

تقييم أداء استراتيجيتي التوجيه في الشبكات الساتلية ذات الطبقة الواحدة LEO

د. م. عادل خضور علي *

د. م. محمد ميهوب **

م. ربيع الجهني ***

(تاريخ الإيداع 2022/4/18 . قُبِلَ للنشر في 2022/5/19)

□ ملخص □

أصبحت الاتصالات الفضائية تلعب دوراً هاماً في بنية شبكات الاتصالات الشخصية وذلك بسبب تفوقها على الشبكات الأرضية بمساحة التغطية وعرض المجال المتاح، وتعد المنظومات الساتلية ذات المدار المنخفض (LEO) Low Earth Orbit الأهم في هذا النوع من الاتصالات، وذلك بفضل ما تتميز به من تأخير منخفض وضياح أقل في الاستطاعة.

تبرز أهمية خوارزميات التوجيه وتأثيرها بشكل كبير على الأداء في شبكات الاتصالات الساتلية LEO بسبب الحركية الدائمة والعدد الكبير نسبياً من السوائل وذلك من ناحية متوسط التأخير ومتوسط حمل حركة مرور البيانات تبعاً للاستراتيجية المتبعة. في هذا البحث قمنا بتقييم أداء استراتيجيتي التوجيه بالعقدة الافتراضية virtual node والطوبولوجيا الافتراضية virtual topology ومناقشة النتائج.

الكلمات المفتاحية: الشبكات الساتلية، استراتيجيات التوجيه، المدارات المنخفضة (LEO)، العقدة الافتراضية، الطوبولوجيا الافتراضية.

* أستاذ في قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

** مدرس في قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

*** طالب ماجستير في هندسة الاتصالات في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

Performance Evaluation of two routing strategies in Low Earth Orbit (LEO) satellite networks

Dr. Adel Khadour Ali ^{*}
Dr. mohammed mayhoub ^{**}
ENG. Rabee aljohni ^{***}

(Received 18 / 4/ 2022 . Accepted 19/5 / 2022)

□ ABSTRACT □

Satellite communications have become an important role in the structure of personal communications networks because of their superiority over terrestrial networks in terms of coverage and available bandwidth. Low Earth Orbit (LEO) satellite systems are the most important in this type of communications, due to their smaller latency, lower free space loss. Because of mobility and the relatively large number of satellites, the importance of routing algorithms and their significant impact on performance in LEO satellite communication networks in terms of average delay and average traffic load depending on the strategy followed. In this paper, we evaluate the performance of the default node and virtual topology routing strategies and discuss the results.

Key words: satellite networks, routing strategies, low orbits (LEO), virtual node, virtual topology.

*Professor in the Department of Communications and Electronics Engineering at the Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University

**Teacher in the Department of Communications and Electronics Engineering at the Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University.

***MSc - Communications Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Damascus University .

1- مقدمة:

امتد نشاط الإنسان مع التطور المتسارع في التقنيات الفضائية ليشمل الفضاء الخارجي. ومع تطور الشبكات العالمية وزيادة الطلب على المعلومات أصبحت الاتصالات الأرضية غير قادرة على تلبية الطلب المتزايد على المعلومات ونقلها لذلك حظيت شبكات الاتصالات الفضائية بقدر متزايد من الاهتمام البحثي. تعتبر الاتصالات الفضائية مثالية من أجل الاتصالات بعيدة المدى حيث لا يمكنها التغلب على القيود الجغرافية فقط بل يمكنها توفير قناة اتصال غير مكلفة ومستقرة وموثوقة [1]. ويمكن باختصار تعريف الشبكات الفضائية بأنها نظام من أجل تحصيل ومعالجة ونقل المعلومات بالزمن الحقيقي اعتماداً على محطات فضائية [2]. والاتصال الفضائي أو الساتلي بين محطتين أرضيتين أو أكثر هو استخدام الساتل كمحطة لإعادة توجيه ونقل الموجات الكهرومغناطيسية. تتألف شبكات الاتصالات الفضائية من ساتل أو عدة سواتل متوضعة على شكل كويكب حول الأرض توفر خدمات اتصال لمختلف المهام الفضائية [3] [4].

تختلف شبكة الاتصال الفضائية عن الأرضية فهي تعاني من [5]:

- تأخير ملحوظ

- فقدان الإرسال بشكل متكرر

- التغير الديناميكي للبنية الطوبولوجية للشبكة.

وتلعب تقنية التوجيه المستخدمة في الشبكة الساتلية دوراً رئيساً في تحديد كفاءة ووثوقية أداء الشبكة، ولذلك فإن تصميم وتطوير خوارزميات توجيه لتوفير مسار إرسال موثوق للبيانات من أهم مواضيع البحث في هذا المجال ويتم حساب المسارات الأمثلية في الشبكات الساتلية المؤلفة من العديد من السواتل اعتماداً على بارامترات الوصلة ومتطلبات جودة الخدمة (QoS) Quality of Service.

2- أهداف البحث:

يهدف البحث إلى دراسة وتقييم استراتيجيات التوجيه بالعقدة الافتراضية من خلال خوارزمية التوجيه الاحتمالي منخفضة التعقيد Low-complexity Probabilistic Routing Algorithm (LCPR) واستراتيجية بالطوبولوجيا الافتراضية من خلال خوارزمية توجيه الكشف الديناميكي Dynamic Detection Routing Algorithm (DDRA) وتقييم أدائهما من ناحية التأخير والإنتاجية ومعدل الفقد ودرجة تعقيد كل منهما.

3- طرائق وموارد البحث:

سيتم في هذا البحث التطرق إلى مكونات المنظومات الساتلية وأنواع المدارات في المنظومات الساتلية وخاصة المدارات ذات الارتفاعات المنخفضة من ميزات وخصائص وأهم المنظومات العاملة بها وبشكل خاص منظومة Iridium، دراسة استراتيجيات التوجيه في الشبكات الساتلية ذات الطبقة الواحدة، دراسة خوارزمياتي LCPR و DDRA وتقييم الخوارزميتين.

3-1 التوجيه في الشبكات الساتلية:

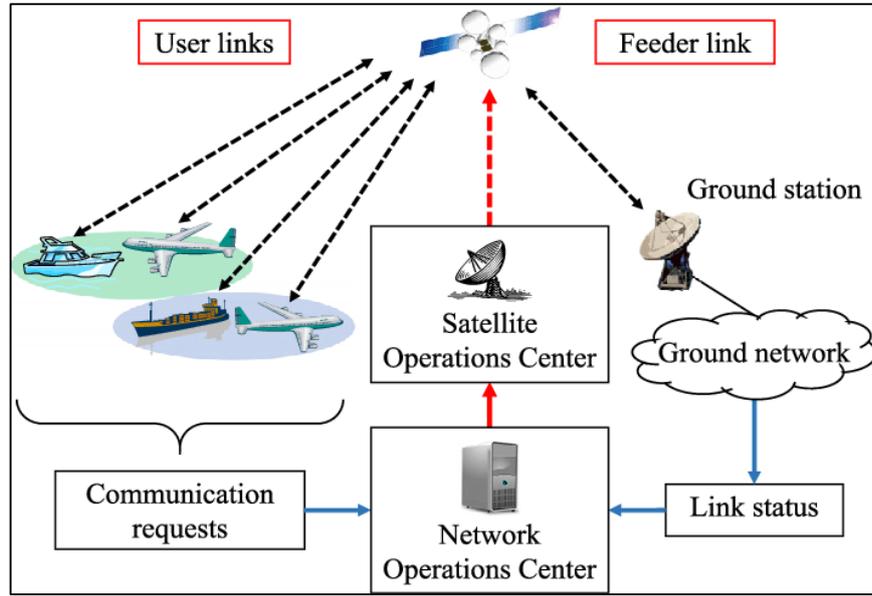
3-1-1 مكونات النظام العامة:

يبين الشكل (1) مكونات المنظومة الساتلية وهي:

1- القسم الفضائي: يضم واحد أو أكثر من السواتل الفعالة والاحتياطية المرتبة على شكل كويكب.

2- قسم التحكم: ويضم نظم التحكم بالسائل والملاحقة والمتابعة وكذلك التحكم بالاتصالات وتوجيهها انطلاقاً من محطات أرضية.

3- القسم الأرضي: يضم بشكل أساسي إدارة الاتصالات على الأرض وتخصيصها وتوجيهها [6].



الشكل (1) مكونات المنظومة الساتلية

2-3 أنواع المدارات في الشبكات الساتلية:

يمكن تصنيف مدارات السواتل تبعاً للمسافة بين السائل وسطح الأرض إلى ثلاثة أصناف [4]:

- المدار المتزامن مع الأرض GEO
- المدار ذو الارتفاع المتوسط MEO
- المدار ذو الارتفاع المنخفض LEO

تتوضع السواتل في LEO على مدارات بارتفاع بين 500-1500 km فوق سطح الأرض، وتمتاز عن سواتل GEO بزمان الانتشار المحدود والذي يبلغ حوالي 20 ms وشدة إشارة أعلى بكثير من إشارة سائل GEO من أجل نفس استطاعة الإرسال، ولكن من مساوئ سواتل LEO هو تعرّض الإشارة المنتشرة إلى انزياح ترددي كبير نتيجة ظاهرة دوبلر.

أهم خصائص هذه السواتل:

1. يتراوح زمن الدورة الواحدة حول الأرض للسائل من ساعة ونصف إلى ساعتين.
2. يبلغ نصف قطر مساحة التغطية للسائل 8000 km.
3. يبقى السائل ظاهراً لمدة زمنية لا تتعدى 20 دقيقة.

ولأجل تغطية الكرة الأرضية بشكل كامل وعلى مدار الساعة يلزم العديد من السواتل، وقد جرى استخدام مدارات LEO لنشر عدة منظومات اتصال تغطي الكرة الأرضية لأغراض متنوعة بما فيها خدمات الاتصال الصوتي.

يتطلب الاستخدام العملي لهذه المنظومة عدة مدارات، كل مدار يتضمن عدد من السواتل، ويتطلب تحقيق اتصال بين محطتين أرضيتين تسليم الإشارات من سائل لآخر.

3-3 أنواع التوجيه في الشبكات الساتلية:

يمكن تقسيم التوجيه في الشبكات الساتلية بحسب البنية إلى ثلاثة أنواع [7] [5]:

- التوجيه الحدودي Boundary Routing: التكامل بين الشبكات الأرضية والساتلية يتطلب تطوير بروتوكولات توجيه حدودية من أجل تفعيل إمكانية التشغيل البيئي السلس بين هذه الشبكات.
- توجيه الوصول Access Routing: مسؤول عن وصول مستخدمي الهواتف النقالة والمحطات القاعدية إلى السواتل. يتم اختيار الساتل المسؤول عن توجيه الوصول بحيث تتم مراعاة زمن التأخير وقوة الإشارة.
- التوجيه الخارجي On-board Routing: المقصود هو التوجيه في القسم الفضائي وهو الجزء الأهم والأصعب في تقنية التوجيه في الشبكات الساتلية، ويتم البحث عن أفضل المسارات بين العقدة المرسله والعقدة الوجهة بما يتماشى مع معايير جودة الخدمة.

قبل البحث عن بروتوكول توجيه يجب حل مشكلة تغير الطوبولوجيا المستمر وبالتالي تقنية التوجيه عبارة عن استراتيجية تواكب التغير المستمر في الطوبولوجيا.

تختلف تقنيات التوجيه المستخدمة في الشبكات الساتلية بحسب البنية تبعاً لعدد الطبقات، وسنركز في البحث على الشبكات ذات الطبقة الواحدة LEO التي تعتمد على إحدى التقنيتين التاليتين:

3-3-1 التوجيه المعتمد على الطوبولوجيا الافتراضية:

تقوم استراتيجية التوجيه اعتماداً على الطوبولوجيا الافتراضية على تقسيم الفترة الزمنية إلى عدد من الشرائح الزمنية المحددة بزمن بداية وزمن نهاية على الشكل التالي

$$[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{n-1}, t_n]$$

يمكن تمثيل الشبكة المتغيرة في كل شريحة زمنية كشبكة ثابتة الطوبولوجيا خلال الزمن $[t_{i-1}, t_i]$ ، عند ذلك يحدث الاتصال وقطع الاتصال في لحظات زمنية منقطعة t_1, t_2, \dots, t_n ويتم حساب المسارات باستخدام الطوبولوجيا الافتراضية في هذه اللحظات.

وأهم الخوارزميات المعتمدة على هذه الاستراتيجية [5] [6] [7]:

- DT-DVTR (Dynamic Virtual Topology Routing)
- CEMR (Compact Explicit Multi-path Routing)
- ELB (Explicit Load Balancing)
- DDRA (Dynamic Detection Routing Algorithm)

مع الأخذ بعين الاعتبار التطوير والتحسين على هذه الخوارزميات وفق التسلسل السابق من ناحية مراعاة زمن الانتشار وزمن تأخير الانتظار في الرتل للعقدة الهدف والتعامل مع الحالات المفاجئة من اختناق في الرتل أو سقوط الوصلة.

إلا أن هذه الاستراتيجية تقود إلى مشكلة الحاجة إلى مساحة تخزينية كبيرة حيث يتم تقسيم دورة النظام إلى عدد كبير من الشرائح الزمنية، ويضاف إلى ذلك استمرار صعوبة الموائمة عند تغير دفق البيانات أو حدوث اختناق بالوصلة أو الإرسال بالزمن الحقيقي.

3-3-2 التوجيه اعتماداً على العقدة الافتراضية:

يتم تحديد الموقع الجغرافي للساتل S بواسطة $[lonS, latS]$ ، واللذان يشيران إلى خط الطول وخط العرض لموقع الساتل S على التوالي ونفترض، أن سطح الأرض بالكامل مغطى بمواقع منطقية للسواتل، والذي يتم ملؤه بواسطة أقرب ساتل. حيث يتم تجسيد كل موقع منطقي في أي وقت بواسطة ساتل فعلي معين. عندما يختفي ساتل

عبر الأفق، يتم تمثيل موقعه السابق بواسطة السائل التالي الذي يمر فوق الأفق ويتم نقل معلومات الحالة (مثل إدخالات جدول التوجيه أو معلومات تخصيص القناة) إليه.

يتم اتخاذ قرار التوجيه بناءً على هذا الهيكل الظاهري الثابت، وبالتالي يتم عزل طبقة الشبكة عن ديناميكية كوكبة السائل. بهذه الطريقة، ليس من الضروري النظر في تحركات السوائل.

وأهم الخوارزميات المعتمدة على هذه الاستراتيجية [5] [6] [7]:

- LZDR (Localized Zone Distributed Routing)
- DRA (Datagram Routing Algorithm)
- LCPR (Low – Complexity Probabilistic Routing Algorithm)

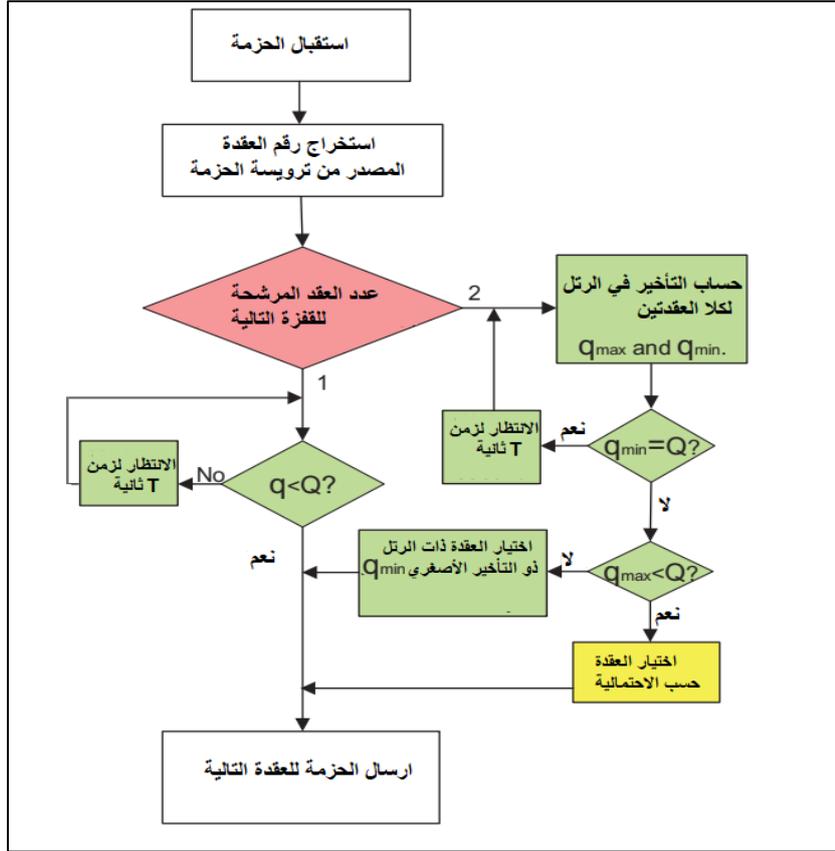
مع الأخذ بعين الاعتبار التطوير والتحسين على هذه الخوارزميات وفق التسلسل السابق من ناحية مراعاة زمن الانتشار وتقليل تعقيد آلية عمل الخوارزمية ومراعاة الاختناقات في العقد.

3-4 خوارزمية التوجيه الاحتمالي منخفضة التعقيد LCPR:

وبما أن أغلب النماذج الموزعة تركز عادةً على كيفية اعتماد خوارزميات التوجيه الأرضي لشبكة المدار الأرضي المنخفض LEO . والتي تقوم بتنفيذ الخوارزميات باستخدام خوارزميات المسار الأقصر التقليدية Dijkstra ، الأمر الذي يؤدي إلى قدر كبير من العمليات الحسابية والتعقيد.

وعليه من أجل تخفيف التعقيد وتحقيق التوازن بين التأخير من طرف إلى طرف ومعدل خسارة الرزمة، تم اقتراح خوارزمية التوجيه الاحتمالي منخفضة التعقيد LCPR التي تعتمد على موازنة الحمل لشبكة ساتلية في المدار الأرضي المنخفض LEO تتمثل الطريقة الرئيسية لـ LCPR في استخدام استراتيجية العقدة الافتراضية [8].

تتألف خوارزمية التوجيه الاحتمالي منخفض التعقيد من المراحل التالية:



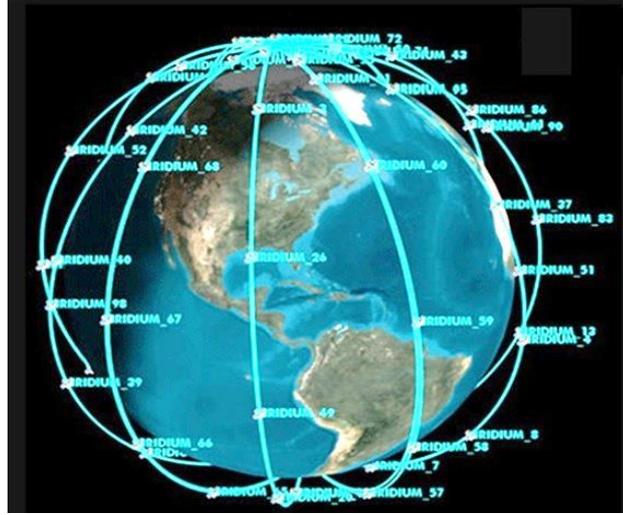
الشكل (2) المخطط التدفقي للخوارزمية

3-4-1 التوجيه واختيار القفزة التالية:

يمكن الحصول على القفزات التالية المرشحة وذلك وفقا لرقم الوجهة والذي يكون موجود في ترويسة الرزمة. بما أن عدد السوائل في المدار هو فردي وبالتالي يوجد مسار واحد فقط للاقتراب من الوجهة بالاتجاه الشاقولي. بعد استلام الرزمة، سيقوم السائل بتحليل معلومات من الترويسة والحصول على رقم الوجهة. من خلال حساب العلاقة بين الرقم المنطقي للعقدة الحالية والوجهة، من السهل معرفة الرقمين المنطقيين للقفزات التالية المرشحة. بفرض رقم العقدة الحالية N_c والعقدة الهدف N_d يمكن الحصول على القفزات التالية المرشحة من خلال العلاقات التالية:

إذا كانت $c/n < d/n$ ، فإن القفزة التالية المرشحة في الاتجاه الأفقي هي $c + n$. وإذا كانت $c \bmod n < n/2$ ، فإن القفزة التالية في الاتجاه الرأسي هي $(c + 1) \bmod n + \lfloor \frac{c}{n} \rfloor \times n$.

حيث n عدد السوائل في المدار الواحد وفي حالتنا 11 سائل كون النظام المعتمد هو *iridium*. كما مبين بالشكل (3) ويمكن حساب الحالات الأخرى بنفس الطريقة. وبالتالي يوجد لدينا قفزان مرشحتان واحدة في الاتجاه الشاقولي والأخرى في الاتجاه الأفقي.



الشكل (3) توضع وأرقام السوائل ضمن المدارات

يوجد حالات يكون لدينا قفزة مرشحة واحدة فقط:

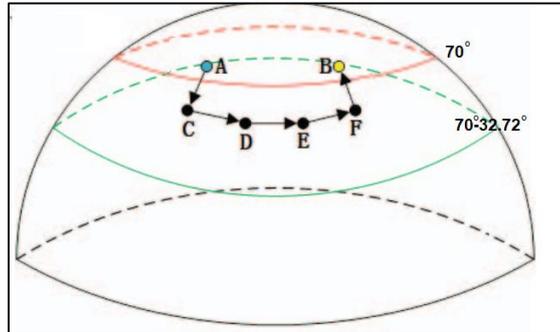
I. إذا كانت العقدة الحالية والوجهة في نفس مستوى المدار، فلا يوجد خيار سوى الاقتراب من الوجهة عمودياً.

II. إذا كانت العقدة الحالية والوجهة في نفس الموضع النسبي لمستويات مدار مختلفة خارج المنطقة القطبية، فإن الرزمة ستقترب من الوجهة أفقياً.

III. إذا كانت العقدة الحالية في منطقة قطبية، فسوف تنتقل الرزم إلى العقدة المجاورة ذات خط العرض الأدنى ويكون ذلك في الاتجاه الشاقولي.

IV. ، إذا كانت الوجهة في المنطقة القطبية والعقدة الحالية في المنطقة الخاصة (حيث يكون خط العرض بين $70^\circ - \frac{360}{n}$ و 70° ، يجب أن تتحرك الرزمة أفقياً حتى تصل العقدة في نفس المستوى مع الوجهة.

على سبيل المثال ، في الشكل (4) الوجهة هي العقدة B. إذا وصلت الرزمة إلى العقدة الحالية A ، هناك قفزة تالية واحدة فقط (العقدة C) مع خط عرض أقل في الاتجاه الرأسي. ثم تصل الرزمة إلى العقدة C ويجب أن تتحرك أفقياً نحو الوجهة. هذا هو نفسه بالنسبة للعقدة D والعقدة E. عندما تصل الرزمة إلى العقدة F في نفس المستوى مع الوجهة ، يجب أن تتحرك عمودياً بالقرب من العقدة B. أخيراً ، تصل إلى الوجهة



الشكل (4) مثال عن حالة خاصة

3-4-2 آلية الإبلاغ:

تبنى آلية الإبلاغ لكل عقدة ساتلية لإرسال رسالة قائمة بانتظار إلى العقد المجاورة لها كل T ثانية، تمثل رسالة قائمة الانتظار رزمة ذات أولوية عليا حيث لا تحتوي ترويسة الرزمة إلا على دلالة على نوعها ويمثل الحمل الخاص بها عدد الرزم المنتظرة q_i في قائمة انتظار العقدة N_i . تستقبل العقدة الساتلية N_i أربعة رسائل تمثل قوائم الانتظار في العقد المجاورة لها ويمكن الإشارة لها بحسب جهتها وفق ما يلي:

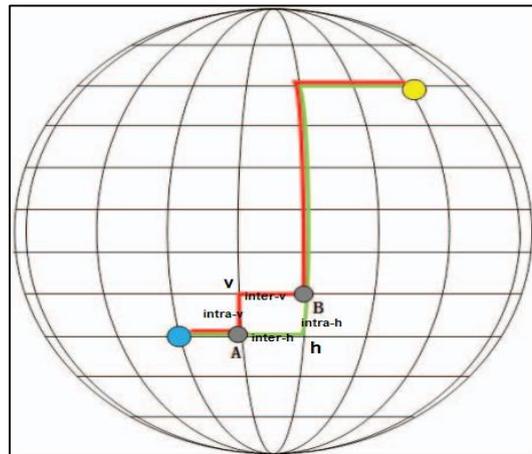
$$q_{i-up}, q_{i-}, q_{i-down}, q_{i-}$$

لدينا $q \leq L$ حيث L حجم قائمة الانتظار. إذا كان هناك عقدة مرشحة وحيدة للقفزة التالية يتم اختبار الشرط $q < L$ وفي حال تحققه يتم إرسال الرزمة إلى العقدة المرشحة فيما عدا ذلك يتم الانتظار لمدة T ثانية واختبار الشرط مرة أخرى وهكذا.

في حالة وجود اثنتين من العقد المرشحة تتم المقارنة بين عدد الرزم المنتظرة في قائمة انتظار كل من العقدتين ويتم الإشارة بـ q_{min} للعدد الأصغر وتشير q_{max} للعدد الأكبر أي أن $q_{min} \leq q_{max} \leq L$. في حال كانت $q_{min} = q_{max} = L$ فإن قائمة الانتظار في كلتا العقدتين المرشحتين تكون ممتلئة، وبالتالي يتم انتظار T ثانية قبل المقارنة مجدداً. أما في حالة $q_{min} < L$ يتم اختيار العقدة المرتبطة بـ q_{min} كعقدة القفزة التالية و يتم إرسال الرزمة لها. في حال تحقق الشرط $q_{min} \leq q_{max} < L$ أي أن قائمة الانتظار في كلتا العقدتين المرشحتين بها شاغر فإن اختيار عقدة القفزة التالية سيتم بحسب الاحتمال الذي يتم حسابه كما هو موضح في المرحلة التالية.

3-4-3 احتمالات القفزة التالية للعقد المرشحة:

إذا كانت هناك عدة قفزات تالية مرشحة يجب أن نحسب الاحتمال لتحديد القفزة التالية. لا يتم حساب التأخير كاملاً من العقدة الحالية إلى الوجهة وذلك لأن كل عقدة تقوم بحساب القفزة التالية فقط. إذا تم اختيار القفزة التالية عمودياً أو أفقياً N_v أو N_h فهناك مساران مختلفان على الأقل من العقدة الحالية إلى الوجهة. بفرض لدينا المسارين كما في الشكل (5) (المسار الأخضر والمسار الأحمر) يتم حساب التأخير اللازم للوصول للعقدة B.



الشكل (5) مثال لمسار ثابت

يمكن حساب التأخير الإجمالي بالمعادلات التالية:

$$T_{\text{تأخير الرتل}} + T_{\text{تأخير الانتشار}} = T_{\text{التأخير الكلي}} \quad (1)$$

يمكن الحصول على احتمالية P_v (في الاتجاه العمودي) و P_h (في الاتجاه الأفقي) للقفزة التالية المرشحة N_v, N_h في المعادلات التالية [8]:

$$\frac{P_v}{P_h} = \frac{T_p(\text{intra}) + T_p(\text{inter} - h) + T_q(h)}{T_p(\text{intra}) + T_p(\text{inter} - v) + T_q(v)} \quad (2)$$

حيث يشير T_p و T_q إلى تأخير الانتشار وتأخر قائمة الانتظار. بأخذ L_0 كطول الرزمة المنقولة و C كسعة القناة يمكن حساب تأخير قائمة الانتظار للمسارين يمكن حسابه كما تبين المعادلة التالية:

$$T_q(h) = \frac{q_h L_0}{V} \quad (3)$$

$$T_q(v) = \frac{q_v L_0}{V} \quad (4)$$

وعليه إذا كانت النسبة $\frac{P_v}{P_h}$ أكبر من 1 يتم اختيار الاتجاه الأفقي وإلا فيتم اختيار الشاقولي .

3-5 خوارزمية توجيه الكشف الديناميكي DDRA :

باعتبارها خوارزمية توجيه طوبولوجيا افتراضية، فإن مبدأ DDRA هو تقسيم فترة السائل إلى n شريحة زمنية أثناء الحالة العادية وكل طوبولوجيا يمكن ان تُقدم بلقطة زمنية واحدة.

المدة الزمنية بين شريحتين زمنيتين متجاورتين هي $\Delta t = \frac{T}{n}$ حيث T تمثل دور السائل. يتم تحميل طوبولوجيا جديدة كل $t = k\Delta t, k = 0, 1, \dots, n$ حيث تبقى هذه الطوبولوجيا غير متغيرة خلال فترة زمنية بين $[k\Delta t, (k+1)\Delta t]$.

نعرف الطوبولوجيا خلال اللحظة الزمنية k بالمخطط $G(K)$ (graph) وتكلفة الوصلة بين العقدتين i, j ك $c_{i,j}^k(t)$ وعليه، يجب أن يفي طول Δt بالشروط التالية:

- يجب أن تعكس $G(K)$ بدقة طوبولوجيا الشبكة خلال الشريحة الزمنية الحالية.
- صغيرة بحيث تكون تكلفة الوصلة خلال الزمن $t \in [K\Delta t, (K+1)\Delta t]$ تحقق:
$$(c_{i,j}^k(t) - c_{i,j}^k(k\Delta t)) < \varepsilon \quad (5)$$

ولكن من أجل تحقيق اختلاف صغير في تكلفة الوصلة، يجب أن تكون مدة الشريحة الزمنية صغيرة قدر الإمكان مما ينعكس على مساحة التخزين المطلوبة. وهنا لدينا تنازل عن ميزة مساحة التخزين الصغيرة مقابل تحقيق Δt الشروط المطلوبة.

كما تقترح DDRA حلاً للتغيير المفاجئ. حيث تتم المراقبة بشكل دوري لقائمة الانتظار الفرعية للإرسال وبمجرد أن يتجاوز عدد الرزم في قائمة الانتظار عتبة معينة Q يمكن اعتبار ان الوصلة الداخلية للسائل أصبحت مزدحمة مما يؤدي إلى زيادة حادة في تأخير الانتظار في قائمة الانتظار الجزئي.



الشكل(6): رتل الانتظار الجزئي عند المرسل

كل سائل على الأقل لديه رتلي انتظار جزئيين لنقل المعطيات كل منها بطول L بينما العتبة Q يجب ان تحقق $Q \leq L$ كما في الشكل(6) خلال المحاكاة يتم إدخال الرزم إلى ذيل الرتل الجزئي وتستخرج من رأس الرتل الجزئي، يتم تحديد مدة الانتظار في قائمة الانتظار لآخر رزمة في قائمة الانتظار الفرعية بالعلاقة [9]:

$$T = \frac{L_0}{V} \times q \quad (6)$$

حيث L_0 تمثل طول الرزمة الوسطي و V معدل نقل البيانات في الوصلة. q تحدد عدد الرزم المخزنة في الرتل الجزئي وعندما تصل q إلى أعلى قيمة تكون هي قيمة العتبة Q . يشير T إلى زمن التأخير حتى استخراج آخر رزمة من الرتل الجزئي وفقا للعلاقة السابقة نجد أن Q يمكن أن تكتب بالشكل [9]:

$$Q = T \times \frac{V}{L_0} \quad (7)$$

وفقا لما سبق تكون q عظمى عندما تكون V و T عظمى وتكون L_0 صغيرة. نظريا لا يمكن أن يكون طول الرسالة L_0 أصغر من طول معين. أما معدل البيانات V يختلف بحسب بيئات الإرسال المختلفة والذي يتعلق بشكل أساسي بخصائص الطبقة الفيزيائية وطبقة وصلة البيانات.

تكون T أكبر من أي تأخير لأية رزمة في هذا الرتل الفرعي وأعلى قيمة لـ T تمثل قيمة عتبة تأخير الرتل لهذه العقدة الساتلية الحالية تصبح T هي T_0 والتي تحدد عن طريق عدد القفزات خلال التوجيه والحد الأقصى للتأخير المسموح T_{max} والذي يعبر عنه بالعلاقة [10]:

$$T_{max} = \sum_{i=0}^M t_{i,switch} + t_{i,\alpha} \quad (8)$$

حيث $t_{i,switch}$ هو الزمن الذي تبقى فيه الرزمة في الساتل i و $t_{i,\alpha}$ هو زمن الانتشار بين الساتل i والساتل الذي يليه $i+1$. إذا كان زمن الانتشار والتأخير في المعالجة مهمل T_{max} يصبح متعلق فقط بزمن التأخير في الرتل وعليه:

$$T_0 = \frac{T_{max}}{M} \quad (9)$$

وفقاً للوائح الاتحاد الدولي للاتصالات ITU [10]، فإن القيمة النموذجية لـ T_{max} هي 500 مللي ثانية و M يتم الحصول عليها عادةً عن طريق المحاكاة. وعليه إذا كان $T \leq T_0$ نحصل على العتبة

$$q \leq Q = \frac{T_{max}}{M} \times \frac{V_{max}}{L_{min}} V_{max} \quad (10)$$

هو أعلى معدل نقل و L_{min} هو أقل قيمة لطول الرزمة.

عند حدوث تغيير مفاجئ أثناء عملية الاتصال والذي يتمثل بفشل الوصلة بين العقدة الحالية والعقدة التالية الأمر الذي يؤدي إلى فقدان كبير للبيانات. يمكن معالجة هذه المشكلة من خلال آلية التغذية الراجعة الدورية للحكم على ما إذا كانت الخطوة التالية فعالة أم لا. ومن أجل تخفيف عبء الإرسال بين الوصلات في السواتل، يجب أن تتوقف التغذية الراجعة بمجرد انتهاء الاتصال. تعتبر القفزة التالية خارج الخدمة مرة واحدة عندما لا تجيب على ثلاث رسائل استعلام متتالية.

عند اعتبار العقدة التالية غير قابلة للوصول يتم حذف هذه العقدة من طوبولوجيا الشبكة وإعادة حساب أقصر مسار من الساتل الحالي إلى الوجهة.

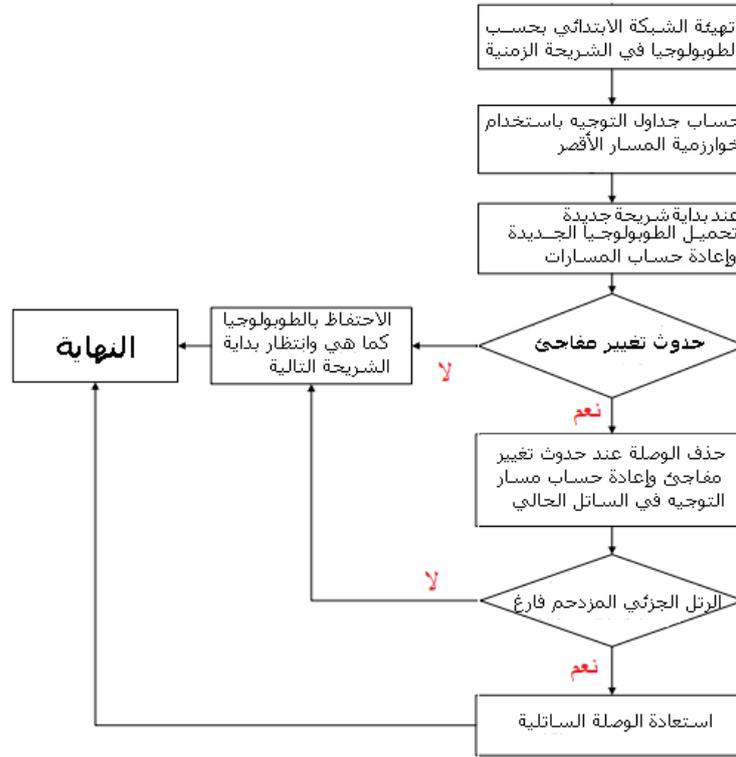
افترض أن جميع العقد والروابط تشكل بيان G يمكن باعتماد العقد $N_k (k = 0, 1, \dots, 66)$ والوصلات $E_{i,j} (i, j = 0, 1, \dots, 66)$ توصف كما يلي [5] [10]:

• تحميل طوبولوجيا الشبكة الموافقة للشريحة الزمنية وحساب جدول التوجيه وفقاً لذلك.

- المراقبة بشكل دوري لعدد رزم الانتظار في قائمة الانتظار الفرعية للإرسال وإرسال تنبيه إلى السوائل المجاورة. إذا تجاوز عدد رزم الانتظار العتبة Q أو فشل في تلقي ثلاث ردود من القفزة التالية، فيمكن القول أن الحافة $E_{i,j}$ لم تعد متصلة وحذفها من الرسم البياني.
- يتم تحديث البيان G بعد حذف الحافة $E_{i,j}$ وإعادة حساب أقصر مسار من السائل الحالي إلى السائل الوجهة.

- يراقب دورياً قائمة الانتظار الفرعية المزدحمة ويستعيد الحافة المحذوفة $E_{i,j}$ في الرسم البياني G في حال أصبح عدد الرزم في الرتل الجزئي أقل من العتبة Q . ونبين بالشكل (6) المخطط

التدفقي لخوارزمية DDRA



الشكل (6) المخطط التدفقي لخوارزمية DDRA.

4- النتائج والمناقشة:

تمت محاكاة الخوارزميات السابقة في بيئة NS2 بمساعدة برنامج SAVI، وتم استخدام نموذج نظام IRIDUM من خلال نشر 66 ساتل على 6 مدارات كما هو موضح بالجدول (1):

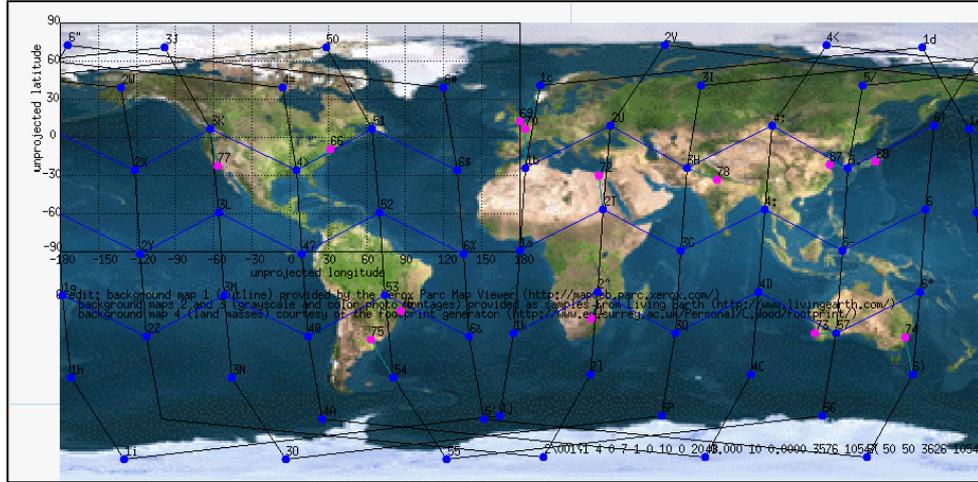
الجدول (1) بارامترات المنظومة [11]

Altitude	780 km
Planes	6
Satellites per plane	11
Inclination (deg)	86.4
Interplane separation (deg)	31.6
Seam separation (deg)	22
Elevation mask (deg)	8.2
Intraplane phasing	Yes
Interplane phasing	Yes
ISLs per satellite	4
ISL bandwidth	25 Mb/s
Up/downlink bandwidth	2 Mb/s
Cross-seam ISLs	No
ISL latitude threshold (deg)	60

محاكي NS2: يعتبر المحاكي غني جداً بالعديد من مكونات وبروتوكولات الشبكات والتي يتم التعبير عنها بشكل Object، ويرتكز في عمله داخلياً على لغتين هما ++C,OTCL. يحتوي NS2 على إضافات تمكن من محاكاة الشبكات الساتلية وتهدف هذه النماذج بشكل أساسي إلى دراسة جوانب الشبكات لمنظومات السواتل وعلى وجه الخصوص طبقة الارتباط وبروتوكولات التوجيه والنقل [9]. أداة SaVi: أداة إظهار السواتل لتصوير وتحريك حركة السواتل وتغطيتها. يتم تنفيذ SaVi كمحاكي مدار ساتلي، مكتوب بلغة C، والذي يتم تشغيله بواسطة لغة (TCL)

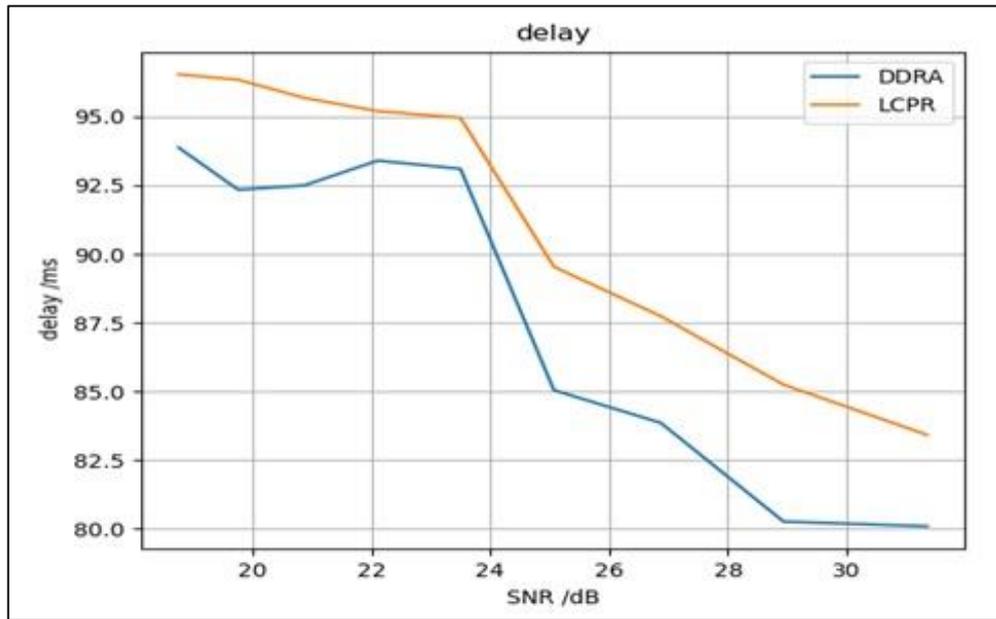
4-1 معاملات المحاكاة:

قمنا بتحديد سعة الوصلة للوصلة الصاعدة والهابطة و ISL بـ C=25 Mbps. حجم الرزمة 1 كيلوبايت، طول أرتال الانتظار 50، فترة تحديث رسالة قائمة الانتظار 5 ثوانٍ (T = 5 sec). لدينا 600 مستخدم موزعين على 6 مجموعات جزئية في ست مناطق قارية [12]، بإتباع توزيع مماثل لتوزيع الحركة المستخدمة في الشكل (7) نتبع توزيع باريتو بثابت يساوي 1.2. ويتم ضبط متوسط الرشقة ومتوسط وقت الخمول على 200 ميلي ثانية. نختار 6 أزواج من المصدر والوجهة ونقيس القيم ذات الصلة لتدفقات حركة المرور هذه. ترسل المحطات البيانات بمعدلات ثابتة من مجال 1.2 Mbps إلى 2 Mbps



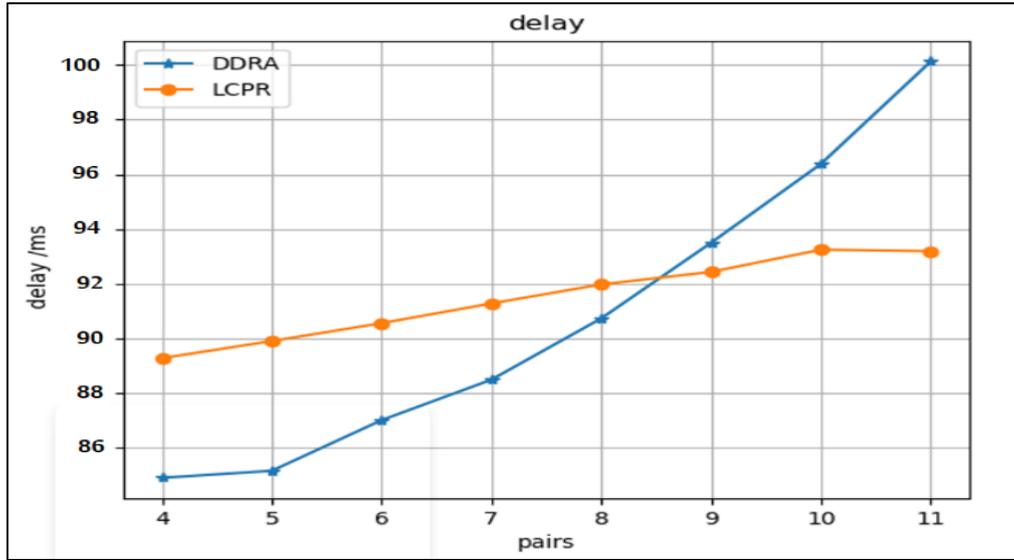
الشكل (7) توزيع المحطات الأرضية

من أجل قيم استطاعة الإشارة إلى الضجيج مختلفة SNR نلاحظ أن خوارزمية DDRA تتفوق على خوارزمية LCPR من ناحية التأخير طرف إلى طرف كما يبين الشكل (8) الذي يمثل تقييم لمنحني التأخير في الخوارزمتين مع زيادة معدل SNR والسبب أن الرزم تنحرف أحياناً عن أقصر المسارات في LCPR



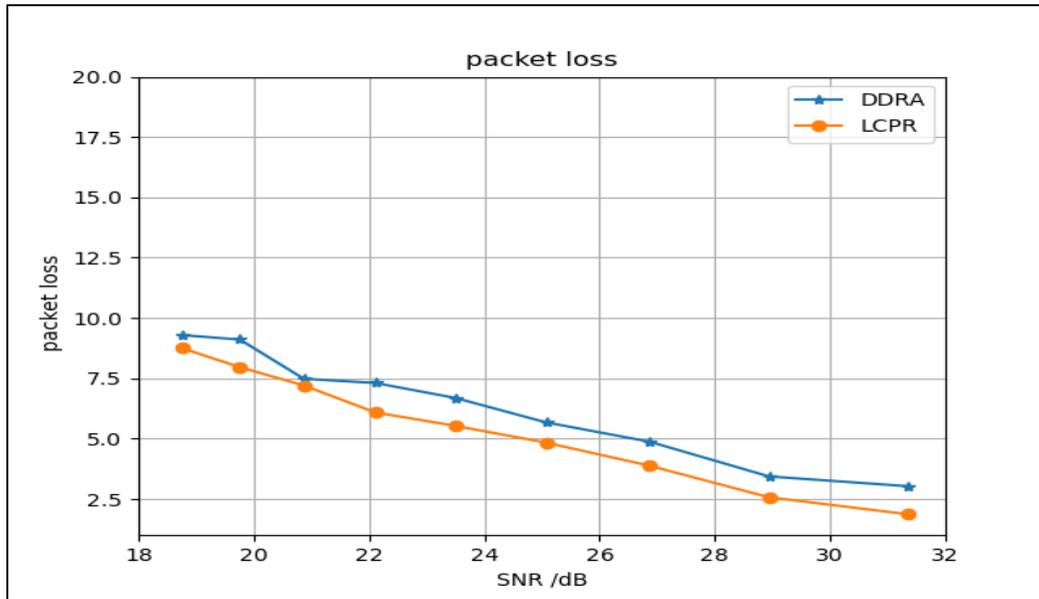
الشكل (8) التأخير مقابل SNR

عند زيادة عدد أزواج المصدر-الوجهة تدريجياً يمكن رؤية ميزة التأخير من طرف إلى طرف لـ LCPR. في الشكل (9) يرتفع متوسط التأخير من طرف إلى طرف لـ LCPR بشكل أبطأ من DDRA كلما زاد عدد أزواج المصدر والوجهة حيث أن معدل التأخير يكون أعلى في LCPR عند 6 أزواج مصدر - وجهة وتتبع النتيجة عند الارتفاع فوق 9 أزواج، يعود السبب إلى أن احتمالية أن تكون قائمة انتظار لكل عقدة مشغولة يزيد في DDRA.



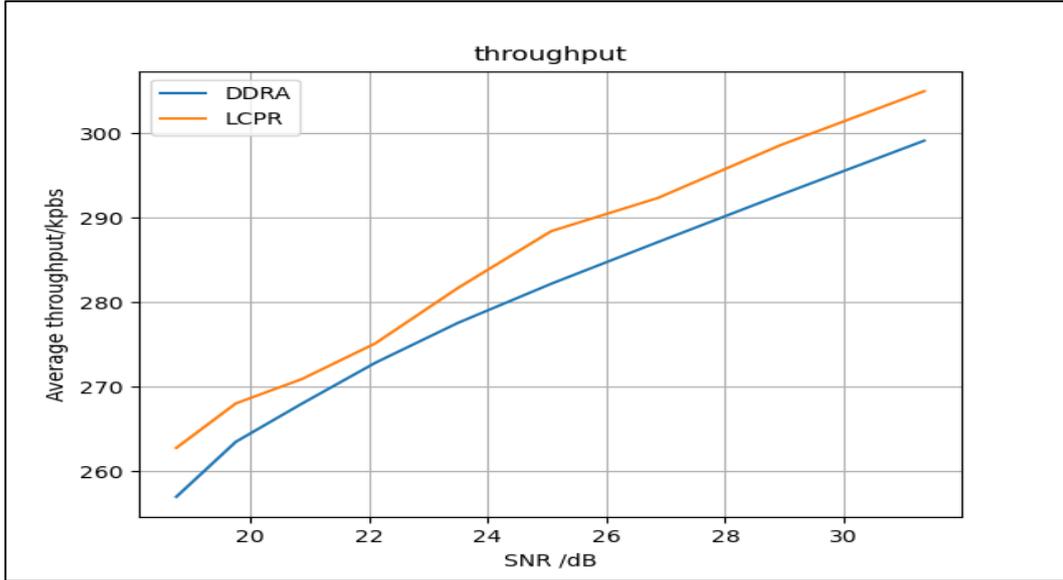
الشكل (9) التأخير مقابل عدد الأزواج

تنفوق LCPR في الأداء على DDRA من ناحية معدل فقدان الرزمة كما يبين الشكل (10) عند قيم SNR مختلفة وهذه ميزة مهمة لـ LCPR يعود السبب فيها إلى آلية الإعلام المستخدمة المسؤولة عن إيقاف إرسال الرزم عندما تكون قائمة انتظار القفزة التالية ممتلئة.



الشكل (10) معدل الفقد مقابل SNR

يشير الشكل (11) إلى ميزة إيجابية أخرى لـ LCPR في تحسين معدل النقل المفيد (الإنتاجية)، والسبب في ذلك أن LCPR يمكنها موازنة حمل المرور بشكل تكيفي من خلال الآليات المستخدمة لاعتماد احتمال تحديد القفزة التالية.



الشكل (11) معدل الإنتاجية مقابل SNR

التعقيد الزمني لخوارزمية LCPR هو $O(1)$ بينما يكون تعقيد DDRA هو $O(n^2)$ كونها تعتمد على خوارزمية Dijkstra في اختيار المسار الأقصر. كما تتميز LCPR بتقليل مساحة التخزين لأنها لا تحتفظ بجداول توجيه.

5- الاستنتاجات والتوصيات

قمنا في هذا البحث بدراسة شاملة لخوارزميتي توجيه في الشبكات الساتلية ذات الطبقة الواحدة متضمنة استراتيجيتي توجيه العقدة الافتراضية والطوبولوجيا الافتراضية وتمت تقييم أداء خوارزميتي LCPR و DDRA حيث قمنا بدراسة تفصيلية عن آلية عمل كل منهما وقمنا بتنفيذ الخوارزميتين على برنامج المحاكاة NS2 و SAVI ورأينا أن الخوارزميتان تتقاربان في الأداء ولكن تتميز LCPR بتعقيدها المنخفض وبالتالي تظهر تفوقاً في تحسين الأداء بشكل خاص في حالة المستخدمين على نطاق واسع large-scale users. ويمكن العمل على خوارزمية LCPR من ناحية آلية اختيار المسار الأفضل و آلية معالجة الاختناق وتقييم النتائج من ناحية التأخير وتقليل معدل الفقد.

6- المراجع:

- [1] "Xu, X., Dong, C & Liu, A. (2021). Optimization of load balancing routing algorithm based on extended localized link states in low earth orbit satellite networks. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 39(6), 591-604 ."
- [2] "Geng, S., Liu, S., Fang, Z & Gao, S. (2020). An optimal delay routing algorithm considering delay variation in the LEO satellite communication network. *Computer Networks*, 173, 107166 ."
- [3] "Ferreira A, Galtier J, Penna P. Topological design, routing and handover in satellite networks [J]. *Handbook of wireless networks and mobile computing*, 2002, 473-493 ."
- [4] O. Kodheli et al., "Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 1, pp. 70-109, Firstquarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2020.3028247 .
- [5] Xiaogang, Q. I., Jiulong, M. A., Dan, W. U., Lifang, L. I. U & Shaolin, H. U. (2016). A survey of routing techniques for satellite networks .
- [6] Padmaja Kuruba, Sumalatha E, Dushyantha N D (2019, June) Distributed Small Satellite Network and the Routing Protocols,. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* ISSN: 2277-3878, Volume-8, Issue-1S4 .
- [7] Korçak, Ömer. "Routing and Network Mobility Management in Next Generation Satellite Networks." Istanbul Turkey: Bogazici University PhD Dissertation ..(2009)
- [8] Xinmeng Liu, Zhuqing Jiang 2015, December A low-complexity probabilistic routing algorithm for polar orbits satellite constellation networks.. *IEEE/CIC ICC 2015 Symposium on Wireless Networking and Multimedia* .
- [9] Tan, H. and Zhu, L., 2014, December .A novel routing algorithm based on virtual topology snapshot in LEO satellite networks. In *2014 IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering* (pp. 357-361). IEEE .
- [10] Tjelta, Terje, Anne Lise Lillebø, and Erik Otto Evenstad. "ITU-R world radiocommunication conference 2007." *Teletronikk 1* (2008): 144-159 ..
- [11] <https://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/index.html> .
- [12] Li, N., Zhao, X.H. and Yao, K., 2021, June. Semi-distributed load balancing routing algorithm based on LEO satellite networks. In *International Conference on Signal Image Processing and Communication (ICSIPC 2021)* (Vol. 11848, p. 118481K). Internatio .