



Organizacja domen rutingowych w taktycznych sieciach łączności

EMIL KUBERA¹, MAREK AMANOWICZ^{2,3}

¹Wojskowy Instytut Łączności, Zakład Systemów Łączności, 05-130 Zegrze, ul. Warszawska 22 A

²Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

³Wojskowy Instytut Łączności, Zakład Systemów C4I, 05-130 Zegrze, ul. Warszawska 22 A

Streszczenie. W artykule omówiono metodę organizacji domen rutingowych zapewniającą ograniczenie ilości informacji służbowych przekazywanych w narodowym komponencie taktycznej sieci łączności oraz akceptowalny czas zbieżności algorytmu marszrutyzacji. Skupiono się na przedstawieniu procedur podziału systemu na domeny rutingowe, reguły doboru węzłów do poszczególnych domen oraz procedury wyboru lidera domeny rutingowej. Artykuł zawiera także opis badania symulacyjnego oraz prezentuje wyniki eksperymentów, które w pełni potwierdziły skuteczność rozwiązania zaproponowanego przez autorów. Opracowana metoda może być z powodzeniem wykorzystywana w procesie planowania taktycznych sieci łączności.

Słowa kluczowe: mobilne sieci taktyczne, ruting dynamiczny, protokół PNNI, TACOMS Post 2000, symulacja komputerowa

1. Wprowadzenie

Zgodnie z zasadami standaryzacji systemów określonymi w ramach projektu TACOMS Post 2000 (TP2K) [7] taktyczną sieć łączności tworzą narodowe komponenty wykorzystujące własne rozwiązania, właściwe dla stosowanych w nich technik sieciowych. Zakłada się, że mechanizmy rutingu wykorzystywane w takim heterogenicznym środowisku powinny zapewnić realizację usług z gwarantowaną jakością w całym łańcuchu telekomunikacyjnym. W tym celu wykorzystywany jest zdefiniowany w [7] ruting międzydomenowy, realizowany pomiędzy punktami brzegowymi komponentów narodowych (tzw. punktami interoperacyjności), który

nie ingeruje w sposób realizacji funkcji marszrutyzacji wewnątrz sieci narodowych. Z kolei sposób realizacji routingu wewnątrzdomenowego (realizowanego w obrębie narodowego komponentu sieci taktycznej) jest uzależniony od stosowanej techniki sieciowej. Powinien on spełniać wymagania wynikające z mobilności elementów systemu, niezawodności oraz uwzględniać istotne ograniczenia w jakości i przepustowości taktycznych łączy radiowych, a także zapewniać współpracę z mechanizmami routingu międzydomenowego.

Zaprezentowane w artykule zasady organizacji domen routingowych zostały opracowane dla taktycznego systemu łączności [3], wykorzystującego w sieci szkieletowej protokół routingu dynamicznego PNNI (*Private Network-Network Interface*) [2]. Protokół ten zapewnia skalowalność systemu (podział na domeny routingowe oraz poziomy hierarchii), a także umożliwia wsparcie gwarantowania jakości usług [4, 5]. Wiadomości routingowe protokołu PNNI są wymieniane poprzez dedykowany kanał wirtualny (o zdefiniowanym kontrakcie ruchowym), co umożliwiło prowadzenie analiz oraz realizację badań przy założeniu obciążenia systemu wyłącznie ruchem routingowym.

2. Zasady organizacji domen routingowych

2.1. Zasady podziału systemu na domeny routingowe

W celu opracowania propozycji podziału systemu na domeny routingowe, konieczne było określenie ilości informacji routingowych wymienianych w taktycznej sieci łączności oraz wyznaczenie maksymalnej liczby węzłów w domenie. Założono, że przekroczenie maksymalnej liczby węzłów w sieci jednodomenowej lub w domenie sieci hierarchicznej jest jednoznaczne z koniecznością dokonania nowej organizacji routingu — przeprowadzenia nowego podziału na domeny.

Do wyznaczenia obciążenia taktycznej sieci łączności informacjami routingowymi niezbędna była analiza zawartości oraz rozmiarów poszczególnych wiadomości routingowych protokołu PNNI [2], a także zasad ich przesyłania w sieci łączności [1].

Ilość informacji routingowych obciążających sieć łączności wynika z rozmiarów oraz liczby wiadomości routingowych przekazywanych w okresie tworzenia baz danych o topologii sieci. W protokole PNNI ilość przesyłanych informacji jest sumą danych przekazywanych w pięciu pakietach routingowych, tj.:

$$I = \sum_{k=1}^5 R_k \cdot L_k, \quad (1)$$

gdzie: I — obciążenie sieci ruchem routingowym [B];

R_k — rozmiar przesyłanych pakietów [B];

L_k — liczba przesyłanych pakietów;
 k — rodzaj wiadomości rutingowej.

Wyznaczenie obciążenia sieci ruchem rutingowym zostało przeprowadzone w trzech etapach. W pierwszej kolejności, bazując na specyfikacji protokołu PNNI [2], określono rozmiary poszczególnych wiadomości rutingowych przekazywanych w procesie tworzenia baz danych o topologii sieci. Następnie wyznaczono liczbę pakietów rutingowych przekazywanych w procesie osiągnięcia wspólnego obrazu sieci. Ostatecznie ustalono, że wielkość obciążenia sieci ruchem rutingowym można wyznaczyć z zależności:

$$I = \sum_{k=1}^5 R_k \cdot L_k \cong R_2 \cdot L_2 = R_2 \cdot N^2, \quad (2)$$

gdzie: R_2 — rozmiar pakietów wiadomości PTSE (*PNNI Topology State Elements*);
 L_2 — liczba pakietów wiadomości PTSE;
 N — liczba węzłów sieci.

Założono, że wielkość maksymalnego obciążenia ruchem rutingowym generowanym z portu wyjściowego węzła nie powinna przekraczać wartości wynikającej z przyjętego kontraktu ruchowego dla danego kanału wirtualnego dedykowanego do przekazu wiadomości rutingowych. Przyjmując szczytową szybkość generacji komórek (*Peak Cell Rate*) równą 384 kbit/s, chwilowe obciążenie portu nie powinno przekraczać 48 kB. Zatem:

$$I_T = \frac{I}{T} = \frac{R_2 \cdot N^2}{1,5 \cdot N} \leq 48 \text{ kB}, \quad (3)$$

gdzie: I_T — obciążenie linii łączności związane z wymianą wiadomości rutingowych;
 T — liczba linii łączności w systemie.

Stąd, przyjmując zgodnie z [1] rozmiar pakietów wiadomości PTSE $R_2 = 3 \text{ kB}$, liczba węzłów domeny rutingowej powinna spełniać zależność $N_{\max} \leq 24$. Uwzględniając powyższe, sieci taktyczne o rozmiarze przekraczającym 24 węzły należy konfigurować jako wielodomenowe sieci hierarchiczne.

2.2. Zasady doboru węzłów do domen rutingowych

Dobór węzłów do poszczególnych domen rutingowych powinien być realizowany ze względu na efektywność wykorzystania zasobów taktycznej sieci łączności. W związku z powyższym przyjęto, że selekcja węzłów będzie prowadzona z punktu widzenia minimalizacji ilości informacji rutingowych obciążających zasoby systemu.

Rozważono trzy reguły doboru węzłów do domen rutingowych, tj.:

- powiązań organizacyjnych (wynikających ze struktury ugrupowania);
- powiązań informacyjnych (uwzględniających prawdopodobieństwo komunikacji węzłów);
- powiązań topologicznych (odległość między węzłami w domenie).

Metoda powiązań organizacyjnych, pomimo intuicyjności przydziału węzłów do domen, jest metodą mało elastyczną, szczególnie z punktu widzenia nowych trendów prowadzenia operacji (rozproszenie organizacyjne, tworzenie ugrupowań o charakterze tymczasowym — na potrzeby realizacji konkretnego zadania, misji).

Z kolei metoda powiązań informacyjnych nie sprawdza się w sytuacji, w której elementy danej grupy zainteresowań są rozrzucone w terenie i nie znajdują się w bezpośredniej lokalizacji (mogą być osiągnane przez wiele skoków) — następuje znaczne obciążenie elementów pośrednich poprzez wymieniane wiadomości rutingowe. Kolejną niedogodnością stosowania metody powiązań informacyjnych jest ich zmienność w trakcie prowadzonej operacji, co może prowadzić do sytuacji, w której skład domen byłby dość przypadkowy.

W [1] wykazano, że najlepsze wyniki uzyskuje się przy podziale na domeny uwzględniającym kryterium powiązań topologicznych. W takim przypadku przydział węzłów do domeny bazuje na wyznaczaniu najkrótszych ścieżek od zdefiniowanego punktu wyjściowego do pozostałych węzłów, czyli ścieżek zawierających najmniejszą liczbę krawędzi grafu.

Podstawowym kryterium zastosowanym w opracowanym algorytmie doboru węzłów jest minimalizacja liczby krawędzi w każdej z konstruowanych domen rutingowych. Istota procedury konstrukcji domen rutingowych polega na dodawaniu do węzła „centralnego” (węzła o najwyższym stopniu, tj. posiadającego największą liczbę incydentnych krawędzi) węzłów oddalonych od niego odpowiednio o 1, 2, 3... krawędzie, aż do momentu uzyskania dopuszczalnej liczby węzłów w domenie L_{wD} zgodnie z zależnością:

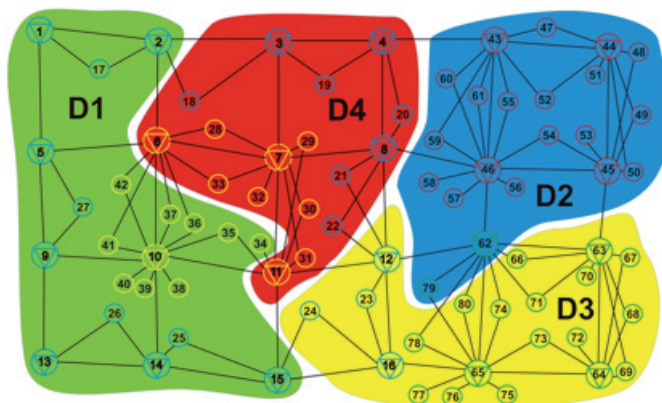
$$L_{wD} = \left[\frac{L_w}{L_D} \right], \quad (4)$$

przy czym: $L_D = \left[\frac{L_w}{N_{\max}} \right]$.

Jeżeli po przeprowadzeniu podstawowych operacji pozostaną węzły nieprzydzielone do żadnej z domen, następuje ich przydział do domen, których są sąsiadami lub w oparciu o kryterium najmniejszej odległości do wyznaczonych węzłów centralnych. Szczegółowy algorytm doboru węzłów wspierający konstrukcję domen rutingowych można znaleźć w [1].

Konstrukcja domen rutingowych przy wykorzystaniu opracowanego algorytmu umożliwia uzyskanie jednoznacznego podziału taktycznej sieci łączności na domeny przy zachowaniu założonych powiązań topologicznych. Przykład

podziału sieci taktycznej na domeny routingowe w oparciu o przedstawioną regułę zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Efekt podziału sieci na domeny na podstawie opracowanego algorytmu

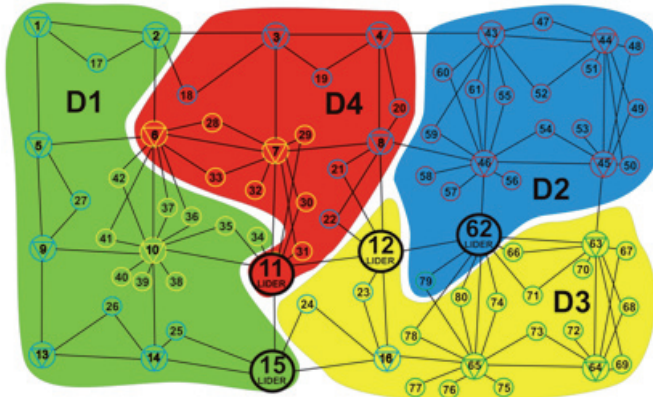
2.3. Zasady wyboru liderów domen routingowych

W każdej ze zdefiniowanych domen routingowych konieczne jest określenie, który z węzłów będzie pełnił rolę lidera, czyli węzła widzianego przez pozostałych liderów na wyższym poziomie hierarchii i umożliwiającego realizację współpracy z elementami należącymi do innych domen routingowych [2]. Autorzy zaproponowali sposób wyboru węzła, któremu należy na etapie konfiguracji systemu nadać odpowiedni priorytet *PGLP* (*Peer Group Leader Priority*), aby w procesie elekcji został liderem danej domeny.

Kryteria wyboru węzłów pełniących funkcje liderów poszczególnych domen powinny umożliwić selekcję takich węzłów, które przejmując funkcje lidera, zapewnią optymalizację funkcjonowania całego systemu taktycznego (z punktu widzenia dodatkowego ograniczenia ruchu routingowego). Przyjęto następujące kryterium wyboru liderów: rolę liderów powinny pełnić węzły brzegowe (posiadające bezpośrednie połączenie z sąsiednią domeną), dla których suma odległości pomiędzy nimi jest minimalna.

Istota opracowanego algorytmu wyboru liderów polega na wyznaczeniu węzłów brzegowych dla poszczególnych domen, a następnie na wyznaczeniu najkrótszych ścieżek od każdego węzła brzegowego danej domeny do węzłów brzegowych pozostałych domen, obliczeniu sumy ich odległości i wskazaniu na odległość minimalną. Liderem zostaje węzeł posiadający minimalną sumę odległości, a gdy kilka węzłów posiada taką samą odległość minimalną, liderem zostaje węzeł posiadający wyższy stopień.

Opracowany algorytm wyboru liderów został szczegółowo omówiony w [1]. Przykład zastosowania algorytmu wyboru liderów w oparciu o przedstawioną regułę zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Efekt zastosowania algorytmu wyboru liderów domen rutingowych

3. Badania symulacyjne

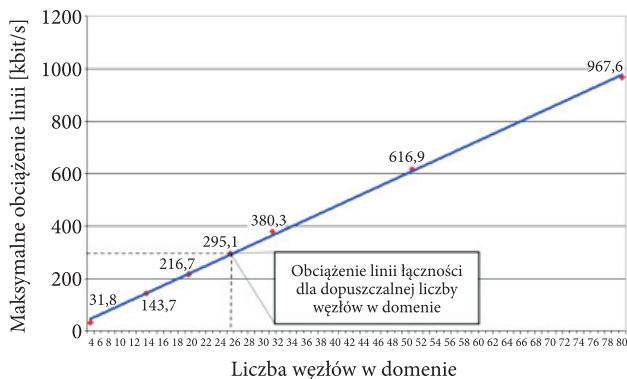
Przedstawiony w artykule sposób organizacji domen rutingowych w taktycznych sieciach łączności został zweryfikowany przy wykorzystaniu symulacji komputerowej. Do realizacji badań zastosowano program OPNET (wersja 12.0) [8], wyposażony w moduł dodatkowy PNNI (zbudowany zgodnie z rekomendacją [2]).

Jako główne założenia do badań symulacyjnych przyjęto, że obciążenie systemu będzie wynikało wyłącznie z ruchu rutingowego związanego z wymianą informacji o topologii sieci (ruch o wysokim priorytecie przekazywany w wydzielonym kanale wirtualnym [6]) oraz że parametry modeli niezwiązane bezpośrednio z protokołem rutingowym będą posiadały wartości zgodne ze standardem [2].

Celem badań symulacyjnych było określenie skuteczność opracowanej organizacji domen przy wykorzystaniu zdefiniowanych metryk i zaproponowanych charakterystyk wyjściowych. Uzyskiwane wyniki porównywano z rezultatami otrzymanymi dla innych propozycji organizacji domen rutingowych.

3.1. Wpływ rozmiaru domen rutingowych na parametry sieci

Dla oceny wpływu rozmiaru domen rutingowych na parametry sieci przeprowadzono eksperymenty symulacyjne dla zmiennej liczby węzłów w zakresie od 4 do 80 (szczegóły w [1]). Wyznaczaną charakterystyką sieci było obciążenie kanału wirtualnego dedykowanego do przekazywania wiadomości rutingowych (rys. 3).

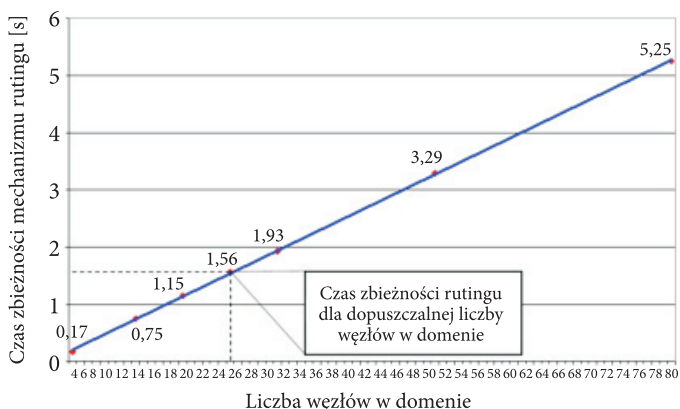


Rys. 3. Maksymalne obciążenie linii łączności w funkcji liczby węzłów w domenie

Maksymalne obciążenie linii łączności wynikające z przekazywania wiadomości routingowych rośnie liniowo przy zwiększaniu liczby węzłów w domenie (rys. 3). Dla wyznaczonej maksymalnej liczby węzłów w domenie uzyskane obciążenie linii jest na poziomie poniżej wartości szczytowej szybkości transmisji (PCR) kanału wirtualnego przeznaczonego dla wiadomości routingowych. Jest to zgodne z przytoczonymi wcześniej założeniami poczynionymi w procesie wyznaczania maksymalnej liczby węzłów w domenie. Wraz ze wzrostem liczby węzłów w domenie, obciążenie linii zaczyna przekraczać wartość dopuszczalną i wykorzystuje do przekazu wiadomości routingowych zasoby łącza przeznaczone do wymiany danych.

Przeprowadzono także badania związane z określeniem czasu zbieżności oraz globalnego obciążenia sieci łączności o założonych wcześniej strukturach.

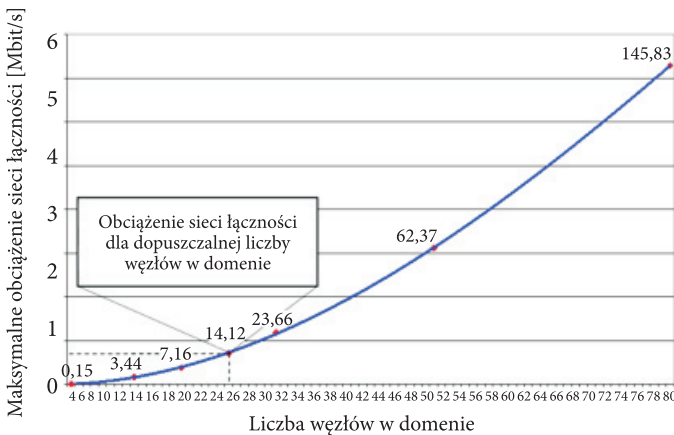
Na rysunku 4 zaprezentowano wykres obrazujący czas zbieżności mechanizmu routingowego w funkcji liczby węzłów w domenie routingowej.



Rys. 4. Czas zbieżności mechanizmu routingowego w funkcji liczby węzłów w domenie

Czas zbieżności mechanizmu routingu rośnie liniowo przy zwiększaniu liczby węzłów w domenie — każdy dodany węzeł wymaga uwzględnienia go w procesie wymiany wiadomości routingowych i wydłuża w ten sposób czas konieczny do uaktualnienia wszystkich baz danych routingu (rys. 4). Dla maksymalnej liczby węzłów w domenie uzyskany czas zbieżności wyniósł 1,56 sekundy, co można uznać za wartość akceptowalną z punktu widzenia funkcjonowania taktycznego systemu łączności.

Na rysunku 5 przedstawiono wykres obrazujący obciążenie sieci łączności wiadomościami routingowymi w funkcji liczby węzłów w domenie. Wykres przedstawia wartości maksymalnego obciążenia sieci wiadomościami routingowymi w momencie inicjowania jej pracy (jest to obciążenie wynikające z wymiany pakietów *PTSE*) — obciążenie uzyskiwane podczas cyklicznego odświeżania baz danych jest na zbliżonym poziomie.



Rys. 5. Obciążenie sieci informacjami routingowymi w funkcji liczby węzłów w domenie

Obciążenie systemu rośnie nieliniowo (funkcja kwadratowa) przy zwiększaniu liczby węzłów w domenie — zgodnie z (2) obciążenie jest funkcją kwadratu liczby węzłów w domenie (rys. 5). Dla maksymalnej liczby węzłów w domenie uzyskane obciążenie wynosi 14 Mbit (zbliżoną wartość uzyskuje się, stosując (2) dla topologii o rozmiarze 24 węzłów).

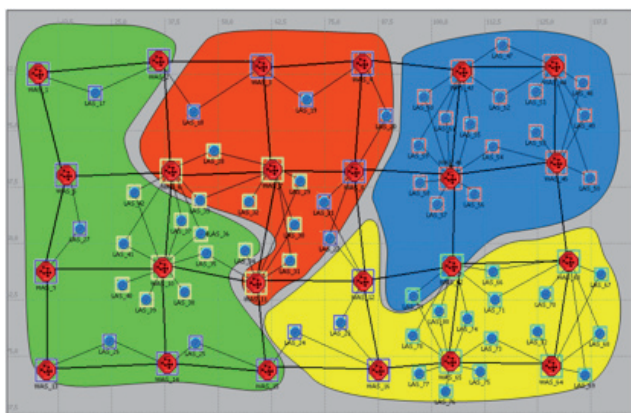
Zaprezentowane wyniki badań potwierdzają, że stosowanie się do wytycznych związanych z maksymalną liczbą węzłów w domenie gwarantuje obciążenie elementów systemu na akceptowalnym poziomie, bez przekraczania wartości zdefiniowanych kontraktów ruchowych. Wskazują także na konieczność stosowania struktur hierarchicznych dla taktycznych sieci łączności o rozmiarach kilkudziesięciu węzłów.

3.2. Wpływ zastosowania reguły doboru węzłów na parametry sieci

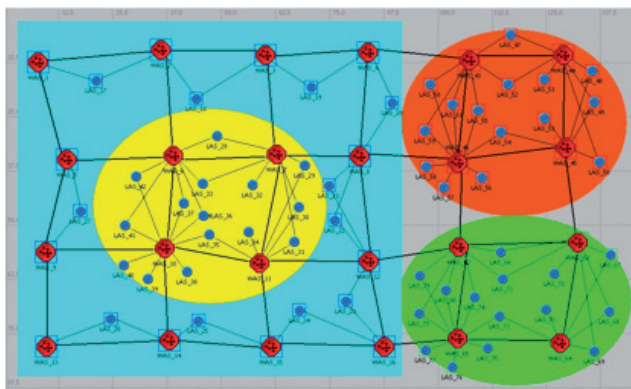
Dla oceny wpływu opracowanej reguły konstrukcji domen na parametry sieci określono czas zbieżności mechanizmu routingu oraz obciążenie wiadomościami routingowymi sieci łączności zorganizowanej zgodnie z opracowanym podziałem na domeny i porównano uzyskane wyniki z rezultatami testów sieci skonstruowanych bez uwzględnienia opracowanego algorytmu konstrukcji domen. We wszystkich modelach zastosowano opracowany algorytm wyboru liderów.

W tym celu zrealizowano trzy eksperymenty symulacyjne, w których dobór węzłów do domen następował przy uwzględnieniu:

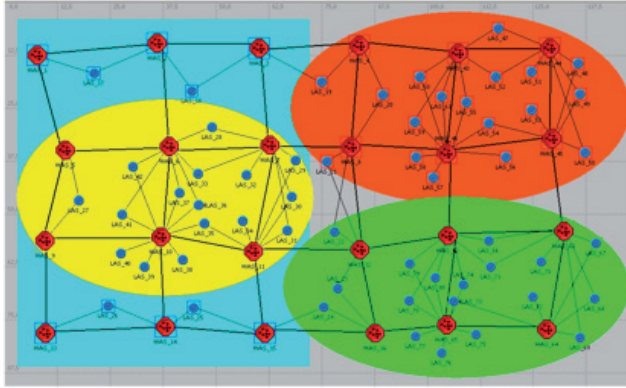
- eksperyment 1 — opracowanego algorytmu (rys. 6),
- eksperyment 2 — powiązań organizacyjnych (rys. 7),
- eksperyment 3 — powiązań informacyjnych (rys. 8).



Rys. 6. Model symulacyjny podziału na domeny — opracowany algorytm



Rys. 7. Model symulacyjny podziału na domeny — powiązania organizacyjne

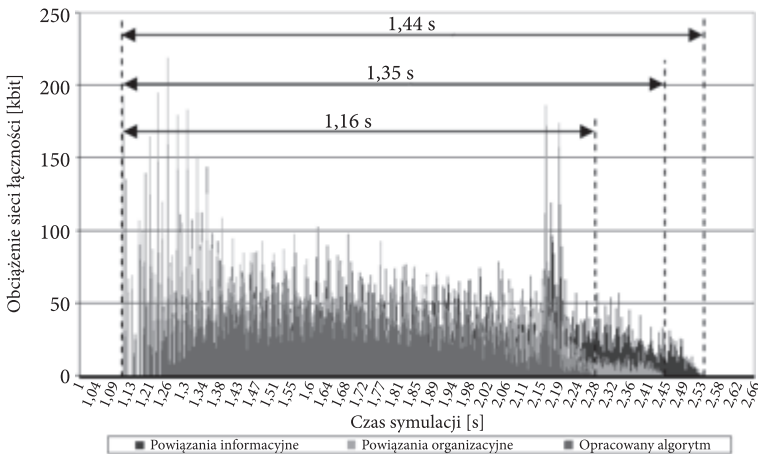


Rys. 8. Model symulacyjny podziału na domeny — powiązania informacyjne

Szczegóły związane z efektem zastosowania poszczególnych metod doboru węzłów oraz konstrukcją modeli symulacyjnych reprezentujących dany sposób tworzenia domen rutingu zostały przedstawione w [1]. Znajdują się tam także wyniki uzyskane dla poszczególnych modeli, ich analiza oraz wnioski.

W artykule skupiono się wyłącznie na porównaniu wyników uzyskanych dla poszczególnych wariantów organizacji domen.

Na rysunku 9 przedstawiono porównanie czasu zbieżności mechanizmu rutingu uzyskanego podczas badań poszczególnych modeli.

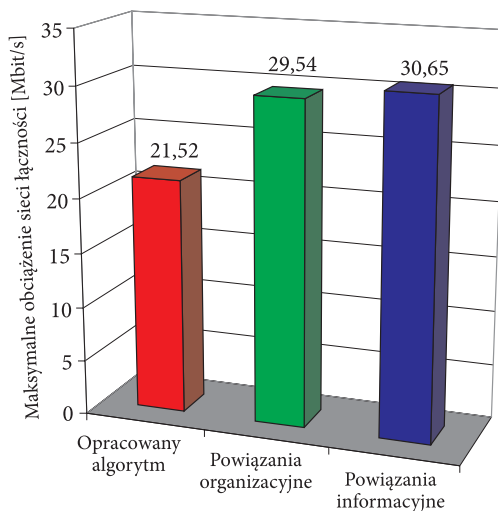


Rys. 9. Porównanie czasu zbieżności przy zastosowanych sposobach konstrukcji domen

Czasy zbieżności otrzymane podczas konstrukcji domen rutingu z wykorzystaniem powiązań organizacyjnych oraz powiązań informacyjnych są

dłuższe (odpowiednio o 16% oraz o 24%) od czasu zbieżności uzyskanego podczas badań modelu powstałego w oparciu o przedstawiony algorytm (rys. 9).

Na rysunku 10 zobrazowano porównanie maksymalnego chwilowego obciążenia sieci w momencie inicjowania jej pracy, uzyskanego podczas badań poszczególnych modeli organizacji domen.

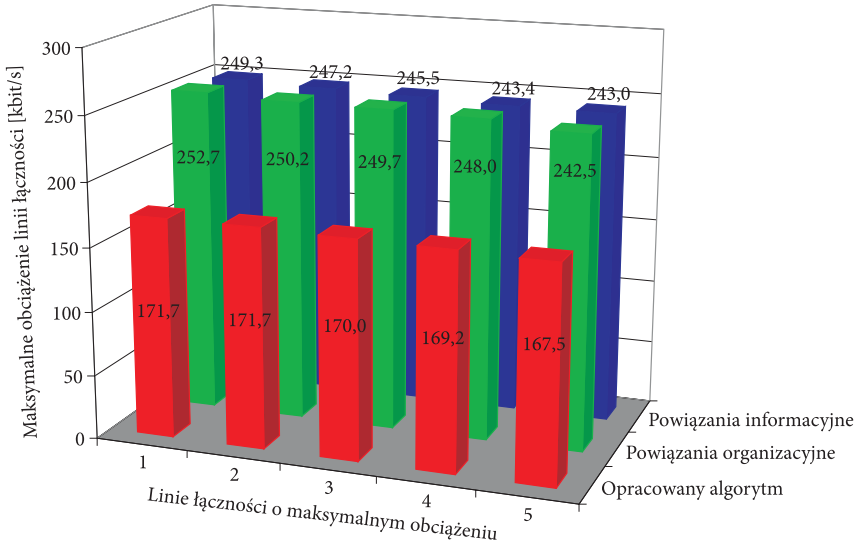


Rys. 10. Porównanie maksymalnego obciążenia sieci łączności

Obciążenia sieci uzyskane podczas konstrukcji domen przy uwzględnieniu powiązań organizacyjnych oraz powiązań informacyjnych są większe (odpowiednio o 37% oraz o 42%) od obciążenia uzyskanego podczas badań modelu powstałego w oparciu o opracowany algorytm (rys. 10).

W celu zobrazowania obciążenia poszczególnych elementów systemu łączności, na rysunku 11 przedstawiono porównanie maksymalnego obciążenia dla pięciu najbardziej wykorzystywanych linii w poszczególnych modelach organizacji domen.

Organizacja domen routingowych na podstawie kryteriów powiązań organizacyjnych oraz powiązań informacyjnych prowadzi do zwiększenia obciążenia linii łączności (odpowiednio o 47% oraz 45%) w stosunku do obciążenia uzyskanego dla modelu skonstruowanego przy wykorzystaniu opracowanego algorytmu (rys. 11).



Rys. 11. Porównanie maksymalnego obciążenia linii łączności

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono propozycję organizacji domen rutingowych w taktycznych systemach łączności oraz wybrane wyniki badań symulacyjnych.

Zaprezentowany sposób organizacji domen zapewnia ograniczenie ilości przesyłanych informacji rutingowych oraz akceptowalny czas zbieżności algorytmu marszrutyzacji. Wyniki badań symulacyjnych potwierdziły prawidłowość poczynionych założeń oraz wykazały, że proponowana metoda organizacji domen rutingowych z punktu widzenia zdefiniowanych kryteriów oceny pozwala na uzyskanie zadowalających wyników, lepszych od wyników otrzymanych podczas testów innych sposobów konstrukcji domen rutingowych.

Przedstawiona w artykule metoda organizacji domen rutingowych powinna umożliwić wsparcie procesu planowania łączności dla taktycznego systemu łączności wykorzystującego w sieci szkieletowej protokół rutingu PNNI.

Artykuł wpłynął do redakcji 3.12.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2009 r.

LITERATURA

- [1] E. KUBERA, *Organizacja wewnątrzdomenowego rutingu dynamicznego z gwarancją jakości usług w taktycznych sieciach łączności*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2009.
- [2] ATM Forum, *Private Network-Network Interface Specification Version 1.0 (PNNI 1.0)*, af-pnni-0055.000, 1996.

-
- [3] E. KUBERA, A. MROCZKO, *Analiza protokołu PNNI pod kątem możliwości wykorzystania w SSL Wład*, Wojskowy Instytut Łączności, Zegrze, 2002.
 - [4] E. KUBERA, K. ZUBEL, A. MROCZKO, *Analiza algorytmów rutowych wewnątrzdomenowych, międzydomenowych oraz współpracy z sieciami zewnętrznymi dla usług typu połączeniowego z punktu widzenia gwarantowanej jakości obsługi*, Wojskowy Instytut Łączności, Zegrze, 2003.
 - [5] E. KUBERA, J. KOZŁOWSKA, A. MROCZKO, K. ZUBEL, *Ruting dynamiczny w sieci szkieletowej ATM taktycznych systemów łączności*, Krajowe Sympozjum Telekomunikacji, Bydgoszcz, 2004.
 - [6] E. KUBERA, J. KOZŁOWSKA, A. MROCZKO, K. ZUBEL, *Usage of OPNET simulation tool for validation of routing in ATM backbone networks of tactical communication systems*, Military Conference MILCOM, USA, 2004.
 - [7] *Standardization Agreement TACOMS Post 2000 (STANAG 4637-4647)*.
 - [8] OPNET Technologies, *Dokumentacja programu symulacyjnego OPNET*.

E. KUBERA, M. AMANOWICZ

Organization of routing domains in tactical communication networks

Abstract. The method of routing domains' organization that ensures reduction of the number of transmitted routing information in the national component of tactical communication network and provides acceptable convergence time of routing algorithm was depicted in this article. Particularly, procedures of dividing the system into routing domains, principles of selection of nodes for routing domains and procedure of selection of routing domains' leaders were presented. The article contains description of simulation tests and presents the results of experiments that confirmed the effectiveness of the solution proposed by authors. The proposed method could be used in the process of tactical communication networks planning.

Keywords: mobile tactical network, dynamic routing, PNNI protocol, TACOMS Post 2000, computer simulation

