



Synchronizacja fazy systemów w.cz w akceleratorach cząstek elementarnych

Krzysztof Czuba

Polish Accelerators School

19.10.2026

Synchronizacja

Proces doprowadzenia dwóch lub więcej zjawisk, urządzeń, procesów lub plików do wzajemnej zgodności w czasie [wiki]



Synchronizacja jest przeprowadzana za pomocą sygnałów zrozumiałych dla elementów systemu

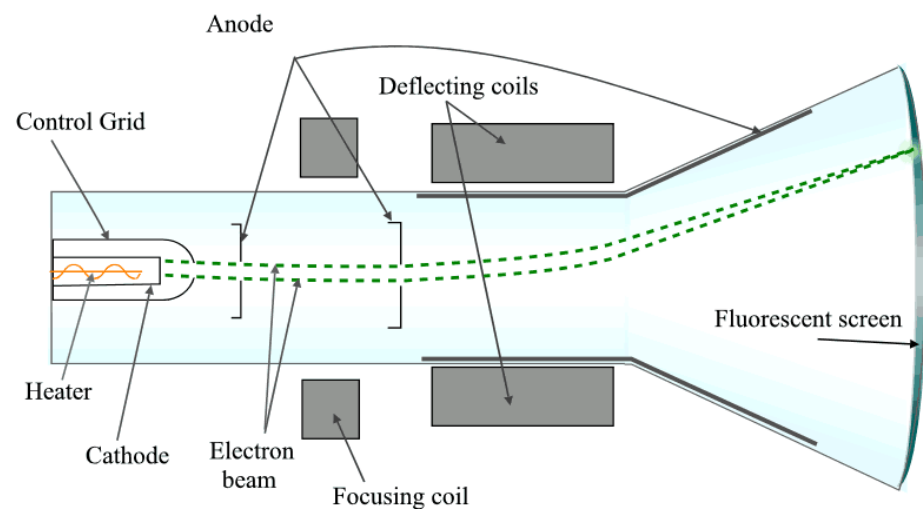


Rodzaje synchronizacji

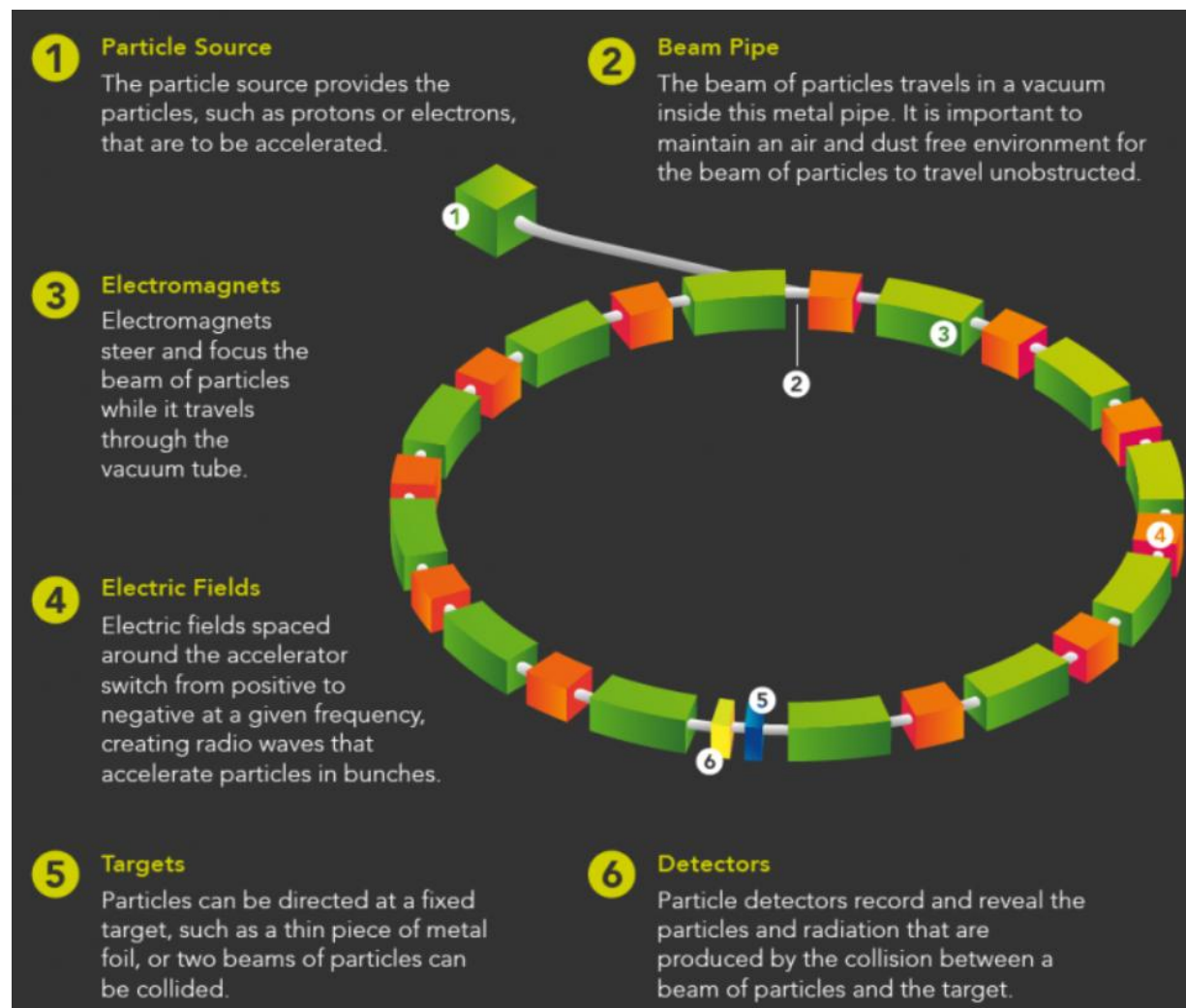
- **Analogowa** – odbiorniki systemów sterowania polem przyspieszającym, diagnostyka wiązki...; **sygnał harmoniczny** (*Phase reference line*)
- **Optyczna** – lasery, detektory optyczne, ...; **najczęściej impulsy optyczne** (*Optical reference line*)
- **Systemowa** – wyzwalanie procesów w akceleratorze, identyfikacja zdarzeń; **sygnały z zakodowanym czasem oraz np. numerami zgęstek**, **Timing system**
- **Cyfrowa** – przetworniki A/C i C/A, „procesory”, sterowniki cyfrowe, ...; **sygnały zegarowe** (głównie wewnątrz urządzeń) – często jako rozszerzenie powyższych

Zaczniemy od synchronizacji analogowej

Jak działa akcelerator?

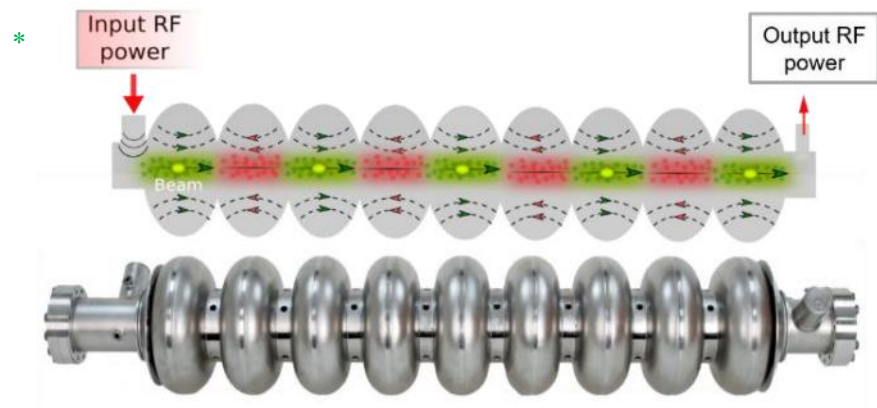


www.forbot.pl

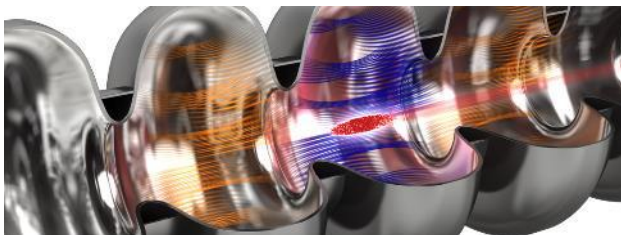


www.energy.gov

Technologia nadprzewodzących rezonatorów TESLA



**

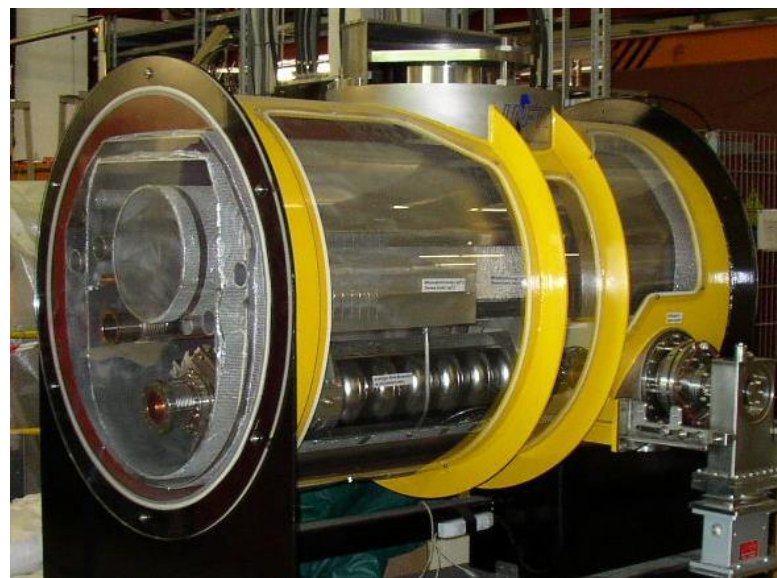


* Oleksandr Hryhorenko et al. „An Innovative Approach ...”, J. Manuf. Mater. Process. 2023

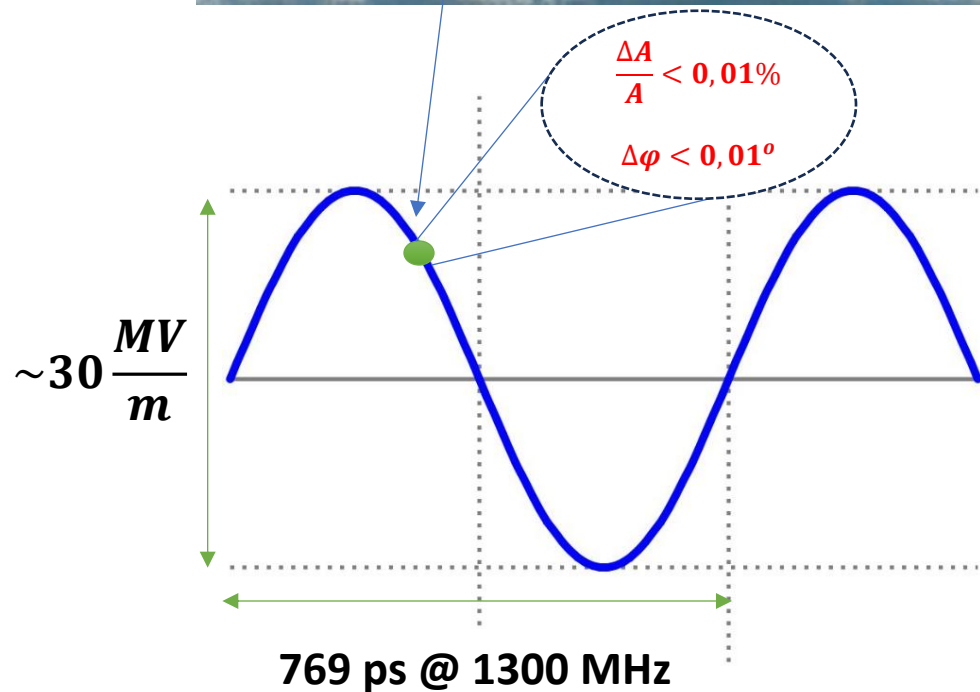
** www.xfel.eu

- Wykonane z czystego niobu
- Częstotliwość rezonansowa $f_0 = 1,3$ GHz
- Próżnia
- Temperatura 2 K (-271 °C!)
- Dobroć nieobciążona $\sim 10^{10}$
- Gradient pola EM ~ 23 MV/m

Model kriomodulu

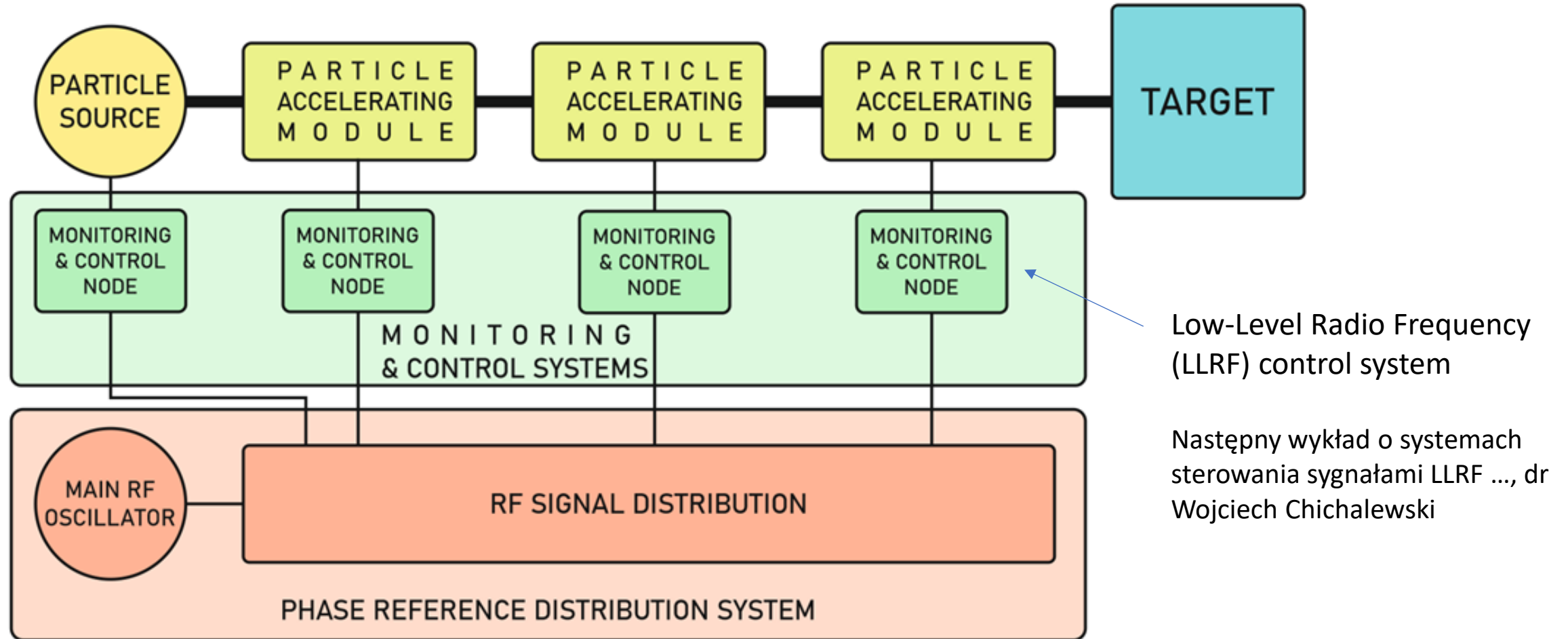


Przyspieszanie cząsteczek



- Cząstki muszą precyzyjnie trafić „na falę”
- Olbrzymie gradienty pola
- Ultrakrótkie czasy

Sterowanie liniowego akceleratora cząstek elementarnych



Low-Level Radio Frequency (LLRF) control system

Następny wykład o systemach sterowania sygnałami LLRF ..., dr Wojciech Chichalewski

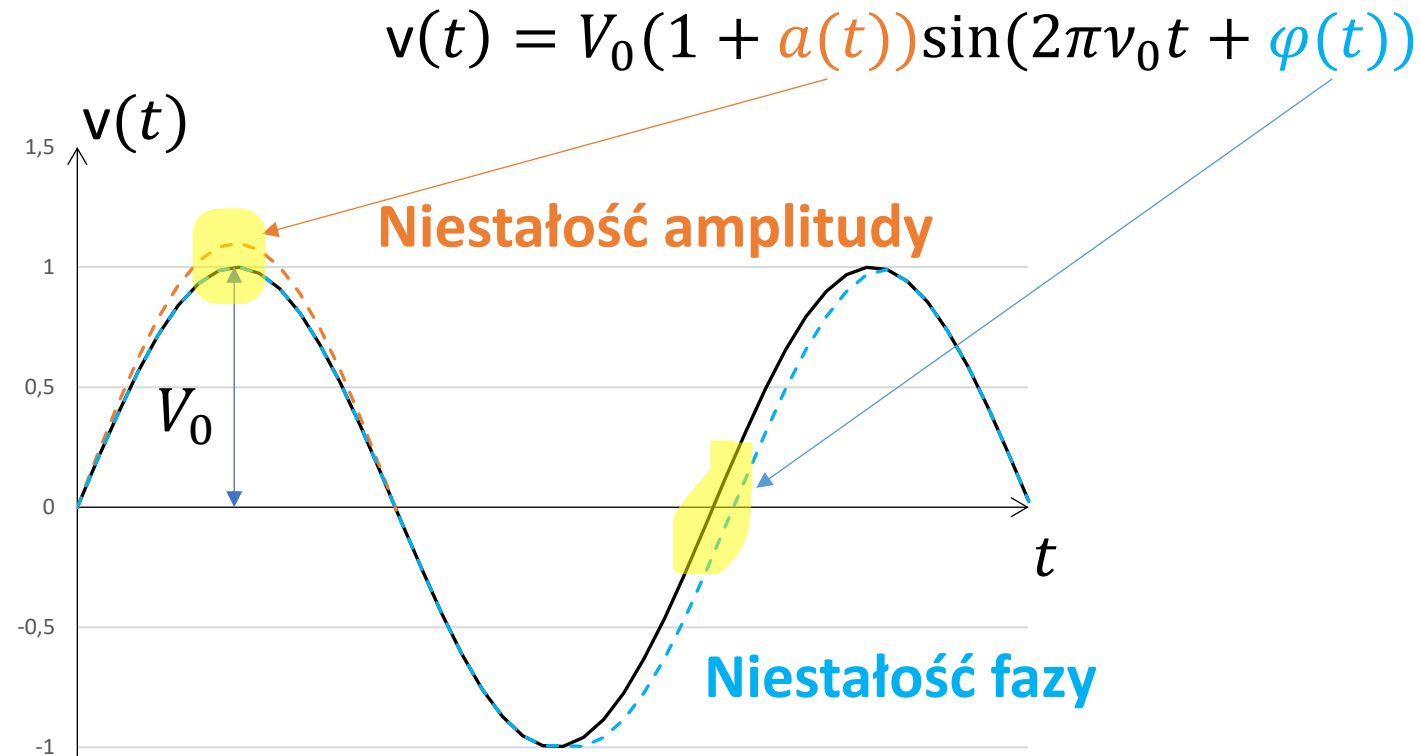
Bardzo uproszczony schemat blokowy (rys. M. Urbański)



Synchronizacja fazy - sygnał harmoniczny

Dla systemów LLRF oraz diagnostyki wiązki

Często mylona z timing'iem



Idealny sygnał harmoniczny

$$v(t) = V_0 \sin(2\pi\nu_0 t)$$

Stałość fazy określamy przez niestałości

Podział ze względu na:

- **Charakter:**

- losowy (szumy)
- deterministyczny (wpływ zmian temperatury, harmoniczne sieci AC)

- **Odniesienie:**

- bezwzględne (szumy fazowe/jitter mierzone na danym wyjściu)
- względne (dryfty fazy lub szumy resztkowe - residual noise, - zmiana pomiędzy różnymi punktami systemu)

- **Czas obserwacji:**

- krótkoterminowe
- długoterminowe

Niestąłości krótko i długoterminowe

Niestąłość krótkoterminowa dotyczy zmian fazy/częstotliwości w czasie krótszym niż 1 sekunda

- “szybkie” składowe szumów ($f > 1 \text{ Hz}$)
- wyrażana w postaci gęstości widmowej szumów lub jitteru

Niestąłość długoterminowa dotyczy zmian fazy/częstotliwości w czasie dłuższym niż 1 sekunda

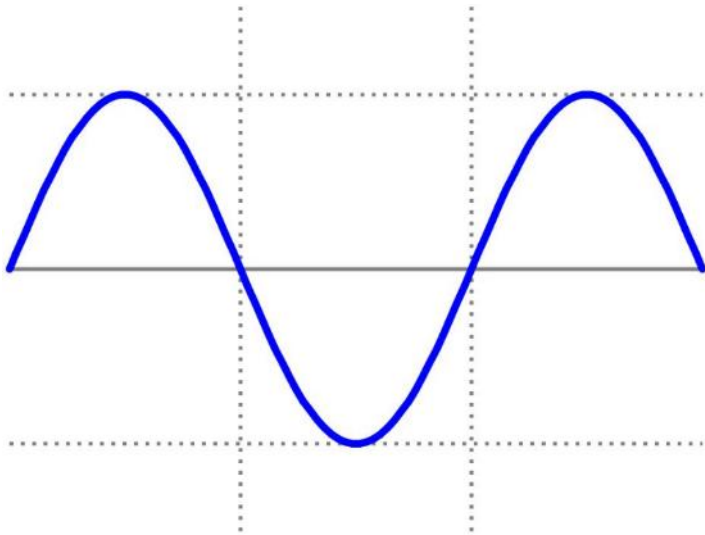
- **dryfly** - wywodzi się z procesów długoterminowych, starzenie elementów lub wpływ czynników środowiskowych
- Wyrażana w stopniach, sekundach, ppm na jednostkę czasu
- **Mierzona w czasie $>1\text{s}$, a czasem $>10\text{s}$** szczególnie gdy chodzi o pomiary szumów w pasmie $<10\text{Hz}$

Skąd biorą się niestałości?

- **Szumy** – losowe procesy w elementach elektronicznych wpływające na amplitudę i fazę sygnałów
- **Zakłócenia** – często bardzo silne w systemie akceleratora
- **Wibracje mechaniczne, naprężenia**
- **Wrażliwość elementów** toru sygnałowego na zmiany temperatury i wilgotności
- Starzenie się elementów

Szumy w sygnale harmonicznym

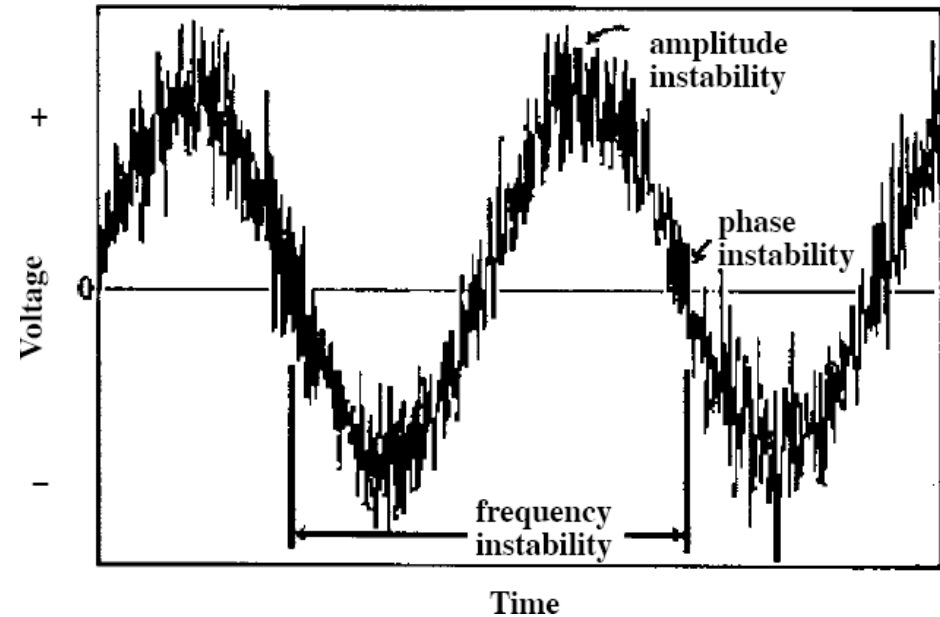
Chcemy rozpropagować czystą sinusoidę



$$v(t) = V_0 \sin(2\pi \nu_0 t)$$



W praktyce (w dziedzinie czasu):



Phase Noise and Jitter

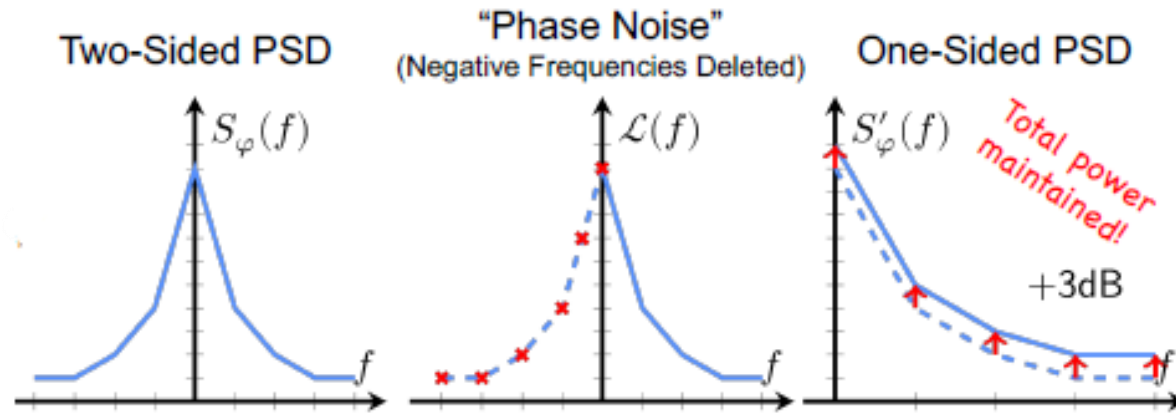
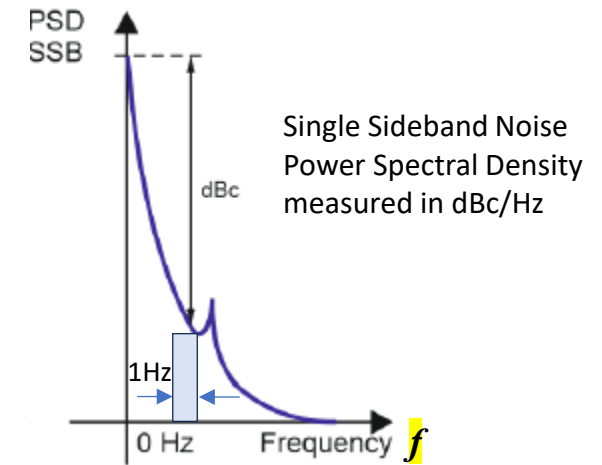


Fig. Courtesy of Maximilian Schütte

Klasyczna definicja szumów fazy



$$\phi_{jitter}^2 = \int_{f_1}^{f_2} S'_\varphi(f) df$$

Jitter fazy

Uwaga $1/\nu_0$ – im większa częstotliwość nośna, tym mniejszy jitter czasu dla takich samych poziomów szumów fazy!

$$\Delta t_{rms} = \left(\frac{1}{2\pi\nu_0} \right) \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S'_\varphi(f) df}$$

Jitter fazy wyrażony w sekundach

Jitter fazy w sekundach?

Wygodne jest przedstawienie jitteru fazy Φ w jednostkach czasu jako Δt

- Fizycy zazwyczaj podają czasy przelotu cząsteczek przez maszynę / dotarcia do eksperymentu
- Łatwiej jest porównać błędy związane z niestałością synchronizacji

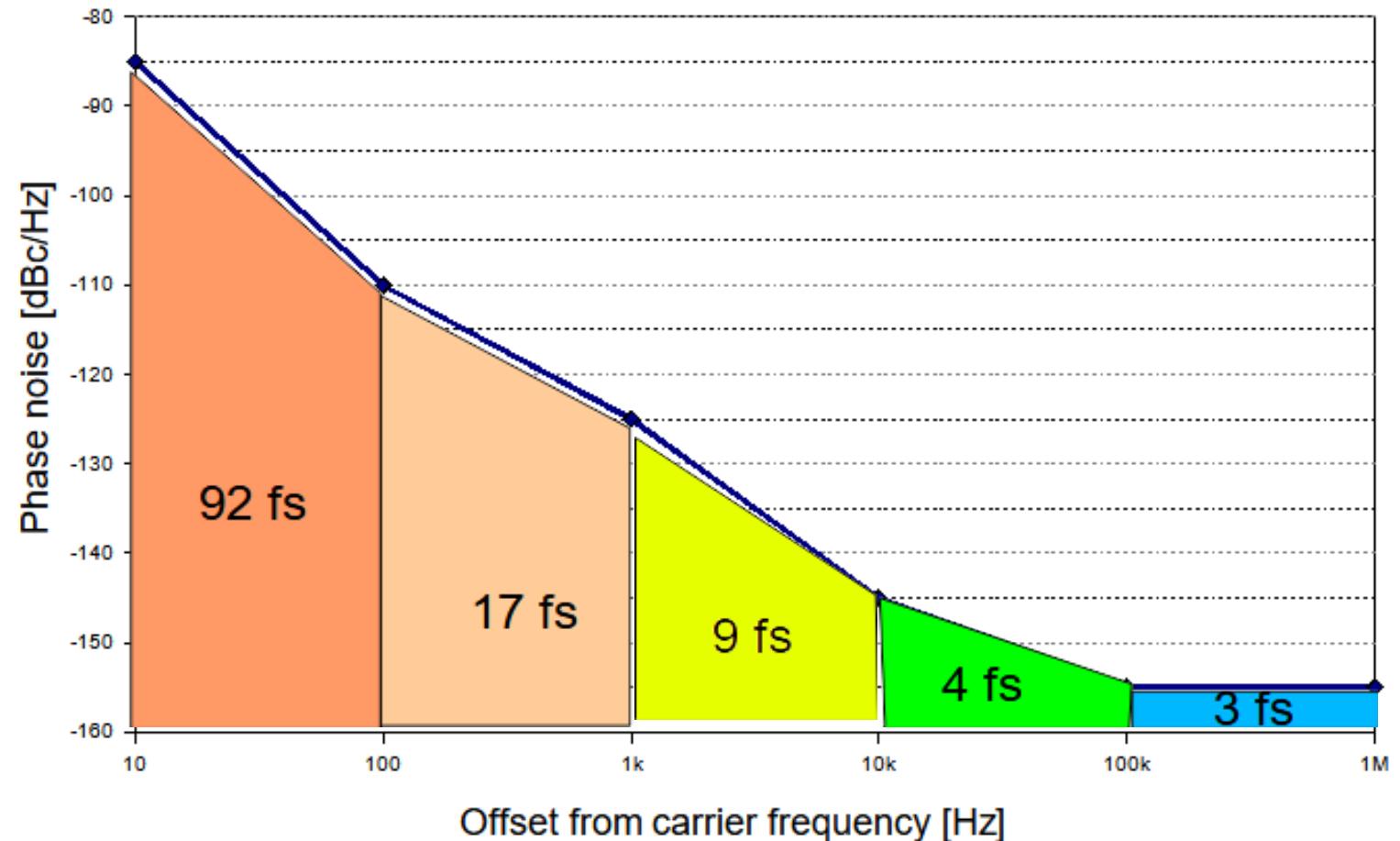
$$\Delta t = \frac{\phi T}{360^\circ}$$

Przykład: $\nu_0 = 1300 \text{ MHz} \rightarrow T \approx 0,769 \text{ ps}$,

$$\Phi = 1^\circ \rightarrow \Delta t \approx 2,13 \text{ ps}$$

Przykładowy wykres gęstości widmowej szumów fazowych

Sygnał z oscylatora 1300 MHz



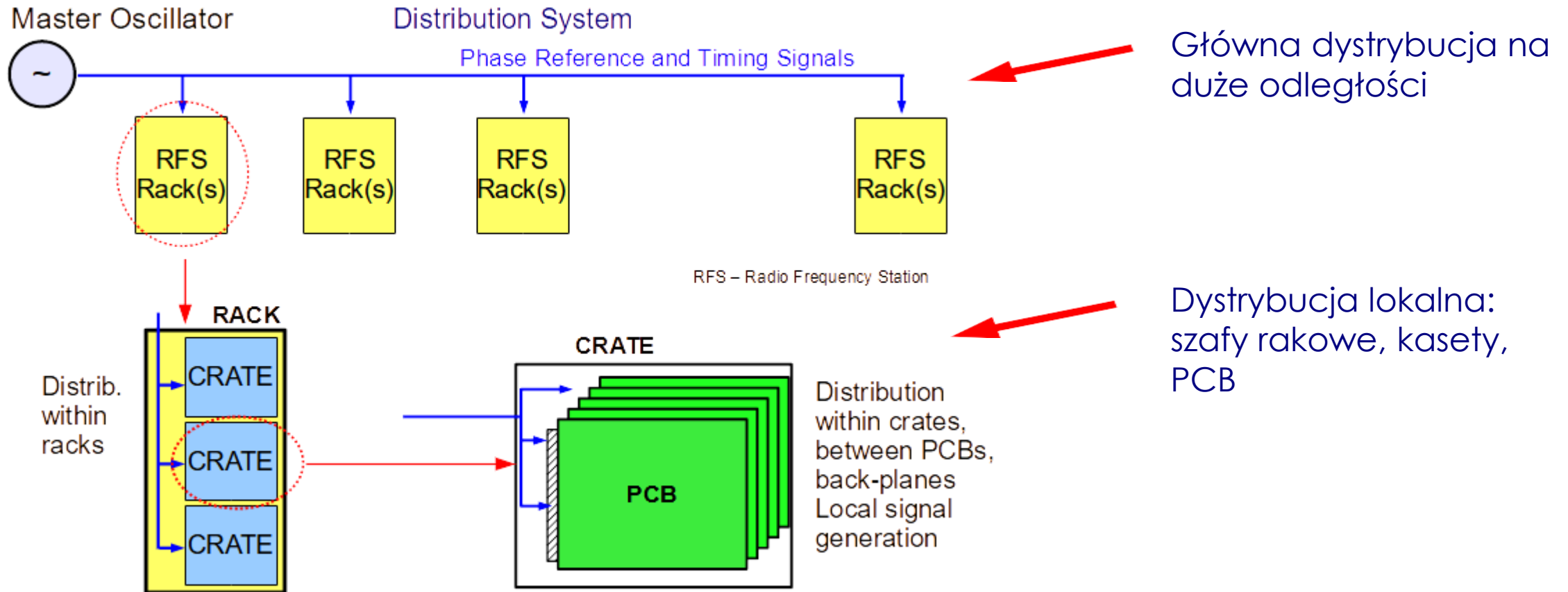
Im bliżej nośnej, tym większy wkład szumów do wartości jitteru

Główne zadania twórców systemu synchronizacji fazy

- Wygenerować sygnał o odpowiedniej czystości
- Wzmocnić i rozdzielić ten sygnał
- Rozprowadzić do kilkuset urządzeń nie psując parametrów
- Zapewnić wysoką dostępność (99,999%)
- Zabezpieczyć się przed telefonami od operatorów w środku nocy/wakacji...

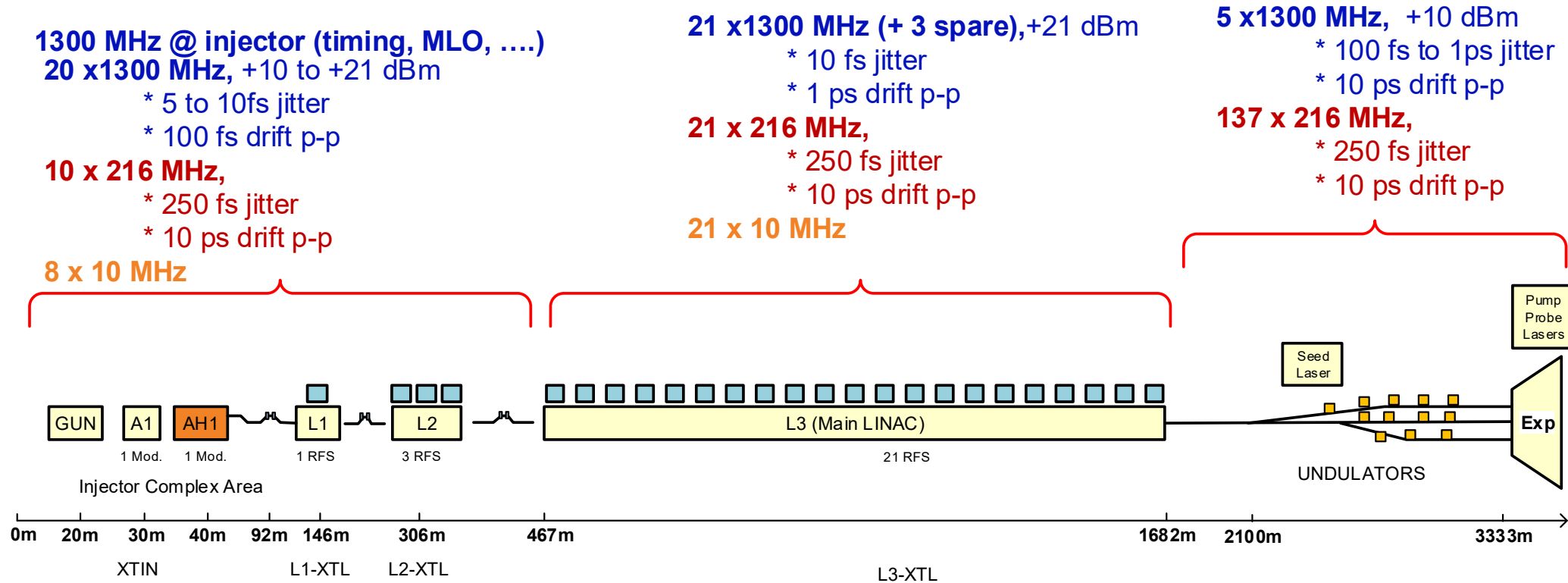


System synchronizacji fazy w uproszczeniu



Bardzo często nie docenia się znaczenia lokalnej dystrybucji sygnałów (wewnątrz kaset, na PCB)

Wymagania dla systemu synchronizacji E-XFEL



- **Ponad 220 wyjść**
- Wymagana dostępność sygnałów na poziomie 99,9%

Co oznacza 10 fs lub 1ps w praktyce?

- W czasie 10 fs światło pokonuje w próżni drogę $\sim 3\mu\text{m}$!
- W typowym przewodzie $\sim$ połowę mniej...
- Dla częstotliwości $f = 1,3\text{ GHz}$
 - $\Delta t = 10\text{ fs} \rightarrow \Phi \approx 0,0045^\circ$
 - $\Delta t = 1\text{ ps} \rightarrow \Phi \approx 0,45^\circ$
- A akcelerator E-XFEL ma prawie 2 km długości + 1,5 km *beamlines*...



shutterstock · 484458925

Zaczniemy od generacji sygnału referencyjnego

Generator Wzorcowy

Main/Master Oscillator

Typowe wymagania dla generatora wzorcowego

- Niskie szumy fazowe -> np. jitter <10 fs w zakresie od 1Hz do 10 MHz
- Od 1 do kilkunastu częstotliwości wyjściowych
- Od 1 do kilkudziesięciu wyjść
- Moc wyjściowa od 10mW do 50W
- Wysoka dostępność (redundancja)
- Zintegrowana diagnostyka

Z takimi się spotkałem

The Very Master Oscillator

- W większości przypadków jest to OCXO (*Oven Controlled Crystal Oscillator*)
- Typowa długoterminowa stałość częstotliwości OCXO $\sim 10^{-10}$
- Jeśli trzeba lepszej stałości, to OCXO może zostać zsynchronizowany z:
 - Źródłem atomowym (zegar rubidowy) $\sim 10^{-12}$
 - GPS (lub odpowiedniki) $\sim 10^{-14}$
- Częstotliwości OCXO rzadko przekraczają 200 MHz
- Konieczność syntezy większych częstotliwości



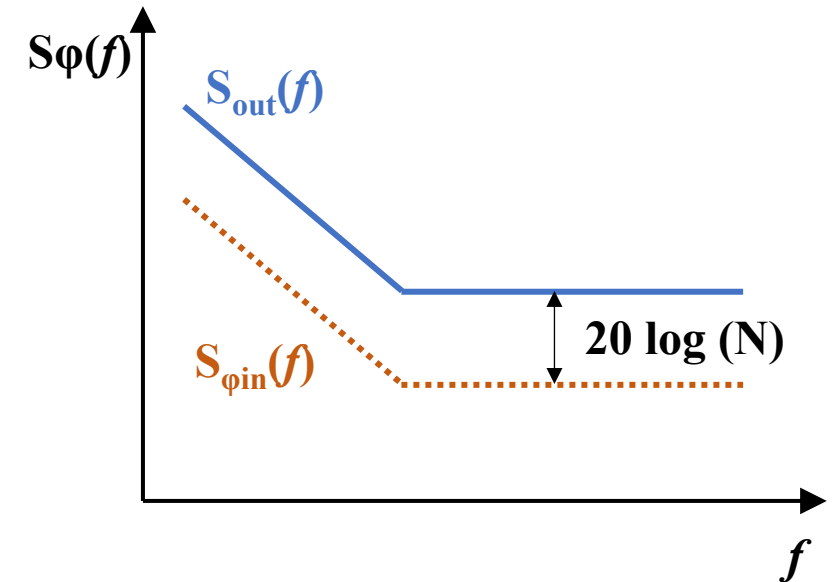
„Simplest” MO Solution

- **Off the shelf** signal synthesizer
 - There are some devices offering high-performance signals
 - Phase jitter in range of tens of fs
 - Relatively high noise floor (-155 to -160 dBc)
 - But still sufficient for many machines
-
- For higher performance and non typical requirements a custom design is necessary

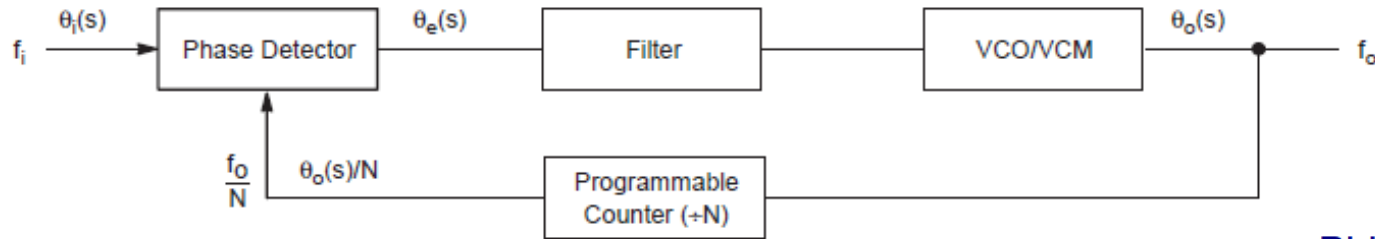


Frequency Synthesis with a Multiplier

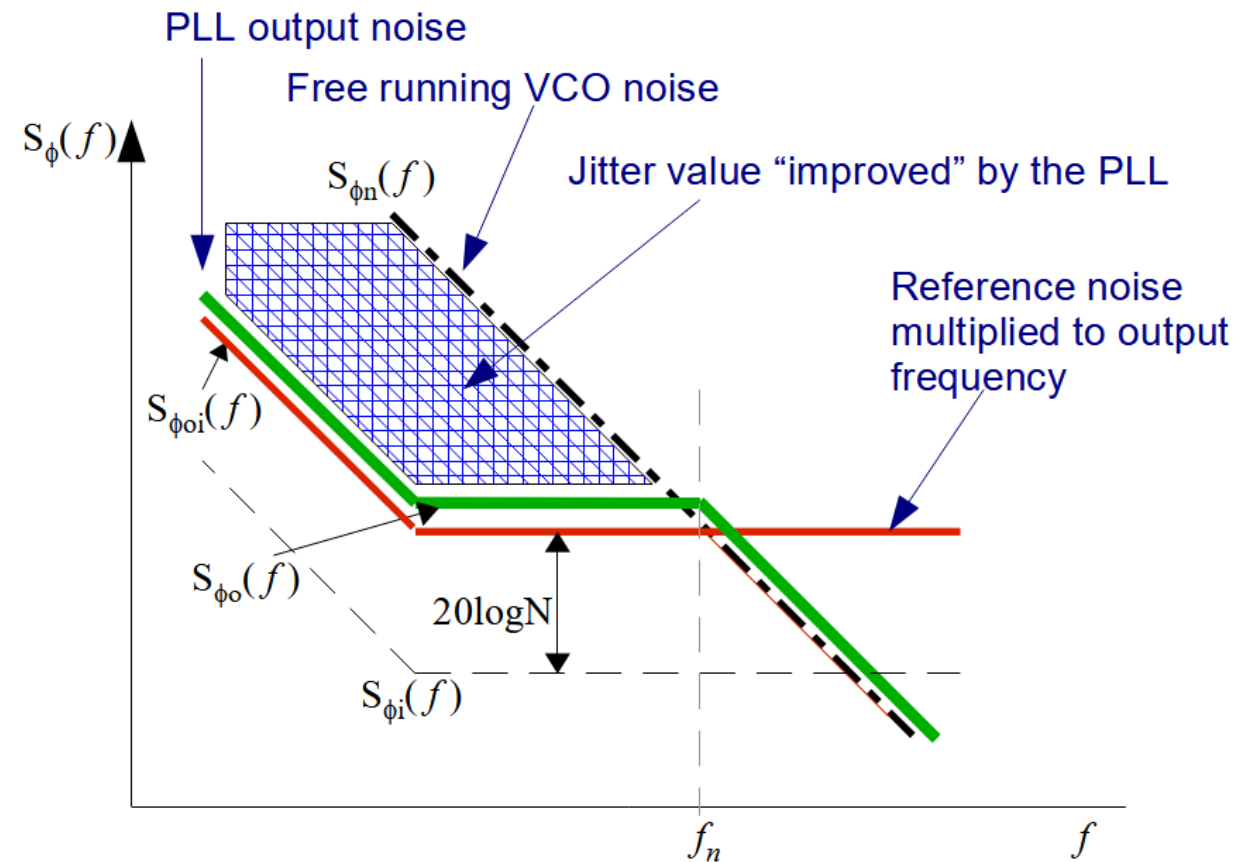
- Usually, the multiplication factor $N = 2$ or 3
- Rather narrow frequency range
- Limited choice of high-performance devices
- Limited flexibility but still possible to make a good design
- **Phase noise floor rarely below -155 dBc!**
- May drift significantly with temperature



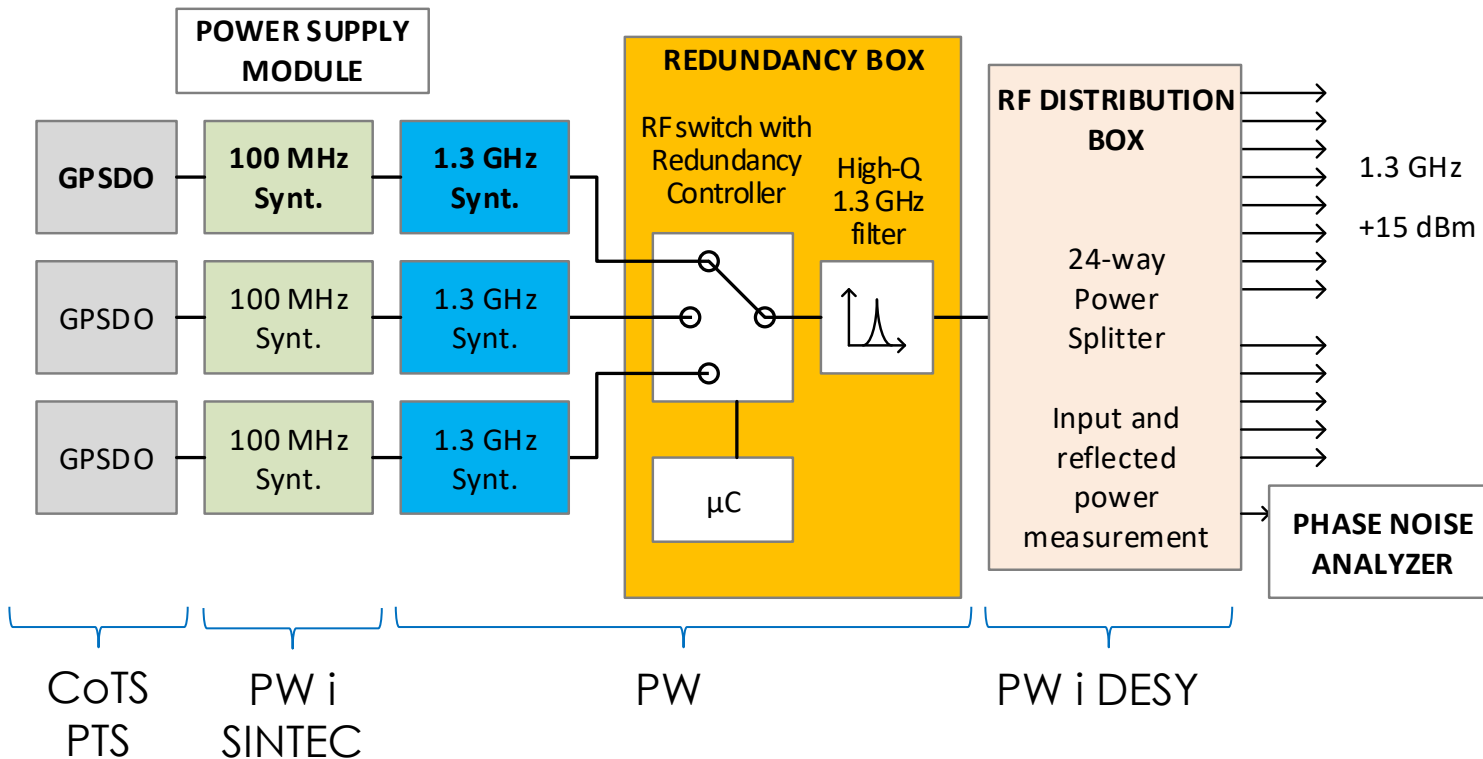
Phase-Locked Loop Synthesizer



- Phase – locking of a VCO to a reference signal
- Flexibility in selecting output frequency
- Proper selection of PLL components allow for phase noise (jitter) reduction comparing to a standard multiplier



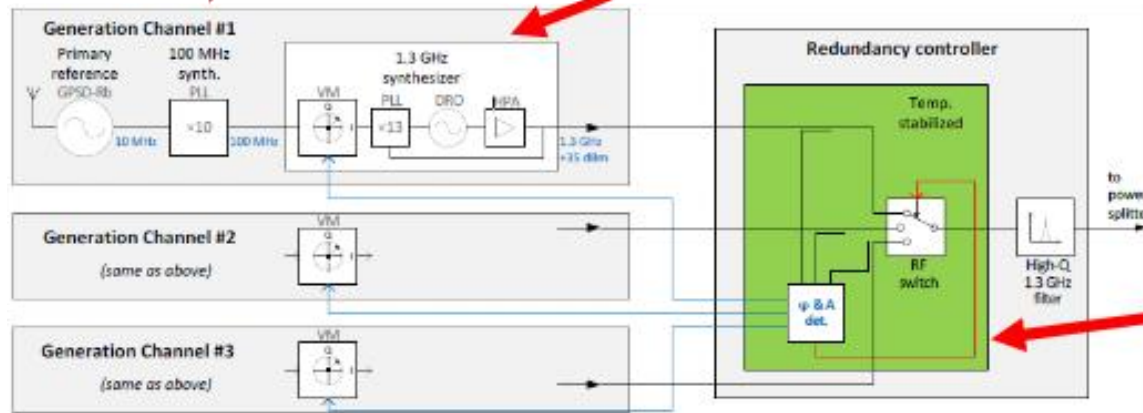
Projekt XFEL Master Oscillator*



*ostatnio Main Oscillator

- Ultraniskoszumny syntezer częstotliwości 1300 MHz
- System 3-kanalowy z kontrolerem redundancji i przełącznikiem
 - **Detekcja błędu, decyzja oraz przełączenie w czasie 300 ns!**
- Podtrzymywanie sygnału wyjściowego przez filtr o dużej dobroci
- 7 z 10 modułów składowych zbudowano na PW

XFEL Master Oscillator



Instalacja generatora wzorcowego w E-XFEL

Instalacja systemu generatora wzorcowego



- System działa w E-XFEL od roku 2017
- Wbudowana zaawansowana diagnostyka

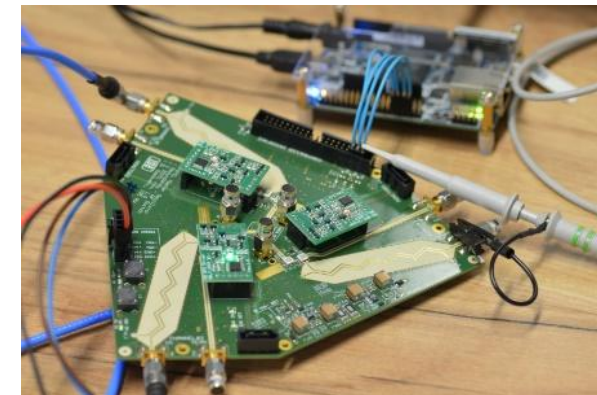
Moduł syntezy 1,3 GHz



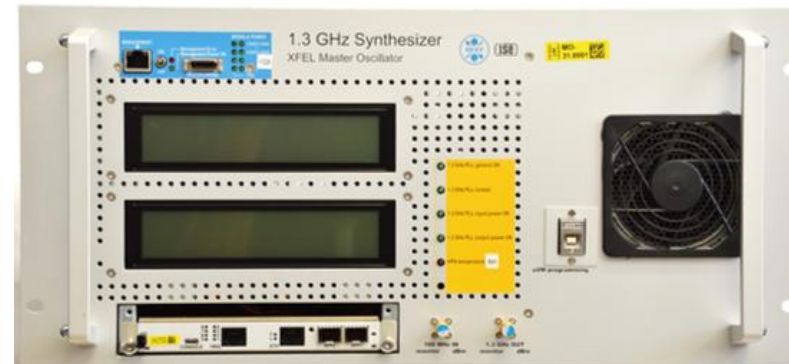
Filtr o dużej dobroci



Przełącznik z detektorami



Moduł syntezy 100 MHz

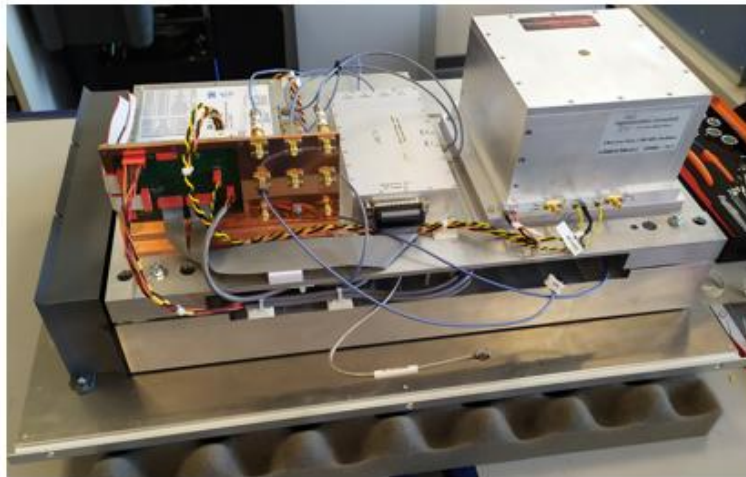


Optymalizacja konstrukcji MO upgrade

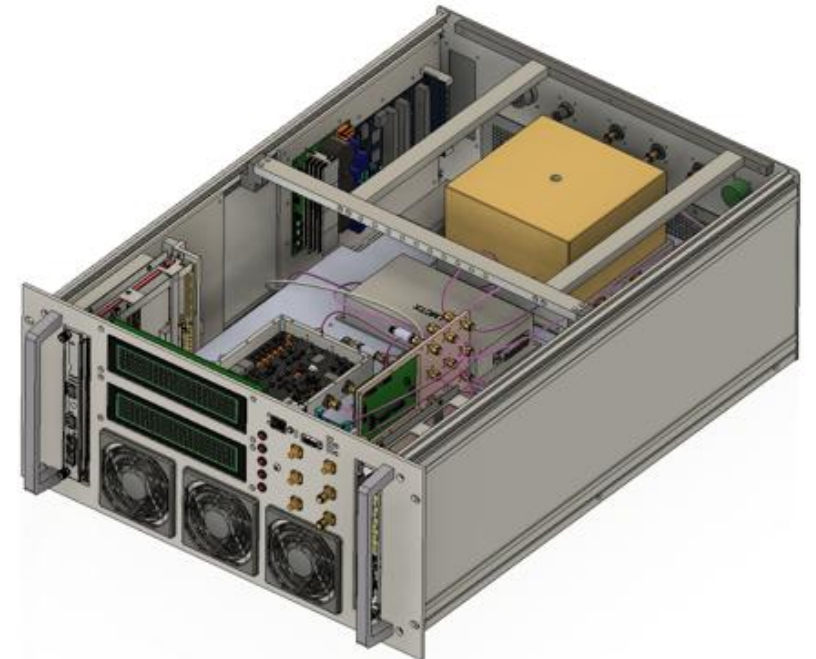
- Stosowanie jak najmniejszej liczby kabli połączeniowych w obudowie
- Projektowanie pod kątem łatwości montażu i późniejszego serwisowania urządzenia:
 - Redukcja kosztów związanych z przestojem w pracy akceleratora,
 - Redukcja kosztów napraw i serwisu modułów.



+



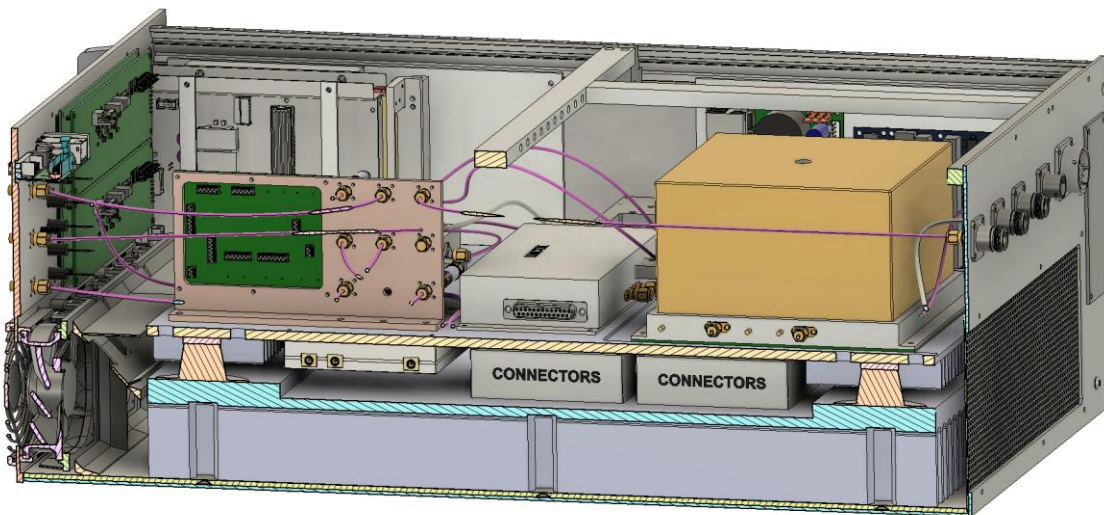
=



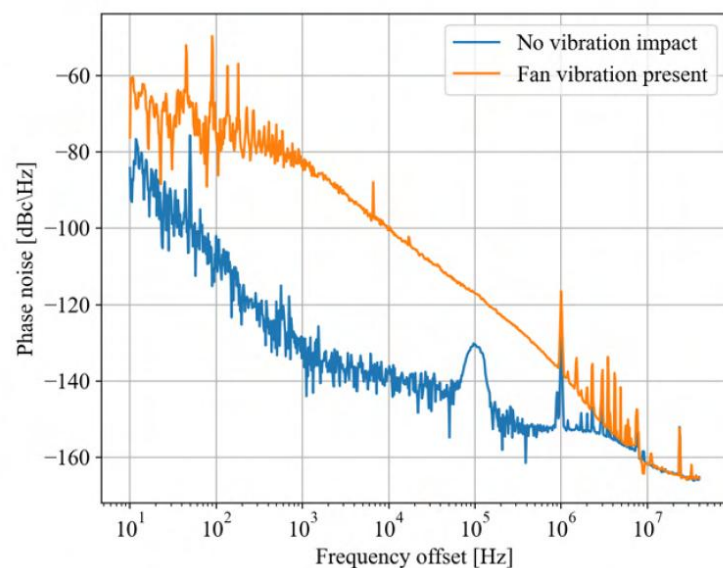
Uproszczona instrukcja montażu (i serwisu) syntezeru FLASH-MO

(rys. M. Urbański)

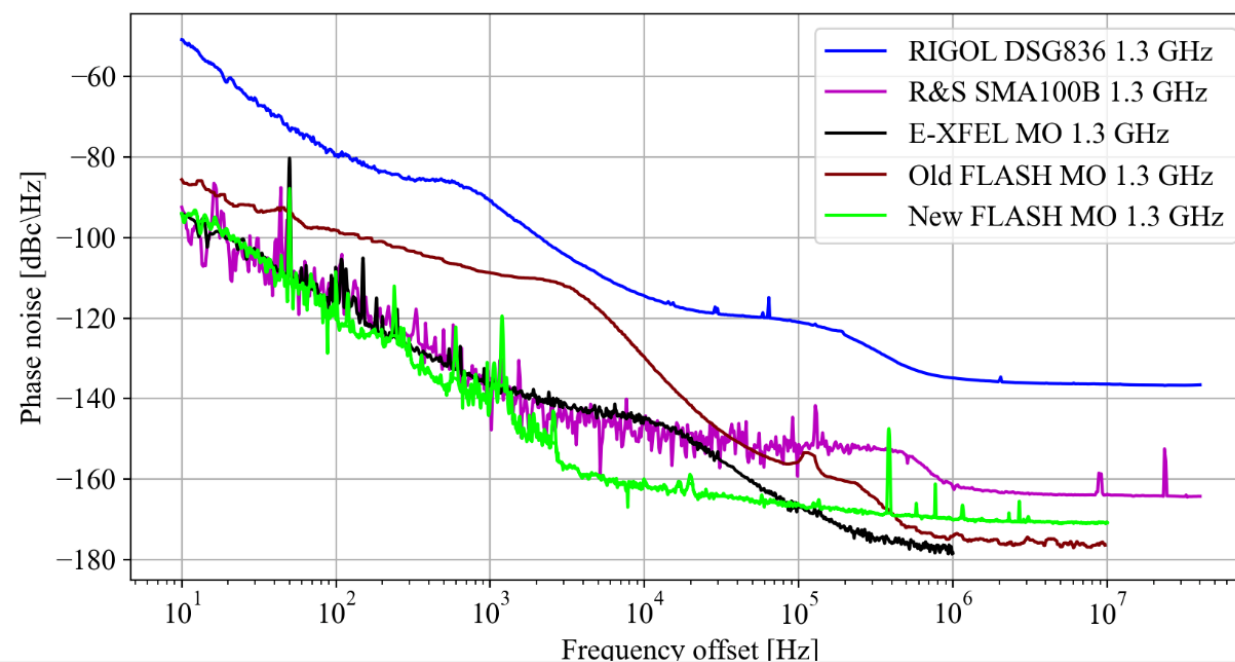
Redukcja wpływu wibracji



OCXO phase noise optimization



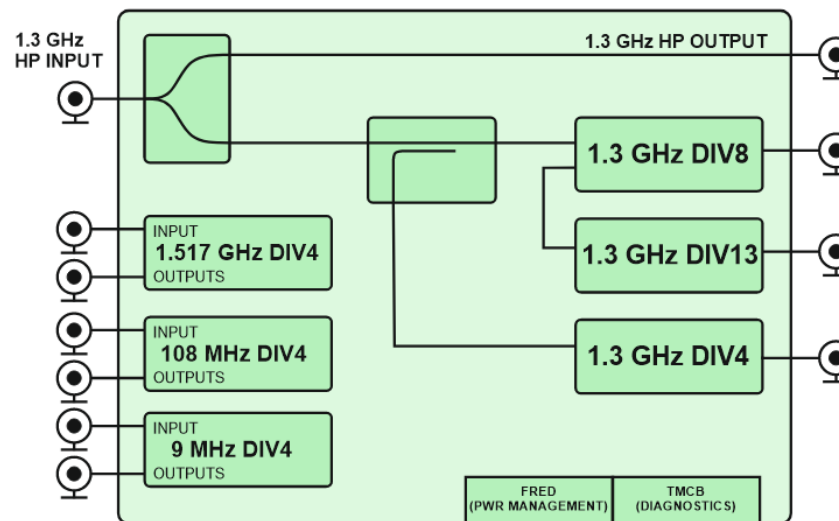
	Phase Jitter (10 Hz do 1 MHz)		
	Old FLASH MO	E-XFEL MO	NewFLASH2020+ MO
108 MHz	86.1 fs	-	27.8 fs
1300 MHz	55.9 fs	19.5 fs	10.7 fs
1517 MHz	1390 fs	-	45.8 fs



Moduł dzielników mocy sygnałów



Moduł dystrybucji sygnału wzorcowego w.cz FLASH-DISM w trakcie testów.
Widoczny moduł dedykowany dzielnika mocy DIV13.



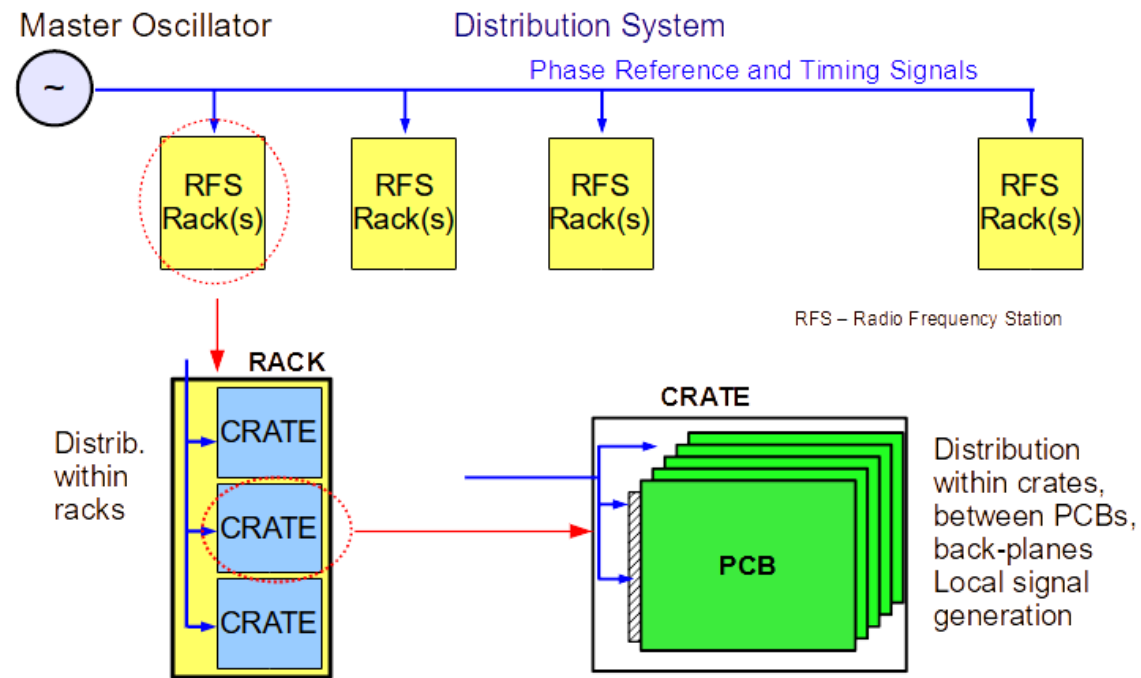
Schemat blokowy modułu dystrybucji sygnału



(rys. M. Urbański)

Mamy już sygnał

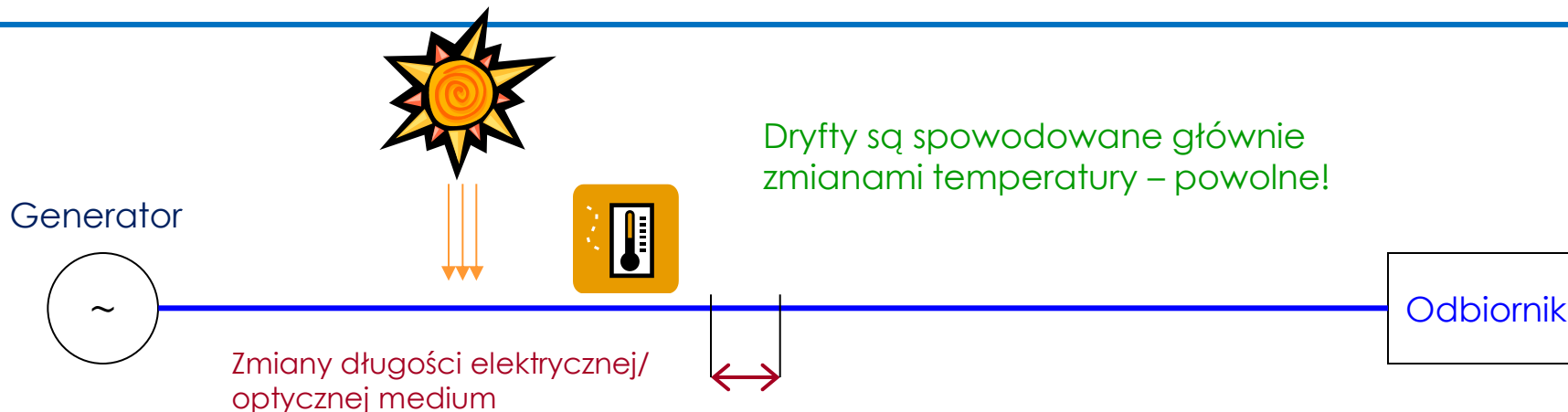
Bierzemy się za jego dystrybucję ...



Jeszcze parę słów o niestałościach fazy w systemach referencyjnych

- Stałość bezwzględna zależy głównie od szumów fazowych MO
- Elementy pasywne nie dodają jitter'u (*ale... EMC, niskie moce*)
- Można zbudować wzmacniacze w.cz. o pomijalnych szumach addytywnych
- **Dobrze zaprojektowana linia referencyjna „transportuje” jitter fazy z MO i nie dodaje nic od siebie**
- Systemy timing'owe wymagają niestałości w zakresie od ps do ns
- Niskoszumne sygnały zegarowe dla ADC syntezuje się z sygnałów referencyjnych
- Każde medium dystrybucji wprowadza dryfty fazy

Problem długich (choć nie tylko) połączeń



Main Enemy:
DRYFTY FAZY

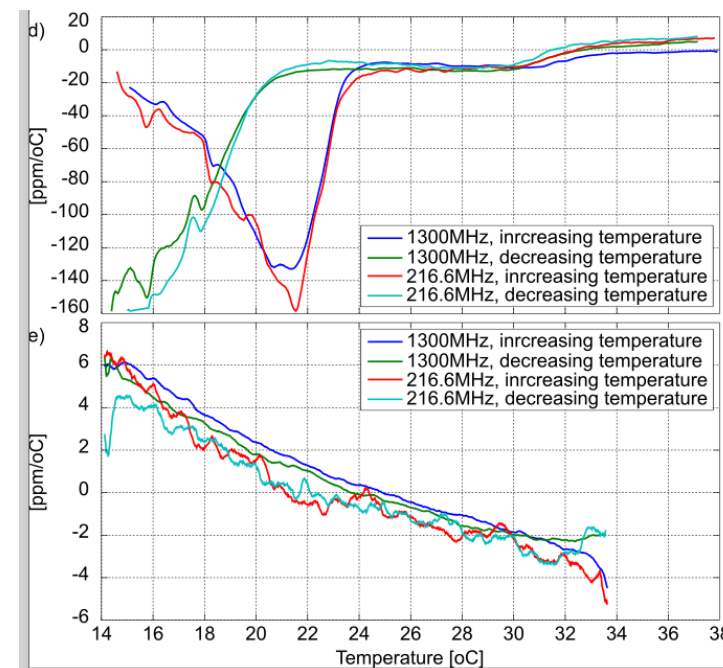
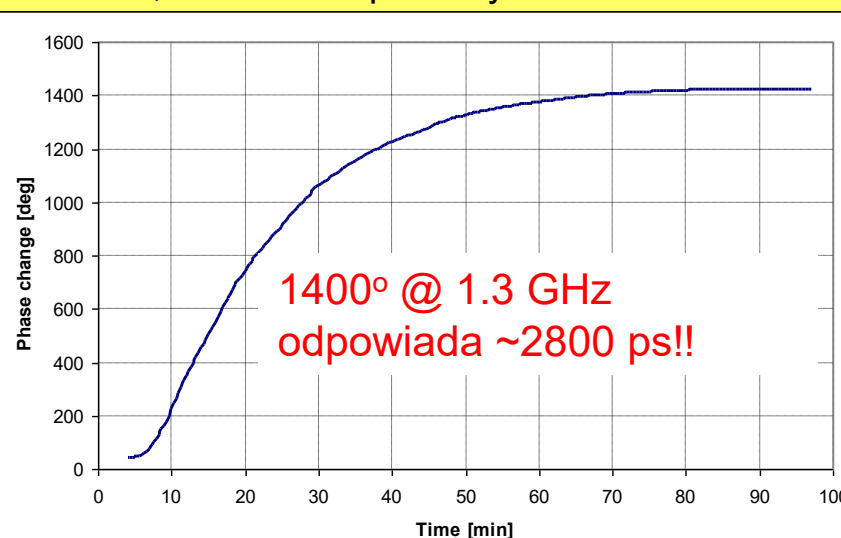


Źródła dryftów:

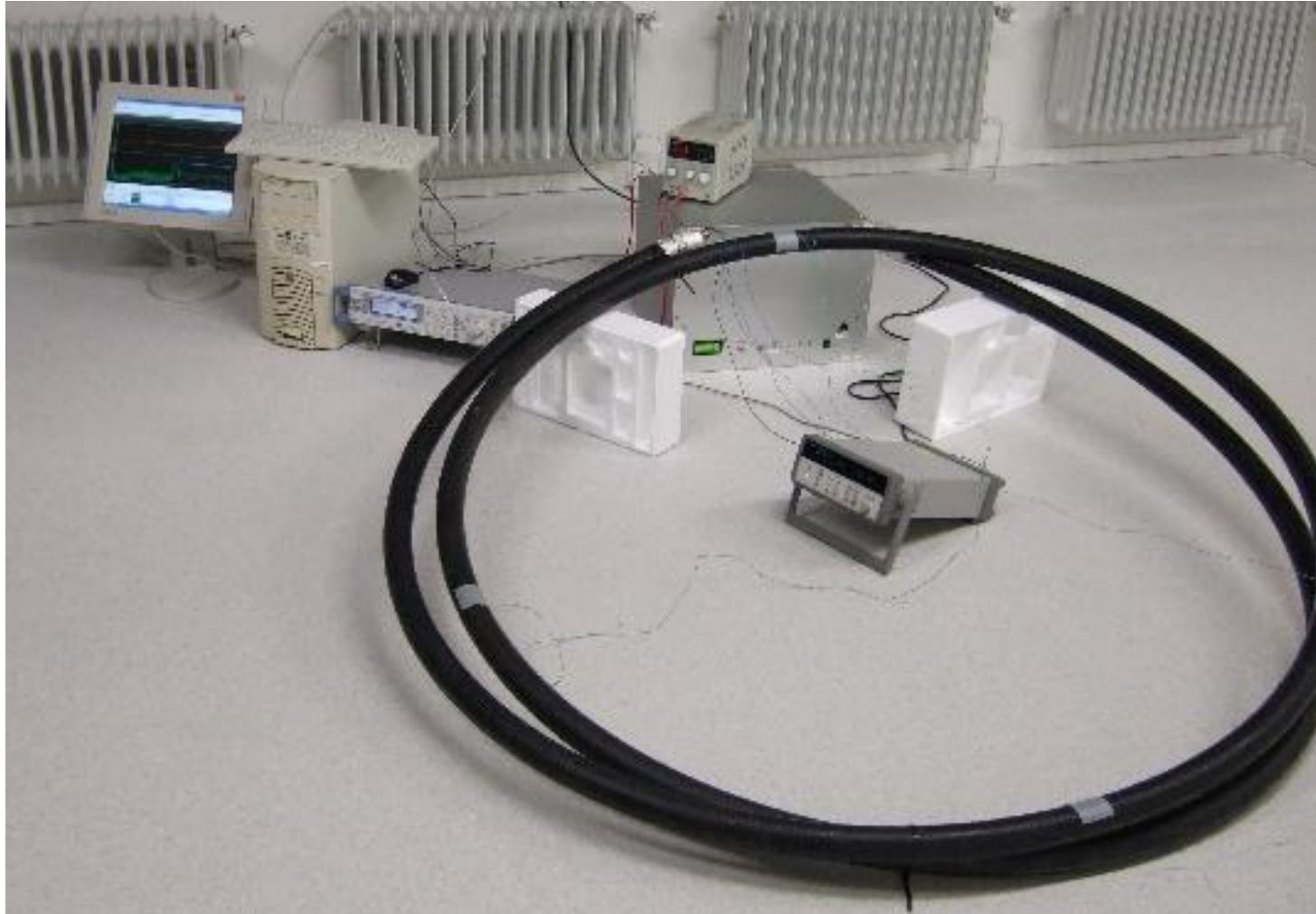
- w światłowodach: zmiany n_{eff}
- w przewodach: zmiany rozmiaru lub stałej dielektrycznej

Wymagana jest aktywna kompensacja dryftów fazy

Zmiana fazy sygnału 1.3 GHz w światłowodzie, $L=5\text{km}$, Zmiana temperatury = 10°C



Amatorskie pomiary dryftów fazy w grubych przewodach 😊



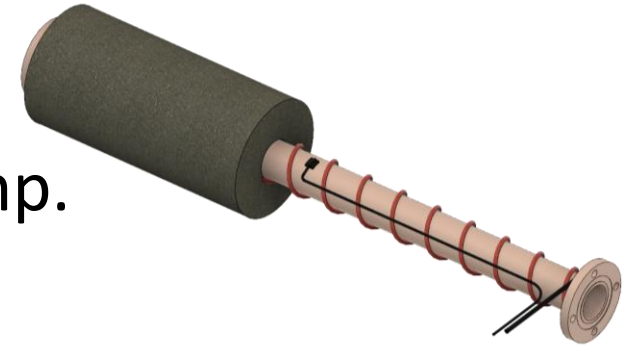
Jak walczymy z dryftami fazy

To zależy od wielkości akceleratora oraz wymagań na stałość synchronizacji

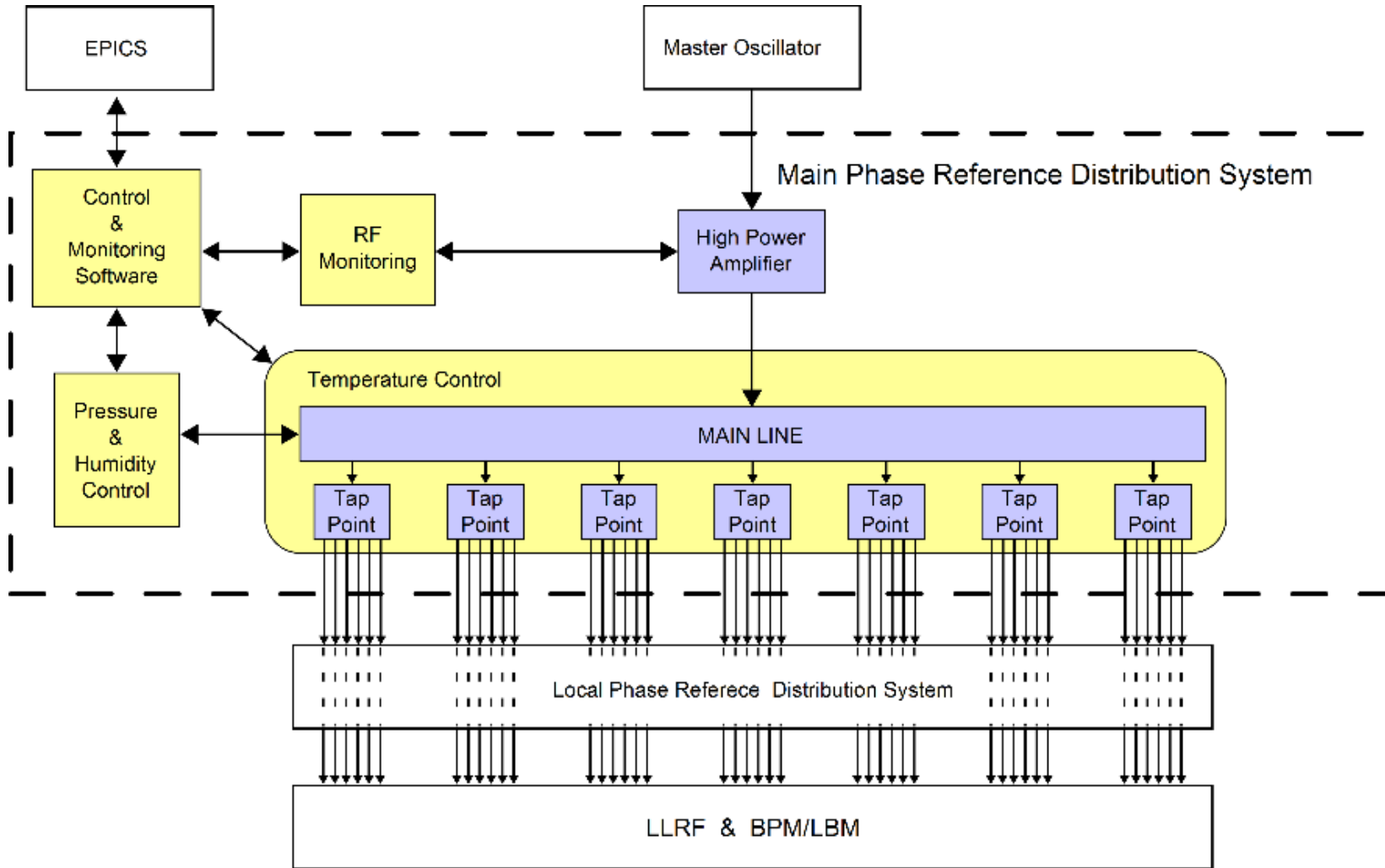
- Dla małych akceleratorów może wystarczyć dobrze zaprojektowana linia pasywna
- Dla większych maszyn może to być dystrybucja ze stabilizacją:
 - **pasywną** z kablami/światłowodami o przeciwnych (kompensujących) się współczynnikach temperaturowych zmian fazy
 - **pośrednią** – poprzez stabilizację temperatury przewodów
 - **aktywną** - z sprzężeniem zwrotnym

Cable Temperature Stabilization

- Either by cooling water or by heating tapes
- Very well known, robust, good performance
- Require a good thermal insulation to achieve good temp. stability far from sensors
- Feasible for up to several hundred meters
- Demonstrated $\sim 0.1^\circ$ p-p phase stability / 100m @ 704 MHz at ESS
- For longer distances and higher frequencies stability and cost may be compromised

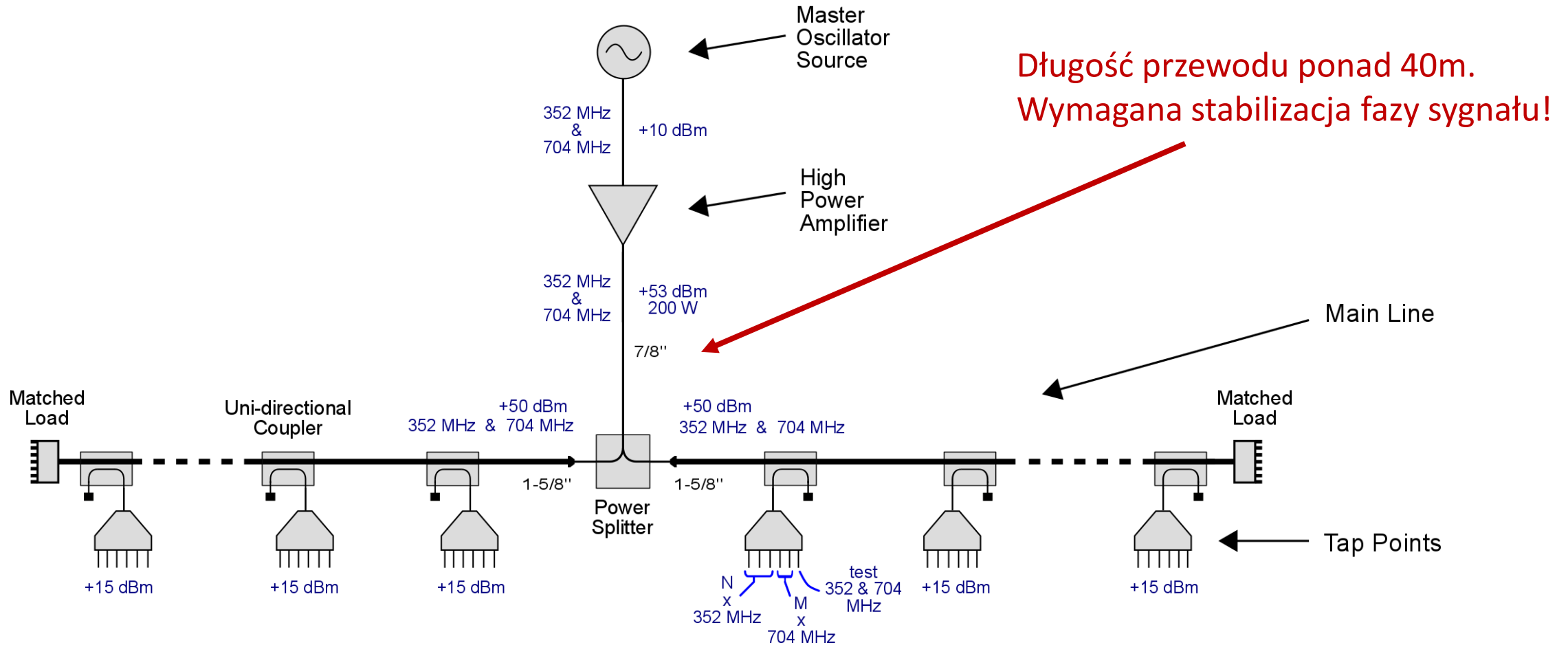


Koncepcja i najważniejsze części systemu

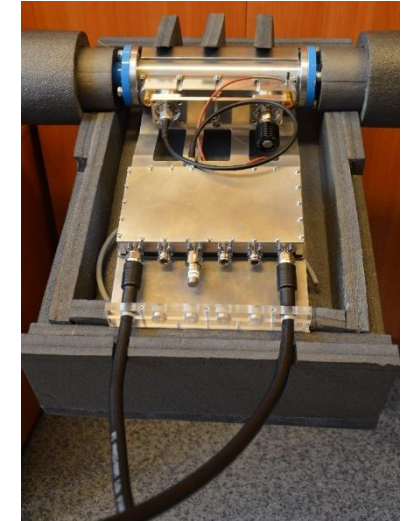
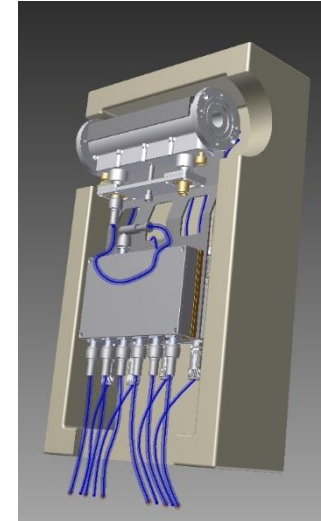
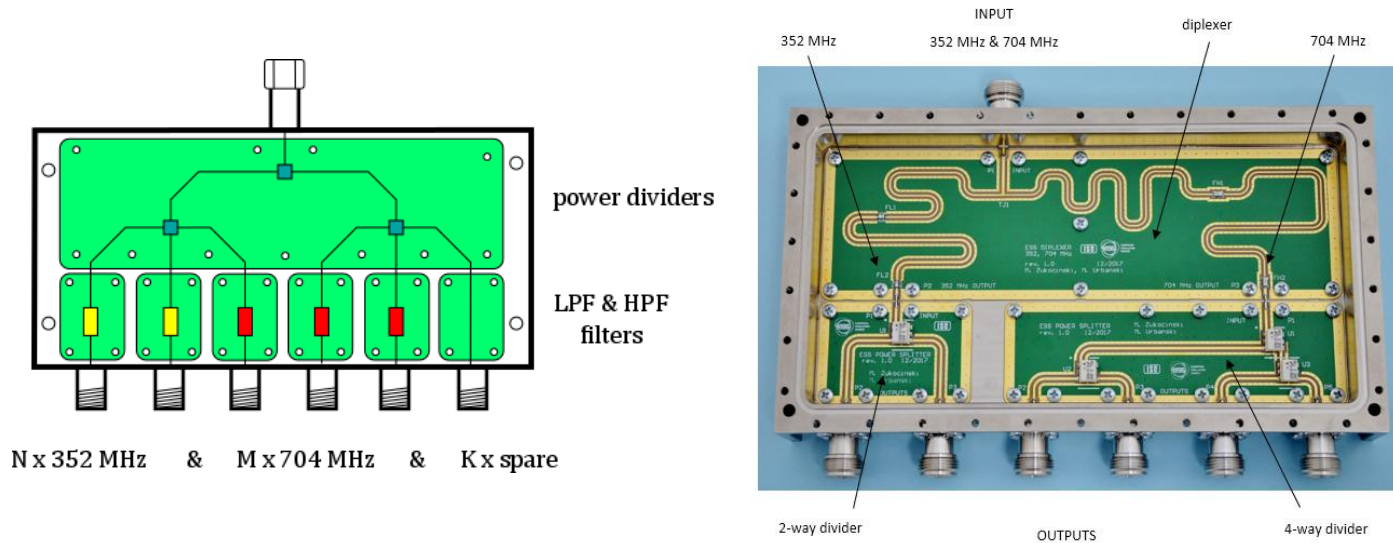


- Linia główna ze sprzęgaczami
- Moduły wyjściowe (Tap-Point)
- System stabilizacji temperatury
- System stabilizacji ciśnienia i wilgotności gazu
- System sterowania i diagnostyki

Podstawowy model w.cz. linii



Moduł wyjściowy (TapPoint) – część w.c.z.

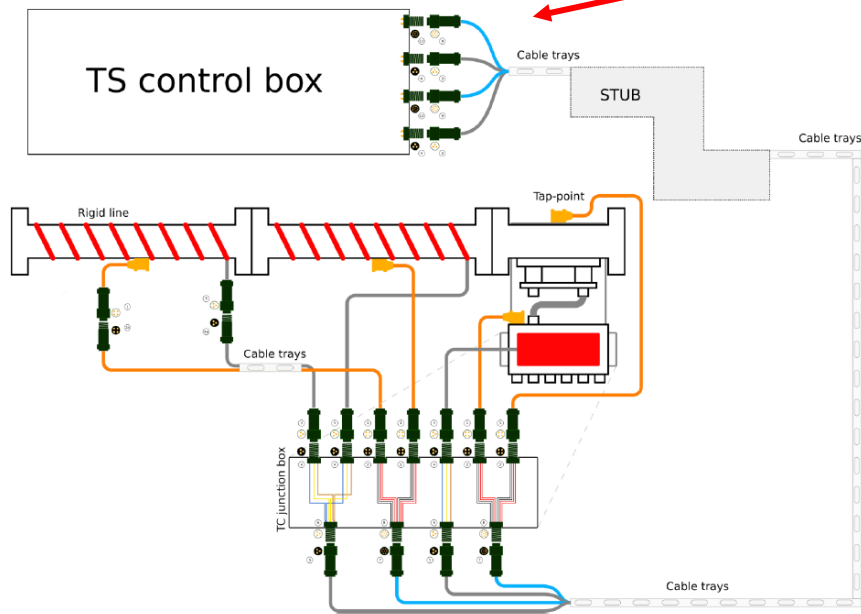


- Funkcjonalność dzielnika mocy i filtru
- **Modułowość**
- „Problem z Teflonem”
- Powinien zapewnić równy poziom mocy na obu częstotliwościach
- Minimalizacja odbić sygnałów do linii
- Dupleksery
- Stabilizacja temperatury
- Wyprodukowano i zainstalowano 58 szt.



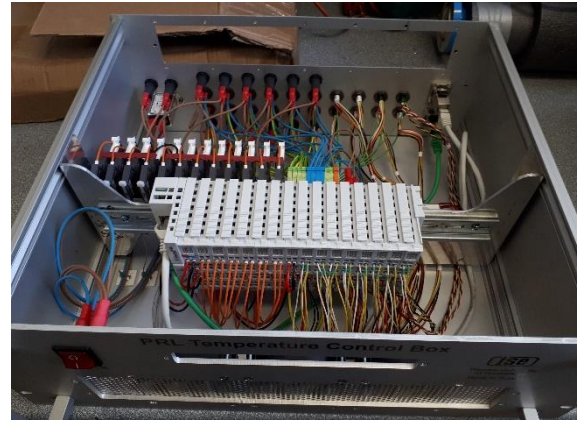
Elementy systemu stabilizacji temperatury

Uproszczony schemat jednej sekcji systemu



202 systemy
~26 km of cables

Temperature Control Box



Wyprodukowano 19 sztuk



System stabilizacji temperatury - podsumowanie

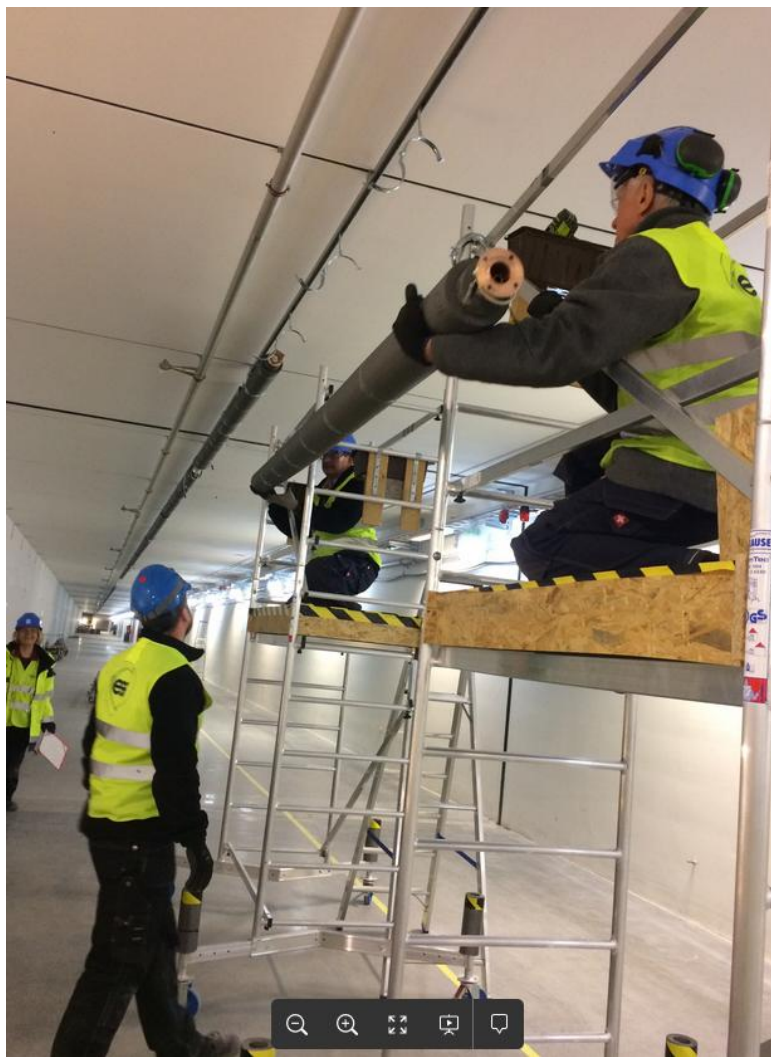
- **Zainstalowano 18 modułów TCB** obsługujących **203 obwody** stabilizacji temperatury, **275 grzałek** i **275 czujników** temperatury,
- **Uzyskano stabilizację** temperatury systemu **na poziomie 0,1 °C** na całej długości 580 m!
- **Zainstalowano 355 połączeń kablowych** pomiędzy halą Klystron Gallery, a tunelem o łącznej długości **26 km**
- **Podgrzewanie linii** od 20 °C do 40 °C powoduje jej **wydłużenie o około 13 cm!** System podwieszenia na łożyskowanych „wózkach”



Przygotowanie linii do instalacji



Zaczęliśmy instalację w pustym tunelu



Phase Reference Line po instalacji

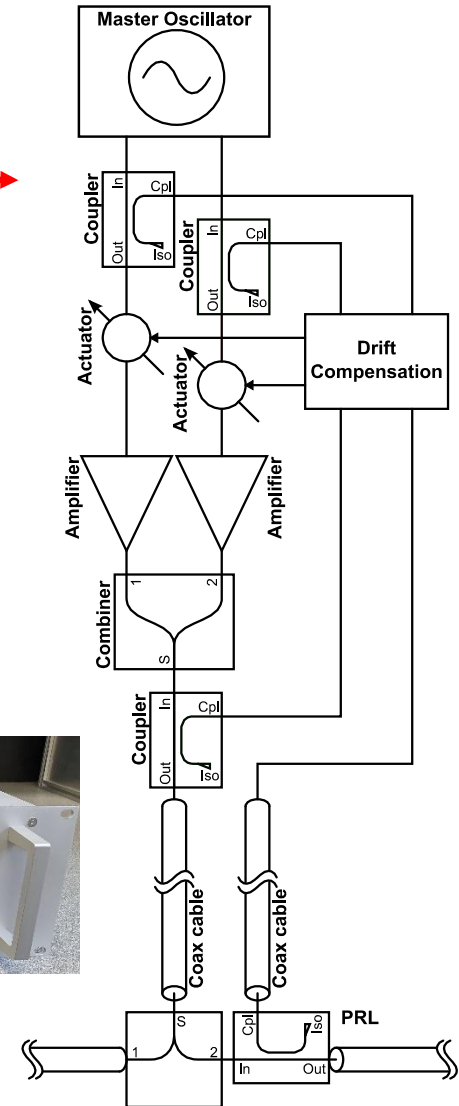
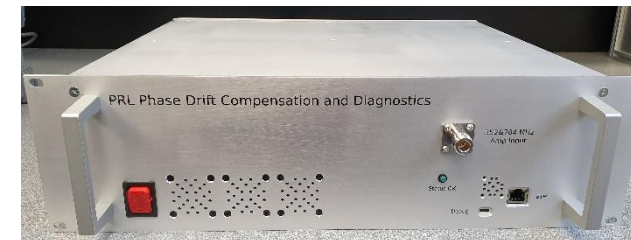
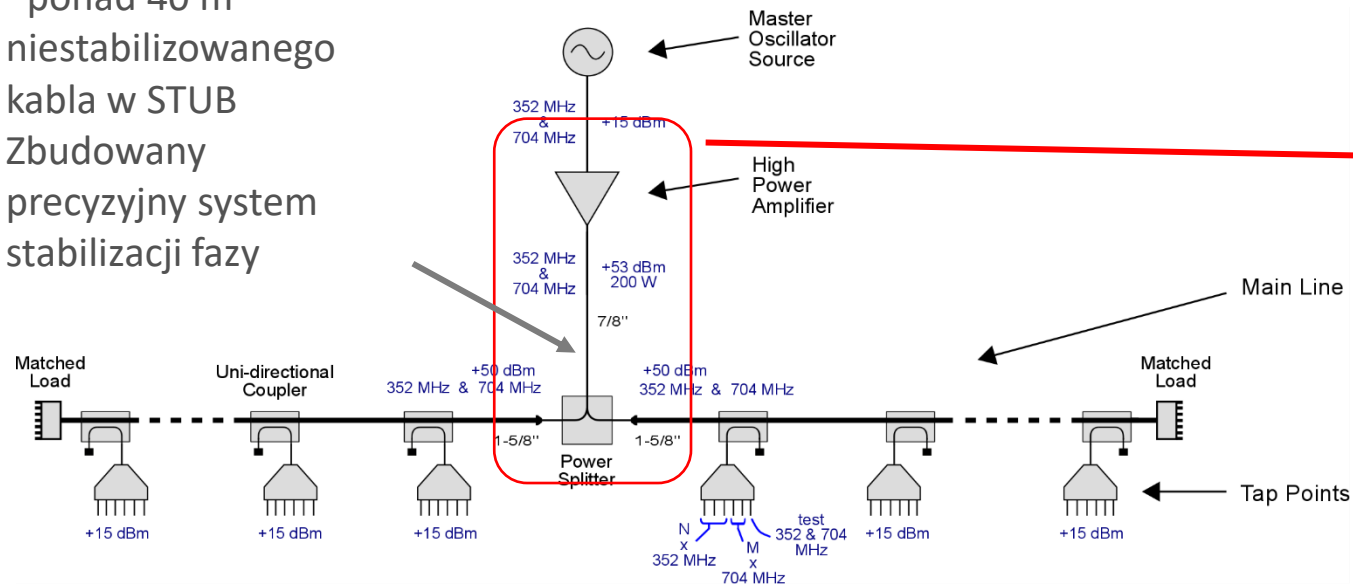
- Zainstalowane i przetestowane wszystkie elementy
- Działa od 2022
- PW przygotowuje światłowodowe łącze do monitorowania zmian fazy w hali KG
- Prawie 9-letnia przygoda kilkunastu osób ...



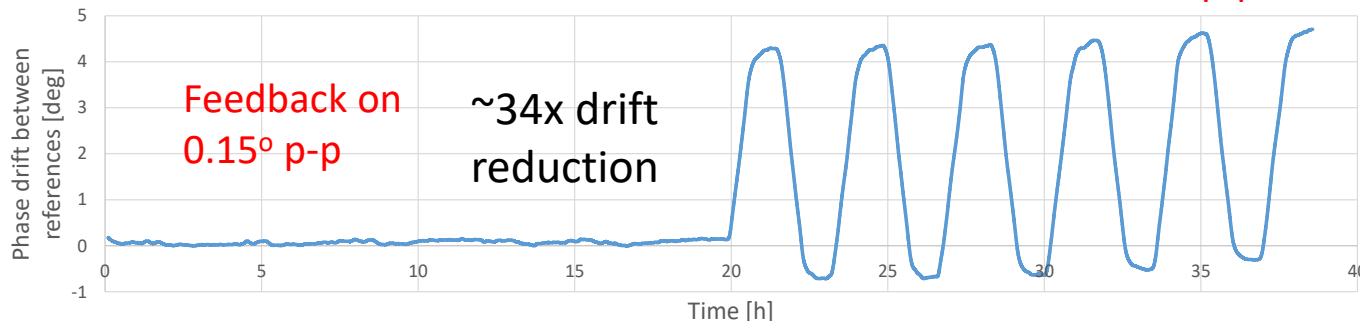
Aktywna stabilizacja dryftów fazy

Sekcja łącząca MO z linią główną w tunelu

- ~ponad 40 m niestabilizowanego kabla w STUB
- Zbudowany precyzyjny system stabilizacji fazy



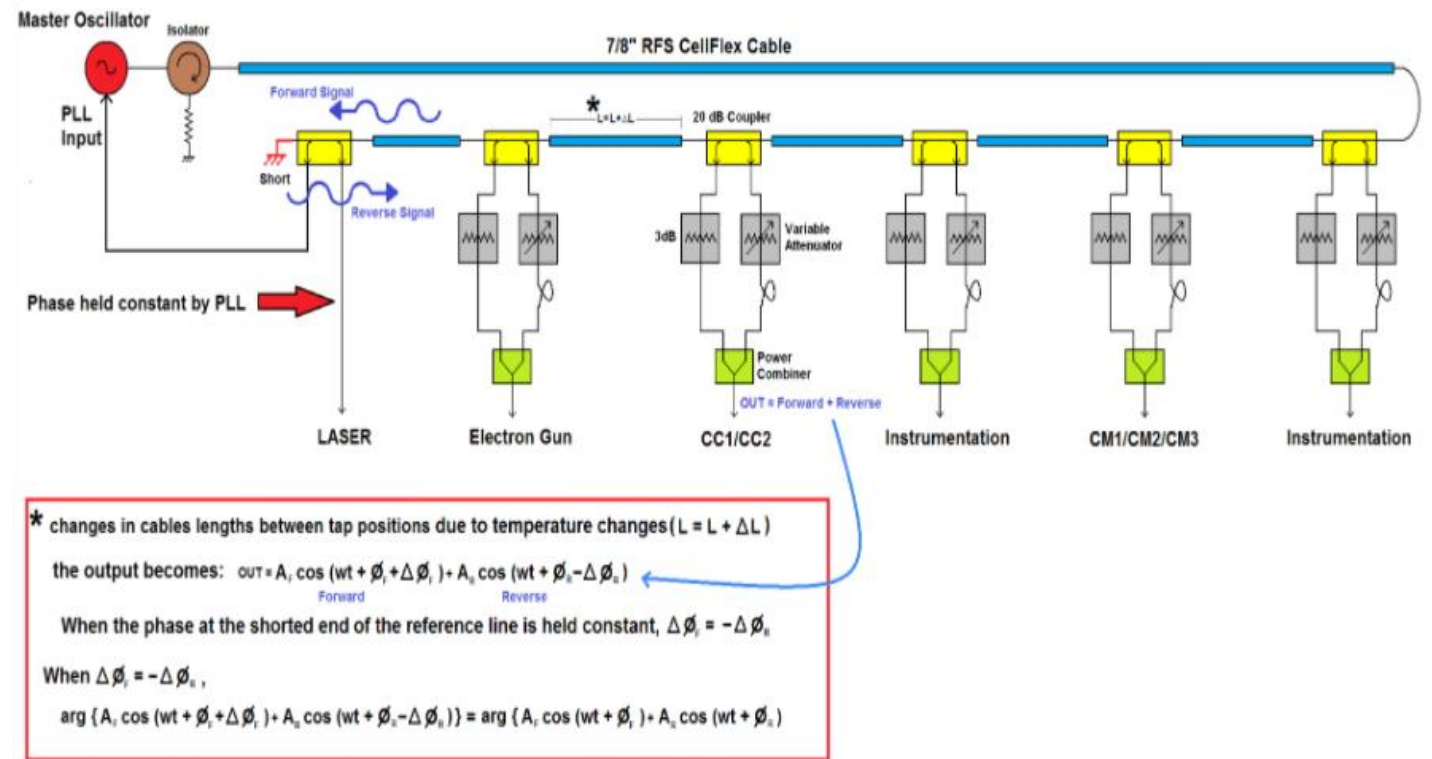
Cable Phase Drift



Active Drift Mitigation (2)

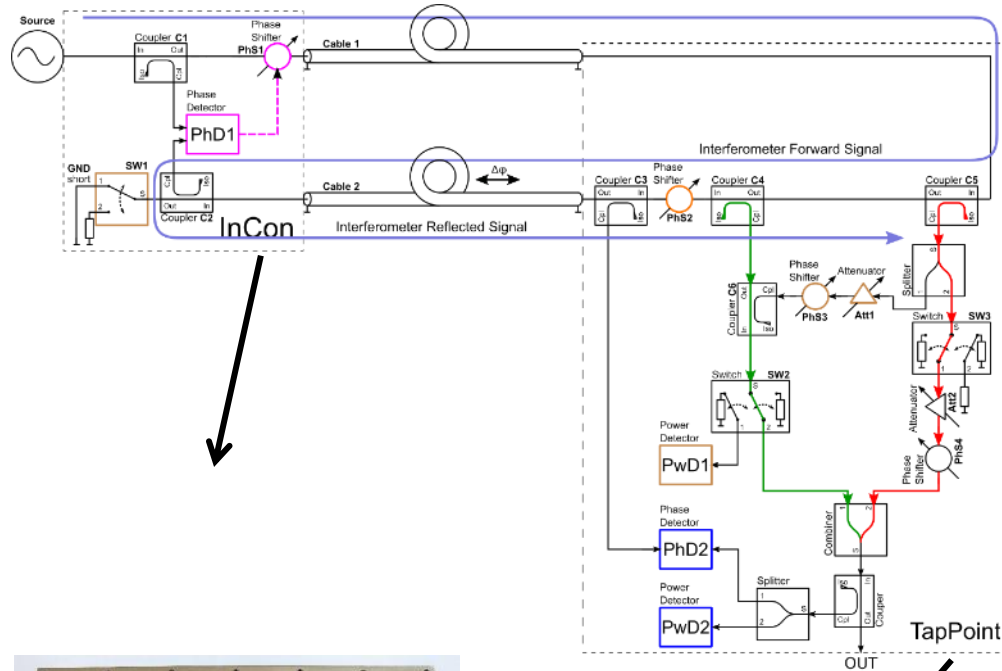
Interferometer/phase averaging scheme

- Round trip signal phase locked at the transmitter
- But also reflected back and summed at outputs of directional couplers
- Signal vector sum averages out phase drifts
- Relatively difficult to setup
- Many problems with parasitic reflections
- Offers excellent performance for up to few hundred meters



Idea by Ed Cullerton and Brian Chase (Fermilab), Presented at LLRF2011, DESY

Łącze interferometryczne dla E-XFEL



D. Sikora, ... „Phase Drift Compensating RF Link for Femtosecond Synchronization of E-XFEL”, IEEE TNS, vol. 67, 2020

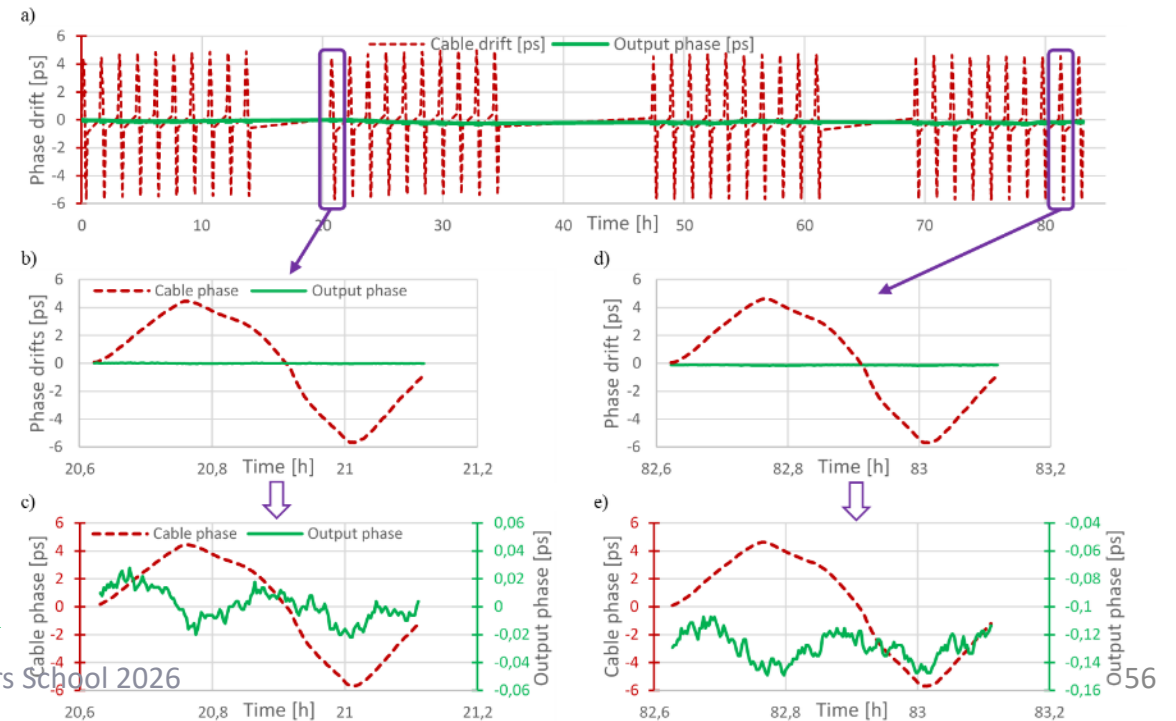
2026.10.19, K. Czuba

Testy interferometru



Dryfty fazy w przewodzie wymuszone za pomocą komory termicznej (12,3 ps p-p, symulacja ~150m przewodu)

Wynik: redukcja 200x, do 50 fs p-p w czasie 84h!



Polish Accelerators School 2026

Timing System

- Provides **triggers** initiating specified **events**
 - There is a specified trigger sequence for given event
 - Eg. Initiating filling cavities with RF field, starting RF Gun to produce bunch, running beam diagnostics, ... – entire process of passing beam through accelerator
- Provides **coded event name and time** information
 - Allows to correlate data gathered from various subsystems during selected event
- Generates and distributes clock signals

Timing System Example

- Fiducial trigger synchronized with AC mains and a common subharmonic
- Synchronized event triggers with user programmable delays
- Master timing clock, triggers and event codes combined and sent usually by optical fibers
- There are well established solutions available like the White Rabbit

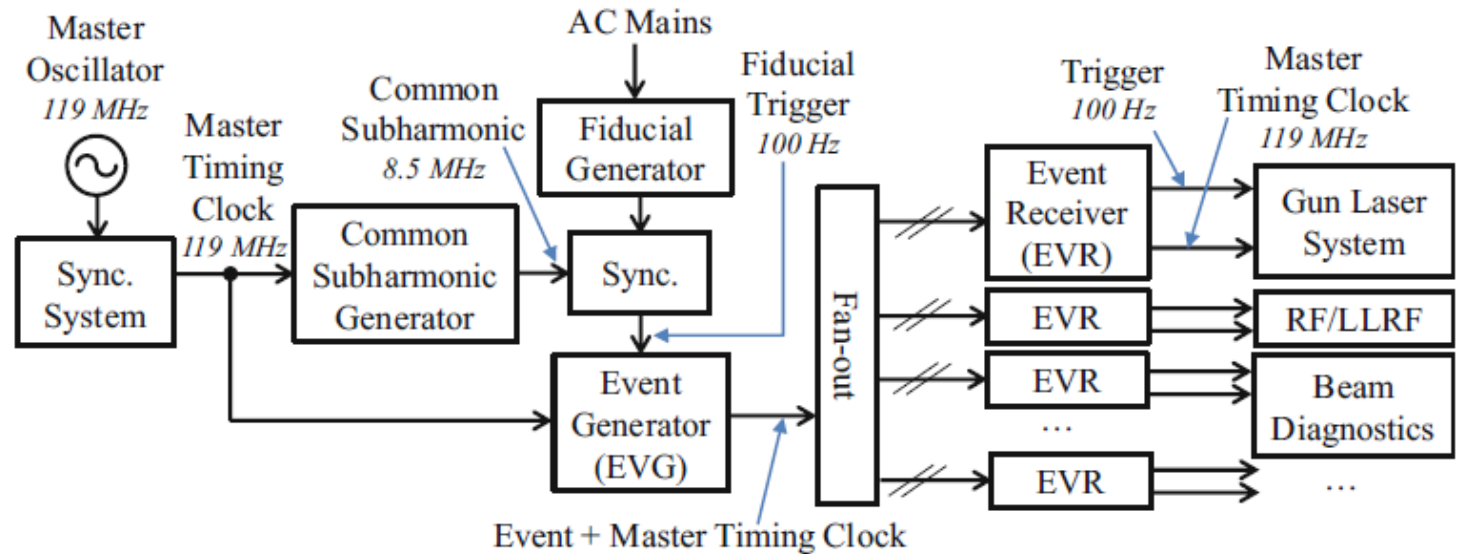
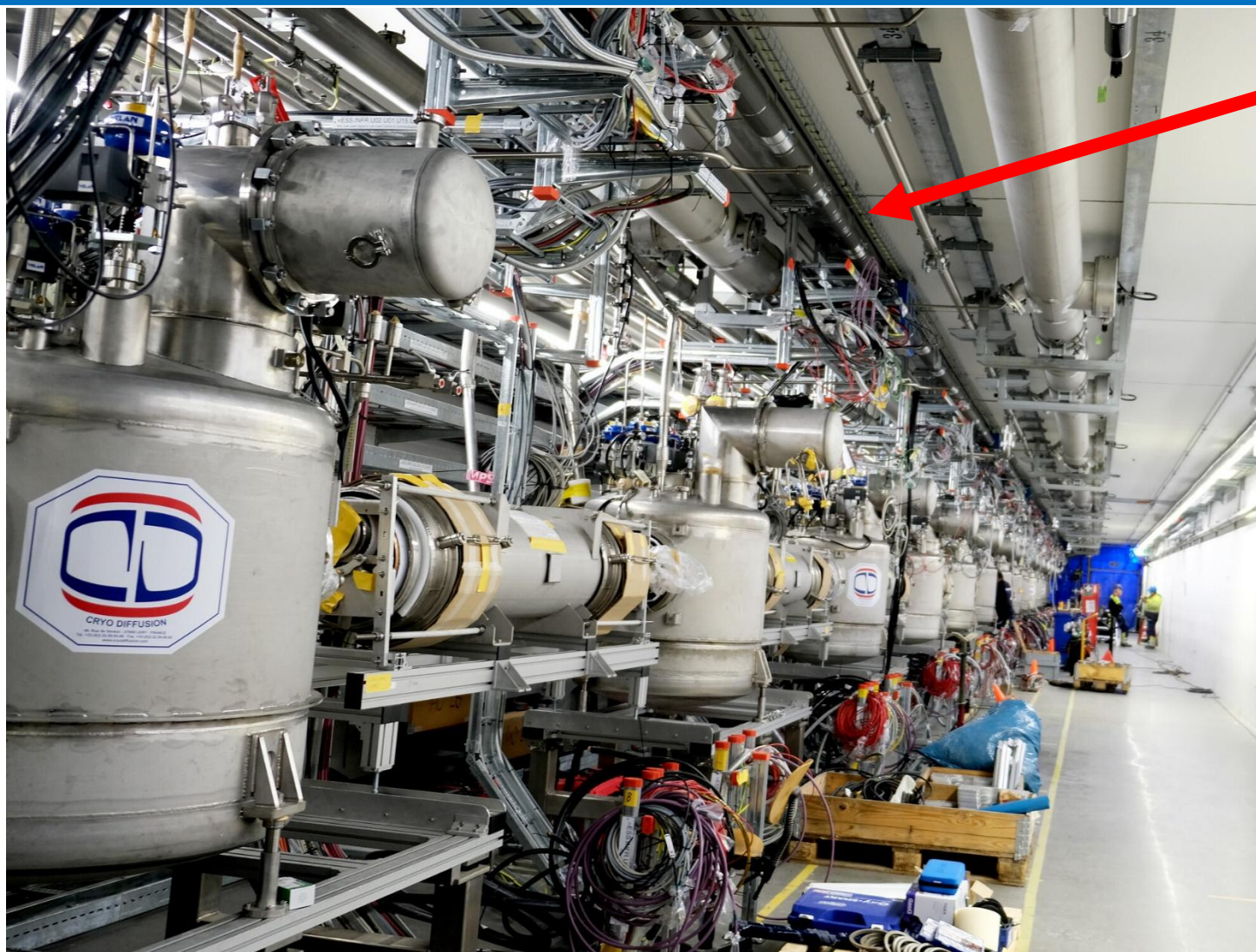


Figure source: S. Simrock and Z. Geng, Low-Level Radio Frequency Systems, 2022

Podsumowanie

- Budowa „serca” akceleratora jest fascynującym wyzwaniem
- Systemy timing’owe rozprawdzają trigger’y, informacje o zdarzeniach oraz sygnały zegarowe o mniejszej jakości (ps to ns of jitter)
- Systemy referencyjne używane są do dystrybucji sygnałów harmoniczných harmonic z femtosekundową precyzją
- Szumy fazowe są łatwe do uzyskania i dystrybucji (niestałość krótkoterminowa)
- Największy problem: dryfty fazy na dużych odległościach
- Najbardziej zaawansowane systemy dystrybucji wykorzystują techniki aktywne do zapewnienia (sub)femtosekundowych dryftów fazy
- **Systemy optyczne....**

Dziękuję za uwagę



Tu się schowało 😊