

KAZIMIERZ MIŚKIEWICZ
ANDRZEJ NOWROT
ANTONI WOJACZEK

Operating RTLS systems in underground workings

The difficult environment conditions of underground mines require the identification of persons present in mining workings. To date, miner location systems applied in several mines only allow a dispatcher to determine the crew working at given level or in given operation area on quantitative basis. The dispatcher has no opportunity to accurately and currently locate the miners who are in the workings. This constitutes a large difficulty in the case of mining disasters and where rescue actions are to be undertaken when miners are trapped underground in workings. Several days spent searching for miners during a recent disaster led to the implementation of a RTLS continuous localization system in especially dangerous areas. This paper discusses the opportunity to use RTLS systems in mines and presents selected first experiments related to operation tests of such RTLS systems that were carried out recently in several mines.

Key words: *RFID systems, RTLS location systems, radio communication in mining*

1. INTRODUCTION

Contemporary radio communications provides the opportunity to construct a crew localization system in underground workings.

Two solutions are applied [1, 2]:

- Zone location using RFID engineering (*Radio Frequency Identification*) consists of a wireless (radio) readout of the identification number of an identifier (transponder) by means of a reader. Using such a solution, inputs to the zone being monitored are equipped with gates that include RFID readers that allow determining the direction of identifier motion (entering a zone, leaving a zone). Such a system allows the determination of the number of miners within every zone as well as the entry/exit time of a miner into/out a zone. However, the dispatcher has no opportunity to locate precisely (and currently) the miners in the separate workings of a monitored zone.
- RTLS – “precise” locating (*Real Time Locating System*). It allows the determination, with appropriate precision, of the location (for instance, coordinates) of an identifier (transponder) in a monitored working (for instance, within particularly dangerous zones) and at specified time intervals.

RTLS systems are to be provided in zones of special danger, for instance in those where associated dangers exist. In the case of the occurrence of a dangerous event in such a working, a RTLS system makes it possible to locate all miners who were present within the dangerous zone just before this event occurred, for instance, rescue operation, explosion, fall of roof, etc. [3, 4].

Figure 1 shows the general structure of a crew location system in a mine. Both RFID and RTLS systems are equipped with this kind of structure [3].

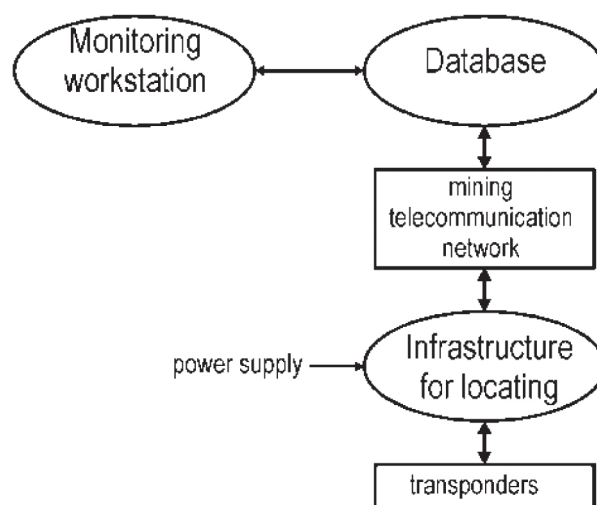


Fig. 1. Structure of the crew locating system

One may distinguish in the structure the following:

- personal transponders of the crew, mostly active, supplied from their miner's lamp,
- underground infrastructure for location (readers, ID gates, intrinsically safe power units, external antennas, connection boxes etc.),
- mining underground telecommunication network, as well as a surface one (copper, optical-fibre cable or partly a radio one),
- database in location system servers including software,
- software (as well as devices) for a visualization system.

2. RTLS SYSTEMS

2.1. Operation principles of RTLS systems

RTLS location systems are a developed form of RFID engineering. The (stationary) reader not only reads the radio signal sent through the (portable) identifier in such systems, but also makes the measurement of certain parameters of the received radio signal possible, so that the system can count the identifier position within definite accuracy while the signal transmission is sent.

We can distinguish RTLS systems depending on usage:

- locating identifiers in space by calculating 3 coordinates,
- locating identifiers on plane by calculating 2 coordinates,
- locating identifiers along a line (frequently a straight one) by calculating one coordinate; this type of solution should be applied in the dog headings of underground mines.

RTLS systems are most frequently called **exact location systems**, meaning that such a system counts the identifier position with a certain degree of accuracy (including a specified error). The identifier location error contains the random component that constitutes the measure of location precision and systematic error. Figure 2 presents the interpretation of location component error of an identifier placed on the plane in the point Q_k of coordinates x_k, y_k .

Next (during consecutive broadcasting sessions) the identifier positions determined (calculated) by the reader are defined by P_i and shown in Figure 2 as

red dots. They have co-ordinate x_i, y_i . The centre $\bar{P}_k$ of determined identifier positions in relation to the reader has co-ordinates that equal:

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

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

The standard deviation $\sigma_k(P_k)$ of points P_i from the centre $\bar{P}_k$ is defined by the following dependences:

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

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

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

and is the measure of location precision, and location results scatter the evaluation around the centre of location $\bar{P}_k$ as well. The distance Δ_k constitutes the systematic error measure of the location among the real identifier position Q_k , and the centre of determined locations $\bar{P}_k$.

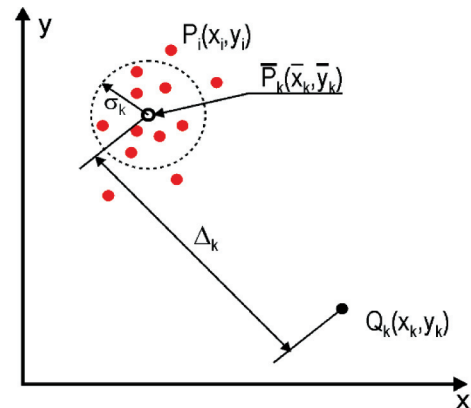


Fig. 2. Components of the identifier (tag) locating error [5]

The accuracy of location could also be determined by specifying the parameters as follows [6]:

- CEP – (*Circular Error Probability*) the circle radius, of the centre in the real position of identifier, in which 50% of the calculated identifier positions are included (also explained as substitute radius of the error [7]),
- CEP70 – the circle radius, of the centre in the real position of identifier, in which 70% of calculated identifier positions are included,
- R95 – circle radius for 95% of the calculated identifier positions.

2.2. Location methods in RTLS systems

We may distinguish the following methods of identifier locations on a plane in RTLS systems [8]:

- AOA – the method of the measurement of the arrival angle of the received signal from the identifier (*Angle of Arrival*),
- TOA – the method of the measurement of arrival time of the signal from the identifier (*Time of Arrival*),
- TDOA – the method of the measurement of the arrival time difference signal from the identifier (*Time Difference of Arrival*),
- RSS – the measurement method (by means of readers) of the radio signal level emitted by the identifier (*Received Signal Strength*).

Hybrid solutions applying two of the above-mentioned methods are also applied e.g. AOA and TDOA (e.g. solution of UBISENSE company) [5].

In the case of identifier location (Id) by means of the AOA method, two readers are applied and arranged within distance d (Fig. 3). Every reader is equipped with an antenna that allows the determination of the angles α and β of signal arrival from identifier. The knowledge of the distance d and angles α and β allows us to specify the identifier position using geometrical dependences related to a triangle [3].

In the case of the TOA method, three readers are applied (Fig. 4). Readers make the indirect measurement of the distance d_1 , d_2 , d_3 to the identifier, measuring the time necessary for an electromagnetic wave to cover a distance from an identifier to the reader. Time can be measured using two methods:

- bidirectional (reader – Id – the reader) taking into consideration the response execution time,
- unidirectional, where the identifier sends signals according to the defined instant moments.

Because one cannot assure the synchronization of identifier clocks and readers, an unknown clock skew of identifiers and readers influences the result of time measurement. The clock skew could be determined by applying an additional reader (e.g. 3 readers for location on two-dimensional plane or 4 readers for location in space) using the notion of pseudo-distance (similarly as in GPS systems). Knowledge of distances d_1 , d_2 , d_3 and readers position allows the determination of the identifier position using geometrical dependences.

In the case of the TDOA method, readers with synchronized clocks are applied and time difference of signal arrival from identifier to two readers is measured. In the case of usage 3 readers, time differences allow the determination of the distance differences $\Delta_{12} = d_1 - d_2$, $\Delta_{23} = d_2 - d_3$. Knowing the distance differences, we are able to determine identifier position using suitable geometrical dependences.

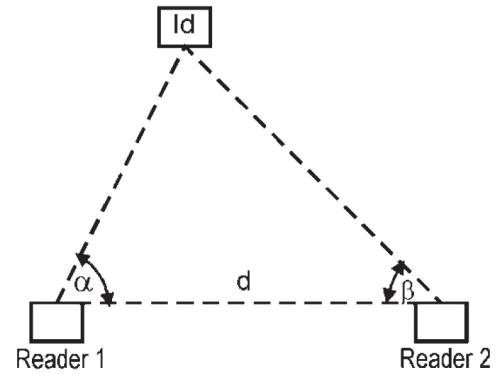


Fig. 3. Illustration of the AOA method for locating the Id identifier [3]

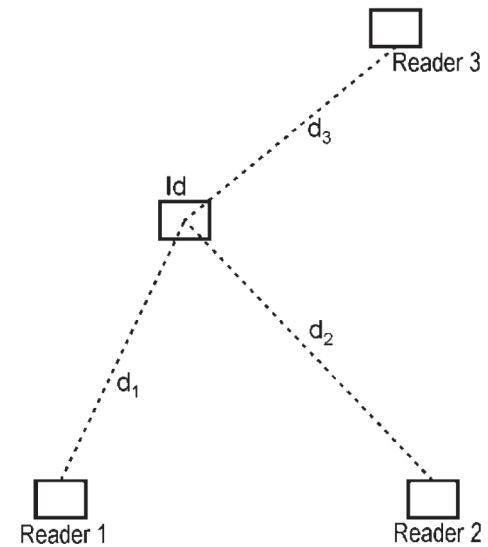


Fig. 4. Illustration of TOA, TDOA, RSS methods for locating the Id [3]

In the case of the *RSS* method, readers measure the level of signal received from identifier. If the electromagnetic wave propagation model is known (dependence of signal level on the distance), then the value of signal level received by individual readers will allow the determination of the distance d_1, d_2, d_3 and the identifier position. Methods to calculate the identifier position are described in references [9, 3].

3. A RTLS SYSTEM IN A DOG HEADING

3.1. The purpose of applying a RTLS system in a mine

The exact location is essential in case of mining catastrophes. Information on personnel position at the moment of a catastrophe allows the better performance of rescue actions. On the 5th May 2018, a 190 MJ tremor occurred in the Zofiówka coalmine and, as a result, 7 miners were injured and 5 miners died. The last miner's body was found after 12 days of action. The location of the miners bodies was one of the essential problems of this rescue action. Due to the shape of workings in underground mines, it is only possible to locate identifiers along the axis of a working without the location on its transverse section. This is **a one-dimensional location** (only one co-ordinate is available) i.e. identifier position is defined as a distance from reference point (e.g. from conventional beginning of the excavation). Two RTLS location methods could be practically used in underground excavations: time difference measurement method (TDOA), or the measurement method of radio signal level (*RSS*).

3.2. Location by means of time difference measurement TDOA

As mentioned previously, the TDOA location method consists in the fact that the transponder sends the radio signal that has to be received by a minimum of two readers (Fig. 5). The time difference of the reception of this signal by these readers is measured. Signal propagation time from transponder to reader 1 equals t_1 and the time of propagation of signal from transponder to reader 2 equals t_2 .

If the transponder is located in a working between two readers 1 and 2 in the distance x from reader 1 and the distance between readers equals l (Fig. 5), then the time difference Δt equals:

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

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

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

where c – the speed of electromagnetic wave.

If the transponder is located at a distance greater than l from reader 1, the time difference equals:

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

regardless of distance x . If the transponder is located to the left in relation to reader 1, the time difference equals:

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

regardless of distance x .

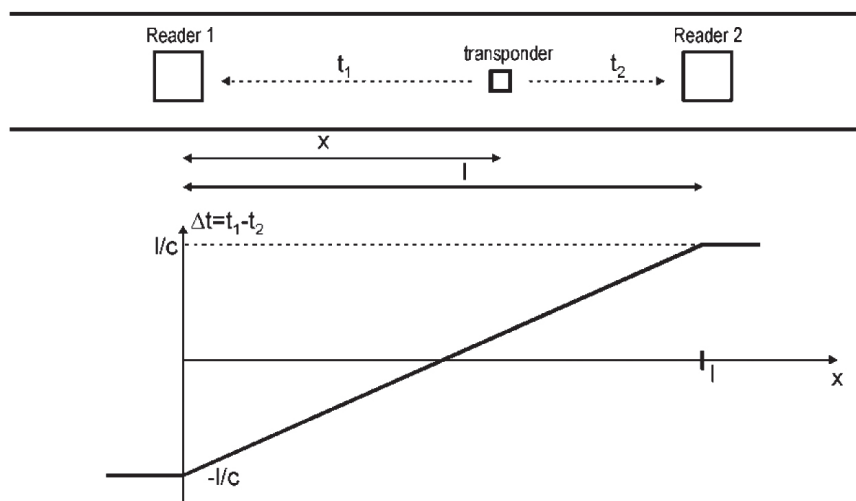


Fig. 5. Illustration of the linear location by the TDOA method [3]

Therefore, if the transponder is not located between the readers, then the location of its position by means of TDOA method is not possible. We may find a way out by installing readers using such a method that identifier would be within the range of more than two readers. The conditions for using the TDOA method consists of the opportunity to measure time with nano-second accuracy. Such a large degree of accuracy in time measurement can be achieved by applying the wideband modulation CSS (Chirp Spread Spectrum) [3].

3.3. Location by measurement of radio signal level RSS

The method of location by measurement of the radio signal level RSS^1 relies on the fact that the transponder sends a radio signal that is received by two readers (1 and 2) and the difference of the transponder signal level (ΔRSS) received by both these readers is measured in the system.

Figure 6 shows the possible locations of a transponder in relation to two readers. For the transponder location as shown in Figure 6a the following dependences exist:

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

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

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

The same transponder location as shown in Figure 6b² the difference of transponder signal level (ΔRSS) received by both these readers should equal:

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

And for the transponder location as shown in Figure 6c it equals:

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

where:

- $RSS_1(x)$ – radio signal level measured by reader 1 in the distance x from identifier,
- $RSS_2(l-x)$ – radio signal level measured by reader 2 in the distance $l-x$ from identifier,
- $RSS(x_0)$ – the radio signal reference level within the distance x_0 from identifier,
- n – coefficient dependent on the propagation conditions of a radio signal in a working (within limits 1.2 up to 1.6),
- x – identifier position co-ordinate (it assumes positive or negative values when the transponder is located on the left side of reader 1 – Fig. 6b),
- σSS – random variable of Gaussian distribution taking into account the local propagation conditions of electromagnetic waves (reflections, refractions, dispersion).

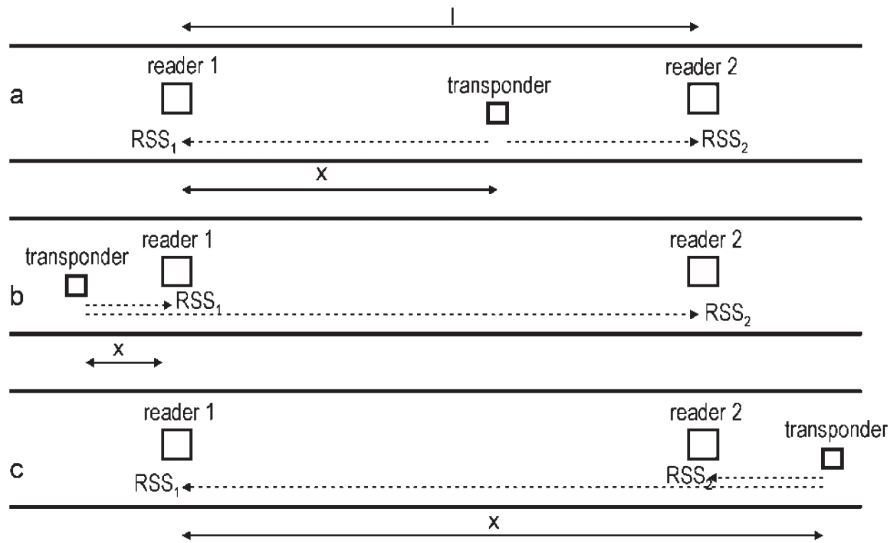


Fig. 6. Illustration of locating by the RSS radio signal level measurement method [3]

¹ This can also be designated by the abbreviation RSSI (Received Signal Strength Indicator).

² In this case, x has negative value and such a value is to be substituted in the formula; reference level "0" is in the spot where reader 1 is located.

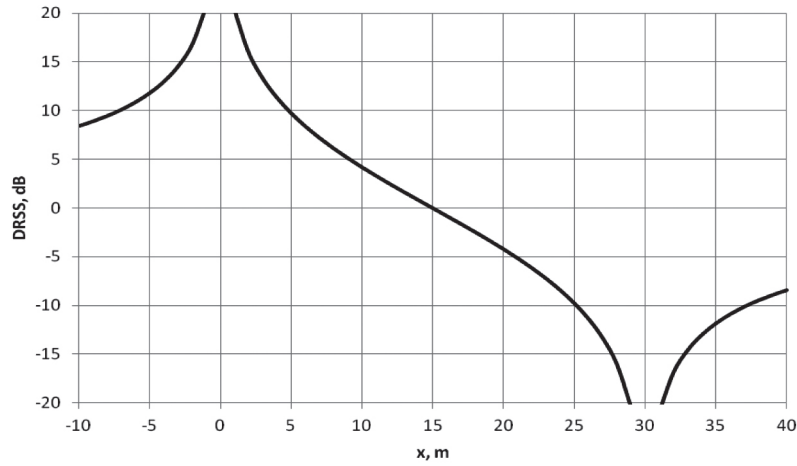


Fig. 7. An example of the calculated dependence of the difference in the level of radio signals ΔRSS (DRSS, dB) on the position of the transponder (x, m) [3]

Figure 7 shows an example of the calculated dependence of signal level difference ΔRSS versus transponder distance x from readers disposed within the distance $l = 30$ m and coefficient $n = 1.4$ whereas the random variable σSS is neglected. From the graph, we can conclude that for certain ΔRSS values there are two possible transponder positions.

The discontinuities in the graph (Fig. 7) are the result of placing the transponder and readers along one straight line (the transponder distance from reader could equal 0). In fact, due to the transverse sizes of excavations, the transponder distance to the reader should never equal 0.

If we mark the transponder distance from reader 1 by x_1 , and transponder distance from reader 2 by x_2 , then dependences (13)–(15) could be transformed as follows:

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

hence:

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

Knowing the level difference of radio signal received by readers 1 and 2, we can calculate the relation of transponder distance from readers $k_{12} = x_2/x_1$ according to the dependence (17). The geometric locus of points, of constant ratio of distance from two points of known position is an Apollonius circle (Fig. 8) with a radius equal to:

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

crossing the straight line passing through both readers within distances:

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

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

Any ambiguity of location as a result of the RSS method using two readers can be eliminated by applying more readers.

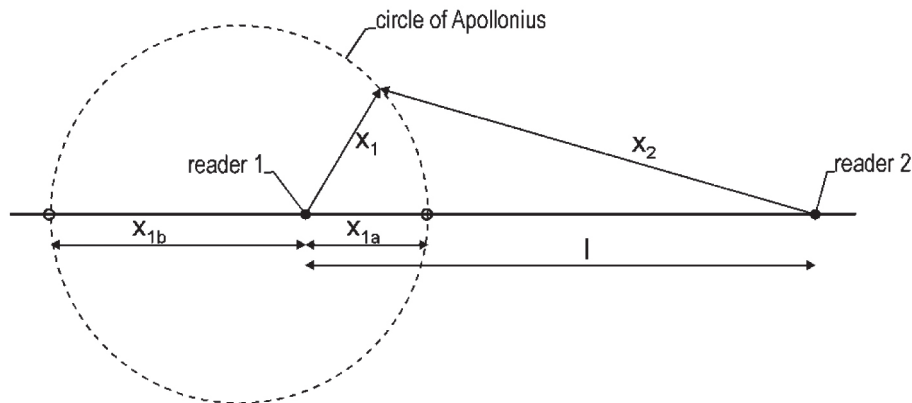


Fig. 8. The circle of Apollonius as a result of locating by the RSS method [3]

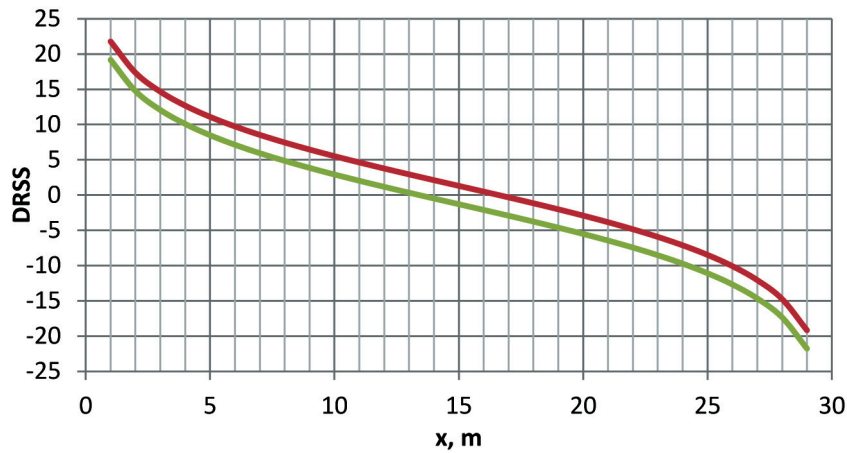


Fig. 9. An example of the dependence of the difference in the level of radio signals ΔRSS on the position of the transponder, taking into account the random variable resulting from the propagation conditions [3]

Figure 9 shows an example of dependence of signal level difference ΔRSS versus transponder distance x for the distance between readers $l = 30$ m and coefficient $n = 1.4$ taking into account the random variable σSS .

The standard deviation $\sigma SS = 1.3$ dB was assumed for analysis as measured in mine workings under conditions of optical visibility LOS [9]. The red line denotes values $\Delta RSS + \sigma SS$, whereas the blue line is the values $\Delta RSS - \sigma SS$. It results from the presented graph that the largest absolute error of location appears in the centre between readers and in the case of accepted assumptions equals ± 1.5 m. Tests conducted in a mine prove that in the case of a location system by means of the RSS method, we can obtain an accuracy level of about 10% of distance x among two readers.

4. OPERATIONAL TESTS OF RTLS SYSTEMS IN MINES

Due to the catastrophe in Zofiówka mine, the decision was made in several mines of the JSW to conduct operational tests of several location systems of the RTLS type in longwall excavations. The basic estimation criteria of the functioning of the RTLS systems during the performance of the tests were, among others:

- the accuracy of worker location along the longwall, as well as along longwall headings; the system should locate miners within the limits up to ± 2 m along an excavation;
- assurance 100% of transponder recognizability in real time (under conditions of the correct operation of the teletransmission infrastructure operated in given mine).

Four systems were subjected to operation tests [10]:

- EMLOK-16 made by Elektrometal company,
- PORTAS made by EMAG,
- ISI made by ZAM-SERVIS,
- ATUT-Location made by ATUT.

The systems used two methods of identifier location: RSS within a band of 868 MHz (PORTAS as well as ISI systems) and TDOA within a band of 2.4 MHz (EMLOK-16 and ATUT-Location systems).

A series of design and operation aspects were subject to assessment:

- the structure of the underground part of the system within an area of longwall;
- methods of assembly, diagnostics, maintenance, exchange and configuration of the devices included within the tested system as the daily longwall operation advances;
- power supply method of active units of the system, taking into consideration the existing power network within the area covered by the tests;
- battery operation time of the active system components;
- software functionality used to visualize the staff, events alerting, report generating as well as systems configuration from the surface.

Tests were performed according to previously prepared uniform script of operation tests. A dozen or so miners making the operation tests of every of systems were equipped with active identifiers (transponders) that, depending on the given technical solution, were installed in personal lamps, or they possessed an autonomous power source [10].

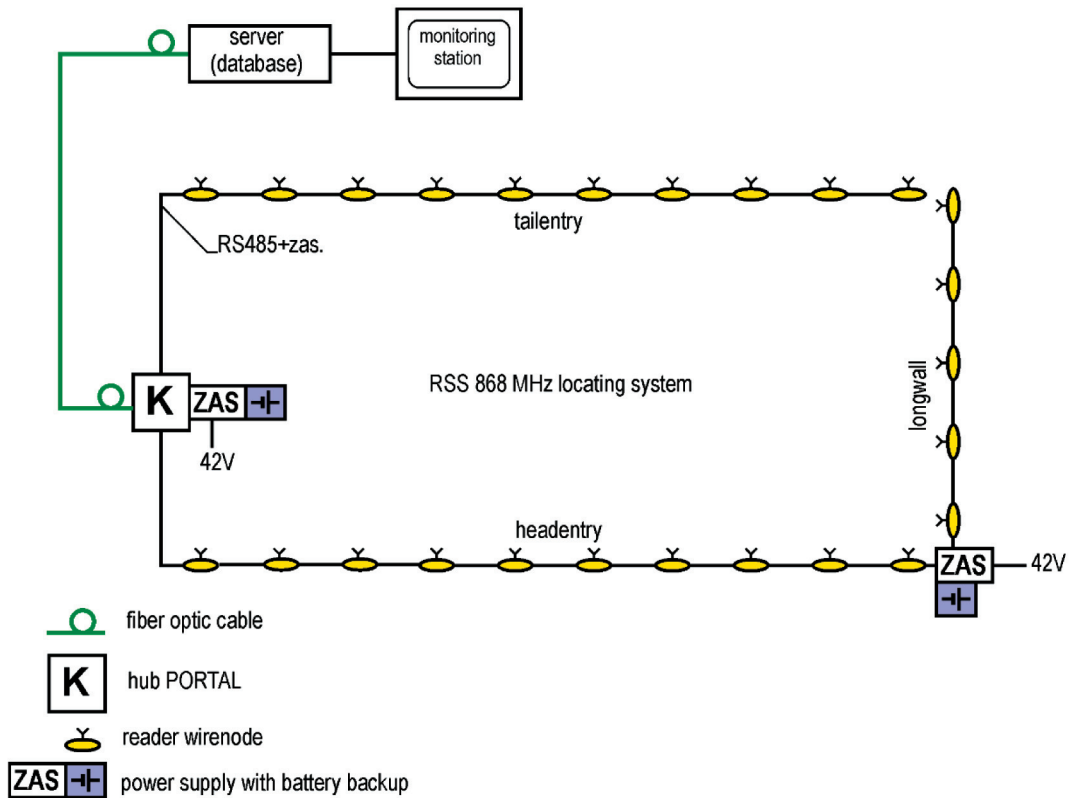


Fig. 10. Block diagram of the locating system using the RSS method [10]

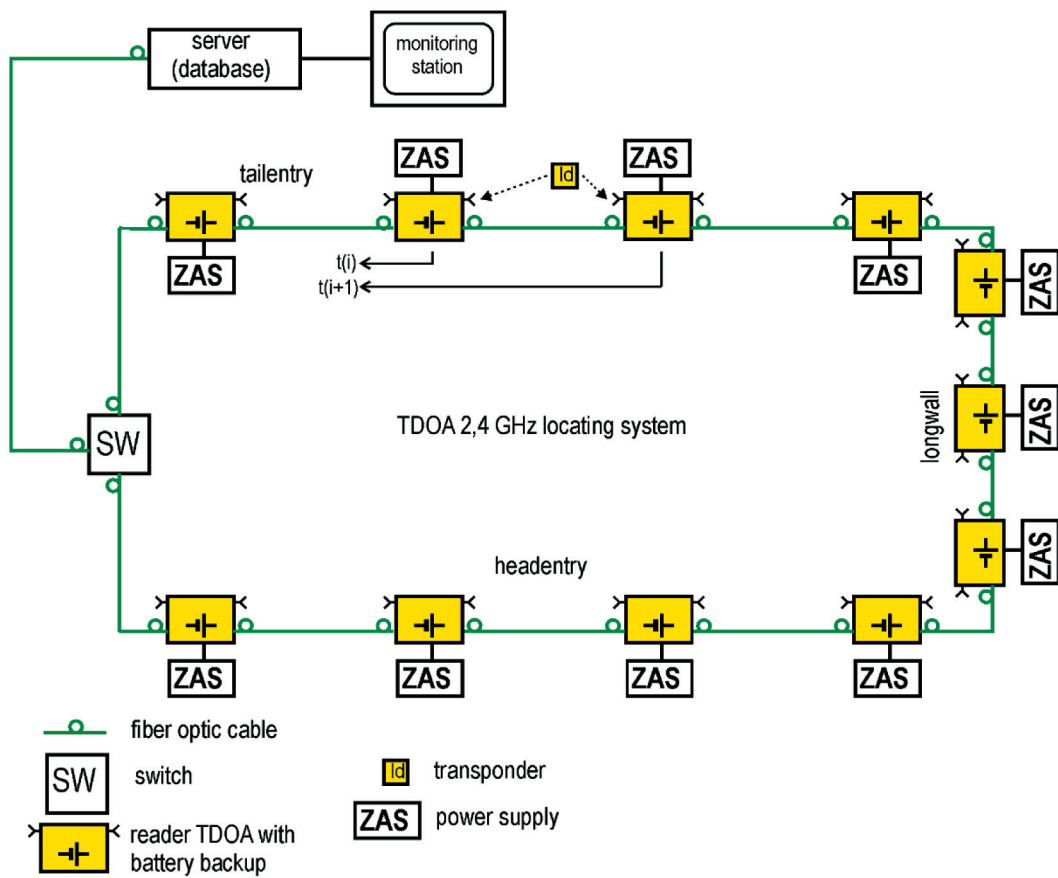


Fig. 11. Block diagram of the locating system using the TDOA method [3, 10]

Figure 10 presents the simplified block diagram of a location system within the area of longwall that utilized the RSS method within the band of 868 MHz. Readers, arranged in longwall headings as well as on the longwall (at 20–40 m intervals), are connected by means of RS485 connections to the concentrator. The line connection to the concentrator also makes it possible to supply readers located in excavations.

Id identifiers send a radio signal at certain time periods that include an identification number. Signals are received by neighbouring readers. The readers send to the location server (by means of a concentrator), among other, its identification number, identifier Id identification number as well as the level of the RSS radio signal received. The server, on the basis of the radio signal level received, the position of individual readers as well as subordinating the identifiers to individual persons, calculates the positions of individual identifiers and makes it possible to present a visualization on a previously prepared map of the mining department.

Figure 11 shows an example of a simplified block diagram of a TDOA location system within an area of longwall using the method within a band of 2.4 GHz and optical fibre connection between readers.

Readers used for the TDOA method are installed at longwall headings and in the longwall at distances ranging from 30 m to 300 m (using direction aerials) depending on local conditions. The TDOA method requires that all readers clocks are to be synchronized within given region. TDOA readers could be connected with copper cable, optical fibre or radio link within the 2.4 GHz band. They require a guaranteed power supply.

Id identifiers send a radio signal that includes its identification number at certain time periods. Signals are received by neighbouring readers. The readers send to the location server, among other, its identification number, identifier identification number as well as signal arrival time from identifier. The server, on the basis of the received radio signal level, position of individual readers as well as subordinating the identifiers to individual persons, calculates the positions of individual identifiers and makes it possible to present them in a visualization of a previously prepared map of the department.

As the operation proceeds, the longwall relocates, and longwall headings shorten (or lengthen). This results in the need to reline, liquidate or add readers within the region of the crossroad with the longwall and the main and upper gates. Every change of reader position requires the suitable modification of the da-

tabase as well as the modification of the map in the visualization system. The condition of correct location system operation is a correct system configuration that assures, among others:

- assuming the beginning of the coordinate system for the main gates and the longwall,
- entering the area map to visualization system in which the location takes place,
- entering the positions of all readers performing RTLS locations,
- assignment of suitable identifiers to particular persons descending into the mine.

5. SUMMARY

An RTLS system should be an important component of a crew location mine system and can be used in regions where there are large associated threats. Most frequently, these are regions of longwalls and heading faces. In other regions such as passenger stations, pit bottoms, shaft tops, or lamp rooms, it is rational to use zone location, since knowledge of when an employee entered and left the zone is sufficient. The opportunity to test the correctness of the identifier operation in indispensable in a lamp room.

The tests of location systems performed in JSW mines led to the affirmation that:

- There are various stage of readiness (availability) of systems under examination for operation in mine excavations,
- RTLS location opportunity using both RSS and TDOA method,
- more advantageous propagation conditions of electromagnetic waves within the band 868 MHz, that makes possible better location of persons who move in closed trolleys of narrow-gauge railway,
- simpler power supply of RSS system components, particularly in places provided with an undeveloped power network (e.g. in upper entries).

RTLS Systems generate very sensitive data for mining crews (who, where, and how long they have been at work). Due to this reason it is indispensable to:

- determine who and how should access the current data of the location system,
- determine who and how should access the archive data of the location system,
- crew training on location system functioning as well as convincing miners that the location system would improve their safety.

References

- [1] Finkenzeller K.: *RFID Handbook. Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester 2013.
- [2] Zekavat S.A., Buehrer R.M. (ed.): *Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances*. "IEEE Press" John Wiley and Sons, New Jersey 2019.
- [3] Miśkiewicz K., Wojacek 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, nr 12: 56–59.
- [6] Chruszczyk Ł., Zając 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: 137–142.
- [8] Zientek P.: *Wykorzystanie sygnałów impulsowych z modulacją częstotliwości w systemach lokalizacyjnych w warunkach silnej wielodrogowości*, Politechnika Warszawska, Warszawa 2013 [unpublished doctoral thesis].
- [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 [unpublished].

KAZIMIERZ MIŚKIEWICZ, Ph.D., Eng.
 ANDRZEJ NOWROT, Ph.D., Eng.
 ANTONI WOJACZEK, prof.
 Department of Electrical Engineering
 and Automation in Industry
 Faculty of Mining, Safety Engineering
 and Industrial Automation
 Silesian University of Technology
 ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Poland
 {kmiskiewicz, andrzej.nowrot, awojacek}
 @polsl.pl

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

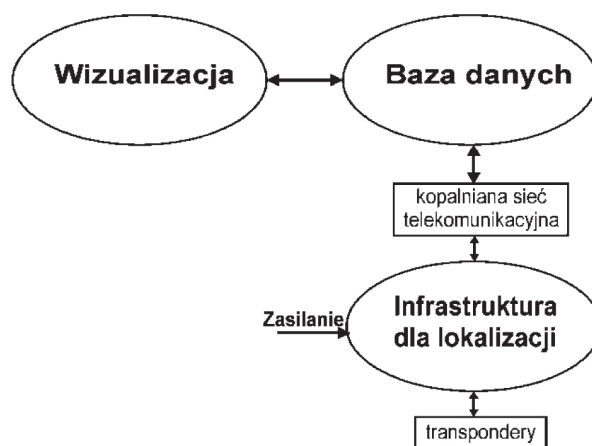
Współczesna radiokomunikacja stwarza możliwość budowy systemów lokalizacji załogi w wyrobiskach podziemnych.

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 błąd systematyczny. Na rysunku 2 pokazano interpretację składowych błęd lokalizacji identyfikatora umieszczonego na płaszczyźnie w punkcie Q_k o współrzędnych x_k, y_k .

Kolejne (w czasie następnych sesji transmisyjnych) wyznaczane (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 położzeń identyfikatora w stosunku do czytnika ma współrzędne równe:

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

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

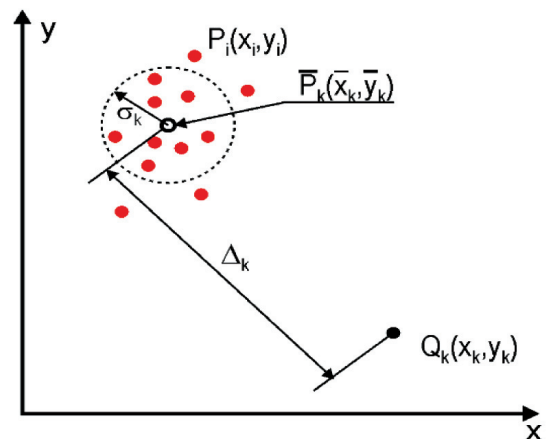
Odchylenie standardowe $\sigma_k(P_k)$ punktów P_i od środka $\bar{P}_k$ jest określone zależnościami:

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

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

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

i jest miarą precyzji lokalizacji, a także oceną rozrzutu wyników lokalizacji wokół środka lokalizacji $\bar{P}_k$. Miarą błędu systematycznego 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].

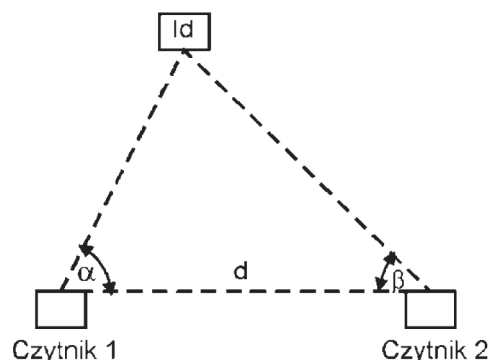
W przypadku lokalizacji identyfikatora (Id) metodą AOA stosuje się dwa czytniki ustawione w odległości d (rys. 3). Każdy czytnik jest wyposażony w antenę umożliwiającą określenie kątów α i β nadejścia sygnału z identyfikatora. Znajomość odległości d oraz kątów α i β pozwala na określenie położenia identyfikatora,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

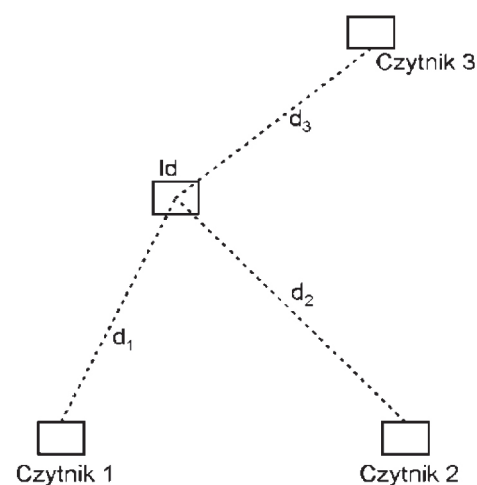
- dwukierunkowo (czytnik – Id – czytnik) z uwzględnieniem czasu realizacji odpowiedzi,
- jednokierunkowo, gdzie identyfikator wysyła sygnały w zdefiniowanych chwilach czasowych.

Ponieważ nie można zapewnić synchronizacji zegarów identyfikatora i czytników, na wynik pomiaru czasu ma wpływ nieznane 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.

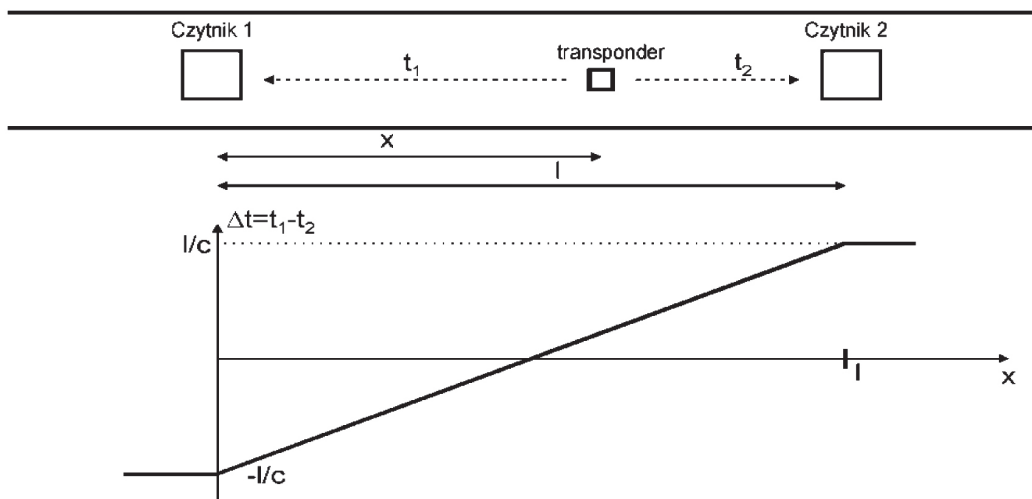
Jeżeli transponder jest w odległości większej od l od czytnika 1, to różnica czasów jest równa:

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

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,

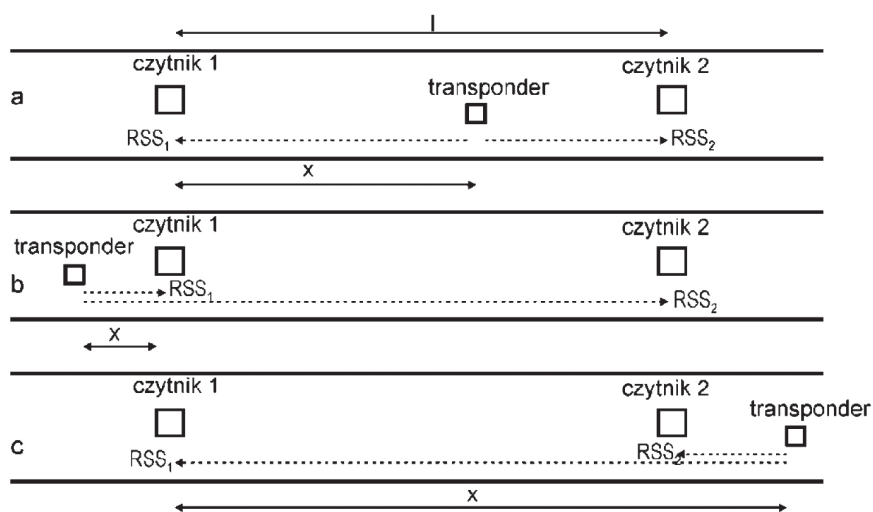
$RSS_2(l-x)$ – poziom sygnału radiowego zmierzony przez czytnik 2 w odległości $l-x$ od identyfikatora,

$RSS(x_0)$ – 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),

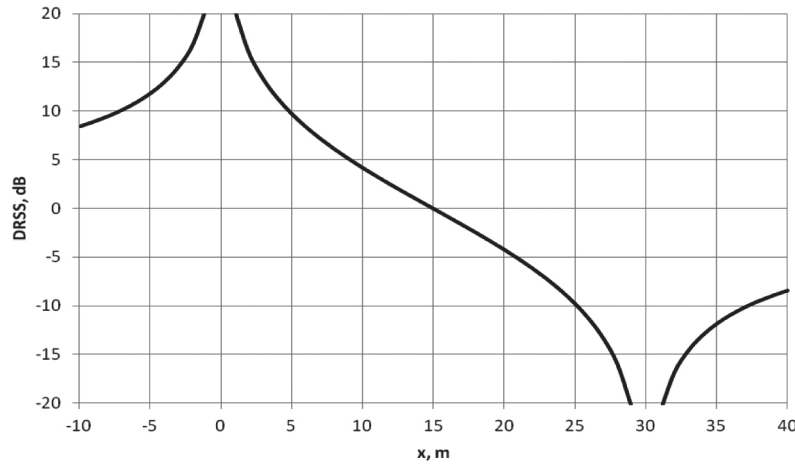
σSS – zmienna losowa o rozkładzie normalnym uwzględniająca lokalne warunki propagacji fal elektromagnetycznych (odbicia, załamania, rozproszenie).



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 czytnika może być wtedy równa 0). W rzeczywistości ze względu na poprzeczne rozmiary wyrobisk odległość transpondera do czytnika nigdy nie będzie równa 0.

Jeżeli przez x_1 oznaczymy odległość transpondera od czytnika 1, a przez x_2 oznaczymy odległość transpondera od czytnika 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 czytniki 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:

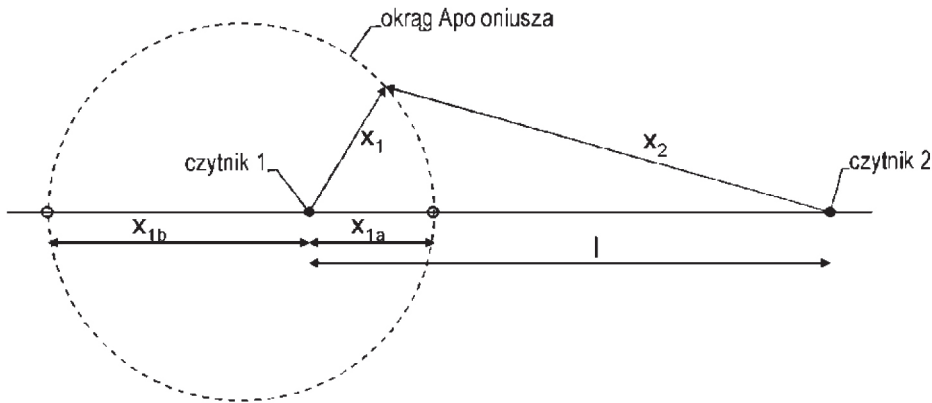
$$r = l \frac{k_{12}}{k_{12}^2 - 1} \quad (18)$$

przecinającym prostą przechodzącą przez oba czytniki w odległościach:

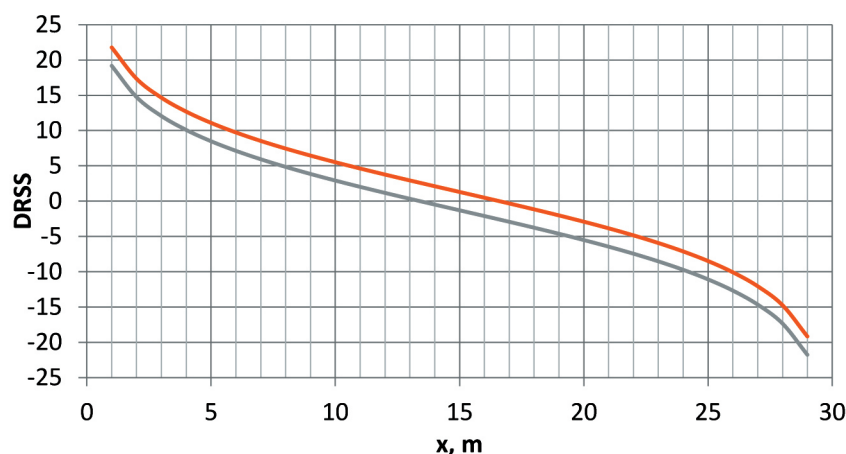
$$x_{1a} = \frac{l}{1 + k_{12}} \quad (19)$$

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

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 paśmie 868 MHz (systemy PORTAS oraz ISI) oraz TDOA w paśmie 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].

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 łączami 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 przesuwająca, 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,
- przyporządkowanie 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., Zając 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] Widłak 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 Automatyk Przemysłowej

Politechnika Śląska

ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice

{kmiskiewicz, andrzej.nowrot, awojaczek}

@polsl.pl