

Zastosowanie inteligentnych sieci czujników i systemów monitorowania do zarządzania gospodarką wodno-kanalizacyjną w obszarach zurbanizowanych

Streszczenie. W artykule przedstawiamy system do kontroli poziomu nieczystości ciekłych w zbiornikach bezodpływowych, wykorzystywanych głównie w gospodarstwach domowych. System ten to zespół kilku powiązanych elementów realizujących jako całość zadanie polegające na przekazaniu końcowemu użytkownikowi informacji o stanie napełnienia zbiornika. Ponadto, umożliwia analizę poziomu ścieków wskazując na ewentualną eksfiltrację ścieków lub infiltrację wód gruntowych.

Abstract. In this article, we present a system for controlling the level of liquid waste in septic tanks, commonly used mainly in households. The system is a set of several interrelated elements that perform, as a whole, and proceeding the information about the filling status of the tank to the end-user with. In addition, it enables the analysis of the level of sewage, indicating a possible exfiltration of sewage or infiltration of groundwater (*Smart networks of sensors and monitoring systems for water and sewage management in urban areas*).

Słowa kluczowe: inteligentna infrastruktura, Internet Rzeczy, monitoring środowiskowy, zbiornik bezodpływowy

Keywords: smart infrastructure, Internet of Things, environmental monitoring, septic tank

Wstęp

Szybki przyrost ludności i technologiczny rozwój miast, stawiają nowe wymagania dotyczące ochrony środowiska, zwłaszcza na terenach zurbanizowanych. Monitorowanie stanu środowiska jest kluczowe w rozwoju miasta. Minimalizowanie negatywnego oddziaływania przemysłu oraz zanieczyszczeń komunalnych to obecnie najważniejszy technologiczny trend w inżynierii środowiska [1]. Nowym wyznacznikiem inteligentnego miasta opartego na wykorzystaniu technologii Internetu Rzeczy (IoT), informatyzującego procesy miejskie i przemysłowe jest właściwe sterowanie pracą obiektów technologicznych, używanych w gospodarce przemysłowej 4.0 [2]. Celem badań jest implementacja systemu, umożliwiającego monitorowanie bezodpływowych zbiorników nieczystości. Wybór odpowiedniego monitoringu dla sieci wodociągowo-kanalizacyjnej, stanowi jedno z największych wyzwań w obszarach zarówno wiejskich, jak i silnie zurbanizowanych. Wprowadzenie na rynek usług infrastruktury teleinformatycznej i rozwiązań Przemysłowego Internetu Rzeczy (IIoT) [3], stanowi istotną przewagę w porównaniu do dotychczasowych metod gromadzenia danych. Wykorzystanie infrastruktury teleinformatycznej pozwala na efektywniejsze gromadzenie i przetwarzanie danych [4]-[8]. Przynosi to korzyści gdyż ocena parametrów środowiskowych staje się pełniejsza, dzięki większej częstotliwości ich odczytu i prowadzona jest na bieżąco dzięki przetwarzaniu w trybie on Line [9]-[11].

Pomimo spadku liczby przydomowych zbiorników na nieczystości (szamb), (dane GUS za rok 2019 podają liczbę 2,1 mln w stosunku do 2,2 mln w roku 2018), systemy odprowadzania ścieków z budynków mieszkalnych nadal pozostają dużym problemem w Polsce. Ze względu na niewystarczająco rozwiniętą infrastrukturę kanalizacyjną, a niejednokrotnie brak ekonomicznego lub technicznego uzasadnienia podłączenia niektórych nieruchomości do sieci kanalizacyjnej należy zakładać, że w najbliższych latach nie nastąpi znaczny spadek liczby przydomowych zbiorników bezodpływowych na nieczystości ciekłe. Zbiorniki te stanowią potencjalne zagrożenie dla ludzi i środowiska, co wynika z braku szczelności, szczególnie w zbiornikach długo użytkowanych i skutkuje skażeniem wód gruntowych chorobotwórczymi patogenami, zarazkami oraz toksynami. Problemem jest też zamierzone, nielegalne pozbywanie się ścieków. Choć polskie przepisy regulują

konieczność udokumentowanego wywozu nieczystości ciekłych z nieruchomości, bardzo często zdarzają się przypadki celowego opróżnienia zbiorników do rowów melioracyjnych czy gruntów rolnych. Zanieczyszczenie środowiska gleb i wód powierzchniowych ściekami jest jednym z wielu problemów dotyczących szerokiego zagadnienia, jakim jest ochrona środowiska. Jednak w przeciwieństwie do np. problemu zanieczyszczenia powietrza, nie ma tu wystarczająco rozwiniętych narzędzi pozwalających poznać skalę zjawiska lub prowadzić stały nadzór, umożliwiający minimalizowanie lub eliminowanie zagrożeń.

Obecnie poza rozwiązaniami administracyjnymi (obowiązek udokumentowania wywozu ciekłych nieczystości), brak jest środków technicznych wykorzystujących zaawansowane technologie [12] do prowadzenia systemowego monitoringu bezodpływowych zbiorników nieczystości ciekłych, tak pod względem kontroli szczelności, jak również kontroli wywozu ich zawartości. Co prawda istnieją pewne rozwiązania techniczne do monitorowania poziomu ścieków [13], ale są to jednak rozwiązania indywidualne, których głównym zadaniem jest informowanie użytkownika o konieczności opróżnienia zbiornika. W urządzeniach tych rolę czujnika spełnia z reguły sonda pływakowa lub sondy prętowe. Dwustanowy sygnał z sond przesyłany jest najczęściej drogą przewodową do sygnalizatora świetlno-dźwiękowego umieszczonego w budynku [14]. Bardziej zaawansowane rozwiązania wykorzystują transmisję radiową Wi-Fi [15]. Informacja przekazywana jest wtedy lokalnie do użytkownika pod warunkiem posiadania sieci. Czasem instalacje takie wyposażone być mogą w moduły GSM (Global System for Mobile Communications) do wysyłania powiadomień, nie tylko do użytkownika, ale też np. do firmy asenizacyjnej.

Jak wspomniano wyżej zjawisko zanieczyszczenia środowiska ściekami jest istotnym i częstym problemem. Przedostające się do gleby i wód gruntowych, szkodliwe czynniki biologiczne, np. grzyby i bakterie stanowią poważne zagrożenie dla ludzi i środowiska naturalnego. Główną przyczyną tego zjawiska jest nieszczelność sieci kanalizacyjnych, szczególnie kanalizacji grawitacyjnych, a w przypadku braku kanalizacji nieszczelność bezodpływowych zbiorników nieczystości ciekłych, oraz w wielu przypadkach traktowanie ścieków jako nawóz. Nie w każdym przypadku możliwe jest szybkie i łatwe

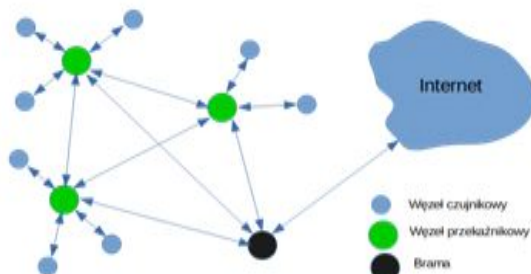
sprawdzenie szczelności zbiornika, szczególnie zbiorników długo użytkowanych lub sprawdzenie udokumentowanego wywozu nieczystości. Zastosowanie monitoringu poziomu ścieków w zbiornikach i przesyłanie tych informacji do odpowiedniego organu kontrolującego, pozwoli na zredukowanie problemu zanieczyszczenia środowiska ściekami. Elementami systemu są w warstwie sprzętowej węzły czujników bezprzewodowych (sensor node), węzły przekaźnikowe (relay node) oraz brama (gateway). A w warstwie informatycznej oprogramowanie agregujące dane oraz platforma ISIMPIO prezentująca dane. Platforma ta jest efektem projektu p.t. Inteligentna Infrastruktura Bezprzewodowej Sieci Czujników (IIBSC) dla Instalacji Komunalnych i Przemysłowych. Spośród wielu zagadnień dotyczących projektowania i wdrażania naszego systemu przedstawimy efekty przeprowadzonego przez nas eksperymentu i wyniki modelowania. Eksperymentowi podlegał wykonany przez nas, działający prototyp systemu monitoringu, którego celem była weryfikacja funkcjonalności systemu w zakresie niezawodności komunikacji w przypadku umieszczenia nadajnika (czujnika) wraz z anteną poniżej poziomu gruntu. W oparciu o modelowanie przeprowadzono symulację przyrostu poziomu ścieków. Na podstawie modelu oszacowano wielkość tłumienia sygnału radiowego w sieciach rozległych.

Nadrzędnym celem pracy była ocena skuteczności bezprzewodowych sieci czujników w monitorowaniu bezodpornych zbiorników nieczystości przy zastosowaniu Internetu Rzeczy.

Metodyka

Struktura blokowa systemu bezprzewodowej sieci czujników (IIBSC) :

Rysunek 1 przedstawia architekturę proponowanego systemu bezprzewodowej sieci czujników. Jest to sieć kratowa o topologii klastrowej. Topologia klastrowa wynika bezpośrednio z umieszczenia czujników poziomiu.



Rys.1. Uproszczona architektura systemu IIBSC

Ze względu na to, iż pomiar poziomu odbywa się w zbiornikach ziemnych, zachodzi konieczność wyniesienia nadajnika lub anteny ponad poziom gruntu, co nie zawsze jest możliwe ze względów technicznych lub z powodu konieczności ochrony przed uszkodzeniami. W konsekwencji, nie byłoby możliwości komunikacji bezpośredniej między czujnikami. Problem ten został rozwiązany przez użycie węzłów przekaźnikowych zbierających dane z określonych grup czujników. Komunikacja między węzłami, a bramą jest zorganizowana za pomocą protokołu DigiMesh®. Protokół ten wraz z wspierającymi go modułami radiowymi Xbee 868 LP tworzy homogeniczną sieć w której wszystkie węzły przekierowują pakiety danych po trasach wyznaczonych dynamicznie przez protokół. Ponieważ ustalone trasy są zapamiętywane przez węzeł, sieć nie jest obciążona ciągłym trasowaniem. Trasy są zmieniane jedynie w przypadku utraty komunikacji

z którymkolwiek węzłem, a ze względu na niejawność protokołu, nie są znane zasady tworzenia tras.

W przypadku naszej topologii odbywa się to w następujący sposób: każdy węzeł czujnikowy w swojej ramce danych umieszcza 64-bitowy adres węzła docelowego, w tym przypadku bramy. Ramka danych wraz z adresem jest przekazywana do będącego w zasięgu radiowym węzła przekaźnikowego, a ten wraz z innymi węzłami przekaźnikowymi tworzy właściwą sieć trasującą pakiety danych do bramy. Protokół wspiera rozwiązania nisko-mocowe, a to znaczy że wszystkie węzły sieci pozostają w trybie uśpienia i są wybudzane synchronicznie. Synchronizację czasową ustala użytkownik, nominując jeden z węzłów koordynatorem, który również pozostaje w trybie uśpienia.

Elementy systemu:

A. Węzeł bezprzewodowego czujnika poziomu i temperatury

Zadaniem węzła czujnikowego (Rys 2) jest wykonanie pomiaru poziomu ścieku oraz pomiaru temperatury otoczenia wymaganej do kompensacji pomiaru. Wymagania stawiane przed węzłem czujnikowym to jego energooszczędność (pozwalająca na kilkuletnią pracę na bateriach), powtarzalność pomiaru, odporność mechaniczna, wodoodporność i odporność chemiczna. Energooszczędność jest zapewniona konstrukcją płyty głównej węzła czujnikowego, użytymi elementami oraz doбором czujnika poziomu. W projekcie wykorzystano mikrokontroler firmy Microchip PIC18LFxxxx, wykorzystujący technologię NanoWatt® (np. w trybie uśpienia z pracującym „timerem” pobór prądu wynosi 750nA przy zasilaniu 3V). Elementem pomiarowym jest komercyjny czujnik ultradźwiękowy 42kHz firmy MaxBotix pracujący z rozdzielczością 1mm o zasięgu 5m i strefie nieczułości 30cm. Czujnik ten wyposażony jest w interfejs szeregowy, posiada stopień ochrony IP67 oraz osłonę teflonową zapewniającą odporność chemiczną – (Rys. 3) Elementem odpowiadającym za transmisję radiową jest moduł radiowy Xbee 868 LP firmy Digi RF. Moduł radiowy pracuje w paśmie ISM z częstotliwością 868MHz i poborem prądu w trybie uśpienia 1uA.

W badaniu została zaprojektowana i wykonana specjalna obudowa – (Rys. 4) z tworzywa zbrojonego włóknem węglowym. Obudowa zapewnia stopień ochrony IP67 oraz ochronę chemiczną. Działanie czujnika opiera się o dwa zdarzenia:

1) Pierwsze to przerwanie od „timera”, które wybudza procesor, zostaje podane zasilanie na czujnik, a następnie interfejsem szeregowym procesor odczytuje wynik pomiaru i wykonuje operację uśredniania wraz z aktualizacją pakietu danych przygotowanych do wysyłki. Czas operacji wynosi około 160ms. Następnie procesor przechodzi w tryb uśpienia. W projekcie przyjęto 5-cio minutowy cykl pomiarowy.

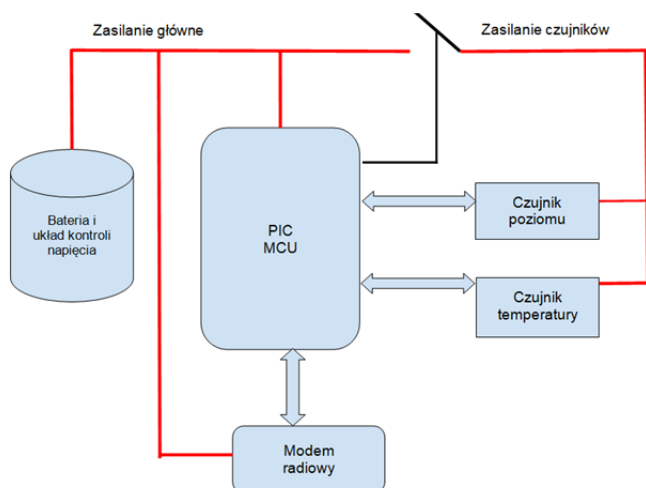
2) Drugim zdarzeniem jest przerwanie pochodzące od wybudzonego synchronicznie modułu radiowego. W ramach tego zdarzenia, procesor interfejsem szeregowym przesyła ramkę danych do modułu. W badaniu użyto transmisję z potwierdzeniem ACK, przy której czas operacji zależy od wielkości sieci i waha się od 50ms do 1s.

B. Węzeł przekaźnikowy

Zadaniem węzła przekaźnikowego jest trasowanie pakietów danych w sieci. Wymagania stawiane przed węzłem to odporność na warunki atmosferyczne. Węzeł przekaźnikowy to samodzielny modem radiowy Xbee 868 LP zasilany bateryjnie. Węzeł przekaźnikowy może być też dodatkowo wyposażony w inny czujnik środowiskowy, np. monitorujący stan jakości powietrza.

C. Brama

W warstwie fizycznej brama jest podłączona do ogólnej sieci internetowej przy pomocy interfejsu GPRS, Wi-Fi lub przez Ethernet. W warstwie aplikacji która jest najbliższej końcowego użytkownika wykorzystano znany i szeroko stosowany w Internecie rzeczy (IoT) protokół MQTT (MQ Telemetry Transport or Message Queuing Telemetry Transport). Jest to protokół oparty o wzorzec publikacja / subskrypcja. W warstwie aplikacji pracuje również baza danych szeregów czasowych dostępna dla końcowego użytkownika za pomocą API (Interfejs Programowania Aplikacji). Jako platformę sprzętową zastosowano jednopłytkowy komputer wyposażony w procesor klasy ARM-Cortex® -A8 z 512MB pamięci operacyjnej oraz 4GB wbudowanej pamięci flash. Całość pracuje pod nadzorem systemu operacyjnego Linux.



Rys. 2. Schemat blokowy węzła czujnikowego

Eksperyment

1. Modelowanie propagacji fal radiowych w środowiskach wielowarstwowych

Podstawowym celem eksperymentu jest pomiar spadku mocy sygnału radiowego przesyłanego przez łącze radiowe w warunkach dodatkowego tłumienia propagacyjnego, wprowadzanego przez warstwę gruntu. W ramach eksperymentu została również określona jakość łącza radiowego opisanego pakietowym współczynnikiem błędów PER. Weryfikacji poddano również trwałość elementów systemu w zmiennych warunkach atmosferycznych.



Rys. 3 Czujnik poziomu: Źródło MaxBotix

Fundamentalnym elementem szacowania poziomu sygnału w modelach propagacyjnych jest współczynnik tłumienności trasy. Badanie propagacji fal

elektromagnetycznych w środowiskach wielowarstwowych (w eksperymencie wybrano dwa środowiska powietrze i warstwę gruntu), rozpatrywano przy użyciu modelu bilansu mocy łącza. Zatem moc sygnału uzyskana na odbiorniku (Pr) dana jest wzorem [28]:

$$(1) Pr = Pt + Gr + Gt - FSPL - GSPL$$

gdzie: Pt to moc nadajnika, Gt, Gr to odpowiednio zysk anteny nadawczej i odbiorczej, FSPL to tłumienie wolnej przestrzeni a GSPL to tłumienie w gruncie. Tłumienie wolnej przestrzeni i tłumienie w gruncie są odpowiednio opisane wzorami [29]:

$$(2) FSPL [dB] = 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(R) + K$$

$$(3) GSPL [dB] = 6.4 + 20 \log(r) + 20 \log(\beta) + 8.69(\alpha \cdot r)$$

gdzie f jest częstotliwością pracy układu, R to odległość między antenami, r długość ścieżki w gruncie, K stała zależna od jednostek: 32.44 dla [km] i [MHz] lub -27.55 dla [m] i [MHz], α jest stałą tłumienia, β jest stałą przesunięcia fazowego.



Rys. 4. Obudowa z płytą główną i czujnik

Obydwie stałe α i β są zależne od przenikalności gruntu. Analiza modelu propagacji fal w gruncie znacznie przekracza zakres artykułu, dlatego za autorami [29], przyjęto średnie wartości tłumienia sygnału w gruncie GSPL wyliczone na podstawie modelu [28]. Dla frakcji granulometrycznej użytego w eksperymencie iłu gliniastego o objętościowej zawartości wody 22% średnia wartość tłumienia wyliczona z modelu wynosiła 48,59 dB [29]. Wartość tłumienia wolnej przestrzeni FSPL została wyliczona dla odległości między antenami wynoszącej 30m i wynosiła 60,760 dB. Obliczeniowa moc sygnału odebranego przez odbiornik wg (1) stanowiła 91,85 dB, co przy czułości odbiornika wynoszącej 110 dB wskazuje na wystarczający margines błędów aby zapewnić stabilność łącza.

2. Opis eksperymentu

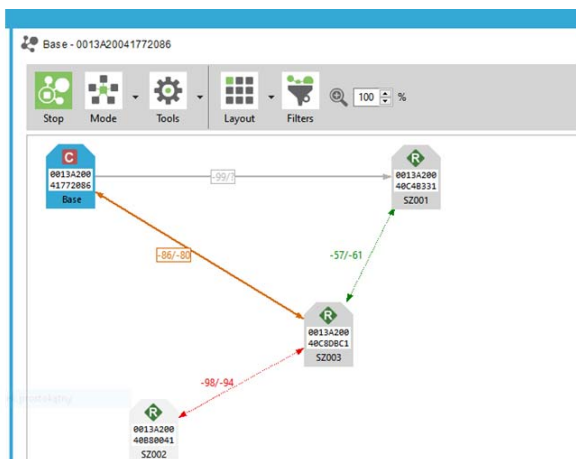
Celem eksperymentu był pomiar spadku mocy sygnału radiowego w warunkach dodatkowego tłumienia wprowadzonego przez warstwę gruntu. Doświadczenie zostało przeprowadzone w warunkach kontrolowanych, ale zbliżonych do warunków normalnego użytkownika. Środowisko, w którym odbywał się eksperyment zostało sprawdzone pod względem zakłóceń elektromagnetycznych, mogących mieć wpływ na pomiar. Sprawdzenie tła elektromagnetycznego wykonano przy użyciu analizatora widma RSA306B. Diagnoza nie wykazała, aby w pobliżu przeprowadzonego badania działały urządzenia mogące zakłócić pomiary. W trakcie prowadzenia eksperymentu kontroli podlegały: wysokość

zawieszenia anten odbiorczych (węzłów przekaźnikowych) oraz głębokość na której umieszczono antenę nadawczą (węzeł czujnikowy). Opisano również typ gruntu. Do eksperymentu wykorzystano węzeł czujnikowy wyposażony w komercyjną antenę PCB o charakterystyce dookólnej z zyskiem 1,5 dBi, umieszczoną w obudowie węzła. Węzeł czujnikowy został umieszczony w rurze PCV, która została wkopana w warstwę powierzchniową gruntu. Odległość węzła od poziomu gruntu ustawiono na $h_1 = 30\text{cm}$. Do gruntu wysypano 15 centymetrową warstwę żwiru. Odbiorniki (węzły przekaźnikowe) wyposażone w anteny ćwierćfalowe o zysku 2 dBi zostały umieszczone na elewacji budynku oraz wysokościach odpowiednio $h_2 = 2\text{m}$ i $h_3 = 4\text{m}$. Odległość między miejscem umieszczeniem nadajnika, a umieszczeniem odbiorników wynosiła $d = 30\text{m}$. Pomiaru zostały wykonane przy użyciu modułu radiowego Xbee 868 LP z interfejsem USB oraz oprogramowania XCTU firmy Digi RF.

Za pomocą bezpłatnej aplikacji XCTU, zarządzano modułami radiowymi Digi (RF) i testowano połączenia radiowe. Podstawowym testem przeprowadzonym w ramach eksperymentu było skanowanie sieci. Do przeprowadzenia tego testu węzły sieci zostały skonfigurowane, jako stale aktywne (nie przechodzące w tryb uśpienia). W trybie stałej aktywności procesor nie wymusza transmisji ramek danych, co daje pewność niezakłóconej wymiany informacji między węzłami. W teście skanowania sieci, węzeł bazowy „Base”, wysłał w trybie rozgłoszeniowym ramki zapytań z żądaniem identyfikacji. Poszczególne węzły sieci odpowiadają swoim 64 bitowym adresem, nadaną nazwą oraz wielkością RSSI, która to wartość jest badaną przez nas wielkością.

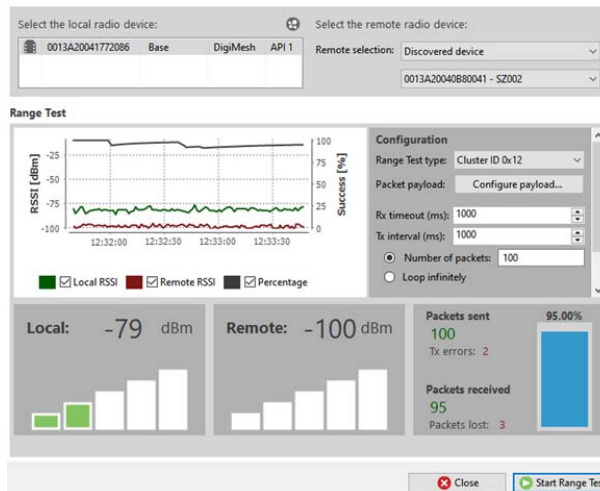
Na Rys. 5. jest przedstawiony efekt skanowania sieci. SZ002(R) to węzeł czujnikowy umieszczony w gruncie. SZ001(R) to węzeł przekaźnikowy umieszczony na elewacji budynku na wysokości 2m od poziomu gruntu, a węzeł SZ003(R) na wysokości 4m. W badaniach pokazano, że węzeł czujnikowy SZ002(R) komunikuje się tylko z węzłem SZ003(R) umieszczonym na większej wysokości. Znaczący to, że kąt załamania fali przy przejściu z ośrodka o większej gęstości do ośrodka o mniejszej gęstości jest mniejszy, niż wartości oczekiwane. Istotną w naszym eksperymencie zmierzona wartość RSSI i wynosząca 94 dB, nie wykazała znaczącego odchylenia w stosunku do wartości obliczonej.

Widoczna na rysunku wartość 98 dB to RSSI węzła SZ003(R). Pomimo, że węzeł SZ001(R) jest poza zasięgiem węzła bazowego „Base”(C), uwzględniony został (przedstawił się) w sieci, co wskazuje na potencjał aplikacyjny sieci o topologii kratowej.



Rys. 5. Pomiar mocy sygnału na odbiorniku

Następnym pomiarem przeprowadzonym w ramach eksperymentu był pomiar jakości łącza. Miarą jakości łącza jest PER (packet error ratio) – wyrażony w procentach stosunek błędnych pakietów wysłanych i odebranych do całkowitej liczby pakietów testowanych. Pomiar był wykonany przy ustawieniach sieci, takich jak w pomiarze mocy sygnału na odbiorniku. Pomiar został przeprowadzony w następujący sposób: węzeł bazowy „Base”(C) do węzła czujnikowego SZ002(R) wysłał 100 pakietów w każdym po 100 bajtów losowych danych. Uzyskany pomiar PER to 5%. Efekt pomiaru pokazany jest na Rys. 6. W badaniu pakiety były przesyłane za pośrednictwem węzła SZ003(R).



Rys. 6. Pomiar jakości łącza

Modelowanie

Do oszacowania zmian poziomu ścieków w zbiorniku wykorzystano model analogowy zbiornika prostopadłościennego, pozwalający badać poziom cieczy $h(t)$ w zbiorniku w zależności od intensywności dopływu cieczy $Q_n(t)$ i jej grawitacyjnego wypływu $Q_w(t)$. Pojemność zbiornika została wyliczona na podstawie danych statystycznych. Przyjęto, że GUS, dobowe zużycie wody na osobę w ilości 100 l/dobę, rozpatrując 4-osobową rodzinę i wywóz nieczystości w cyklu dwudziestodniowym plus dwa dni zapasu nieczystości wg (4) pojemność zbiornika V równą $8800\text{ l} = 8.8\text{ m}^3$

$$(4) \quad V = n \cdot q \cdot t$$

gdzie: n – liczba domowników; q – zużycie wody na osobę; t – czas przebywania ścieków w zbiorniku

Dobrano standardowy zbiornik o pojemności 10 m^3 o wymiarach wewnętrznych: długość = 2.9 m, szerokość = 2.3 m i wysokość = 1.55 m.

Model matematyczny rozważanego zbiornika, na podstawie bilansu masy można przedstawić za pomocą równania różniczkowego:

$$(5) \quad \frac{dV(t)}{dt} = Q_n(t) - Q_w(t)$$

Uwzględniając fakt iż pole powierzchni przekroju zbiornika jest stałe na całej jego wysokości możemy zapisać po przekształceniach, gdzie A pole powierzchni przekroju zbiornika:

$$(6) \quad \frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A} (Q_n(t) - Q_w(t))$$

Zakładając szczelność zbiornika czyli $Q_w(t) = 0$ i dane statystyczne wykorzystane w modelu wyliczono dobowy przyrost poziomu ścieków $\Delta h = 20\text{cm}$. Podobnie, zakładając stan beczynności zbiornika przez 6 godzin, czyli $Q_w(t) = 0$ i niepewność pomiaru $\pm 5\text{ mm}$ wybrano wykrywaną zmianę poziomu $\Delta h = \pm 1\text{cm}$, co odpowiada 66 l eksfiltracji lub infiltracji w ciągu 6 godzin.

Do oceny możliwości zbudowania sieci radiowej pokrywającej swym zasięgiem obszar kilku kilometrów kwadratowych wykorzystano model zmian dużej skali, który jest jednym z podstawowych modeli, rozszerzającym model fizyczny Friis'a. Jest on stosowany do przewidywania tłumienia w szerokim zakresie środowisk operacyjnych, podczas gdy model Friis'a jest ograniczony do strat przestrzeni wolnej.

Model ten jest opisany wzorem:

$$(7) PL_R = PL(R_0) + 10n \cdot \log_{10}\left(\frac{R}{R_0}\right)$$

gdzie: $PL(R_0)$ – tłumienie mocy w odległość referencyjnej R_0 od nadajnika wyznaczone z równania Friis'a,
 $PL(R)$ – tłumienie mocy w dowolnej odległości od nadajnika,
 n – wykładnik tłumienia mocy dobrany według Tabeli 1 w zależności od środowiska.

Tabela 1. Wykładnik tłumienia mocy w zależności od środowiska

Środowisko operacyjne	Wykładnik tłumienia n
Wolna przestrzeń	2
Środowisko miejskie z zakłóceniami telefonii komórkowej	2.7 do 3.5

Wykonano obliczenia bilansu łącza oraz marginesu łącza dla transmisji w otwartej przestrzeni dla wykładnika tłumienia $n = 2$. Wyniki zebrano w Tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki bilansu łącza oraz marginesu łącza dla transmisji w otwartej przestrzeni dla wykładnika tłumienia $n = 2$

Odległość [km]	F SPL [dB]	P rx [dB]	Margines [dB]
1	91.2103	-77.2103	-28.7896
2	97.2309	-83.2309	-22.7690
3	100.7528	-86.7528	-19.2471

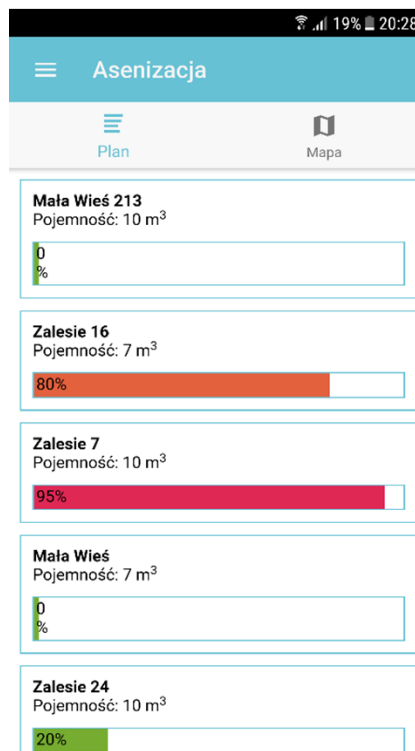
Dyskusja

W artykule przedstawiamy rozwiązanie testowe, przedwdrożeniowe. Poruszone w artykule zagadnienia dotyczą najistotniejszych naszym zdaniem problemów w złożonym projekcie jakim jest system monitoringu bezprzewodowego. Pierwszym i podstawowym problemem było zweryfikowanie danych obliczeniowych dotyczących tłumienia fal radiowych przez warstwę gruntu oraz zachowanie zadowalającej jakości łącza. Nasz eksperyment pozwala stwierdzić, że pomimo wprowadzenia przez warstwę gruntu dużego tłumienia jakoś połączenia jest zadowalająca PER na poziomie 5%. Z eksperymentu wynika, że w promieniu 30m od węzła przekaźnikowego mogą być umieszczone węzły czujnikowe z zachowaniem dobrej jakości łącza. Modelowanie zmian poziomu ścieków w zbiorniku wskazuje, że dobór czujnika ultradźwiękowego o rozdzielczości 1mm był zasadny. Pomiar poziomu przy normalnym napływie ścieków nie następuje problemów metrologicznych jednak w przypadku eksfiltracji lub infiltracji zdolności metrologiczne czujnika są naszym zdaniem niewystarczające. Przyczyną jest szereg zakłóceń mających wpływ na dokładność pomiarów. Mogą one jednak być pomocne w analizie statystycznej mającej na celu wykrycie nieszczelności. Modelowanie zasięgu sieci ma tylko znaczenie szacunkowe ponieważ na zasięg transmisji radiowej ma wpływ wiele czynników przede wszystkim terenowych. Wyniki modelowania wskazują

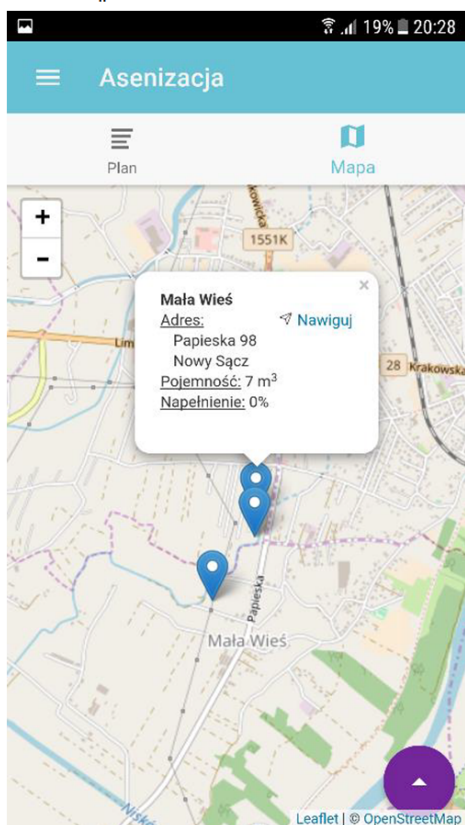
jednak na określone możliwości i tak osiągnięcie odległości do 2 km między węzłami przekaźnikowymi jest możliwe, co można przełożyć na pokrycie terenu rzędu dziesiątek km kwadratowych.

Problem eksfiltracji ścieków i infiltracji wód gruntowych jest ujawniany jedynie na drodze statystycznej analizując różnicę między ilością wody zużytej, a ilością wywozonych ścieków. Proponowany system wykorzystuje znane i stosowane z powodzeniem w wielu dziedzinach bezprzewodowe sieci czujników (WSN) [16] o topologii sieci kratowej. Sieci kratowe to skuteczny sposób kierowania danych. Zasięg zwiększa się, umożliwiając transmisję danych od węzła do węzła, a niezawodność rośnie dzięki „samo-naprawianiu”, czyli tworzeniu alternatywnych ścieżek w przypadku awarii jednego węzła lub utraty połączenia z nim. Sieć została zbudowana w oparciu o zastrzeżony protokół sieci kratowej o komercyjnej nazwie DigiMesh®, opracowany przez firmę Digi RF. Protokół ten umożliwia synchronizację czasową uspionych węzłów i działanie przy niskim poborze mocy. Jednym z unikatowych aspektów DigiMesh®, w porównaniu z innymi protokołami, takimi jak ZigBee® lub Z-Wave, jest to, że wszystkie urządzenia w sieci DigiMesh® są tego samego typu. Nie jest wymagana żadna złożona architektura, aby zdefiniować różne węzły w sieci, jako węzły końcowe, routery, koordynatory, routery graniczne itp. Każde urządzenie jest takie samo i może przekierowywać pakiety, pozostawać w trybie uspienia w celu optymalizacji mocy i komunikować się za pośrednictwem sieci kratowej.

W ramach badań zostały zaprojektowane i wykonane węzły przekaźnikowe sieci oraz brama GPRS. Proponowane rozwiązanie integruje w jednolity system metodę pomiaru poziomu ścieku wraz ze sposobem rejestracji i archiwizacji danych. Systemowa baza danych szeregów czasowych zapewnia integralność danych, ich dokładność, prawdziwość i aktualność [17]. Należy również zwrócić uwagę na niebagatelną zaletę stosowania bezprzewodowych czujników poziomu ścieków w zbiornikach bezodpływowych którą jest bezpieczeństwo obsługi.



Rys. 7. Widok – podstawowe informacje o parametrach zbiornika bezodpływowego



Rys. 8. Widok – podstawowe informacje o lokalizacji zbiorników bezodpływowych

Propozycja budowy informatycznego systemu wczesnego ostrzegania o przepełnieniu i nieszczelnościach przydomowych zbiorników bezodpływowych – (szamb), może znaleźć szerokie zastosowanie w gospodarce wodno-ściekowej. Implementacja systemu, umożliwiającego monitorowanie zbiorników bezodpływowych wpisuje się w tendencję stosowania technik opartych na koncepcji Internetu Rzeczy (IoT) do zarządzania gminami bez interwencji człowieka, w tym koncepcję smart cities [18]. Monitoring pozwoli też na wcześniejsze ostrzeżenie [19]-[21] przed niekontrolowanym przelaniem lub rozszczelnieniem zbiornika bezodpływowego oraz zwiększy efektywność ekonomiczną odbioru nieczystości przez optymalizację tras dla obsługi asenizacyjnej (sygnalizacja stanów wypełnienia z podaniem adresu i trasy dojazdu do zbiorników w Google-Maps).- (Rys. 7 i 8) Wypełnienie wymagające opróżnienia zbiornika sygnalizowane jest po przekroczeniu określonego poziomu, a ewentualne rozszczelnienie przez obliczanie różnicy poziomów w kolejnych pomiarach, w określonych interwałach czasowych. Podstawowym problemem było zweryfikowanie danych obliczeniowych dotyczących tłumienia fal radiowych przez warstwę gruntu oraz zachowanie zadowalającej jakości łącza. Nasz eksperyment pozwolił stwierdzić, że pomimo wprowadzenia przez warstwę gruntu dużego tłumienia, jakość połączenia była zadowalająca – PER na poziomie 5%. Z eksperymentu wynika, że w promieniu 30m od węzła przekaźnikowego mogą być umieszczone węzły czujnikowe z zachowaniem dobrej jakości łącza. Modelowanie zasięgu sieci miało tylko znaczenie szacunkowe, ponieważ na zasięg transmisji radiowej ma wpływ wiele czynników przede wszystkim środowiskowych [23]. Wyniki pracy ukazały, że system czujników można przełożyć na pokrycie terenu rzędu dziesiątek km kwadratowych.

Zastosowanie Inteligentnej Infrastruktury Bezprzewodowej Sieci Czujników (IIBSC) dla Instalacji Komunalnych w obszarach miejskich, może wskazać kierunki na przyszłość dla rozwoju koncepcji Internetu Rzeczy [22]. Sieć jednoznacznie identyfikowanych urządzeń, gromadzących dane jest przydatna do lokalizacji usterek obiektowych urządzeń technologicznych [24]-[27]. Przedstawione systemy nadają się również do bezprzewodowych i przewodowych rozwiązań sterowania i monitorowania stacji próżniowo-tłocznych.

Nasze badania wykazały, że inteligentne urządzenia pomiarowo-kontrolne są przydatne w monitorowaniu studzienek kanalizacyjnych. Wyniki przeprowadzonych dociekań wykazały również, że zaprojektowane przez nas urządzenia sprawdzają się w sytuacji potrzebnej szybkiej reakcji na awarie. Może mieć to znacznie przy tworzeniu komputerowych modeli predykcyjnych dla szacowania ilości zanieczyszczeń w ściekach, w oczyszczalniach. Uważamy też, że rozbudowanie prezentowanej technologii w przyszłości, wpłynie na oszczędność czasu dla służb konserwujących urządzenia. Ponadto, dla podmiotów gospodarczych, korzystających z tych rozwiązań technicznych, przyniesie korzyści w postaci oszczędności kosztów eksploatacji i serwisowania, w tym szczególnie poprzez mniejsze zużycie energii oraz ich dłuższą niezawodność. Wykorzystanie aplikacji mobilnej w połączeniu z czujnikami umieszczonymi w zbiornikach, dostarcza nowoczesnych metod monitoringu. System ten będzie miał też duże znaczenie w aspekcie ochrony środowiska, gdzie bieżący monitoring pozwoli na dużo wcześniejsze zareagowanie na potencjalne zagrożenia. Rozwiązanie to przeznaczone jest dla służb miejskich, jak i mieszkańców. Wyniki monitoringu wykazały że nasza metoda może być szeroko stosowana do inteligentnych aplikacji mobilnych. Zaprezentowane urządzenia, z wysoką wydajnością, mogą znaleźć zastosowanie w informowaniu o awarii w sieci kanalizacyjnej. Urządzenia i moduły zapewnią bezpieczeństwo, dlatego przydadzą się w monitoringu stanu napelnienia zbiorników bezodpływowych i przepływu ścieków. Mogą być również przydatne w dalszym rozwoju nowoczesnych technologii dla gospodarki wodno-ściekowej.

Podsumowanie

Badanie zanieczyszczeń stanowi wyzwanie w usługach komunalnych i ekonomii miejskiej. W artykule przedstawiono rozwiązanie testowe przygotowane do wdrożenia. W instalacji testowej pomiary odbywały się w czasie rzeczywistym. Zebrane dane mogą być przesyłane bezprzewodowo dedykowaną siecią IoT i wyświetlane online w aplikacji mobilnej i webowej. Dodatkowo system umożliwia przechowywanie danych historycznych, ułatwiających podejmowanie decyzji. Poruszone zagadnienia dotyczą istotnych problemów na terenie zurbanizowanym, jakim jest system monitoringu bezprzewodowego zanieczyszczeń. Nasze rozwiązania projektowe i zastosowana technologia, usprawniają omówione wyżej procesy i mogą zwiększyć efektywność monitoringu ważnego w ochronie środowiska oraz spowodować oszczędności energetyczne. Analiza sytuacji awaryjnych powinna być monitorowana przez oprogramowanie dostępne dla szeroko rozumianych urządzeń mobilnych. Platforma ISIMPIO to system wczesnego ostrzegania o potencjalnych problemach związanych z przeciekaniem i przepełnieniem zbiorników bezodpływowych. W instalacji testowej pomiary odbywały się w czasie rzeczywistym. Następnie zebrane dane były przesyłane bezprzewodowo dedykowaną siecią IoT i wyświetlane online w aplikacji mobilnej i webowej.

Dodatkowo system umożliwiał przechowywanie danych historycznych, ułatwiających podejmowanie decyzji. Przykładowe przedstawienie stanów wypełnienia zbiorników z podaniem adresu (Rys.7) i trasy dojazdu do nich na Google-Maps (Rys. 8)

Praca wykonana z wykorzystaniem projektu w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Małopolskiego na lata 2014 – 2020. Tytuł projektu: "Inteligentna Infrastruktura Bezprzewodowej Sieci Czujników dla instalacji przemysłowych i komunalnych" Umowa o dofinansowaniu RPMP.01.02.01-12-0384/16

Autorzy:

mgr inż. Jacek Swolkień, Przedsiębiorstwo „TELETRANS-ELCOMP” Sp. z o.o, ul. Czechowicza 5A Kraków, E-mail: j.swolkien@teletrans.com.pl

inż. Marek Tomaszek, Przedsiębiorstwo „TELETRANS-ELCOMP” Sp. z o.o, ul. Ks. Łazarzkiego 1 Limanowa, E-mail: m.tomaszek@teletrans.com.pl

mgr inż. Wiktor Halecki, Katedra Melioracji i Kształtowania Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, ul. Mickiewicza 24/28 30-059 Kraków, E-mail: wikt.halecki@ur.krakow.pl

LITERATURA

- [1] Al Mamun M.A., Hannan M.A., Hussain A., Basri H., Theoretical model and implementation of a real time intelligent bin status monitoring system using rule based decision algorithms. *Expert Systems with Applications*, (2016), n. 48, 76-88
- [2] Ardanza A., Moreno A., Segura Á., de la Cruz M., Aguinaga, D., Sustainable and flexible industrial human machine interfaces to support adaptable applications in the Industry 4.0 paradigm. *International Journal of Production Research*, (2019), 1-15
- [3] Balakrishnan S., Rani S.S., Ramya K. C., Design and Development of IoT Based Smart Aquaculture System in a Cloud Environment. *International Journal of Oceans and Oceanography*, 13 (2019), n. 1, 121-127
- [4] Bian D., Kuzlu M., Pipattanasomporn M., Rahman S., Shi D. Performance evaluation of communication technologies and network structure for smart grid applications. *IET Communications*, 13 (2019), n. 8, 1025-1033
- [5] Bublitz M., Oetomo F., Sahu A.S., Kuang K., Fadrique A.X., Velmovitsky L. E., Nobrega P. R., Morita P.P., Disruptive Technologies for Environment and Health Research: An Overview of Artificial Intelligence, Blockchain, and Internet of Things. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16 (2019), n. 20, p.3847.
- [6] Chen T., Barbarossa S., Wang X., Giannakis G.B., and Zhang Z.L., Learning and Management for Internet of Things: Accounting for Adaptivity and Scalability. *Proceedings of the IEEE*, 107 (2019), n. 4, 778-796
- [7] Cox S., Johnson N., and Price M., The Internet of Things. A Baseline of Development: Higher Education and Technology, (2019), 29
- [8] Din S., and Paul A., Smart health monitoring and management system: Toward autonomous wearable sensing for internet of things using big data analytics. *Future Generation Computer Systems*, (2019), n. 91, 611-619
- [9] Gómez J. E., Marcillo F. R., Triana, F. L., Gallo V.T., Oviedo B. W., Hernández V. L. IoT for environmental variables in urban areas. *Procedia Computer Science*, (2017), 109, 67-74
- [10] Janhunen J., Mikhaylov K., Petäjälä J., Sonkki M., Wireless Energy Transfer Powered Wireless Sensor Node for Green IoT: Design, Implementation and Evaluation. *Sensors*, 19 (2019), n. 1, 90
- [11] Khattak H. A., Farman H., Jan B., Din I. U., Toward integrating vehicular clouds with IoT for smart city services. *IEEE Network*, 33 (2019), n. 2, 65-71
- [12] Ke F., Huang X., Zeng W. and Liu Y., Sum Throughput Maximization for MIMO Wireless Powered Communication Networks with Discrete Signal Inputs. *IEICE Transactions on Communications*, 102 (2019), n. 5, 1037-1044
- [13] Marsal-Llacuna M. L., Colomer-Llinàs J., Meléndez-Frigola J., Lessons in urban monitoring taken from sustainable and livable cities to better address the Smart Cities initiative. *Technological Forecasting and Social Change*, (2015), n. 90, 611-622
- [14] Nassar M. A., Luxford L., Cole P., Oatley G., Koutsakis P., The Current and Future Role of Smart Street Furniture in Smart Cities. *IEEE Communications Magazine*, 57 (2019), 6, 68-73
- [15] Nazneen, S., Chowdhury M.M.J., and Sabuj S.R., Analysis of delay sensitive performance in cognitive wireless sensor networks. *Internet Technology Letters*, 2 (2019), n. 3, p.e98
- [16] Ni J., Lin X., and Shen X.S., Toward Edge-Assisted Internet of Things: From Security and Efficiency Perspectives. *IEEE Network*, 33 (2019), n. 2, 50-57
- [17] Ostad-Sharif A., Arshad H., Nikooghadam M., Abbasinezhad-Mood D. Three party secure data transmission in IoT networks through design of a lightweight authenticated key agreement scheme. *Future Generation Computer Systems*, (2019), 100, 882-892
- [18] Pires F.M., Mendes L.D.S., and Quiñonez L.L., Integrated system architecture for decision-making and urban planning in smart cities. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15 (2019), n. 8, p.1550147719867829
- [19] Qian Y., Wu D., Bao W., Lorenz P. The internet of things for smart cities: Technologies and applications. *IEEE Network*, 33 (2019), n. 2, 4-5
- [20] Rahman M. A., Rashid M. M., Hossain M. S., Hassanain E., Alhamid M. F., Guizani M. Blockchain and IoT-based cognitive edge framework for sharing economy services in a smart city. *IEEE Access*, (2019), 7, 18611-18621
- [21] Rashid B., Rehmani M. H., Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey. *Journal of network and computer applications*, (2016), 60, 192-219.
- [22] Saleem Y., Crespi N., Rehmani M. H., Copeland R. Internet of things-aided Smart Grid: technologies, architectures, applications, prototypes, and future research directions. *IEEE Access*, (2019), 7, 62962-63003
- [23] Thangaramya K., Kulothungan K., Logambigai R., Selvi M., Ganapathy S., Kannan A. Energy aware cluster and neuro-fuzzy based routing algorithm for wireless sensor networks in IoT. *Computer Networks*, (2019), 151, 211-223
- [24] Yousuf O., and Mir R.N., A survey on the Internet of Things security: State-of-art, architecture, issues and countermeasures. *Information & Computer Security*, 27 (2019), n. 2, 292-323
- [25] Zhang K., Ni J., Yang K., Liang X., Ren J., Shen X. S., Security and privacy in smart city applications: Challenges and solutions. *IEEE Communications Magazine*, 55 (2019), n. 1, 122-129
- [26] Zeinolabedini M., Najafzadeh M. Comparative study of different wavelet-based neural network models to predict sewage sludge quantity in wastewater treatment plant. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191 (2019), 3, 163
- [27] Zhang F., Chang Z., Niu K., Xiong J., Jin B., Lv Q., Zhang, D. Exploring LoRa for Long-range Through-wall Sensing. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, (2020), n. 4(2), 1-27
- [28] Sikora A. Modelowanie i symulacja rozproszona mobilnych sieci ad-hoc. *Politechnika Warszawska Warszawa* (2015).
- [29] Vuran M.C., Silva A.R., *Communication Through Soil in Wireless Underground Sensor Networks – Theory and Practice* Springer, Berlin, Heidelberg, 309-347