

DEDUKCJA ZACHOWAŃ WĘZŁÓW TRANZYTOWYCH W WIELOSKOKOWEJ SIECI BEZPRZEWODOWEJ W OBECNOŚCI ZAKŁÓCEŃ

DEDUCING NODAL FORWARDING BEHAVIOR IN A MULTIHOP WIRELESS NETWORK IN THE PRESENCE OF ERRORS

Streszczenie: Przedstawiono nowy algorytm dedukcji zachowań (metryki reputacji) węzłów tranzytowych w wieloskokowej sieci bezprzewodowej na podstawie potwierdzeń końcowych. Algorytm stosuje znane metody matematyczne i jest odporny na zakłócenia naturalnie występujące w sieciach bezprzewodowych oraz intencjonalne zmiany zachowania węzłów. Informacja zwracana przez algorytm, poza wydedukowanym zachowaniem węzłów, zawiera dane o możliwym błędzie dedukcji.

Abstract: A novel algorithm is presented to deduce nodal forwarding behavior in a multihop wireless network from end-to-end acknowledgements on source-destination paths. The algorithm uses well-founded mathematical methods and is resistant to errors occurring naturally in wireless networks as well as intentional behavior changes of the nodes. The information returned by the algorithm consists of deduced behavior values (reputation metric) accompanied by the data on possible deduction error.

Słowa kluczowe: dedukcja zachowań, reputacja, błąd pomiaru, wieloskokowa sieć bezprzewodowa.

Keywords: behavior deduction, reputation, measurement error, multihop wireless network.

1. WSTĘP

Problem kooperacji między racjonalnymi agentami jest aktywną sferą badań w wielu dziedzinach nauki. Wraz ze wzrostem stopnia autonomii urządzeń sieciowych i rezygnacją z dedykowanej infrastruktury w niektórych architekturach sieciowych (np. MANET, VANET, sieci sensorowe) problem zaczął być badany się również w bezprzewodowych sieciach komputerowych z transmisją wieloskokową. Z teorii gier wynika, że sieć działająca w oparciu o tradycyjne domniemanie kooperatywnego zachowania węzłów, rozumianego tu jako gotowość węzłów tranzytowych do przekazywania pakietów danych na ścieżkach pomiędzy węzłami źródłowymi i docelowymi, będzie narażona na nadużycia ze strony racjonalnych węzłów tranzytowych [7]. Spowoduje to obniżenie jakości transmisji, tj. stosunku liczby pakietów danych dostarczonych i wysłanych na danej ścieżce (ang. *Path Delivery Ratio*, PDR). Jednym z podejść do rozwiązania tego problemu jest wyposażenie sieci w system reputacyjny, który klasyfikuje zachowa-

nia węzłów, aby następnie umożliwić eliminację węzłów zaklasyfikowanych jako niekooperatywne, bądź podejmowanie działań typu "wet za wet", które zachęcą węzły tranzytowe do zachowań kooperatywnych.

Elementem systemu reputacyjnego jest mechanizm dedukcji zachowań węzłów tranzytowych, określający ich metrykę reputacji na podstawie rozmaitych informacji dostępnych w sieci. Prezentowany dalej algorytm odnosi się właśnie do tego mechanizmu. Wyróżnikami proponowanego rozwiązania jest oparcie się wyłącznie na potwierdzeniach końcowych (ang. *end-to-end*), odporność na różnego rodzaju zakłócenia przypadkowe, oraz względnie wysoka dokładność dedukcji zachowania węzła tranzytowego, a także informacja o możliwym błędzie dedukcji pozwalająca na podjęcie trafnej decyzji co do dalszego wykorzystania otrzymanej metryki.

Dalsza część artykułu jest zorganizowana następująco: punkt 2 pokrótce opisuje ważniejsze prace dotyczące omawianej problematyki; punkt 3 opisuje model sieci, punkt 4 przedstawia algorytm dedukcji zachowań węzłów; punkt 5. opisuje eksperyment, w którym przebadano właściwości opisanego algorytmu oraz prezentuje uzyskane wyniki. Punkt 6 podsumowuje pracę i wskazuje kierunki przyszłych badań.

2. WCZEŚNIEJSZE PRACE

Najpopularniejszą metodą detekcji zachowania węzłów w wieloskokowych sieciach bezprzewodowych jest mechanizm o nazwie *watchdog* [6]. Jego działanie wymaga dookolnej charakterystyki anten radiowych w węzłach sieci. Mechanizm ten powinien być zainstalowany na każdym węźle takiej sieci, zbierać informacje o zachowaniu swoich sąsiadów a następnie rozsyłać je do innych węzłów w sieci. Koncepcja zakłada, że na przykładowej ścieżce *A-B-C*, gdzie węzeł *A* komunikuje się z *C* za pośrednictwem węzła *B*, *A* będzie w stanie „usłyszeć” czy *B* przekazał pakiet danych wysłany przez *A* do *C* i na tej podstawie ocenić zachowanie *B* co do przekazywania pakietów tranzytowych. Działanie mechanizmu *watchdog* nie uwzględnia różnic właściwości kanału radiowego oraz błędów występujących w medium transmisyjnym, które mogą znacząco wpływać na wiarygodność uzyskiwanych wyników.

Metoda *Two-ACK* [2] bazuje na modyfikacji mechanizmu potwierdzeń, które są przesyłane nie tylko pomiędzy węzłem docelowym a źródłowym, ale również między węzłami tranzytowymi, które w ten sposób identyfikują węzeł odpowiedzialny za utracone pakiety.

Powyższe i podobne metody wymagają zaufania do węzłów tranzytowych, z reguły niezainteresowanych detekcją węzłów niekooperatywnych, znacznie zwiększają narzut pakietów kontrolnych przesyłanych przez sieć oraz łamią tzw. zasadę end-to-end [4].

Dwie inne metody dedukcji zachowań węzłów tranzytowych, bazujące na znajomości PDR różnych ścieżek i węzłów tranzytowych znajdujących się na każdej z nich, zostały przedstawione w [1] i [3]. W obu tych rozwiązaniach dedukcja zachowania jest realizowana poprzez próbę izolacji pojedynczego węzła znajdującego się na wszystkich ścieżkach, na których wartości PDR są niezadowalające. Jak przyznają autorzy, mechanizmy te mogą zidentyfikować ograniczoną liczbę węzłów niekooperatywnych. W przypadku specyficznych topologii i w obecności kilku węzłów niekooperatywnych istnieje możliwość fałszywej identyfikacji węzłów niekooperatywnych.

We wcześniejszej pracy [8] przedstawiliśmy system dedukujący zachowania w oparciu o program liniowy, który z odebranych raportów o wykorzystywanych przez węzły źródłowe ścieżkach oraz ich zbiorach węzłów tranzytowych i wartościach PDR wylicza maksymalną i minimalną możliwą wartość zachowania każdego węzła tranzytowego. Maksymalny możliwy do uzyskania w ten sposób przedział jest równy [0,1], jednak wraz ze zwiększającą się liczbą raportów przedział ten jest stopniowo zawężany, aż do osiągnięcia zakresu zawierającego pojedynczą, dokładną wartość zachowania danego węzła. Na podstawie otrzymanego przedziału (na przykład jako jego punkt środkowy) wyliczana jest dedukowana wartość zachowania każdego węzła w sieci. Szerokość zwracanego przez algorytm przedziału zawiera informację o ilości zebranych danych i prawdopodobnej wielkości błędu popełnionego przez algorytm dedukcji. Wadą takiego rozwiązania jest wymóg działania sieci w warunkach bliskich idealnych: brak lub minimalna ilość strat w medium transmisyjnym, niezmiennie zachowanie węzłów tranzytowych. Gdy powyższe warunki nie są zachowane, układ szybko staje się sprzeczny i algorytm nie jest w stanie zwrócić sensownych wyników. Prezentowany w tej pracy algorytm jest w całości oparty na tym samym modelu, jednak algorytm dedukcji jest nowy i odporny na błędy, które mogą pojawić się w rzeczywistym środowisku sieciowym.

Większość z systemów detekcji klasyfikuje zidentyfikowane zachowanie węzła na kilka kategorii określających kooperatywność danego węzła, przykładowo: kooperatywny, niekooperatywny, nieokreślony. Klasyfikacja ta odbywa się z wykorzystaniem logiki rozmytej [1] lub a priori określonych progów [6]. Inne systemy [8] zwracają wartość liczbową (typowo w zakresie [0,1]) określającą zachowanie danego węzła, w postaci np. stosunku liczby pakietów przesłanych dalej do liczby pakietów zaoferowanych przez węzeł źródłowy. Wynikiem działania tych algorytmów jest typowo pojedyncza

wartość, określająca wyliczone zachowanie danego węzła bez określenia błędu zwróconego wyniku.

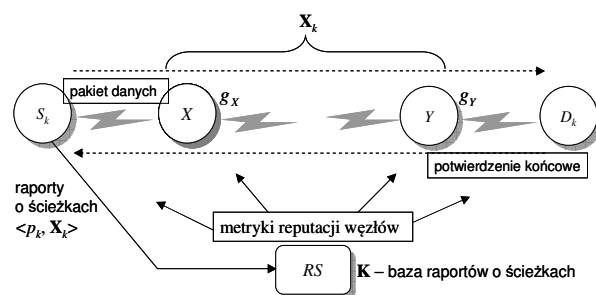
3. MODEL SIECI

Prezentowane rozwiązanie opiera się na otrzymanych od węzłów źródłowych raportach o ścieżkach, i zbiorach węzłów tranzytowych, jakie zawierają, oraz odpowiednich wartościach PDR. Niech N będzie zbiorem wszystkich węzłów w sieci. Wartość PDR na ścieżce k zawierającej zbiór węzłów tranzytowych $X_k \subseteq N$ oznaczana p_k , jest równa iloczynowi zachowań g_x węzłów tranzytowych $X \in X_k$, gdy ścieżka zawiera przynajmniej jeden węzeł tranzytowy, bądź 1 w przeciwnym razie:

$$p_k = \begin{cases} \prod_{x \in X_k} g_x, & X_k \neq \emptyset, \\ 1, & X_k = \emptyset. \end{cases} \quad (1)$$

Model (1) nie uwzględnia jawnie różnych zjawisk w rzeczywistych sieciach (np. błędy transmisji, przepełnienia buforów, zagubienia potwierdzeń), które obok zachowań węzłów wpływają na obserwowane PDR, traktując je jako błędy pomiarowe. Zakłada się, że w dobrze zaprojektowanej i pracującej w normalnych warunkach ruchowych sieci błędy takie nie są znaczące. Modele podobne do (1) są stosowane w literaturze [7].

Jeden z węzłów w sieci, nazywany *serwerem reputacji* (ang. *Reputation Server*, RS), nie uczestniczy w przesyłaniu pakietów danych ani nie uczestniczy w ścieżkach jako węzeł tranzytowy. RS zbiera raporty od węzłów źródłowych na temat wykorzystywanych przez nie ścieżek, odpowiednich zbiorach węzłów tranzytowych i zaobserwowanych wartościach PDR. Po każdym odebraniu raportu RS dedukuje na nowo zachowania węzłów tranzytowych i rozsyła zaktualizowane informacje o zachowaniu węzłów do wszystkich węzłów w sieci. Wartość PDR, p_k , jest wyliczana przez węzeł źródłowy S_k na podstawie liczby wysłanych pakietów danych oraz liczby potwierdzeń end-to-end otrzymanych od węzła docelowego D_k . Model ścieżki k oraz działanie RS przedstawia Rys. 1.



Rys. 1. Model ścieżki k oraz działanie RS

Prezentowany model zakłada istnienie centralnego węzła dedykowanego do dedukcji zachowań, tj. implementującego funkcjonalność RS, co nie harmonizuje z koncepcją sieci ad hoc. Rozwiązanie to zostało przyjęte dla uproszczenia prezentacji, a jego wariant rozproszony z wieloma RS można zaimplementować podobnie, co wprowadza dodatkowe błędy (w tym niespójności raportów w różnych RS), które tutaj zostały pominięte.

4. ALGORYTM DEDUKCJI ZACHOWAŃ

Na podstawie odebranych raportów RS tworzy układ równań w oparciu o model (1). Rozpatrzmy przykładową ścieżkę k złożoną z węzłów tranzytowych X, Y i Z , tj. $\mathbf{X}_k = \{X, Y, Z\}$. Równanie stworzone na jej podstawie przyjmie postać $g_x g_y g_z = p_k$. Kolejne otrzymywane przez RS raporty o wykorzystywanych ścieżkach skutkują tworzeniem kolejnych równań w oparciu o tę samą zasadę, co prowadzi do pewnego układu równań nieliniowych. Można z niego uzyskać układ równań liniowych stosując przekształcenie logarytmiczne; równanie dla naszej przykładowej ścieżki przybierze postać $\log_b(g_x) + \log_b(g_y) + \log_b(g_z) = \log_b(p_k)$, gdzie $b > 1$ jest dowolną podstawą logarytmu.

Utworzony w ten sposób układ równań jest najczęściej sprzeczny z uwagi na wyżej wspomniane błędy obserwacji wartości PDR, powodujące, że wartości te są realizacjami zmiennych losowych. Stosując metodę najmniejszych kwadratów poszukujemy

$$\min \|A\tilde{\mathbf{g}} - \tilde{\mathbf{p}}\|^2 \quad (2)$$

przy ograniczeniach $g_Y \in [0,1], Y \in \mathbf{N}$,

gdzie $\|\cdot\|$ oznacza normę euklidesową, A jest macierzą incydencji węzeł-ścieżka $|\mathbf{N}| \times |\mathbf{K}|$, przy czym \mathbf{K} – zbiór wszystkich dotąd zaraportowanych ścieżek, $\tilde{\mathbf{g}} = (-\log_b(g_Y), Y \in \mathbf{N})$, zaś $\tilde{\mathbf{p}} = (-\log_b(p_k), k \in \mathbf{K})$ jest wektorem przekształconych wartości PDR wszystkich ścieżek. Rozwiązanie problemu (2) ma postać

$$\tilde{\mathbf{g}}^* = (A^T A)^{-1} A^T \tilde{\mathbf{p}} \quad (3)$$

gdzie A^T – macierz transponowana A , zaś A^{-1} – macierz odwrotna A . By otrzymać wydedukowane zachowania węzłów (tj. metrykę reputacji) należy odwrócić przekształcenie logarytmiczne: $r_x = \exp_b(-\tilde{g}_x^*)$.

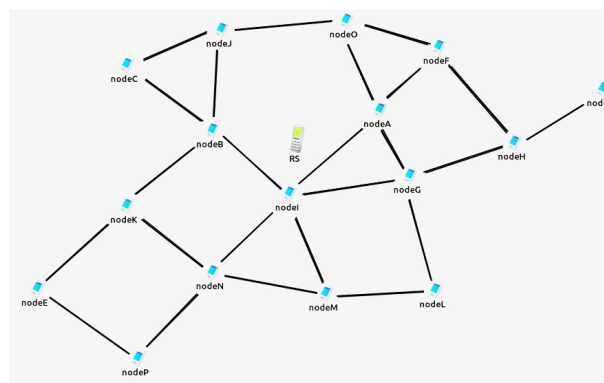
Powyższy algorytm zwraca wydedukowaną wartość zachowania dla każdego z węzłów w sieci (metrykę reputacji) bez odniesienia do jej dokładności, tj. potencjalnego błędu. Pewne przybliżenie tej informacji, z zasady sobie nieznanej, RS może uzyskać podstawiając do (1) wyliczone wartości r_x zamiast g_x i porównując tak otrzymane wartości p_k' z wartościami PDR, p_k , raportowanymi przez węzły źródłowe. W wynikach prezentowanych w punkcie 5 dla każdego węzła X przeprowadzono takie porównanie dla wszystkich $k \in \mathbf{K}_X$, gdzie $\mathbf{K}_X \subseteq \mathbf{K}$ jest zbiorem ścieżek zawierających X jako węzeł tranzytowy. Za potencjalny błąd przyjęto maksymalną wartość bezwzględną różnicy $p_k' - p_k$ na wszystkich raportowanych ścieżkach k zawierających X . By uniknąć sztucznego zaniżania błędu, przyjmuje się, że wynosi on 1 (największa możliwa wartość), gdy $|\mathbf{K}_X| \leq 2$.

Rozmiar $|\mathbf{K}|$ tworzonego układu równań rośnie szybko w miarę upływu czasu i raportowania kolejnych ścieżek, co zwiększa koszt dedukcji zachowań oraz ilość potrzebnej pamięci w RS. Zauważono również niską odporność takiego systemu na intencjonalne zmiany zachowania przez węzły. W celu rozwiązania tych problemów wprowadzono arbitralne ograniczenie liczby

ścieżek wykorzystywanych do dedukcji metryki reputacji węzłów tranzytowych. Nie znaleziono uniwersalnej zasady pozwalającej a priori określić optymalny rozmiar $|\mathbf{K}|$, tak by zapewnić jednocześnie satysfakcjonującą jakość wyników oraz szybkie dopasowywanie się algorytmu do zmian środowiska. Z dotychczasowych eksperymentów wynika, że na każdy węzeł w sieci powinno przypadać kilka-kilkanaście raportów o ścieżkach.

5. WALIDACJA ALGORYTMU

Zaprezentowany algorytm zaimplementowano i przetestowano w 16-węzłowej sieci MANET symulowanej w środowisku OMNET++ [5]. Użyto topologii przedstawionej na Rys. 2, przy czym pary węzłów źródłowych i docelowych dobierano losowo. Liczba ścieżek aktywnych w całej sieci nie była w żadnym momencie większa od 3. Uzyskano raporty z 1092 ścieżek z przynajmniej jednym węzłem tranzytowym, stanowiące dane wejściowe dla RS.



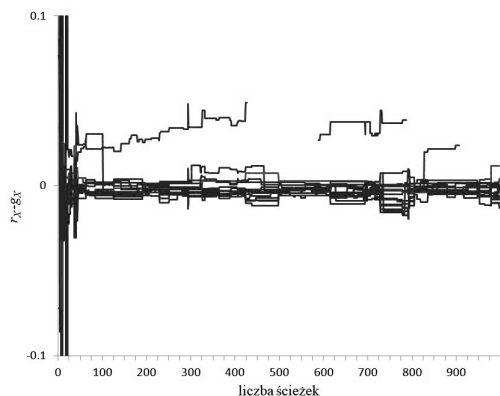
Rys. 2. Topologia sieci wykorzystana w symulacji. Wykorzystywane łącza zaznaczono czarnymi liniami.??

Tab. 1. Wybrane charakterystyki modelu symulacyjnego

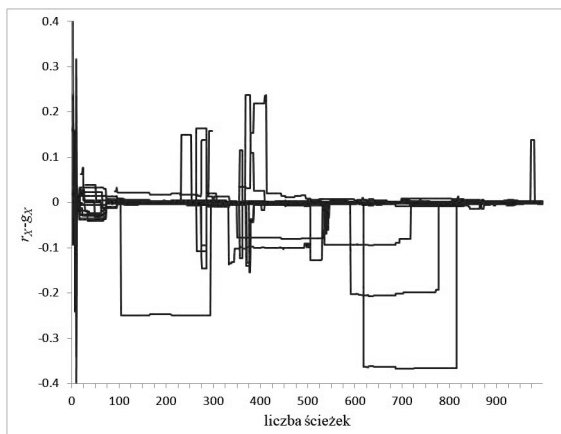
Charakterystyka	Opis
Antena	dookolna
Moc nadawcza	1 mW
Czułość odbiornika	-90 dBm
Model błędów	Ieee80211BerTableErrorMode lper_table_80211g_Trivellato. dat [5]
Protokół MAC	802.11g (54 Mbps)
MAC ACK	wyłączone
Protokół transportowy	TCP (DumbTCP) [5]
Protokół routingu	Dynamic Source Routing
Liczba jednocześnie aktywnych ścieżek	1..3

Przeprowadzono dwa pełne przebiegi symulacji o zbliżonych parametrach natężenia ruchu pakietów. Przez cały czas trwania tych przebiegów zachowania wszystkich węzłów znajdowały się w przedziale $[0,5, 1]$. Zaobserwowano niewielkie odchylenia raportowanych wartości PDR od modelu (1) (maksymalnie 0,082, średnio 0,014, odchylenie standardowe $\approx 0,015$). W pierwszym przebiegu zachowania węzłów były niezmiennie w czasie, w drugim wystąpiło łącznie 13 losowych intencjonalnych zmian zachowania niektórych węzłów.

Rys. 3 przedstawia różnice między wydedukowanymi zachowaniami r_X (metryką reputacji) a rzeczywistymi zachowaniami g_X dla każdego węzła X w zależności od bieżącej liczby raportowanych ścieżek, bez zmian zachowania węzłów. Rys. 4 przedstawia analogiczne różnice przy intencjonalnych zmianach zachowań węzłów. Widoczny jest efekt samostabilizacji: znaczące różnice występują jedynie dla węzłów, które zmieniły zachowanie, i utrzymują się jedynie przez pewien czas od zmiany zachowania. Skrócenie tego czasu wymaga ulepszenia algorytmu, co zostanie podjęte w przyszłych badaniach.



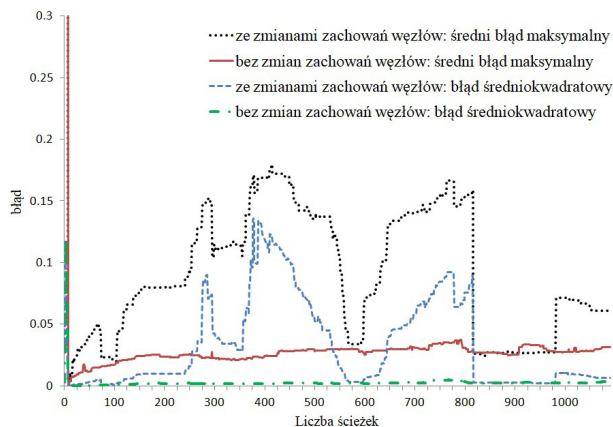
Rys. 3. Różnice $r_X - g_X$ dla każdego z 15 węzłów sieci; przebieg symulacyjny bez zmian zachowań węzłów



Rys. 4. Różnice $r_X - g_X$ dla każdego z 15 węzłów sieci; przebieg symulacyjny ze zmianami zachowań węzłów

Rys. 5 przedstawia maksymalny błąd $|p_k' - p_k|$ dla $k \in \mathbf{K}_X$, uśredniony po wszystkich węzłach X zarówno dla przebiegu symulacyjnego ze stałym jak i zmiennym zachowaniem węzłów. Wartości nieprzekraczające 0,2 świadczą o niewielkich różnicach $g_X - r_X$ (których prawdziwe wartości są nieznane dla RS); ma to miejsce szczególnie w przypadku stałych zachowań węzłów. Dla porównania przedstawiono także błąd średniokwadratowy $\|\tilde{A}\tilde{g}^* - \tilde{p}\|^2$, gdzie \tilde{g}^* dane jest wzorem (3). Widać, że błąd ten niedoszacowuje rozbieżności pomiędzy wydedukowanymi i rzeczywistymi zachowaniami węzłów.

Zaprezentowane wyniki demonstrują zdolność przedstawionego algorytmu do stosunkowo dokładnej dedukcji zachowań (metryki reputacji) węzłów tranzytowych w wieloskokowych sieciach bezprzewodowych mimo błędów i zakłóceń obserwacji PDR.



Rys. 5. Średni maksymalny błąd dedukcji dla wszystkich węzłów w sieci

6. PODSUMOWANIE

Zaprezentowano zastosowanie algorytmu najmniejszych kwadratów do dedukcji zachowań (metryki reputacji) węzłów tranzytowych na podstawie potwierżeń end-to-end w wieloskokowej sieci bezprzewodowej w obecności błędów obserwacji wartości PDR. Poza algorytmem dedukcji naszkicowano podejście pozwalające oszacować wysokość błędu dedukcji zachowań, co umożliwia ocenę przydatności zwracanych przez algorytm danych oraz ryzyka popełnienia błędu.

Opracowanie i implementacja zdecentralizowanej wersji systemu będzie celem przyszłych badań.

PODZIĘKOWANIE

Praca sfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki (umowa UMO-2016/21/B/ST6/03146).

LITERATURA

- [1] Tan, Shuaishuai, Li, Xiaoping, Dong, Qingkuan. 2016. „A Trust Management System for Securing Data Plane of Ad-Hoc Networks”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 9, s. 7579 – 7592.
- [2] Gopalakrishnan, Kaliaperumal, Uthariaraj, V. Rhymend. 2011. „Acknowledgment based Reputation Mechanism to Mitigate the Node Misbehavior in Mobile Ad Hoc Networks”, Journal of Computer Science 7 (8): s. 1157-1166.
- [3] Sivanantham, S. Kirankumar, K. Akshaya, V. 2013. „Detection and Avoidance of Intrusion, Packet Drop and Modification in WSN”, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, Vol. 2, Issue 11.
- [4] Saltzer, Jerome H. Reed, David P. Clark, David D. 1981. „End-to-End Arguments in System Design”. Proc. of the Second International Conference on Distributed Computing Systems. April 8–10, 1981. IEEE Computer Society, s. 509-512.
- [5] OpenSim.Ltd, Omnet++, wersja 5.0.0, wraz z pakietem INET, wersja 3.4.0, <https://omnetpp.org/>
- [6] Buchegger, Sonja, Le Boudec, Jean-Yves. „Performance analysis of the CONFIDANT protocol”. 2002. Proc. 3rd ACM Int. Symp. Mobile Ad Hoc Netw. Comput. s. 226-236.
- [7] Liu, K. J. Ray, Wang, Beibei. 2010. „Repeated games and learning for packet forwarding”, [w] Cognitive Radio Networking and Security A Game-Theoretic View, Cambridge University Press, s. 270-296.
- [8] Konorski, J. Rydzewski, K. 2015. „System reputacyjny z centralnym agentem i metrykami zaufania opartymi na poziomie świadczonych usług sieciowych”. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne. nr 8-9, s. 1-5.

