Τηλεϊατρική με PET/CT

Μανταδάκης Ε,[1] Μενύχτας Δ,[1] Χατζηιωάννου Σ,[2] Παπασπύρου ΣΛ,[2] και Καλλέργη Μ[1]

[1] Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (Τ.Ε.Ι.) Αθήνας, Τμήμα Τεχνολογίας Ιατρικών Οργάνων
[2] Ινστιτούτο Ιατρικών και Βιολογικών Ερευνών της Ακαδημίας Αθηνών

Περίληψη: Η μελέτη αυτή υλοποίησε ένα σύστημα τηλεϊατρικής μεταξύ ενός Τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής Αθηναϊκού Ερευνητικού Κέντρου και του αντίστοιχου τμήματος Πανεπιστημιακού Νοσοκομείου των Αθηνών. Ο σκοπός ήταν να επιτευχθεί η απομακρυσμένη διάγνωση εξετάσεων PET/CT με τρόπο που να ικανοποιούνται κριτήρια του απορρήτου ιατρικών δεδομένων, χαμηλού κόστους, εύκολης πρόσβασης και χρήσης τους συστήματος από το ιατρικό προσωπικό, και δυνατότητα μελλοντικής επέκτασής του και συνεχούς βελτίωσής του. Το προτεινόμενο σύστημα βασίστηκε σε Virtual Network Computing (VNC), δηλαδή στον έλεγχο των γραφικών της οθόνης ενός απομακρυσμένου υπολογιστή μέσω ιδεατού ιδιωτικού δικτύου (Virtual Private Network - VPN). Η εφαρμογή αυτή παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι εφαρμογών βασισμένων στην μεταφορά αρχείων με file transfer protocol (FTP) διότι (α) διατηρείται το ίδιο περιβάλλον εργασίας, (β) η απόδοση του συστήματος είναι ανεξάρτητη από τον όγκο των εξετάσεων και (γ) η σύνδεση είναι άμεση. Το μειονέκτημα μιας εφαρμογής VNC είναι ότι απαιτεί (α) την τήρηση αυστηρών μέτρων ασφαλείας στον απομακρυσμένο σταθμό εργασίας αυξάνοντας έτσι το κόστος της εφαρμογής και (β) την ύπαρξη σύνδεσης Internet επαρκούς ταχύτητας και στα δύο κέντρα

Ι. Εισαγωγή

Τηλεϊατρική είναι η ανταλλαγή ιατρικών πληροφοριών από ένα μέρος σε ένα άλλο με την βοήθεια ηλεκτρονικών μέσων μετάδοσης. Η τηλεϊατρική έχει σκοπό την βελτίωση και υποστήριξη της υγείας του ασθενούς. Περιλαμβάνει διάφορες εφαρμογές όπως τηλεδιάσκεψη, μεταφορά εικόνων ή κειμένου, απομακρυσμένη παρακολούθηση βιοσημάτων, συνεχιζόμενη ιατρική εκπαίδευση και περίθαλψη μέσω τηλεφωνικού κέντρου.

Η τηλεϊατρική στην πυρηνική ιατρική (telenuclear medicine) αναφέρεται ως η ιατρική γνωμάτευση εξετάσεων πυρηνικής ιατρικής που πραγματοποιείται σε ένα σημείο απομακρυσμένο από το σημείο όπου η ιατρική πληροφορία δημιουργήθηκε. Για την τεχνική υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, η Αμερικανική Society of Nuclear Medicine (SNM) πρότεινε έναν οδηγό τηλεπυρηνικής ιατρικής που θέτει τις βασικές και γενικά αποδεκτές προδιαγραφές για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Παρόμοιος αναλυτικός οδηγός τηλεπυρηνικής ιατρικής δεν υπάρχει στο ευρωπαϊκό ή παγκόσμιο επίπεδο. Ούτε η Ελληνική Εταιρεία Πυρηνικής Ιατρικής & Βιολογίας (ΕΕΠΙΒ), ούτε η European Association of Nuclear Medicine (EANM) έχει εκδώσει ανάλογες προδιαγραφές. Έτσι, η οποιαδήποτε εφαρμογή είτε συμβουλεύεται τον οδηγό της SNM είτε γίνεται με ανεξάρτητα κριτήρια. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το πιλοτικό δίκτυο κέντρων PET σε τρεις χώρες, Γαλλία, Γερμανία, και Ισπανίας που παρέχει υπηρεσίες τηλεϊατρικής και κυρίως τηλεδιάγνωσης. Το δίκτυο αυτό ονομάζεται Trans-European Network for PET (TENPET) και γίνεται με την βοήθεια (VPN).

Τα VPN αναπτύχθηκαν με σκοπό να αντικαταστήσουν τις μισθωμένες γραμμές για την επίτευξη ενός δικτύου ευρείας ζώνης από μια εταιρεία ή έναν οργανισμό. Σαν φυσικό μέσο χρησιμοποιούν τον παγκόσμιο ιστό, αλλά καταφέρνουν να διαχωριστούν από αυτόν. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρεμβολή μιας επιπλέον στρώσης (Internet layer) στις τέσσερις υπάρχουσες στρώσεις του TCP/IP .Έτσι οι υπολογιστές που συνδέονται με VPN να θεωρούνται ότι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους τοπικά.

Η λειτουργία του TENPET βασίζεται σε δυο μεθόδους σύνδεσης: (α) Σύνδεση εκτός γραμμής (off-line mode) όπου τα ιατρικά δεδομένα έχουν μεταφερθεί από την προηγουμένη στον απομακρυσμένο σταθμό διάγνωσης. Ο ιατρός τα βλέπει την επόμενη ημέρα και καταγράφει τη διάγνωση. (β) Σύνδεση εντός γραμμής (on-line mode) όπου δύο ιατροί σε διαφορετικά γεωγραφικά σημεία 'μοιράζονται' στις οθόνες υπολογιστών την εξέταση του ίδιου ασθενούς. Έτσι, οι αλλαγές ή η επεξεργασία που γίνεται στη μία οθόνη από τον ένα ιατρό να εμφανίζεται αυτόματα και σε πραγματικό χρόνο στην οθόνη του άλλου ιατρού.

Σε αυτή τη μελέτη, πρώτα εξετάσαμε διάφορα είδη σύνδεσης που είναι διαθέσιμα στην ελληνική αγορά για να καθορίσουμε ποια από αυτά είναι αποδεκτά για εφαρμογές τηλεπυρηνικής ιατρικής. Μετά συγκρίναμε το πιο διαδεδομένο τρόπο μεταφοράς ιατρικής πληροφορίας, μέσω FTP, με μία εφαρμογή VNC, η οποία είναι σχεδιασμένη για να ελέγχει το γραφικό περιβάλλον ενός απομακρυσμένου υπολογιστή.

ΙΙ. Πρόβλημα

Το Τμήμα Πυρηνικής Ιατρικής ενός Ερευνητικού Κέντρου των Αθηνών (θα αναφερόμαστε σε αυτό σαν Κέντρο Α) διαθέτει ένα σύστημα PET/CT, το Biograph (Siemens, GE), που άρχισε πρόσφατα να χρησιμοποιείται σε κλινικές μελέτες. Σε διάστημα λίγων μηνών, ο ρυθμός εργασίας έχει αυξηθεί σημαντικά και έχει τριπλασιαστεί σε σχέση με τον αρχικό προγραμματισμό. Σήμερα, πραγματοποιούνται στο τμήμα περίπου 20 εξετάσεις την εβδομάδα που πρέπει να διαβάζονται καθημερινά. Για να επιτευχθεί αυτό με το περιορισμένο αριθμό ειδικών ιατρών που

απασχολούνται μερικώς στο Τμήμα, απαιτείται μία λύση τηλεϊατρικής ώστε ο ιατρός να μπορεί να διαβάζει τις εξετάσεις της ημέρας από σημεία εκτός Κέντρου Α. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιθυμείται η σύνδεση μεταξύ του Κέντρου Α και του Τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής Πανεπιστημιακού Νοσοκομείου της Αθήνας (θα αναφερόμαστε σε αυτό σαν Κέντρο Β) για να μπορεί να γίνεται ή διάγνωση εξ αποστάσεως. Αναμένεται ότι η δημιουργία ενός συστήματος τηλεϊατρικής μεταξύ των Κέντρων Α και Β θα ικανοποιήσει το αίτημα διάγνωσης σε πραγματικό χρόνο, θα αυξήσει το ρυθμό εξυπηρέτησης ασθενών κατά περίπου 65%, και θα επιτρέψει την ανταλλαγή απόψεων μεταξύ ειδικών για δύσκολες περιπτώσεις.

Η υλοποίηση ενός συστήματος τηλεϊατρικής για το συγκεκριμένο πρόβλημα απαιτεί γνώσεις διαχείρισης ψηφιακής ιατρικής πληροφορίας στο παγκόσμιο πρότυπο Digital Image and Communication in Medicine (DICOM) και τεχνολογιών Local Area Network (LAN) and Wide Area Networks (WAN). Παράλληλα η εφαρμογή πρέπει να είναι προσαρμοσμένη στα πρωτόκολλα προστασίας των τοπικών δικτύων των Κέντρων που θα συνδέσει. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό και υλοποίηση είναι το κόστος, η ταχύτητα, η ευκολία χρήσης, και ο βαθμός κλινικής αποδοχής.

Αυτή η τηλεϊατρική εφαρμογή απαιτεί την μεταφορά εικόνων PET/CT που είναι περίπου 62,9 kB η κάθε μία. Η εξέταση ενός ασθενούς περιλαμβάνει 1267 εικόνες (390 εικόνες CT, 390 PET, 497 PET Uncorrected) και μπορεί να φτάσει συνολικά τα 280 MB. Με απλή συμπίεση των αρχείων και όχι των εικόνων (ZIP ή RAR), το μέγεθος των δεδομένων μειώνεται κατά 67% σε σχέση με το αρχικό μέγεθος του φακέλου. Έτσι το μέγεθος του συμπιεσμένου φακέλου μίας εξέτασης ενός ασθενούς φτάνει τα 90 MBytes.

Η διάγνωση αυτών των εξετάσεων απαιτεί την παρουσίαση των εικόνων σε εξειδικευμένο πρόγραμμα ανάγνωσης (workstation-user interface) που παρέχει και εργαλεία επεξεργασίας. Τέτοιο πρόγραμμα παρέχεται από την εταιρεία κατασκευής του PET/CT (Siemens, GE) στο Κέντρο Α αλλά όχι στο Κέντρο Β. Η οποιαδήποτε λύση σύνδεσης λοιπόν θα πρέπει να λάβει υπόψη και το τρόπο παρουσίας των εικόνων στο Κέντρο Β που θα πρέπει να είναι ο ίδιος ή συμβατός με αυτόν στο Κέντρο Α.

III. Μεθοδολογία

α. Τρόπος σύνδεσης

Ο πιο άμεσος τρόπος σύνδεσης δύο απομακρυσμένων υπολογιστών είναι μέσω ενός μισθωμένου κυκλώματος το οποίο το προμηθεύει μια εταιρία Διασύνδεσης Δικτύων. Η εξασφάλιση σταθερής ταχύτητας σε αυτή την περίπτωση αυξάνει το κόστος της συντήρησης της σύνδεσης.

Ένας έμμεσος τρόπος σύνδεσης δυο απομακρυσμένων υπολογιστών είναι η σύνδεσή τους μέσω Internet μέσω του οποίου θα ανταλλάσουν πληροφορίες. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τα είδη των συνδέσεων που υπάρχουν στην ελληνική αγορά, την ταχύτητά τους και το κόστος τους.

Πίνακας 1 : Συνδέσεις στο Ιντερνετ

Είδος σύνδεσης	Ταχύτητα (download/upload)	Κόστος / Μήνα
Modem 56k	56.0/48.0 kbit/s	0.31€/ min
ISDN 64k	64 kbit/s	20€
ADSL	8192/1024 kbit/s	40€
ADSL2	12,288/3584 kbit/s	50€
Wireless 802.11b	11.0 Mbit/s	20€
Mobile Broadband	3,6 Mbits	30€
Hellas Satnet 1000+	1024/512 kbits	355€

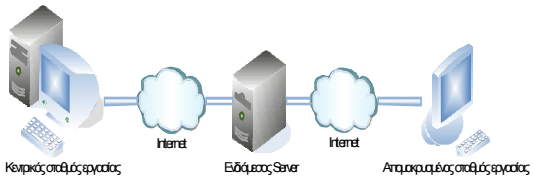
Οι ταχύτητες που αναγράφονται στον Πίνακα 1 είναι οι μέγιστες και αυτές που εγγυάται ο παροχέας από την γραμμή του υπολογιστή μέχρι τον δικό του εξοπλισμό. Από κει και πέρα εξαρτάται από την κίνηση (traffic) του διαδικτύου.

β. Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

β.1. Πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων FTP

Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο FTP είναι ασύγχρονου τύπου. Δηλαδή το αρχείο φορτώνεται αρχικά σε έναν εξυπηρετητή. Μετά ο πελάτης συνδέεται στον εξυπηρετητή κάνοντας ταυτοποίηση (Login) και κάνει την μεταφορά του αρχείου. Η σύνδεση χρησιμοποιεί ένα κανάλι ελέγχου (control stream) το οποίο χρησιμοποιείται για την 'συνεννόηση' των δύο υπολογιστών και την επιλογή του αρχείου. Για την μεταφορά του αρχείου χρησιμοποιείται μια ξεχωριστή σύνδεση, το κανάλι δεδομένων (data stream), το οποίο σε αντίθεση με το κανάλι ελέγχου, δεν χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο ελέγχου μεταφοράς (TCP) και άρα δεν έχουμε πιστοποίηση για την μεταφορά του αρχείου.

Για παράδειγμα, έχουμε έναν υπολογιστή ο οποίος μέσω του internet συνδέεται με έναν εξυπηρετητή FTP και στέλνει κάποια αρχεία. Έπειτα ο υπολογιστής- πελάτης συνδέεται μέσω του internet και τα κατεβάζει .



Εικόνα 1. Γραφική παράσταση του πρωτοκόλλου FTP.

Γίνεται φανερό ότι η μεταφορά της εξέτασης γίνεται εκτός γραμμής και ότι πρέπει να μεταφερθεί ολόκληρο το αρχείο για να ξεκινήσει η διάγνωση. Επιπλέον δεν είναι πρακτικό η μεταφορά να γίνεται για κάθε εξέταση ξεχωριστά. Είναι προτιμότερο να γίνεται στο τέλος όλων των εξετάσεων. Κατ' επέκταση ο όγκος των εξετάσεων δεν είναι σταθερός και συνεπακόλουθα ο χρόνος που απαιτείτε για την αποστολή. Τέλος, το πρωτόκολλο FTP απαιτεί εξειδικευμένο πρόγραμμα για την προβολή των εικόνων το οποίο θα είναι εύκολο στη χρήση και συμβατό με ότι έχει εκπαιδευτεί ο ιατρός.

β.2. Πρωτόκολλο Απομακρυσμένου Καταχωρητή Εικόνων (Remote frame buffer, RFB)

Οι σύγχρονες συνδέσεις γνωστές και ως συνδέσεις πραγματικού χρόνου επιτρέπουν την μεταφορά δεδομένων (data), ήχου (audio), και video σχεδόν σε πραγματικό χρόνο μεταξύ δύο διαφορετικών θέσεων. Οι **σύγχρονες διαδραστικές** (interactive) **υπηρεσίες** επιτρέπουν ακόμα την on-line εξέταση ενός ιατρικού περιστατικού, ενός αρχείου ιατρικών δεδομένων. Ένα πρωτόκολλο σύγχρονης σύνδεσης είναι το πρωτόκολλο απομακρυσμένου καταχωρητή εικόνων (RFB).

Το RFB αποτελεί τη βάση των VNC. Με αυτήν την εφαρμογή τα δεδομένα που βρίσκονται στον καταχωρητή εικόνων ενός κεντρικού υπολογιστή αποστέλλονται σε έναν απομακρυσμένο υπολογιστή, με τον οποίο έχει πραγματοποιηθεί προηγουμένως η σύνδεση. Αντίστοιχα ο απομακρυσμένος υπολογιστής στέλνει τα δεδομένα από τα συμβάντα στο πληκτρολόγιο και το ποντίκι του. Άρα ο απομακρυσμένος υπολογιστής «βλέπει» (χωρίς ήχο) και ελέγχει τον κεντρικό υπολογιστή.

Είναι προφανές ότι όλος ο φόρτος εργασίας επιβαρύνει τον κεντρικό υπολογιστή οπότε δεν έχουμε απαιτήσεις, πέραν της οθόνης και του περιβάλλοντα χώρου, από τον απομακρυσμένο σταθμό ως προς τα προγράμματα ή το υλικό του. Ένα μειονέκτημα αυτού του πρωτόκολλου είναι ότι για την ικανοποιητική απόδοση του απαιτείται μια ελάχιστη ταχύτητα σύνδεσης περίπου 2Mbps. Αυτό δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα για σύνδεσης στο λεκανοπέδιο της Αττικής όπου, ανάλογα με την σύνδεση του κάθε ιδρύματος, μπορεί να μην είναι σοβαρός παράγοντας καθυστέρησης στην επικοινωνία δύο απομακρυσμένων Κέντρων. Επιπλέον οι ταχύτητες των δικτύων αυξάνονται καθημερινά.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα σε αυτό το πρωτόκολλο είναι η ασφάλεια. Ανοίγοντας πόρτες του VNC υπονομεύεται η ασφάλεια του δικτύου αφού δίνετε ο έλεγχος ενός υπολογιστή του δικτύου σε κάποιον εξωτερικό χρήστη. Σε αυτή την περίπτωση, η χρήση ενός ιδεατού εικονικού δικτύου, virtual private network (VPN), είναι μία καλή λύση για να προστατευθεί το δίκτυο από εξωτερικούς κινδύνους.
Τα δίκτυα VPN αναπτύχθηκαν με σκοπό να αντικαταστήσουν τις μισθωμένες γραμμές για την επίτευξη ενός δικτύου ευρείας ζώνης από μια εταιρεία ή οργανισμό. Σαν φυσικό μέσο χρησιμοποιούν τον παγκόσμιο ιστό, αλλά καταφέρνουν να διαχωριστούν από αυτόν, και έτσι οι υπολογιστές που συνδέονται μέ VPN να θεωρούνται ότι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους τοπικά. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρεμβολή του VPN μεταξύ των στρώσεων (Layers) 2 και 3 του διαδικτύου (για το TCP\IP). Έτσι τα δεδομένα είναι προστατευμένα σε κάποιο βαθμό χωρίς να έχει χρησιμοποιηθεί καμία τεχνική κρυπτογράφησης. Επίσης με την χρήση ενός εξειδικευμένου δρομολογητή VPN (VPN Router) δεν κινδυνεύει το δίκτυο όταν κάποιος προσπαθεί να συνδεθεί με αυτό. Τέλος μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές δημιουργίας διόδου(**Point-to-Point Tunneling Protocol** (PPTP), Layer 2 Tunneling Protocol (L2TP)) και κρυπτογράφησης **(Secure Sockets Layer(SSL),**Secure Shell(SSH)και έτσι να επιτευχθεί μέγιστη ασφάλεια όπως απαιτείται σε όλες τις ιατρικές εφαρμογές. Να σημειωθεί όμως ότι η ασφάλεια έρχεται συνήθως με αντίστοιχη επιβάρυνση στην ταχύτητα σύνδεσης.

Εικόνα 2. Απομακρυσμένη επιφάνεια εργασίας VNC μέσω VPN.

Συμπερασματικά, το VNC παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα για αυτή την εφαρμογή τηλεπυρηνικής ιατρικής. Προσφέρει αμεσότητα, μείωση όγκου δεδομένων που πρέπει να μεταφέρονται μεταξύ των δύο Κέντρων, και σημαντικά χαμηλότερο κόστος αφού αυτό περιορίζεται αυστηρά σε ότι αφορά το δίκτυο και όχι στην αγορά επιπρόσθετων ειδικών προγραμμάτων για την επεξεργασία των εικόνων. Τέλος η ποιότητα εικόνας είναι η ίδια με τον κεντρικό σταθμό, εφόσον οι οθόνες παρουσίασής τους είναι συμβατές και το περιβάλλον ανάγνωσης παρόμοιο, και η κάθε εξέταση είναι ασφαλής αφού περικλείεται από το VPN. Τα μειονεκτήματά του είναι η αύξηση των απαιτήσεων στην ροή των δεδομένων και το κόστος των VPN routers ή ενδιάμεσων firewall sites που αν δεν χρησιμοποιηθούν, υπονομεύεται η ασφάλεια ολόκληρου του δικτύου εκτός από το απόρρητο των ιατρικών δεδομένων.

γ. Εφαρμογή συνδέσεων και αξιολόγηση από τον ειδικό ιατρό

Στη μελέτη αυτή, πρώτα έγινε μία προσομοίωση της σύνδεσης μεταξύ των δύο Κέντρων που περιέλαβε τη δοκιμή τριών πρωτοκόλλων σύνδεσης και τηλεπικοινωνίας: Ένα πρωτόκολλο FTP με το IQ-VIEW(http://www.image-systems.biz/content/view/49/58/lang,en) πρόγραμμα για παρουσίαση των εικόνων και δύο εφαρμογές του πρωτοκόλλου VNC (TightVNC και UltraVNC) μέσω VPN με το καθιερωμένο σύστημα παρουσίασης της Siemens. Η προσομοίωση ήταν επιτυχής αλλά έγινε εντός του δικτύου του Κέντρου Α.

Η πρώτη προσπάθεια υλοποίησης των ίδιων συνδέσεων μεταξύ των Κέντρων Α και Β ήταν ανεπιτυχής λόγω περιορισμών του πρωτοκόλλου ασφάλειας στο δίκτυο του Κέντρου Β. Η επίλυση αυτών των προβλημάτων είναι τρέχουσα.

Να σημειωθεί ότι, όπως απαιτείται για κάθε εφαρμογή τηλεϊατρικής, η επιτυχημένη σύνδεση των δύο Κέντρων θα αξιολογηθεί ποιοτικά και ποσοτικά από χρήστες-ιατρούς. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θα αξιολογήσουμε την παρουσία των εικόνων, και όλη τη διαδικασία τηλεδιάγνωσης με

ένα ερωτηματολόγιο, το οποίο περιλαμβάνει ερωτήσεις για την αξιολόγηση της ποιότητας των εικόνων στο Κέντρο Β, και της ταχύτητας και ευκολίας της σύνδεσης με βάση μία διακριτή κλίμακα 5 βαθμίδων. Τα αποτελέσματα του ερωτηματολογίου θα υποβληθούν σε στατιστική ανάλυση.

V. Βιβλιογραφία

American Telemedicine Association (ATA), 2007 "What Is Telemedicine & Telehealth?"

Society of Nuclear Medicine (SNM), 2002 "Society of Nuclear Medicine Procedure Guideline for Telenuclear Medicine"

Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A (NIMA), 2006 "European health telematics networks for positron emission tomography"