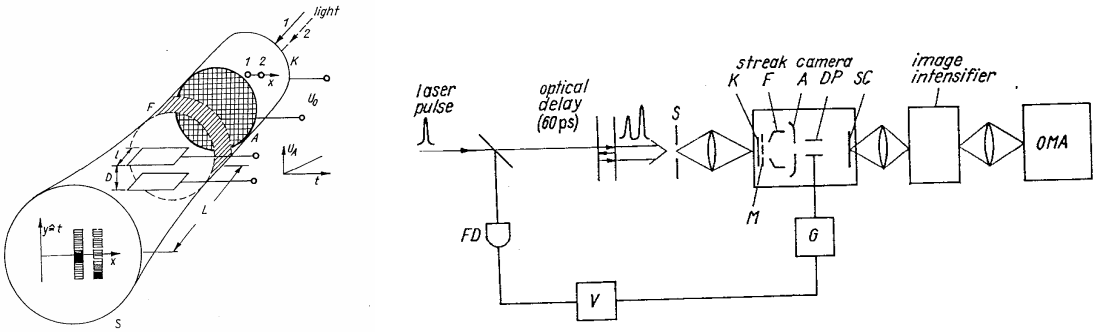
Měření optických signálů

Časové rozlišení detektorů

- Lidské oko: 150 ms [Segner, 1740]
- Mechanické závěrky (fotoaparát): <1 ms
- Mechanická streak-kamera s rotujícím zrcadlem: 1 μs [Wheatstone, 1834], teoreticky až 1 ns
- Polovodičové PIN fotodiody (vnitřní fotoelektrický jev): několik ps, v praxi ale zpravidla 100 ps
- Detektory založené na vnějším fotoelektrickém jevu
  Fotonásobiče: 50 ps
  Elektroptická streak-kamera: 1 ps



- Korelační metody založené na nelineární optice:
  - Generace druhé harmonické
  - Kerrův jev a jiné nelinearity 3. řádu
  - Dvoufotonová absorpce

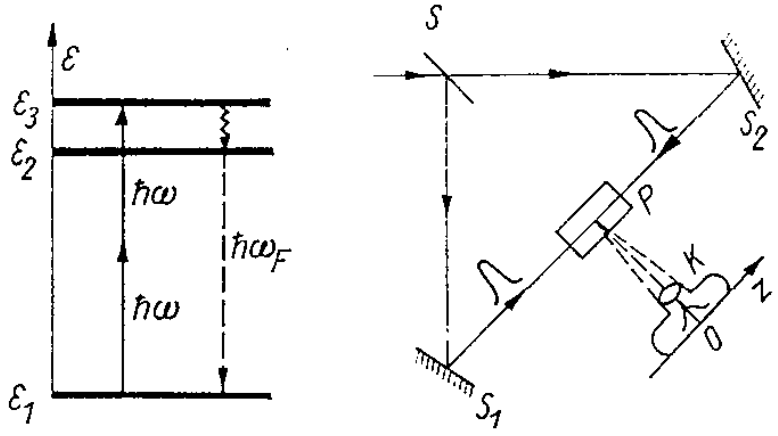
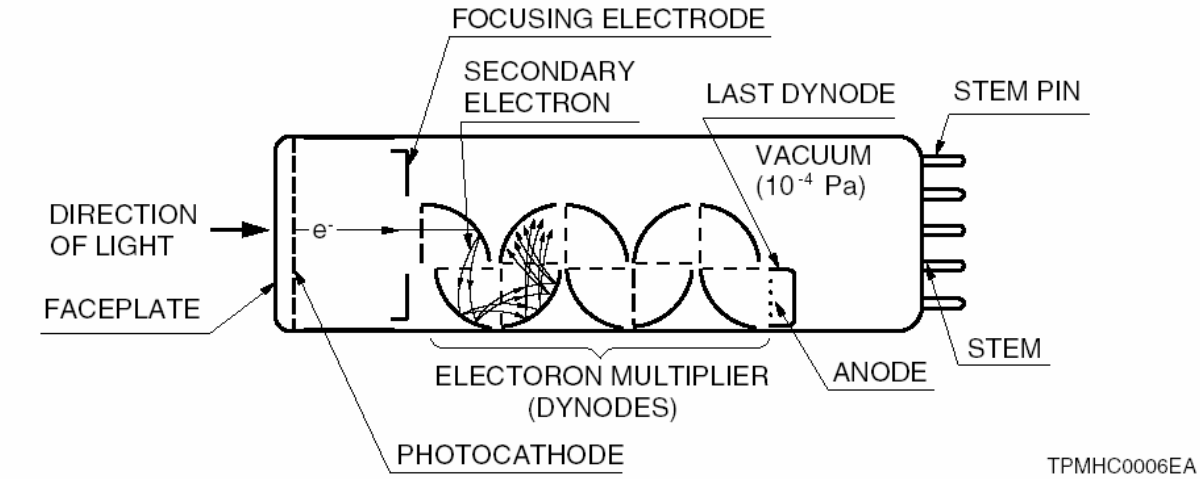


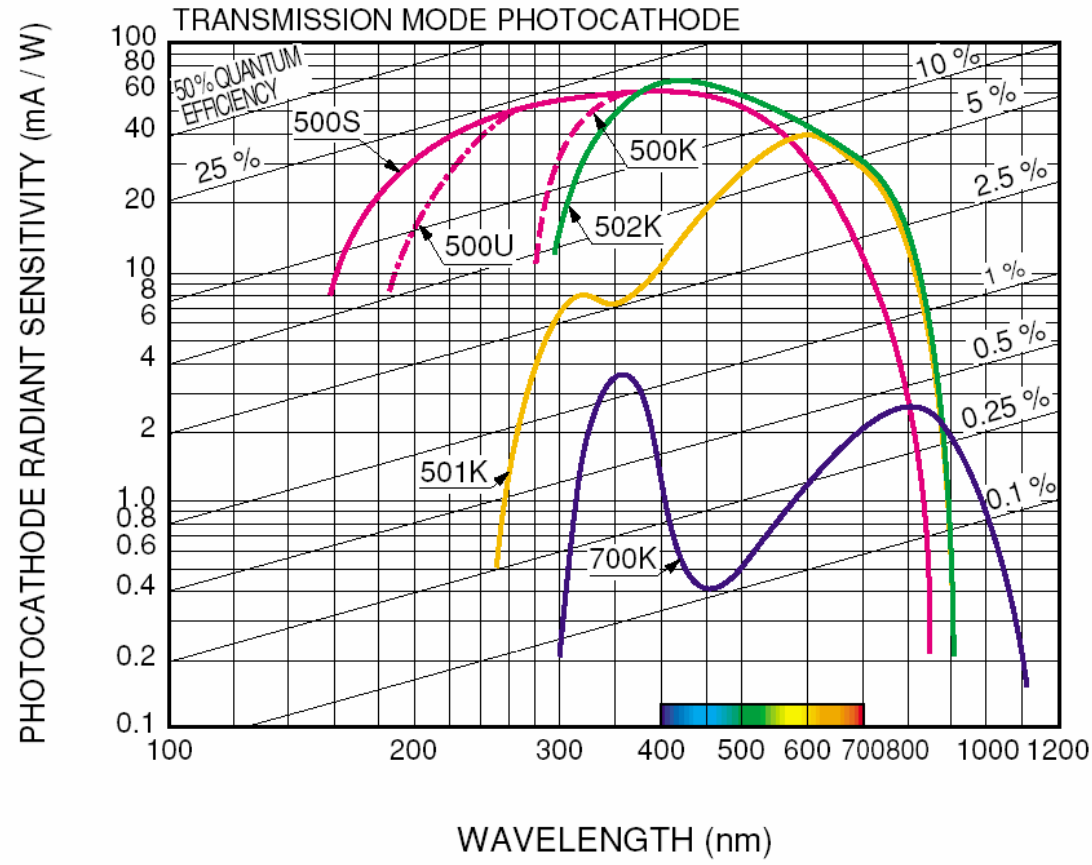
Schéma měření autokorelace založené na dvoufotonové absorpci

- detektory slabých kvantových signálů (fotonásobiče, lavinové fotodiody, iCCD)

Fotonásobiče

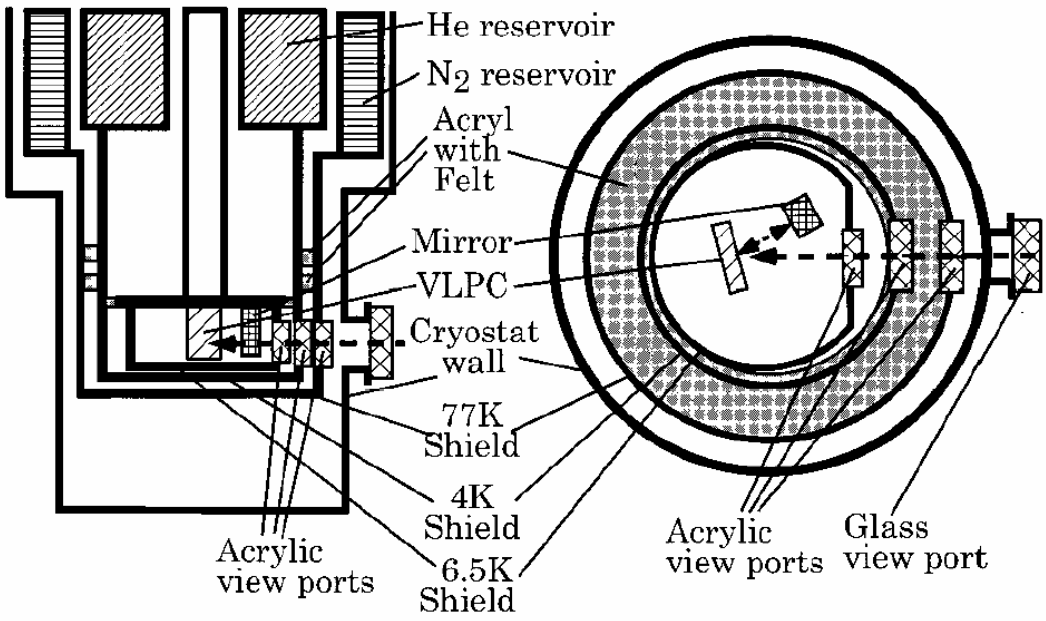
- zpravidla citlivé jen v UV a ve spodní polovině viditelné oblasti (300-700 nm)
- kvantová účinnost max. 25%
- velmi nízký šum
- fotokatoda je zpravidla tvořena slitinami alkalických kovů

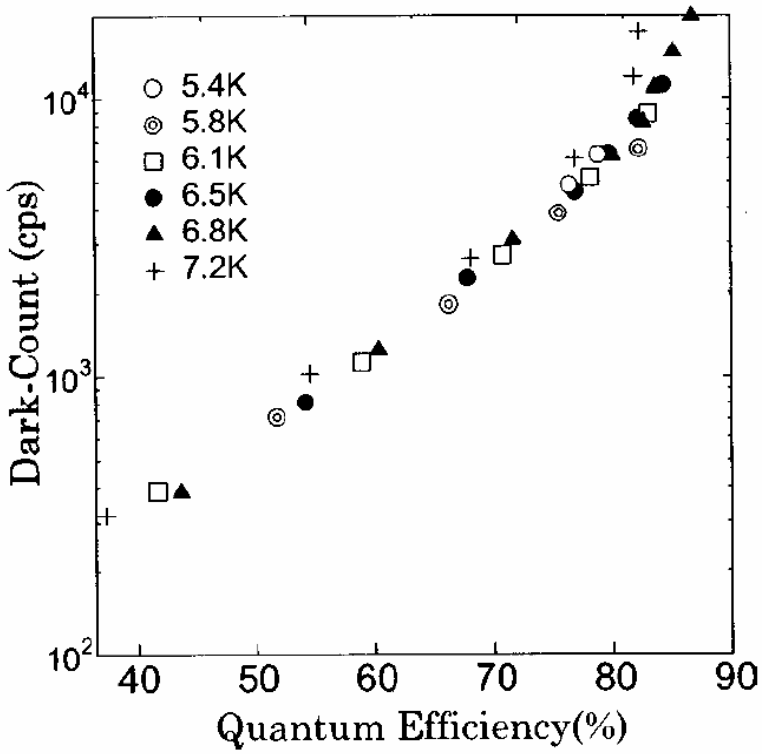




VLPC (visible light photon counter)
[Takeuchi, Kim, Yamamoto, Hogue, 1998]

- využívá lavinový efekt v pásu nečistot v křemíku
- velký šum (10^4 pulsů/s i při chlazení na 7K)
- velká kvantová účinnost (až 88%)
- *může rozlišit počty fotonů*





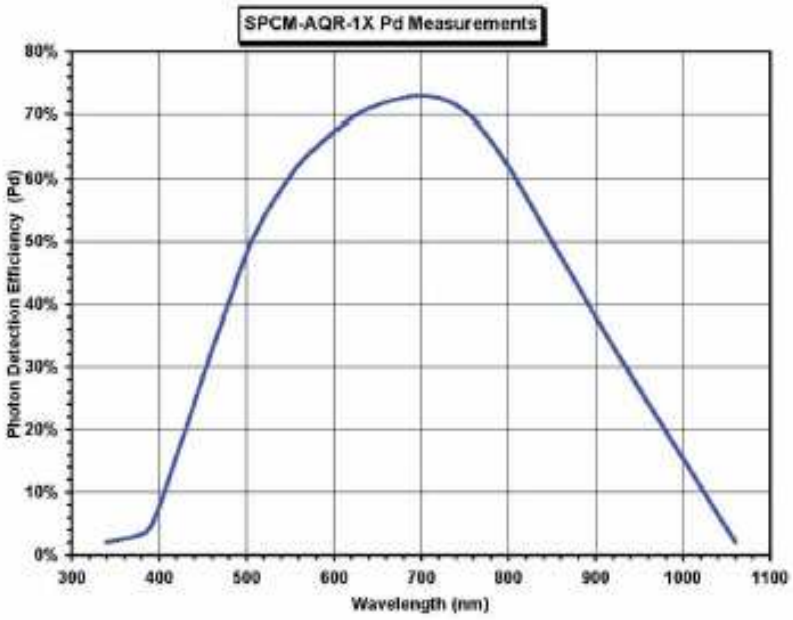
Lavinové fotodiody

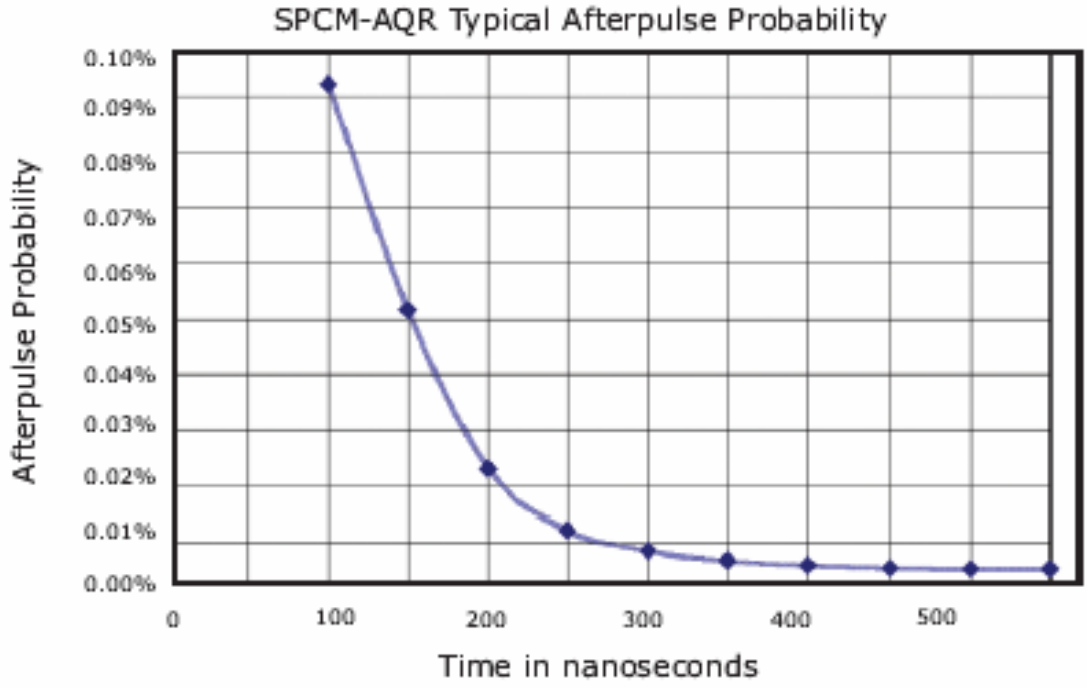
Si – 400-1100 nm,

- 10-1000 temných pulsů za sekundu
- až 76% maximální kvantová účinnost
- termoelektrické chlazení

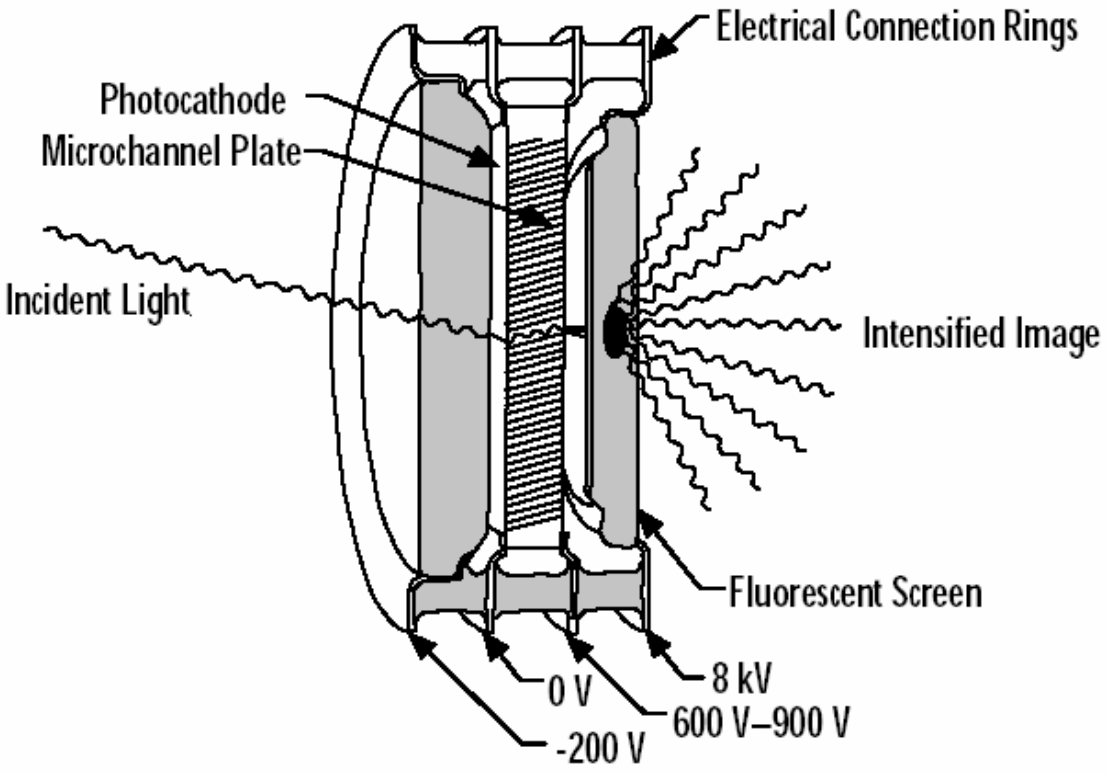
Ge, InGaAs, InGaAsP – 800-2000 nm

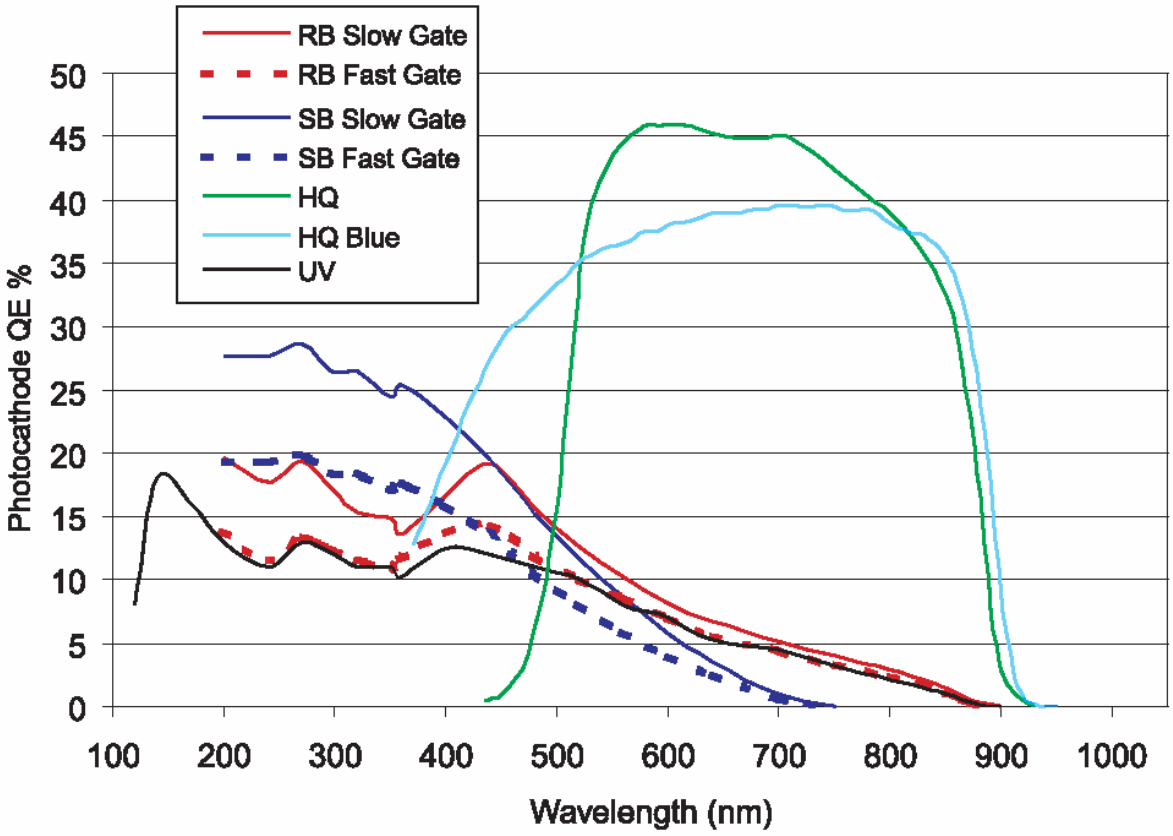
- typicky 10^4-10^6 temných pulsů za sekundu
- max. 15% kvantová účinnost
- chlazení tekutým dusíkem





Intenzifikovaná CCD kamera





Autokorelační metody (založené na generaci 2. harmonické)

pro detekci impulsů <1 ps

$$E(t) = \sqrt{I(t)}\, e^{i[\omega t + \varphi(t)]} = \int \sqrt{I(\omega)} e^{i\varphi(\omega)} e^{i\omega t} d\omega$$

Detekuje se intenzita druhé harmonické:

$$I_{SHG}(\tau) \propto \int \left| \left[E(t) + E(t-\tau) \right]^2 \right|^2 dt$$

Pokud je interferenční člen zprůměrován, dostáváme:

Intenzitní autokorelace

$$I_{SHG}(\tau) \propto 1 + 2\int I(t) I(t-\tau) dt \Big/ \int I^2(t) dt \quad \text{(kontrast 3:1)}$$

Ve vhodném geometrickém uspořádání lze eliminovat konstantní člen:

„Background-free" intenzitní autokorelace

$$I_{SHG}(\tau) \propto \int I(t) I(t-\tau) dt \Big/ \int I^2(t) dt$$

- Poskytuje kusou informaci o délce pulsu
- Neposkytuje ale téměř žádnou informaci o fázi (chirpu) a o tvaru a struktuře pulsu (a jeho případné asymetrii)
- Intenzitní spektrum $I(\omega)$ může prozradit nekonstantnost $\varphi(t)$.

Pokud se provede experiment s interferometrickým rozlišením:

Interferometrická autokorelace

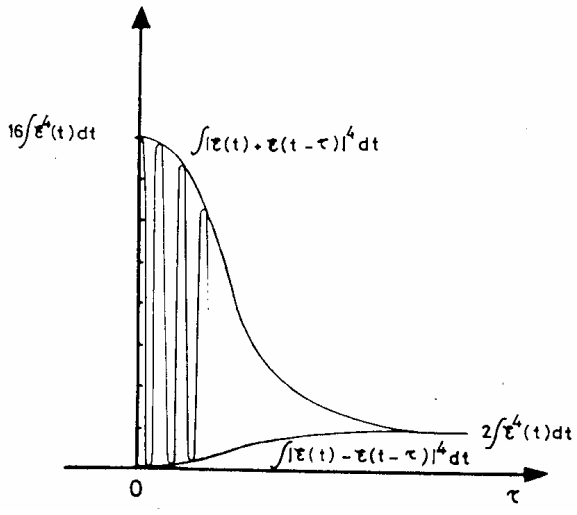
Horní obálka (konstruktivní): $\int \left| E(t) + E(t-\tau) \right|^4 dt$

Dolní obálka (destruktivní): $\int \left| E(t) - E(t-\tau) \right|^4 dt$

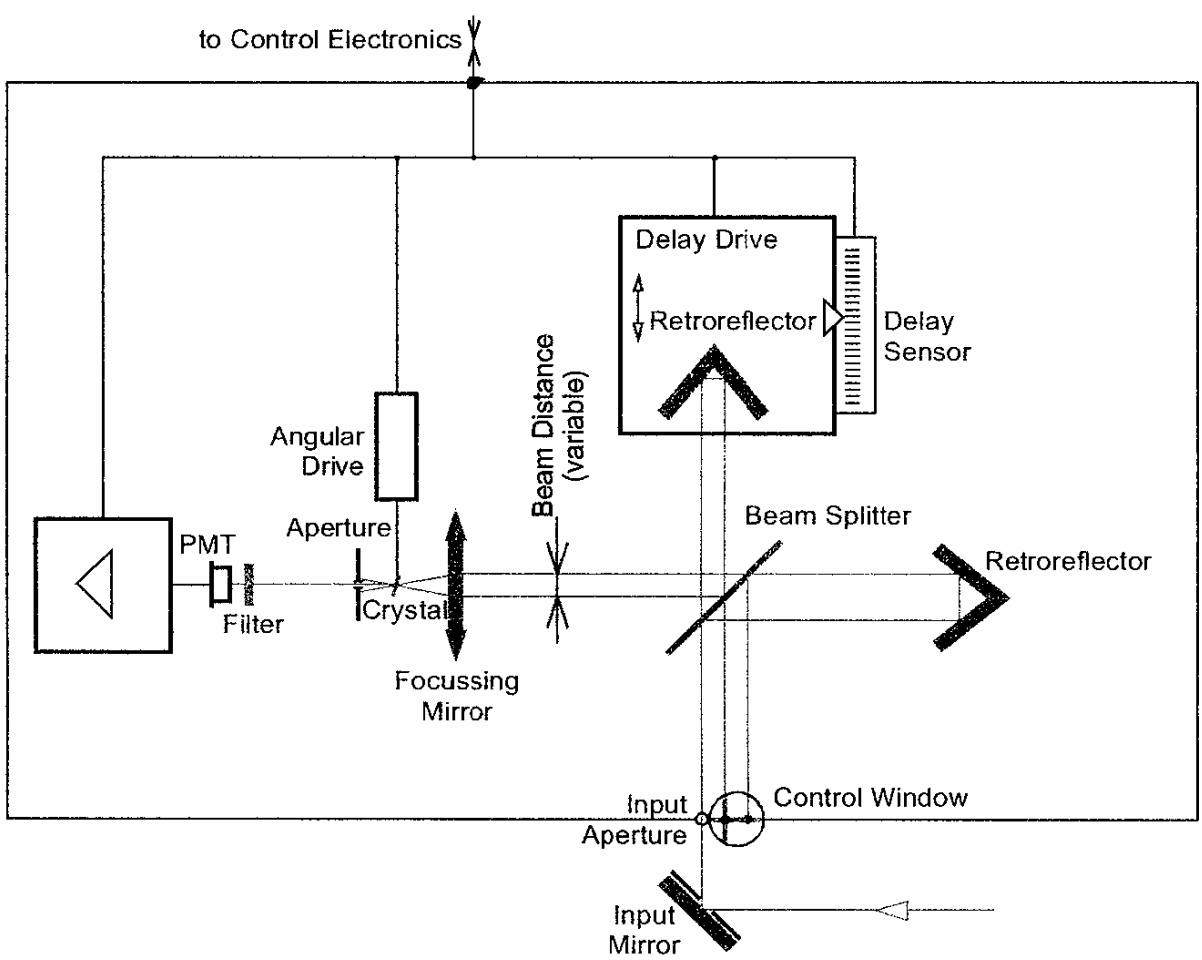
(kontrast 9:1)

- Citlivá na tvar impulsu
- Různé průběhy chirpu dávají charakteristický tvar obálek

Spolu s informací o **intenzitním spektru** $I(\omega)$ lze numericky fitovat obecné tvary impulsu a nalézt průběh amplitudy i fáze pro určité přepokládané tvary impulsů



Autokorelátor Pulsescope 15
(APE Berlin)



Autokorelátor i cross-korelátor

Měří šířky pulsů [ac]: 50 fs – 3,5 ps

Rozlišení: < 1 fs

Může měřit intenzitní (i background-free) a obálky interferometrické autokorelace.

Spektrometr s rotující mřížkou

Intenzitní spektrum 400-1500 nm

Rozlišení: 0,2 nm

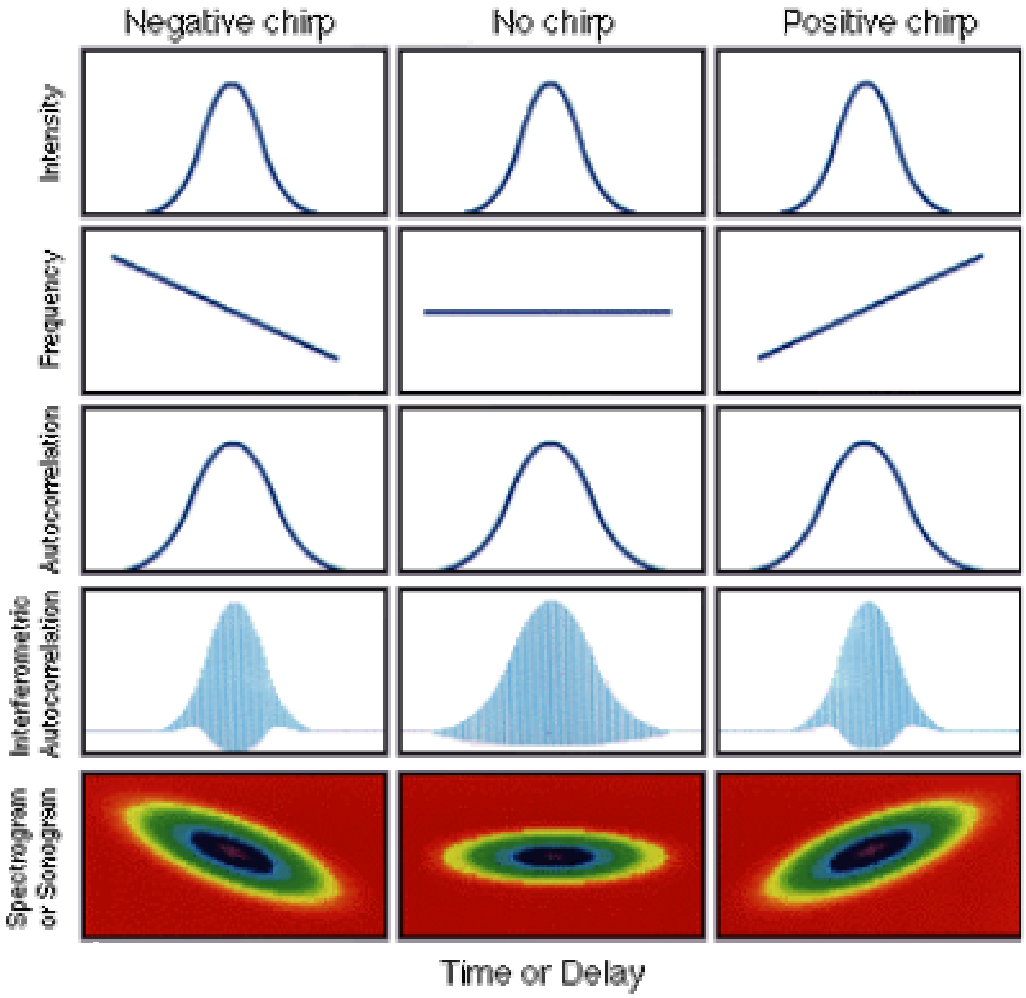
Úplná charakterizace ultrakrátkého impulsu

Oddělená měření v časové a frekvenční oblasti nemohou poskytnout informaci pro úplnou charakterizaci impulsu.

Hybridní časově-frekvenční měření:

Spektrogram: $S(\omega,t)=\left|\int_{-\infty}^{+\infty}E(t)g(t-\tau)e^{-i\omega t}dt\right|^2$ (vybíráme krátké časové úseky impulsu a měříme jejich spektrum)

Sonogram: $S(\Omega,T)=\left|\int_{-\infty}^{+\infty}E(\omega)h(\omega-\Omega)e^{-i\omega T}d\omega\right|^2$ (vybíráme úzké spektrální oblasti a měříme jejich časový průběh)

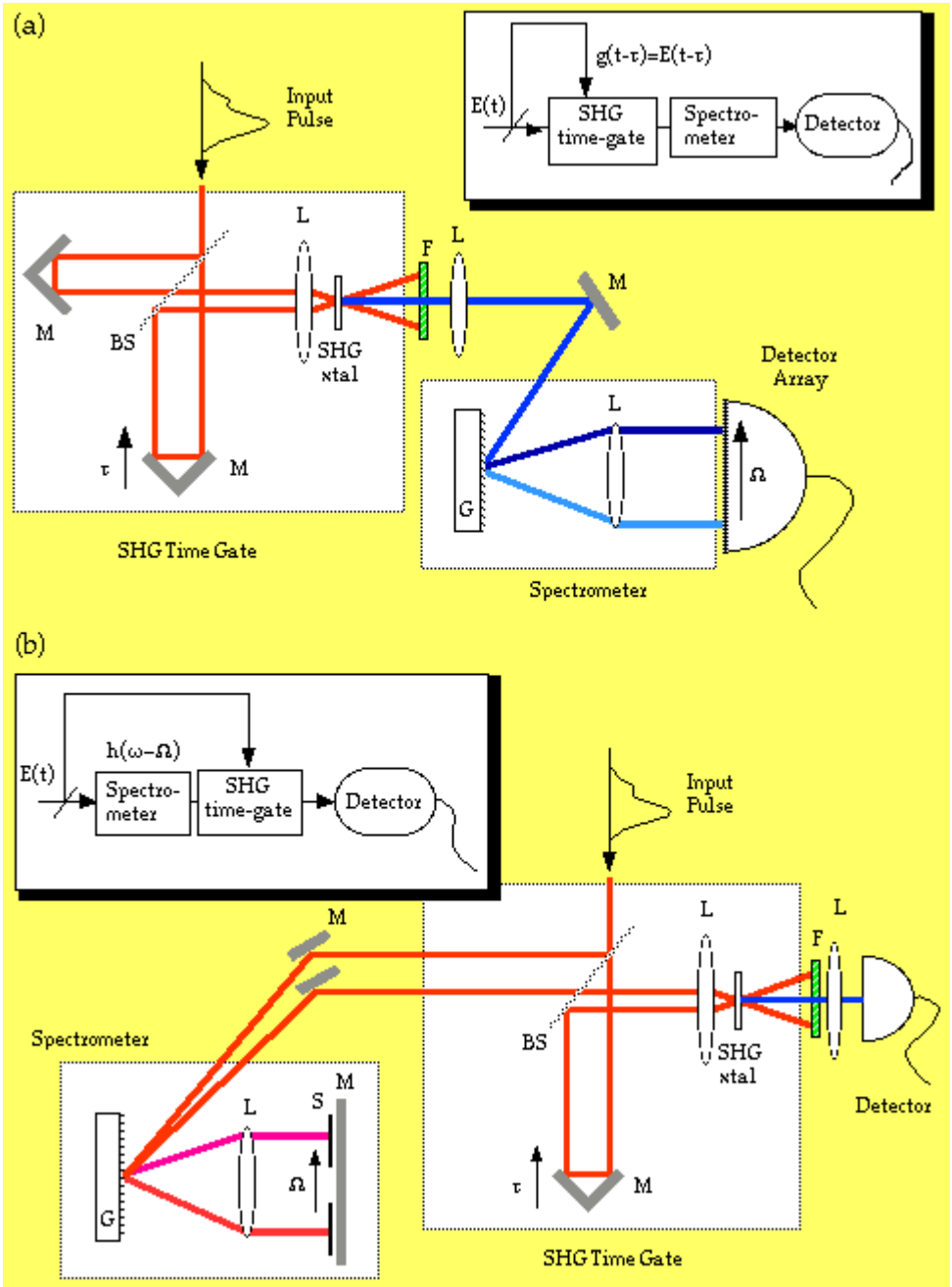


Úplná charakterizace ultrakrátkého pulsu – FROG

(frequency resolved optical gating)

Měříme spektrogram (nebo sonogram): $S(\omega,t)=\left|\int_{-\infty}^{+\infty}E(t)E(t-\tau)e^{-i\omega t}dt\right|^2$

(spektrum autokorelace pomocí druhé harmonické)

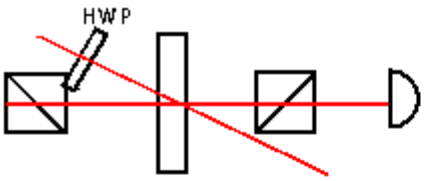


Ze spektrogramu (reálná funkce dvou proměnných) lze rekonstruovat úplnou informaci o tvaru pulsu (komplexní funkce jedné proměnné) iterativním algoritmem („*phase retrieval algorithm*“).

FROG – experimetální techniky

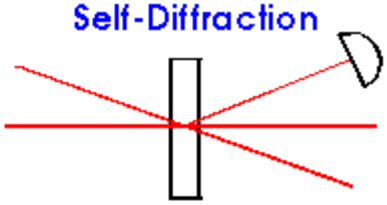
Lze použít různé nelineární jevy jako „gating“ pro metodu FROG.

Polarization Gate



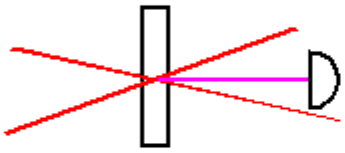
$$E_{sig}(t,\tau) = E(t)|E(t-\tau)|^2$$

Self-Diffraction



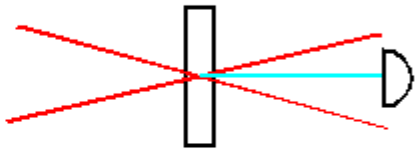
$$E_{sig}(t,\tau) = E^2(t)E^*(t-\tau)$$

Third-Harmonic Generation



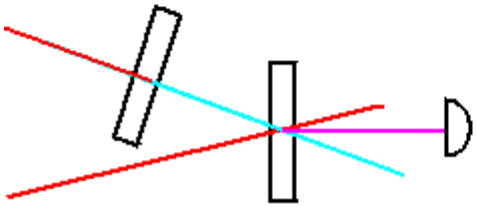
$$E_{sig}(t,\tau) = E^2(t)E(t-\tau)$$

Second-Harmonic Generation



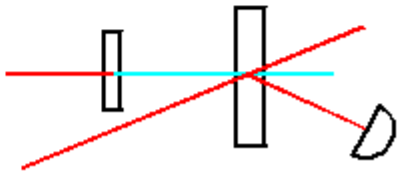
$$E_{sig}(t,\tau) = E(t)E(t-\tau)$$

Parametric Upconversion



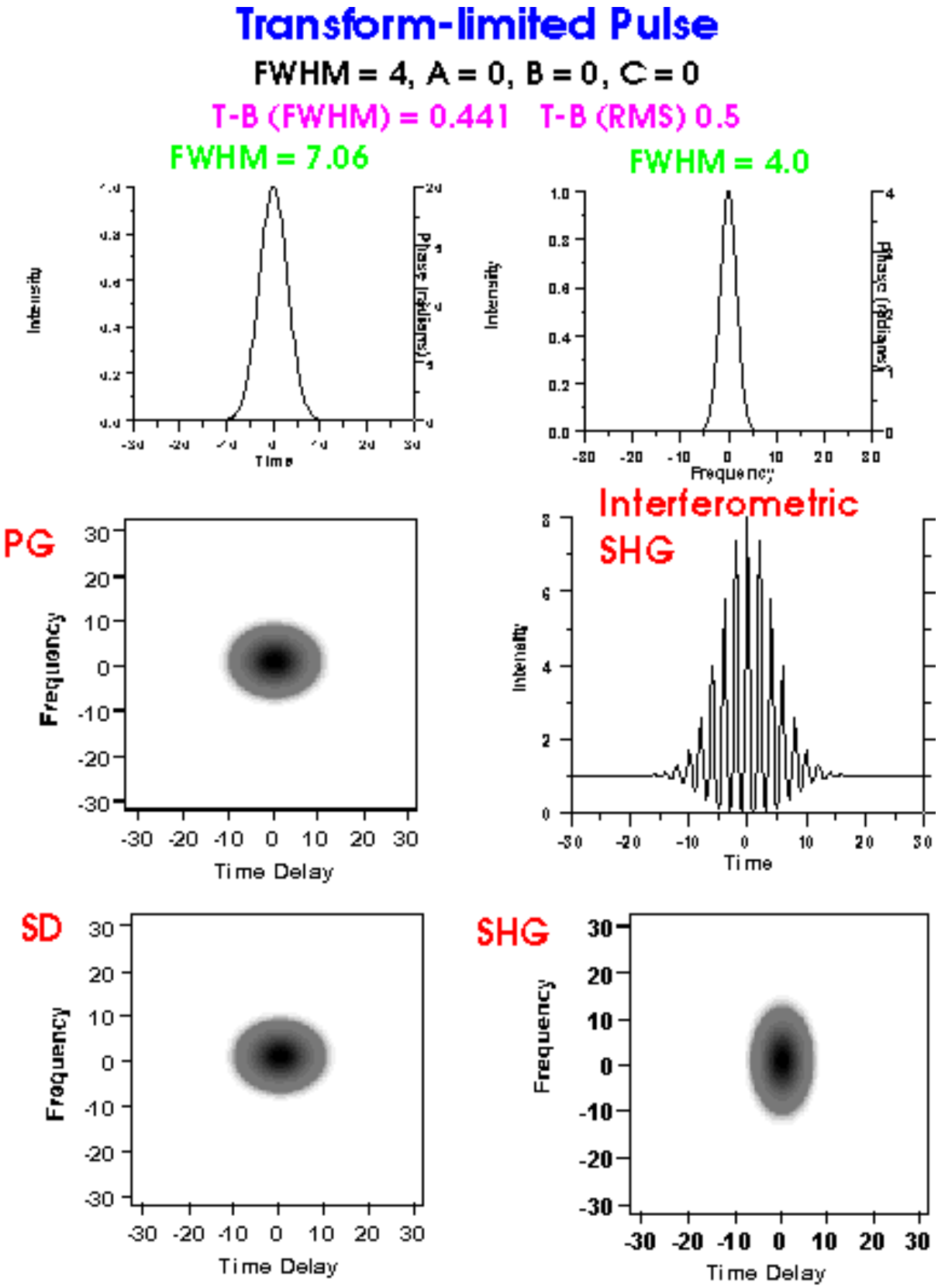
$$E_{sig}(t,\tau) = E^2(t)E(t-\tau)$$

Parametric Downconversion

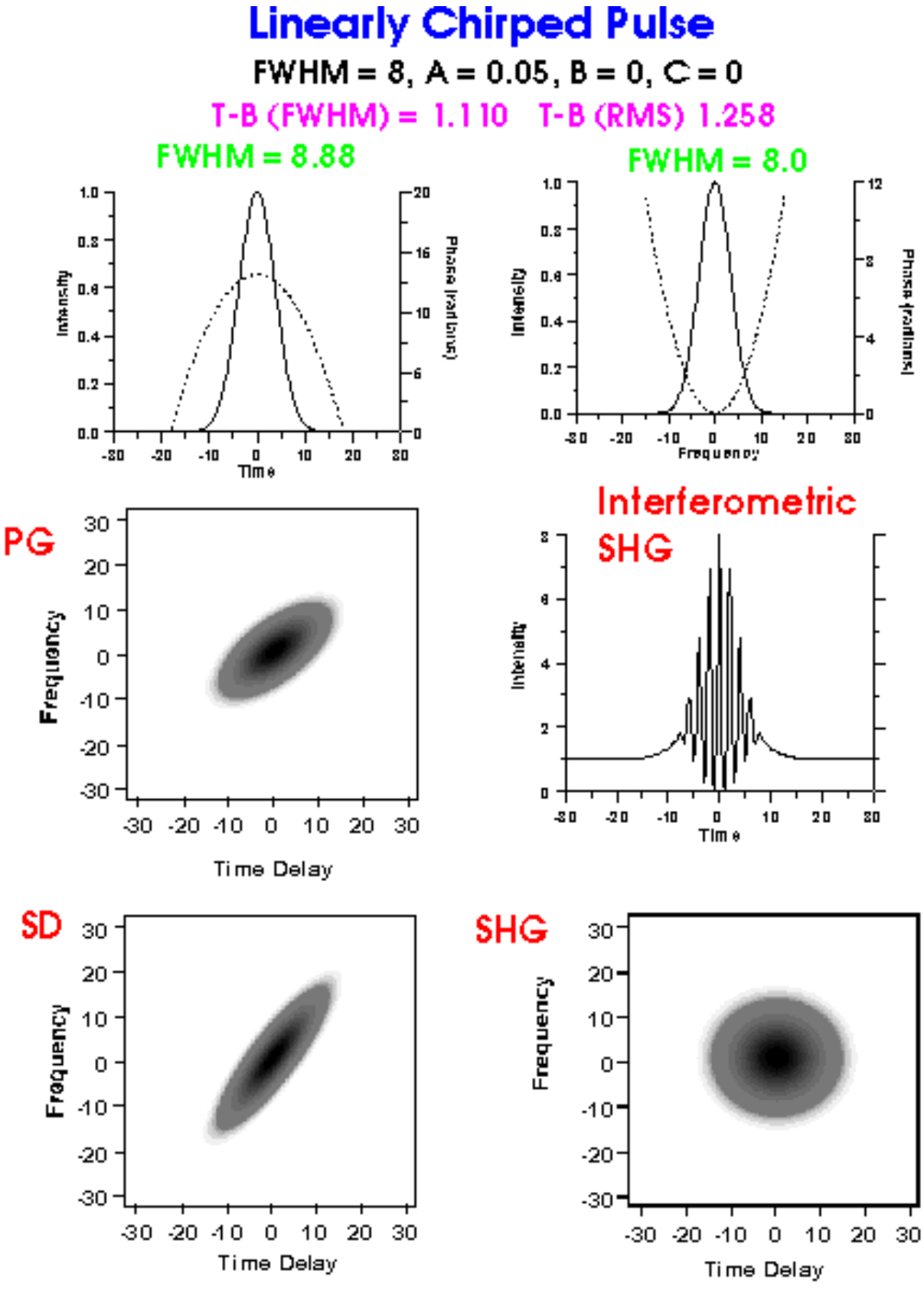


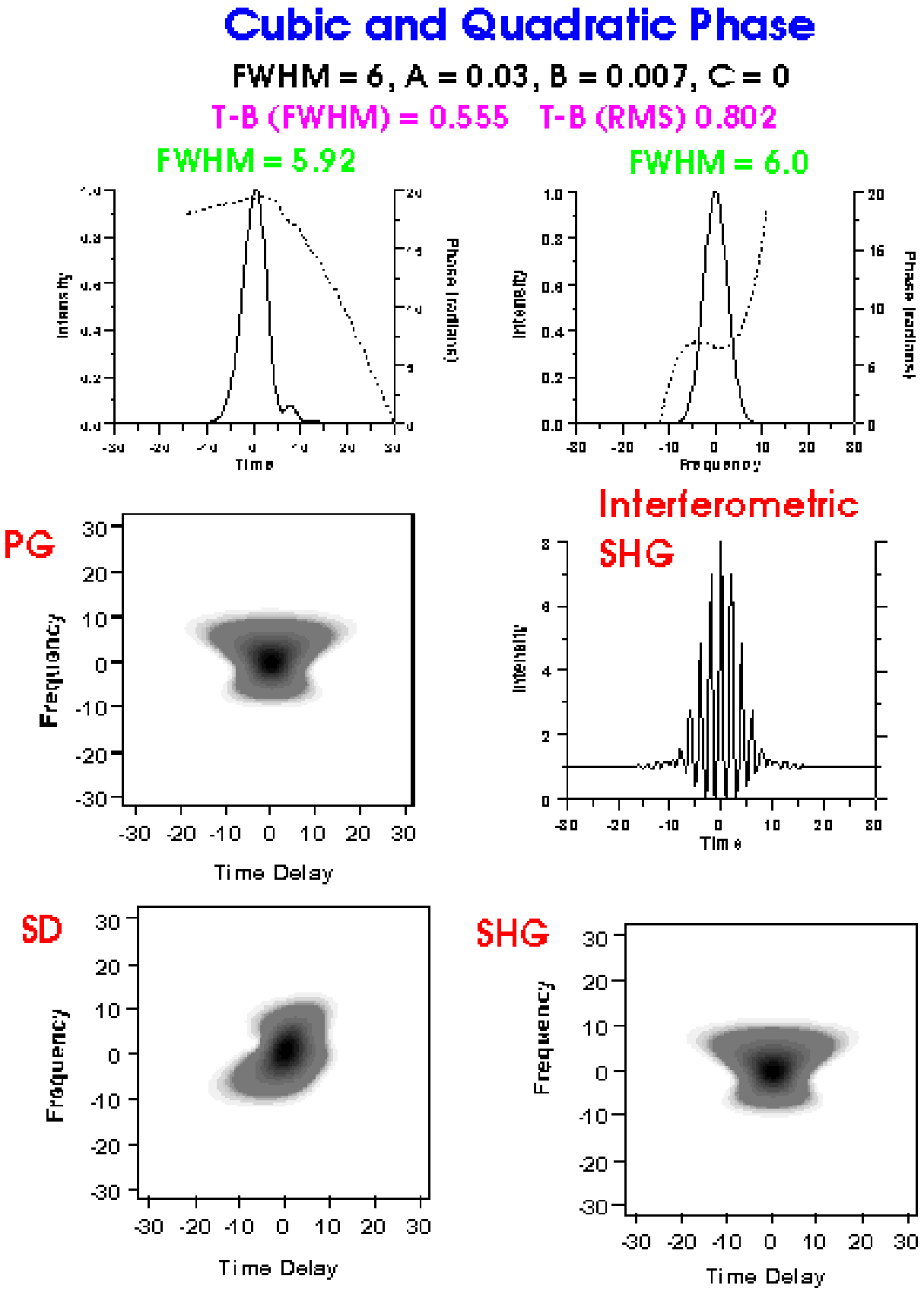
$$E_{sig}(t,\tau) = E^2(t)E^*(t-\tau)$$

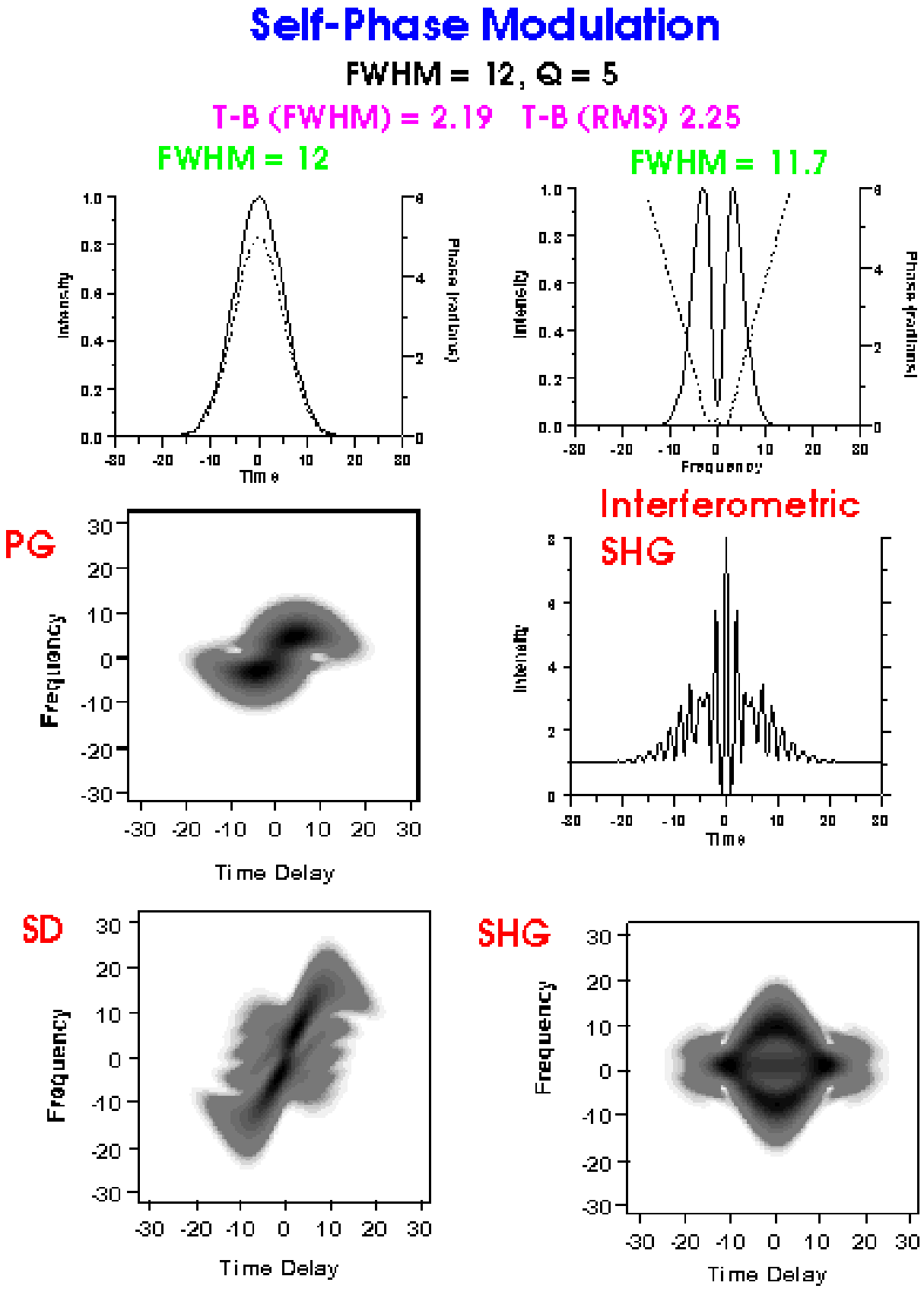
- Metody založené na nelinearitách 2. řádu (SHG,PU,PD) neposkytují informaci o asymetrii pulsu, k tomu jsou třeba liché nelinearity (3. řád: PG, SD, THG)
- Metody založené na nelinearitách 3. řádu jsou zpravidla méně efektivní, potřebují velké energie v pulsu. Nelinearity 2. řádu umožňují měřit pJ energie opakovaně a μJ pro jediný impuls.
- Nejpoužívanější jsou PG (pro silné pulsy) a SHG (pro slabé pulsy)
- PG dává nejintuitivnější výsledky a algoritmus rychle konverguje


Transform-limited Pulse
FWHM = 4, A = 0, B = 0, C = 0
T-B (FWHM) = 0.441 T-B (RMS) 0.5
FWHM = 7.06
FWHM = 4.0
Intensity
Time
Frequency
PG
Frequency
Time Delay
Interferometric
SHG
Intensity
Time
SD
Frequency
Time Delay
SHG
Frequency
Time Delay

FROG – příklady

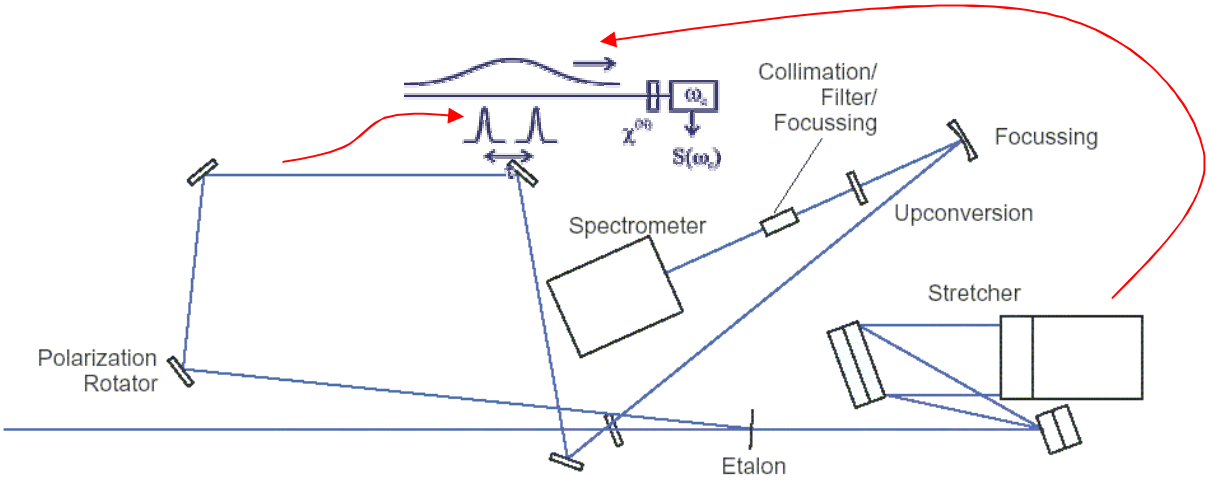


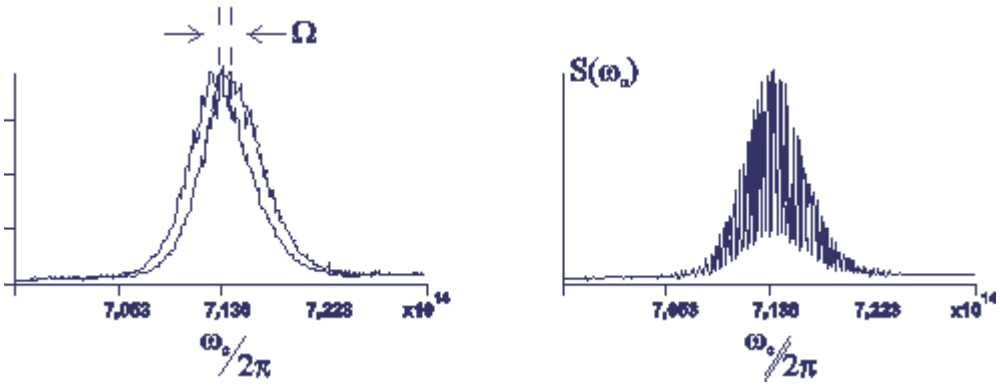

Cubic and Quadratic Phase
FWHM = 6, A = 0.03, B = 0.007, C = 0
T-B (FWHM) = 0.555 T-B (RMS) 0.802
FWHM = 5.92
FWHM = 6.0
Intensity
Phase (radians)
Time
Frequency
PG
Time Delay
Interferometric
SHG
SD
SHG


Self-Phase Modulation
FWHM = 12, Q = 5
T-B (FWHM) = 2.19 T-B (RMS) 2.25
FWHM = 12
FWHM = 11.7
Intensity
Phase (radians)
Time
Frequency
PG
Interferometric
SHG
Frequency
Time Delay
SD
SHG
Frequency
Time Delay

Úplná charakterizace ultrakrátkého pulsu – SPIDER

(spectral phase interferometry for direct electric field reconstruction)



Založen na spektrální střihové interferometrii (shear interferometry).

- Pár pulsů se generuje pomocí etalonu
- Mřížkový stretcher produkuje prodloužený čerpovaný puls
- Dvojice pulsů se superponuje na prodloužený puls a každá replika získává jiný spektrální posuv v procesu parametrické konverze nahoru
- Výsledný signál se získá interferencí těchto frekvenčně posunutých replik
- Velmi jednoduchý neiterativní algoritmus pro rekonstrukci fáze