieją dwa możliwe położenia transpondera.

Nieciągłości na wykresie (rys. 7) wynikają z umieszczenia transpondera i czytników na jednej prostej (odległość transpondera do czytника może być wtedy równa 0). W rzeczywistości ze względu na poprzeczne rozmiary wyrobisk odległość transpondera do czytника nigdy nie będzie równa 0.

Jeżeli przez x_1 oznaczymy odległość transpondera od czytника 1, a przez x_2 oznaczymy odległość transpondera od czytника 2, to zależności (13)–(15) można przekształcić do postaci:

$$\Delta RSS = RSS_1(x_1) - RSS_2(x_2) = 10 \cdot n \cdot \lg \frac{x_2}{x_1} \quad (16)$$

stąd:

$$\frac{x_2}{x_1} = k_{12} = 10^{\Delta RSS / 10n} \quad (17)$$

Znając różnicę poziomów sygnału radiowego odebranego przez czytники 1 i 2, możemy obliczyć stosunek odległości transpondera od czytników $k_{12} = x_2/x_1$ według zależności (17). Miejscem geometrycznym punktów o stałym stosunku odległości od dwóch punktów o znanym położeniu jest okrąg Apoloniusza (rys. 8) o promieniu równym:

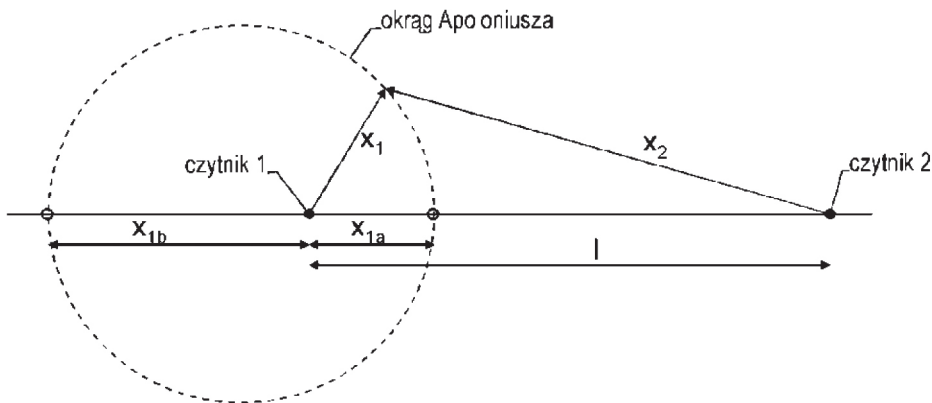
$$r = l \frac{k_{12}}{k_{12}^2 - 1} \quad (18)$$

przecinającym prostą przechodzącą przez oba czytники w odległościach:

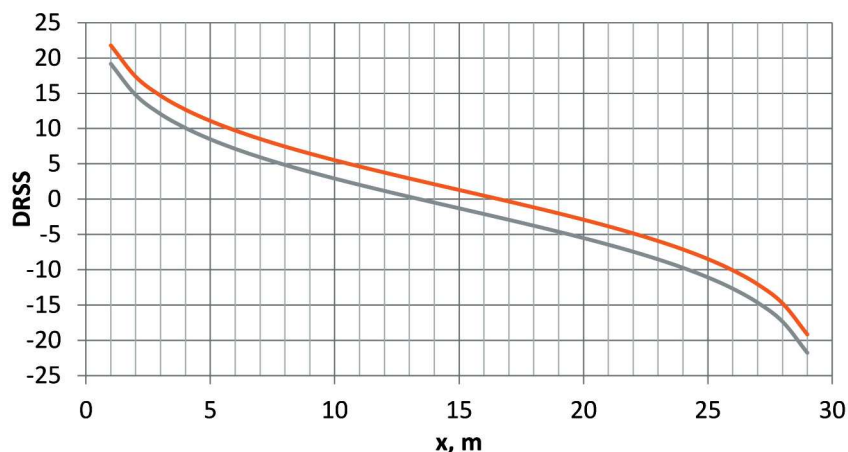
$$x_{1a} = \frac{l}{1 + k_{12}} \quad (19)$$

$$x_{1b} = \frac{l}{1 - k_{12}} \quad (20)$$

Dwuznaczność lokalizacji metodą RSS z użyciem dwóch czytników można usunąć, stosując więcej czytników.



Rys. 8. Okrąg Apoloniusza jako wynik lokalizacji metodą RSS [3]



Rys. 9. Przykład zależności różnicy poziomu sygnałów radiowych ΔRSS od położenia transpondera x z uwzględnieniem zmiennej losowej wynikającej z warunków propagacji [3]

Na rysunku 9 przedstawiono przykład zależności różnicy poziomu sygnału ΔRSS od odległości transpondera x dla odległości między czytnikami $l = 30$ m i współczynnika $n = 1,4$ z uwzględnieniem zmiennej losowej σSS .

Do analizy przyjęto odchylenie standardowe $\sigma SS = 1,3$ dB zmierzone w wyrobisku kopalnianym w warunkach widoczności optycznej LOS [9]. Linia czerwona oznacza wartości $\Delta RSS + \sigma SS$, a linia niebieska wartości $\Delta RSS - \sigma SS$. Z przedstawionego wykresu wynika, że największy bezwzględny błąd lokalizacji występuje w środku między czytnikami i dla przyjętych założeń jest równy $\pm 1,5$ m. Z prób przeprowadzonych w kopalni wynika, że dla systemu lokalizacji metodą RSS uzyskujemy dokładność około 10% odległości x pomiędzy dwoma czytnikami.

4. PRÓBY RUCHOWE SYSTEMÓW RTLS W KOPALNIACH

W związku z katastrofą w kopalni Zofiówka w kilku kopalniach JSW podjęto decyzję o wykonaniu prób ruchowych kilku systemów lokalizacji typu RTLS w wyrobiskach ścianowych. Podstawowymi kryteriami oceny funkcjonowania systemów RTLS w czasie prowadzenia prób była między innymi:

- dokładność lokalizacji pracowników w ścianie oraz w chodnikach przyścianowych; system powinien lokalizować górników w granicach do ± 2 m wzdłuż wyrobiska;
- zapewnienie 100% wykrywalności transponderów w czasie rzeczywistym (w warunkach prawidłowej pracy infrastruktury teletransmisyjnej eksploatowanej w danej kopalni).

Próbowi ruchowym poddano cztery systemy [10]:

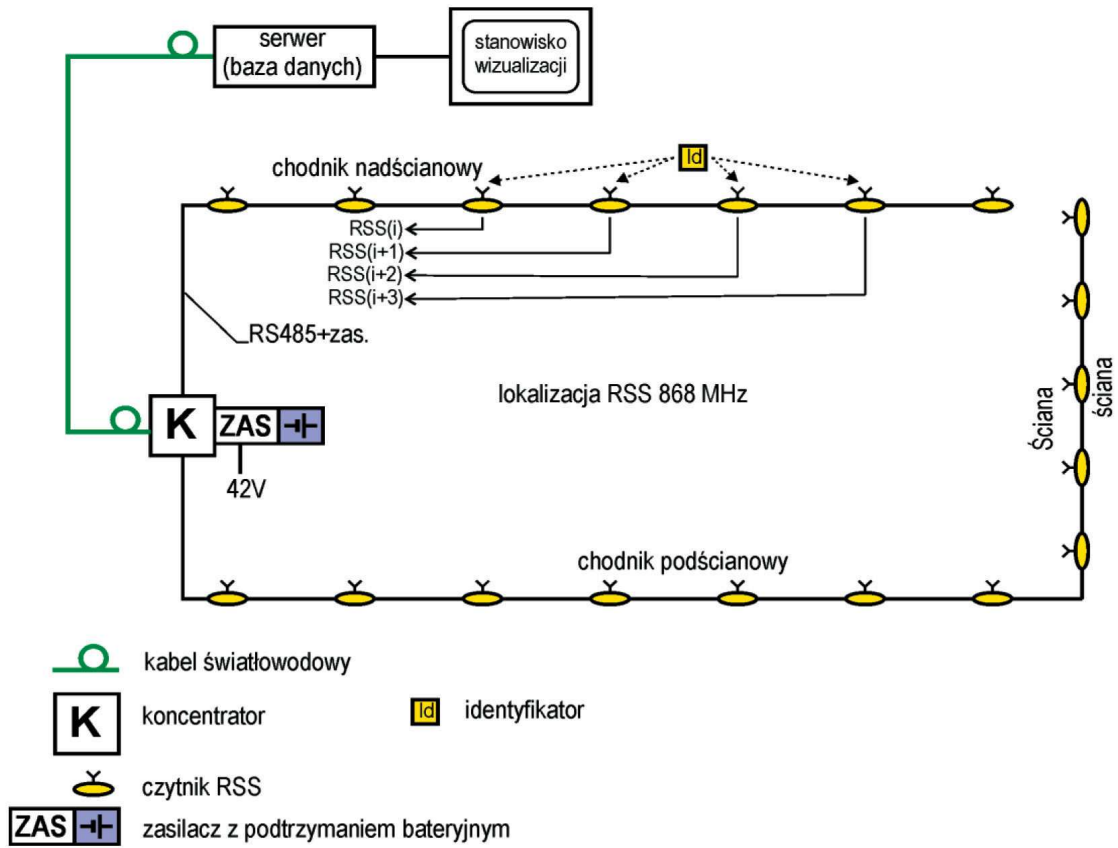
- EMLOK-16 firmy Elektrometal,
- PORTAS firmy EMAG,
- ISI firmy ZAM-SERVIS,
- ATUT-Location firmy ATUT.

Badane systemy wykorzystywały dwa sposoby lokalizacji identyfikatorów: RSS w pasmie 868 MHz (systemy PORTAS oraz ISI) oraz TDOA w pasmie 2,4 MHz (systemy EMLOK-16 oraz ATUT-Location).

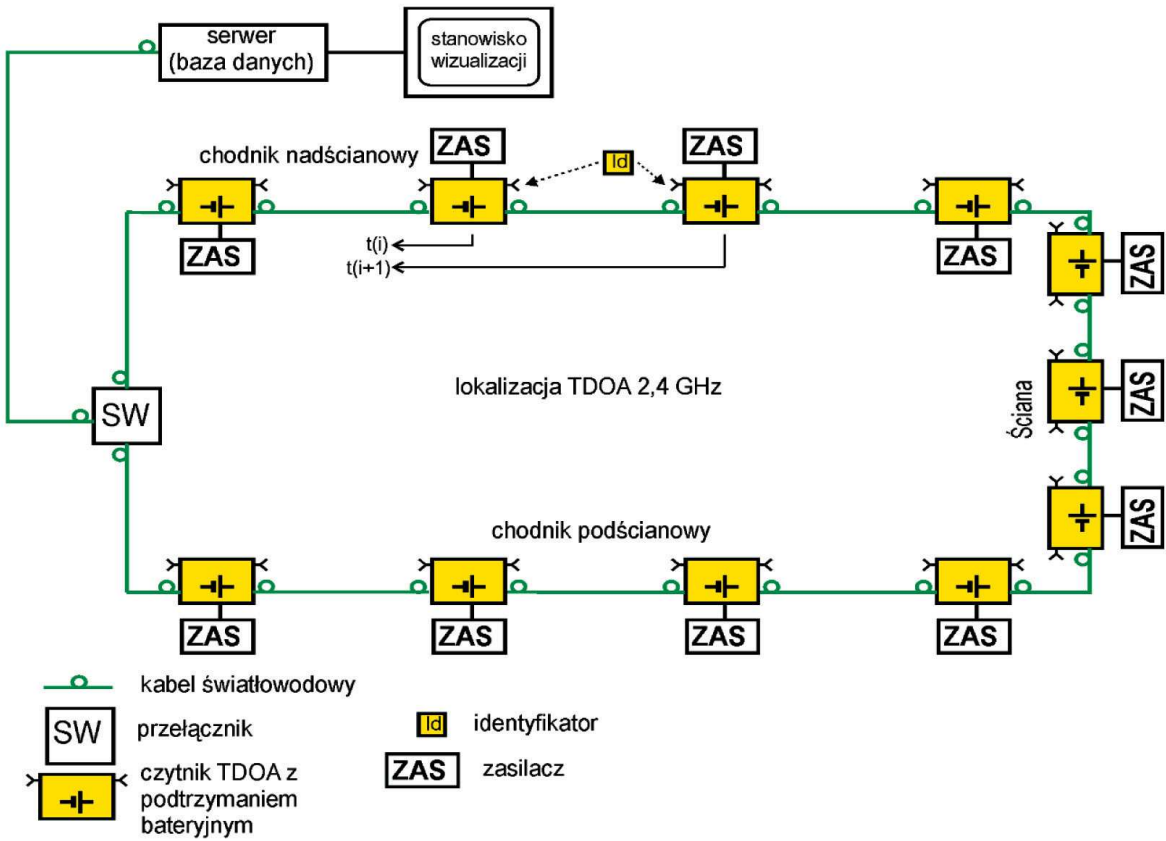
Ocenie podlegało wiele aspektów budowy i funkcjonowania systemu, takich jak:

- struktura części dołowej systemu w rejonie ściany;
- sposób montażu, diagnostyki, utrzymania, wymiany oraz konfiguracji urządzeń wchodzących w skład testowanego systemu w miarę postępu dobowego ściany;
- sposób zasilania elementów aktywnych systemu z uwzględnieniem istniejącej sieci elektroenergetycznej w rejonach objętych testami;
- czas podtrzymania baterijnego elementów aktywnych systemu;
- funkcjonalność oprogramowania do wizualizacji personelu, alertowania zdarzeń, generowania raportów oraz konfiguracji systemów z powierzchni.

Testy były przeprowadzane według uprzednio przygotowanego jednolitego scenariusza prób ruchowych. Kilkunastu górników wykonujących próby ruchowe każdego z systemów zostało wyposażonych w aktywne identyfikatory (transpondery), które w zależności od danego rozwiązania technicznego zostały zainstalowane w lampach osobistych, względnie posiadały autonomiczne źródło zasilania [10].



Rys. 10. Schemat blokowy systemu lokalizacji wykorzystującego metodę RSS



Rys. 11. Schemat blokowy systemu lokalizacji wykorzystującego metodę TDOA

Na rysunku 10 pokazano uproszczony schemat blokowy systemu lokalizacji w rejonie ściany wykorzystującego metodę RSS w pasmie 868 MHz. Czytniki, rozmieszczone w chodnikach przyścianowych oraz w ścianie (w odstępach 20–40 m), są przyłączone łączyami RS485 do koncentratora. Połączenie przewodowe z koncentratorem umożliwia również zasilanie czytników znajdujących się w wyrobiskach.

Identyfikatory Id wysyłają w pewnych odstępach czasowych sygnał radiowy zawierający swój numer identyfikacyjny. Sygnały są odbierane przez sąsiednie czytniki. Czytniki wysyłają do serwera lokalizacji (poprzez koncentrator) między innymi swój numer identyfikacyjny, numer identyfikacyjny identyfikatora Id oraz poziom odebranego sygnału radiowego RSS. Serwer na podstawie otrzymanych poziomów sygnału radiowego, położenia poszczególnych czytników oraz przyporządkowania identyfikatorów poszczególnym osobom oblicza położenia poszczególnych identyfikatorów, co umożliwia ich przedstawienie na stanowisku wizualizacji na tle wcześniej przygotowanej mapy oddziału wydobywczego.

Na rysunku 11 pokazano przykład uproszczonego schematu blokowego systemu lokalizacji TDOA w rejonie ściany wykorzystującego metodę w pasmie 2,4 GHz i łączy światłowodowe między czytnikami.

Czytniki dla metody TDOA są zainstalowane w chodnikach przyścianowych i w ścianie w odległościach od 30 m do 300 m (przy zastosowaniu anten kierunkowych) w zależności od lokalnych warunków. Metoda TDOA wymaga synchronizacji zegarów wszystkich czytników w danym rejonie. Czytniki TDOA mogą być połączone kablem miedzianym, światłowodowym lub łączem radiowym w pasmie 2,4 GHz. Wymagają zasilania gwarantowanego.

Identyfikatory Id wysyłają w pewnych odstępach czasowych sygnał radiowy zawierający swój numer identyfikacyjny. Sygnały są odbierane przez sąsiednie czytniki. Czytniki wysyłają do serwera lokalizacji między innymi swój numer identyfikacyjny, numer identyfikacyjny identyfikatora oraz czas nadejścia sygnału z identyfikatora. Serwer na podstawie otrzymanych poziomów sygnału radiowego, położenia poszczególnych czytników oraz przyporządkowania identyfikatorów poszczególnym osobom oblicza położenia poszczególnych identyfikatorów, co umożliwia ich przedstawienie na stanowisku wizualizacji na tle wcześniej przygotowanej mapy oddziału.

Wraz z postępem eksploatacji ściana się przesuwają, a chodniki przyścianowe się skracają (lub wydłużają). Powoduje to konieczność przebudowy, likwidacji lub dodania czytników w rejonie skrzyżowania ściany z chodnikiem podścianowym i nadścianowym. Każda zmiana położenia czytnika wymaga odpowiedniej modyfikacji bazy danych, a także modyfikacji mapy w systemie wizualizacji. Warunkiem poprawnej pracy systemu lokalizacji jest poprawna konfiguracja systemu zapewniająca między innymi:

- przyjęcie początku układu współrzędnych dla chodników przyścianowych i ściany,
- wprowadzenie do systemu wizualizacji mapy rejonu, w którym odbywa się lokalizacja,
- wprowadzenie położenia wszystkich czytników realizujących lokalizację RTLS,
- przyporządkowane poszczególnym osobom zjeżdżającym na dół odpowiednich identyfikatorów.

5. PODSUMOWANIE

System RTLS będzie ważnym elementem kopalnianego systemu lokalizacji załogi. Jest przewidywany do zastosowania w rejonach o dużych zagrożeniach skojarzonych. Najczęściej są to rejonu niektórych ścian i przodków korytarzowych. W innych rejonach, takich jak dworce osobowe, podszybia, nadszybia czy lampownie, sensowne jest zastosowanie lokalizacji strefowej, w której wystarczająca jest informacja, kiedy pracownik wszedł do strefy i kiedy pracownik wyszedł ze strefy. W lampowni niezbędna jest możliwość testowania poprawności pracy identyfikatora.

Testy systemów lokalizacji w kopalniach JSW pozwoliły stwierdzić:

- różny stopień gotowości (zaawansowania) badanych systemów do pracy w wyrobiskach kopalnianych,
- możliwość lokalizacji RTLS metodą RSS, a także TDOA,
- korzystniejsze warunki propagacji fal elektromagnetycznych w pasmie 868 MHz; co umożliwia lepszą lokalizację osób przemieszczających się w zamkniętych wagonikach kolejek,
- prostsze zasilanie elementów systemu RSS szczególnie w miejscach z nierozbudowaną siecią elektroenergetyczną (np. w chodniku nadścianowym).

Systemy RTLS generują bardzo wrażliwe dane dla załóg górniczych (kto, gdzie i jak długo przebywał w czasie pracy). Z tego powodu niezbędne jest:

- określenie, kto i w jaki sposób będzie miał dostęp do aktualnych danych systemu lokalizacji,
- określenie, kto i w jaki sposób będzie miał dostęp do archiwalnych danych systemu lokalizacji,
- szkolenie załóg na temat funkcjonowania systemu lokalizacji oraz przekonanie górników, że system lokalizacji ma poprawić ich bezpieczeństwo.

Literatura

- [1] Finkenzeller K.: *RFID Handbook. Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester 2003.
- [2] Zekavat S.A., Buehrer R.M. (ed.): *Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances*, John Wiley and Sons, New Jersey 2019.
- [3] Miśkiewicz K., Wojaczek A.: *Radiokomunikacja w kopalniach podziemnych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2020.
- [4] RME. *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych*, Dz.U. z 2017 r., poz. 1118.
- [5] Eljasz D., Tkacz J., Gratkowski T., Doligalski M.: *Wyznaczenie precyzji i dokładności lokalizacji obiektu na przykładzie systemu lokalizacji wewnątrzbudynkowej Dimension firmy Ubisense*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2018, 12: 56–59.
- [6] Chruszczyk Ł., Zajac A.: *Comparison of Indoor/Outdoor, RSSI-Based Positioning Using 433, 868 or 2400 MHz ISM Bands*, „INTL Journal of Electronic and Telecommunications” 2016, 62, 4: 395–399.
- [7] Widlak Cz.: *Porównanie wartości CEP obliczonych według różnych zależności podawanych w literaturze*. „Problemy Techniki Uzbrojenia” 2007, 36, 103: 13–142.
- [8] Zientek P.: *Wykorzystanie sygnałów impulsowych z modulacją częstotliwości w systemach lokalizacyjnych w warunkach silnej wielodrogowości*, Politechnika Warszawska, Warszawa 2013 [niepublikowana rozprawa doktorska].
- [9] Mabrouk I.B., Talbi L., Mnasri B., Nedil M.: *Experimental Characterization of a Wireless MIMO Channel at 2.4 GHz in Underground Mine Gallery*, „Progress in Electromagnetics Research Letters”, January 2012.
- [10] Opinia dotycząca rekomendacji wyboru systemu identyfikacji i lokalizacji pracowników w wyrobiskach podziemnych kopalń Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A., opracowana przez Zespół doradców ds. rekomendowania wyboru systemu identyfikacji i lokalizacji pracowników w wyrobiskach podziemnych dla kopalń JSW S.A., Jastrzębie Zdrój, kwiecień 2019 [niepublikowana].

dr inż. KAZIMIERZ MIŚKIEWICZ

dr inż. ANDRZEJ NOWROT

dr hab. inż. ANTONI WOJACZEK, prof. PŚ

Katedra Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej

Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa

i Automatyki Przemysłowej

Politechnika Śląska

ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice

{kmiskiewicz, andrzej.nowrot, awojaczek}

@polsl.pl