

## 5. Defibrilatori

- **ventrikularna fibrilacija** – asinkrone kontrakcije srčanih stanica
- srčani izlaz opada i približava se nuli
- **ireverzibilna oštećenja mozga** uslijed prekida krvotoka i posljedično nedostatka opskrbe stanica kisikom nastupaju nakon ~5 min
- terapija: prekid fibrilacije srca – **defibrilacija**
- načelo: **električni udar** (šok) zaustavlja rad svih stanica srčanog mišića, koje sve odjednom ulaze u refraktorni period
- tako je omogućen (i vjerojatan) **ponovni početak sinusnog ritma srca**
- vanjski defibrilatori – električni udar izvodi se **transtorakalno**, preko velikih površinskih elektroda smještenih na prsni koš; jedna elektroda smješta se **desno iznad prsne kosti** (lat. sternum) a druga **bočno, ispod pazuha**, u visini vrha srca (lat. apex)
- načelo rada: **pražnjenje visokonaponskog kondenzatora**
- energija pohranjena na kondenzatoru je do 400 J ( $E = CU^2/2$ )
- maksimalni napon: **2 kV do 9 Kv**
- shema: saljd 6.

### *Bifazni defibrilator*

- imaju **dvostruko manje razine izlaznih energija** (u usporedbi s monopolarnim impusima)

### *Prijenos*

- izvode se kao prijenosni uređaji radi lakše intervencije u slučaju nesreće
- glavni zahtjevi: smanjenje mase i dimenzija, vizualno praćenje EKG-a i mogućnost elektrosimulacije (pacinga) srca

### *Elektrode defibrilatora*

- a) **žličaste** elektrode za defibrilaciju na otvorenom srcu
- b) **površinske** elektrode s kontrolnim tipkalima

### ***Automatski vanjski defibrilator***

- mogu ih primijeniti i osobe bez medicinskog obrazovanja u hitnim slučajevima na javnim mjestima
- primjenjuje se samoljepljive elektrode velike površine, uz jasne oznake mjesta primjene

### ***Implantabilni kardioverteri/defibrilatori***

- indikacije: profilaksa nagle srčane smrti (sudden cardiac death – SCD)
- populacija – srednja dob (stres) – menadžeri
- funkcije:
  - 1) **kardioverzija** – primjena električnog udara za prekid abnormalnih tahikardija
  - 2) **defibrilacija** – primjena električnog udara za prekid fibrilacije i uspostavu sinusnog ritma
- prikaz EKG-a slajdovi 16. i 17.

### ***Značajke izvora napajanja ICD-a***

- **mala** unutarnja impedancija – struja punjenja kondenzatora je oko 2-3 A
- značajno unaprjeđenje značajki u odnosu na baterije za pacemakere
- kapacitet baterije može dati ~200 električnih udara (**9 godina**)

### ***Visoki napon***

- u implantiranom uređaju treba iz napona baterije dobiti napon do **750 V**
- visokonaponski kondenzator: posebne izvedbe aluminijskih elektrolitskih kondenzatora
- volumen kondenzatora je cca 30% volumena ICD-a

### ***ICD osigurava terapiju:***

- ventrikularnih tahikardija
- ventrikularne fibrilacije
- supraventrikularnih aritmija

### ***Postupak implantacije***

- **lokalna anestezija**
- **kratka** postoperacijska njega (1 dan u bolnici)
- 55,000 implantacija godišnje u SAD-u

### ***Dijagnostika tahikardija zasnovana je na:***

- a) analizi PR intervala
- b) analizi srčane frekvencije (HR)

### ***Implantabilni elektrodni kateteri***

- složenija struktura od pacemakera

#### **u prošlosti:**

- implementacija uređaja u abdomen
- opća anestezija
- dug post-operativan boravak u bolnici
- post-operacijska smrtnost do 9%
- nisu programirajući (samo visokonaponski udari)
- trajnost ~1,5 godina
- manje od 1000 implementacija godišnje

#### **danas:**

- mali uređaji
- implantirani pektoralno
- transvenska implantacija – jedan rez
- lokalna anestezija
- post operacijska smrtnost < 1%
- programirajući
- jedno i dvokomorske izvedbe
- trajnost do 9 godina

- vrste:
- a) **endokardijalni**
- b) **intramiokardijalni**

### ***Programator***

- **telemetrija** i programiranje putem RF impulsa
- analiza intrakardijalnih signala
- terapija: pacing i električni udari
- ispitivanje implantiranog ICD-a

## **6. Ugradbeni (implantabilni) medicinski uređaji**

- funkcije: zamjena bioloških struktura, podrška oštećenoj biološkoj strukturi i pojačanje postojeće biološke strukture
- izvedba: transplantirano biološko tkivo, umjetno uzgojeno tkivo, pasivni implantanti, aktivni medicinski uređaji

### ***Pasivne naprave***

- a) **ortoza** – ortopedska naprava ili uređaj za potporu, poravnanje, sprječavanje ili ispravljanje deformacije, ili poboljšavanje funkcije pokretnih dijelova tijela (npr. naočale, štapovi...)
- b) **proteza** – umjetna naprava koja **zamjenjuje** nestali ili ozlijeđeni dio tijela

### ***Aktivni ugradbeni elektronički uređaji***

- funkcije:
  - 1) **terapija** – najčešće elektroterapija putem električkih impulsa predanih tkivu ili organu
  - 2) **monitoriranje** (praćenje) signala ili drugih fizioloških veličina radi:
- smanjenja rizika za pacijenta (pad kod starijih)
- optimiranja liječenja (regulacija lučenja inzulina kod dijabetesa)

### ***Električka simulacija***

- **jednostavnost**: najčešće pravokutni valni oblik, konstantni napon ili struja, parametri impulsa jednostavno se kontroliraju
- ciljno tkivo: mišići, živci, ostala tkiva
- funkcije:
  - 1) **dijagnostika** – mjerenje brzine provođenja živcima, osjetljivost...
  - 2) **terapija** – rehabilitacija, el. stimulacija skeletnih mišića, el. stimulacija srca, defibrilacija...
- trajanje simulacije:
  - a) **privremeno** – kratkotrajno ili periodički (rehabilitacija, defibrilacija, potiskivanje bola; površinske i potkožne elektrode)
  - b) **trajno** – održavanje vitalnih funkcija (rad srca, disanje), poboljšanje kvalitete života (duboka stimulacija mozga, fiziološka elektrostimulacija srca, potiskivanje bola...); implantirane elektrode
- stimulatori
  - 1) vanjski (eksterni)
  - 2) unutarnji (implantirani)

### ***Električka stimulacija – sistematizacija po stimuliranom organu***

- srce – povremena ili trajna aritmija, prekid rada srca, fibrilacija
- mišići – omogućiti kontrakciju mišića radi ostvarivanja pokreta udova, ošita, terapija inkontinencije
- mozak i živčani sustav – zamjena ili pojačavanje osjeta, terapija bolesti (epilepsija, hipertenzija) ili simptoma (bol, tremor, disanje)
- kosti – ubrzavanje zacjeljivanja kostiju nakon prijeloma
- ostali organi

### ***Električki stimulatori***

- stimulacija mišića električkim impulsima
- postizanje **kontrakcije mišića**
  - a) rehabilitacija

- b) prevencija slabljenja (atrofije) mišića kod dugotrajne imobilizacije
  - c) ispitivanje mišića i/ili živaca
  - d) sport – trening i jačanje mišića
- električni impulsi su **zamjena za akcijske potencijale** iz središnjeg živčanog sustava
  - površinske elektrode, iglaste elektrode ili implantabilne elektrode

### ***Modeliranje električke simulacije***

- za opisivanje podražljivosti tkiva, koristi se krivulja koja opisuje odnos amplitude impulsa i njegovog trajanja (**I-t krivulja**)
- matematički se opisuje kao **hiperbola**
- temelji se na podacima dobivenima **empirijski**
- za beskonačno duge pravokutne impulse intenzitet podražaja mora postići vrijednost  $I_0 = V_T/R$  – ta struja naziva se **struja reobaze**
- trajanje impulsa koje na I-t krivulji odgovara dvostrukoj struji reobaze naziva se **vrijeme kronaksije**

### ***Modeliranje podražljivosti***

- drugi model podražljivosti temelji se na električkim svojstvima stanice
- stanična membrana može se modelirati linearnim električkim sklopom koji se sastoji od paralelnog spoja otpornosti  $r$  i kapacitivnost  $c$  membrane
- slajd 12.

### ***Intenzitetno-vremenska krivulja***

- normalizirana na vrijeme kronaksije za struju, naboj i energiju
- najmanja energija impulsa potrebna za ostvarivanje nekog efekta stimulacije je pri trajanju impulsa  $t = 1,25 \cdot T_e$ ; gdje je  $T_e$  vrijeme kronaksije

### ***Valni oblici stimulusa***

- najčešće **pravokutni** oblici impulsa
- trajanje i amplituda impulsa izabiru se sukladno vremensko – inenzitetskoj krivulji za pojedini mišić/skupinu mišića ili živac

### ***Frekvencija impulsa stimulacije***

- prilikom stimulacije niskim frekvencijama impulsa, može se razlikovati svaki pojedinačni pokret kao posljedica stimulusa
- povećanjem frekvencije dolazi do trzanja mišića, a **pri frekvencijama od 40-80 Hz dolazi do glatkog pokreta**
- takva kontrakcija mišića naziva se **tetanička kontrakcija**

### ***Električki stimulatori srca***

- ugradbeni ili implantabilni
- prva humana ugradnja 1958.
- funkcije: stimulacija srčanog mišića, senziranje intrakardijalnog EKG-a, senziranje okoline, komunikacija s programatorom/medicinskim osobljem
- temeljen na mikroračunalu

### ***Srčana podražljivost i provodni sustav srca***

- **sinusno-atrijski (SA) čvor** – primarni predvodnik srčanog ritma (pacemaker)
- specijalizirano mišićno tkivo sa svojstvom samopodražljivosti (spontano stvara impulse)
- impuls se širi kroz atrijske brzinom 1 m/s prema **atrioventrikulskom čvoru (AV)**
- AV čvor je jedina provodna veza između atrijske i ventrikula
- slika na slajdu 22.

### ***Elektrokardiogram***

- zapis električke aktivnosti srca
- značajan za utvrđivanje električke aktivnosti srca
- pokazuje abnormalnosti srčanog ritma
- omogućuje dijagnostiku stanja srčanog mišića

### ***Aksijski potencijal srčanih mišićnih vlakana***

- razlikuje se od aks. potencijala ostalih ekscitabilnih stanica (postojanje platoa, tj. zadržavanje u hiperpolariziranom stanju nekoliko stotina ms)
- različiti tipovi srčanih stanica – različite karakteristike (različit prag podražljivosti, različita frekvencija otkucaja, različit valni oblik)

## ***Vrste pacemakera***

- pacemaker se sastoji od elektroničkog uređaja koji se ugrađuje pod kožu te jedne ili više elektroda postavljenih na elektrodne katetere, a koje se putem vena postavljaju u srčane komore
- **vrste:**
  - a) **jednokomorni pacemakeri** – stimulira se jedna srčana komora (najčešće desna klijetka)
  - b) **dvokomorni** – elektrode se postavljaju u dvije srčane komore (desna pretklijetka i klijetka)
  - c) **trokomorni ili uređaji za resinkronizaciju srca** – desna pretklijetka te desna i lijeva klijetka
  - d) **suvremeni srčani kardioverter** – defibrilatori (u sebi sadrže i funkciju pacemakera)
- pacemakeri se koriste u liječenju sporih srčanih ritmova (**bradiaritmija**)
- **bradikardija** – srčani ritam koji je niži od 60 otkucaja u minuti

## Dijelovi srčanog stimulatora

- slika na slajdu 37.
- kućište, izvor napajanja, konektor, kateter, elektroda, elektronički sklopovi

## **Načini rada**

- 1) **asinkroni** (kompetitivni)
- 2) **na zahtjev** (nekompetitivni)
  - a) sinkroni : na R zubac ili na P val
  - b) inhibirajući na R zubac
- 3) **fiziološki** (engl. rate responsive) – frekvencija se pomoću različitih algoritama postavlja na fiziološku to jest pretpostavljenu razinu fizičke aktivnosti

## Vremenski dijagram jednog ciklusa

- 3 vremenska razdoblja:
  - a) **Tr – refraktorno vrijeme**
  - b) **Tn – vrijeme osluškivanja** (engl. noise sampling period)
  - c) **Ta – vrijeme sinkronizacije** (engl. alert period)
- prikaz na slajdu 40.



## ***Elektrode***

- postavljanje:
  - 1) **epikardijalno** – na površinu srca
  - 2) **intramiokardijalno** – pričvršena u srčani mišić
  - 3) **endokardijalno** ili intraluminarno – pritisnuta na stijenku srčanog mišića s unutrašnje strane
- polaritet pri stimulaciji:
  - a) **monopolarna** (unipolarna) – referentna elektroda je kućište stimulatora
  - b) **bipolarna** – dvije elektrode na elektrodnom kateteru
- **pasivno pričvršćivanje elektrode** – četiri hvataljke uhvate se za fibrozna vlakna u unutrašnjosti srca
- **aktivno pričvršćivanje** – helikoidalni dio elektrode ugradi se u srčani mišić, pozicioniranje bilo gdje u srcu
- materijali od kojih se izrađuju elektrode – **plemenite kovine**:
  - 1) platina i njene slitine
  - 2) titan i njegove slitine
  - 3) iridij
  - 4) nehrđajuće željezo
  - 5) kompozitni materijal vitreous (staklo+kovina+ugljik)
- značajke materijala:
  - a) **biokompatibilnost** – biološka prihvatljivost i podnošljivost materijala korištenih u medicini i stomatologiji
  - b) **inertnost** – ne otpušta čestice materijala u tijelo
  - c) **otpornost na koroziiju**
- površina elektrode:
  - 1) **hrapava** – radi povećanja efektivne površine (smanjenja gustoće struje)
  - 2) **porozna** – omogućuje otpuštanje lijeka (steroida) radi smanjenja upalnog procesa nakon ugradnje elektrode (1 mg pohranjen u vrh elektrode)

## ***Elektrodni kablovi***

vodič:

- isprepleteni spiralni **višežični** vodič
- **mali otpor**
- materijal: slitina više kovina (Co, 35% Ni, 20% Cr, 10% Mo) s jezgrom od srebra
- čvrstina, savitljivost, elastičnost – dugotrajnost

izolator:

- **velika impedancija**
  - biokompatibilnost
  - materijal: silikonska guma i poliuretane
  - čvrstina, savitljivost, elastičnost – dugotrajnost
- 
- za vrijeme ugradnje mjeri se **prag podražljivosti** srčanog mišića pacijenta
  - magnituda impulsa namješta se na **dvostruku vrijednost praga stimulacije**, radi veće pouzdanosti

## ***Izvor napajanja***

- baterija: primarni članak temeljen na litiju: **litij (-) / jodid –poli-2-vinilpiridin (+)**
- **velika gustoća** energije
- napon praznog hoda: **2,8 V** – stabilan za vrijeme višegodišnje uporabe
- dva do tri članka serijski vezana
- kapacitet baterije – 1 Ah do 3 Ah
- zamjena stimulatora kad kapacitet baterije padne na 0,09 Ah
- baterija za vrijeme rada **ne proizvodi plinove**
- relativno visok **izlazni otpor baterije**

## **Senzori u fiziološkim pacemakerima**

- **akcelerometar** – pokreti, tjelesna aktivnost
- **mikrofon** – disanje

- **električna impedancija** – pletismografija (promjena intrakardijalnog volumena, disanje)
- **intrakardijalni ECG** (analiza QT segmenta, površina R zupca)
- **mjerilo krvnog tlaka**
- **termistor** – temperatura krvi
- pH
- dvostruko senziranje – za povećanje pouzdanosti

#### Akcelerometri – MEMS

- osjećaju promjene nastale uslijed pomicanja
- prikaz piezoelektričkog kristala za mjerenje akceleracije u pacemakeru

#### Pletismografija

- promjene impedancije prsnog koša mjere se **između elektrode u srcu i kućišta pacemakera**

## Modeliranje

- proces stvaranja modela
- model – reprezentacija strukture i rada nekog sustava
- jednostavniji je od sustava kojeg reprezentira
- svrha: omogućiti analizu sustava pri promjeni utjecajnih veličina
- kompromis između realističnosti i jednostavnosti
- vrste: fizički, konceptualni, matematički, deskriptivni i eksplanatorni
- u biomedicinskim znanostima:
  - 1) in vivo – organizmi za proučavanje koji će dati uvid i razumijevanje sveobuhvatnijih pojava
    - o medicina koristi modelske organizme prije kliničkih pokusa na ljudima (minimizacija rizika)

- npr. vinska mušica (genetičari, miševi, štakori, bakterije...)
- 2) ex vivo
  - eksperimentira se na stanicama, tkivima ili organima izvađenim iz organizma, u vanjskom okruženju s minimalnim izmjenama prirodnih uvjeta
- 3) in vitro
  - izolira se specifični živi proces i reproducira u laboratorijskim uvjetima (u epruveti, u Petrijevim posudama)
- 4) in silico
  - računalni modeli izraženi algoritmima u obliku računalnih programa (simulacijski modeli)

#### Vrste simulacijskih modela

- 1) statički i dinamički modeli
  - statički: opisuju sustave u stacionarnom stanju
  - dinamički: postoji vremenski promjenjiva interakcija među varijablama
- 2) deterministički i stohastički modeli
  - stohastički: sadrže bar jednu slučajnu varijablu
- 3) linearni i nelinearni modeli

#### Koraci u razvoju simulacijskih modela

- a) zahtjevi na model
- b) konceptualni model
- c) matematički model
- d) programska implementacija
  - aproksimacija vremenski kontinuiranih sustava u vremenski diskretne
  - algoritmi
  - programska implementacija
- e) simuliranje rezultata
- f) validacija modela
  - tehnike: simuliranje modela poznatim ulaznim signalima i usporedba izlaza s izlazom stvarnog sustava
  - drugo: razdvoje se podatci u skup za učenje i skup za vrednovanje

### Model srca kao strujnog dipola

- valni oblik EKG-a ovisio je o položaju elektroda i načinu mjerenja
- srce- izvor (generator) u volumnom vodiču
- srce modeliramo kao strujni dipol (=idealizirani model izvora u kojem struja izvire na jednom i ponire na drugom kraju)
- za vrijeme srčanog ciklusa dipol mijenja veličinu i orijentaciju
- napon koji mjerimo između nekog para elektroda proporcionalan je projekciji vektora dipola na pravac koji prolazi elektrodama

### Hodgkin-Huxleyev model

- u izvanstaničnoj tekućini je velika koncentracija  $\text{Na}^+$  iona, a u citoplazmi  $\text{K}^+$  iona
- u nepobuđenoj stanici ovi koncentracijski gradijenti čine membranu polarnom (negativnom iznutra)
- u pobuđenoj stanici dolazi do brze promjene polaritosti membrane mijenjanjem njene propusnosti za  $\text{Na}^+$  i  $\text{K}^+$  (nastanak i širenje akcijskog potencijala)
- 1945. Hodgkin i Huxley uvode mikroelektrodu u divovski akson lignje i pokazuju da tijekom akcijskog potencijala dolazi do obrata polariteta napona na membrani
- 1952. Hodgkin i Huxley postavljaju suvremenu teoriju nastanka i širenja akcijskog potencijala
- 1963. Hodgkin i Huxley dobivaju Nobelovu nagradu za teoriju nastanka i širenja akcijskog potencijala

## Medicinsko oslikavanje

- koristi se u dijagnostičkim postupcima i intervencijskim postupcima
- osnovni principi za medicinsko oslikavanje (engl. medical imaging)
  - a) radiografija
  - b) računalna tomografija
  - c) magnetska rezonancija
  - d) ultrazvuk
  - e) nuklearna medicina
- proces: objekt snimanja -> uređaj za snimanje -> podatci -> algoritam -> rekonstrukcija presjeka objekta

## RAČUNALNA TOMOGRAFIJA

- ideja: **rekonstruirati presjek objekta iz velikog broja projekcija**
- Radon otkrio matematički postupak rekonstrukcije iz projekcija (1917.)
- Cormack i Hounsfield, Nobelova nagrada za medicinu, 1979.
- rani CT uređaji: rezolucija slike 128\*128 i lošija kvaliteta slike
- moderni CT uređaji: rezolucija slike 1024\*1024 i sliku visoke kvalitete
- željena rezolucija i debljina sloja ovise o **dijagnostičkim potrebama**
- kompromis između rezolucije i doze radijacije
- radiološki standardi definiraju dozvoljene doze za snimanja pojedinih organa

## VIRTUALNA STVARNOST

- koriste se za virtualnu endoskopiju
- **endoskopija** – snimanje unutrašnjosti organizma kroz prirodni ili umjetni otvor na tijelu
- koristi 3D oslikavanje te analizu slike za vizualizaciju unutrašnjosti tijela bez umetanja klasičnog endoskopa
- virtualna bronhoskopija, virtualna kolonoskopija, odmotavanje crijeva

## ULTRAZVUK

- prva dijagnostička uporaba ultrazvučnog oslikavanja u Austriji za dijagnostiku tumora mozga, 1942.
- Doppler oslikavanje, 1956.
- Beam forming metode (phased-array tehnologija), 1968.

- princip: **emitirani zvuk se reflektira na mjestima gdje dolazi do promjene brzine zvuka u tkivu**
- prijemnik registrira kašnjenje reflektiranog vala i uz poznatu brzinu širenja zvuka **određuje dubinu** na mjestu refleksije

## MAGNETSKA REZONANCIJA

- Paul Lauerbur objavio prvu MR sliku, 1973.
- Lauterbur i Mensfield, Nobelova nagrada za medicinu, 2003.
- prvi komercijalni MR – 1980-ih
- funkcionalni MR: 1993.
- princip: temeljen na **mjerenju magnetskih svojstava atoma vodika u tkivu**
- atomi vodika čine vodu tako da je MR oslikavanje pogodno za snimanje organa koji sadrže u sebi vodu
- dijelovi tijela u kojima je manje vode (npr. kosti) slabije se vide na MR slikama
- primjene:
  - srčani MRI – omogućuje analizu pokreta srca
  - diffusion tensor imaging – mjeri difuziju vode, omogućuje snimanje nervnih vlakana u mozgu
  - funkcionalni MRI – omogućuje oslikavanje aktivnosti mozga tijekom raznih aktivnosti
  - MR spektroskopija – mjeri distribuciju kemijskih tvari u svakom vokselu tkiva

## 11. Računalna tomografija (CT)

- engl. computed tomography (CT)
- modalitet snimanja koji generira slike **presjeka ljudskog tijela** koje prikazuju apsorpciju rendgenskih zraka
- ekstenzija klasične tomografije (rezanjem se dobivaju tanki slojevi tkiva – preparati – koji se gledaju na mikroskopu)
- izraz CT koristi se isključivo za **rendgensku** računalnu tomografiju
- prvi CT scanner – Hounsfield 1972. godine
- CT uređaj mjeri **prigušenje rendgenskih zraka** uzduž velikog broja linija
- mjeri se prigušenje za veliki broj kutova i udaljenosti od centra
- na temelju mjerenja prigušenja rekonstruira se slika presjeka

**Geometrija snimanja (slike predavanje 11. slajd 6)**

- a) geometrija s paralelnim zrakama
- b) fan-beam geometrija – točkasti izvor zračenja
- c) mjerenja iz drugog kuta

**Hounsfieldova jedinica**

- moderni CT skeneri daju slike u kojim se vrijednosti piksela izražavaju pomoću Hounsfieldovih jedinica (HU) definiranih kao:

$$CTnumber (in HU) = \frac{\mu - \mu_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} * 1000$$

- gdje je  $\mu$  linearni apsorpcijski koeficijent koji zauzima vrijednosti:

zrak	-1000 HU
voda	0 HU
kosti i druga tkiva	100-1000 HU

**Detektori u CT uređajima**

- sastoje se od scintilacijskog kristala i fotodiode
- scintilacijski kristal pretvara foton rendgenskog zračenja u vidljivo svjetlo
- fotodioda detektira vidljivo svjetlo i pretvara ga u električni naboj
- sustav za akviziciju podataka integrira struju iz fotodiode i konvertira ju u naponski signal te nakon A/D konverzije dobivamo numerički podatak

**Rekonstrukcija slike iz projekcija**

- pretpostavimo geometriju s paralelnim zrakama (pod a) gdje  $\mu(x,y)$  predstavlja koeficijent gušenja na poziciji  $(x,y)$  i da je  $\mu(x,y) = 0$  izvan područja dijametra FOV (field of view)
- jednačbe: str.10-13
- projekciju je dovoljno mjeriti samo za raspon kuta  $\Theta$  od 0 do  $\pi$

**Sinogram**

- mjerenje projekcija pod raznim kutevima i na raznim pozicijama zrake  $r$  i daje 2D skup mjerenja  $p(r, \Theta)$



- problem rekonstrukcije slike je iz izmjerenog sinograma  $p(r, \Theta)$  izračunati  $\mu(x,y)$
- to je inverzni problem

#### Diskretizacija prostora

- u praksi je moguće izmjeriti samo za konačni broj projekcija
- diskretni sinogram  $p(n\Delta r, m\Delta\Theta)$  je matrica s  $n$  stupaca i  $m$  redaka
- $\Delta r$  je razmak između uzoraka u  $r$  dimenziji
- $\Delta\Theta$  je finoća uzorkovanja u dimenziji  $\Theta$

#### Radonova transformacija

- matematička transformacija neke funkcije  $f(x,y)$  u sinogram  $p(r, \Theta)$
- za dani presjek računaju se transformacije
- slajd 16.
- inverzna Radonova transformacija – rješava se problem rekonstrukcije slike iz projekcija može se riješiti na taj način

#### Projekcijski teorem

- neka je  $F(k_x, k_y)$  2D Fourierova transformacija slike  $f(x, y)$  slajd.18

#### Rekonstrukcija slike iz projekcija – Radonova transformacija

- neke metode za rekonstrukciju slike iz projekcija su temeljene na projekcijskom teoremu:
  - a) direktna Fourierova rekonstrukcija
  - b) metoda filtriranja povratne projekcije
  - c) pristupi temeljeni na linearnoj algebri

#### Fan beam geometrija

- prve generacije CT uređaja imale su paralelnu geometriju, dok su sljedeće generacije koristile su fan-beam geometriju
- bolje opisuje realnu situaciju gdje je izvor zračenja točkasti i zrake se šire radijalno iz jedne točke

- u praksi je teže dobiti paralelni snop zraka
- parametri zrake su  $\beta$  i  $\gamma$ , veza dana na slajdu 22.

#### Rekonstrukcija slike iz projekcija – fan-beam projekcija

- a) preslagivanje projekcija (engl. rebinning)
  - preslagivanjem se za svaku fan-beam zraku identificira korespondentna zraka u paralelnoj geometriji
  - nakon što su sve zrake presložene primjeni se bilo koji algoritam za rekonstrukciju u paralelnoj geometriji

#### CT oslikavanje u 3D

##### a) cirkularni CT

- najjednostavniji način je oslikavanjem više 2D presjeka
- za svaku sljedeću 2D sliku stol na kojem leži pacijent pomiče se za neku udaljenost – to se zove aksijalno skeniranje
- razmak između slojeva ovisi o dijagnostičkim potrebama i potrebi minimizacije radijacije
- kad su sve 2D slike prikupljene kombiniranjem 2D slika dobivamo jedan 3D volumen

##### b) spiralni CT

- engl. helical CT
- tehnika u kojoj se rendgenska cijev kontinuirano rotira oko pacijenta, a stol na kojem pacijent leži se pomiče jednolikom brzinom
- kvocijent aksijalnog pomaka stola za vrijeme jednog okreta izvora zračenja oko pacijenta i debljine sloja detektora zove se engl. pitch
- prednosti:
  - 1) stol ne treba naizmjenice pokretati i zaustavljati te svaki put čekati da se tijelo pacijenta umiri
  - 2) povećava se brzina snimanja (važno kad pacijenti ne mogu dugo ostati mirni ili zadržati dah)
  - 3) smanjuje se vjerojatnost pojave artefakata uslijed pomicanja pacijenta (ili organa)

c) multi-slice CT

- u modernim CT uređajima detektori su organizirani u više redova (ne samo u jednom)
- na taj način moguće je odjednom mjeriti zračenje u više slojeva
- moguća je još veća brzina pomaka stola na kojem leži pacijent

d) volumetrijski CT

- veći broj redova detektora omogućuje da se u jednom kruženju izvora zračenja snimi cijeli organ
- cone-beam geometrija
- tada se koriste 3D metode rekonstrukcije

Tipovi CT uređaja

a) CT uređaji opće namjene

- FOV: 0,5 m
- 3 rotacije u sekundi

b) multi-slice CT

- 320 redova detektora
- debljina reda: 0,5 mm

c) namjenski CT uređaji

- intervencijski, za glavu, za dojku

Kliničke primjene

- glava i vrat, pluća, urogenitalni trak, abdomen, mišićno-skeletni sustav

Biološki efekti i sigurnost

- radijacijska doza je veća nego kod radiografije jer se snima više projekcija
- kompromis između radijacijske doze i dijagnostičke kvalitete

## 12. Magnetska rezonancija

- princip poznat od 1940., praktična primjena tek od 1973.
- Lauterbur i Mansfield – Nobelova nagrada za medicinu 2003.

### *Fizikalni princip*

- detektiraju se **atomi vodika** (a 2/3 ljudskog tijela sastoji se od vode)
- atom vodika ima jedan proton koji se vrti oko svoje osi i ponaša kao mali **magnet**
- određenim nizom pobuda magnetskim poljem može se **mjeriti magnetsko polje** koje protoni generiraju u svakoj prostornoj koordinati

### *MRI oslikavanja*

- moguće je mjeriti prisutnost atoma vodika u svakom vokselu mjerenog volumena
- prednost : **nije invazivan**
- razne **dijagnostičke** primjene

### *Različite vrste slika:*

- a) **T1 slika** (T1 weighted) – bolje pokazuje **anatomiju**
- b) **T2 slika** (T2 weighted) – bolje pokazuje razne **patologije**
- c) **gustoća protona** (proton density) – koristi se kad T1 i T2 daju slične slike
- moguće raditi **fuziju** više slika u jednu radi bolje vizualizacije sadržaja u slikama

### *MR sekvencije*

- spin-echo
- gradient-echo
- 3D oslikavanje (dio volumena je selektiran a ne jedan tanak sloj)
- sekvencije za brza snimanja

### *Funkcionalna MRI snimanja*

- **koncentracija kisika u tkivu** mijenja izmjereni signal
- **BOLD** efekt (blood oxygenation level dependent)
- kad se neuroni u mozgu aktiviraju povećava se protok krvi i to se vidi na MRI slici
- pacijent leži u MRI uređaju i slika se snimi prije određene aktivnosti i nakon aktivnosti
- nakon oduzimanja slika možemo vidjeti **koji dio mozga** se aktivirao

### *Vrste MRI uređaja*

- a) **zatvoreni** MRI uređaj za dijagnostičku primjenu

- b) **otvoreni** MRI uređaj za intraoperativnu primjenu
- manji osjećaj klaustrofobije
  - omogućuje operacije gdje se koristi navođenje pomoću MRI
  - npr. navođenje igle za biopsiju, katetera za administraciju antibiotika ili sonde za termoterapiju

#### ***Problemi intraoperativne primjene***

- moraju se koristiti **MRI kompatibilni materijali** (feromagnetski materijali su opasni jer ih privlači magnetsko polje uređaja i jer proizvode artefakte u slikama)
- svi elektronički uređaji koji proizvode EM zračenje moraju biti **oklopljeni** da ne smetaju MR uređaju koji detektira slaba magnetska polja
- mora se koristiti **tehnologija optičkih vlakana** umjesto običnih kablova

#### ***Konstrukcija MRI uređaja***

- MRI moraju precizno generirati složena magnetska polja **velike indukcije** (do 10 T)
- takva jaka polja zahtijevaju **supravodljive magnete** – skuplja konstrukcija uređaja
- uređaj mora biti u prostoriji koja je magnetski oklopljena da ne bi smetala vanjska polja

#### ***Ograničenja u uporabi***

- može se provoditi samo na pacijentima koji nemaju nikakvih metalnih proteza, metalnih stranih tijela ili uređaja ugrađenih u tijelu
- jaka magnetska polja mogu pomaknuti metalni predmet u tijelu – ozljede

## **13. Nuklearna medicina**

- u pacijenta se unosi **radiofarmaceutik** koji sudjeluje u nekom metaboličkom procesu te emitira gama zrake
- uređajima za oslikavanje se mjeri emisija zračenja iz tijela pacijenta i tako se dobiva informacija o odabranom metaboličkom procesu
- kasne 1950-e: Hal Anger uvodi prvu gama kameru
- ta kamera koristi 2D detektor gama zračenja za generiranje 2D slike
- **scintigrafija** – snimanje gama kamerom

#### ***Emisijska tomografija***

- Angerova kamera može se koristiti za tomografiju
- sličan princip kao kod CT-a
- iz projekcija može se računati prostorna distribucija radiofarmaceutika
- **SPECT** (engl. single photon emission computed tomography)
- zračenje dolazi iz **tijela pacijenta**, a ne izvana kao kod CT-a
- Anger: korištenjem dvije scintilacijske kamere može se detektirati par fotona koji nastaju raspadom određenih radionuklida i istovremeno kreću u različitim smjerovima – **PET** snimanje (pozitronska emisijska tomografija)
- u kliničkoj uporabi od 90-ih godina

## **Radionuklidi**

- **nuklid**: atom sa karakterističnim brojem protona i neutrona te definiranim nuklearnim stanjem
- **radionuklidi**: nuklidi kod kojih postoji višak mase ili energije pa stabilnost postižu radioaktivnim raspadom
  - a) beta raspad (beta minus i beta plus)
  - b) gama zračenje – metastabilno (izomerno) stanje
  - c) elektronski zahvat
  - d) alfa raspad
- radionuklidi se u nuklearnoj medicini koriste za :
  - 1) **dijagnostiku** (oslikavanje) kao označivači – tehnecij, jod, talij
  - 2) **terapiju** (zračenje) kao ozračivači
- u dijagnostici se koriste za označavanje spojeva (farmaceutika) koji sudjeluju u određenom metaboličkom procesu
- **radiofarmaceutik**: spoj radionuklida i farmaceutika

## ***Detekcija gama zračenja***

- kod CT-a (transmisijska tomografija) veliki broj fotona se detektira u kratkom vremenskom intervalu
- u emisijskoj tomografiji: mali broj fotona se detektira u duljem vremenskom intervalu

## ***Detektori gama zraka***

- detektor se sastoji od fotomultiplikacijske cijevi spojene na scintilacijski kristal
- **proces foto-električke apsorpcije**: scintilacijski kristal apsorbira foton gama zraka
- elektron koji je nastao putuje kroz kristal i svoju kinetičku energiju distribuira tisućama drugih elektrona koji emitiraju fotone
- emitirani fotoni su vidljivo svjetlo koje se pojačava pomoću fotomultiplikacijske cijevi

### ***Kolimatori gama zraka***

- u radiografiji se točno zna iz kojeg smjera je došlo detektirano zračenje (poznata projekcijska linija)
- u emisijskoj tomografiji potrebna je **kalimacija** jer je nepoznata prostorna distribucija izvora zračenja (izvor je pacijent)
- kod gama kamere i SPECT snimanja kaliminator je: debela olovna ploča s izbušenim rupama
- samo zrake okomite na ploču mogu proći
- problem: puno zraka (koje dolaze pod kutem) su apsorbirane te se tako smanjuje osjetljivost detekcije
- kod PET snimanja kaliminator nije potreban – istovremeno se detektira par fotona koji određuju projekcijsku liniju – stoga PET ima veću osjetljivost

### **Uređaji**

#### **1) gama kamera**

#### **2) SPECT**

- koristi mehanički koliminator koji definira projekcijsku zraku koja odgovara pojedinom detektoru

#### **3) PET**

- projekcijska zraka je određena sklopom za detekciju koincidentnih udara fotona

### ***Rekonstrukcija slike iz projekcija***

- rezultat akvizicije podataka: izmjerene projekcije uzduž poznatih projekcijskih linija

- metodama rekonstrukcije slike se iz projekcija dobiva slika presjeka objekta ili slika određenog volumena

### Broj detektiranih fotona - SPECT

- broj detektiranih fotona na mjestu d uzduž linije s dan je izrazom:

$$N(d) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda(s) \cdot e^{-\int_s^d \mu(\xi) d\xi} \cdot ds$$

- gdje je:  
 $\mu$ : koeficijent linearne apsorpcije  
 $\lambda$ : prostorna distribucija radionuklida uzduž projekcijske linije
- problem: nepoznati su  $\lambda$  i  $\mu$  - složeni problem rekonstrukcije

### Broj detektiranih fotona – PET

- broj detektiranih fotona na pozicijama d1 i d2 uzduž linije s:

$$N(d_1, d_2) = e^{-\int_{d_1}^{d_2} \mu(s) ds} \int_{-\infty}^{\infty} \lambda(s) ds$$

- gdje je:  
 $\mu$ : koeficijent linearne apsorpcije  
 $\lambda$ : prostorna distribucija radionuklida uzduž projekcijske linije
- koeficijent linearne apsorpcije  $\mu$  (atenuacija) jednak je za svaku točku uzduž projekcijske linije – jednostavnija rekonstrukcija

### Metode rekonstrukcije

- Fourierova rekonstrukcija
  - Metoda filtrirane povratne projekcije
  - Iterativne metode (Bayesova, MAP, ML)
  - 3D rekonstrukcija (cone beam)
- **kontrast slike** je određen karakteristikama radionuklida i ograničen raspršenjem fotona



- **kvaliteta slike (rezolucija)** – mjeri se širinom impulsnog odziva na polovici od maksimalne vrijenosti (full width at half maximum)
  - 1) za PET: 4-8 mm
  - 2) za SPECT: 10-15 mm

### ***Uređaji***

- danas praktički nema razlike između gama kamere i SPECT uređaja
  - svaki SPECT uređaj može funkcionirati kao gama kamera ako se gleda iz samo jednog kuta
  - rotacijom gama kamere i snimanjem iz više kutova moguće je napraviti SPECT rekonstrukciju slike
- a) PET
- ima jedan prsten kristalnih detektora promjera oko 1 m
  - nije potrebna rotacija detektora – **detektor je fiksni**
  - postoji samo pomični stol na kojem leži pacijent
  - detektori su kristali dimenzija 4mm \* 4mm organizirani u 2D polje i spojeni na fotomultiplikacijsku cijev
  - može imati više takvih prstenova čime se povećava širina pogleda (field of view)
  - tri prstena od 13 x 4 mm svaki daju širinu pogleda od 16 cm

### ***Hibridni uređaji***

- a) SPECT-CT
  - b) SPECT-MR
  - c) PET-CT
  - d) PET-MR
- prednost – nije potrebna naknadna registracija slika

### ***Klinička upotreba***

- za SPECT kao radionuklid se najčešće koristi tehnecij (vrijeme poluraspada: 6h)

- za PET se koriste radionuklidi koji imaju vrijeme poluraspada od 2-20 min (zbog tog kratkog vremena poluraspada takvi radionuklidi moraju se proizvoditi u ciklotronu u blizini bolnice)

### ***Kliničke primjene***

- metabolizam kostiju
- miokardijalna perfuzija
- plućna embolija
- detekcija tumora
- snimanje funkcije štitne žlijezde
- neurološke bolesti – demencija

### ***FDG-PET studija***

- FDG je molekula fluoro-deoksi-glukoze koja je odlična za **praćenje potrošnje glukoze** u tkivu
- otkriva tumore koji imaju **veću metaboličku aktivnost** (veću potrošnju glukoze)

### ***Scintigrafija***

- pri pogledu na pacijenta koji ima frakturu, vidi se veća metabolička aktivnost u području frakture

### ***SPECT slika mozga***

- snimanjem dopaminskih receptora (DAT, D2) u mozgu mogu se detektirati promjene nastale uslijed Parkinsonove bolesti

## **14. Ultrazvuk**

- prvi put klinički primijenjen u Austriji 1942.
- prvi uređaj koji je mogao prikazivati sliku u stvarnom vremenu → izradio Siemens 1965.

- široka raspoloživost od sredine 1970-ih

PREDNOSTI	MANE
neinvazivno	šum
nije skupo (kao CT i MR)	mala prostorna rezolucija
mogućnost prijenosa	
visoka vremenska rezolucija	

### ***ULTRAZVUČNI VALOVI***

- longitudinalni kompresijski valovi
- frekvencije korištene u medicini > **2.5 MHz**
- generiraju se i detektiraju pomoću **piezoelektričnih kristala**

### ***Piezoelektrični kristali***

- deformiraju se pod utjecajem električnog polja i generiraju električno polje uslijed mehaničke deformacije
- kad se na takav kristal primijeni izmjenični napon generira se **mehanički val** iste frekvencije
- takav kristal zove se **PRETVARAČ (engl. transducer)**

### ***LINEARNA VALNA JEDNADŽBA***

$$\nabla^2 \cdot p - \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

gdje je:

p – akustički pritisak

c – brzina širenja vala u mediju

Brzina zvuka u:

<b>mekanom tkivu:</b>	c=1540 m/s
<b>kosti:</b>	c=4000 m/s
<b>zraku:</b>	c=300 m/s

### ***Propagacija u homogenom mediju***

$$H(f, z) = e^{-\alpha_0 \cdot f^n \cdot z}$$

gdje je:

H – atenuacija vala

$\alpha$  – koeficijent prigušenja

f – frekvencija

z – dubina u tkivu

- **nelinearnost:** linearna valna jednadžba vrijedi samo za male amplitude zvučnog vala
- **difrakcija:** pojava složenih uzoraka valova u blizini izvora zvuka

### ***PROPAGACIJA U NEHOMOGENOM MEDIJU***

#### a) REFLEKSIJA

- Snellov zakon – refleksija i transmisija vala

$$\frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_t}{c_2} = \frac{\sin \theta_r}{c_1}$$

Gdje je:

theta\_i – ulazni kut

theta\_r – kut refleksije

theta\_t – kut transmisije

c1 i c2 – brzine zvuka u dva medija

- do refleksija dolazi na granici dvaju različitih tipova tkiva

#### b) RASPRŠENJE

- do raspršenja dolazi zbog refleksija uslijed nehomogenosti tkiva (ne samo na granici između organa)

---

**točkasta nehomogenost**

---

točkasto raspršenje – generira val koji se iz točke širi u svim smjerovima

---

---

veće nehomogene regije

skup točkastih raspršenja čiji se efekti zbrajaju

---

## ***Akvizicija podataka***

### *1) A-mod*

- odmah nakon emitiranja impulsa zvuka, pretvarač se koristi kao prijemnik za detekciju reflektiranog signala
- ako se objekt ne miče sva su mjerenja ista
- ako se miče svako je drugačije

### *2) M-mod*

- dolazi od engl. motion
- visoka frekvencija mjerenja – 1000 u sekundi
- linije odgovaraju ponovljenim mjerenjima

### *3) B-mod*

- dolazi od engl. brightness
- slika se dobiva translacijom ili rotacijom pretvarača
- za svaki položaj pretvarača snima se jedna linija

## ***Rekonstrukcija slike***

Koraci:

*a) filtriranje reflektiranog signala (uklanjanje šuma)*

*b) detekcija ovojnice reflektiranog signala*

- služi za eliminaciju brzih fluktuacija amplitude RF signala, koje nisu bitne za vizualizaciju

*c) korekcija prigušenja*

*d) kompresija dinamičkog opsega vrijednosti*

- na vrijednosti signala primjenjuje se log kompresija koja izdiže male vrijednosti signala relativno u odnosu na veće vrijednosti
- tako se postiže poboljšanje slike jer je moguće vidjeti veći dinamički opseg signala

*e) konverzija skeniranih linija****Trajanje akvizicije i rekonstrukcije***

- u medicinskim primjenama svaka linija na slici odgovara dubini od oko 20 cm
- vrijeme akvizicije jedne linije: 0.267 ms
- za sliku s 120 linija treba 32 ms
- brzina: 30 slika u sekundi

***Doppler ultrazvuk***

<b>kontinuirani val (CW)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- u sondi se koriste dva pretvarača: jedan za generiranje UZ vala i drugi smješten u istoj sondi služi za prijem signala</li> <li>- iz razlike poslane i primljene frekvencije izračunava se brzina snimljenog objekta</li> <li>- ovaj način snimanja ne daje prostornu informaciju nego samo informaciju o brzini</li> <li>- npr. mjerenje brzine krvi kroz srčani zalistak</li> </ul>
<b>pulsni val (PW)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- emitira se niz sinusoidalnih signala (impulse) te se analizom reflektiranih signala zaključuje o frekvenciji tj. brzini objekta koji se kreće</li> </ul>
<b>kolor Doppler</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- izračunava brzinu objekta na temelju razlike u fazama primljenog signala</li> </ul>

***Ultrazvučni uređaji***

- manjih dimenzija od drugih vrsta uređaja za oslikavanje
- sastoje se od:

- **pretvarača** (koji je spojen na sustav za obradu slike)
  - ugrađenog **računala**
  - **monitora** za prikaz slike
- postoje i portabilni UZ uređaji za spajanje na laptop

### ***Pretvarač s linearnim poljem***

- sadrži 1-D niz piezoelektričnih kristala koji se **sekvencijalno okidaju**
- koristi se za situacije kad je potrebno **šire područje snimanja** (npr. vaskularna snimanja)

### ***Phased-array pretvarač***

- kristali se **istovremeno okidaju** te se tako formira željeni oblik i smjer širenja akustičkog vala
- u obradi signala to se zove **formiranje snopa** (engl. beamforming)

### ***Pretvarači za 3D snimanje***

- a) mehaničko rotiranje konvencionalnog pretvarača
- b) bolje: korištenje 2D phased array pretvarača
  - piezo kristali su organizirani u 2D polje
  - upravljanjem 2D polja pretvarača može se dobiti slika fokusirana na željeno područje
  - mana: nije moguć rad u stvarnom vremenu
  - problem kalibriranja zbog velikog broja senzora

### ***Klinička primjena – glavne pretrage:***

- glava (kod novorođenčadi)
- prsni koš
- dojka
- abdomen
- urogenitalni trakt
- fetus
- vaskularni sustav
- muskulo-skeletalni sustav
- srce

