ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ MIS

ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Free and Open-source Tools for Network Simulation

ΣΙΒΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ : M18/03

ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ : ΟΙΚΟΝΟΜΙΔΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ
ΠΟΜΠΟΡΤΣΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

Περιεχόμενα

Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια οι τεχνικοί δικτύων ολοένα και περισσότερο στηρίζονται στην προσομοίωση για να σχεδιάσουν και να αναπτύξουν τα πολύπλοκα και επιρρεπή σε σφάλματα δίκτυα. Αντιστοίχως οι ερευνητές των δικτύων όλο και πιο πολύ στηρίζονται στην προσομοίωση για να εξερευνήσουν την συμπεριφορά και τις επιδόσεις των νέων πρωτοκόλλων που έχουν σχεδιαστεί. Πάντως, παρόλη αυτή την χρήση της προσομοίωσης, στις μέρες μας υπάρχει ελάχιστη κοινή αντίληψη του βαθμού του ελέγχου της αξιοπιστίας που απαιτείται για τις διάφορες εφαρμογές προσομοίωσης. Επίσης υπάρχει ελάχιστη γνώση που αφορά την αποτελεσματικότητα των τεχνικών του ελέγχου αξιοπιστίας. Στην προσπάθεια να υλοποιηθεί η ανάγκη για προσομοίωση των πρωτοκόλλων και των υπηρεσιών των δικτύων δημιουργήθηκαν από πολλές ερευνητικές ομάδες προγράμματα τα οποία ασχολούνται με την προσομοίωση δικτύων, πρωτοκόλλων, υπηρεσιών και οτιδήποτε άλλο χρήζει ενδιαφέροντος προσομοίωσης με σκοπό την καλύτερη σχεδίαση και ανάπτυξη των δικτύων. Βέβαια από τα πολλά προγράμματα που έχουν δημιουργηθεί είναι λογικό κάποια από αυτά να απαιτούν κάποιο οικονομικό αντίτιμο ώστε να είναι δυνατή η χρήση τους από τους απλούς χρήστες, ενώ αρκετά από αυτά υπάρχουν ελεύθερα στο διαδίκτυο και μπορεί οποιοσδήποτε απλός χρήστης να τα «κατεβάσει» και να τα χρησιμοποιήσει στον προσωπικό του υπολογιστή. Στην εργασία αυτή σκοπός είναι να περιγραφούν και να παρουσιαστούν κάποια από αυτά τα προγράμματα που προσφέρονται ελεύθερα στο ευρύ κοινό ώστε να μπορεί κανείς να επιλέξει το εργαλείο που του ταιριάζει ώστε να προσομοιώσει με το σωστό και αποτελεσματικό τρόπο τις δικτυακές λειτουργίες που επιθυμεί.

Abstract

During the past years, the technicians of networks rely even more on the simulation in order to draw and develop the complicated and prone-to-faults networks. Respectively, the researchers of networks bank on simulation in order to explore the behavior and the performance of new protocols that have been created. However, despite this use of simulation in our days, there exists minimal common perception of the degree of the reliability that is required for the various applications of simulation. In addition, the knowledge that concerns the effectiveness of techniques of the reliability control is also restricted. In the effort for the need for simulation of protocols and services of networks to be materialised, a lot of researching teams created programs which deal with the simulation of networks, protocols, services and everything else that requires simulation aiming at the better designing and growth of networks. Of course, it is reasonable that from the amount of programs that has been created some of them require some economic compensation, so that they will be accessible to the simple users, while others exist freely in the internet and any simple user can "download" and use them in his personal computer. In this paper the aim is to describe and introduce some of these programs that are offered freely in the wide public so that one can be able to select the tool that suits him to simulate with the right and effective way the network operations that he wishes.

1. Εισαγωγή – Περιγραφή Προβλήματος

Τα δίκτυα συνεχίζουν να αναπτύσσονται όλο και πιο πολύπλοκα όσο η βιομηχανία παράγει τόσο ενσύρματες όσο και ασύρματες τεχνολογίες σε μεγάλης κλίμακας αρχιτεκτονικές δικτύων, αλλά και όσο οι εφαρμογές των χρηστών και η «κίνηση» σε αυτά συνεχίζουν να εξελίσσονται. Στις μέρες μας ελάχιστες εταιρίες μπορούν να ανεχτούν το κόστος για να χαραμίζουν επιπλέον megabits το δευτερόλεπτο σε ένα ερευνητικό έργο (project), όταν ο

προϋπολογισμός της εταιρίας προστάζει για ακριβή, άρτια και οικονομικά σχέδια δικτύων από την αρχή.
Αντιμέτωποι με αυτή την τεράστια ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια οι τεχνικοί και οι ερευνητές των δικτύων σχεδόν καθολικά χρησιμοποιούν την προσομοίωση με σκοπό να προβλέψουν την αναμενόμενη απόδοση πολύπλοκων δικτύων και να κατανοήσουν τη συμπεριφορά των υπαρχόντων πρωτοκόλλων δικτύων που δεν έχουν στηριχτεί σε πρότυπα πώς λειτουργούν στα σημερινά δίκτυα. Η προσομοίωση επίσης διαρκώς και πιο πολύ χρησιμοποιείται για να προβλέψει την ορθότητα και τις επιδόσεις των νέων σχεδίων πρωτοκόλλων για τα δίκτυα. Επιπλέον η χρησιμοποίηση της προσομοίωσης πλέον εμφανίζεται σαν μια αυστηρή απαίτηση στην διαδικασία που οδηγεί στην διεθνή πιστοποίηση, όπως το πρότυπο IMT-2000 για την τρίτη γενιά, ασύρματης και κινητής τηλεφωνίας.
Βέβαια αυτή η αναπτυσσόμενη εμπιστοσύνη στην προσομοίωση αυξάνει της απαιτήσεις σε ότι αφορά την εξασφάλιση της ορθότητας και της πρόβλεψης των σφαλμάτων σε συγκεκριμένα μοντέλα προσομοίωσης. Παρόλα αυτά όμως δεν υπάρχουν ευρέως αποδεκτές πρακτικές και τεχνικές για να βοηθήσουν στην αξιολόγηση των προσομοιώσεων των δικτύων και στην αποτίμηση εμπιστοσύνης στα αποτελέσματά τους.
Οι πρώτες εργασίες που αφορούσαν την τεχνική σχεδίαση και έρευνα των δικτύων περιείχε τόσο πειραματικά όσο και μαθηματικά μοντέλα για να αποδείξει την επίτευξη και την εξασφάλιση των ορίων για την προβλεπόμενη απόδοση. Τα τελευταία δέκα χρόνια καθώς τα δίκτυα έγιναν τόσο πολύ μεγάλα ώστε να επιτρέπουν εύκολο πειραματισμό, αλλά και τόσο πολύπλοκα ώστε να επιτρέπουν μια αρκετά εύκολη μαθηματική ανάλυση, η προσομοίωση των δικτύων ήρθε να συμπληρώσει ένα πολύ σημαντικό ρόλο, βοηθώντας τους ερευνητές και τους σχεδιαστές να αντιληφθούν την συμπεριφορά και την απόδοση των πρωτοκόλλων και των δικτύων. Σήμερα η προσομοίωση συχνά χρησιμοποιείται :

- για να την απόδοση των τωρινών δικτύων και πρωτοκόλλων με σκοπό να βοηθήσει στον καθορισμό της τεχνολογίας, να προγραμματίσει τις παραγόμενες δυνατότητες και να επιδείξει την εκπλήρωση των απαιτήσεων του πελάτη.
- για να προβλέψει την αναμενόμενη συμπεριφορά των νέων δικτυακών πρωτοκόλλων και σχεδίων μέσα από ποιοτικές και ποσοτικές εκτιμήσεις απόδοση ή ορθότητας και
- για να εξερευνήσει γρήγορα τα όρια και τις δυνατότητες ενδεχόμενων σχεδίων πρωτοκόλλων μέσα από σύντομη αποτίμηση και επανάληψη.

Λόγω αυτής της μεγάλης εξάπλωσης της προσομοίωσης των δικτύων έχει δημιουργηθεί ένας μεγάλος αριθμός εργαλείων με τα οποία μπορεί να γίνει η προσομοίωση σε διάφορες τοπολογίες ή σε διάφορα πρωτόκολλα και τα οποία μέσω των γραφικών που διαθέτουν να καταδείξουν τα αποτελέσματα και τις επιδόσεις που προκύπτουν από την λειτουργία ενός δικτύου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και παραμέτρους. Τα εργαλεία αυτά που έχουν δημιουργηθεί αναφέρονται σε διάφορες πλατφόρμες και υποστηρίζονται από συγκεκριμένα λειτουργικά συστήματα. Πολλά αυτά λειτουργούν μόνο σε περιβάλλοντα Linux ή Unix, κάποια άλλα σε περιβάλλοντα Windows, μερικά σε Solaris, ενώ λίγα σχετικά προσφέρονται και είναι συμβατά σε όλα τα λειτουργικά συστήματα.
Όλα σχεδόν τα εργαλεία προσομοίωσης δικτύων απαιτούν αρκετά μεγάλες προγραμματιστικές ικανότητες σε συνδυασμό με άριστη γνώση των δικτύων και των πρωτοκόλλων τους, καθώς για να προκύψουν σωστά, αλλά κυρίως χρήσιμα αποτελέσματα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την αποφυγή ανεπιθύμητων σφαλμάτων, θα πρέπει να μπορεί ο προγραμματιστής να εκτιμήσει και να δώσει τις σωστές παραμέτρους που θα εξαντλούν όλες τις πιθανές περιπτώσεις χρήσης ενός δικτύου. Είναι άσκοπο να ξοδεύεις άπειρες ώρες στην προσομοίωση μιας δικτυακής εφαρμογής αν στο τέλος δε μπορείς να βγάλεις ασφαλή και τεκμηριωμένα αποτελέσματα για την αξιοπιστία, τις επιδόσεις, την ασφάλεια και γενικά την άρτια λειτουργία της εφαρμογής. Όπως προαναφέρθηκε λοιπόν είναι απαραίτητο να

δοθεί η ίδια έμφαση στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση.
Το θέμα που θα μας απασχολήσει σε αυτή την εργασία αφορά στην παρουσίαση κάποιων προγραμμάτων προσομοίωσης τα οποία είναι ελεύθερα προς χρήση και δεν είναι απαραίτητο να πληρώσει κάποιος για να μπορέσει να τα χρησιμοποιήσει στον προσωπικό του υπολογιστή. Υπάρχουν όπως είπαμε πολλά προγράμματα προσομοίωσης, με αποτέλεσμα αρκετά από αυτά να απαιτούν κάποιο αντίτιμο ώστε να επιτρέψουν σε κάποιον να τα κατεβάσει μέσω του διαδικτύου και να τα χρησιμοποιήσει στον υπολογιστή του, όπως είναι το OPNET,το QUALNET και άλλα. Βέβαια από την άλλη μεριά υπάρχουν και πολλά προγράμματα προσομοίωσης τα οποία μπορεί κάποιος ελεύθερα να τα κατεβάσει μέσω του διαδικτύου και να πειραματιστεί με τις υπηρεσίες που αυτά προσφέρουν, όπως είναι το NS-2, το OMNET++, το GloMoSim, το CNET και άλλα τα οποία θα παρουσιάσουμε πιο αναλυτικά στη συνέχεια. Όπως είπαμε τα προγράμματα αυτά δεν λειτουργούν σε όλες τις πλατφόρμες και όλα τα λειτουργικά συστήματα, οπότε για να μπορεί κάποιος να «τρέξει» το πρόγραμμα που επιθυμεί θα πρέπει να διαθέτει και το κατάλληλο λειτουργικό σύστημα ή το κατάλληλο λογισμικό ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει σωστά το πρόγραμμα.

2. Network Simulator 2 (NS-2)

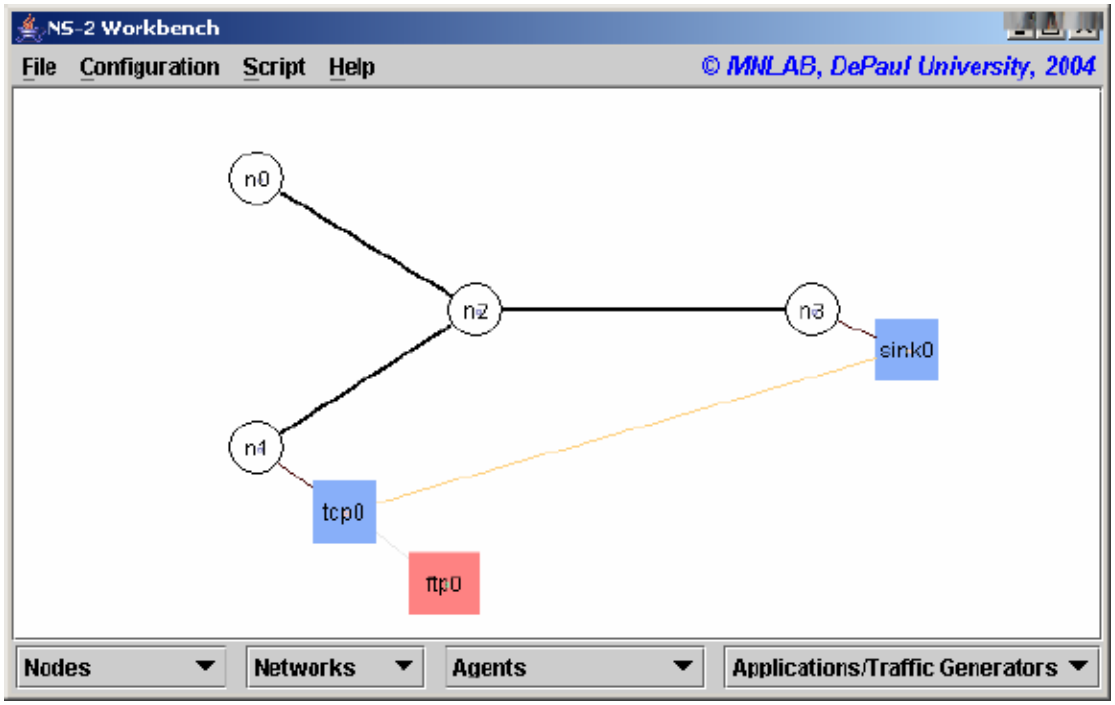
2.1 Εισαγωγή

Το περισσότερο διαδεδομένο εργαλείο προσομοίωσης είναι κατά πολλούς το Network Simulator 2 ή αλλιώς NS-2. Το NS-2 είναι ένα open source εργαλείο προσομοίωσης που τρέχει κυρίως σε περιβάλλον Linux. Είναι ένας προσομοιωτής διακριτών γεγονότων που στοχεύει στην έρευνα δικτύωσης. Παρέχει ουσιαστική υποστήριξη για την προσομοίωση της δρομολόγησης, των multicast πρωτοκόλλων και πρωτοκόλλων IP, όπως τα UDP, TCP, RTP και SRM πάνω από συνδεμένα με καλώδιο αλλά και ασύρματα (τοπικά και δορυφορικά) δίκτυα. Το NS-2 έχει πολλά πλεονεκτήματα που το κατατάσσουν ως ένα χρήσιμο εργαλείο για την υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων και τη δυνατότητα της γραφικής λεπτομερειακής απεικόνισης της δικτυακής κίνησης. Επιπλέον υποστηρίζει αρκετούς αλγόριθμους που αφορούν στη δρομολόγηση και στις ουρές αναμονής.
Το NS άρχισε ως παραλλαγή του REAL network simulator το 1989 και έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Το 1995 η ανάπτυξη του NS υποστηρίχθηκε από την DAPRA μέσω του VINT project στις LBL, Xerox PARC, UCB, και USC/ISI. Αυτή την περίοδο η ανάπτυξη του NS υποστηρίζεται μέσω της DAPRA με την SAMAN και μέσω της NSF με την CONSER, και οι δύο σε συνεργασία με άλλους ερευνητές συμπεριλαμβανομένου της ACIRI. Το NS λαμβάνει συνεχώς σημαντική βοήθεια και από άλλους ερευνητές, συμπεριλαμβανομένου του ασύρματου κώδικα από τα UCB Daedelus και CMU Monarch projects και από την Sun Microsystems.

2.2 Εγκαθιστώντας το NS-2

Το NS-2 είναι διαθέσιμο σε αρκετές πλατφόρμες όπως είναι οι : FreeBSD, Linux, SunOS και Solaris. Το NS-2 επίσης μπορεί να εγκατασταθεί και να τρέξει σε περιβάλλον Windows. Τα απλά σενάρια θα πρέπει λογικά να τρέχουν σε οποιοδήποτε απλό μηχάνημα, παρόλα αυτά όμως τα πολύ μεγάλα σενάρια απαιτούν και επωφελούνται από την ύπαρξη μεγάλης κεντρικής μνήμης από το υπολογιστικό σύστημα. Επιπλέον το NS-2 χρειάζεται τα ακόλουθα πακέτα να είναι εγκατεστημένα επίσης ώστε να μπορεί να τρέξει : Tcl release 8.3.2, Tk release 8.3.2, OTcl release 1.0a7 and TclCL release 1.0b11.
Το NS είναι αρκετά μεγάλο σαν πρόγραμμα και το όλα σε ένα πακέτο απαιτεί περίπου 250MB χώρο στο δίσκο ώστε να εγκατασταθεί. Η εγκατάσταση του NS σε ξεχωριστά κομμάτια μπορεί να γλιτώσει κάποιο χώρο στο δίσκο. Υπάρχουν δύο τρόποι για την εγκατάσταση του NS-2 : *from all the pieces* ή *all at once*. Αν κάποιος θέλει να το δοκιμάσει

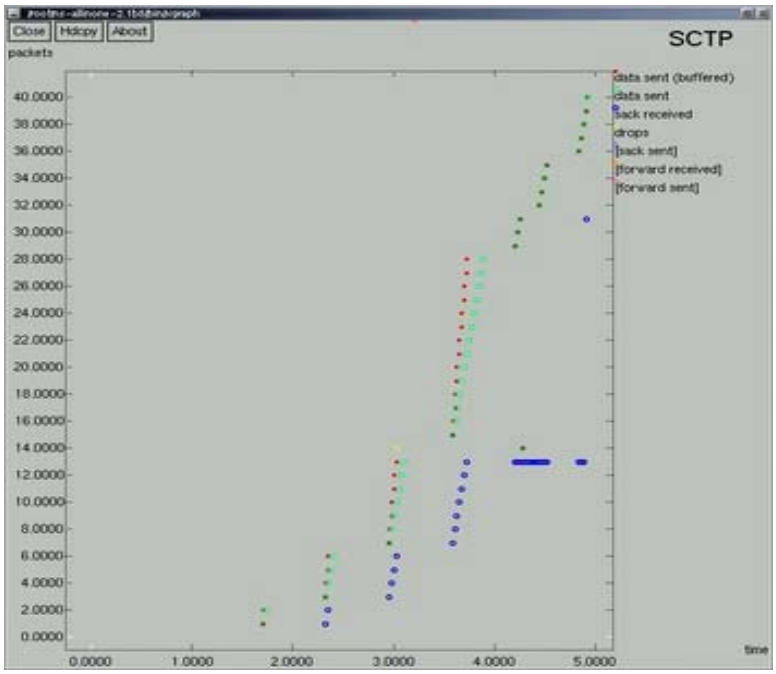
και να το εγκαταστήσει γρήγορα θα πρέπει να δοκιμάσει τη δεύτερη περίπτωση, ενώ αν κάποιος θέλει αναπτύξει το πρόγραμμα στο επίπεδο της C ή να γλιτώσει χρόνο στο κατέβασμα του προγράμματος και χώρο στο δίσκο θα πρέπει να δοκιμάσει την πρώτη περίπτωση.
Το NS-2 είναι διαθέσιμο τόσο μέσα από HTTP σελίδες (http://www.isi.edu/nsnam/ns/), όσο και σε anonymous FTP στο ftp://ftp.isi.edu/nsnam, αλλά και σε anonymous CVS στην *anon-cvs page*. Το ftp για το NS-2 υπάρχει αντίστοιχα και στο ευρωπαϊκό mirror ftp://ftp.ee.surrey.ac.uk/pub/Mirrors/ftp.isi.edu/nsnam
Ενώ υπάρχει ιδιαίτερη εμπιστοσύνη στο NS, το NS δεν είναι ένα καλογυαλισμένο και ολοκληρωμένο προϊόν, αλλά το αποτέλεσμα μιας συνεχούς προσπάθειας έρευνας και ανάπτυξης. Ειδικότερα, λάθη στο λογισμικό του προγράμματος ακόμα ανακαλύπτονται και διορθώνονται. Οι χρήστες του NS είναι αρμόδιοι για να επαληθεύσουν ότι οι προσομοιώσεις τους δεν καταλήγουν να είναι άκυρες λόγω των λαθών. Για να βοηθηθεί ο χρήστης σε αυτό το πρόβλημα καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια με τη επέκταση και την αυτοματοποίηση των προγραμμάτων ελέγχου της αξιοπιστίας των παραγόμενων αποτελεσμάτων.
Ομοίως, οι χρήστες είναι αρμόδιοι για να επαληθεύσουν ότι οι προσομοιώσεις τους δεν ακυρώνονται επειδή το πρότυπο που εφαρμόζεται στον προσομοιωτή δεν είναι το πρότυπο που ανέμεναν. Το τρέχον εγχειρίδιο του NS θα πρέπει να τους βοηθήσει σε αυτήν την διαδικασία.



2.3 Περιγραφή και Δυνατότητες του NS-2

Ο NS-2 είναι ένας *αντικειμενοστραφής προσομοιωτής* (*Object Oriented Simulator*), ο οποίος χρησιμοποιεί στο προσκήνιο την γλώσσα προγραμματισμού OTcl (Object Tool Command Language) και στο παρασκήνιο την C++. Ο προσομοιωτής διαθέτει μια ιεραρχία τάξεων σε C++ (που αναφέρεται ως *compiled hierarchy*) και μια παρόμοια ιεραρχία στην OTcl (που αναφέρεται ως *interpreted hierarchy*, μιας και η Tcl διαθέτει interpreter και όχι compiler). Από την πλευρά του χρήστη υπάρχει μια αντιστοιχία 1-1 ανάμεσα στις τάξεις που ανήκουν στην compiled hierarchy (C++) και σε εκείνες που ανήκουν στην interpreted hierarchy

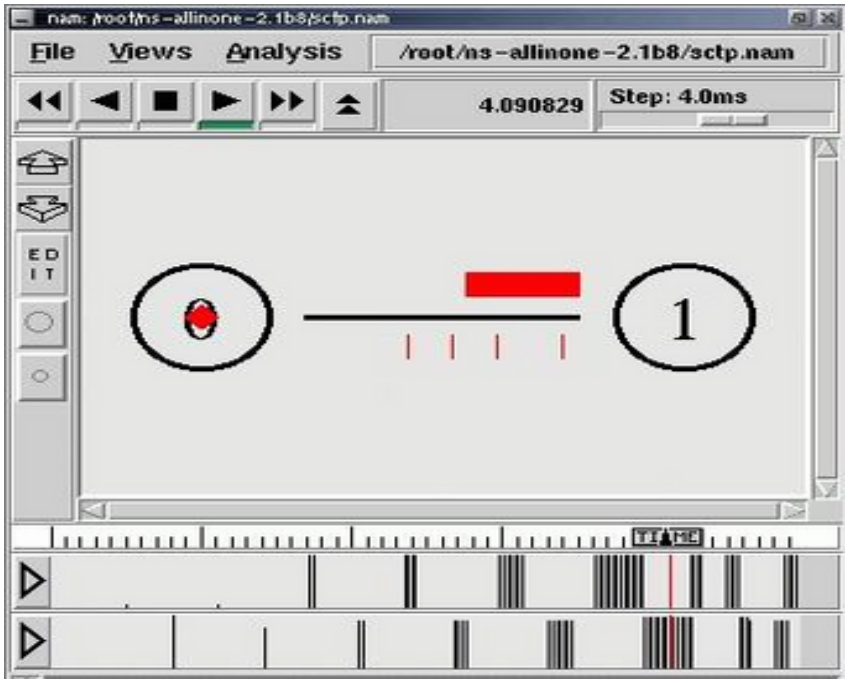
(OTcl)[1]. Η *ρίζα* σε αυτή την ιεραρχία είναι η τάξη TclObject. Οι χρήστες μπορούν να δημιουργούν νέα αντικείμενα προσομοίωσης μέσα από τον OTcl interpreter. Η αρχικοποίηση αυτών των αντικειμένων γίνεται από τον OTcl interpreter, κατά την οποία αντιστοιχίζονται και με το ανάλογο αντικείμενο που υπάρχει στην class hierarchy (C++).



Η φιλοσοφία που κρύβεται πίσω από τη χρήση δύο γλωσσών προγραμματισμού και δύο παρόμοιων ιεραρχιών τάξεων, είναι ότι κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης υπάρχουν δύο διαφορετικά πράγματα που πρέπει να εκτελεστούν από τον προσομοιωτής. Από τη μια πλευρά, η λεπτομερής προσομοίωση πρωτοκόλλων και δικτύων απαιτεί μια γλώσσα προγραμματισμού, η οποία να μπορεί να διαχειρίζεται με αποδοτικό τρόπο bytes, επικεφαλίδες πακέτων (packet headers), καθώς και να τρέχει αλγόριθμους, οι οποίοι να διαχειρίζονται μεγάλα σύνολα δεδομένων. Για αυτές τις ενέργειες, ο χρόνος εκτέλεσης (run-time) αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο, ενώ ο *χρόνος διόρθωσης & επαναπροσδιορισμού* της προσομοίωσης (turn-around time), ο οποίος περιλαμβάνει τη διαδικασία εύρεσης και διόρθωσης λαθών στον κώδικα και επανάληψη της μεταγλώττισης και της εκτέλεσης, είναι λιγότερο σημαντικός.

Από την άλλη ένα μεγάλο κομμάτι της έρευνας σε δίκτυα υπολογιστών περιλαμβάνει τις διαρκείς δοκιμές και εκτελέσεις της προσομοίωσης μεταβάλλοντας ίσως κατά πολύ λίγο ορισμένες παραμέτρους (όπως π.χ. την ταχύτητα των ζεύξεων, τον ρυθμό λαθών στο κανάλι, τον αριθμό των κόμβων, κλπ), έτσι ώστε να εξερευνηθεί ένας όσο το δυνατόν μεγαλύτερος αριθμός «σεναρίων» σχετικά με την εξεταζόμενη δικτυακή τοπολογία. Για τις ενέργειες αυτές, ο χρόνος κατά τον οποίο μεταβάλλουμε τις παραμέτρους *ρύθμισης* της προσομοίωσης είναι πολύ σημαντικός και η interpreted γλώσσα προγραμματισμού OTcl αποτελεί μια πολύ καλή λύση, μιας και η ρύθμιση μιας δικτυακής τοπολογίας γίνεται στην αρχή και μετά παραμένει η ίδια σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

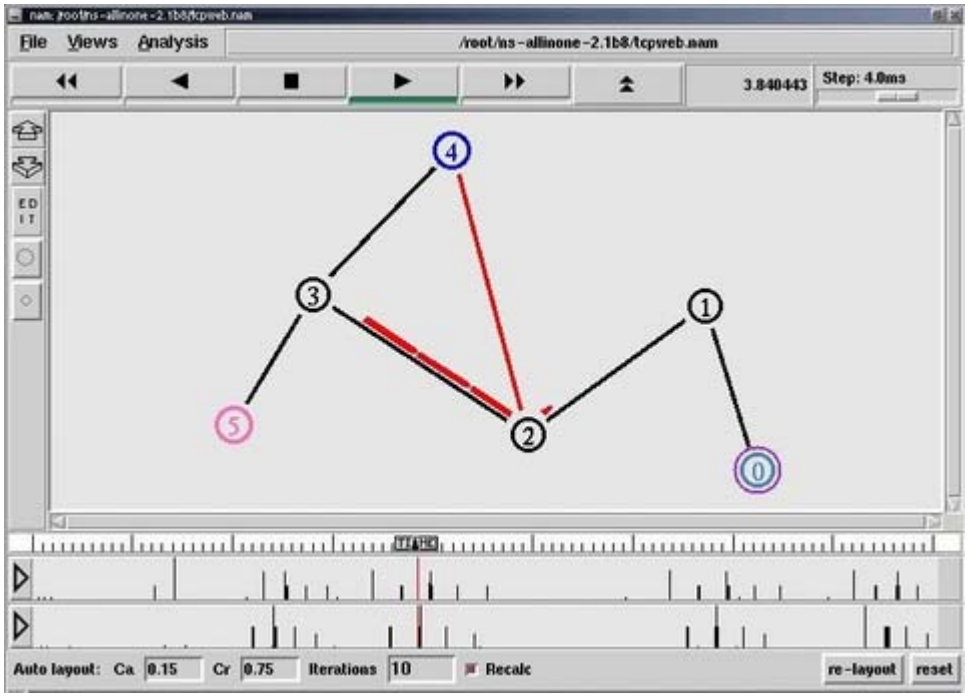
[1] Και άρα και στα αντικείμενά τους



Αν και θα μπορούσαμε να υλοποιήσουμε τα πάντα σε όποια γλώσσα προγραμματισμού θέλουμε από τις δύο (αν και σε C++ είναι λίγο δυσκολότερο μιας και στο προσκήνιο χρησιμοποιείται ο OTcl interpreter), καλό είναι την OTcl να τη χρησιμοποιούμε κυρίως για να ρυθμίζουμε τη δικτυακή τοπολογία μας και τις διάφορες παραμέτρους της, ενώ τη C++ για να υλοποιούμε πολύπλοκους και απαιτητικούς αλγόριθμους δρομολόγησης, ελέγχου λαθών, πρωτοκόλλων εφαρμογών, δικτύου, κλπ. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι ο NS-2 παρέχει τη δυνατότητα να «σπάμε» την υλοποίηση ενός αντικειμένου ανάμεσα στις 2 γλώσσες[2], με μερικές από τις ιδιότητες και μεθόδους να βρίσκονται στο OTcl αντικείμενο (ίσως αυτές της ρύθμισης της προσομοίωσης) και τις περισσότερο πολύπλοκες στο αντίστοιχο C++ αντικείμενο που ανήκει στην compiled hierarchy. Στη συνέχεια, μπορούμε (μέσα από κατάλληλους μηχανισμούς που παρέχει ο NS-2), να **καλούμε** μια μέθοδο του αντικειμένου που είναι γραμμένη σε C++, **μέσα** από το OTcl αντικείμενο, ελέγχοντας και εκτελώντας την προσομοίωσή μας κατευθείαν από την OTcl, η οποία άλλωστε χρησιμοποιείται και στο προσκήνιο από τον NS-2. Ο NS-2 είναι ένας Object-Oriented Simulator και κατά συνέπεια τα πάντα γίνονται με τη χρήση αντικειμένων. Ο NS διαθέτει ένα ευρύ σύνολο αντικειμένων για τη δημιουργία και τη διαχείριση των προσομοιώσεών μας. Το κάθε αντικείμενο διαθέτει ορισμένες **ιδιότητες** (χαρακτηριστικά, τα οποία αντιπροσωπεύονται ως **μεταβλητές** που είναι ενσωματωμένες στο αντικείμενο) και **μεθόδους** (δυνατότητες εκτέλεσης ορισμένων εργασιών από το αντικείμενο, οι οποίες αντιπροσωπεύονται ως **διαδικασίες** που είναι ενσωματωμένες κι αυτές στο αντικείμενο).

Κάθε προσομοίωση που δημιουργούμε στον NS-2, εξαρτάται από ένα κεντρικό αντικείμενο, το *αντικείμενο ελέγχου της προσομοίωσης Simulator*. Με τις ιδιότητες και τις μεθόδους του αντικειμένου αυτού μπορούμε να ελέγχουμε την προσομοίωσή μας, ρυθμίζοντας την τοπολογία της, τα πρωτόκολλα που θα «τρέχουν» οι κόμβοι του δικτύου, τις συνδέσεις ανάμεσα στους κόμβους, το πρωτόκολλο δρομολόγησης που θα χρησιμοποιεί η προσομοίωση, τη *δυναμικότητα* του δικτύου (απενεργοποίηση & ενεργοποίηση συνδέσεων και κόμβων), κλπ. Το αντικείμενο Simulator δημιουργείται στην αρχή και το χρησιμοποιούμε σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

[2] Τα περισσότερα αντικείμενα στον NS-2 έτσι λειτουργούν

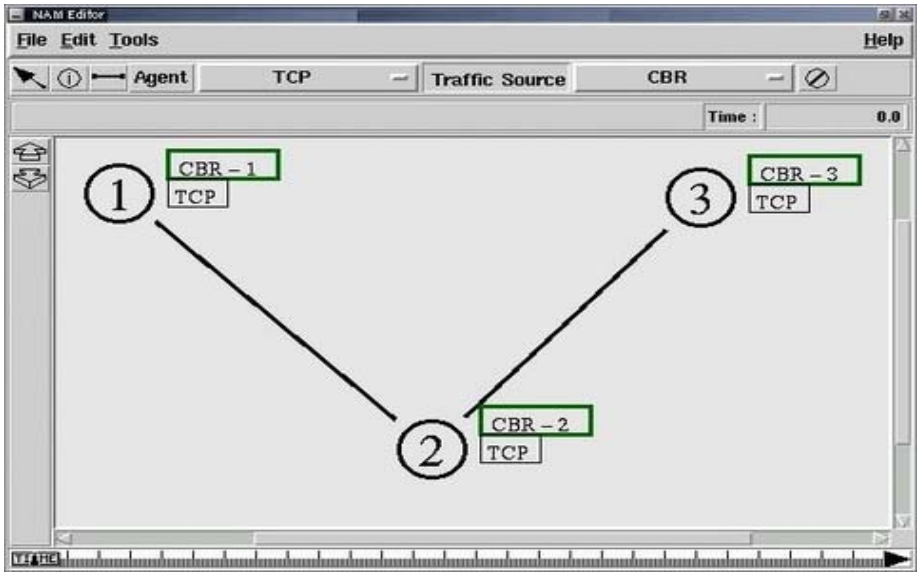


Αφού δημιουργήσουμε το αντικείμενο ελέγχου της προσομοίωσης, σειρά έχει η δημιουργία της δικτυακής μας τοπολογίας, η οποία ξεκινά με τη δημιουργία των *κόμβων*. Ένας κόμβος μπορεί να αντιπροσωπεύει τον υπολογιστή ενός χρήστη, έναν δρομολογητή, ή ακόμη και ένα ολόκληρο εργαστήριο υπολογιστών, ανάλογα ίσως και με το ρυθμό με τον οποίο μεταδίδει δεδομένα. Επίσης, μπορεί να αντιπροσωπεύει και έναν ασύρματο κόμβο (κινητό ή ακίνητο), ή έναν δορυφόρο, κλπ, ανάλογα πάντα με το τι θέλουμε να προσομοιώσουμε.
Αφού δημιουργήσουμε τους κόμβους και τις συνδέσεις τους, θα πρέπει να δημιουργήσουμε και κάποια κυκλοφορία δεδομένων ανάμεσά τους. Αυτό απαιτεί δύο πράγματα. Καταρχήν θα πρέπει να εξοπλίσουμε τους **κόμβους** μας με τα κατάλληλα **πρωτόκολλα** μετάδοσης δεδομένων, όπως είναι το TCP, το UDP, το SCTP, κλπ. Ωστόσο, επειδή αυτά τα πρωτόκολλα δεν είναι ικανά να αποστέλλουν και να λαμβάνουν δεδομένα από μόνα τους, χρειάζεται να προσδιορίσουμε και κάποιες **εφαρμογές** που να τα χρησιμοποιούν (π.χ. μια εφαρμογή FTP).
Όπως προαναφέραμε, θα πρέπει να δημιουργήσουμε και τις κατάλληλες **εφαρμογές** που θα χρησιμοποιούν τα πρωτόκολλα αυτά για την αποστολή και λήψη των δεδομένων τους. Υπάρχουν διαφορετικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο TCP και άλλες που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο UDP. Ένα παράδειγμα εφαρμογής για το TCP πρωτόκολλο είναι η μεταφορά αρχείων FTP Application, ενώ παραδείγματα εφαρμογών για το UDP πρωτόκολλο είναι : μία εφαρμογή που να αποστέλλει δεδομένα με σταθερό ρυθμό (Constant Bit Rate – CBR Application) και μία που αποστέλλει δεδομένα σε τυχαίες χρονικές στιγμές (exponential application).
Με τον NS-2 έχουμε τη δυνατότητα να εισάγουμε μοντέλα δυναμικής διαχείρισης της δικτυακής τοπολογίας μας. Τα μοντέλα αυτά έχουν να κάνουν με την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση των ζεύξεων μεταξύ των κόμβων του δικτύου, έτσι ώστε να προσομοιωθούν περιπτώσεις όπου μια ζεύξη ή ένας κόμβος είναι ελαττωματικός και προκαλεί κατά συνέπεια απώλεια δεδομένων.
Επιπλέον με τον NS-2 έχουμε τη δυνατότητα να **παρακολουθούμε** μία ή περισσότερες ουρές της δικτυακής μας τοπολογίας. Αυτό γίνεται με τη χρήση των αντικειμένων τύπου **Monitor**, τα οποία μπορούν να συσχετίζονται με τις ουρές της δικτυακής μας τοπολογίας και να καταγράφουν την κίνηση σε αυτές μέσα στις ιδιότητές τους. Στο τέλος της προσομοίωσης (ή όποτε άλλοτε θέλουμε) μπορούμε απλά να **ανακτήσουμε** τις τιμές αυτών των ιδιοτήτων και είτε να τις αποθηκεύσουμε σε αρχεία, ή να τις εμφανίσουμε στην οθόνη.

Ο προσομοιωτής NS-2 συνοδεύεται από ένα βοηθητικό εργαλείο οπτικής απεικόνισης της εκτέλεσης της προσομοίωσής μας, τον **Network Animator (NAM).** Όταν απεικονίζουμε την προσομοίωσή του NS-2 σε NAM μπορούμε να χρωματίσουμε με διαφορετικό χρώμα τις ροές των Agents πρωτοκόλλου, έτσι ώστε να μπορούμε να τις ξεχωρίσουμε και να παρακολουθούμε με μεγαλύτερη ευκρίνεια τη ροή των αποτελεσμάτων.

2.4 Netrwork Animator (NAM)

Το NAM είναι ένα πρόγραμμα απεικόνισης βασισμένο στην γλώσσα προγραμματισμού Tcl/Tk για την παρακολούθηση αρχείων δικτυακών προσομοιώσεων που έχουν δημιουργηθεί από εργαλεία προσομοίωσης όπως είναι το NS-2. Υποστηρίζει την σχεδίαση τοπολογιών, την απεικόνιση του επιπέδου των πακέτων και πολλά εργαλεία παρακολούθησης των δεδομένων. Το NAM ξεκίνησε στην LBL και εξελίχθηκε σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Έτσι λοιπόν αν κανείς προτιμά ένα γραφικό περιβάλλον στο οποίο θα μπορεί να υλοποιεί τις προσομοιώσεις που δημιουργεί μέσω του NS-2 το NAM υποστηρίζει ένα drag and drop περιβάλλον χρήστη. Σε αυτό μπορούν να τοποθετηθούν οι δικτυακοί κόμβοι, να ενωθούν μεταξύ τους και στη συνέχεια να οριστούν οι παράγοντες που επιθυμεί ο χρήστης καθώς και η αντίστοιχη εφαρμογή ή η γεννήτρια κίνησης. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένα παράδειγμα μιας απλής χρήσης του NAM. Για να υλοποιηθεί την τοπολογία που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα θα πρέπει να κάνουμε τα εξής :



NAM Editor

Στην μπάρα εργαλείων κάνουμε κλικ στο κουμπί Add node και τοποθετούμε τρεις κόμβους στο παράθυρο του προγράμματος κάνοντας δεξί κλικ στις σωστές θέσεις. Για να ενώσουμε τους κόμβους κάνουμε κλικ στο Add link. Επιλέγουμε τον έναν κόμβο και κρατώντας πατημένο το κουμπί του ποντικιού επιλέγουμε τον άλλο κόμβο για να δημιουργήσουμε έναν σύνδεσμο. Στη συνέχεια ποια μέσα θέλουμε να χρησιμοποιήσομε στο δίκτυο από μενού των agents. Για να προστεθεί το μέσο θα πρέπει να κάνουμε κλικ στον κατάλληλο κόμβο. Τέλος επιλέγουμε ποια εφαρμογή θέλουμε να προσομοιώσουμε, δηλαδή ή FTP ή CBR πηγή. Για να προσθέσουμε την εφαρμογή θα πρέπει να κάνουμε κλικ στο επιλεγμένο μέσο. Σε αυτό το σημείο με δεξί κλικ στα διάφορα στοιχεία της τοπολογίας μπορούμε να διαμορφώσουμε τις ιδιότητές τους, όπως το χρώμα ή ο χρόνος έναρξης και λήξης της εφαρμογής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προσομοίωση πρέπει πρώτα να μεταγλωττιστεί από το NS-2 και στη συνέχεια να τρέξει στο περιβάλλον του NAM.

3. OMNET ++

3.1 Εισαγωγή

Το OMNET++ είναι ένα πακέτο προσομοίωσης διακριτών γεγονότων βασισμένο στη γλώσσα C++ που αναπτύχθηκε στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Βουδαπέστη από τον Andr'as Varga. Ο αρχικός τομέας εφαρμογών του OMNET++ είναι η προσομοίωση δικτύων υπολογιστών και άλλων κατανεμημένων συστημάτων. Είναι πρόγραμμα open-source, ελεύθερο για μη κερδοσκοπική χρήση, και έχει μια αρκετά μεγάλη και ενεργή κοινότητα χρηστών. Επιτρέπει επίσης τη σχεδίαση αρθρωτών μοντέλων προσομοίωσης, τα οποία μπορούν να συνδυαστούν και να επαναχρησιμοποιηθούν αρκετά εύκολα. Έχει αποδειχθεί ότι αυτό το πλαίσιο προσομοίωσης είναι κατάλληλο για την προσομοίωση σύνθετων συστημάτων όπως τους κόμβους Διαδικτύου και τη δυναμική των πρωτοκόλλων TCP/IP με τρόπο πολύ ρεαλιστικό. Το OMNET++ υποστηρίζει ένα πολύ καλά δομημένο και εξίσου βοηθητικό γραφικό περιβάλλον το GNED το οποίο υπάρχει ελεύθερο στο internet ώστε να μπορεί ο οποιοσδήποτε κοινός χρήστης να το κατεβάσει και να το τρέξει στον υπολογιστή του. Το OMNET++ αν και μπορεί από μόνο του να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές προσομοίωσης χρησιμοποιείται ευρέως ως πλατφόρμα πάνω στην οποία έχουν αναπτυχθεί άλλα προγράμματα προσομοίωσης που αφορούν σε συγκεκριμένες κατηγορίες και τύπους δικτύων και τα οποία θα αναφέρουμε στη συνέχεια.
Το OMNET++ τρέχει εξίσου καλά στα Linux και στα περισσότερα λειτουργικά συστήματα που βασίζονται ή μοιάζουν με Unix, αλλά και σε Win32 πλατφόρμες(Windows 2000, XP). Υπάρχει ελεύθερο στο internet και στο site http://www.omnetpp.org/.

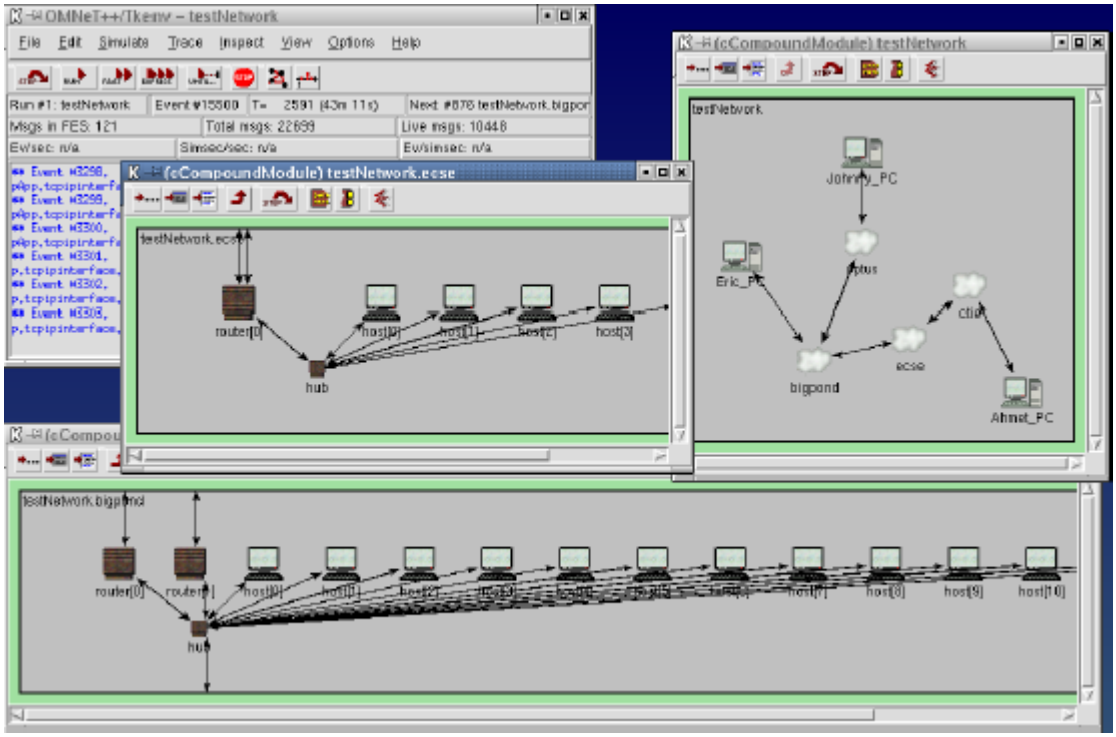
3.2 Χρησιμοποιώντας το OMNET++

Ο προσομοιωτής OMNET++ λοιπόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για :

- Μοντελοποίηση κυκλοφορίας των δικτύων τηλεπικοινωνιών
- Μοντελοποίηση πρωτοκόλλων
- Μοντελοποίηση δικτύων ουρών αναμονής
- Μοντελοποίηση πολυεπεξεργαστών και άλλων κατανεμημένων hardware συστημάτων
- Επικύρωση αρχιτεκτονικών υλικού
- Αξιολόγηση των πτυχών απόδοσης των σύνθετων συστημάτων λογισμικού <>
- Μοντελοποίηση οποιουδήποτε άλλου συστήματος όπου η προσέγγιση διακριτών γεγονότων είναι κατάλληλη.

Τα προσομοιωμένα μοντέλα αποτελούνται από ιεραρχικά τοποθετημένες ενότητες. Στο OMNET++ υπάρχουν δύο τύποι ενοτήτων: απλές και σύνθετες ενότητες. Οι απλές ενότητες διαμορφώνουν το χαμηλότερο επίπεδο ιεραρχίας και εφαρμόζουν την δραστηριότητα μιας ενότητας και μπορούν αυθαίρετα να συνδυαστούν για να διαμορφώσουν τις σύνθετες ενότητες. Οι ενότητες επικοινωνούν με τη μεταβίβαση μηνυμάτων. Τα μηνύματα μπορεί να σταλούν είτε μέσω των συνδέσεων που εκτείνονται μεταξύ των ενοτήτων είτε άμεσα στις ενότητες προορισμού τους. Ο χρήστης καθορίζει τη δομή του μοντέλου (τις ενότητες και τη διασύνδεσή τους) με τη χρησιμοποίηση της γλώσσας περιγραφής τοπολογίας (NED) από το OMNET++.
Οι απλές ενότητες εφαρμόζονται στην C++, χρησιμοποιώντας τις κλήσεις συστήματος του πυρήνα προσομοίωσης και την βιβλιοθήκη της κλάσης της προσομοίωσης. Για κάθε απλή ενότητα, είναι δυνατό να επιλεχθεί προσομοίωση μεταξύ των τύπων proccess-style και protocol-style, ανάλογα με το τι επιθυμεί ο χρήστης. Επομένως, διαφορετικά μέρη υπολογισμού και συστημάτων επικοινωνιών μπορούν να προγραμματιστούν με φυσικό τρόπο και να συνδεθούν εύκολα. Η βιβλιοθήκη της κλάσης προσομοίωσης παρέχει μια καλά ορισμένη διεπαφή (API) στον προγραμματιστή εφαρμογής για τις πιο κοινές εργασίες

προσομοίωσης, που περιλαμβάνουν: τυχαία παραγωγή αριθμού, ουρές, πίνακες, μηνύματα, εξερεύνηση τοπολογίας και δρομολόγηση. Επίσης δημιουργία και καταστροφή ενότητας, δυναμικές τοπολογίες, στατιστικά στοιχεία, εκτίμηση πυκνότητας (που περιλαμβάνει ιστογράμματα, P2 και K-split) καθώς και καταγραφή των δεδομένων εξόδου. Η αντικειμενοστραφής προσέγγιση επιτρέπει την εύκολη επέκταση των κλάσεων της βάσης που παρέχονται από τον πυρήνα προσομοίωσης.
Τα στοιχεία του μοντέλου συντάσσονται και συνδέονται με τη βιβλιοθήκη προσομοίωσης και μια από τις βιβλιοθήκες διεπαφής με το χρήστη για να διαμορφώσουν ένα εκτελέσιμο πρόγραμμα. Μια βιβλιοθήκη διεπαφής με τον χρήστη βελτιστοποιείται για το commandline, ενώ η άλλη χρησιμοποιεί ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη (GUI) που μπορεί να χρησιμοποιείται για να εντοπίσει και να διορθώσει τα λάθη της προσομοίωσης (για παράδειγμα, το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει την προσομοίωση της μορφής ενός δικτύου).



Σχήμα 1 : Οθόνη του OMNET++ που δείχνει ένα ιεραρχικό μοντέλο δικτύου. Το πάνω δεξιά παράθυρο δείχνει την τοπολογία του δικτύου προσομοίωσης που αποτελείται από τέσσερα υποδίκτυα. Οι τοπολογίες των δύο από αυτά τα υποδίκτυα, ecse και bigpond φαίνονται στο μεσαίο και στο κάτω παράθυρο αντίστοιχα.

Το GUI καθιστά το εσωτερικό ενός μοντέλου προσομοίωσης πλήρως ορατό, επιδεικνύει γραφικά το δίκτυο, δείχνει με κίνηση τη ροή των μηνυμάτων και αφήνει το χρήστη να επιλέξει τα αντικείμενα (μηνύματα, ουρές, κ.λ.π.) μέσα στο μοντέλο. Είναι επίσης δυνατό να αλλαχτούν οι παράμετροι και τα πεδία μηνυμάτων για τη διαδικασία της διόρθωσης. Τα χαρακτηριστικά της οπτικοποίησης καθιστούν το OMNET++ κατάλληλο ακόμη και για εκπαιδευτικούς ή λόγους επίδειξης. Λόγω της αρθρωτής σχεδίασης, είναι δυνατό να ενσωματωθεί η μηχανή προσομοίωσης (συμπεριλαμβανομένων των μοντέλων) σε άλλες εφαρμογές. Το OMNET++ επίσης υποστηρίζει την προσομοίωση παράλληλων διακριτών γεγονότων (PDES).

3.3 Δημιουργία και Εκτέλεση μιας Προσομοίωσης

Ένα μοντέλο στο OMNET++ αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη :

- Τη γλώσσα NED (.ned αρχεία) που περιγράφει την τοπολογία, την δομή του μοντέλου με τις παραμέτρους, τις πύλες κ.τ.λ. Τα αρχεία NED μπορεί να γραφτούν σε οποιονδήποτε επεξεργαστή κειμένου ή με τον GNED γραφικό επεξεργαστή.
- Τους ορισμούς των μηνυμάτων (msg. αρχεία). Μπορεί ο προγραμματιστής να ορίσει διάφορους τύπους μηνυμάτων και να προσθέσει πεδία δεδομένων σε αυτά. Το OMNET++ θα μεταφράσει τους ορισμούς των μηνυμάτων σε πλήρως δομημένες κλάσεις της C++.
- Τα αρχεία από τις απλές ενότητες. Είναι αρχεία C++ με κατάληξη .h/.cc .

Το σύστημα προσομοίωσης παρέχει τα ακόλουθα μέρη :

- Ο πυρήνας προσομοίωσης. Αυτός περιέχει τον κώδικα που διαχειρίζεται την προσομοίωση και την βιβλιοθήκη της κλάσης προσομοίωσης. Είναι γραμμένος σε C++ και μαζί με την μεταγλώττιση δημιουργεί μια βιβλιοθήκη (ένα αρχείο με κατάληξη .a ή .lib).
- Διεπαφή με τον χρήστη. Το OMNET++ παρέχει διεπαφή με τον χρήστη που χρησιμοποιείτε κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης για να εξηγήσει τον έλεγχο των λαθών, για επίδειξη των αποτελεσμάτων ή για παράλληλη εκτέλεση προσομοιώσεων. Είναι γραμμένη σε C++ και μαζί με την μεταγλώττιση δημιουργεί μια βιβλιοθήκη (ένα αρχείο με κατάληξη .a ή .lib).

Τα προγράμματα προσομοίωσης δημιουργούνται από τα παραπάνω συστατικά μέρη. Πρώτα τα αρχεία NED μεταγλωττίζονται σε C++ πηγαίο κώδικα, χρησιμοποιώντας τον NEDC μεταφραστή που είναι μέρος του OMNET++. Στη συνέχεια όλα τα αρχεία με τον πηγαίο κώδικα C++ μεταγλωττίζονται και συνδέονται με τον πυρήνα προσομοίωσης και την διεπαφή του χρήστη για να διαμορφώσουν ένα εκτελέσιμο αρχείο προσομοίωσης.
Το εκτελέσιμο αρχείο προσομοίωσης είναι ένα αυτόνομο πρόγραμμα, κατά συνέπεια μπορεί να τρέξει σε άλλες μηχανές χωρίς το OMNET++ ή τα αρχεία του μοντέλου να είναι παρόντα. Όταν το πρόγραμμα αρχίζει, διαβάζει ένα αρχείο σχηματισμού (configuration file συνήθως αποκαλούμενο omnetpp.ini). Αυτό το αρχείο περιέχει τις ρυθμίσεις που ελέγχουν το πώς η εκτελείται προσομοίωση, τιμές των παραμέτρων του μοντέλου κ.λ.π. Το αρχείο σχηματισμού μπορεί επίσης να ορίσει διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να τρέξει η προσομοίωση και στην απλούστερη περίπτωση, θα εκτελεσθούν από το πρόγραμμα προσομοίωσης το ένα μετά από άλλο.
Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης γράφεται σε αρχεία εξόδου : σε ενδιάμεσα αρχεία εξόδου, σε κλιμακωτά αρχεία εξόδου, και ενδεχομένως στα αρχεία εξόδου του χρήστη. Το OMNET++ παρέχει ένα εργαλείο GUI που ονομάζεται Plove για να βλέπει και να σχεδιάζει το περιεχόμενο των αρχείων εξόδου των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Δεν αναμένεται ότι κάποιος θα επεξεργαστεί τα αρχεία αποτελέσματος χρησιμοποιώντας το OMNET++ μόνο: τα αρχεία εξόδου είναι αρχεία κειμένων που μπορούν να διαβαστούν από προγράμματα όπως το Matlab ή το Octave, ή να εισαχθεί στους υπολογισμούς με λογιστικό φύλλο (spreadsheet) όπως στο OpenOffice, το Calc, το Gnumeric ή το Excel. Όλα αυτά τα εξωτερικά προγράμματα παρέχουν την πλούσιες λειτουργίες για στατιστική ανάλυση και απεικόνιση των αποτελεσμάτων, και είναι έξω από το πεδίο του OMNET++ να αναπαραγάγει αυτές τις λειτουργίες.
Ο αρχικός σκοπός της διεπαφής με τον χρήστη είναι να κατασταθούν τα εσωτερικά στοιχεία του μοντέλου ορατά στο χρήστη, να ελεγχθεί η εκτέλεση προσομοίωσης και να επιτραπεί ενδεχομένως στον χρήστη να επέμβει με την αλλαγή των μεταβλητών και των αντικειμένων μέσα στο μοντέλο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στη φάση της ανάπτυξης και διόρθωσης του προγράμματος προσομοίωσης. Εξίσου σημαντικό είναι και το γεγονός ο χρήστης αποκτά μια

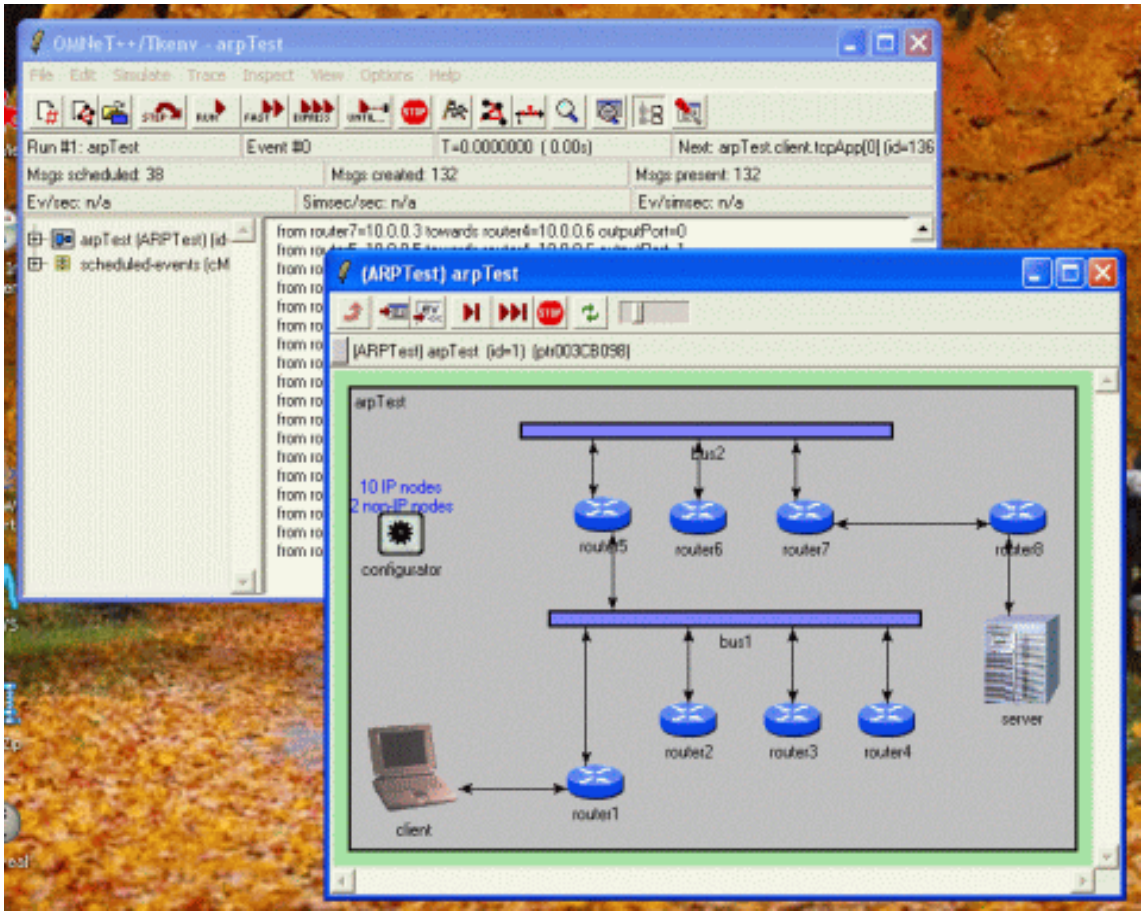
οπτική εμπειρία που τον διευκολύνει να πάρει μια αίσθηση της συμπεριφοράς του μοντέλου. Το γραφικό ενδιάμεσο με τον χρήστη μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να καταδείξει τη λειτουργία ενός προτύπου.
Το ίδιο μοντέλο προσομοίωσης μπορεί να εκτελεσθεί με διαφορετική διεπαφή με τον χρήστη, χωρίς οποιαδήποτε αλλαγή στα αρχεία του μοντέλου από τον ίδιο. Ο χρήστης θα μπορεί να εξετάζει και να διορθώνει την προσομοίωση με ένα ισχυρό γραφικό ενδιάμεσο με τον χρήστη, και τελικά να την τρέχει με ένα απλό και γρήγορο γραφικό περιβάλλον που υποστηρίζει εκτέλεση batch.

3.4 Εργαλεία Προσομοίωσης που Βασίζονται στο OMNET++

Η ανάπτυξη και χρησιμότητα του OMNET++ οδήγησε στην ανάγκη να δημιουργηθούν εργαλεία τα οποία να εξειδικεύουν την προσομοίωση σε συγκεκριμένους τύπους και σχηματισμούς δικτύων. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στα εργαλεία INET Framework, Mobility Framework και IPv6Suite.

3.4.1 INET Framework

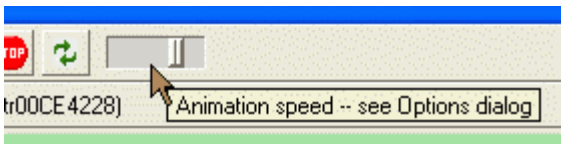
Το INET Framework είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης το οποίο είναι κατάλληλο για την προσομοίωση του TCP/IP και άλλων πρωτοκόλλων που σχετίζονται με το internet, που είναι γραμμένο για το περιβάλλον του OMNET++. Αν κάποιος εγκαταστήσει το INET Framework στον υπολογιστή του και προσπαθήσει να το τρέξει αντικρίσει το εξής παράθυρο :



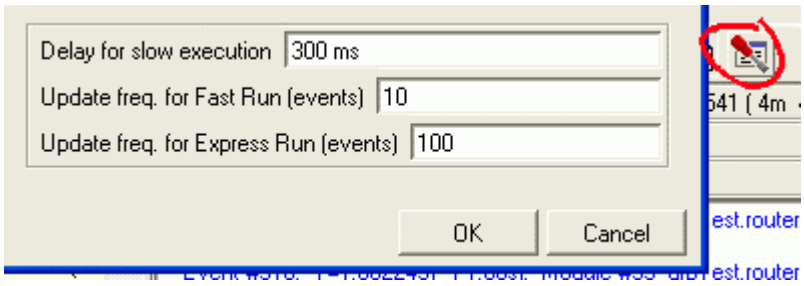
Στο πίσω μέρος της εικόνας φαίνεται η αρχική οθόνη του OMNET++ ενώ στο μπροστινό μέρός βλέπουμε το περιβάλλον του INET Framework. Για να τρέξουμε μια προσομοίωση θα

πρέπει να πατήσουμε το κουμπί Run από κύριο μενού εργαλείων ή πατάμε το F5. Για να την σταματήσουμε αρκεί να πατήσούμε το κόκκινο STOP ή πατώντας το F8.

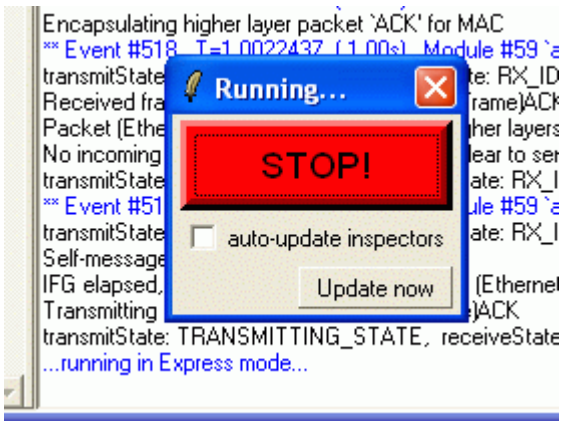
Στη συνέχεια η προσομοίωση ξεκινάει και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το πόσο γρήγορα θέλει να τρέχει αυτή απλά καθορίζοντας την από γραμμή κύλισης στο πάνω μέρος του παραθύρου του προγράμματος.



Το εικονίδιο Fast θα σβήνει το μήνυμα της προσομοίωσης και θα ανανεώνει την γραφική απεικόνιση μόνο ανάμεσα σε κάθε 10 γεγονότα. Αυτό βέβαια μπορούμε να το ρυθμίσουμε από το μενού των επιλογών. Το κουμπί Express παρέχει την υψηλότερη ταχύτητα εκτέλεσης και αυτόματα αν πατηθεί κλείνουν οι γραφικές απεικονίσεις προς τον χρήστη, ενώ ανανεώνει της ενδείξεις στην οθόνη κάθε 1000 γεγονότα κάτι που επίσης μπορεί να αλλάξει από το μενού επιλογών.

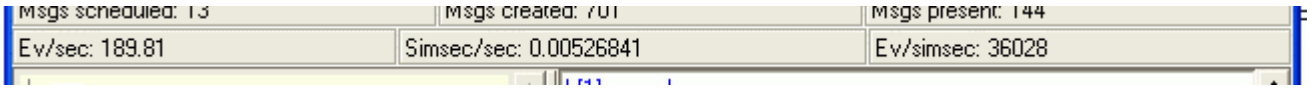


Στην κατάσταση Express μπορούμε να σταματήσουμε την προσομοίωση μόνο πατώντας το μεγάλο κόκκινο STOP που φαίνεται παρακάτω.

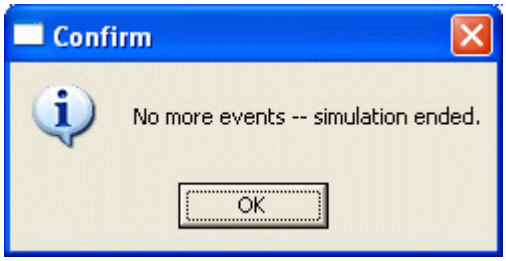


Στο status bar της εφαρμογής μπορούμε να δούμε την ταχύτητα της προσομοίωσης. Η ένδειξη Ev/sec μας λέει πόσα γεγονότα εκτελεί η CPU σε ένα δευτερόλεπτο. Αυτό εξαρτάται

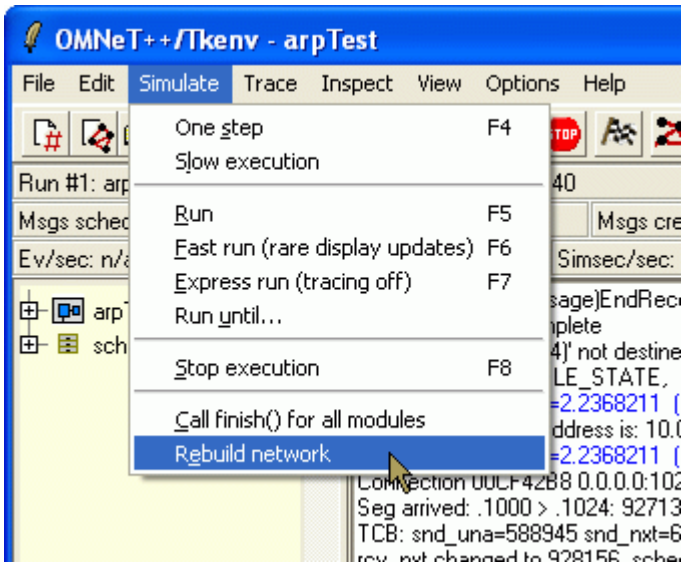
από τις δυνατότητες του υλικού του χρήστη, από το μέγεθος του κώδικα της C++ που χρησιμοποιείται στο μοντέλο και τον τρόπο εκτέλεσης της προσομοίωσης (Normal, Fast, Express). Είναι σύνηθες η Express προσομοίωση να είναι 100-200 φορές γρηγορότερη από την Fast προσομοίωση.



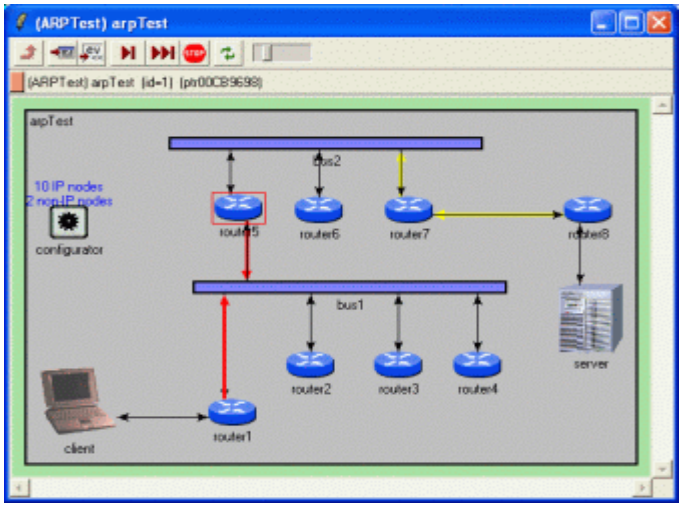
Στην παραπάνω μπάρα μπορούμε επίσης μπορούμε να δούμε πόσα δευτερόλεπτα προσομοίωσης έχουν περάσει σε ένα πραγματικό δευτερόλεπτο εκτέλεσης (Simsec/sec) και πόσα γεγονότα συνέβησαν σε ένα δευτερόλεπτο προσομοίωσης (Ev/Simsec). Η ένδειξη Simsec/sec είναι χρήσιμη για να υπολογίσουμε πόσο θα κρατήσει η προσομοίωση. Η ένδειξη Ev/Simsec είναι ανεξάρτητη από το αν χρησιμοποιούμε Normal, Fast ή Express εκτέλεση και εξαρτάται μόνο από τη φύση και το μέγεθος του μοντέλου.
Αφού τρέξει η προσομοίωσή μετά από λίγο θα εμφανιστεί το επόμενο εικονίδιο πληροφόρησης :



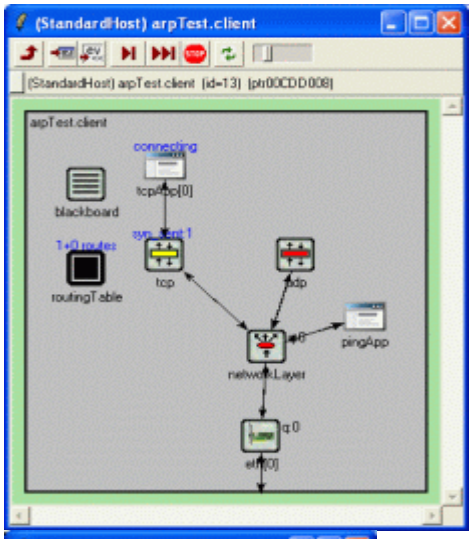
Αυτό το παράθυρο μας πληροφορεί ότι η προσομοίωση τελείωσε και ότι δεν υπάρχουν άλλα γεγονότα τα οποία να μπορούν προσομοιωθούν. Αυτό στο επίπεδο του μοντέλου σημαίνει ότι ο χρήστης έκλεισε την TCP σύνδεση και τελείωσε τις ενέργειές του, ενώ δεν κυκλοφορούν άλλα πακέτα και δεν τρέχει κανένας χρονομετρητής σε ολόκληρο το μοντέλο. Μπορεί επίσης κάποια προσομοίωση να τελειώσει μετά από κάποιο συγκεκριμένο χρόνο προσομοίωσης ή αφού επιτεύχθηκε η απαιτούμενη στατιστική ακρίβεια που είχε καθοριστεί. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να ξαναξεκινήσει πατώντας το Rebuild network στο μενού Simulate. Στην πραγματικότητα αυτό μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε στιγμή της εκτέλεσης της προσομοίωσης και αυτή να επανεκκινήσει.

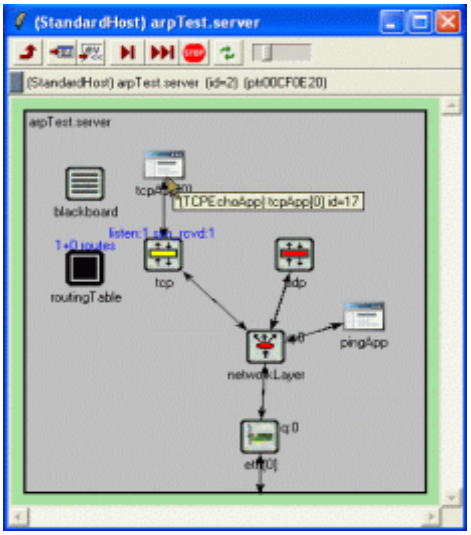


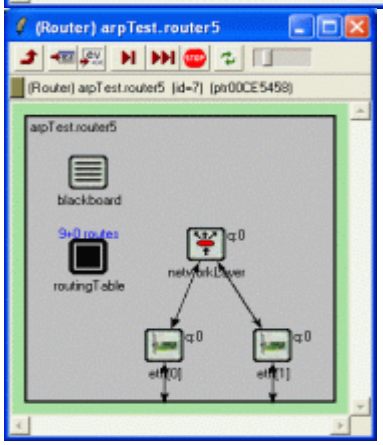
Κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης βλέπουμε κάποια links στο μοντέλο να αναβοσβήνουν με συγκεκριμένα χρώματα, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί :



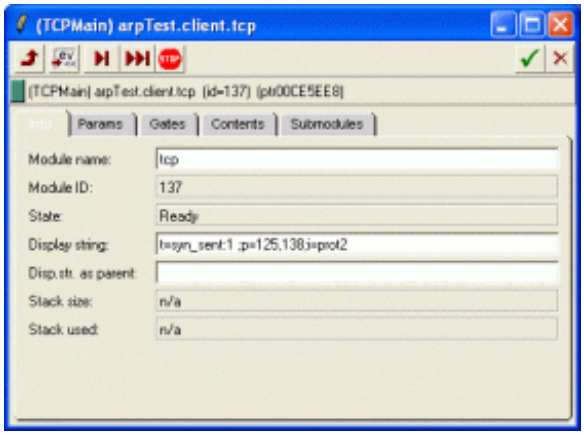
Αν ένα link είναι κίτρινο σημαίνει ότι ο κόμβός στέλνει στο link. Αν ένας κόμβος έχει υποστεί σύγκρουση και σταματήσει την αποστολή για λίγο τότε το link γίνεται κόκκινο. Το κόκκινο πλαίσιο που φαίνεται στο σχήμα γύρω από τον router 5 επισημαίνει την τοποθεσία στην οποία βρίσκεται το γεγονός που εκτελείται την συγκεκριμένη στιγμή.
Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι κάνοντας διπλό κλικ σε έναν κόμβο του σχεδιασμένου μοντέλου μπορούμε να δούμε τα εσωτερικά χαρακτηριστικά του.





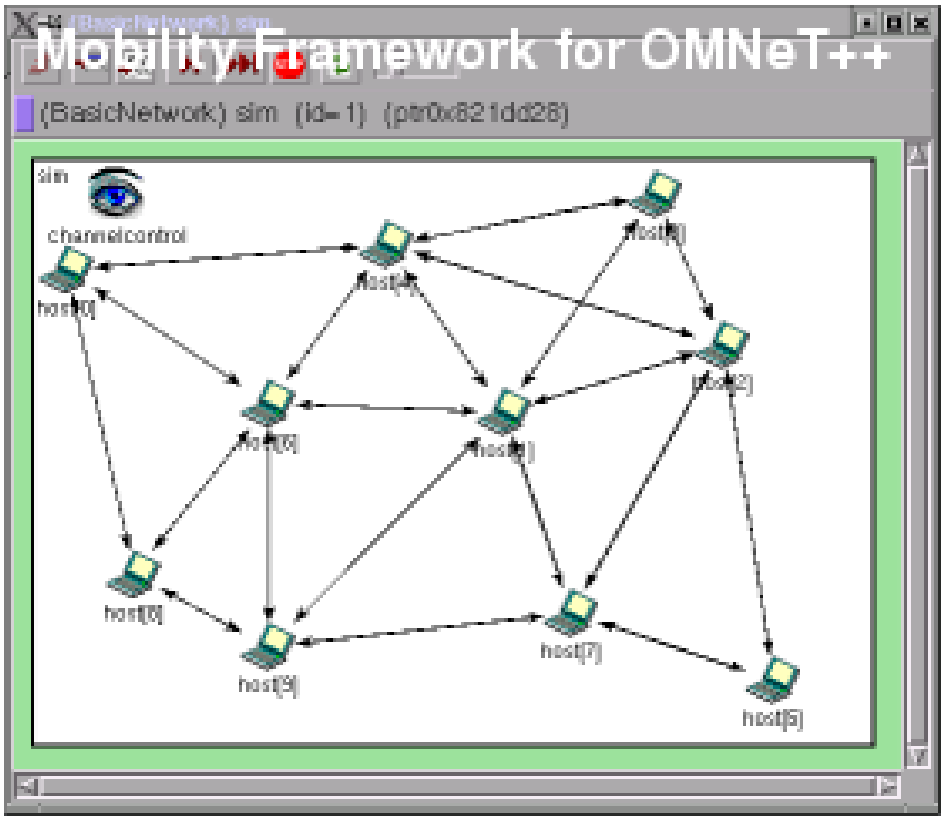


Αν στην συνέχεια ξαναπατήσουμε διπλό κλικ σε αυτά τα στοιχεία που βλέπουμε (TCP, UDP, etc.) τότε ανοίγει ένα παράθυρο με επιλογές όπου μπορούμε να ορίσουμε τα χαρακτηριστικά τους.



3.4.2 Mobility Framework

Αυτό το εργαλείο έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει ασύρματα και κινητά δίκτυα προσομοίωσης μέσα στα πλαίσια που προσφέρει το OMNET++. Το εργαλείο αυτό παρέχει υποστήριξη για κινητούς κόμβους, διαχείριση δυναμικής σύνδεσης και μοντέλα ασύρματων καναλιών. Επιπλέον προσφέρει απλές ενότητες υλοποίησης οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν και να παράγουν σύνθετες ενότητες. Με αυτά τα δεδομένα είναι αρκετά εύκολο για έναν προγραμματιστή να αναπτύξει ένα δικό του πρωτόκολλο για το Mobility Framework (MF) χωρίς να χρειάζεται να ασχοληθεί με το interface άλλα και μα τα στοιχεία διαλειτουργικότητας.



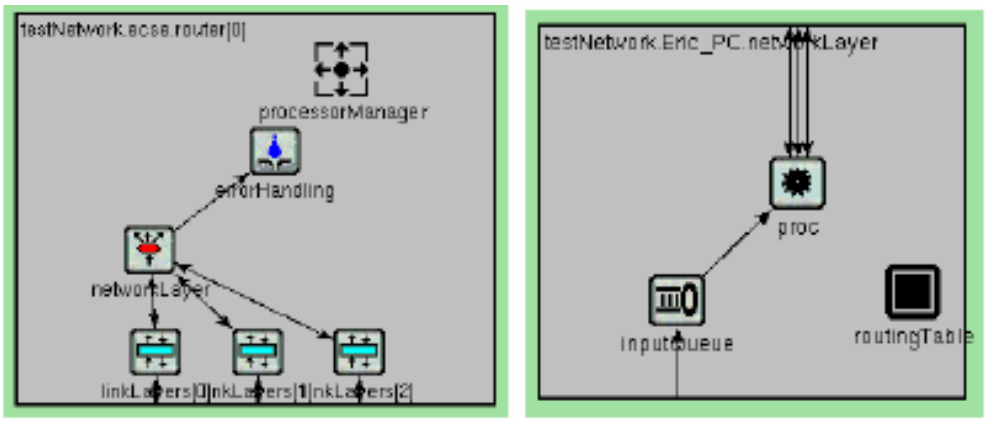
Το MF μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση :

- Σταθερά ασύρματα δίκτυα
- Κινητά ασύρματα δίκτυα
- Κατανεμημένα (ad-hoc) και συγκεντρωτικά δίκτυα
- Δίκτυα αισθητήρων
- Πολυκάναλα ασύρματα δίκτυα
- Πολλές άλλες προσομοιώσεις που χρειάζονται κινητή υποστήριξη ή ασύρματο interface.

Αυτό τον καιρό αναπτύσσεται μια βιβλιοθήκη με τα πρότυπα πρωτόκολλα για το MF (802.11, AODV, …), με τελικό σκοπό να δημιουργηθεί μια πλούσια βιβλιοθήκη για τέτοιου είδους πρωτόκολλα έτσι ώστε να γίνει εύκολη η προσομοίωση τους μέσα από το εργαλείο. Υπάρχει εγχειρίδιο για την λειτουργία του προγράμματος το οποίο είναι προσβάσιμο μέσω internet σε μορφή pdf με το οποίο θα πρέπει να ξεκινήσει κάποιος που ενδιαφέρεται να υλοποιήσει προγράμματα προσομοίωσης με τη χρήση του FM. Για να εγκαταστήσει κάποιος το MF στον υπολογιστή του θα πρέπει να διαθέτει την έκδοση 3.0a4 ή παραπάνω του OMNET++ με όλες του τις λειτουργίες. Αν πληροί αυτές τις προϋποθέσεις αρκεί να κατεβάσει την τελευταία έκδοση το MF από το site *http://mobility-fw.sourceforge.net* .

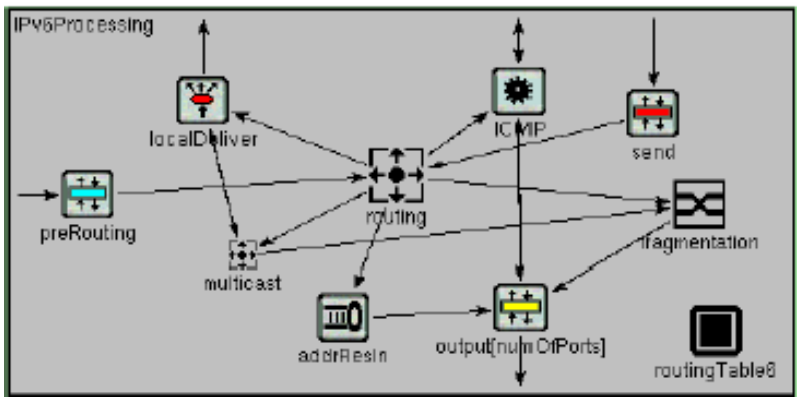
3.4.3 IPv6Suite

Το IPv6Suite εργαλείο προσομοίωσης αποτελείται από πολλά λειτουργικά μέρη και όπως είναι λογικό τα κυριότερα μέρη αφορούν τα επίπεδα δικτύωσης (network layer) και ελέγχου σύνδεσης δεδομένων (data link layer). Με τον συνδυασμό αυτών των μερών μπορούν να δημιουργηθούν προσομοιωμένοι hosts, routers, Ethernet, point-to-point συνδέσεις κ.α. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μοντέλο ενός δρομολογητή (router) σε τρεις δικτυακούς τύπους. Το εργαλείο αυτό παρέχει σημαντικές βελτιώσεις στην υλοποίηση προσομοιώσεων IP πρωτοκόλλων χρησιμοποιώντας διάφορους μηχανισμούς φυσικής επικοινωνίας (point-to-point συνδέσεις, Ethernet συνδέσεις κ.α.), όπως επίσης και στο σχεδιασμό κόμβων χρησιμοποιώντας οποιονδήποτε συνδυασμό με όλες αυτές τις φυσικές συνδέσεις.



Το μοντέλο προσομοίωσης ενός router σε τρεις διαφορετικούς τύπους δικτύων

Επιπλέον το IPv6Suite υποστηρίζει την μοντελοποίηση διπλής στοίβας δρομολογητές που επιτρέπουν την ροή πακέτων μέσω του IPv4 και του IPv6 ταυτόχρονα. Ακόμη επιτρέπει πολλά interfaces του επιπέδου ελέγχου σύνδεσης δεδομένων να είναι παρόντα σε ένα και μόνο κόμβο.
Για να τρέξουμε μια προσομοίωση με αυτό το εργαλείο θα πρέπει να δημιουργήσουμε τη σχεδίαση του μοντέλου μέσα από το οποίο θα φαίνεται ο προορισμός των πακέτων, ο αποστολέας και ο δέκτης καθώς και οι μηχανισμοί αναγνώρισης των γειτονικών κόμβων. Μια τέτοια σχεδίαση μέσω του εργαλείου IPv6Suite φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί :

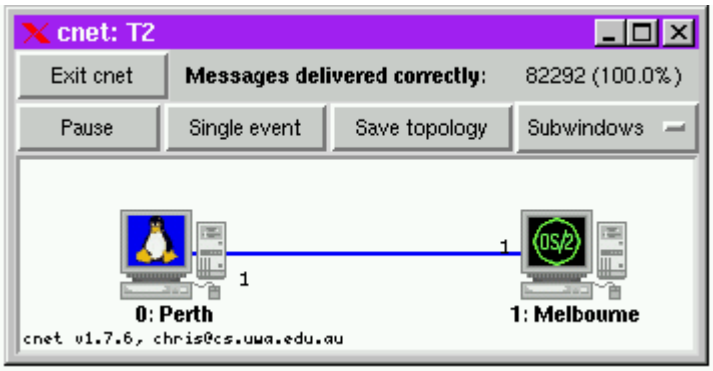


Το IPv6Suite είναι διαθέσιμο στο internet και η εγκατάστασή του απαιτεί την ύπαρξη του OMNET++. Βρίσκεται ελεύθερο για κατέβασμα στην ιστοσελίδα *http://ctieware.eng.monash.edu.au/twiki/bin/view/Simulation/Documentation* .

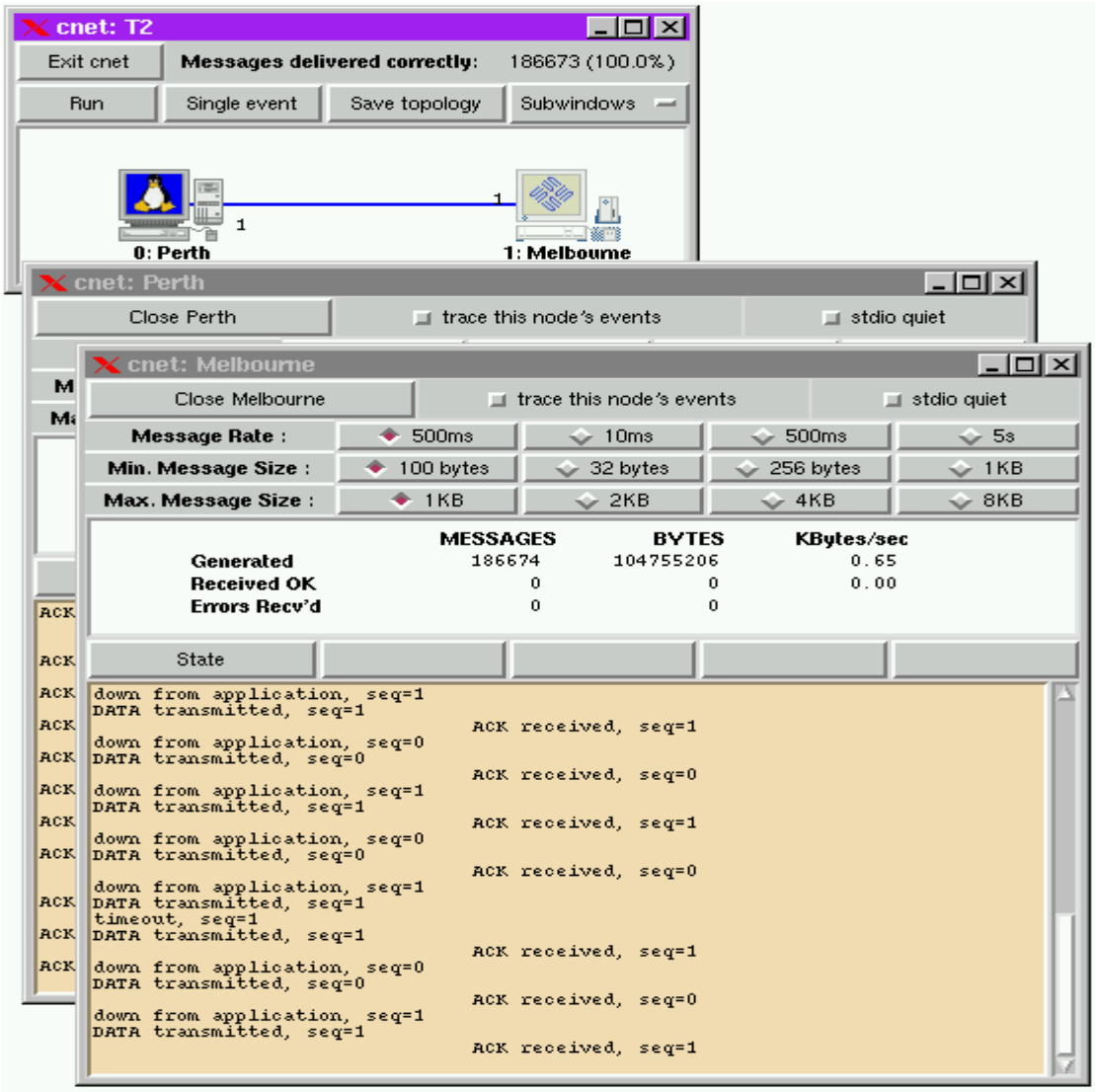
4. CNET Network Simulator

4.1 Παρουσίαση του CNET

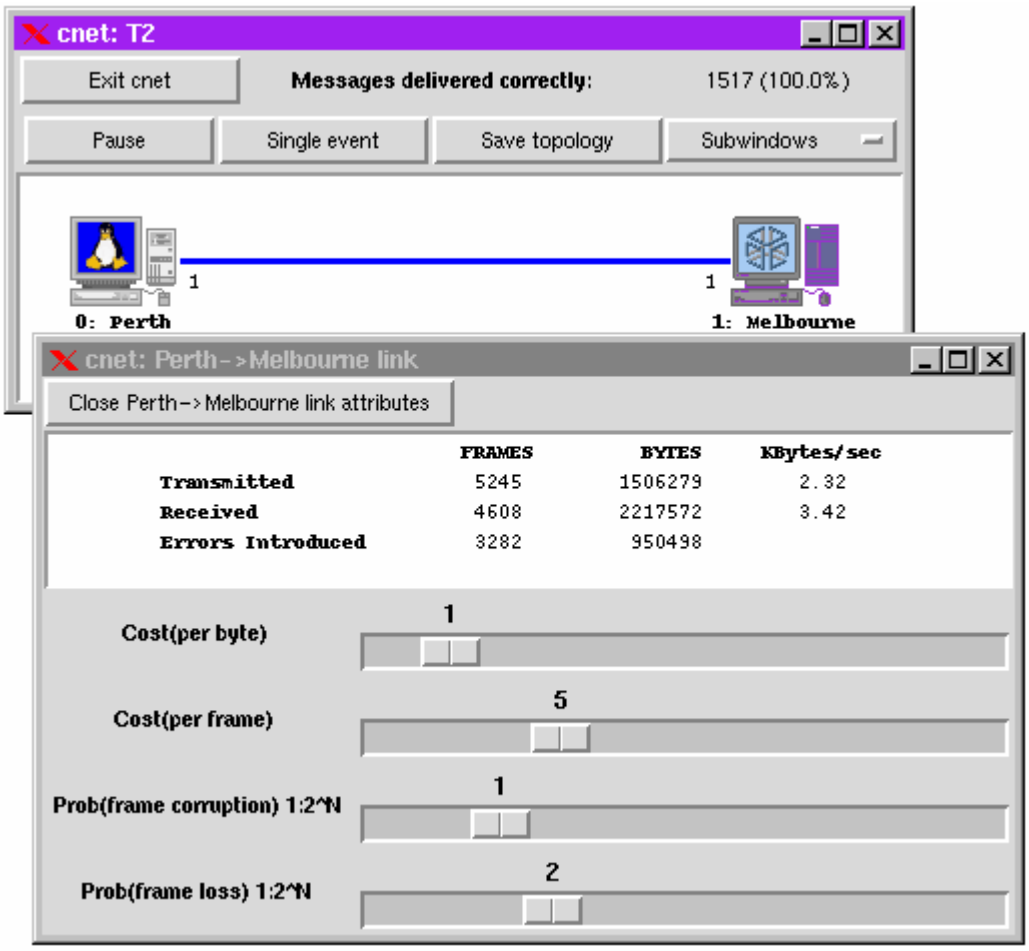
Το CNET είναι εργαλείο προσομοίωσης δικτύων το οποίο επιτρέπει τον πειραματισμό με πολλά πρωτόκολλα των επιπέδων ελέγχου σύνδεσης δεδομένων (data-link layer), δικτύωσης (network layer), δρομολόγησης και επικοινωνίας, καθώς και σε δίκτυα που αποτελούνται από οποιοδήποτε συνδυασμό point-to-point συνδέσεων και IEEE 802.3 Ethernet στοιχείων. Με βάση το μοντέλο OSI το cnet παρέχει προσομοίωση στα επίπεδο εφαρμογών αλλά και στο φυσικό επίπεδο. Τα πρωτόκολλα που μπορούν να γραφτούν από τους χρήστες είναι απαραίτητο να συμπληρώσουν τα ενδιάμεσα επίπεδα και πιο συγκεκριμένα να υπερκεράσουν τα κατεστραμμένα ή χαμένα πλαίσια που το φυσικό επίπεδο του cnet τυχαία παράγει. Επιπλέον οι εξειδικευμένοι χρήστες μπορούν να αναπτύξουν διαφορετικά το επίπεδο εφαρμογών και το φυσικό επίπεδο και να παράγουν διαφορετικά στατιστικά χαρακτηριστικά της παραγωγής μηνυμάτων και της αποστολής δεδομένων. Το εύρος της προσομοίωσης μπορεί να ποικίλει από λίγους μέχρι λίγες εκατοντάδες κόμβους. Το cnet είναι ένα open-source εργαλείο το οποίο μπορεί κανείς να κατεβάσει από το site http://www.csse.uwa.edu.au/cnet/
Το cnet είτε εμφανίζει ολόκληρο το δίκτυο με τη βοήθεια της Tcl/Tk είτε τρέχει με λιγότερο γραφικό τρόπο σε ένα ASCII παράθυρο. Με τη βοήθεια της Tcl/Tk το cnet παρέχει μια γραφική απεικόνιση του δικτύου κατά την εκτέλεση και επιτρέπει ένα μεγάλο αριθμό ρυθμίσεων και χαρακτηριστικών του δικτύου να μπορούν να μετατραπούν κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης. Οι κόμβοι μπορούν να επιλεγούν με το ποντίκι και με διπλό κλικ να εμφανιστεί ένα παράθυρο το οποίο δείχνει την έξοδο και τα στατιστικά του πρωτοκόλλου του κόμβου. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του κόμβου, όπως ο ρυθμός και το μέγεθος των μηνυμάτων, μπορούν να τροποποιηθούν κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης επιλέγοντας τα κουμπιά επιλογής. Ομοίως οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για τα χαρακτηριστικά των κόμβων μπορεί ταυτόχρονα να αλλάξουν επιλέγοντας και αλλάζοντας τις καθολικές μεταβλητές. Από ένα άλλο μενού κάθε κόμβος μπορεί να αναγκαστεί να επανεκκινήσει , να διακοπεί, να τερματιστεί και να επανεκκινήσει, να σταματήσει προσωρινά και να αποτύχει.



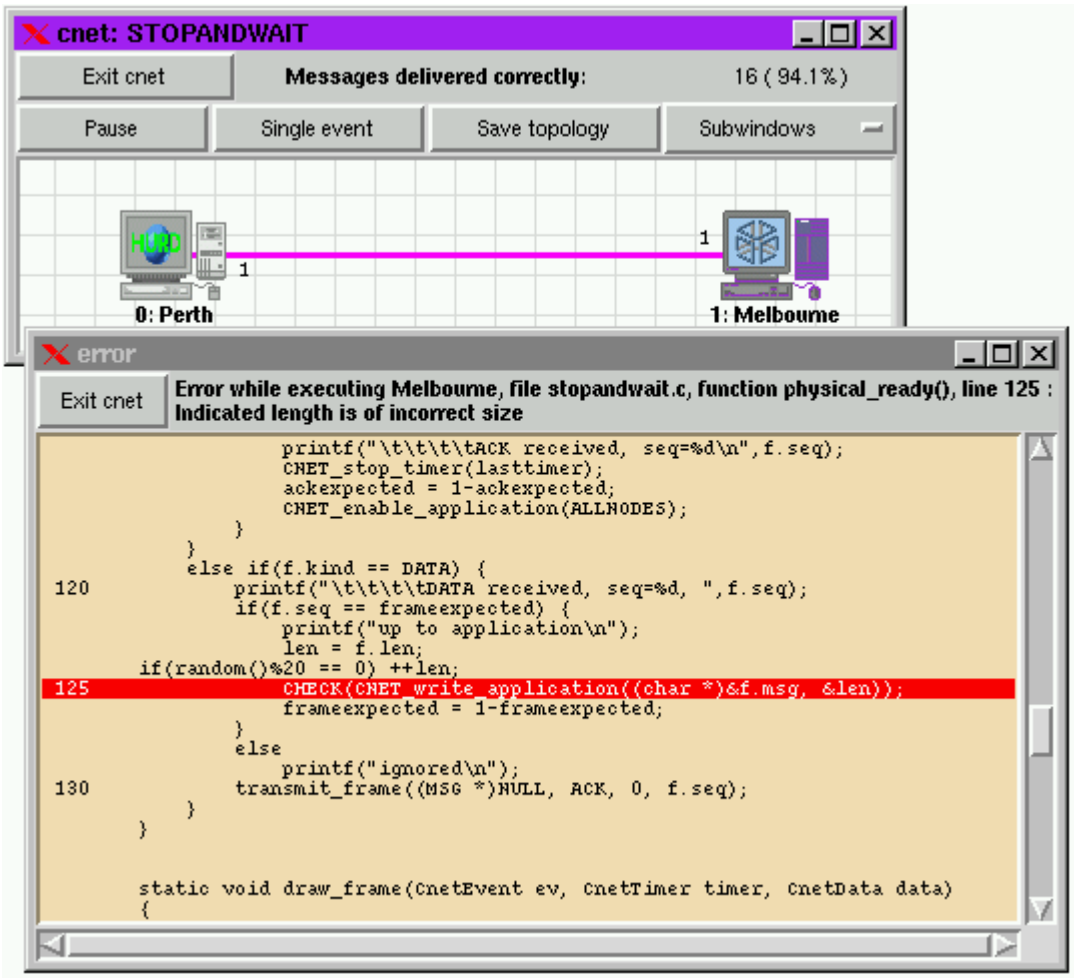
Αυτή είναι μια τυπική απεικόνιση μιας προσομοίωσης με δύο κόμβους, όπου εδώ συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο *stop-and-wait*. Η προσομοίωση βρίσκεται κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης αλλά υπάρχει δυνατότητα να σταματήσει και έπειτα να πραγματοποιηθεί με την εκτέλεση ενός βήματος τη φορά χρησιμοποιώντας τα κουμπιά. Ένα σύνολο από 82292 μηνύματα έχουν εμφανιστεί έως τώρα και το επίπεδο εφαρμογών δεν έχει παρουσιάσει εσφαλμένα μηνύματα. Άρα το πρωτόκολλο αναφέρεται από το πρόγραμμα σαν να είναι 100% σωστό.



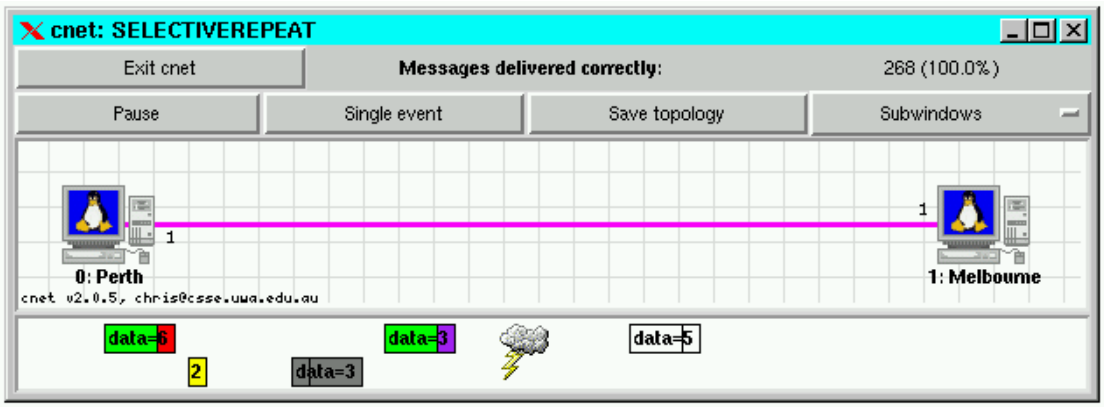
Εδώ κάναμε κλικ σε έναν από τους κόμβους έτσι ώστε να φανεί το παράθυρο εξόδου. Ένα παράθυρο εξόδου είναι διαθέσιμο για κάθε κόμβο ακόμα και σε μεγάλες προσομοιώσεις. Επιλέγοντας έναν σύνδεσμο έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζεται ένα υποπαράθυρο το οποίο δείχνει στατιστικά στοιχεία της μετάδοσης για το συγκεκριμένο link. Οι σύνδεσμοι είναι και προς τις δύο κατευθύνσεις έτσι επιλέγοντας έναν από αυτούς σημαίνει ότι κάνουμε κλικ σε σημείο κοντά στον κόμβο πηγή. Τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης για το κόστος αποστολής και τις πιθανότητες λάθους μπορούν να τροποποιηθούν ενώ η προσομοίωση βρίσκεται σε εκτέλεση μετακινώντας τις μπάρες κύλισης. Ομοίως τα χαρακτηριστικά όλων των συνδέσεων του δικτύου μπορούν ταυτόχρονα να τροποποιηθούν κατά την διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης επιλέγοντας και αλλάζοντας τα συνολικά χαρακτηριστικά των συνδέσεων.



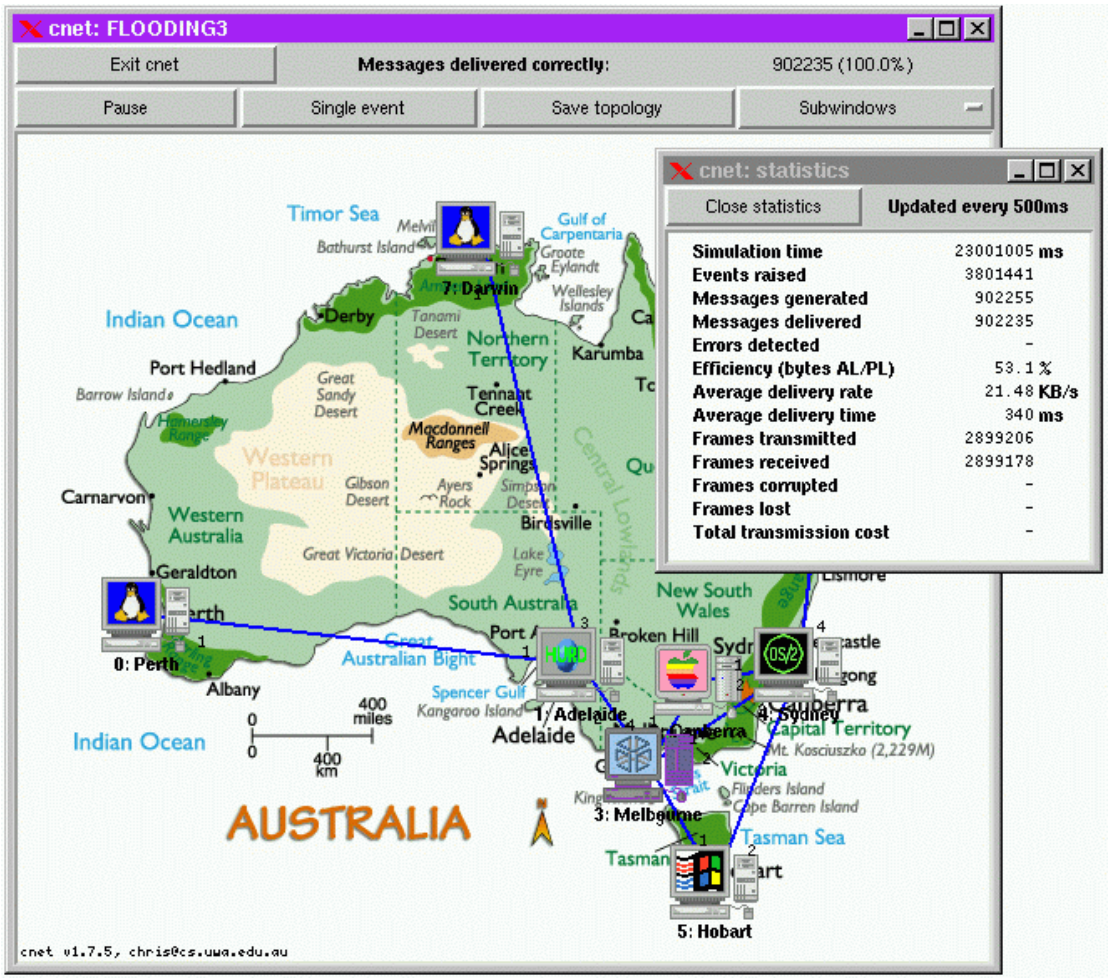
Το cnet είναι ικανό αυτόματα να ανιχνεύει και αναφέρει έναν μεγάλο αριθμό σφαλμάτων τα οποία είναι πιθανόν να γίνουν κατά την ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου. Αυτά περιέχουν λάθος ορισμό των παραμέτρων σε λειτουργίες, λάθος ορισμός των συνδέσεων, διευθύνσεις και χρονομετρητές, μηνύματα που πέρασαν σε λάθος προορισμούς, εκτός σειράς ή διπλά μηνύματα λάθους. Όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα, τα λάθη αναφέρονται σε ένα pop-up παράθυρο περιγράφοντας το λάθος και τη θέση του στον κώδικα πηγής του χρήστη.



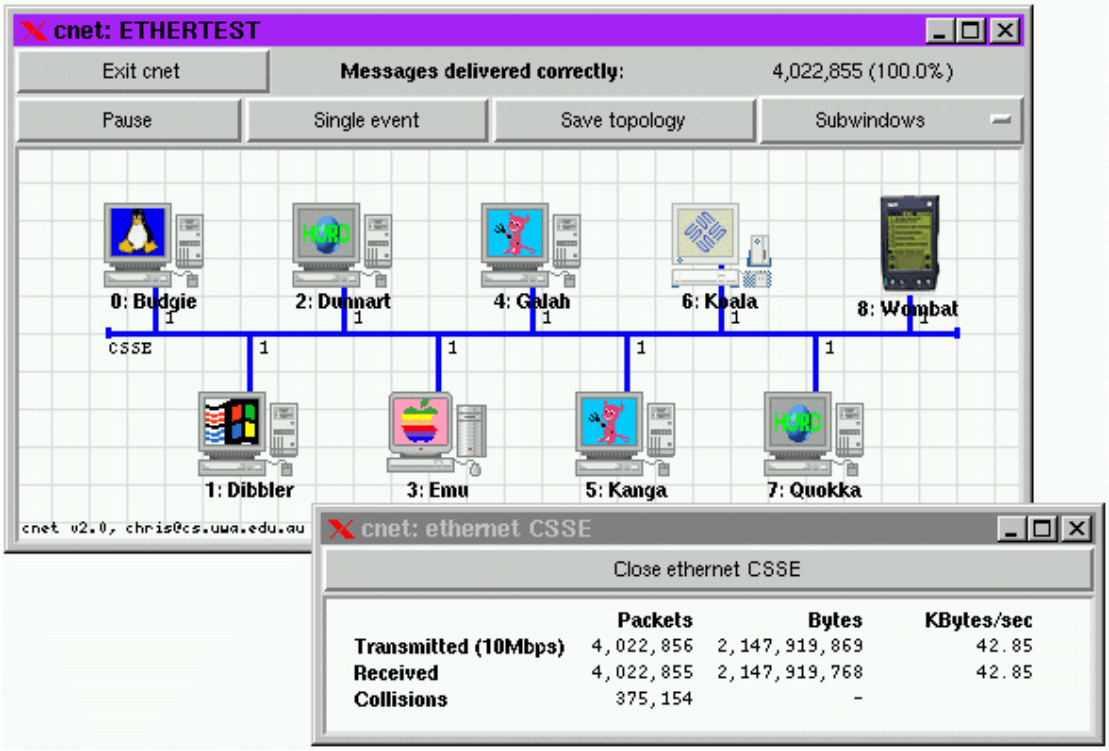
Το cnet μπορεί να παρουσιάσει μια περιορισμένη απεικόνιση των πλαισίων δεδομένων που διαπερνούν το φυσικό επίπεδο. Χρησιμοποίηση απλών ορθογωνίων, χρωμάτων και σύντομων string είναι δυνατό να επιδειχθούν τα δεδομένα και τα πλαίσια αναγνώρισης, καθώς και το περιεχόμενο μερικών από τους τομείς τους. Σε συνδυασμό, αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διορθώσουν τις εφαρμογές του επιπέδου σύνδεσης δεδομένων. Παρακάτω, βλέπουμε σε ένα selective-repeat πρωτόκολλο την απώλεια Πλαισίων (το άσπρο πλαίσιο δεδομένων αριθμός 5) και την καταστροφή των πλαισίων (το γκρίζο πλαίσιο δεδομένων αριθμός 3), ενώ άλλα πλαίσια δεδομένων και αναγνώρισης ανταλλάσσονται επίσης.



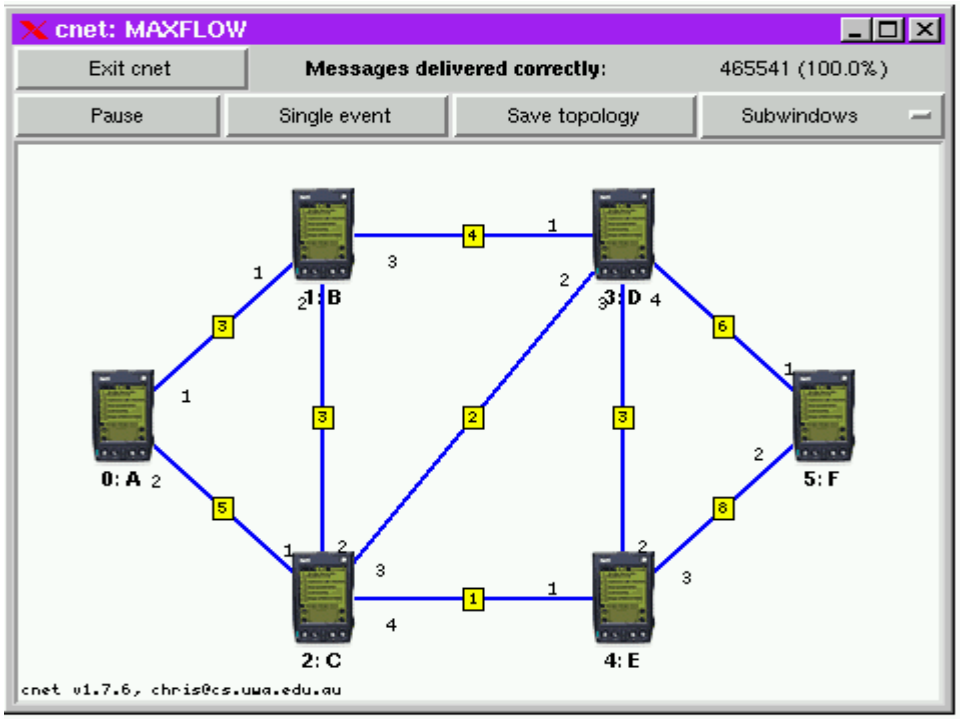
Το cnet απαιτεί τα πρωτόκολλα δικτύων να γράφονται στη γλώσσα προγραμματισμού Ansi-C και υποστηρίζει την εκτέλεσή τους μέσα σε μια Unix ή Linux διαδικασία. Ένας πρότυπος μεταγλωττιστής, κατά προτίμηση GCC, χρησιμοποιείται για να μεταγλωττίσει ο χρήστης τον γραπτό κώδικα του πρωτοκόλλου. Ο μεταγλωττισμένος κώδικας συνδέεται έπειτα δυναμικά στο χρόνο εκτέλεσης με τον προσομοιωτή cnet. Τα πρωτόκολλα καλούνται άμεσα από το cnet το ίδιο και δεν ερμηνεύονται. Από τη σχεδίαση, τα πρωτόκολλα δεν είναι απαραίτητο να περιέχουν οποιοδήποτε windowing κώδικα.



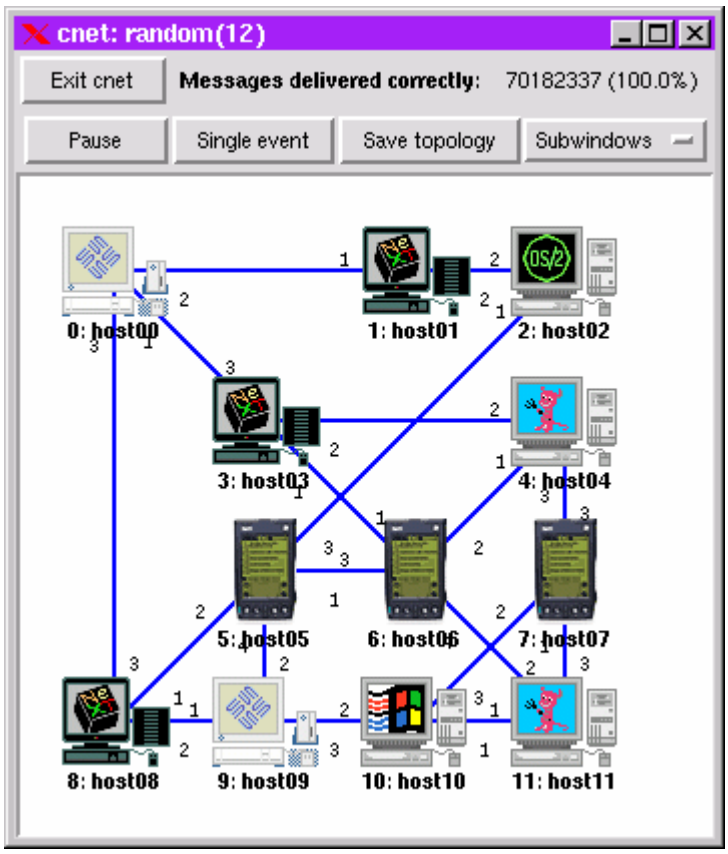
Όσον αφορά την έκδοση 2.0,το cnet υποστηρίζει το IEEE 802,3, τμήματα του Ethernet, καθώς επίσης και οι παραδοσιακές από σημείο σε σημείο WAN συνδέσεις. Κάθε τμήμα μνήμης αποτελείται από δύο ή περισσότερες κάρτες διεπαφής δικτύων (NICs) που συνδέουν τους κόμβους σταθμών ή δρομολογητών με το τμήμα του δικτύου. Τα μεγάλα δίκτυα μπορούν να κατασκευαστούν με την ένωση των πολλαπλάσιων τμημάτων του Ethernet μέσω κόμβων πυλών και συνδέσεων ευρείας ζώνης από σημείο σε σημείο. Η διεύθυνση του κάθε NIC καθορίζεται αρχικά στο αρχείο τοπολογίας, με τη δεκαεξαδική μορφή 6-οκτάδων παραδοσιακού Ethernet, και το cnet παρέχει τις λειτουργίες για να διαμορφώσει τη διεύθυνση κάθε NIC, και για να θέσει τα χαρακτηριστικά ενός NIC με ένα κατάλληλο τρόπο. Η προσομοίωση Ethernet είναι λογική, αλλά όχι τελειοποιημένη. Το cnet υποστηρίζει ένα σταθερό ποσοστό μετάδοσης του 10Mbps, ένα slot-time με 52 χρήστες, broadcast μετάδοσης, ανίχνευση σύγκρουσης, μπλοκάρισμα, και δυαδικό εκθετικό backoff, αλλά δεν υποστηρίζει έλεγχο jitter ούτε την multicasting διευθυνσιοδότηση.



Οι παρούσες τιμές των ιδιοτήτων των κόμβων και των συνδέσεων (όπως ενδεχομένως τροποποιήθηκαν μέσω της διαδικασίας windowing) είναι διαθέσιμες στον κώδικα του πρωτοκόλλου και κάθε κόμβος στις δομές δεδομένων και τις μεταβλητές της C. Αυτές οι δομές και οι μεταβλητές αρχικοποιούνται όταν κάθε κόμβος επανεκκινεί και ενημερώνεται έτσι ώστε κάθε κόμβος να σχεδιάζεται για εκτέλεση. Οι τιμές τους θεωρούνται ως μόνο ανάγνωσης και δεν μπορούν (επιτυχώς) να τροποποιηθούν άμεσα από τα πρωτόκολλα. Μπορούν, φυσικά, να τροποποιούνται μέσω της διαδικασίας windowing.



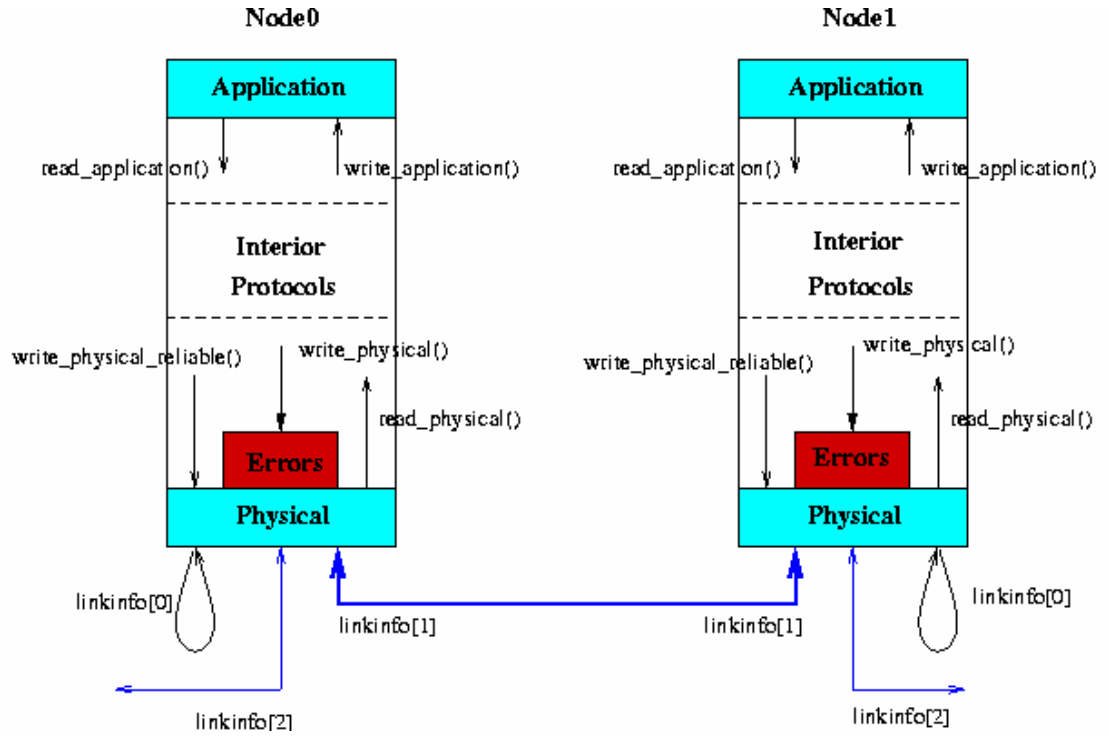
Οι δαπάνες ή τα βάρη μπορούν να ανατεθούν σε κάθε σύνδεση, για να αντιπροσωπεύσει το κόστος κάθε πλαισίου ή τον αριθμός των οκτάδων κάθε πλαισίου. Τα πρωτόκολλα μπορούν έπειτα να αναπτυχθούν για να παραδώσουν την κυκλοφορία δικτύων όπου κάθε ένα ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος, ή μεγιστοποιεί τη συνολική ροή.



Και όταν θεωρείτε ότι έχετε την εργασία πρωτοκόλλων σας, τρέξτε την με την cnet – r προαιρετική δυνατότητα ώστε να παραχθεί μια τυχαία τοπολογία.

4.2 Το Μοντέλο Προσομοίωσης του CNET

Το cnet υποστηρίζει ένα μοντέλο δικτύωσης στο οποίο οι κόμβοι συνδέονται είτε από σημείο σε σημείο συνδέσεις είτε σε τμήματα Ethernet. Οι κόμβοι μπορούν να είναι είτε σταθμοί είτε δρομολογητές, αλλά τα εισαγωγικά πρωτόκολλα θα χρησιμοποιήσουν μόνο τους σταθμούς και τις από σημείο σε σημείο συνδέσεις. Οι σταθμοί είναι όπως τους τερματικούς σταθμούς, με κάθε έναν που έχει το επίπεδο εφαρμογών να παράγει τα μηνύματα για την παράδοση μέσω του επιπέδου εφαρμογών σε άλλους σταθμούς. Οι σταθμοί δεν παράγουν ποτέ τα μηνύματα για τους εαυτούς τους, και οι δρομολογητές δεν παράγουν μηνύματα καθόλου.
Το μοντέλο προσομοίωσης του cnet εμφανίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



5. GloMoSim

5.1 Περιγραφή του GloMoSim

Σε GloMoSim χτίζετε ένα εξελικτικό περιβάλλον προσομοίωσης για τα ασύρματα και συνδεμένα με καλώδιο συστήματα δικτύων. Σχεδιάζεται χρησιμοποιώντας την παράλληλη ικανότητα προσομοίωσης διακριτών γεγονότων που παρέχεται από την Parsec. Το GloMoSim υποστηρίζει αυτήν την περίοδο τα πρωτόκολλα για ένα καθαρώς ασύρματο δίκτυο. Στο μέλλον, υπάρχει η προσδοκία της λειτουργίας προσομοίωσης για συνδεμένο με καλώδιο καθώς επίσης και υβριδικό δίκτυο (με τις συνδεμένες με καλώδιο και ασύρματες ικανότητες).
Τα περισσότερα συστήματα δικτύων χτίζονται αυτήν την περίοδο χρησιμοποιώντας την προσέγγιση των επιπέδων που είναι παρόμοια με την OSI δικτυακή αρχιτεκτονική επτά επιπέδων. Το σχέδιο είναι να χτιστεί το GloMoSim χρησιμοποιώντας μια παρόμοια προσέγγιση βασιζόμενη σε επίπεδα. Πρότυπα API's θα χρησιμοποιηθούν μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων προσομοίωσης. Αυτό θα επιτρέψει τη γρήγορη ολοκλήρωση των μοντέλων που αναπτύσσονται στα διαφορετικά επίπεδα από διαφορετικούς χρήστες. Τα πρωτόκολλα που στέλνονται με την παρούσα βιβλιοθήκη περιλαμβάνουν τα εξής :

Επίπεδα	Πρωτόκολλα
Mobility	Random waypoint, Random drunken, Trace based
Radio Propagation	Two ray and Free space
Radio Model	Noise Accumulating
Packet Reception Models	SNR bounded, BER based with BPSK/QPSK modulation
Data Link (MAC)	CSMA, IEEE 802.11 and MACA
Network (Routing)	IP with AODV, Bellman-Ford, DSR, Fisheye, LAR scheme 1, ODMRP, WRP
Transport	TCP and UDP
Application	CBR, FTP, HTTP and Telnet

Για να τρέξει το GloMoSim, θα χρειαστείτε τον πιό πρόσφατο μεταγλωττιστή της Parsec (που περιλαμβάνεται τώρα με τη διανομή του GloMoSim). Εάν θέλει κανείς να αναπτύξετε τα πρωτόκολλά σας σε GloMoSim, πρέπει να υπάρχει κάποια οικειότητα με την Parsec, αλλά δεν χρειάζεται να είναι εμπειρογνώμονας. Οι περισσότεροι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου θα πρέπει γράφουν καθαρά τον κώδικα σε C με μερικές Parsec λειτουργίες για τη χρονική διαχείριση. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε τον Parsec μεταγλωττιστή. Ο Parsec κώδικας χρησιμοποιείται εκτενώς στον πυρήνα του GloMoSim. Οι περισσότεροι χρήστες δε χρειάζεται να ξέρουν πώς λειτουργεί ο πυρήνας. Εάν ενδιαφέρετε κάποιος για τον πυρήνα του GloMoSim, θα πρέπει να έχει εκτενή γνώση της Parsec. Το GloMoSim μπορεί ελεύθερα να το αποκτήσει κάποιος και να το εγκαταστήσει στον υπολογιστή του αρκεί να το κατεβάσει από το site http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/.

5.2 Χτίζοντας ένα Δίκτυο με το GloMoSim

Η απλή προσέγγιση στο σχεδιασμό μιας προσομοίωσης δικτύων θα ήταν να αρχικοποιηθεί κάθε κόμβος του δικτύου στην προσομοίωση ως μια Parsec οντότητα. Μπορούμε να εμφανίσουμε τις διαφορετικές εκκινήσεις οντοτήτων ως χωριστές λογικές διαδικασίες στο σύστημα. Ως εκ τούτου κάθε εκκίνηση οντοτήτων απαιτεί το διάστημα στοιβών της στο χρόνο εκτέλεσης. Σε GloMoSim, προσπαθούμε να χτίσουμε μια προσομοίωση που θα επεκτείνεται σε χιλιάδες κόμβους. Εάν πρέπει να αρχικοποιήσουμε μια οντότητα για κάθε κόμβο στο χρόνο εκτέλεσης, οι απαιτήσεις μνήμης θα αυξάνονταν εντυπωσιακά. Η απόδοση του συστήματος θα έπεφτε επίσης γρήγορα. Δεδομένου ότι υπάρχουν τόσες πολλές οντότητες στην προσομοίωση, ο χρόνος εκτέλεσης θα χρειαζόταν συνεχώς στο διακόπτη πλαισίου μεταξύ των διαφορετικών οντοτήτων στο σύστημα. Αυτό θα προκαλέσει τη σημαντική υποβάθμιση κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Ως εκ τούτου η αρχικοποίηση κάθε κόμβου ως χωριστή οντότητα θα περιορίσει εγγενώς την εξελιξιμότητα και την απόδοση της προσομοίωσης.

Για να παρακαμφθούν αυτά τα προβλήματα στο χτίσιμο των δικτύων εισήχθη στην προσομοίωση η τεχνική του gridding των δικτύων . Με gridding δικτύων, μια ενιαία οντότητα μπορεί να προσομοιώσει διάφορους κόμβους δικτύων στο σύστημα. Μια χωριστή δομή δεδομένων που αντιπροσωπεύει την πλήρη κατάσταση κάθε κόμβου διατηρείται μέσα

στην οντότητα. Ομοίως πρέπει να διατηρήσουμε το σωστό επίπεδο αφαίρετηκότητας. Όταν ο κώδικας προσομοίωσης ενός ιδιαίτερου κόμβου εκτελείται δεν πρέπει να έχει πρόσβαση στις δομές δεδομένων των άλλων κόμβων στην προσομοίωση. Η gridding δικτύων τεχνική σημαίνει ότι μπορούμε να αυξήσουμε τον αριθμό κόμβων στο σύστημα διατηρώντας τον ίδιο αριθμό οντοτήτων στην προσομοίωση. Στην πραγματικότητα, η μόνη απαίτηση είναι ότι χρειαζόμαστε μόνο τόσες οντότητες όσες ο αριθμός των επεξεργαστών στον οποίο η προσομοίωση εκτελείται. Ως εκ τούτου εάν τρέχουμε μια διαδοχική προσομοίωση πρέπει να αρχικοποιήσουμε μόνο μια οντότητα στο σύστημα. Επίσης δεν συναντάμε τα προβλήματα μετατροπής μνήμης ή πλαισίου που περιορίζουν την προσομοίωση.
Στο GloMoSim, κάθε οντότητα αντιπροσωπεύει έναν γεωγραφικό τομέα της προσομοίωσης. Ως εκ τούτου οι κόμβοι των δικτύων που αντιπροσωπεύουν μια ιδιαίτερη οντότητα καθορίζονται από τη φυσική θέση των κόμβων.

6. NIST Products

6.1 ATM/HFC Network Simulator

Ένας προσομοιωτής δικτύων ασύγχρονης μεταφοράς δεδομένων (ATM)έχει αναπτυχθεί για να παρέχει τα κατάλληλα μέσα στους ερευνητές και τους αρμόδιους για το σχεδιασμό δικτύων, ώστε να αναλύσουν τη συμπεριφορά των δικτύων ATM χωρίς τη δαπάνη της οικοδόμησης ενός πραγματικού δικτύου.
Ο προσομοιωτής χρησιμοποιείται ως εργαλείο προγραμματισμού δικτύων με τη προσομοίωση των διάφορων διαμορφώσεων του δικτύου και των φορτίων κυκλοφορίας, και λαμβάνοντας στατιστικά στοιχεία όπως η χρησιμοποίηση των συνδέσεων δικτύων και τα ποσοστά ρυθμό-απόδοσης εικονικών κυκλωμάτων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να απαντήσει σε ερωτήσεις όπως : πού είναι οι δυσκολίες στα δίκτυα; ποια είναι η επίδραση της αλλαγής της ταχύτητας μιας σύνδεσης; αν η προσθήκη μιας νέας εφαρμογής θα προκαλέσει συμφόρηση;
Ο προσομοιωτής μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο ανάλυσης πρωτοκόλλου για να μελετήσει τη συνολική επίδραση συστημάτων ενός ιδιαίτερου πρωτοκόλλου δικτύων του ATM. Παραδείγματος χάριν, κάποιος μπορεί να ερευνήσει την αποτελεσματικότητα των διάφορων μηχανισμών ελέγχου ροής δεδομένων για τα δίκτυα ATM και να αντιμετωπίσει τέτοια ζητήματα όπως τους μηχανισμούς για τη δίκαιη κατανομή εύρους ζώνης, υπερχρησιμοποίηση πρωτοκόλλου, και χρησιμοποίηση εύρους ζώνης. Ο προσομοιωτής σχεδιάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε τις ενότητες που προσομοιώνουν τα συστατικά ενός δικτύου ATM να μπορούν να αλλάξουν εύκολα, να προστίθενται ή να διαγράφονται..
Ο προσομοιωτής δικτύων NIST ATM δίνει στο χρήστη ένα διαλογικό περιβάλλον διαμόρφωσης με ένα γραφικό ενδιάμεσο με τον χρήστη. Η NIST έχει αναπτύξει το εργαλείο χρησιμοποιώντας και τη γλώσσα C και το σύστημα Windows X που τρέχει σε μια Unix βασισμένη πλατφόρμα. Το εργαλείο είναι βασισμένο σε έναν προσομοιωτή δικτύων που αναπτύσσεται στο MIT και παρέχει υποστήριξη για τις ιδιαίτερες τεχνικές προσομοίωσης γεγονότος.
Το δίκτυο που προσομοιώνεται αποτελείται από διάφορα συστατικά που στέλνουν μηνύματα το ένα στο άλλο. Ο ευρυζωνικός τερματικός εξοπλισμός (B-TE) προσομοιώνει τους κόμβους και τις εφαρμογές σταθμού του ATM. Οι διακόπτες και τα συστατικά B-TE διασυνδέονται με τις φυσικές συνδέσεις, οι οποίες θεωρούνται επίσης συστατικά. Οι εφαρμογές του ATM είναι λογικές οντότητες που τρέχουν στους σταθμούς B-TE και μπορούν να θεωρηθούν ως γεννήτριες κυκλοφορίας ικανές για μεταβλητές ή σταθερές πηγές κυκλοφορίας ποσοστού δυαδικών ψηφίων.
Για να εκτελέσει μια προσομοίωση, ο χρήστης δημιουργεί ένα δίκτυο που αποτελείται από οποιοδήποτε αριθμό διακοπτών και σταθμών του ATM που διασυνδέονται από τις συνδέσεις

των μεταβλητών ταχυτήτων. Οι εικονικές συνδέσεις μεταξύ οποιωνδήποτε δύο σταθμών καθιερώνονται χειροκίνητα, και οι εφαρμογές στους σταθμούς επιλέγονται και αρχίζουν. Ενώ μια προσομοίωση τρέχει, τα διάφορα στιγμιαία μέτρα απόδοσης μπορούν να παρουσιαστούν σε γραφική μορφή κειμένων στην οθόνη ή να σωθούν σε αρχείο για την επόμενη ανάλυση.
Το εργαλείο αυτό είναι διαθέσιμο μέσω του internet και στην ιστοσελίδα http://w3.antd.nist.gov/Hsntg/prd_atm-sim.html .

6.2 Private Network-Network Interface (PNNI) Simulator

Ο Private Network-Network Interface (PNNI) προσομοιωτής αναπτύχθηκε στο εθνικό ίδρυμα προτύπων και τεχνολογίας (NIST) για να μελετήσει την απόδοση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης PNNI σε ένα περιβάλλον δικτύων πολλών κόμβων.
Ο προσομοιωτής PNNI γράφεται σε C. Ο κώδικας αποτελείται από δύο μέρη: τη διεπαφή ενδιάμεσο με τον χρήστη και τα πρωτόκολλα δρομολόγησης PNNI. Η διεπαφή με τον χρήστη επιτρέπει στο χρήστη για να εισαγάγει τις διάφορες φυσικές τοπολογίες δικτύων και τις παραμέτρους του PNNI. Μερικές από τις παραμέτρους τοπολογίας δικτύων είναι αριθμός διακοπτών PNNI ATM, ο αριθμός φυσικών συνδέσεων και καθυστέρησής τους. Μερικές από τις παραμέτρους PNNI είναι η όμοια ομάδα, η όμοια προτεραιότητα ηγεσίας ομάδας, οι τιμές χρονομέτρων, και οι όμοιες ομάδες πιό υψηλού επιπέδου. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης PNNI εκτελούν τις απαραίτητες λειτουργίες των μεμονωμένων πρωτοκόλλων όπως προσδιορίζονται στην ιδιωτική έκδοση προδιαγραφών στο φόρουμ του ATM Private Network-Network Interface Specification Version 1.0.
Τα αποτελέσματα για οποιοδήποτε ιδιαίτερο τρέξιμο προσομοίωσης παρέχουν το χρόνο και τα στοιχεία που απαιτούνται για να φθάσουν σε μία σταθερή κατάσταση για τη δεδομένη τοπολογία δικτύων. Η έξοδος μπορεί επίσης να παρέχει το ποσό των δεδομένων που απαιτείται για να διατηρήσει αυτή τη σταθερή κατάσταση. Με τη μελέτη των πολλαπλάσιων τρεξιμάτων της προσομοίωσης με την ποικιλία των παραμέτρων δρομολόγησης PNNI, μπορεί κάποιος να καθορίσει μια βέλτιστη διαμόρφωση για μια δεδομένη τοπολογία δικτύων.
Το εργαλείο αυτό είναι διαθέσιμο μέσω του internet και στην ιστοσελίδα http://w3.antd.nist.gov/Hsntg/prd_aprops.html .

7. Συμπεράσματα

Όπως γίνεται κατανοητό υπάρχουν αρκετά ελεύθερα και open-sourceεργαλεία προσομοίωσης δικτύων τα οποία μπορούν και λειτουργούν σε όλες τις πιθανές πλατφόρμες που διατίθονται στην αγορά. Από εκεί και πέρα τον ποιον προσομοιωτή θα επιλέξει ο κάθε προγραμματιστής αφορά κυρίως στο περιβάλλον στο οποίο αυτός είναι συνηθισμένος να δουλεύει οπότε και γνωρίζει καλύτερα, αλλά και με ποια γλώσσα προγραμματισμού είναι κανείς περισσότερο εξοικειωμένος. Ίσως το περισσότερο διαδεδομένο εργαλείο προσομοίωσης, από αυτά που περιγράψαμε, να θεωρείται από πολλούς το NS-2 το οποίο παρέχει μια μεγάλη γκάμα τοπολογιών, πρωτοκόλλων και εφαρμογών που μπορεί να προσομοιώσει. Εξίσου διαδεδομένου είναι και το OMNET++ διότι εκτός του από μόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε προσομοίωση, έχουν αναπτυχθεί με βάση αυτό και άλλα εργαλεία τα οποία εξειδικεύονται σε τοπολογίες ή συγκεκριμένα πρωτόκολλα δικτύων και τα οποία στη συνέχεια μπορούν να συνδυαστούν άψογα με οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή έχει αναπτυχθεί σε OMET++. Ένα εργαλείο που ίσως δε χρειάζεται ιδιαίτερα μεγάλη εξοικείωση με γλώσσες προγραμματισμού είναι το Cnet το οποίο προσφέρει ένα πολύ εύχρηστο και βοηθητικό γραφικό περιβάλλον και διευκολύνει κατά πολύ την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Τέλος παρουσιάστηκαν και κάποια άλλα εργαλεία λιγότερα διαδεδομένα, όπως το GloMoSim και τα δύο προϊόντα της NIST τα οποία όμως μπορούν αποβούν εξίσου αποτελεσματικά στη διαδικασία της προσομοίωσης των δικτύων. Σίγουρα υπάρχουν και άλλα εργαλεία τα οποία

έχουν αναπτυχθεί και για τα οποία δε συγκεντρώσαμε τις απαραίτητες πληροφορίες για να τα παρουσιάσουμε, όπως είναι το Qualnet, το ONE simulator, το 3LS κ.α.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Βιβλία

[1]. Peter Pieda, Jeremy Ethridge, Mandeep Baines, and Farhan Shallwani. *A Network Simulator, Differentiated ServicesImplementation*. Open IP, Nortel Networks, 2000.

[2]. David B. Johnson. Validation of Wireless and Mobile Network Models and Simulation. In Proceedings of the DARPA/NIST Network Simulation Validation Workshop, Fairfax, Virginia, USA, May, 1999.

[3] Rajive Bagrodia, Richard Meyer, MineoTakai, Yu-an Chen, Xian Zeng, Jay Martin, and Ha Yoon Song. PARSEC: A Parallel Simulation Environment for Complex Systems. IEEE Computer, 31(10), 77-85, October, 1998.
http://dlib.computer.org/co/books/co1998/pdf/rx077.pdf

[4] X. Zeng, R. Bagrodia and M. Gerla, "GloMoSim: A Library for Parallel Simulation of Large-Scale Wireless Networks," 12th Workshop on Parallel and Distributed Simulation, May 1998.

[5] A. Varga. OMNeT++ User Manual. Department of Telecommunications, Technical University of Budapest, 1997.
URL reference: ftp://ftp.hit.bme.hu/sys/anonftp/omnetpp/doc/usman.pdf.

Συνέδρια

[1] Peter Pieda, Jeremy Ethridge, Mandeep Baines, and Farhan Shallwani. *A Network Simulator, Differentiated ServicesImplementation*. Open IP, Nortel Networks, 2000.

[2] A. Varga. The OMNeT++ discrete event simulation system. In Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)

[3] U. Kaage, V. Kahmann, and F. Jondral. An OMNeT++ TCP model. In Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)

[4] Pierre L'Ecuyer. Software for uniform random number generation: Distinguishing the good and the bad. In *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, December 2001.

Sites

[1] NS2 Homepage : http://www.isi.edu/nsnam/ns/
[2] NS2 Complete Tutorial: http://www.isi.edu/nsnam/ns/tutorial/index.html
[3] http://www.omnetpp.org/.
[4] http://mobility-fw.sourceforge.net
[5] http://ctieware.eng.monash.edu.au/twiki/bin/view/Simulation/Documentation
[6] http://www.csse.uwa.edu.au/cnet/
[7] http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/
[8] http://w3.antd.nist.gov/Hsntg/prd_atm-sim.html
[9] http://w3.antd.nist.gov/Hsntg/prd_aprops.html
[10] http://www.isi.edu/nsnam/nam/index.html
[11] http://www.linuxjournal.com/article/5929
[12] http://community.omnest.com/doc/INET-Tutorial/
[13] http://pcl.cs.ucla.edu/projects/parsec/
[14] http://www.cs.cornell.edu/skeshav/real/overview.html
[15] http://www.nwfusion.com/reviews/0524rev.html
[16] http://www.idsia.ch/~andrea/simtools.html
[17] http://www.topology.org/soft/sim.html
[18] http://www.brothersoft.com/Utilities_Miscellaneous_AdventNet_Simulation_Toolkit
[19] http://www.scalable-networks.com/products/qualnet.php

[20] http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/GloMoSimManual.html