

XIX Seminarium

ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2009

Oddział Gdański PTETiS

Referat nr 22

ZINTEGROWANA LINIA RADIOTERAPEUTYCZNA

Witold MIŁOCH¹, Jerzy WTOREK²

1. Szpital Morski im. PCK
tel: 508481247 e-mail: wimiloch@wp.pl
2. Politechnika Gdańska
tel: (58) 3471384 e-mail: jaolel@biomed.eti.pg.gda.pl

Streszczenie: Zintegrowana linia radioterapeutyczna (ZLR) stanowi złożenie sprzętu i oprogramowania służącego do precyzyjnej radioterapii. W pierwszej kolejności w referacie wyjaśniono różnice pomiędzy teleradioterapią, a brachyterapią, które stanowią podstawowe rodzaje radioterapii. Następnie przedstawiono budowę i funkcje poszczególnych części ZLR: tomografu komputerowego, systemu planowania leczenia, symulatora i akceleratora. W dalszej kolejności przedstawiono typy komputerów sterujących ich pracą. Opis ten zawiera krótką charakterystykę konfiguracji, systemu operacyjnego, sposobu zasilania i komunikacji z pozostałymi komputerami.

W referacie przedstawiono także modyfikacje ZLR, które były konieczne do uzyskania zadawalającego poziomu bezpieczeństwa napromienianych pacjentów. Na zakończenie referatu poruszono problematykę rozwoju linii terapeutycznej dla części brachyterapii jak i teleradioterapii.

Słowa kluczowe: teleradioterapia, brachyterapia, akcelerator,

1. WPROWADZENIE

Wzrost zachorowań na choroby nowotworowe na całym świecie spowodował gwałtowny rozwój sprzętu i oprogramowania wspomagającego ich leczenie. W Polsce do niedawna sytuacja była dużo gorsza niż w innych krajach europejskich. Wynikało to przede wszystkim z niskich nakładów finansowych na służbę zdrowia. W rezultacie używany był przestarzały i wyeksploatowany technologicznie sprzęt. Mało wydajny sprzęt powodował wydłużenie kolejek pacjentów oczekujących na terapię. Późne wykrywanie nowotworów spowodowane było między innymi niedoskonałą diagnostyką obrazową. Obecnie sytuacja ulega poprawie, dzięki Narodowemu Programowi Walki z Rakiem szpitale o profilu onkologicznym są systematycznie wyposażane w nowy sprzęt i współpracujące z nim oprogramowanie.

Okolo 80% pacjentów chorych na raka leczonych jest przy pomocy radioterapii. Często jest to jedna z form leczenia, towarzysząca np. chemioterapii, czy leczeniu chirurgicznemu lub hormonoterapii. Radioterapia dzieli się na teleradioterapię (dostarczenie dawki promieniowania z zewnątrz ciała pacjenta) oraz brachyterapię (źródło promieniotwórcze umieszczane jest w guzie lub bliźnie

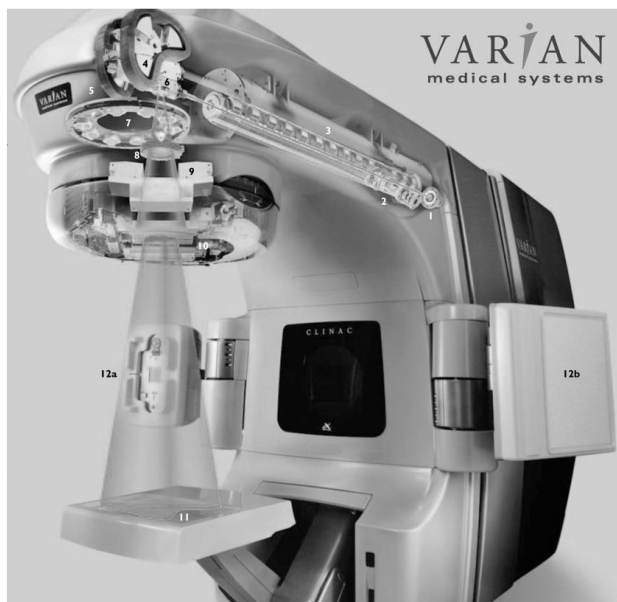
pooperacyjnej po guzie). Obie metody leczenia mają swoje zalety i zdarza się, że są stosowane jednocześnie u tego samego pacjenta.

Aby zachować kompatybilność sprzętu i oprogramowania zalecane jest tworzenie ZLR z elementów pochodzących od jednego producenta [1]. Na polskim rynku obecne są trzy firmy: *Electa*, *Siemens* i *Varian*. W ośrodku gdyńskim zainstalowano produkt amerykańskiej firmy *Varian* (oprócz tomografu komputerowego, który nie jest produkowany przez tę firmę). W rezultacie referat dotyczy systemu zarządzania terapią *Varis*, symulatora *Acuity*, akceleratora *Clinac 2300CD*, systemu planowania leczenia *Eclipse* oraz aparatu do brachyterapii HDR (High Dose Rate) *GammamedPlus iX* (do leczenia nowotworów źródłem promieniotwórczym Ir-192 aplikowanym bezpośrednio do guza). Całość linii stanowi kilkadziesiąt komputerów, sterowników i systemów wykorzystujących mikrokontrolery lub procesory.

2. METODY RADIOTERAPII

2.1. Teleradioterapia

Teleterapię (zwana również teleterapią) polega na napromienianiu obszarów objętych chorobą, lub zagrożonych reemisją choroby nowotworowej za pomocą wiązek promieniowania jonizującego z zewnątrz ciała pacjenta. Obecnie najpowszechniej stosuje się akceleratory fotonów (4MV-20MV) i elektronów (4MeV-20MeV). Napromienianie odbywa się podczas kilkudziesięciu seansów (frakcji), podczas których pacjent musi być ułożony w identyczny sposób. Plan leczenia przygotowują fizycy medycznych, następnie sprawdzany jest na symulatorze (rodzaj aparatu rentgenowskiego) i realizowany za pomocą akceleratora (Rys. 1). Leczenie pacjenta polega na napromienieniu okolic guza z kilku zaplanowanych kierunków podczas wielokrotnie powtarzanych sesji (jedna lub dwie dziennie).



Rys. 1 Akcelerator wyposażony w opcję radioterapii wspomaganej obrazowo: 1- działo elektronowe, 2 – przełącznik energii, 3 – linia przyspieszająca, 4 – elektromagnes, 5 – system kontroli wiązki, 6 – geometryczne źródło promieniowania, 7 – tarcza filtrów, 8 – komory jonizacyjne, 9 – asymetryczne szczęki, 10 – kolimator, 11 – portal (matryca detektorów), 12a –lampa rentgenowska, 12b – portal

2.2 Brachyterapia

Do brachyterapii służy aparat nazywany jest *HDR'em* lub *Afterloader'em* (Rys. 2). Źródłem promieniowania radioaktywnego jest Iryd 192, którego połowiczny czas rozpadu wynosi 74 dni. Źródło promieniowania, przymocowane do stalowej linki, jest przemieszczane w aplikaturze za pomocą silnika krokowego. Fizycy medyczni planują kolejne pozycje i czasy postoju źródła w obszarze guza i jego okolicy, biorąc pod uwagę anatomię pacjenta, leczony obszar oraz znajdujące się w pobliżu organy wrażliwe na promieniowanie (tzw. organy ryzyka, które wykazują obniżoną odporność na promieniowanie jonizujące, a ich zniszczenie nie jest obojętne dla funkcji życiowych pacjenta, np. rdzeń kręgowy).



Rys. 2 Aparat do brachyterapii HDR

Po zaplanowaniu terapii jej przebieg wysyłany jest do aparatu, który tym samym jest gotowy do przeprowadzenia zabiegu. Zaletą tej metody leczenia (w porównaniu z teleradioterapią) są mniejsze powikłania popromienne. Wynika to z umieszczenia źródła promieniowania

bezpośrednio w okolicy guza. Wadą brachyterapii jest inwazyjność - przy aplikatorach igłowych konieczne jest znieczulenie. Dzięki temu, że ten aparat również jest firmy Varian, możliwe jest jednoczesne (względnie prosto realizowane) leczenie za pomocą teleradioterapii i brachyterapii. Prowadzi to do przestrzennego i czasowego sumowania dawek z obu metod radioterapii.

3. ZINTEGROWANA LINIA TERAPEUTYCZNA

Gdyńskie Centrum Onkologii przy Szpitalu Morskim im. PCK w Gdyni dzięki uczestnictwu w Narodowym Programie Walki z Rakiem zmodernizowało sprzęt i dziś dysponuje pełną linią terapeutyczną, na którą składają się tomograf komputerowy, system planowania leczenia, symulator, dwa akceleratory oraz system zarządzania radioterapią. Chcąc zachować jednolitość linii i pełną kompatybilność poszczególnych jej części zdecydowano się na jednego producenta sprzętu i oprogramowania (w tym przypadku jest to firma Varian Medical Systems). Jedynym odstępstwem od tej reguły musiał być tomograf komputerowy (Siemens Open Sensation), ponieważ firma Varian nie produkuje sprzętu diagnostycznego. Wszystkie wymienione wyżej aparaty ZLR pracują w 100Mb sieci komputerowej odseparowanej od Internetu i sieci szpitalnej dla zapewnienia bezpieczeństwa danych. Komputery, których praca ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa pacjenta wyposażone są w systemy zasilania awaryjnego (serwery mają je podwójne).

Komputery należące do zintegrowanej linii terapeutycznej można podzielić na pięć grup:

1. tworzące system planowania leczenia pacjenta,
2. zarządzające informacją o pacjencie,
3. sterujące pracą aparatów,
4. specjalizowane typu *embedded*,
5. serwery.

Komputery służące do planowania leczenia pacjenta to stacje robocze pracujące pod kontrolą systemu Windows 2000 lub XP z jedną, specjalizowaną aplikacją służącą do obliczania dawki dla pacjenta na podstawie struktury wewnętrznej jego ciała obrazowanego za pomocą tomografu komputerowego (*Eclipse 6.5*).

Obliczenia dokonywane są dla wiązek fotonowych o energiach od 6MV do 15MV oraz elektronów o energiach od 6MeV do 18MeV, z uwzględnieniem gęstości i pochłaniania poszczególnych tkanek. Algorytmy służące do tych obliczeń to Pencil Beam (splotowa metoda obliczania dawki) oraz Monte Carlo (metoda modelowania oparta na generatorze liczb losowych) [2]. Czas obliczeń dla szybkich dwurdzeniowych komputerów waha się od kilku sekund (dla prostego pola fotonowego) do kilkudziesięciu minut (dla skomplikowanego pola elektronowego). Każda zmiana planu leczenia wymaga ponownych obliczeń.

Komputery do zarządzania informacją o pacjencie są najprostszymi, standardowymi komputerami pracującymi pod kontrolą systemu Windows XP. Pracujący na nich technicy, pielęgniarki i lekarze korzystają z nich przy wprowadzaniu danych osobowych pacjenta, wykonaniu zdjęcia do identyfikatora, uzyskiwaniu informacji o leczeniu danego pacjenta i prowadzeniu dokumentacji medycznej.

Komputery sterujące pracą aparatów, podobnie jak komputery systemu planowania leczenia, są szybkie, wielordzeniowe, dobrze wyposażone, przeznaczone do pracy w jednej aplikacji. Należą do nich komputery sterujące terapią pacjentów z nastawni akceleratorów, symulatorem

oraz aparatem do brachyterapii HDR [3]. Z powodu wymagań aplikacji symulatora komputer sterujący nim obsługuje dwa monitory oraz *frame grabber* – urządzenia do przechwytywania obrazu w czasie rzeczywistym. Wszystkie powyższe komputery są w dużej mierze autonomiczne, mogą pracować chwilowo lub stale (z pewnymi ograniczeniami) bez sieci komputerowej i wyposażone są w system zasilania awaryjnego. W przypadku Gdynskiego Centrum Onkologii wszystkie dane pomiędzy częściami ZLR przesyłane są za pomocą sieci komputerowej. Autonomiczna praca aparatów terapeutycznych przewidziana jest tylko jako rozwiązanie awaryjne, na wypadek dłuższego spadku napięcia.

Do komputerów specjalizowanych należą wszystkie komputery o ściśle określonej funkcji. Cechują je również niewielkie rozmiary i małe możliwości rozszerzenia przy jednoczesnym szybkim wykonywaniu powierzonych zadań. Należą do nich sterowniki ruchu współpracujące z: czujnikami kolizji (zapewniającymi bezpieczeństwo pacjenta i sprzętu), regulatorami (PWM) prędkości obrotowej, enkoderami i potencjometrami odczytującymi pozycje. Przykładem tego typu komputera jest sterownik kolimatora wielolistkowego odpowiadający za ruch każdego z 80 lub 120 listków w kolimatorze [4]. Dzięki niemu możliwa jest inicjalizacja początkowej pozycji kolimatora, sterowanie ruchem listków (także w terapiach dynamicznych, gdzie ruch listka odbywa się w trakcie napromieniania), kontrola poprawności wykonywania ruchów, zapisywanie logów z wykonanych zadań, oraz ułatwiona diagnostyka ewentualnych uszkodzeń. Komunikacja pomiędzy sterownikiem, a układami wykonawczymi znajdującymi się w kolimatorze, z powodów bezpieczeństwa, niezawodności i prędkości, odbywa się za pomocą światłowodów. Komputer typu „zagrzebany” w ramieniu symulatora wraz z wbudowanym projektorem multimedialnym pozwala rzutować obrysy listków lub osłon indywidualnych na ciało pacjenta. Pracuje pod kontrolą systemu Windows CE. Komputery specjalizowane najliczniej występują w zintegrowanej linii terapeutycznej, w akceleratorze, podobnie jak w symulatorze, jest ich kilkanaście,.

Serwery nadzorują pracę całej linii. Posiadamy dwa serwery: VarisBox dla danych tekstowych dotyczących pacjentów, przebiegu leczenia, dokumentacji medycznej, oraz VisionBox służący do przechowywania obrazów DICOM pochodzących z tomografu komputerowego, symulatora, portali i ramienia C. Codziennie wykonywane są całkowite kopie bezpieczeństwa dysków twardych, które pracują w konfiguracji macierzy RAID. Sieć komputerowa łącząca poszczególne elementy ZLR odseparowana jest od intranetu i Internetu.

4. MODYFIKACJE

Największą troską osób zaangażowanych w proces leczenia jest zapewnienie bezpieczeństwa pacjenta i jednocześnie wysokiej jakości terapii. Ogromna większość pacjentów leczona jest zgodnie z założeniami terapii. Należy jednak pamiętać, że promieniowanie jonizujące użyte w sposób niewłaściwy (w wyniku nałożenia kilku następujących po sobie błędów) może stanowić zagrożenie dla życia pacjenta. W trakcie wdrażania systemu informatycznego bardzo pomocny okazał się projekt *ROSIS* (Radiation Oncology Safety Information System) [5]. Polega on na zbieraniu anonimowych informacji na temat wypadków i zdarzeń niebezpiecznych dla pacjentów lub

obsługi. Dzięki precyzyjnym opisom zdarzeń możliwe stało się wcześniejsze zapobieganie i wykluczanie ewentualnych sytuacji generujących błędy.

System zarządzania radioterapią Varis jest stabilnym i dobrze dopracowanym produktem, ale posiada kilka wad, które należało szybko usunąć. Producent udziela gwarancji na stabilność pracy i tym samym bierze odpowiedzialność za ewentualne pomyłki z winy systemu pod warunkiem, że oprogramowanie komputerów nie jest modyfikowane i nie jest zainstalowany jakiegokolwiek inny program. W związku z tym należało wykorzystać wszystkie możliwości systemu dla poprawy bezpieczeństwa i ergonomii pracy. Projekt *ROSIS* wykazał, że stosunkowo łatwo pomylić plany terapii dla dwóch różnych pacjentów. Z tego powodu należało wprowadzić takie rozwiązania, które w sposób jednoznaczny określałyby tożsamość pacjenta i identyfikowały odpowiedni plan leczenia. Zrealizowano to za pomocą identyfikatorów z kodem kreskowym i zdjęciem. Fotografia pacjenta wykonywana jest kamerą internetową i zapisywana na serwerze. Stamtąd pobierana jest odpowiednim raportem SQLowym wraz z PESElem i drukowana na papierze. PESEL, jako unikatowy numer pacjenta zapisany jest w postaci kodu kreskowego (Code 3z9). Dzięki temu identyfikacja następuje szybko, czytniki kodów kreskowych pracujące w trybie klawiatury USB wczytują PESEL konieczny do rozpoczęcia terapii. Dzięki opisanej rozbudowie systemu, która nie ingeruje w jednorodność oprogramowania dostarczonego przez producenta, nie ma możliwości pomylenia pacjenta, napromienienia dwa razy w ciągu jednego dnia lub pomylenia planu terapii.

Kolejną zauważoną niedoskonałością systemu jest brak potwierdzenia zmian parametrów napromienianego pola podczas symulacji na symulatorze Acuity. Ten etap przygotowania pacjenta do terapii zawsze wykonywany jest w obecności lekarza prowadzącego, plan po symulacji jest dwukrotnie sprawdzany przed pierwszą frakcją napromieniania (jest porównywany z oryginałem planu pochodzącym z systemu planowania leczenia), a także kilkakrotnie w trakcie terapii.

Planowane jest wykonanie dodatkowego zabezpieczenia przed tego typu pomyłkami działającego na zasadzie automatycznie generowanej sumy kontrolnej CRC planu leczenia generowanej przed i po symulacji. Zapis sumy CRC w postaci kodu paskowego pozwoli szybko i niezawodnie porównać oba plany.

Możliwości systemu pozwoliły na pełne dokumentowanie pracy techników. Baza danych firmy Sybase oraz dostarczone oprogramowanie, InfoMaker, do tworzenia raportów SQL'owych pozwoliły na ograniczenie pracy biurowej techników: zapisywanie rozmiarów kolejnych pól podczas napromieniania oraz notowania kolejności pacjentów [6]. Wszystkie te czynności zapisywane są w bazie danych. Wymagało to skorzystania z narzędzi InfoMaker'a i uzyskania niezbędnej informacji w postaci wydruku. Opcja *Documents* pozwoliła stworzyć pełną dokumentację pacjenta w formacie *Word97*. Wszystkie dokumenty, czyli opis badania podmiotowego i przedmiotowego, historia choroby, obserwacje, plan leczenia, protokół badania kwalifikacyjnego, zgoda pacjenta i epikryza, tworzone są na komputerze, zachowywane na serwerze i ewentualnie drukowane dla pacjenta.

Pełna integracja wszystkich etapów leczenia radioterapeutycznego wniosła nową jakość do tej dyscypliny nauki. Dzięki sieci komputerowej zwiększyło się bezpieczeństwo danych i tym samym pacjentów.

5. PROBLEMY W TRAKCIE INTEGRACJI

Integracja brachyterapii z teleradioterapią jest jeszcze na niskim poziomie. Podstawowym problemem w łączeniu obu technik jest dokładność obliczeń sumy dawki dla poszczególnych organów. Wynika on z ruchomości organów wewnętrznych w zależności od pozycji pacjenta. W trakcie brachyterapii pacjentka leży w pozycji ginekologicznej, tymczasem podczas teleterapii normalnie na plecach z nogami wyprostowanymi i złączonymi stopami. Tak różne ułożenie pacjenta powoduje ogromne zmiany w ułożeniu narządów wewnętrznych, więc sumowanie rozkładu dawek w okolicach interesujących nas organów jest obciążone dużym błędem. Obecnie wiele ośrodków onkologicznych boryka się z tym problemem, ponieważ brak jest rozwiązania, choćby programowego. Najczęściej zagadnienie to jest upraszczane do sumy maksimum dawki z obu terapii dla danego obszaru z pominięciem przestrzennego rozkładu dawki.

6. PLANY ROZWOJU

Następnym etapem rozbudowy ZLR będzie zakup tomografu MRI z oprogramowaniem przystosowanym do radioterapii. Dzięki temu poprawi się jakość świadczonych usług, w szczególności dla pacjentów z nowotworami w okolicach mózgowia i miednicy. Na zdjęciach diagnostycznych pochodzących z tomografu komputerowego oba obszary mają niewielkie zróżnicowanie gęstości i co za tym idzie, obrazy tkanek zdrowej i chorej różnią się nieznacznie. Dzięki obrazom MRI uzyska się obrazy o wysokim kontraście między tkankami chorymi a zdrowymi, co pozwoli założyć mniejszy margines napromieniania i tym samym bardziej oszczędnie napromieniowywać zdrowe narządy.

Kolejnymi etapami w rozwoju ZLR będzie zakup sprzętu do bramkowania oddechowego (do precyzyjnego napromieniania nowotworów w okolicach klatki piersiowej), aparatury IGRT (Image Guided RadioTherapy) do precyzyjnego pozycjonowania pacjenta przed każdą frakcją oraz przystawki do brachyterapii prostaty w czasie rzeczywistym.

7. PODSUMOWANIE

Największym zyskiem z integracji poszczególnych aparatów jest zwiększone bezpieczeństwo napromieniania pacjentów. Błędy obsługi są wychwytywane i na bieżąco korygowane (terapia nie zostanie rozpoczęta dopóki wszystkie założenia planu nie zostaną spełnione). Szybkość i precyzja leczenia oraz komfort pracy lekarzy, fizyków i techników owocuje znacząco większą wydajnością pracy, czyli liczbą leczonych pacjentów. Dzięki utrzymaniu jednolitości producenta sprzętu i oprogramowania osiągnięto prostszą budowę całości systemu (niż w przypadku, gdy korzysta się z rozwiązań kilku producentów), łatwiejszy serwis i niższy koszt umów serwisowych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Scharf W.: Akceleratory biomedyczne, 1994 Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, s. 267, ISBN 83-01-11308-1
2. Varian Medical Systems: Planning Reference Guide for Algorithms, 2004, P/N B401653R01G
3. Varian Medical Systems: Acuity Reference Guide, 2005, s. 55-60, P/N TM69501000.
4. Varian Medical Systems: MLC Millennium User Guide, 2001, s.1-2, P/N 100011548-02
5. <http://www.clin.radfys.lu.se>
6. Sybase: User's Guide, Sybase Inc. 2003, Document ID 37789-01-0900-01

THE INTEGRATED RADIOTHERAPEUTIC LINE

Key-words: teleradiotherapy, brachytherapy, accelerator

The Integrated Radiotherapeutic Line (IRL) constitutes composition of hardware and software for accurate radiotherapy. First, the paper explains the differences between teleradiotherapy and brachytherapy. Next, a structure of IRL is presented and functions of separate parts are described. The types of control computers are presented as well as a short technical characteristic of hardware, computer network and operating system. Another issue of the paper presents modifications of the Integrated Radiotherapeutic Line, which were necessary to achieve an appropriate level of patient's safety. Problems arising in the course of the line integration are also presented. Finally, the paper presents issues of development of therapeutic line for brachytherapeutic part and teleradiotherapy part.