

RUTAREA FIABILĂ A PACHETELOR MANET PRIN NODURI DE ÎNCREDERE ÎN BAZA REȚELELOR PETRI FUZZY INTUIȚIONISTE

*Emilian Guțuleac, dr. hab, prof. univ., Sergiu Zaporojan, dr., conf. univ., Ion Gîrleanu, drd.
Universitatea Tehnică a Moldovei*

INTRODUCERE

Rețelele Ad-hoc de calculatoare cu dispozitive de calcul mobile fără fir (MANET), care au o topologie dinamică cu auto-organizare, sunt utilizate în diferite domenii și ele cunosc o dezvoltare rapidă atât sub aspectul complexității și/sau performanțelor, cât și al ariei de răspândire [2, 5, 8]. Din cauza mobilității nodurilor și a lipsei administrării centralizate, nu este ușor de a stabili ruta de încredere a transmiterii pachetelor către nodul de destinație prin noduri intermediare, eventual malițioase, din punct de vedere al calității resurselor de calcul alocate. Indicatorul QoS (Quality of Service) de încredere al unui nod MANET reprezintă faptul cât de mare este încrederea în calitatea acestuia de a retransmite pachetele [9].

Analiza cantitativă a QoS rețelelor MANET a atras recent atenția cercetătorilor din domeniul proiectării protocoalelor de rutare fiabilă a pachetelor prin evaluarea gradelor de încredere ale nodurilor rutelor transmiterii pachetelor, deoarece unele noduri pot avea un comportament defectuos [2, 5, 8, 14]. Astfel, autorii lucrării [5] au propus de a determina nodul de încredere ca o combinație între valorile istorice și cele de încredere actuale, unde încrederea istorică este evaluată pe baza raportului de expediție a pachetelor, adică numărul total de pachete recepționate de către un nod și numărul de pachete transmise corect. Încrederea curentă a nodului este evaluată folosind logica fuzzy. Însă, ei nu oferă nici o modalitate de evaluare a parametrilor QoS. În [11] este propus un model în care QoS de rutare se realizează prin încrederea în nodurile MANET, calculată pe baza raportului pachetelor redirectionare RREQ (Cerere rută), RREP (Rută răspuns) și a pachetelor cu date. Nodurile ce au o valoare de încredere mai mică decât un prag stabilit, sunt considerate ca fiind noduri malițioase. Însă autorii nu au prezentat mecanisme de recuperare a rutei ce include astfel de noduri. Modelul descris în [12] permite de a estima încrederea între noduri prin interacțiunile directe și recomandările nodurilor vecine. Durata legăturii, fiind considerată ca indicator QoS, este calculată pe baza pierderii pachetelor de sondare, trimise la intervale regulate

de timp. Însă, această abordare duce la creșterea complexității controlului transmiterii pachetelor. În [2] este propus un protocol bazat pe QoS de încredere ponderată în care lățimea de bandă este considerată ca un parametru de calitate. Însă, acest protocol nu este capabil să accepte modificări dinamice ale topologiei MANET. În [10] autorii au prezentat un model bazat pe recomandări de încredere ale nodurilor, dintre care unele fiind *malițioase* pot oferi *recomandări false*. Însă nu este discutată problema legată de metoda evaluării indicatorilor QoS. În lucrarea [9] este propusă o metodă de evaluare a valorii de încredere a indicatorilor QoS ai nodurilor MANET care este reprezentată printr-un model de rețele Petri (RP) [7] Fuzzy (RPF) [3] și un algoritm de rationament concurent (ARC) în care transmit-terea fiecărui pachet de la un nod la altul necesită folosirea unui sistem expert fuzzy în care este evaluat doar un singur factor de certitudine (μ).

În această lucrare este prezentată o generalizare a metodei prezentate în [9] prin utilizarea modelelor de RPF intuiționiste (RPFI) [6] în care agregarea parametrilor QoS, regulile fuzzy intuiționiste, rutarea fiabilă și recuperarea ei, cu o bună productivitate și durată de livrare a pachetelor prin noduri intermediare de încredere, sunt deduse în mod dinamic pe baza condițiilor stărilor curente ale MANET.

Pentru a demonstra utilitatea acestei abordări în lucrarea dată este considerat un exemplu ilustrativ de agregare QoS, determinare și recuperare dinamică a rutei fiabile de încredere în baza RPFI.

1. RP FUZZY INTUIȚIONISTE

1.1. Elemente de numere fuzzy intuiționiste

Teoria mulțimilor fuzzy și conceptele cu numere fuzzy [1, 3, 14] au apărut din necesitatea de a exprima cantitativ mărimi imprecise, în care domeniul de valori pe care îl ia funcția de apartenență nu mai este limitată la două valori, ci se extinde la întreg intervalul $[0, 1]$. Însă, în lumea reală, există multe situații în care este necesar de a considera și gradul de ezitare la luarea deciziilor. Astfel de situații pot fi tratate prin mulțimi fuzzy intuiționiste (MFI) și numere fuzzy intuiționiste

(NFI), introduse de Atanassov în [1] ca o generalizare a teoriei mulțimi-lor fuzzy în ceea ce privește gradul de *apartenență*, gradul de *non-apartenență* și gradul de *ezitare* la MFI. Acest grad de ezitare nu este altceva decât incertitudinea la luarea unei decizii de către un factor decizional. Teoria MFI are aplicații practice în diferite domenii unde apar fenomene de incertitudine [1, 6, 13].

În teoria MFI elementul x din universul X , mulțime nevidă, este asociat cu gradul de apartenență (numit *acceptare*) precum și gradul de non-apartenență (numit *respingere*), astfel încât suma lor aparține întotdeauna intervalului unitate $[0, 1]$.

Mulțimea fuzzy intuiționistă $\tilde{A} \subseteq X$ este expresia $\tilde{A} = \{ \langle x, \mu_{\tilde{A}}(x), \gamma_{\tilde{A}}(x) \rangle : x \in X \}$, caracterizată prin următoarele funcții [1]:

$$\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0, 1]; \quad x \in X \rightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \in [0, 1] \text{ și}$$

$$\gamma_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0, 1]; \quad x \in X \rightarrow \gamma_{\tilde{A}}(x) \in [0, 1],$$

unde valorile $\mu_{\tilde{A}}(x)$ și $\gamma_{\tilde{A}}(x)$ sunt respectiv gradul de apartenență (*acceptare*), $x \in \tilde{A}$, și gradul de non-apartenență (*respingere*) al elementului x la \tilde{A} , $x \notin X$, astfel încât aceștea, pentru $\forall x \in \tilde{A}$, satisfac condiția: $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) + \gamma_{\tilde{A}}(x) \leq 1$. Gradul de indeterminare (*ezitare, șovăire*) al apartenenței elementului x la \tilde{A} este redat de funcția $\eta_{\tilde{A}}(x)$ [1]:

$$\eta_{\tilde{A}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) - \gamma_{\tilde{A}}(x).$$

Cu cât valoarea lui $\mu_{\tilde{A}}(x)$ este mai apropiată de 1, cu atât este mai puternică apartenența lui x la \tilde{A} .

O submulțime fuzzy intuiționistă \tilde{A} a mulțimii numerelor reale IR este un NFI dacă sunt satisfăcute următoarele proprietăți [1]:

- (i) \tilde{A} este normală, adică există cel puțin un punct $x_0 \in X$ astfel încât $\mu_{\tilde{A}}(x_0) = 1$;
- (ii) \tilde{A} este fuzzy intuiționistă convexă;
- (iii) $\mu_{\tilde{A}}(x)$ (resp. $\gamma_{\tilde{A}}(x)$) este superior (inferior) semicontinuu pe IR ;
- (iv) $A = \{x \in IR : \gamma_{\tilde{A}}(x) < 1\}$ este mărginită.

Două tipuri de NFI sunt cel mai des întâlnite în aplicațiile practice ale teoriei MFI [1, 6, 13]: NFI trapezoidale și cele triunghiulare, un motiv fiind și acela al volumului de calcul [1, 3].

1.2. RPFI și regulile de funcționare

La studierea și evaluarea parametrilor QoS ai diferitor tipuri de MANET, cunoștințele despre valorile gradului de încredere ale parametrilor nodurilor, sunt, în general, mărimi incerte [4, 8]. Prima sursă de incertitudine provine din caracterul

aleatoriu de informații și stări ale MANET care are o variabilitate naturală stocastică. A doua sursă de incertitudine, de evaluare epistemică a riscului de a avea noduri malițioase este legată de caracterul imprecis și incomplet al informațiilor din cauza lipsei de cunoștințe despre mărimile reale ale parametrilor MANET ce își schimbă în mod dinamic stările lor. Deci, pentru a modela în mod mai realist incertitudinea parametrilor QoS la rutarea fiabilă a pachetelor în MANET, trebuie de luat în considerare mai nuanțat aceste aspecte [1, 8, 9].

În acest context, vom prezenta unele definiții de bază necesare pentru înțelegerea abordării date, folosind notații în conformitate cu [6, 9].

Definiția 1. O rețea Petri fuzzy intuiționistă, RPFI, notată $\tilde{\Gamma}$, este o structură de obiecte, redată de un 9-tuplu $\tilde{\Gamma} = \langle P, T, D, I, O, \delta, \theta, Th, CF \rangle$, unde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $n \neq 0$ este mulțimea finită de *locații*; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$, $k \neq 0$ este mulțimea finită de *tranziții*; $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, $n \neq 0$ este mulțimea finită de propoziții, $P \cap T \cap D = \emptyset$ și $|P| = |D|$; $I : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ este matricea de intrare cu dimensiunea $n \times k$ ce redă funcțiile respective de incidență înainte a locațiilor la tranziții. Astfel, dacă există un arc de intrare direcționat de la p_i la t_j , atunci $I(p_i, t_j) = 1$, în caz contrar avem $I(p_i, t_j) = 0$, unde $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, k$; $O : T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ este matricea de intrare cu dimensiunea $k \times n$ ce redă funcțiile respective de incidență înapoi ale tranzițiilor la locațiile respective. Astfel, dacă există un arc de ieșire direcționat de la t_j la p_i , atunci $O(t_j, p_i) = 1$, în caz contrar $O(t_j, p_i) = 0$; $\delta : P \rightarrow D$ reprezintă relația dintre locații și propoziții; $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ este un vector coloană, unde $\theta_i = (\mu_i, \gamma_i) \in IR$ este un NFI care indică gradul de adevăr al lui d_i . IR este mulțimea numerilor reale nenegative, iar $\mu_i \in [0, 1]$, $\gamma_i \in [0, 1]$ și $(\mu_i + \gamma_i) \in [0, 1]$. Vectorul gradului de adevăr initial al D este $\theta^0 = (\theta_1^0, \theta_2^0, \dots, \theta_n^0)$, unde $\theta_i^0 = (\mu_i^0, \gamma_i^0)$, $i = 1, 2, \dots, n$; $Th = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$ este un vector, unde $\lambda_j = (\alpha_j, \beta_j) \in IR$ este un NFI care indică mărimea pragului de validare al tranziției t_j . Aici: $\alpha_j \in [0, 1]$, $\beta_j \in [0, 1]$ și $(\alpha_j + \beta_j) \in [0, 1]$, $j = 1, 2, \dots, k$; Vectorul $CF = \text{diag}(CF_1, CF_2, \dots, CF_k)$, unde $CF_j = (C\mu_j,$

$C\gamma_j) \in IR$ este un NFI în care $C\mu_j \in [0,1]$, $C\gamma_j \in [0,1]$ și $C\mu_j + C\gamma_j \in [0,1]$, $j = 1, 2, \dots, k$ indică gradul de certitudine a regulii de producție R_j , redată de tranziția t_j . ■

Reprezentarea cunoaștințelor prin RPF1. Pentru a reprezenta cunoaștințele și a descrie un raționament adecvat prin RPF1, regulile R_i fuzzy intuiționiste de producție (RFIP) trebuie să fie simple și convenabil combinate cu NFI. Fie mulțimea de RFIP $R = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$ este astfel încât formula generală a acestora are forma R_i :

$$IF d_j THEN d_k (CF_i, \lambda_i),$$

unde d_j și d_k sunt propoziții fuzzy intuiționiste, care reprezintă respectiv *premiza* și *consecința* regulii R_i . Gradele lor de adevăr sunt respectiv θ_j și θ_k , iar CF_i și λ_i reprezintă respectiv factorul de certitudine și mărimea pragului de validare al regulii R_i . Mărimile θ_j, θ_k, CF_i și λ_i sunt NFI.

Relația corespunzătoare între mulțimea de RFIP și a elementelor unui model RPF1 este prezentată în tabelul 1.

Tabelul 1. Relația corespunzătoare dintre mulțimea IFPR și a modelului IFPN.

Mulțimea RFIP	Modelul RPF1
Regulă R_i	Tranziție t_i
Premiză R_i	Locație intrare la t_i
Consecință R_i	Locație ieșire din t_i
Propoziție d_k	Locație p_k
Gradul de adevăr al R_i	Valoarea jetonului p_k
Mărime prag al R_i	Mărime prag al t_i
Factor certitudine al R_i	Factor certitudine al t_i
R_i este aplicată	t_i este declanșată

Menționăm unele dintre caracteristicile esențiale ale RPF1-urilor care diferă de cele ale RP obișnuite: a) numărul de jetoane într-o locație nu poate fi mai mare decât unul, deoarece jetonul este asociat cu gradul de adevăr între zero și unul; b) RPF1-urile sunt întotdeauna mulțimi fără conflicte; c) toate tranzițiile validate de către marcajul curent se vor declanșa concomitent în paralel; d) la declanșarea tranzițiilor validate, jetoanele nu sunt îndepărtate din locațiile de intrare la ele. Acest lucru se datorează faptului că evoluția regulilor de producție înseamnă doar singura propagare a adevărului pro-pozițiilor. Cu alte cuvinte, *adevărul*

propoziției nu va dispărea din cauza raționamentului la executarea regulilor redade de tranzițiile RPF1 respective. RFIP și RPF1 sunt similare cu regulile de producție fuzzy ale FPN, care sunt explicate în [14]. În aceste reguli, partea antecedent (*premiza*) este reprezentată de locațiile de intrare la tranziție, iar partea ulterioară este reprezentată de locații de ieșire din această tranziție. R_i se aplică la declanșarea tranziției t_i ce se află între locațiile de intrare și a celor de ieșire.

În continuare, prezentăm și discutăm câteva RFIP, deoarece acestea sunt necesare pentru a înțelege metoda propusă. Conform [1], RFIP și RPF1 respective pot fi clasificate în patru tipuri.

Modelul $\tilde{1}$ de tipul respectiv, condițiile de validare, declanșare ale tranzițiilor și valorile NFI ale jetoanelor, după declanșarea tranzițiilor validate, sunt prezentate după cum urmează [1].

În Fig. 1 este prezentat un model simplu $\tilde{1}$ al unei subrețele RPF1 de tipul 1 ce realizează regulă $R_i: IF d_j THEN d_k (CF_i, \lambda_i)$ în care $\theta_j = (\mu_j, \gamma_j)$, $\theta_k = (\mu_k, \gamma_k)$, $\lambda_i = (\alpha_i, \beta_i)$ și $CF_i = (C\mu_i, C\gamma_i)$.

Condiția de validare $ec_i(\theta_j)$ a tranziției t_i de către marcajul curent al modelului $\tilde{1}$, notată $\theta_j[t_j >]$, este redată de următoarea funcție logică:

$$ec_i(\theta_j) = (\mu_j \geq \alpha_i) \wedge (\gamma_j \leq \beta_i).$$

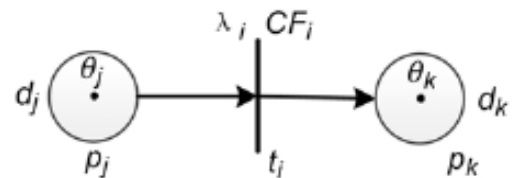


Figura 1. Modelul $\tilde{1}$ al RPF1 de tipul 1.

În cazul în care această condiție este verificată, t_i va declanșa scimbând marcajul curent $\theta = (\theta_j, 0)$ în alt marcaj $\theta' = (\theta_j, \theta_k)$, notat $\theta[t_j > \theta']$. Valorile NFI ale jetonului în locația p_k după declanșarea tranziției t_i sunt respectiv:

$$\mu_k = \mu_j \cdot C\mu_i \text{ și } \gamma_k = \gamma_j \cdot (1 - C\gamma_i) + C\gamma_i. \quad (1)$$

Modelul $\tilde{2}$ de subrețea RPF1 de tipul 2 ce realizează o regulă compusă conjunctivă de premiză R_i :

$IF d_{j_1} AND d_{j_2} AND \dots AND d_{j_n} THEN d_k (CF_i, \lambda_i)$ cu mărimile respective $\theta_{j_m} = (\mu_{j_m}, \gamma_{j_m})$, ($m = 1, 2, \dots, n$), $\theta_k = (\mu_k, \gamma_k)$, $\lambda_i = (\alpha_i, \beta_i)$ și $CF_i = (C\mu_i, C\gamma_i)$ este prezentat în Fig. 2.

Condiția de validare $ec_i(\theta_j)$ a tranziției t_i de către marcajul curent al modelului $\tilde{\Gamma}2$ este redată de următoarea funcție logică:

$$ec_i(\theta_j) = (\min(\mu_{j1}, \mu_{j2}, \dots, \mu_{jn}) \geq \alpha_i) \wedge (\max(\gamma_{j1}, \gamma_{j2}, \dots, \gamma_{jn}) \leq \beta_i). \quad (2)$$

În cazul în care această condiție este verificată, t_i se va declanșa schimbând marcajul curent $\theta = (\theta_{j1}, \theta_{j2}, \dots, \theta_{jn}, 0)$ într-un alt marcaj $\theta' = (\theta_{j1}, \theta_{j2}, \dots, \theta_{jn}, \theta_k)$, notat $\theta[t_j > \theta'$.

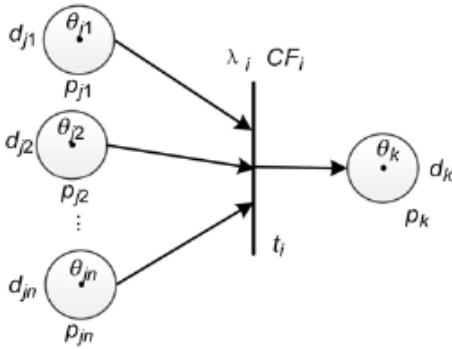


Figura 2. Modelul $\tilde{\Gamma}2$ al RPFi de tipul 2.

Valorile NFI ale jetonului în locația p_k după declanșarea tranziției t_i sunt respectiv:

$$\mu_k = \min(\mu_{j1}, \mu_{j2}, \dots, \mu_{jn}) \cdot C\mu_i \text{ și } \gamma_k = \max(\gamma_{j1}, \gamma_{j2}, \dots, \gamma_{jn}) \cdot (1 - C\gamma_i) + C\gamma_i. \quad (3)$$

În Fig. 3 este prezentat modelul $\tilde{\Gamma}3$ al subrețelei RPFi de tipul 3 ce realizează regula RFIP compusă disjunctivă a condiției de premiză R_i :

IF d_{j1} OR d_{j2} OR \dots OR d_{jn} THEN d_k (CF_{im}, λ_{im})

cu mărimile respective $\theta_{jm} = (\mu_{jm}, \gamma_{jm})$, $\lambda_{im} = (\alpha_{im}, \beta_{im})$, $CF_{im} = (C\mu_{im}, C\gamma_{im})$, ($m = 1, 2, \dots, n$) și $\theta_k = (\mu_k, \gamma_k)$.

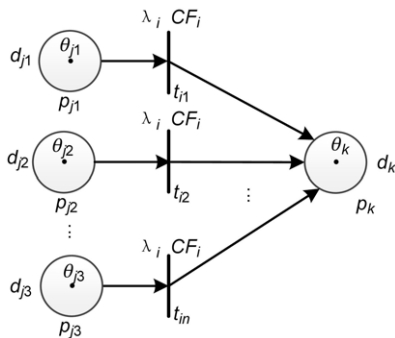


Figura 3. Modelul $\tilde{\Gamma}3$ al RPFi de tipul 3.

Valorile NFI ale jetonului în locația p_k după declanșarea tranziției t_{im} sunt respectiv:

$$\mu_k = \max(\mu_{j1} \cdot C\mu_{j1}, \mu_{j2} \cdot C\mu_{j2}, \dots, \mu_{jn} \cdot C\mu_{jn}) \text{ și } \gamma_k = \min(\gamma_{j1} \cdot (1 - C\gamma_{i1}) + C\gamma_{i1}, \gamma_{j2} \cdot (1 - C\gamma_{i2}) + C\gamma_{i2}, \dots, \gamma_{jn} \cdot (1 - C\gamma_{in}) + C\gamma_{in}). \quad (4)$$

Condiția de validare $ec_{im}(\theta_{jm})$ a tranziției t_{im} , $m = 1, 2, \dots, n$, de către marcajul curent al modelului $\tilde{\Gamma}3$, notată $\theta_{jm}[t_{jm} >$, este redată de următoarea funcție logică:

$$ec_{im}(\theta_{jm}) = (\mu_{jm} \geq \alpha_i) \wedge (\gamma_{jm} \leq \beta_i).$$

În cazul în care această condiție este verificată, t_i va declanșa schimbând marcajul curent $\theta = (\theta_j, 0)$ în alt marcaj $\theta' = (\theta_j, \theta_k)$.

Modelul $\tilde{\Gamma}4$ de subrețea RPFi de tipul 4 ce realizează o regulă RFIP de formă conjunctivă a concluziei R_i :

IF d_j THEN d_{j1} AND d_{j2} AND \dots AND d_{jn} (CF_i, λ_i) cu $\theta_j = (\mu_j, \gamma_j)$, $\lambda_i = (\alpha_i, \beta_i)$, $CF_i = (C\mu_i, C\gamma_i)$ și $\theta_{ki} = (\mu_{ki}, \gamma_{ki})$, ($i = 1, 2, \dots, n$) ce sunt NFI respective, este prezentat în Fig. 4.

Condiția de validare $ec_i(\theta_j)$ a tranziției t_i de către marcajul curent al modelului $\tilde{\Gamma}4$, notată $\theta_j[t_j >$, este redată de următoarea funcție logică:

$$ec_i(\theta_j) = (\mu_j \geq \alpha_i) \wedge (\gamma_j \leq \beta_i).$$

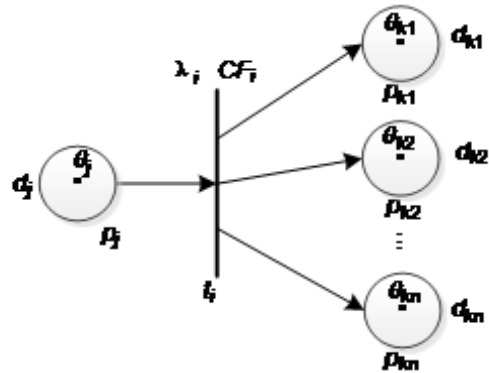


Figura 4. Modelul $\tilde{\Gamma}4$ al RPFi de tipul 4.

În cazul în care această condiție este verificată, t_i va declanșa schimbând marcajul curent $\theta = (\theta_j, 0)$ într-un alt marcaj $\theta' = (\theta'_j, \theta'_{k1}, \theta'_{k2}, \dots, \theta'_{kn})$, notat $\theta[t_j > \theta'$. Valorile jetonului în locația p_k după declanșarea tranziției t_i sunt respectiv:

$$\mu_{ki} = \mu_j \cdot C\mu_i \text{ și } \gamma_{ki} = \gamma_j \cdot (1 - C\gamma_i) + C\gamma_i, \quad (5) \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

2. EVALUAREA QoS MANET

2.1. Evaluarea indicatorilor QoS ai nodurilor

Evaluarea în timp real a indicatorilor QoS ai nodurilor MANET, cum ar fi durata de expirare a energiei, lățimea benzii de legătură, durata de expirare a legăturii și a parametrilor de fiabilitate este efectuată după cum urmează:

- *Calculul energiei reziduale a nodului.* La transmiterea unui pachet de date, un nod trebuie să îl primească și să-l transmită nodului vecin la următorul salt de rutare. În lucrarea [11], energia consumată pentru această activitate este calculată conform relației (6) :

$$E_{cons} = K \cdot (2 \cdot E_{act} + E_{amp} \cdot r^2), \quad (6)$$

unde E_{act} este energia de activare a emitorului/receptorului. Un amplificator necesită o cantitate de energie $E_{amp} \cdot r^2$ pentru a transmite pachete de K biți la o distanță r .

- *Lățimea benzii de legătură.* În lucrările [9] este detaliat explicat modul de evaluare a lățimii de bandă L_{band} a semnalelor legăturii între o pereche de noduri, definită pe baza sloturilor comune de timp ale transmisiei/recepției pachetelor, utilizând protocolul TDMA [5, 14].

- *Durata expirării legăturii (DEL).* În [14] durata de expirare a legăturii τ_{DEL} într-o pereche de noduri este calculată pe baza vitezelor și a direcțiilor sale de mișcare. Fie A și B sunt două noduri vecine cu coordonatele de distanță (x_1, y_1) și (x_2, y_2) respective și vitezele lor v_1 și v_2 respective. Direcțiilor lor de mișcare sunt unghiurile φ_1 și φ_2 respective, iar d este diapazonul semnalului de transmisie. Durata de expirare a legăturii τ_{DEL} dintre nodurile A și B este calculată conform relației (7):

$$\tau_{DEL} = ((\sqrt{d^2 \cdot (r^2 + s^2)} - (s \cdot g - r \cdot q) - (s \cdot q - r \cdot g)) / (r^2 + s^2)), \quad (7)$$

$$s = v_1 \cos(\varphi_1) - v_2 \cos(\varphi_{21}), \quad q = x_1 - x_2,$$

$$r = v_1 \sin(\varphi_1) - v_2 \sin(\varphi_{21}), \quad g = y_1 - y_2.$$

- *Estimarea fiabilității nodului.* Un nod poate evalua fiabilitatea nodului vecin pe baza numărului de pachete primite și a celor transmise corect. În [14], fiabilitatea π_R a unui nod este estimată ca fiind o variabilă aleatorie, folosind teoria inferențelor Bayesian, iar valoarea acesteia se află în intervalul $[0, 1]$. Fie un nod a transmis corect un număr a de pachete dintre un număr b de pachete primite, atunci fiabilitatea medie este calculată conform relației (8) :

$$\pi_R = \zeta_n / (\zeta_n + \xi_n), \quad (8)$$

$$\zeta_n = \zeta_{n-1} + a_{n-1}, \quad \xi_n = \xi_{n-1} + b_{n-1}, \quad \zeta_0 = \xi_0 = 0.$$

2.2. Calculul prin RPFİ a indicatorului QoS de încredere al nodurilor MANET

În protocolul de rutare a pachetelor propus în [9], nodul sursă inițiază procesul de rutare prin trimiterea pachetelor de solicitare rută (Route Request, RREQ) către un nod destinație pentru a stabili ruta de comunicație. Nodul destinație colectează informațiile topologice curente ale MANET și parametrii QoS acesteia prin intermediul pachetelor RREQ și apoi execută algoritmul de raționament concurrent (ARC) pentru a găsi o rută calitativ fiabilă și de încredere, notificând astfel informația despre această rută către nodul sursă prin transmiterea unui pachet de răspuns stabilire rută (Route Reply, RREP).

Pentru a determina ruta de încredere a transmiției pachetelor, în această lucrare funcționarea unei MANET este reprezentată de un model RPFİ în care parametrii QoS sunt NFI de intrare la evaluarea gradului de încredere al nodurilor, $\theta_j = (\mu_j, \gamma_j)$.

În baza unor praguri de încredere, a ponderării arcelor și a nivelurilor de încredere ale locațiilor din amonte se vor declanșa tranzițiile respective, validate de către marcajul curent și se vor evalua valorile de încredere ale locațiilor din aval respective ale modelului RPFİ. În baza acestor parametri nodul destinație selectează nodurile MANET cu cele mai mari valori QoS de încredere de-a lungul rutei identificate de transmiție a pachetelor spre destinație. Această informație este transmisă nodului sursă printr-un pachet RREP.

Sistemul de inferență fuzzy intuitionist ia în considerare parametrii fiecărui nod MANET precum lățimea de bandă (L_{band}), energia reziduală (E_{cons}), fiabilitatea (π_R) și durata de expirare a legăturii (τ_{DEL}) ca fiind variabile fuzzy intuitioniste de intrare pentru a evalua variabila fuzzy de ieșire, adică factorul de încredere $\theta = (\mu, \gamma)$ al nodului respective în baza unei subrețele RPFİ respective.

La transmisia datelor în MANET rata de atenuare a parametrilor QoS unui nod este liniară, de aceea vor fi folosite funcții de apartenență triunghiulare pentru a măsura variabilele fuzzy intuitioniste de intrare și a celor de ieșire așa cum este arătat în Fig. 5 pentru determinarea funcției de apartenență μ .

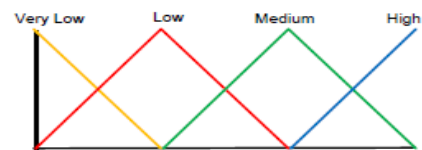


Figura 5. Funcții de apartenență fuzzy μ triunghiulare ale parametrilor MANET [9].

Ici, sunt considerate patru tipuri de MFI, cum ar fi: *Foarte mic* (Very Low, VL), *Mic* (Low, L), *Mediu* (Medium, M) și *Mare* (High, H).

Sistemul expert fuzzy intuitionist de evaluare a QoS urmează două faze, cum ar fi fuzzyficarea și defuzzyficarea [3]. Aici, în procesul de fuzzyficare, toți parametrii QoS sunt agregați [9, 13], aplicând subrețele RPFİ de tipul 2. La faza defuzzyficare este calculat factorul de încredere $\theta = (\mu, \gamma)$. Ambele faze folosesc baza de reguli fuzzy intuitioniste (RFI) [6] așa cum este arătat în tabelul 1.

Tabelul 1. Baza de RFI.

L_{Band}	E_{cons}	π_R	τ_{DEL}	θ
H	H	H	H	H
M	H	H	M	M
L	L	L	M	L
VL	VL	M	M	VL

Aceste RPFİ sunt determinate în dependență de condițiile de funcționare ale MANET, fiind deduse din rezultate experimentale sau simulări.

Valoarea pragului λ_i de validare a tranziției t_i este determinată pentru fiecare tranziție. În modelul RPFİ propus pentru o pereche de noduri adiacente, acesta este definit ca o funcție QoS a ratelor de atenuare ale resurselor respective. Dacă nodurile au o rată de atenuare ridicată a parametrilor QoS resurselor acestora, atunci tranziția respectivă va avea o valoare de prag mai mare și invers.

3. ALGORITMUL DE RUTARE CONCURRENTĂ BAZAT PE RPFİ

3.1. Operatori matriceali

Pentru a reprezenta formal algoritmul ARC, bazat pe RPFİ, vom folosi unii operatori de calcul ai parametrilor NFI matriceali ai RPFİ, definiți în conformitate cu [3, 6].

(1) Operatorul *înmulțire* “ \otimes ”: $C = A \otimes B$, unde $A = (a_{i,j})_{m \times n}$, $a_{i,j} = 1$ sau $a_{i,j} = 0$, iar

$$B = (b_{i,j})_{m \times n} = (\mu b_{i,j}, \gamma b_{i,j})_{m \times n} \text{ și}$$

$$C = (c_i)_{m \times 1} = (c\mu_i, c\gamma_i)_{m \times 1} \text{ cu}$$

$$c\mu_i = \max \left\{ x_i \mid x_i = \begin{cases} b\mu_i, & a_{i,j} = 1 \\ 0, & a_{i,j} = 0 \end{cases} \right\},$$

$$c\gamma_i = \min \left\{ y_i \mid y_i = \begin{cases} b\gamma_i, & a_{i,j} = 1 \\ 0, & a_{i,j} = 0 \end{cases} \right\}.$$

(2) Operatorul *adunare* NFI “ \oplus ”:

$$C = A \oplus B, \text{ unde}$$

$$A = (a_{i,j})_{m \times n} = (\mu a_{i,j}, \gamma a_{i,j})_{m \times n},$$

$$B = (b_{i,j})_{m \times n} = (\mu b_{i,j}, \gamma b_{i,j})_{m \times n},$$

$$C = (c_{i,j})_{m \times n} = (\mu c_{i,j}, \gamma c_{i,j})_{m \times n},$$

$$c_{i,j} = (\max((\mu a_{i,j}, \mu b_{i,j}), \min(\gamma a_{i,j}, \gamma b_{i,j}))).$$

(3) Operatorul *comparare* “ \odot ”:

$$C = A \odot B, \text{ unde } A = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T$$

$$= ((\mu a_1, \gamma a_1), (\mu a_2, \gamma a_2), \dots, (\mu a_m, \gamma a_m))^T,$$

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T = ((\mu b_1, \gamma b_1), (\mu b_2, \gamma b_2),$$

$$\dots, (\mu b_m, \gamma b_m))^T, \quad C = (c_1, c_2, \dots, c_m)^T$$

$$= ((\mu c_1, \gamma c_1), (\mu c_2, \gamma c_2), \dots, (\mu c_m, \gamma c_m))^T,$$

$$c_i = (\mu c_i, \gamma c_i) = \begin{cases} (\mu a_i, \gamma a_i), & (\mu a_i \geq \mu b_i) \& (\gamma a_i \leq \gamma b_i) \\ (0, 1), & \text{altfel} \end{cases}$$

(4) Operatorul *înmulțire directă* “ $*$ ”:

$$C = A * B, \text{ unde } A = (a_{i,j})_{m \times l} = (\mu a_{i,j}, \gamma a_{i,j})_{m \times l},$$

$$B = (b_{i,j})_{l \times n} = (\mu b_{i,j}, \gamma b_{i,j})_{l \times n}, \quad C = (c_{i,j})_{m \times n}$$

$$= (\mu a_{i,j} \cdot \mu b_{i,j}, \gamma a_{i,j} + \gamma b_{i,j} - \gamma a_{i,j} \cdot \gamma b_{i,j})_{m \times n}.$$

(5) Operatorul *negare* “*neg*” sau “ $-$ ”:

$$\text{Fie } \theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T = ((\mu_1, \gamma_1), (\mu_2, \gamma_2),$$

$$\dots, (\mu_n, \gamma_n))^T, \text{ atunci } \bar{\theta} = \text{neg}(\theta)$$

$$= \text{neg}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T =$$

$$= ((\gamma_1, \mu_1), (\gamma_2, \mu_2), \dots, (\gamma_n, \mu_n))^T.$$

3.2. Algoritmul de raționament bazat pe RPFİ

La aplicarea ARC o RPFİ trebuie să fie o rețea *aciclică* în care nu există nici-o buclă sau circuit, deoarece nu există nici-o circularitate în majoritatea bazelor de cunoștințe practic utilizate [6, 12]. Prin urmare, în această lucrare, vom presupune că orice model de RPFİ este o rețea aciclică.

Înainte de a prezenta acest algoritm vom folosi următoarele notații: $\bullet p = \{t \mid O(t, p) > 0\}$ (respectiv $p^\bullet = \{t \mid I(p, t) > 0\}$) este mulțimea de tranziții incidente *înainte* (respectiv *înapoi*) la locația p ; $\bullet t = \{p \mid I(p, t) > 0\}$ (respectiv $t^\bullet = \{p \mid O(t, p) > 0\}$) este mulțimea de locații incidente *înainte* (respectiv *înapoi*) la tranziția t .

Astfel, pentru nodul sursă avem $\bullet p_s = \emptyset$ și $p_s^\bullet \neq \emptyset$, iar pentru nodul destinație $\bullet p_d \neq \emptyset$ și $p_d^\bullet = \emptyset$.

Fie t_i este o tranziție, iar p_l, p_j, p_k sunt locații ale unui model RPFİ. Dacă

$p_l \in \bullet t_i$ și $p_j \in t_i^*$, atunci locația p_j este numită imediat accesibilă din p_l și acest fapt este notat $p_l \rightarrow p_j$. Însă, dacă $p_l \rightarrow p_j$, $p_{j+1} \rightarrow p_{j+2}, \dots, p_{j+k-1} \rightarrow p_{j+k}$, atunci toate locațiile p_{j+m} cu $m = 1, 2, \dots, k$ sunt indirect accesibile din locația p_l și acest fapt este notat $p_l \Rightarrow p_{j+m}$. Mulțimea de locații imediat accesibile din p_l este notată $IAC(p_l)$, iar cea de locații indirect accesibile din p_l este notată $Ac(p_l)$.

În cazul în care modelul RPFİ corespunzător are n locații și m tranziții, ARC redat este după cum urmează.

Algoritm ARC bazat pe un model RPFİ [9].

- *Intrare*: I - matricea de incidență înainte; O - matricea de incidență înapoi; Th - mărimile pragului de validare ale tranzițiilor; CF - factorul de certitudine al regulilor; θ^0 - gradul de adevăr inițial al propozițiilor.

- *Ieșire*: Valorile de adevăr ale jetoanelor locațiilor (adică valoarea reală a propozițiilor) și numărul iterațiilor de calcul k .

- *Preproces*: Verificarea existenței unor circuite în modelul RPFİ analizat. Dacă, există unele circuite în acest model, atunci ARC nu poate fi aplicat. Se cer modificări de rigoare.

- *Pasul 1*. Inițializăm toate intrările și atribuiem: $k = 1$, $\theta^{k-1} = \theta^0 = (\theta_1^0, \theta_2^0, \dots, \theta_n^0)^T$

$$= ((\mu_1^0, \gamma_1^0), (\mu_2^0, \gamma_2^0), \dots, (\mu_n^0, \gamma_n^0))^T.$$

Indicăm *gradul de adevăr* al fiecărei propoziții necunoscute p_i ca fiind $\theta_i = (0, 1)$, iar intrarea inițială echivalentă este indicată prin:

$$\rho_{k-1} = \rho_0 = (\theta_1^0, \theta_2^0, \dots, \theta_n^0)^T \\ = ((\mu_1^0, \gamma_1^0), (\mu_2^0, \gamma_2^0), \dots, (\mu_n^0, \gamma_n^0))^T.$$

- *Pasul 2*. Calculăm intrarea echivalentă a fiecărei tranziții, adică valorile NFI ale jetoanelor locațiilor de intrare ale fiecărei tranziții, care ar trebui să fie echivalentă cu valoarea jetonului unei singure locații de intrare, iar rezultatul calculului este:

$$\rho_k = (\theta_1^k, \theta_2^k, \dots, \theta_n^k)^T \\ = ((\mu_1^k, \gamma_1^k), (\mu_2^k, \gamma_2^k), \dots, (\mu_n^k, \gamma_n^k))^T \text{ cu} \\ \rho \mu_j^k = \min \left\{ x_i \mid x_i = \begin{cases} \mu_i^{k-1}, & I(p_i, t_j) = 1 \\ 1, & I(p_i, t_j) = 0 \end{cases} \right\}, \\ \rho \gamma_j^k = \max \left\{ y_i \mid y_i = \begin{cases} \gamma_i^{k-1}, & I(p_i, t_j) = 1 \\ 0, & I(p_i, t_j) = 0 \end{cases} \right\},$$

adică: $\rho_k = \overline{I^T \otimes \bar{\theta}_{k-1}}$. (9)

- *Pasul 3*. Comparăm valoarea de adevăr echivalentă a jetonului de intrare al fiecărei tranziții cu valoarea prag a fiecărei reguli respective. Păstrăm această valoare echivalentă a jetonului de intrare, care poate declanșa tranziția respectivă:

$$\rho'_k = \rho_k \odot Th. \quad (10)$$

- *Pasul 4*. Calculăm valorile gradelor de adevăr Y_k ale jetoanelor din locațiile de ieșire respective după ce toate tranzițiile validate sunt în paralel declanșate:

$$1) S_k = CF * \rho'_k, \text{ unde } S_k = (s_1^k, s_2^k, \dots, s_n^k)^T \\ = ((s \mu_1^k, s \gamma_1^k), (s \mu_2^k, s \gamma_2^k), \dots, (s \mu_n^k, s \gamma_n^k))^T,$$

$$s \mu_j^k = C \mu_j^k * \rho \mu_j^k, \quad s \gamma_j^k = C \gamma_j^k + \rho \gamma_j^k - C \gamma_i^k * \rho \gamma_j^k;$$

$$2) Y_k = (y \theta_1^k, y \theta_2^k, \dots, y \theta_n^k)^T \\ = ((y \mu_1^k, y \gamma_1^k), (y \mu_2^k, y \gamma_2^k), \dots, (y \mu_n^k, y \gamma_n^k))^T,$$

$$\text{unde } y \mu_j^k = \max \left\{ x_i \mid x_i = \begin{cases} s \mu_i^k, & O(p_i, t_j) = 1 \\ 0, & O(p_i, t_j) = 0 \end{cases} \right\},$$

$$y \gamma_j^k = \min \left\{ y_i \mid y_i = \begin{cases} s \gamma_i^k, & O(p_i, t_j) = 1 \\ 1, & O(p_i, t_j) = 0 \end{cases} \right\}, \text{ adică}$$

$$Y_k = (O \otimes S_k) = O \otimes (CF \bullet \rho'_k). \quad (11)$$

- *Pasul 5*. Calculăm valorile gradelor de adevăr ale jetoanelor tuturor locațiilor, adică gradele de adevăr finale ale tuturor propozițiilor:

$$\theta^k = \theta^{k-1} \oplus Y_k = (\theta_1^k, \theta_2^k, \dots, \theta_n^k)^T$$

$$= ((\mu_1^k, \gamma_1^k), (\mu_2^k, \gamma_2^k), \dots, (\mu_n^k, \gamma_n^k))^T. \quad (12)$$

- *Pasul 6*. Evaluăm dacă procesul de raționament este terminat. Condițiile necesare și suficiente ca procesul de raționament al RPFİ să fie terminat sunt redade de relația $\theta^k = \theta^{k-1}$ [6]. În caz contrar, incrementăm $k = k + 1$ și trecem la *pasul 2*. ■

Astfel, valorile gradelor de adevăr finale θ^k ale tuturor propozițiilor sunt utilizate ca rezultat de ieșire pentru a identifica ruta cea mai fiabilă de încredere pentru a transmite cu succes pachetele.

Se poate demonstra că ARC al unei RPFİ poate fi terminat după k iterații [6], unde $1 \leq k \leq h + 1$, iar h indică numărul de tranziții declanșarea cărora sunt incluse în cea mai lungă rută a modelului RPFİ astfel analizat [9]. De asemenea, se poate demonstra că complexitatea de calcul a acestui algoritm pentru cel mai rău caz este de ordinul $O(n \cdot m^2)$.

Astfel, un protocol de rutare fiabilă a pachetelor MANET în baza metodei prezentate mai sus trebuie să includă și următoarele activități:

- 1) Ori de câte ori nodul sursă n_s dorește să par-tajeze datele cu nodul destinație n_d , acesta trimite

pachete RREQ prin setarea gradului său de încredere ca fiind $\theta_s = (\mu_s, \gamma_s) = (1, 0)$.

2) La recepționarea pachetului RREQ, fiecare nod intermediar n_i evaluează factorul său de încredere $\theta_i = (\mu_i, \gamma_i)$. La redirectionarea pachetului primit către nodurile adiacente, acesta adaugă valorile parametrilor QoS.

3) La recepționarea mai multor pachete RREQ, un nod de destinație poate aduna și memora informații topologice pentru fiecare legătură dintre nodurile MANET, precum și parametrii QoS.

4) Nodul destinație execută algoritmul ARC al modelului RPFİ și determină valorile de încredere ale locațiilor, asociate cu nodurile respective, în baza cărora este identificată cea mai bună rută de încredere. Această rută este stabilită de către nodul destinație prin urmărirea înapoi a valorilor θ ale nodurilor intermediare către nodul sursă.

5) Nodul destinație trimite pachetul RREP cu informația de rigoare pe această cale către nodul sursă. După recepționarea pachetului RREP, nodul sursă stabilește ruta de încredere astfel identificată și apoi va începe transmiterea pachetelor respective.

În continuare, cu scopul de a arăta utilitatea utilizării abordării prezentate în această lucrare, vom considera un exemplu simplu (similar cu cel din [9]). Din cauza limitărilor de spațiu, acest exemplu este extrem de abstract, însă el ilustrează elocvent abordarea propusă.

4. EXEMPLU DE RUTARE ÎN MANET BAZATĂ PE RPFİ

În Fig. 6 este prezentată topologia unei MANET1 cu 12 noduri, în care nodul n_1 și nodul n_{12} sunt respectiv nodul sursă și cel de destinație.

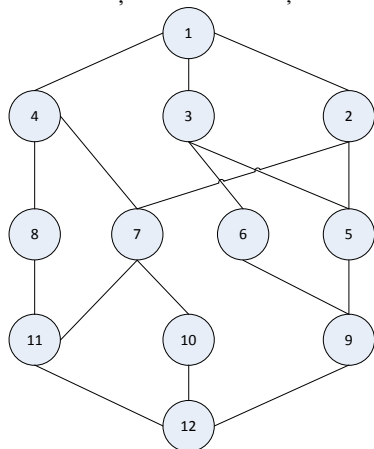


Figura 6. Topologia unei rețele MANET1.

Topologia acestei rețele este convertită într-un model $\tilde{5}$ de tipul RPFİ, structura căreia este prezentată în Fig. 7. În acest model nodurile topo-

logiei MANET și legăturile între ele sunt reprezentate respectiv ca locații și tranziții. Cu fiecare tranziție t_i , $i = 1, 2, \dots, 17$ a modelului $\tilde{5}$ sunt asociate parametrii respectivi: factorul de certitudine $CF_i = (C\mu_i, C\gamma_i)$ și pragul de validare $\lambda_i = (\alpha_i, \beta_i)$.

Observăm că modelul $\tilde{5}$ este compus din subrețele RPFİ de tipul 3.

Marcajul inițial al acestui model RPFİ $\tilde{5}$ este: $\theta^0 = (\theta_1^0, \theta_2^0, \dots, \theta_n^0)^T$, cu $\theta_1^0 = (\mu_1^0, \gamma_1^0) = (1, 0)$ și $\theta_j^0 = (\mu_j^0, \gamma_j^0) = (0, 1)$, $j = 2, 3, \dots, 12$.

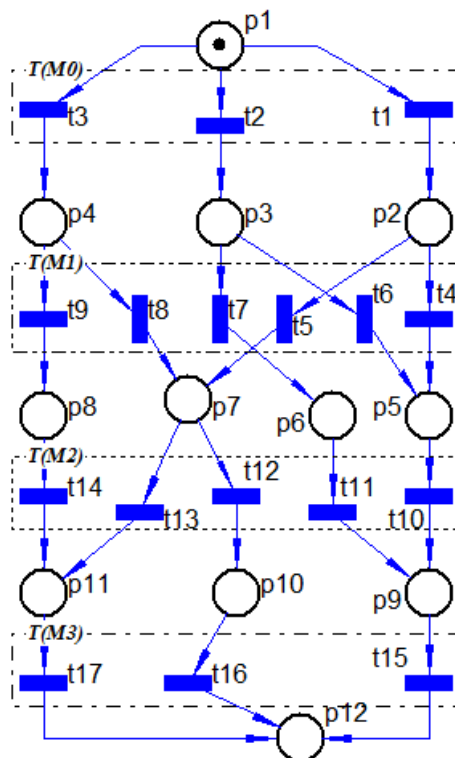


Figura 7. Structura modelului RPFİ $\tilde{5}$ al MANET1 cu topologia prezentată în Fig. 6.

Ca exemplu de determinare a celei mai fiabile rută pentru transmiterea pachetelor în MANET din Fig. 5 o vom efectua în baza modelului RPFİ $\tilde{5}$ cu următoarele NFI: $CF_1 = (0.8, 0.1)$,

- $\lambda_1 = (0.5, 0.2)$; $CF_2 = (0.9, 0.1)$, $\lambda_2 = (0.4, 0.3)$;
- $CF_3 = (0.7, 0.2)$, $\lambda_3 = (0.5, 0.4)$; $CF_4 = (0.7, 0.2)$,
- $\lambda_4 = (0.4, 0.3)$; $CF_5 = (0.8, 0.1)$, $\lambda_5 = (0.4, 0.3)$;
- $CF_6 = (0.6, 0.3)$, $\lambda_6 = (0.5, 0.3)$; $CF_7 = (0.9, 0.1)$,
- $\lambda_7 = (0.6, 0.3)$; $CF_8 = (0.8, 0.2)$, $\lambda_8 = (0.5, 0.4)$;
- $CF_9 = (0.9, 0.1)$, $\lambda_9 = (0.6, 0.3)$; $CF_{10} = (0.9, 0.1)$,
- $\lambda_{10} = (0.5, 0.3)$; $CF_{11} = (0.7, 0.2)$, $\lambda_{11} = (0.4, 0.3)$;
- $CF_{12} = (0.7, 0.2)$, $\lambda_{12} = (0.5, 0.4)$; $CF_{13} = (0.8, 0.2)$,
- $\lambda_{13} = (0.4, 0.5)$; $CF_{14} = (0.6, 0.3)$, $\lambda_{14} = (0.4, 0.5)$;
- $CF_{15} = (0.8, 0.1)$, $\lambda_{15} = (0.5, 0.3)$; $CF_{16} = (0.7, 0.2)$,
- $\lambda_{16} = (0.4, 0.4)$; $CF_{17} = (0.8, 0.2)$, $\lambda_{17} = (0.4, 0.3)$.

Pentru a identifica ruta către nodul destinație n_{12} , nodul sursă n_1 va seta pachetul RREQ cu gradul de încredere $\theta_1 = (1, 0)$ și va trimite copiile acestui pachet către nodurile vecine n_2, n_3 și n_4 . La recepția pachetelor RREQ, fiecare nod n_j evaluează para-metrii săi QoS și aplică mecanismul de inferență fuzzy pentru a estima factorul de certitudine $CF_j = (C\mu_j, C\gamma_j)$. Utilizând relația (4) este calculat și pragul de validare $\lambda_j = (\alpha_j, \beta_j)$. Fiecare nod n_j intermediar adaugă valorile CF_j și λ_j la pachetul RREQ înainte de al redirecționa către nodurile vecine la următorul salt. Astfel, prin pachetele RREQ recepționate de la toate celelalte noduri, nodul destinație n_{12} colectează informațiile despre starea curentă a rețelei MANET și va executa algoritmul ARC. În acest algoritm, nodul destinație n_{12} estimează valorile $\theta_j = (\mu_j, \gamma_j)$ ale fiecărui nod n_j din rețea și va urma ruta cu nodurile ce au valori μ_j mai mari, iar γ_j au valori mai mici.

Cum deja s-a menționat, toate tranzițiile validate ale unui model RPFİ de către marcajul current $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$ se vor declanșa concomitent în paralel, iar jetoanele nu vor fi îndepărtate din locațiile de intrare la ele.

În modelul RPFİ $\tilde{r}5$ din Fig. 6 mulțimea tranzițiilor validate de către marcajul inițial θ^0 este $T(M0) = \{t_1, t_2, t_3\}$, adică avem $\theta^0[T(M0)] >$. Ca rezultat al declanșării tranzițiilor $T(M0)$, obținem un nou marcaj θ^1 , adică $\theta^0[T(M0)] > \theta^1$ cu:

$$\theta_1^1 = (1, 0), \theta_2^1 = (0.8, 0.1), \theta_3^1 = (0.9, 0.1), \\ \theta_4^1 = (0.7, 0.2), \theta_j^1 = (0, 1), j = 5, 6, \dots, 12.$$

Marcajul θ^1 validează încă o nouă mulțime de tranziții $T(M1) = \{t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9\}$ și la declanșarea acestora obținem un nou marcaj θ^2 cu:

$$\theta_1^2 = \theta_1^1, \theta_2^2 = \theta_2^1, \theta_3^2 = \theta_3^1, \theta_4^2 = \theta_4^1, \\ \theta_5^2 = (0.56, 0.28), \theta_6^2 = (0.81, 0.19), \theta_7^2 = (0.64, 0.19), \\ \theta_8^2 = (0.63, 0.28), \theta_j^2 = (0, 1), j = 9, 10, \dots, 12.$$

La rândul său, marcaj θ^2 validează încă o nouă mulțime de tranziții $T(M2) = \{t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}\}$ și la declanșarea acestora este accesibil marcajul θ^3 cu:

$$\theta_1^3 = \theta_1^2, \theta_2^3 = \theta_2^2, \theta_3^3 = \theta_3^2, \theta_4^3 = \theta_4^2, \theta_5^3 = \theta_5^2, \\ \theta_6^3 = \theta_6^2, \theta_7^3 = \theta_7^2, \theta_8^3 = \theta_8^2, \theta_9^3 = (0.567, 0.352),$$

$\theta_{10}^3 = (0.448, 0.352), \theta_{11}^3 = (0.504, 0.352), \theta_{12}^3 = \theta_{12}^2$. Acest nou marcaj validează o nouă mulțime de tranziții $T(M3) = \{t_{15}, t_{16}, t_{17}\}$ și la declanșarea lor obținem marcajul final $\theta^3[T(M0)] > \theta^4$ cu:

$$\theta_1^4 = \theta_1^3, \theta_2^4 = \theta_2^3, \theta_3^4 = \theta_3^3, \theta_4^4 = \theta_4^3, \\ \theta_5^4 = \theta_5^3, \theta_6^4 = \theta_6^3, \theta_7^4 = \theta_7^3, \theta_8^4 = \theta_8^3, \theta_9^4 = \theta_9^3, \\ \theta_{10}^4 = \theta_{10}^3, \theta_{11}^4 = \theta_{11}^3, \theta_{12}^4 = (0.4536, 0.416).$$

Deoarece toate tranzițiile validate au fost declanșate și la următoarea iterație noul marcaj θ^5 obținut este egal cu cel precedent, adică avem $\theta^5 = \theta^4 = (\mu_j^4, \gamma_j^4)$, $j = 1, 2, \dots, 12$, oprim procesul de calcul. În marcajul $\theta^4 = (\mu^4, \gamma^4)$ componența μ^4 , (resp. γ^4), reprezintă valorile de încredere, (resp. *respingere*), ale tuturor nodurilor MANET1.

Pentru valorile NFI ale parametrilor considerați în exemplul modelului $\tilde{r}5$ din Fig. 6 determinăm:

$$\mu^4 = (1, 0.8, 0.9, 0.7, 0.56, 0.81, 0.64, \\ 0.63, 0.567, 0.448, 0.504, 0.4536) \text{ și} \\ \gamma^4 = (0, 0.1, 0.1, 0.2, 0.28, 0.19, 0.19, \\ 0.28, 0.352, 0.352, 0.352, 0.416).$$

Trasarea rutei cea mai fiabilă. În baza marcajului final θ^4 al modelului RPFİ $\tilde{r}5$ identificăm ruta de comunicație fiabilă cu cel mai înalt grad de încredere după cum urmează:

1) Din nodul destinație n_{12} găsim nodul n_j lui adiacent pentru care câștigul gradului de încredere în marcajul final θ^4 al $\tilde{r}5$ este cel mai înalt;

2) Pentru nodul n_j astfel identificat, determinăm din nodurile lui adiacente nodul n_l pentru care câștigul gradului de încredere în marcajul final θ^4 al $\tilde{r}5$ este, de asemenea, cel mai înalt;

3) Repetăm acest proces până când vom identifica nodul sursă.

În cazul nostru, pentru MANET1 din Fig. 5, cea mai fiabilă rută de transmitere a pachetelor de la nodul sursă n_1 către cel de destinație n_{12} , astfel identificată, este ruta: $n_1 \rightarrow n_3 \rightarrow n_6 \rightarrow n_9 \rightarrow n_{12}$.

Valoarea de încredere a acestei rută este:

$$\theta_{12}^4 = (0.4536, 0.416).$$

Această rută, astfel identificată, este transmisă de către nodul destinație către nodul sursă printr-un pachet RREP.

Procesul de recuperare a rutei. În cazul apariției unor evenimente imprevizibile în MANET, metoda descrisă în această lucrare oferă posibilitatea de a recupera rapid o altă rută față de

cea anterior stabilită. De exemplu, legătura dintre nodurile n_6 și n_9 este întreruptă din cauza mobilității unuia dintre aceste noduri și astfel, ruta anterior stabilită de la sursă către destinație este deconectată. În acest caz nodul destinație va stabili următoarea rută care are cea mai mare valoare a gradului de încredere. În cazul exemplului considerat, ruta alternativă stabilită este: $n_1 \rightarrow n_2 \rightarrow n_7 \rightarrow n_{10} \rightarrow n_{12}$.

Menționăm că metoda propusă este o extindere a protocolului AODV [11], combinată cu aplicarea suplimentară a ARC în baza modelelor de RPFI, fără a utiliza pachete suplimentare de control la rutarea pachetelor obișnuite.

Complexitatea metodei de rutare. La monitorizarea, fiecare dintre r noduri colectează un număr q de date de la nodurile vecine prin pachetele HELLO, deci complexitatea de calcul în timp este $O(r \times q)$. La recepția pachetului RREQ, cerere stabilire rută, nodul evaluează parametrii QoS, deci complexitatea de calcul în timp este $O(m \times f^l)$, aici m , f și l sunt respectiv numărul de tranziții, NFI și parametri QoS. Complexitatea de calcul în timp și spațiu a algoritmului ARC este respectiv $O(r \times m \times k)$ și $O(r \times m \times u)$, unde k este numărul de iterații, iar u - numărul de matrice.

5. CONCLUZII

În lucrare este propusă o metodă unificatoare de evaluare nuanțată a valorilor indicatorilor de încredere QoS ai nodurilor și de rutare fiabilă a pachetelor în MANET, bazată pe modele RPFI. Sunt introduse mecanisme de identificare și de recuperare a rutei cele mai fiabile de transmitere a pachetelor prin noduri de încredere, utilizând un algoritm ARC pe modelul RPFI al MANET.

Este analizată din punct de vedere teoretic complexitatea de calcul în timp și spațiu a metodei propuse, care permite de a obține o rută fiabilă cu o bună productivitate și durată de livrare a pachetelor prin noduri intermediare de încredere cu suficientă energie și lățime de bandă. În acest context, este prezentat și analizat numeric un model concret de RPFI al unei MANET cu specificarea nuanțată a parametrilor QoS ce sunt NFI triunghiulare.

Lucrarea dată a fost efectuată în cadrul Proiectului Național de Cercetări Științifice Aplicative 15.817.02.28A din Republica Moldova.

Bibliografie

1. **Atanassov, K. T.** *Intuitionistic fuzzy sets. Fuzzy Sets and Systems*, vol. 20, pp. 87-96, 1986.

2. **Bindu, C.S., Nageswararao, S.** *Weightage based trusted QoS protocol in Mobile Ad-hoc Net-works. IEEE Global Conf. on Wireless Computing and Networking (GCWCN)*, pp.283-287, 2014.

3. **Fryc, B., Pancarz, K., Peters, J. F., Suraj, Z.** *On fuzzy reasoning using matrix representation of extended fuzzy Petri nets. Fund. Informat.*, vol. 60, no. 1-4, pp. 143-157, 2004.

4. **Govindan, K., Mohapatra, P.** *Trust Computations and Trust Dynamics in Mobile Ad-hoc Networks: A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.14, No.2, pp.279-298, 2012.

5. **Ju, L., Sha, E.H., Xia H., Jia, Z.** *Trust prediction and trust based source routing in mobile ad hoc networks. Ad Hoc Networks Elsevier*, Vol. 11, No. 7, pp. 2096-2114, 2013.

6. **Meng, F., Lei, Y., Zhang, B., Shen, X., Zhao, J.** *Intuitionistic Fuzzy Petri Nets for Knowledge Representation and Reasoning. Journal of Digital Information Management*, Vol. 14 No. 2, pp. 104-113, April 2016.

7. **Murata, T.** *Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. Proceedings of the IEEE*, vol.77, no.4, pp.541-580, 1989.

8. **Nageswararao, S., Bindu, C.S.** *Uncertain Rule Based Fuzzy Logic QoS Trust Model in MANETs. International Conference on Advanced Computing and Communications-ADCOM*, pp.55-60, 2015.

9. **Sirisala, N. R., Bindu, C. S.** *A Novel QoS Trust Computation in MANETs Using Fuzzy Petri Nets. International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, Vol.10, No.2, 2017.

10. **Shabut, A.M., Dahal, K.P., Bista, S. K.** *Recommendation Based Trust Model with an Effective Defence Scheme for MANETs. IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.14, pp. 2101-2115, 2015.

11. **Sridhar, S., Ramachandran, B.** *Energy-and Trust-Based AODV for Quality of Service Affirmation in MANETs-ETQ. Artificial Intelligence and Evolutionary Algorithms in Engineering Systems*, Vol. 324, pp. 601-607, 2014.

12. **Wang, B., Chen, X., Chang, W.** *A light-weight trust-based QoS routing algorithm for Ad-hoc networks. Journal of Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 13, pp.164-180, 2014.

13. **Xia, M., Xu, Z., Zhu, B.** *Some issues on intuition-nistic fuzzy aggregation operators based on Archimedean t-conorm and t-norm. Knowl. Based. Syst.*, vol. 31, pp. 78-88, Jul. 2012.

14. **Yu Z., Fu, X., Cai, Y., Vuran, M. C.** *A Reliable Energy-Efficient Multi-Level Routing Algorithm Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Petri Nets. Sensors*, no. 11, pp. 3381-3400, 2011.

Recomandat spre publicare: 04.07.2017.