Power Consumption Improving in Network On Chip (NOC) Using The Optical Elements

Dr. Kkawla Hamwi [*]
Fatten Rabeb [**]

(Received 20 / 8 / 2019. Accepted 14 / 10 / 2019)

□ ABSTRACT □

Demand is increasing in daily our lives for more powerful processors, longer-life batteries and smaller-sized portable devices at lower cost .So the complexity of electronic systems will increase over time, based on the International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). as a result of that, using MPSOC (Multiprocessor System On Chip) will be as a promising solution to the complexity of these systems. The main challenges arising the electronic complexity process that are facing MPSOC design is how to connect the basic components of these systems. Use traditional methods for connecting the components such as bus, cause problems such as excessive power consumption and limited bandwidth. It was proposed to use the Network On Chip (NOC) to solve these problem.

In our research, we proposed building an ONOC (Optical Network On Chip) to improve an important MPSOC parameter, which is the power consumption. The results showed that the use of optical links in Network On Chip improves the power consumption significantly.

Keywords: Multiprocessor System On Chip (MPSOC), Network On Chip (NOC), Optical network On Chip (ONOC).

[*] **Assistant Professor, Factually of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

[**] **Master Student, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

تحسين الطاقة المستهلكة في شبكات الرقاقة الواحدة باستخدام العناصر الضوئية

د. خولة حموي *

فاتن ربيب **

(تاريخ الإيداع 20 / 8 / 2019. قُبِل للنشر في 14/ 10 / 2019)

□ ملخّص □

يزداد الطلب في حياتنا اليومية على معالجات أكثر قوة، بطاريات ذات عمر أطول وأجهزة محمولة ذات حجم أصغر وبكلفة مادية أقل.مما يؤدي إلى زيادة تعقيد الأنظمة الالكترونية مع الزمن وذلك بناءً على توقعات منظمة (ITRS) (International Technology Roadmap for Semiconductors) [1]. بالنتيجة سيكون استخدام أنظمة الرقاقة الواحدة متعددة المعالجات MPSOC(Multiprocessor System On Chip) حلاً واعداً لتعقيد هذه الأنظمة. إن أهم التحديات الناتجة عن عملية التعقيد الالكتروني التي تواجه تصميم (MPSOC)، هو كيفية ربط المكونات الأساسية لهذه الأنظمة. حيث أن وصل المكونات بالطرق التقليدية كاستخدام الربط الخطي bus يتسبب ببعض المشكلات كالاستهلاك الزائد للطاقة ومحدودية عرض الحزمة. تم اقتراح استخدام شبكات الرقاقة الواحدة (Network On Chip) NOC من أجل حل تلك المشكلات. اقترحنا ضمن بحثنا بناء شبكة تستخدم الوصلات الضوئية ONOC (Optical Network On Chip) وذلك لتحسن بارامتر هام من بارامترات (MPSOC) وهو الاستطاعة المستهلكة، حيث بينت النتائج أن استخدام الوصلات الضوئية في شبكات الرقاقة الواحدة يحسن من الاستطاعة المستهلكة بشكل ملحوظ.

الكلمات المفتاحية: أنظمة الرقاقة الواحدة متعددة المعالجات (MPSOC)، شبكات الرقاقة الواحدة (NOC)، شبكات الرقاقة الواحدة الضوئية (ONOC).

مقدمة:

أصبح تخفيض الاستطاعة المستهلكة للأجهزة الالكترونية مطلباً أساسياً، ولكن حسب قانون مور سيزداد عدد الترانزستورات على الدارات المتكاملة بمقدار الضعف وينقص حجمها بمقدار النصف وذلك كل عامين ولاحقاً كل 18

* **مدرسة-قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.**

** **طالبة دراسات عليا (ماجستير)- قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.**

شهر[2]. وهنا تظهر المشكلة التي تواجه التقنيات الحديثة، فمن أجل تحسين أدائها وزيادة فعاليتها يتم زيادة عدد الترانزستورات على الشريحة المتكاملة لكنها وصلت لحدودها الأعظمية، مما يستدعي اللجوء إلى تقنيات أكثر حداثة تخفف من التعقيد الالكتروني مثل استخدام(MPSOC).

تفتح تلك التحديات والمتطلبات قضايا بحثية جديدة في مجال أنظمة الرقاقة الواحدة إذ تمتاز هذه الأنظمة بأنها أقل استهلاكاً للطاقة، أقل تكلفة وأكثر موثوقية من الأنظمة الالكترونية التي حلت مكانها. لكن تواجه أنظمة الرقاقة الواحدة العديد من تحديات التصميم التي تنتج عن التعقيد الالكتروني المذكور أعلاه، مثل كيفية ربط المكونات الأساسية لهذه الأنظمة. فعند استخدام نظام الربط الخطي bus فإن هذا النظام يبقى فعالاً حتى يزيد عدد المكونات المشاركة عن عشرة، حينها سيعاني نظام الـ bus من مشاكل عديدة مثل مشكلة عنق الزجاجة (bottleneck problem). يمكن حل هذه المشكلة باستخدام أنواع أخرى من التوصيل السلكي لكنها ستزيد من تعقيد توصيل الأسلاك واستهلاك الطاقة، خاصة أن عدد المكونات المتصلة معاً كبير جداً و هذا ما يمنع النظام من قابلية التوسع (scalability).

بدلاً من ذلك يمكن أن نربط تلك المكونات باستخدام شبكات الرقاقة الواحدة NOC (Network on Chip). تعتبر شبكات الرقاقة الواحدة من أهم الحلول الواعدة لمشاكل التعقيد الالكتروني، فهي تستعيض عن التوصيل السلكي المعقد بشبكة ذكية تعمل على توجيه الحركة من المصدر إلى الهدف بالاعتماد على خوارزميات التوجيه. لكن على الرغم من هذه الميزات التي تتمتع بها شبكات الرقاقة الواحدة (NOC) مقارنة مع أنظمة الـ bus، إلا أنها قد تواجه عوائق مختلفة مثل عرض الحزمة المتغير وتبديد الطاقة. فمن أجل الحصول على عرض حزمة أكبر واستهلاك طاقة أقل، يمكننا استعمال الوصلات الضوئية في شبكات الرقاقة الواحدة الضوئية (ONOC) لتحسين أداء أنظمة الرقاقة الواحدة بشكل ملحوظ.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من كونه يعمل على تحسين أداء أنظمة الرقاقة الواحدة متعددة المعالجات (MPSOC) من خلال تحسين واحد أو أكثر من بارامتراتها ولا سيما الطاقة المستهلكة. مما يجعلها مجالاً جذاباً للبحث العلمي والتطبيقي، كونها تقدم حلولاً لتخفيض الطاقة المستهلكة التي أصبحت مطلباً أساسياً لتصميم الأجهزة الالكترونية.

تأتي أهمية دراسة شبكات الرقاقة الواحدة الضوئية (ONOC) كونها تقدم حلولاً أوسع للتغلب على قيود أنظمة الرقاقة الواحدة (NOC)، و باعتبار الموجه الضوئي هو العنصر الأكثر أهمية في شبكات الـ ONOC تم اقتراح تصميم موجه ضوئي (optical router) وتقييم أدائه ضمن شبكة mesh ضوئية حيث قدم تحسيناً ملحوظاً في الطاقة المستهلكة وفي أداء الشبكة بصورة عامة.

طرائق البحث ومواده:

1-شبكات الرقاقة الواحدة (NOC):

تعاني أنظمة الـ bus من مشكلة عنق الزجاجة [3] ، بسبب محدودية عرض الحزمة ومشكلة محدودية قابلية التوسع. يمكننا حل مشكلة عرض الحزمة المحدود في نظام الـ bus باستعمال نظام (segmented bus) وهو عبارة عن عدة أنظمة (bus) موصولة معاً باستعمال جسر، لكن سيصبح النظام أكثر تعقيداً ويستهلك المزيد من الوقت والطاقة.

من أجل التغلب على تلك المشاكل ظهرت شبكات الرقاقة الواحدة(NOC) كحل لمشاكل التعقيد الناتج عن التوصيل السلكي والتي تسبب ضياع في الطاقة ومحدودية في قابلية التوسع. يمكننا القول أن شبكات الرقاقة الواحدة هي نظام اتصال فرعي قائم على شبكة مبنية على دارة متكاملة تسمى الرقاقة (chip)، تربط بين نوى الـ IP (Intellectual Property blocks) في أنظمة الرقاقة الواحدة عن طريق تطبيق طرق تشبيك على الرقاقة باستخدام الموجهات (routers). تساعد شبكات الرقاقة الواحدة على تبسيط الأنظمة الالكترونية، حيث أنها تستعيض عن التوصيل السلكي المعقد بشبكة ذكية تعمل على توجيه الحركة من المصدر إلى الهدف بالاعتماد على خوارزميات توجيه (Routing Algorithms) وتقنيات تبديل (Switching Techniques) مناسبة، مما يجعلها أكثر كفاءةً في الأداء وأقل استهلاكاً للطاقة مقارنة مع غيرها من أنظمة الربط [3].

1-1 مكونات شبكات الرقاقة الواحدة (Network On Chip Components):

تتكون شبكات الرقاقة الواحدة من ثلاثة مكونات أساسية [4][5]:

الوصلات (Links):هي مجموعة من الأسلاك التي تصل الموجهات (routers) المختلفة في الشبكة وفقاً للطبولوجيا التي يتم اختيارها.

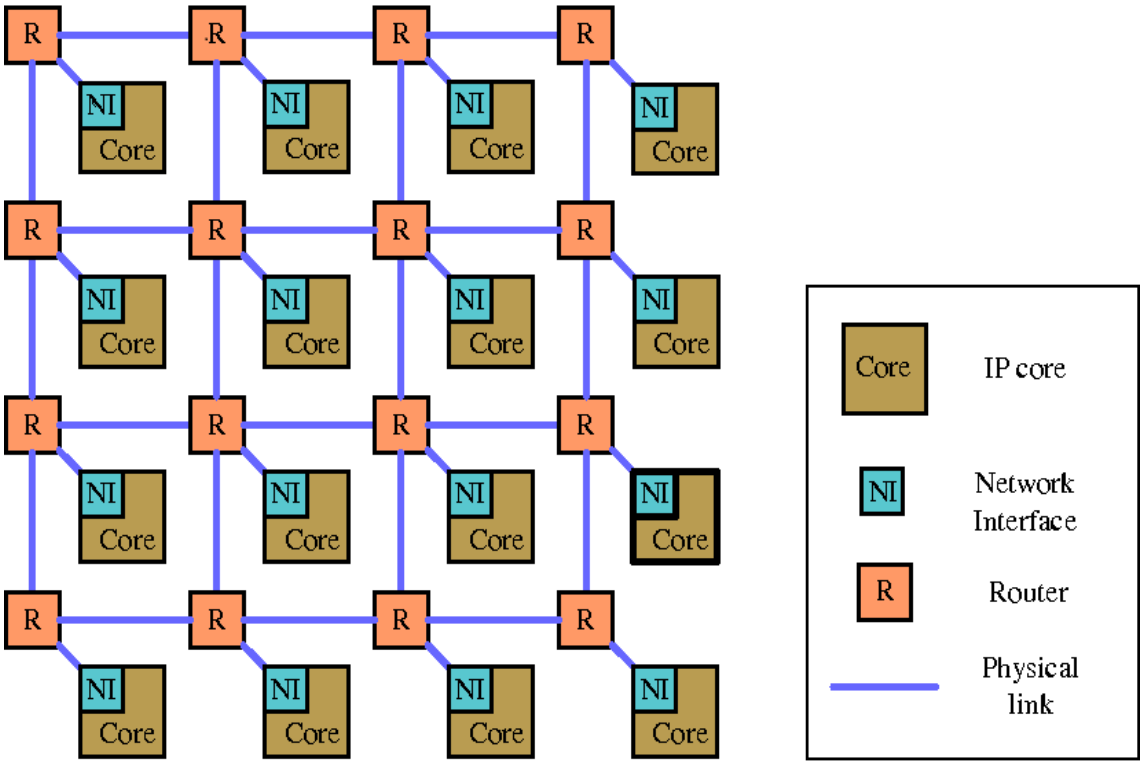
الموجهات (Routers) : هو العمود الفقري للاتصالات في شبكات الرقاقة الواحدة. تعتبر الموجهات أجهزة ذكية تستقبل حزم البيانات القادمة من المصدر، تبحث عن الهدف ثم تقرر المسار الأفضل حتى توجه حركة البيانات. وبما أنه العنصر الأكثر أهمية يجب أن يصمم بكفاءة عالية، فتصميم الموجهات هو الذي يحدد أداء الشبكة بالاعتماد على وظائف التوجيه المطلوبة.

واجهة الشبكة(NI)(Network Interface): يمكن أن نسميها محول الشبكة (adapter network) وهي المسؤولة عن الاتصال المنطقي بين نوى الـIP والشبكة.

1-2- طبولوجيا الشبكة (Network Topology):

يمكن أن نصنف شبكات الرقاقة الواحدة NOC حسب البنية التي تصل الموجهات معاً في الشبكة والتي تُسمى الطبولوجيا (topology). تقرر الطبولوجيا عدد القفزات أو الموجهات التي يجب على الرسالة أن تعبرها لتصل من المصدر إلى الهدف، مما يؤثر بشكل مباشر على مختلف بارامترات الأداء كالطاقة المستهلكة [4].

توجد أنواع عديدة من الطبولوجيا المستعملة في شبكات الرقاقة الواحدة لكن الطبولوجيا الأكثر انتشاراً هي طبولوجيا الـ(Mesh)، كونها تتمتع بكفاءة التخطيط، بساطة في التطبيق ووظائف التوجيه، الخواص الكهربائية الجيدة وإمكانية عنونة الموجهات والموارد على الرقاقة بسهولة كإحداثيات X-Y في الشبكة. يبين الشكل (1) شبكة نوع (mesh) تتألف من عدة أعمدة عددها m وعدة أسطر عددها n كما يتوضع موجه في تقاطع كل سلكين [4][5] .



الشكل(1):الشبكةmesh

1-3- خوارزميات التوجيه Routing Algorithms:

يهدف التوجيه في شبكات الرقاقة الواحدة إلى إيجاد المسار من عقدة المصدر إلى عقدة الهدف ضمن الطبولوجيا المعطاة. تقرر خوارزمية التوجيه كيفية توجه البيانات من المصدر إلى الهدف ثم يقوم الموجه بتوجيه الحزم في الشبكة بالاعتماد على تلك الخوارزمية [6]. تلعب خوارزميات التوجيه دوراً هاماً في أداء الشبكة، ويمكن تصنيف خوارزميات التوجيه حسب الطريقة التي يتم بها اختيار مسار التوجيه إلى :

خوارزمية التوجيه التكيفية (adaptive routing algorithm):

تأخذ هذه الخوارزمية بالحسبان حالة الشبكة (حمولة، شروط الحركة، معلومات حول قنوات الخرج المتوفرة) من أجل اتخاذ قرارات التوجيه. ترسل الحزمة في الاتجاه الذي تكون فيه القناة بالحمل الأخفض، فالرسالة لا تتقيد بمسار واحد عندما تسير من المصدر إلى الهدف فقد تتبع مساراً بديلاً عوضاً عن انتظار القناة المشغولة، مما يقلل من وقت الانتظار غير الضروري ويساعد في توازن الحمل. لكنها تحتاج متطلبات أكثر مقارنة مع خوارزميات أخرى مما يجعلها أكثر تعقيداً وأقل سرعةً [6] .

خوارزمية التوجيه الحتمية (deterministic routing algorithm):

لا تأخذ هذه الخوارزمية بالحسبان شروط الشبكة عندما تتخذ القرار الذي ستسلكه الحزمة من المصدر إلى الهدف، فهي تستخدم فقط عنوان العقدة الحالية وعقدة الهدف من أجل حساب المسار. فالحزمة دائماً تستخدم المسار نفسه بين عقدتين محددتين ولا يمكنها استخدام مسارات بديلة لتجنب القنوات المشغولة، مما قد يسبب تأخير زمني أكبر لكنها تعتبر سهلة التنفيذ فهي تسلك دائماً المسار الأقصر [6][7]. ومن أهم أنواعها خوارزمية التوجيه (XY)، والتي تتتبع

موقع الهدف بالنسبة للمصدر، فإذا لم يكن بنفس العمود ترسل الحزمة بالاتجاه X أولاً(الاتجاه الأفقي) و تكرر هذه العملية في العقد التالية وعندما تصبح عقدة الهدف بنفس العمود سترسل الحزمة بالاتجاه Y [7].

1-4- تقنيات التبديل Switching techniques:

هي التقنيات التي توضح كيفية إرسال البيانات من عقدة المصدر إلى عقدة الهدف. لدينا نوعان أساسيان من تقنيات التبديل وهما:

تبديل الدارة Circuit switching:

يتم فيها إنشاء المسار أو قناة الاتصال من المصدر إلى الهدف بشكل مسبق قبل تبادل البيانات. بكلام آخر، يتم حجز المسار بالكامل من أجل إرسال كامل الحزمة [6].

تبديل الحزمة Packet Switching:

يتم فيه إرسال الحزم واحدة تلو الأخرى بدون حجز المسار بشكل مسبق، وفيه تقسم الرسالة إلى عدد محدد من الحزم وكل حزمة تُوجه بشكل منفرد من المصدر إلى الهدف حيث تخزن في الذاكرة المؤقتة (buffer) لتستخدم من قبل الموجهات حتى تقرر هدف الحزمة [6] .

استخدمنا في بحثنا تبديل الدارة (circuit switching) من أجل شبكات الرقاقة الواحدة الضوئية ONOC.

واستخدمنا تبديل الحزمة (Packet Switching) من أجل حزم التحكم في شبكات الرقاقة الواحدة الكهربائية (NOC)، و التي تستخدم من أجل تأسيس مسارات تبديل الدراة (circuit switching) في شبكات الرقاقة الواحدة الضوئية (ONOC)

2- شبكات الرقاقة الواحدة الضوئية Optical Network On Chip (ONOC):

في الماضي القريب كان هناك تحدي لنقل كميات كبيرة من المعلومات عبر مسافات طويلة (الانترنت مثلاً)، بحيث تلبي حاجة المستخدمين. لم يمضِ وقت طويل حتى استبدلت الكابلات المعدنية بالألياف الضوئية لنقل كميات هائلة من المعلومات بتكلفة أقل، ثم اكتسب استخدام الضوء كوسيلة لنقل البيانات لمسافات طويلة انتشاراً واسعاً فاقترح الباحثون استخدام الضوء لنقل المعلومات عبر المسافات القصيرة. حيث يعتقد الباحثون أن استخدام الوصلات الضوئية على الرقاقة السيليكونية، سيكون حلاً واعداً وجذاباً للمشاكل التي تعاني منها أنظمة الرقاقة الواحدة متعددة المعالجات MPSOC.

لكن العناصر الضوئية تختلف عن العناصر الكهربائية التقليدية وأهمها [2][5]:

الليزر(laser): يعتبر العنصر الأساسي في أي اتصال ضوئي. يستخدم الضوء الناتج بواسطة الليزر لترميز بيانات الاتصال من أجل الإرسال عبر الشبكة لأنه يتميز بخصائص فريدة فالأشعة الضوئية المنبعثة من الليزر لها نفس طول الموجة ولها طور موجي واحد، كما أنها لا تنحرف مع المسافة مقارنة بالأشعة المنبعثة من مصادر ضوئية أخرى .

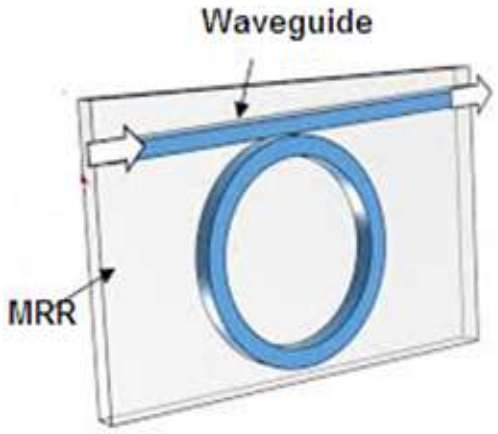
الموجه الموجي (waveguide):يمكن اعتباره مكافئ ضوئي للسلك الكهربائي، فهو الوسط الأساسي الذي يحمل الرسائل الضوئية من المصدر إلى الهدف. تساعد الموجهات الموجية في تحقيق عرض حزمة كبير لأنها تستعمل تقنية الإرسال المتعدد بتقسيم طول الموجة WDM(Wavelength Division Multiplexing [8]. لكن يعاني الضوء المار في الموجه الموجي من خسارات بسبب الانحناءات والتقاطعات.

انحناء الموجه الموجي (Waveguide Bend): الانحناء هو مطلب لا غنى عنه لتوجيه المسارات الضوئية وإنشاء طبولوجيات الشبكة. لكن الخسارة في الموجه الموجي تتناسب عكساً مع نصف قطر الانحناء، لذلك يجب تجنب الانحناءات الحادة .

تقاطع الموجه الموجي (Waveguide Crossing): التقاطعات في الموجه الموجي هي نتيجة لا يمكن تجنبها بسبب الطبيعة المستوية على الرقاقة. لا تؤثر التقاطعات على عرض الحزمة ولكنها تسبب ضياعات واستهلاك أكبر للطاقة. لذلك يجب على المصمم أن يأخذ بعين الاعتبار عدد التقاطعات في الشبكة بحيث لا تتسبب بضياعات كبيرة.

المقرنات (coupler): من العناصر الضوئية الهامة، فهي تسمح للعناصر المتوضعة على الرقاقة بالاتصال الفيزيائي مع العناصر خارج الرقاقة.

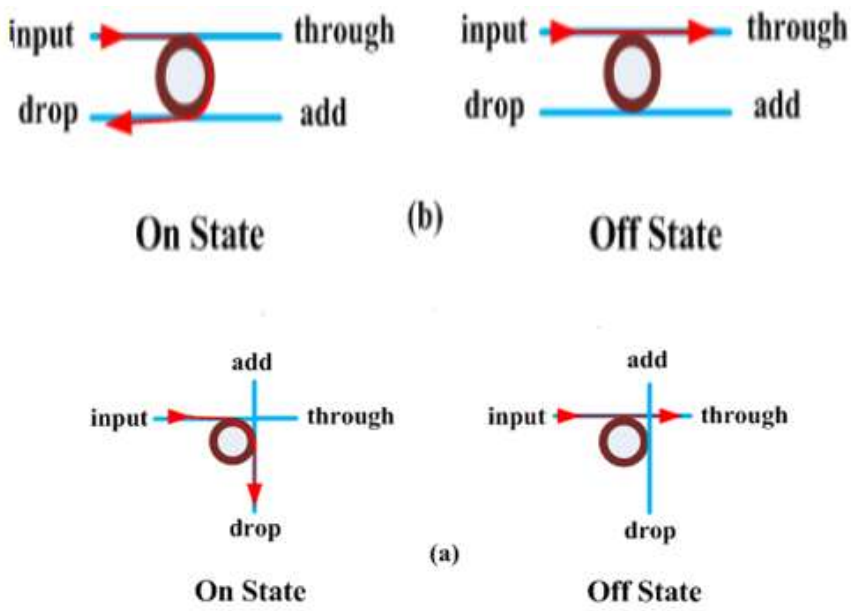
المرنان الحلقي (ring resonators):عبارة عن حلقات محفورة على رقائق السيليكون يمكنها أن تحتفظ بجسيمات الضوء ثم تقوم بإطلاقها. يتم توجيه شعاع الليزر على طول الموجه الموجي لضخ الطاقة الضوئية إلى المرنان ثم يقترن الشعاع بالمرنان بحيث تتحرك الفوتونات حول الحلقة. بمعنى آخر هو مجموعة من الموجهات الموجية التي تكون واحدة منها على الأقل بشكل حلقة مغلقة يمر الضوء عبرها وتكون مقترنة بموجه موجي خطي واحد أو أكثر من أجل دخول الضوء وخروجه.انظر الشكل (2)



الشكل(2): المرنان الحلقي

يعتبر المرنان الحلقي عنصراً هاماً في بناء الشبكات الضوئية فهو يصنّع بأحجام صغيرة جداً MRR (Micro–ring resonators)، بحيث يصل قطر المرنان الحلقي إلى 20 ميكرون وهو ما يعادل $\frac{1}{10}$ عرض شعرة الإنسان. يمكنه القيام باستعمالات متعددة في مجال الضوئيات المتكاملة أهمها العمل كمرشح ، معدل حلقي وكاشف ضوئي.

عناصر التبديل الضوئية PSE (Photonic Switching Elements): يتألف كل عنصر تبديل (PSE) من مرنان حلقي واحد MRR (Micro–Ring Resonator) و موجهين موجيين. يوجد نوعان من عناصر التبديل بحسب توضع الموجه الموجي هما عناصر التبديل المتوازية (parallel PSE) وعناصر التبديل المتقاطعة (cross PSE) [9].انظر الشكل(3)



الشكل(3) عناصر التبديل المتوازي(b) والمتقاطع (a)

يمكن للإشارة الضوئية أن تنتشر على طول الموجه الموجي أو تحول إلى الاتجاه الآخر عن طريق الـ(MRR)، حيث يمكن للمرنان الحلقي أن يرشح وبشكل انتقائي تردداً معيناً ويسير به على طول الموجه الموجي أو يقوم بتحويل اتجاه الضوء. بمعنى آخر، إن إشارة الدخل تُحوّل متى تحقق شرط الرنين التالي:

$$m.\lambda=L.\ n_{eff}$$

حيث: m عدد صحيح، L طول الفجوة الرنينية، n_{eff} قرينة انكسار فعالة، λ طول موجة المرنان .

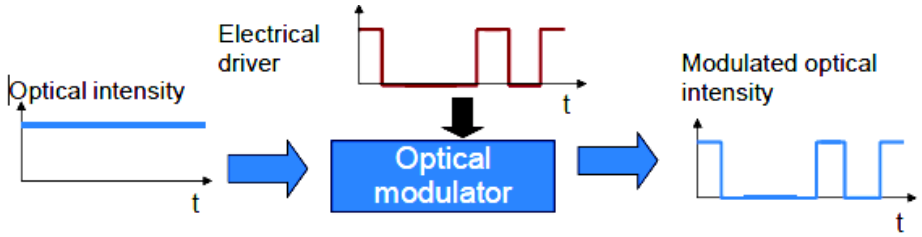
بناءً على ذلك يمكن تمييز الحالتين التاليتين:

الحالة (on–state): عندما يكون طول موجة إشارة الدخل مساوياً لطول موجة الرنين λ_{on} فإن الإشارة تنتقل مباشرةً إلى المنفذ (drop).

الحالة (off–state): عندما يكون طول موجة إشارة الدخل λ_{off} غير مساوياً لطول موجة الرنين فإنها تنتقل إلى المنفذ (through) مباشرةً.

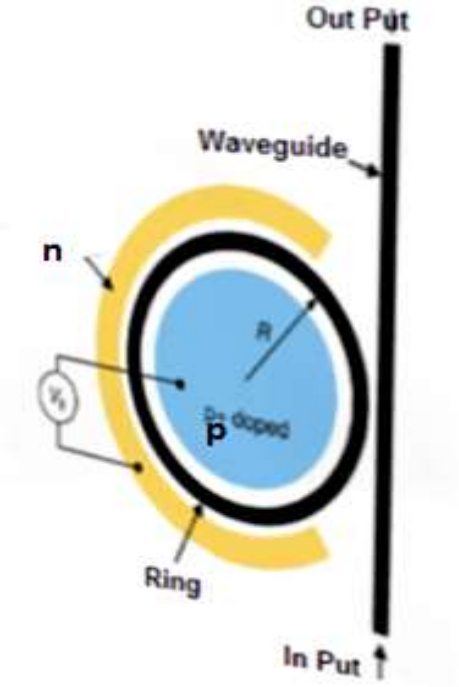
وبالتدوير بين الحالتين(on/off) بشكل ملائم يمكن أن نتحكم بالإشارة الضوئية المحقونة لتنتشر من منفذ الدخل إلى أي منفذ خرج مناسب.

المعدلات الحلقية (Ring Modulator):هي عناصر ضوئية توفر باستخدام المرنان الحلقي آليةً لتحويل البيانات الكهربائية الرقمية إلى بيانات ضوئية تمثل إشارة المعلومات. انظر الشكل (4)



الشكل(4) آلية عمل المعدل الحلقي

ويتم ذلك عن طريق تطبيق جهد انحياز أمامي على وصلة (P–N)، مما يؤدي إلى تشكل مجال كهربائي يدفع حاملات الشحنات السالبة (الالكترونات) باتجاه واحد وحاملات الشحنات الموجبة (الثقوب) بالاتجاه المعاكس فيسري فيها تيار كهربائي و يتشكل باعث ضوئي تلتقي فيه حاملات الشحنات السالبة مع حاملات الشحنات الموجبة داخل منطقة النزوح (depletion region) فتتم بينهما عملية اتحاد وتتحرر كمية من الطاقة (ضوء) [10] .انظر الشكل (5).



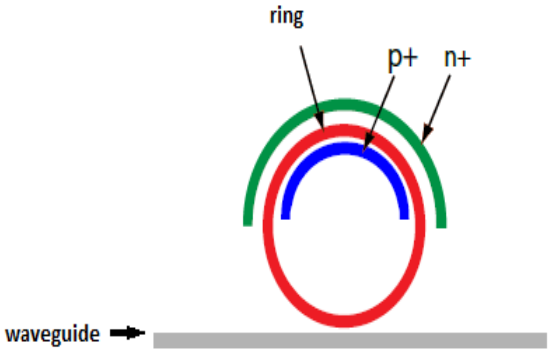
الشكل(5) المعدل الحلقي

لعل الطريقة الأسهل لإنجاز التعديل باستخدام المرنان الحلقي هي استخدام تقنية OOK (On–Off Keying)، أو حجب الضوء من أجل الأصفار والسماح بمرور الضوء من أجل الواحدات [5]. فهي تعمل بنفس الطريقة التي تعمل بها المبدلات الحلقية (الكهربائية/الضوئية) (electro–optic ring switches) حيث يتم التأثير في تدفق البيانات وترميزها عبر التحكم بالتدفق الضوئي للإرسال بالحالتين (on)– (off) .

في الحالة (off) تمر الإشارة الضوئية عبر الحلقة دون عوائق (1 منطقي).

في الحالة (on) تمر الإشارة الضوئية خارج الدليل الموجي فتتم إزالة الضوء (0 منطقي)

الكاشف الضوئي (photo detector): هو المرحلة الأخيرة في الاتصالات الضوئية، ففي حين ينتج الليزر الضوء ويقوم المعدل بتعديل البيانات الرقمية الكهربائية إلى ضوئية فإن الكاشف هو المستقبل على الجانب الآخر حيث يساعد في فك تشفير البيانات المرسلة عبر الوصلات الضوئية ويحول الحزم الضوئية الواردة إلى تيار كهربائي [10]. يتم ذلك عن طريق تطبيق جهد انحياز عكسي على الوصلة (P–N) فيتحويل الضوء الساقط إلى تيار كهربائي. فعندما يسقط فوتون ضمن منطقة النزوح (depletion region) فإنه سيحرر إلكترون مخلفا وراءه ثقباً، وبسبب وجود مجال كهربائي عالي في المنطقة المنضبة نتيجة الانحياز العكسي فإن هذا المجال سيسحب الإلكترون باتجاه القطب الموجب والثقب باتجاه القطب السالب فيسري بذلك تيار كهربائي في الدارة الخارجية تتناسب قيمته طرداً مع شدة الضوء الساقط [5].انظر الشكل (6)



الشكل(6) الكاشف الضوئي

4- المحاكي PhoenixSim:

وهو محاكي يعمل ضمن بيئة OMNET++ من أجل دراسة الوصلات الضوئية على مستوى الطبقة الفيزيائية (physical-layer level) وعلى مستوى النظام (system level). صُمم بالأساس من أجل السماح لنا بفحص شبكات الرقاقة الواحدة الضوئية (ONOC)، ولأن الأجهزة الضوئية غالباً ما تحتاج عناصر الكترونية حولها من أجل التحكم والمعالجة، تم إدراج بعض النماذج لمكونات شبكات الرقاقة الواحدة الكهربائية (ENOC). فهو يحتوي مكتبة من نماذج الأجهزة الكهربائية والضوئية تسمح له بتشكيل بيئة محاكاة مناسبة لكل من (NOC) و(ONOC) [11].

الجدول (2) بعض المواصفات الضرورية من أجل تنفيذ المحاكاة

نظام التشغيل Operation System	المعالج processor	ذاكرة الوصول العشوائية RAM	نسخة OMNET	نسخة Phoenixsim
Windows 7(32 Bit)	Intel(R) Core(TM) i3-4005U CPU @ 1.70GHZ	4 GB	OMNET++(4.1)	Phoenixsim (0.3)

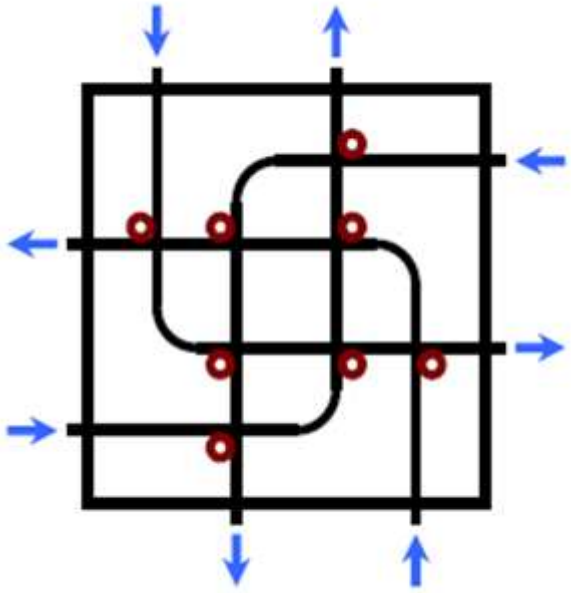
النتائج والمناقشة:

تم استخدام برنامج المحاكاة (phoenixsim) من أجل اختبار عدة نماذج من شبكات الرقاقة الواحدة الكهربائية والضوئية، وذلك لإجراء مقارنة فيما بينها من أجل إثبات التحسين الناتج عن استخدام الوصلات الضوئية في شبكات الرقاقة الواحدة من خلال تحسين بعض البارامترات الهامة مثل الطاقة المستهلكة، معدل زمن التأخير وعرض الحزمة. علماً أن خوارزمية التوجيه المستخدمة في بحثنا هي الخوارزمية الحتمية XY، وطبولوجيا الشبكة من النوع Mesh.

النموذج الأول: إجراء محاكاة لشبكة رقاقة واحدة كهربائية (ENOC) من النوع (4x4 mesh).

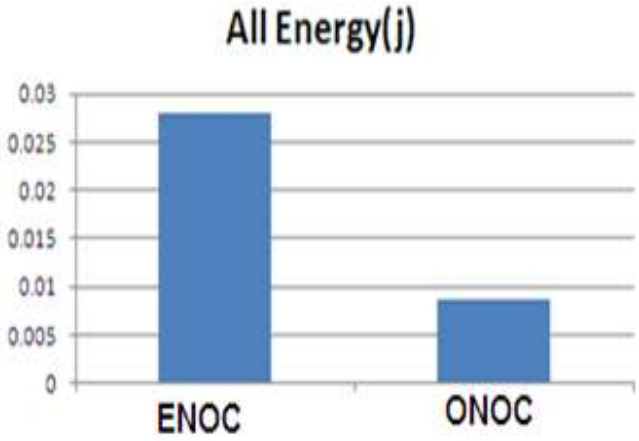
النموذج الثاني: إجراء محاكاة لشبكة رقاقة واحدة ضوئية(ONOC) من النوع (4x4mesh)،و هي تضم أهم جزء في الشبكة الضوئية وهو الموجه الضوئي.

يبين الشكل(7) الموجه الضوئي (non-blocking switch 4x4 new) المستخدم في محاكي الـ(phoenixsim) وهو الموجه الضوئي الذي سنعتمده في شبكة الرقاقة الواحدة الضوئية في النموذج الثاني.



الشكل(7) الموجه الضوئي non-blocking switch 4x4 new

يبين الشكل(8) الفرق بين شبكتي الرقاقة الواحدة الكهربائية (ENOC) والضوئية (ONOC) من حيث الطاقة المستهلكة. حيث بلغت النسبة المئوية لنقصان الطاقة المستهلكة في ONOC تقريبا 67% مقارنة معها في شبكات ENOC، وهذا يدل على تحسن جيد وملحوظ في استهلاك الطاقة الكهربائية عند استخدام الوصلات الضوئية.



الشكل(8) الطاقة المستهلكة في كل من شبكتي ONOC و ENOC

النموذج الثالث:

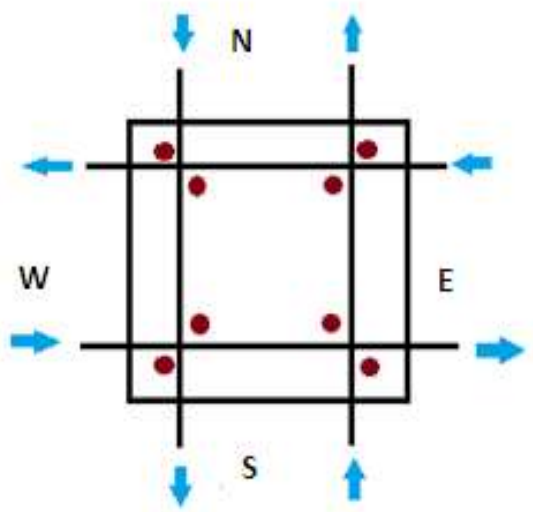
تم اقتراح بنية موجه ضوئي (Master1 Switch) واختباره ضمن الشبكة الضوئية السابقة (ONOC) من النوع (4x4 mesh)، وذلك بالاعتماد على بعض النقاط الهامة نذكر منها:

- يجب أن تصمم بنية الموجه الضوئي بحيث تقلل عدد الـ(MRR) وعدد تقاطعات موجه الموجة (waveguide crossing)، بينما تحافظ على وظائف التحويل الضرورية.

- استغلال ميزة توجيه الإشارات الضوئية (passively) وفيها لا نكون بحاجة إلى تشغيل أي (MRR) إذا سافرت الإشارة الضوئية في نفس البعد خلال الموجه مثلاً (Weast↔East)، بينما تشغل (MRR) واحدة إذا انتقلت الإشارة الضوئية من بعد إلى آخر مثلاً (Weast↔North).
- إن كل من تقاطع وانحناء الدليل الموجي يؤثر على خسارة الإدخال(insertion Loss)، فرغم أن الضياع في كل عبور صغير لكن عدد كبير من التقاطعات والانحناءات يؤدي إلى خسارة هامة.

بالاستفادة مما سبق صمم الموجه (Master1 Switch) كما في الشكل(9) بحيث يحقق ما يلي:

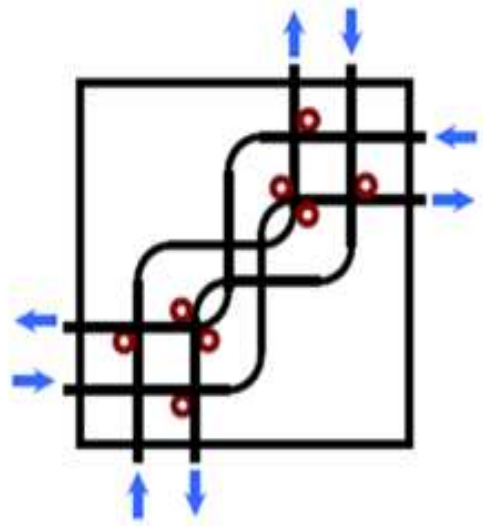
- أن تكون كل (PSE) بحالة (off–state) عندما يتم إرسال البيانات من خلال المسار المباشر.
- يوجد لدينا (4PSE) فقط وتم الاستغناء عن التقاطعات والانحناءات بما يحافظ على وظائف التحويل الأساسية.



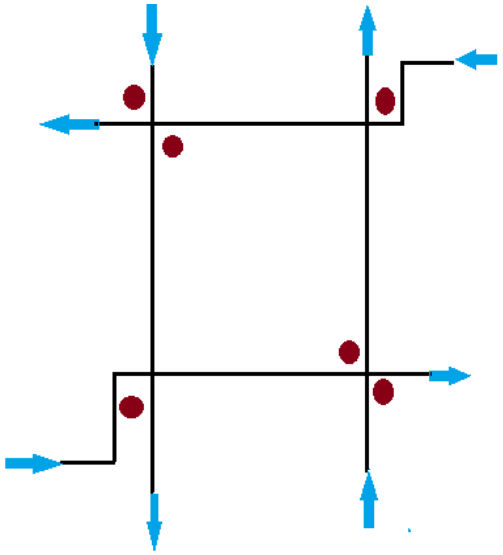
الشكل (9) الموجه الضوئي Master1 Switch

بينت نتائج المحاكاة تحسناً كبيرا في الطاقة المستهلكة التي بلغت $4.48X10^{-8}J$. رغم التحسن الكبير في الطاقة المستهلكة عند استخدام الموجه الضوئي المقترح (Master1 Switch) ،لكنه يعاني من مشكلة أساسية وهي مشكلة الحجب (blocking) حيث لا يمكن الإرسال من W→N و من S→W في الوقت ذاته و بالتالي يسمى الموجه الحاجب (blocking– switch).

النموذج الرابع: للتغلب على مشكلة الحجب تم افتراض الموجه الضوئي(Master2 Switch) المبين بالشكل(11)، حيث استبدلنا اثنين من عناصر التبديل المتقاطعة (cross PSE) باثنين من عناصر التبديل المتوازية (parallel PSE) مما يسمح للإشارة أن تسلك مسارات مختلفة عن المسارات المزدحمة التي تسبب ظاهرة الحجب (blocking)[8].

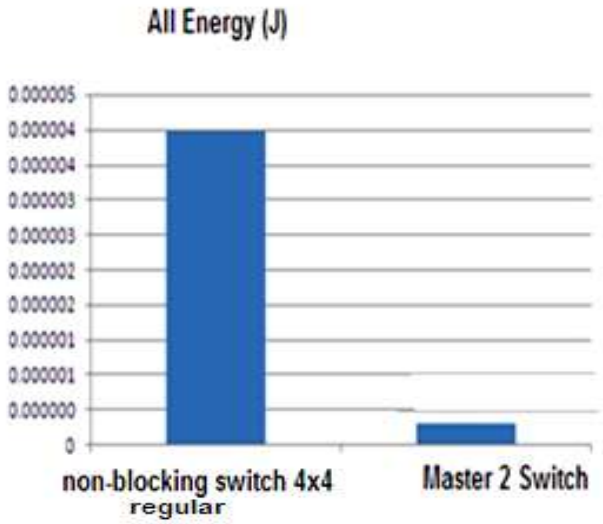


الشكل (10) الموجه الضوئي
non-blocking switch4x4 regular



الشكل (11) الموجه الضوئي Master2 Switch

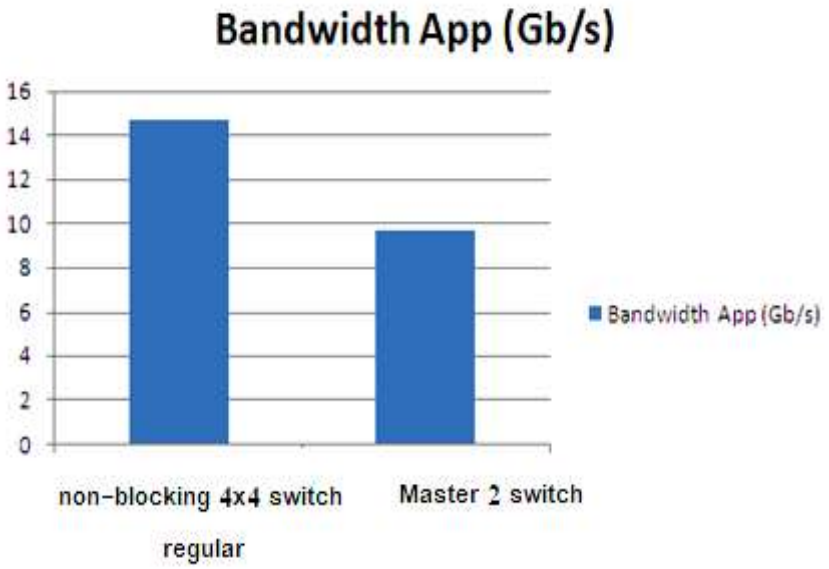
يبين الشكل(12) مقارنة بين الطاقة المستهلكة باستخدام الموجه الضوئي المعدّل (Master2 Switch) والموجه الضوئي الافتراضي (non-blocking switch4x4 regular).



الشكل(12) الفرق بالطاقة المستهلكة باستخدام الموجه الضوئي المعدّل والموجه الضوئي الافتراضي

نلاحظ من الشكل (12) تحسناً كبيراً في الطاقة المستهلكة باستخدام الموجه المعدّل بلغت تقريباً 93%. وهو ما يمكن تفسيره بانخفاض عدد عناصر التحويل المتقاطعة(cross PSE) وعدد تقاطعات موجه الموجة المستخدمة في الموجه الضوئي المعدّل بالمقارنة مع الموجه الضوئي الافتراضي.

على الرغم من التحسين الكبير في الطاقة المستهلكة لكن عرض الحزمة قد انخفض بنسبة 33% وهذا ما يظهر في الشكل(13).



الشكل(13) الفرق بعرض الحزمة باستخدام الموجه الضوئي المعدّل والموجه الضوئي الافتراضي

الاستنتاجات والتوصيات:

إن المعايير الناتجة عن عمليات المحاكاة يعتمد أحدها على الآخر، ولا يمكن أن تعتبر منفصلة عن بعضها البعض فالتصميم المثالي لشبكات الرقاقة الواحدة NOC ينتج عنه زيادة عرض الحزمة، انخفاض في معدل زمن التأخير، استهلاك طاقة أقل وتعقيد الكتروني أقل. لكن من المستحيل أن تتحقق كل هذه الميزات بنفس النظام لأن بعضها يعاكس الآخر، لهذا السبب يضحي الباحثون ببعض هذه الميزات على حساب ميزات أخرى. فعند استعمال الموجه الضوئي (Master2 Switch) انخفض عرض الحزمة نوعاً ما مقارنة بعرض الحزمة عند استخدام الموجه الضوئي الافتراضي(non-blocking switch4x4 regular)، لكن الطاقة المستهلكة تحسنت بشكل كبير وملحوظ. وهذا ما يفتح المجال لأبحاث مستقبلية من أجل تحسين بارامترات أخرى كعرض الحزمة مثلاً، أو اختبار الموجه الضوئي المعدّل ضمن طوبولوجية مختلفة عن الشبكة(mesh) التي استخدمناها في بحثنا.

يعتبر مجال شبكات الرقاقة الواحدة(NOC) مجالاً حديثاً ولا يزال قيد البحث والتجريب، ولا سيما شبكات الرقاقة الواحدة الضوئية(ONOC) التي تحسن من أداء أنظمة الرقاقة الواحدة متعددة المعالجات (MPSOC) بشكل ملحوظ لكنها تحتاج إلى كثير من الجهد في المستقبل فقد تغير عالم الالكترونيات يوماً ما.

المراجع:

[1] KUNDU, S; CHATTOPADHYAY, S. Network-on-Chip: The Next Generation of System-on-Chip Integration. 2018.

[2] WU, J; SHEN, Y. L; REINHARDT. K; SZU, H; DONG, B. *A Nanotechnology Enhancement to Moore's Law*. Applied Computational Intelligence and Soft Computing, 2013. 1-12.

[3] SAMMAN, F. *A Microarchitecture and Implementation of Networks-on-Chip with a Flexible Concept for Communication Media Sharing*. Institute of Sciences, Technologies and Arts (IESTA), Germany, 2016, 253.

[4] SWAPNA, S. *Efficient Router Design For Network On Chip*. 2013.
[5] DESAI, S. *Design And Analysis Of Energy-Efficient Hierarchical Electro-Photonic Network-On-Chip Architectures*. Colorado State University, 2015.
[6] ADAMU, G; CHEJARA, M. P; GARKO, A. B. *Review Of Deterministic Routing Algorithm For Network-On-Chip*. International Journal of advance Research in Science and engineering. Vol 1, No. 4, 2015, 123-128.
[7] RANTALA, V; LEHTONEN, T; PLOSILA, J.*Network on chip Routing Algorithms*. Turku Contre of Computer Science, TUCS Technical Report, No 779, August 2006.
[8]الحسين، عياش . *دراسة مقترح تحسين أداء الشبكة الاتصالات الضوئية السورية عن طريق النموذج الرياضي لعملية التوجيه و إسناد طول الموجة في شبكات WDM الضوئية* .مجلة جامعة تشرين للبحوث و الدراسات العلمية، سلسلة العلوم الهندسية ، المجلد (40) ، العدد(6)، 2018 ، 345-365.
[9] YE, Y; WU, X; XU, J; ZHANG, W; NIKDAST, M; WANG, X. Holistic Comparison of Optical Routers for Chip Multiprocessors. IEEE Anti-counterfeiting, Security, and Identification, Aug 24, 2012, 1-5.
[10] WU, X; HUANG, C; XU ,K; ZHOU, W; SHU, C; TSANG. K, H. 3 × 104 Gb/s Single- λ Interconnect of Mode-Division Multiplexed Network With a Multicore Fiber. IEEE Journal of Lightwave Technology, VOL. 36, NO. 2, 2018, 318-324.
[11] HENDARY, G; CHAN, J. *PhoenixSim 1.0 User Manual. Lightwave Research Lab, Columbia University*, New York, 2011.