

Strokovni članek

DIGITALIZACIJA V RADIOLOŠKI TEHNOLOGIJI

Professional Article

DIGITALIZATION IN RADIOGRAPHY

doc. dr. Dejan Žontar,

dejan.zontar@ijs.si

Institut Jožef Stefan, Oddelek za eksperimentalno fiziko, Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Uvod: Tako kot na vsa področja sodobnega življenja digitalizacija prodira tudi na področje rentgenske diagnostike.

Metode: V prispevku so opisane osnove delovanja digitalnih sistemov, ki se uporabljajo v klasični rentgenski diagnostiki in sicer sistemov za računalniško radiografijo (digitalne slikovne plošče) ter sistemov za digitalno radiografijo. Na kratko so opisane tehnologije, na katerih temeljijo detektorski sistemi.

Rezultati in razprava: Predstavljene so njihove glavne značilnosti s poudarkom na razlikah glede na kombinacijo film-folija ter ključni parametri, ki vplivajo na kvaliteto slike. Prispevek se konča s kratko primerjavo prednosti ter slabosti digitalnih sistemov v primerjavi s klasičnimi rentgenskimi filmi.

Ključne besede: digitalni sistemi, detektorski sistemi, radiološka tehnologija

ABSTRACT

Introduction: Digitalization is present in all fields of modern life and x-Ray diagnostics is no exception.

Methods: The present paper describes basic principles of digital systems used in classic x-ray diagnostics i.e. computer radiography systems (digital image plates) and digital radiography systems. Short description of detector system technologies is included.

Results and Discussion: The description of main characteristics is completed with the review of differences between film-foil combinations and key parameters which affect the image quality. Article concludes with advantages and disadvantages of digital systems in comparison with classic x-ray films.

Key words: digital systems; detector systems, radiography

UVOD

Digitalni sistemi se v rentgenski diagnostiki uporabljajo že desetletja. Tako je zajem podatkov v digitalni obliki, ki omogoča 3D rekonstrukcijo slike, osnova vseh 3D slikovnih načinov (CT, SPECT, PET, MRI, ...). A tudi na področju klasične rentgenske diagnostike so se prvi digitalni sistemi na osnovi slikovnih plošč pojavili že sredi osemdesetih let prejšnjega

stoletja. Vendar so digitalni sistemi začeli intenzivno nadomeščati sisteme film-folija šele v zadnjem času. Digitalni sistem, ki naj nadomesti klasične rentgenske filme, mora namreč izpolnjevati več zahtev:

- dobljena slika mora zadoščati za diagnostične namene,
- celoten postopek mora trajati enako ali manj časa kot pri filmu,
- potrebna doza mora biti enaka ali manjša kot pri uporabi filma,
- uporabljene tehnike morajo biti primerljive tehnikam pri uporabi filmov in
- podatki morajo biti shranjeni v standardnem formatu.

Ceprav ni potrebno, da so vse lastnosti slike, dobljene z digitalnim detektorjem, v vseh pogledih enake lastnostim slike na filmu, pa morajo zadoščati kriterijem za diagnostično uporabno sliko.

Zahteve za lastnosti slike kot so ločljivost, kontrast in velikost so odvisne od slikanega področja in diagnostičnega vprašanja. Pri tem je dosegljiva kakovost slike, dobljene z digitalnim sistemom, močno odvisna od lastnosti detektorja, te pa od uporabljene tehnologije in podrobnosti tehnične izvedbe.

Sistemi za računalniško radiografijo

Računalniška radiografija (CR - Computed Radiography) temelji na uporabi fosfornih plošč (PSP - Photosimulable phosphor). Tako kot pri ojačevalnih folijah, ki se uporabljajo v sistemu film-folija, tudi pri fosfornih ploščah, ki se uporabljajo v CR sistemih, fotoni rentgenske svetlobe vzbudijo elektrone v fosfornih ploščah v vzbujeno stanje. Le ti nato del prejete energije izsevajo kot vidno svetlobo. Vendar je pri fosforjih, ki se uporabljajo v CR sistemih, ta proces bistveno počasnejši kot v ojačevalnih folijah in lahko traja ure ali več. Tako po obsevanju fosforne plošče z rentgensko svetlobo na njej ostane latentna slika, ki jo odčitamo v CR čitalcih.

Fizično je sistem za računalniško radiografijo precej podoben sistemu z rentgenskimi filmi, pa tudi pri delovnem procesu ni velikih razlik. Fosforne plošče se nahajajo v kasetah, podobnim kasetam s kombinacijo film-folija, tako da ob aparatu delo s kaseto ostaja praktično enako. Po ekspoziciji se CR kaseto vstavi v CR čitalec. Tam se fosforna plošča odstrani iz kasete, nato pa se celotno ploščo, točko po točko prečeše z laserskim žarkom. Osvetlitev fosforja z laserskim žarkom ustrezne valovne dolžine spodbudi izsevanje dela energije, shranjene v obsevani točki, v obliki vidne svetlobe. Pri tem je količina izsevane vidne svetlobe sorazmerna s

količino rentgenske svetlobe, ki je med ekspozicijo padla na to točko. Izsevane svetlobo se po optičnih vlaknih vodi do fotopomnoževalk ali fotodiod, kjer se pretvori v električni signal in nato digitalizira. Za vsako točko tako dobimo določeno vrednost signala, ki je sorazmerna s količino vpadle rentgenske svetlobe. Vrednost za vsako odčitano točko se shrani v obliki matrike, ki predstavlja rentgensko sliko v digitalni obliki. Vendar se zaradi omejenega časa odčitavanja pri osvetljevanju z laserjem ne odda vsa shranjena energija. Zato je po končanem odčitavanju potrebno celo ploščo osvetli z močno svetlobo, s čimer se izbriše še preostala latentna slika. Nato se fosforna plošča vrne v kaseto, pripravljena za ponovno uporabo.

Količina izsevane svetlobe predstavlja signal iz izbrane točke in vpliva na razmerje signal/šum na zajeti sliki. Povečamo jo lahko z daljšim časom osvetljevanja z laserskim žarkom ali s povečanjem velikosti posamezne točke (t.j. preseka laserskega žarka). Z daljšim časom osvetljevanja tako sicer izboljšamo razmerje signal/šum, vendar na račun daljšega časa odčitavanja CR plošče. Presek laserskega snopa pa vpliva na velikost točk, iz katerih je sestavljena slika in s tem na prostorsko ločljivost. Kot pri ojačevalnih folijah pa je prostorska ločljivost omejena tudi z disperzijo svetlobe in je odvisna od debeline fosforne plasti. Zato tudi pri CR sistemih večja debelina fosforne plošče omogoča boljši izkoristek a na račun slabše prostorske ločljivosti.

Zaradi napak oziroma okvar fosforne plošče ali CR čitalca se lahko pri uporabi CR sistemov na slikah pojavljajo različni artefakti. Le ti so lahko posledica slabše kakovosti fosforne plošče zaradi staranja ali vlage ali pa njenih poškodb (npr. prask). Artefakti lahko nastanejo tudi zaradi napak CR čitalca, bodisi mehanskih (umazani ali poškodovani optični vodniki, slabi električni kontakti itd.) ali električnih oziroma programskih (npr. napake pri digitalizaciji ali obdelavi slike).

Sistemi za digitalno radiografijo

Za razliko od računalniške radiografije sistemi za digitalno radiografijo (DR) odziv na vpadlo rentgensko svetlobo podajo neposredno kot električni signal. Pri tem se uporabljata dva različna pristopa

- indirektni digitalni detektorji in
- direktni digitalni detektorji.

Indirektni digitalni detektorji tako kot sistemi film-folija uporabljajo fosforne plošče (oziroma scintilatorje), v katerih se vpadna rentgenska svetloba spremeni v vidno. Da bi izboljšali prostorsko ločljivost pa se pri digitalnih detektorjih pogosto uporabljajo fosforji z iglično strukturo, ki delujejo kot optični vodniki in tako zmanjšajo disperzijo. Namesto na rentgenski film nastala vidna svetloba pade na detektorsko plast iz amorfne silicija (a-Si), v kateri povzroči nastanek električnega signala. Pri tem je detektorska plast sestavljena iz številnih drobnih fotodetektorjev. Signal vsakega fotodetektorja je sorazmeren s količino vpadle vidne (in posledično rentgenske) svetlobe, njegov položaj pa določa, katero točko na sliki predstavlja. Za detektorsko plast se najpogosteje uporabljajo ploski (flat panel) detektorji na osnovi tehnologije TFT ali pa detektorji na osnovi CCD.

Pri **direktnih digitalnih detektorjih** pa uporaba ojačevalne plasti ni potrebna. Namesto fosforja se nad detektorsko plastjo nahaja plast amorfnega selena (a-Se), ki ima bistveno višje vrstno število kot silicij in zato precej boljši izkoristek za absorpcijo rentgenske svetlobe ($Z(\text{Se}) = 34$, $Z(\text{Si}) = 14$). Tako se selen lahko uporablja za neposredno detekcijo rentgenske svetlobe. Ta v selenu povzroči nastanek električnega signala (parov elektron-vrzel), ki pod vplivom električnega polja odteče do detektorske plasti. Za detektorsko plast se običajno uporabljajo ploski detektorji na osnovi tehnologije TFT, enako kot pri indirektnih sistemih.

Ne glede na tehnologijo se električni signal odčita iz detektorske plasti, ojača in digitalizira ter nato kot pri CR sistemih shrani v obliki matrike. Vendar uporabljena tehnologija pomembno vpliva na povezavo med izkoristkom in prostorsko ločljivostjo detektorja. Tako pri indirektnih kot pri direktnih detektorjih je najboljša dosegljiva prostorska ločljivost omejena z velikostjo detektorskih elementov. Pri indirektnih detektorjih pa je prostorska ločljivost zaradi disperzije svetlobe v ojačevalni plasti odvisna tudi od njene debeline in tako povezana z izkoristkom detektorja. Nasprotno pa je pri direktnih detektorjih zaradi usmerjanja električnega signala z električnim poljem disperzija zanemarljiva, zato lahko debelino plasti amorfnega selena poljubno povečamo in tako dosežemo zelo dober izkoristek. Direktni digitalni sistemi zato omogočajo zelo dobro prostorsko ločljivost in hkrati visok izkoristek, zaradi česar predstavljajo prevladujočo tehnologijo v digitalnih mamografskih sistemih.

Digitalni detektorji zaradi precej zapletene strukture nimajo povsem homogenega odziva, kar pomeni, da se na enako količino vpadne rentgenske svetlobe različni detektorski elementi odzovejo z različno močnim signalom. Ker bi to močno poslabšalo kakovost slike, se v praksi surova slika (raw image) avtomatsko matematično obdelava, pri čemer se upoštevajo popravki zaradi napak detektorja. Informacije, potrebne za izračun teh popravkov, so rezultat kalibracije detektorjev, ki jo v okviru rednih testov običajno izvajajo radiološki inženirji. Napake pri kalibraciji vodijo do neustreznih popravkov in poslabšajo kakovost vseh nadaljnjih slik, zato je izjemno pomembno, da kalibracija poteka natančno po navodilih proizvajalca.

Lastnosti digitalnih sistemov

Ne glede na uporabljeno tehnologijo imajo digitalni sistemi številne skupne lastnosti. Najbolj očitna je seveda ta, da dobimo sliko v digitalni obliki, ki jo lahko prenašamo, kopiramo in shranjujemo v elektronski obliki ter s programi za obdelavo slike prilagajamo njen prikaz. Pomembna prednost digitalnih sistemov pa je tudi njihov velik dinamični obseg. Za razliko od sistemov film-folija, pri katerih dobimo dober kontrast le v relativno ozkem področju optimalne ekspozicije (doze), imajo digitalni sistem linearen odziv preko zelo širokega območja. To pomeni, da se bo latentni kontrast dobro prenesel na sliko tudi pri obsevanju z dozo, ki je občutno nižja ali višja od optimalne. Vendar to žal ne pomeni, da digitalni sistemi omogočajo visoko kvaliteto slike pri poljubno nizkih dozah. Namesto slabšega prenosa kontrasta

se pri digitalnih sistemih ob nižanju doze slabša razmerje signal/šum (in s tem večja zrnatost slike), kar navzdol omejuje sprejemljivo dozo.

Žal pa pri digitalnih sistemih ne obstaja naravna zaščita pred previsokimi dozami. Medtem ko pri sistemih film-folija slikanje s previsoko dozo vodi do izgube kontrasta zaradi pretemne slike, pri digitalnih sistemih s poviševanjem doze kvaliteta slike narašča, saj se izboljšuje razmerje signal/šum, prenos kontrasta pa ostaja nespremenjen. Previsoka doza se zaradi obdelave slike kot na primer spreminjanje okna (»windowing«) običajno tudi ne odraža ko temnejša slika in pogosto ostane neopažena. Tako pri prehodu na digitalne sisteme obstaja velika nevarnost neupravičenega naraščanja obsevanosti pacientov. Da bi uporabniku omogočili povratno informacijo o uporabljeni dozi, večina proizvajalcev uporablja indikatorje ekspozicije. Ti so povezani z obsevanostjo detektorja in kažejo, ali je bila uporabljena doza primerna ali pa morda prenizka ali previsoka. Žal pa proizvajalci ne uporabljajo enotnega sistema, ampak se indikatorji ekspozicije med proizvajalci močno razlikujejo (S, EI, AL, IgM, ...), kar povzroča zmedo ter otežuje njihovo uporabo in primerjavo med napravami.

Pomembna lastnost vsakega slikovnega sistema je njegova prostorska ločljivost, saj določa velikost najmanjših struktur, ki bodo na sliki še vidne, oziroma najmanjši razmik med strukturami, pri katerem bodo te na sliki še razločljive. Vendar pa sta mejna velikost oziroma razmik odvisna tudi od tega, kako kontrastni so slikani objekti, kar pomeni, da sta prostorska ločljivost in kontrast medsebojno povezana. Pri digitalnih sistemih zato sposobnost slikovnega sistema za prenos majhnih struktur opisujemo s funkcijo MTF (Modulation Transfer Function). Ta pove, za koliko se poslabša kontrast drobnih struktur v primerjavi s kontrastom velikih. Zato si želimo slikovni sistem, ki bo imel čim višjo vrednost funkcije MTF. Ker pa je le ta odvisna od prostorske frekvence (merjene v številu parov linij na milimeter, lp/mm) in običajno ni absolutnega zmagovalca, moramo pri izbiri slikovnega sistema upoštevati, čemu bo namenjen in s tem, kakšno prostorsko ločljivost potrebujemo. Za večino digitalnih sistemov podatke o vrednosti funkcije MTF podajajo proizvajalci.

Pomembna lastnost detektorskega sistema je tudi njegov izkoristek, saj določa, s kolikšno dozo moramo obsevani detektor, da bomo dobili sliko ustrezne kakovosti. V splošnem velja, da so CR sistemi običajno primerljivi s kombinacijo film-folija, DR sistemi pa običajno potrebujejo nižje doze. Za medsebojno primerjavo digitalnih detektorjev se pogosto uporablja funkcija DQE (Detective Quantum Efficiency). Pri tem načeloma velja, da bo sistem z 10% višjo vrednostjo DQE omogočil enako razmerje signal/šum že pri 10% nižji dozi. Tako kot v primeru MTF je tudi DQE odvisen od prostorske frekvence, s stališča varstva pred sevanji pa je seveda boljši sistem z višjo vrednostjo DQE.

ZAKLJUČEK

Digitalni sistemi vztrajno nadomeščajo rentgenske filme na vseh področjih rentgenske diagnostike. To je v veliki meri posledica številnih prednosti, ki jih prinaša njihova uporaba, med katerimi so:

- Ni potrebe po filmih (za enkratno uporabo) in kemičnem razvijanju.
- Preprostejši in hitrejši delovni proces.
- Preprostejše (in cenejše) shranjevanje in prenos.
- Večji dinamični obseg kot klasični filmi:
 - manj pogosto ponavljanje slikanja zaradi previsoke ali prenizke ekspozicije,
 - eno slikanje lahko nadomesti več klasičnih slik s filmi različnih občutljivosti.
- Digitalna obdelava slik.
- Sliki se avtomatično dodajo podatki o posegu

Seveda pa digitalni sistemi niso brez pomanjkljivosti in najpomembnejše med njimi so sledeče:

- Previsoka ekspozicija težko opazna!!!
- Preprosto delo lahko vodi do nepotrebnih dodatnih slik.
- Preprosto brisanje slabih slik.
- Rokovanje kasete s filmom omogoča večjo fleksibilnost (ne velja pri slikovnih ploščah in prenosnih ploskih detektorjih).

Popolnoma pa lahko prednosti, ki jih ponujajo digitalni sistemi za rentgensko diagnostiko, izkoristimo šele, če na delo s slikami v digitalni obliki preide ves radiološki oddelek ali celo celotna institucija (npr. bolnišnica). Šele v tem primeru se bo slika v digitalni obliki uporabljala v celotnem procesu, od zajema in prenosa do shranjevanja in prikaza, rentgenske slike v fizični obliki pa lahko skoraj povsem izginejo.

Literatura

- https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content/AdditionalResources/Training/1_TrainingMaterial/DigitalRadiology.htm
- Schaefer-Prokop C (2008). Digital chest radiography: an update on modern technology, dose containment and control of image quality. *Eur Radiol*, 18: 1818–1830
- Seiber JA (2009). Digital radiography: The bottom line comparison of CR and DR technology. *Applied Radiology* 38: 21–28
- Yaffe MJ, Rowlands JA (1997) X-ray detectors for digital radiography, *Review. Phys. Med. Biol.*, 42: 1–39