GPS PPS

Teoriden mevcut projeye zaman mapping'i

LNAV / HOW / TOW • ABS_SAMPLE • WLS clock bias
125 MHz cross-timestamp • APB atomic commit • PI loop

Tasarım hedefi

Navigation çözümünün ürettiği GPS zaman bilgisini, RF ölçüm epoch'unu kaybetmeden 125 MHz free-running zaman tabanına bağlamak; yazılım ve APB gecikmesini PPS fazına taşımadan düşük bant genişlikli bir PI ile kararlı 1 PPS üretmek.

Kapsam: mevcut C ve RTL davranışı + sentetik event-driven doğrulama modeli

Kaynak: software/pps_python

Yönetici özeti

Bu projede konum WLS'i doğru çalışırken elde edilen dördüncü state, doğrudan 125 MHz receiver clock fazı değildir. Pseudorange'lar her epoch'ta minimum ABS_SAMPLE ile normalize edildiği için RF sayacının mutlak fazı observation'dan çıkar. WLS bias; 68.802 ms sentetik datum ile minimum kanalın gözlenen uçuş süresi arasındaki ortak farkı taşır.

Yanlış başlangıç

İlk HOW/TOW interrupt'ı geldiğinde PPS zamanını 'şimdi' kabul etmek. HOW transmit subframe sınırını etiketler; receive event bundan signal flight time kadar sonradır.

Doğru başlangıç

125 MHz raw counter sürekli çalışır. İlk HOW mutlak zaman etiketini sağlar. İlk coherent WLS, uçuş süresini çıkarır ve GPS receive time'ı aynı epoch'un 125 MHz timestamp'ına bağlar.

$$T_{GPS,k} = T_{TX,k} + S - \frac{b_k}{c}$$

Minimum corrected-ABS kanalının receive GPS zamanı; ilk delivery için TTX,k = HOW + 0.180 s

$$e_k = T_{GPS,k} - T_{LOCAL}(C_{125,k})$$

PI'ye girecek gerçek phase error; GPS reference − local disciplined time

- Minimum kanal yalnız datum'u seçer; clock bias bütün uydularla birlikte çözülür.
- WLS compute ve APB gecikmesi epoch timestamp ile taşınır; PI bu gecikmeyi oscillator hatası sanmaz.
- Raw 125 MHz counter resetlenmez. PPS, ayrı bir disciplined accumulator/NCO üzerinden üretilir.
- İlk dört uydulu çözüm zaman açısından daha gürültülüdür; coarse alignment yapılabilir fakat loop düşük bant genişlikli tutulmalıdır.

Önce zamanları ayıralım

GPS system time

Uyduların navigation mesajında etiketlenen ortak zaman. HOW Z-count bunun 6 saniyelik kaba sınırını verir.

ölçüm →

RF sample time

16.368 MHz AFE kenarlarının sayımı. ABS_SAMPLE sinyalin receiver'a hangi RF sample civarında ulaştığını ölçer.

mapping →

Tracking/PPS time

125 MHz free-running counter ve ondan türetilen disciplined GPS accumulator. Fiziksel PPS kenarı 8 ns grid üzerindedir.

Sorunun özü üç zamanın aynı şey sanılmasıdır. GPS TOW transmit zamanını, ABS_SAMPLE receive olayını, 125 MHz counter ise local oscillator fazını temsil eder. PPS tasarımı bu üçü arasında timestamp'lı bir dönüşüm kurar.

$$t_{RX,i} = t_{TX,i} + \tau_i$$

Signal time-of-flight ile transmit → receive dönüşümü

$$C_{125}(t) \simeq C_0 + 125\,\mathrm{MHz}\,(1+\varepsilon_f)t$$

Free-running local oscillator; εf drift/frequency error

$$T_{DISC}(C) = T_0 + \alpha(C - C_0)$$

PPS modülünün kuracağı GPS-time mapping; α PI ile yavaşça disipline edilir

Temel kural

Bir zaman değeri tek başına yeterli değildir. Her GPS zaman referansı, geçerli olduğu hardware counter değeri ve epoch sequence ile birlikte taşınmalıdır.

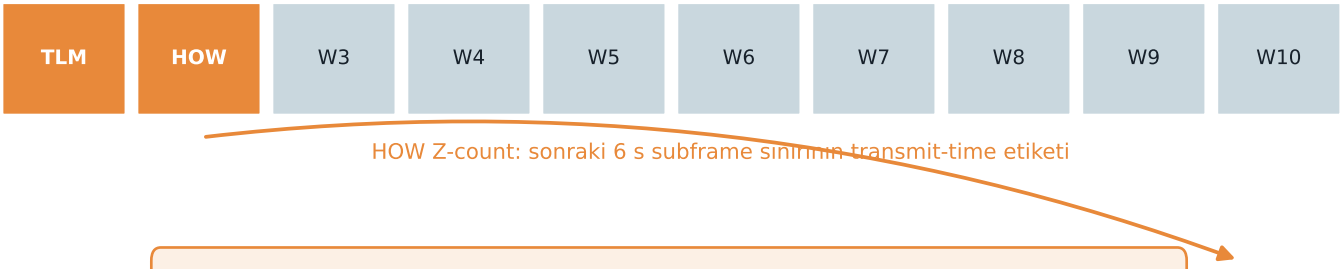
GPS L1 C/A LNAV zaman hiyerarşisi



Bir GPS frame = 5 subframe = 30 s



Bir subframe'in 10 word'ü



Mevcut hardware 9. takip eden bitte teslim eder: 9 × 20 ms = POSTPONE_TOW = 180 ms

Projede hardware ne yapıyor?

TLM preamble detection, word polarity/tümleyen ve parity akışı tracking wrapper'da yapılır. Software'e 10 adet navigation word ve subframe-ready interrupt gelir.

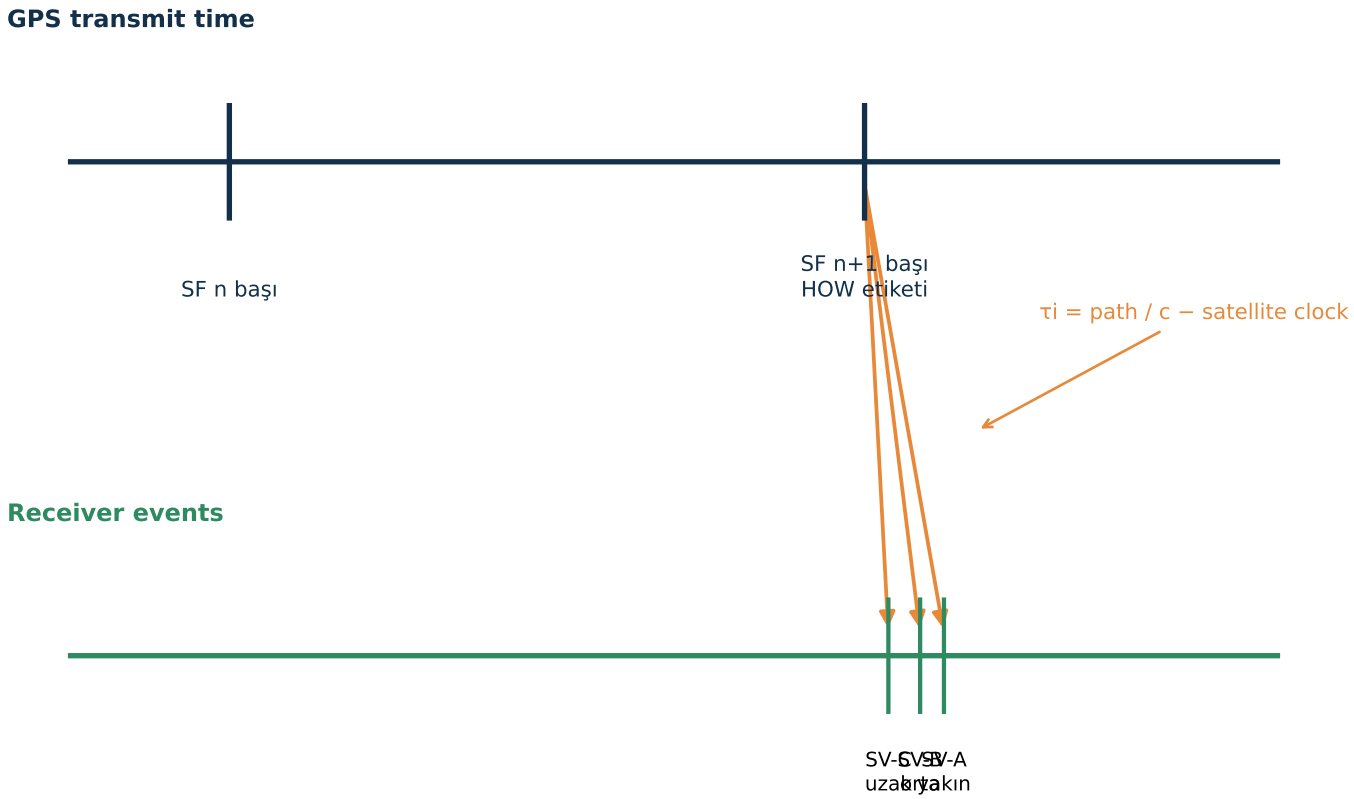
Software ne yapıyor?

parse_subframe(), HOW alanını çıkarıp Z-count × 6 ile tow.sec yapar; subframe 1–3 ephemeris, SF4 page 18 iono/UTC, SF5 almanac referansını günceller.

PPS açısından kritik anlam

HOW zaman etiketi receiver interrupt anı değildir. Uydunun saat düzeltmesi, signal flight time ve tracking/pipeline gecikmesi eklenmeden 125 MHz local counter'a bağlanamaz.

Transmit subframe sınırı receiver'a ne zaman gelir?



$$T_{RX,i} = T_{HOW} + \frac{\rho_i + I_i + T_i}{c} - \delta t_{SV,i}$$

Aynı transmit sınırı her kanalda farklı receive timestamp üretir

Hardware delivery epoch: $T_{event,i} = T_{HOW} + 0.180\,s + \tau_i$

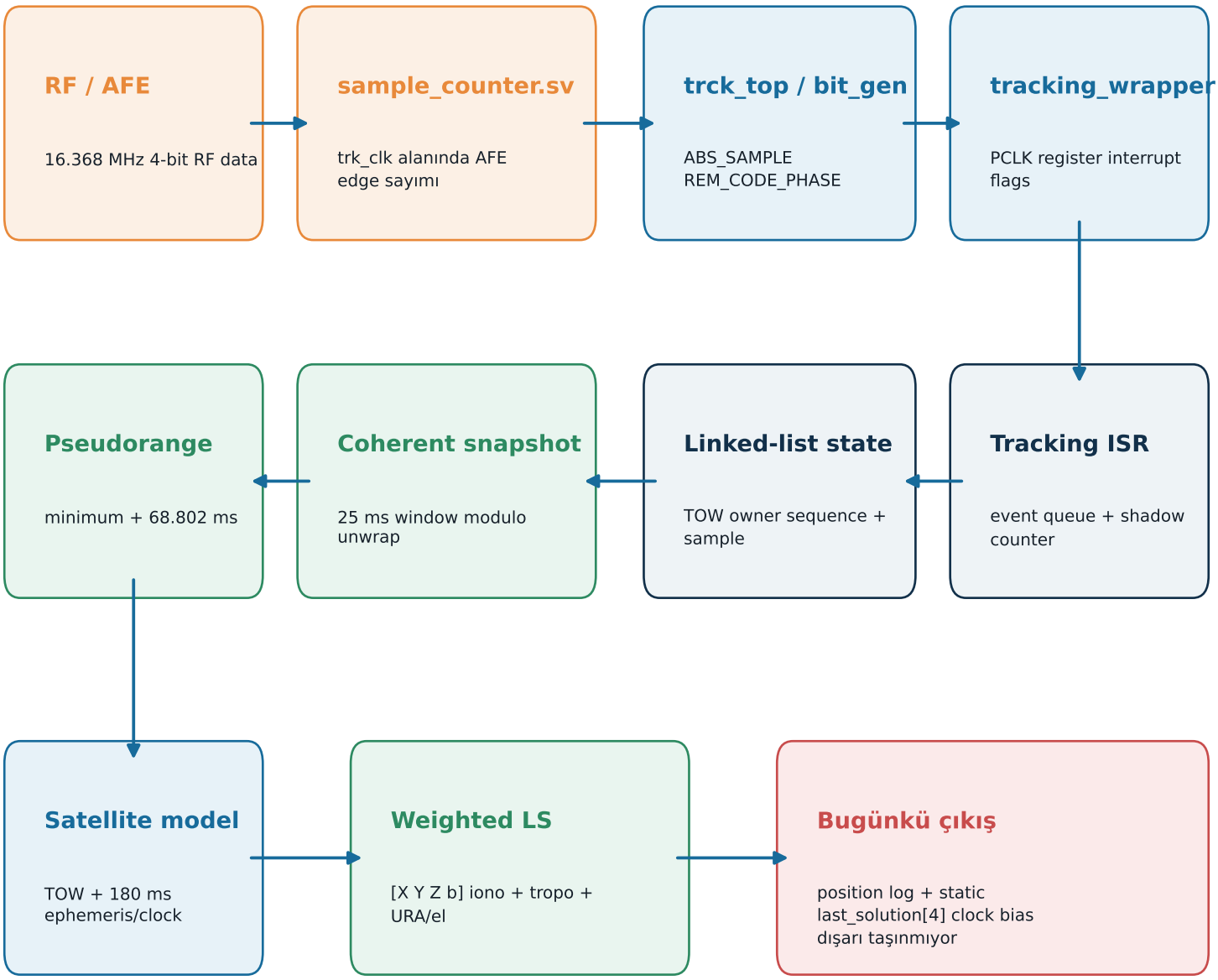
Bütün kanallar zaten locked ise

Aynı subframe sınırında en kısa gözlenen uçuş süresine sahip kanal önce event üretir. Fark birkaç ms mertebesinde olabilir.

Cold-start sırasında

Acquisition tamamlanması, bit lock ve hangi tam subframe'in yakalandığı 6 saniyelik adımlarla değişebilir; ilk HOW yalnız yakınlıkla seçilmez.

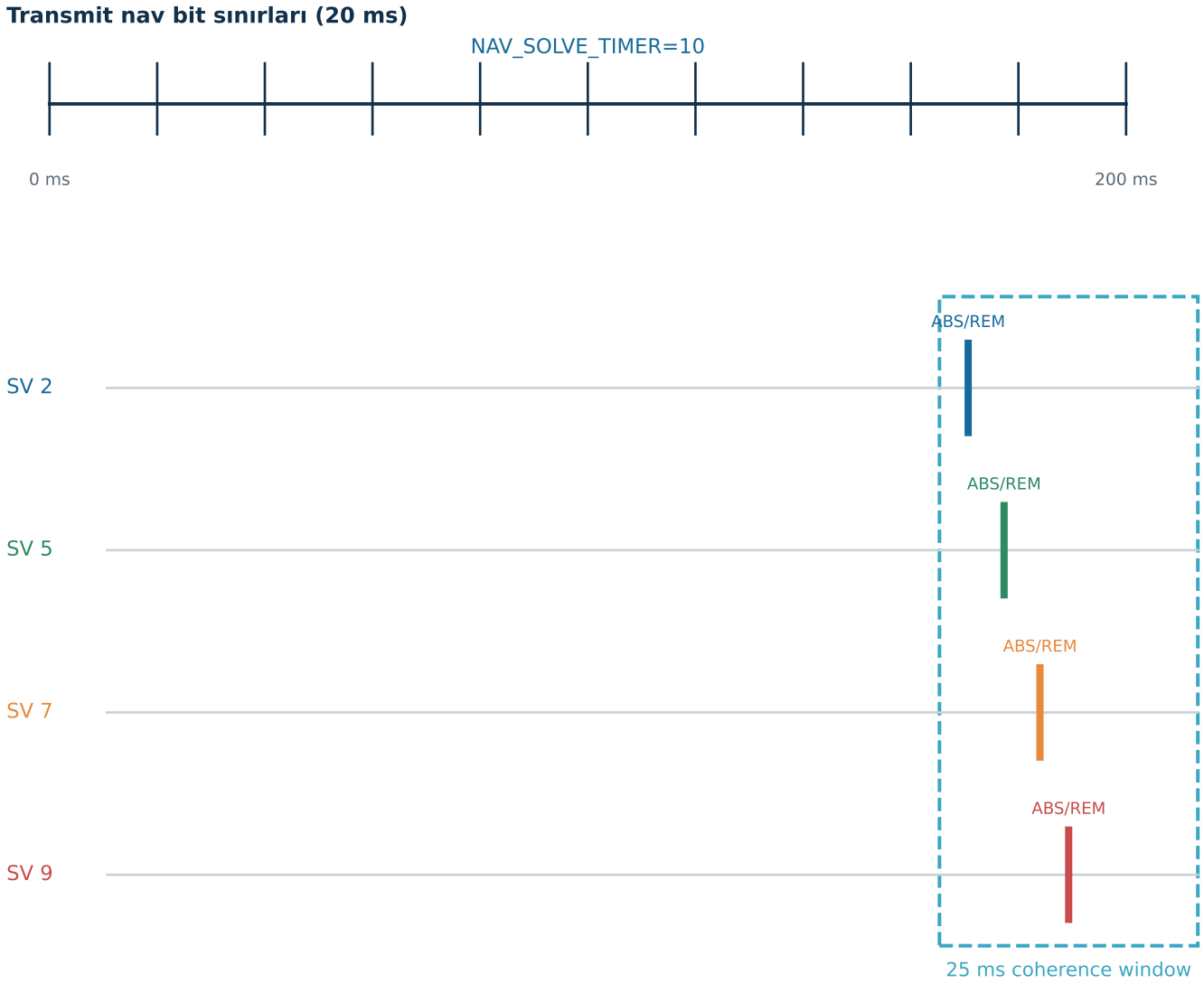
Mevcut projede ölçümün uçtan uca akışı



PPS için eklenecek veri bağı

ABS_SAMPLE ve REM_CODE_PHASE ile aynı logical measurement eventinde 64-bit tracking_counter_125 latch edilecek. WLS sonucu [b, GPS transmit label, reference SVID, counter timestamp, epoch sequence] olarak atomik taşınacak.

Nav-solve epoch ve coherency davranışı



Software snapshot

En yeni raw ABS_SAMPLE referans alınır. Diğer kanallar signed modulo-32 delta ile unwrap edilir; corrected double yalnız pseudorange'a gider.

TOW ownership

İlk gerçek nav-solve eventine kadar HOW günceller. Sonra her event TOW'u sabit N×20 ms artırır; arkadaki nav bits ephemeris'i günceller fakat live TOW'u yazmaz.

PPS timestamp da aynı snapshot kuralını izlemeli; ISR'ın okuma anı ölçüm epoch'u değildir.

Mevcut pseudorange datum'u nasıl kuruluyor?

1 Fractional RF sample düzeltmesi

$$A_i^{corr} = A_i^{raw} - \frac{REM_i}{1.023 \times 10^6}$$

2 Wrap-safe coherent unwrap ve minimum seçimi

$$A_{min} = \min_i \left(A_i^{corr}\right)$$

3 C kodundaki sentetik propagation datum'u

$$P'_i = c\left[\frac{A_i^{corr} - A_{min}}{16.368\,MHz} + S\right] + c\,\delta t_{SV,i}$$

S = 68.802 ms; gps_ip.c içinde ms formunda hesaplanır

Minimum neden var?

Raw ABS_SAMPLE'ın receiver açılışına bağlı büyük ortak sayısını çıkarır. Uydular arası arrival-time farkları korunur; konum geometrisi bu farklarda bulunur.

68.802 ms neden var?

Göreli range'leri fiziksel 20–26 bin km büyüklüğüne taşır ve WLS common bias'ı sıfıra yakın tutar. Yeni bilgi eklemez; datum seçer.

Sonuç: common RF counter fazı (A0) minimum çıkarımında iptal olur. Bu nedenle WLS b doğrudan physical 125 MHz clock phase değildir.

Weighted least squares ve dördüncü state

Standart GNSS observation modeli receiver position ve receiver clock bias'ı aynı anda çözer. Bu projede uydu saat düzeltmesi pseudorange'a eklenir; ionosphere ve troposphere WLS residual modelinde çıkarılır.

$$P_i = \rho_i(X, Y, Z) + b + I_i + T_i + \varepsilon_i$$

$$\mathbf{x} = [X\ Y\ Z\ b]^T, \qquad A_i = [-\hat{u}_{ix}\ -\hat{u}_{iy}\ -\hat{u}_{iz}\ 1]$$

$$\Delta\mathbf{x} = (A^T W A)^{-1} A^T W\,\mathbf{r}$$

Ağırlık modeli

URA varyansı ile elevation-dependent 3 m/sin(el) varyansı toplanır; ağırlık 1/variance olur ve maksimum ağırlığa normalize edilir. Normalize etmek çözümü değiştirmez.

Projeye özgü b

Matematiksel olarak common range bias state'idir. Fakat observation minimum ABS_SAMPLE ve S ile tanımlandığı için fiziksel local timer − GPS time anlamı ancak TOW ve timestamp ile handover yapıldığında oluşur.

C implementasyon notu

last_solution[4] bütün state'leri bir sonraki solve'a seed eder. Convergence normVect(xVec) ile yalnız XYZ update'e bakar; final clock update Python CSV'sinde ayrıca izlenir.

WLS bias'tan signal flight time nasıl çıkar?

Aynı transmit nav-bit sınırı için receiver arrival zamanı:

$$t_{RX,i} = t_{TX} + \frac{\rho_i + I_i + T_i}{c} - \delta t_{SV,i}$$

Bu ifade minimum-normalized observation'a yerleştirilirse:

$$b = cS - (\rho_{min} + I_{min} + T_{min}) + c\,\delta t_{SV,min}$$

b, bütün uydularla çözülür fakat observation origin'i minimum kanaldır

Dolayısıyla minimum kanalın gözlenen uçuş süresi:

$$\tau_{min}^{obs} = S - \frac{b}{c} = \frac{\rho_{min} + I_{min} + T_{min}}{c} - \delta t_{SV,min}$$

Bu değer transmit GPS time'ı receive GPS time'a taşır

Neden raw b/c PI'ye verilmez?

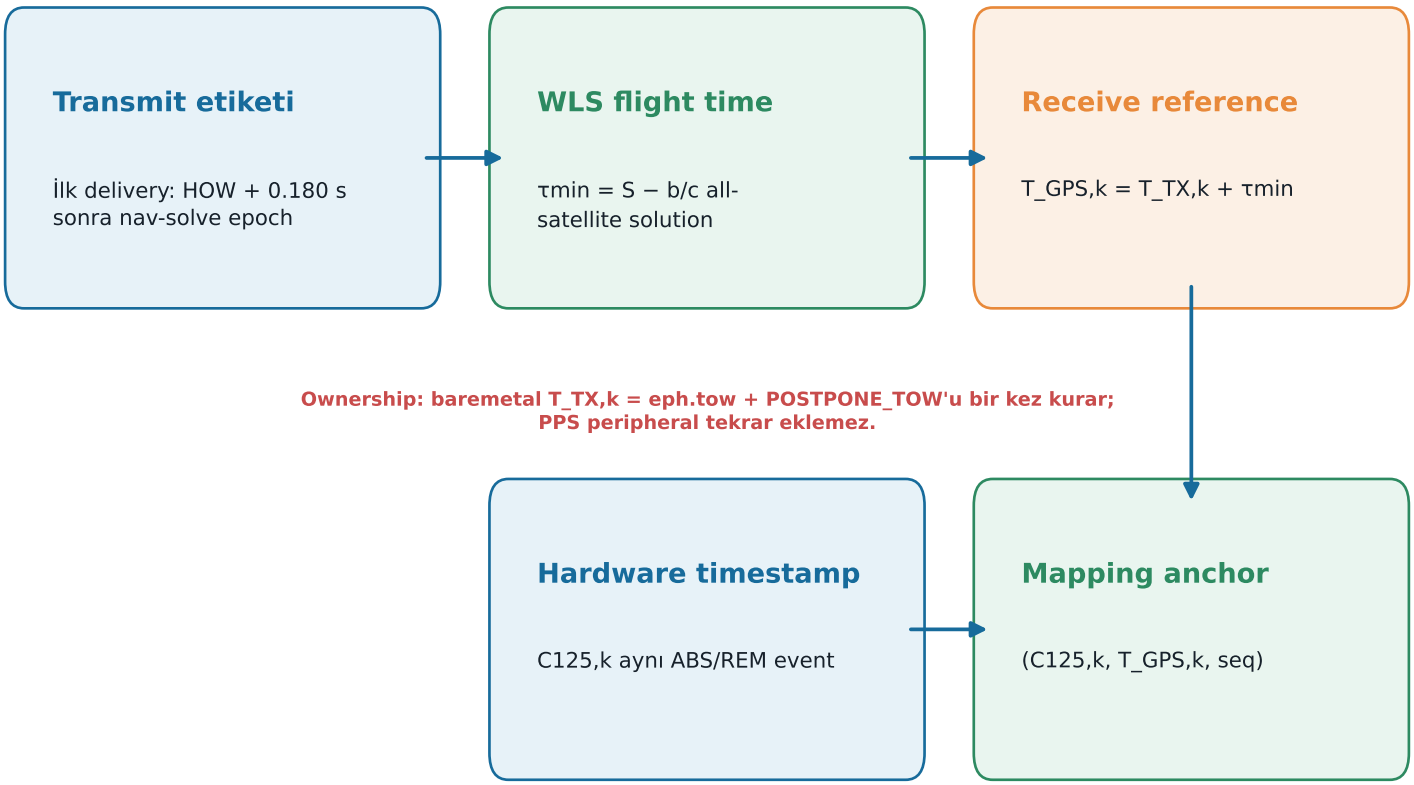
Referans uydu değişince path_min değişir ve b/c milisaniyelik basamak yapar. Bu oscillator phase step değildir; datum değişimidir.

Neden TOW + S − b/c süreklidir?

Her epoch'un transmit etiketi ve seçilen kanalın timestamp'ı birlikte değişir. Doğru çift kurulduğunda receiver GPS time sürekli kalır.

GPS time ile 125 MHz counter mapping'i

İlk coherent WLS epoch'u k



$$T_{GPS}(C) = T_{GPS,k} + \alpha_k (C - C_{125,k})$$

Başlangıçta α ≈ 1/125 MHz; TRACK state'inde PI ile küçük frequency düzeltmesi eklenir

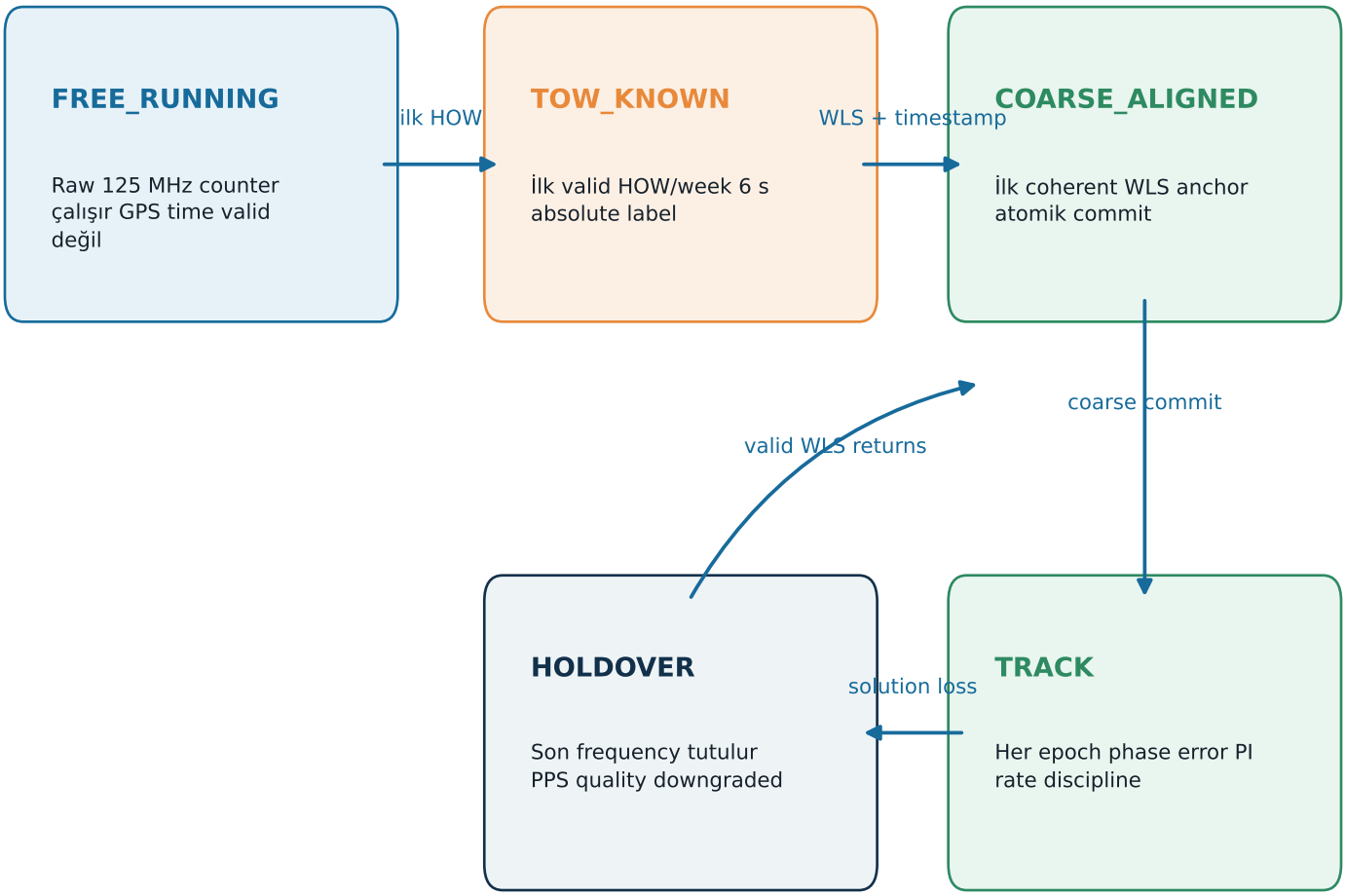
Bir başka uydu kullanılırsa

Kendi ρ+I+T ve satellite-clock düzeltmesiyle kendi receive time'ı bulunur; kendi C125 timestamp'ına bağlandığında aynı affine mapping çıkmalıdır.

Coherency residual

Per-SV mapping farkları PPS'i ayrı ayrı başlatmak için değil, stale sample, yanlış TOW veya channel timing hatasını yakalamak için kullanılabilir.

PPS zaman ownership state machine



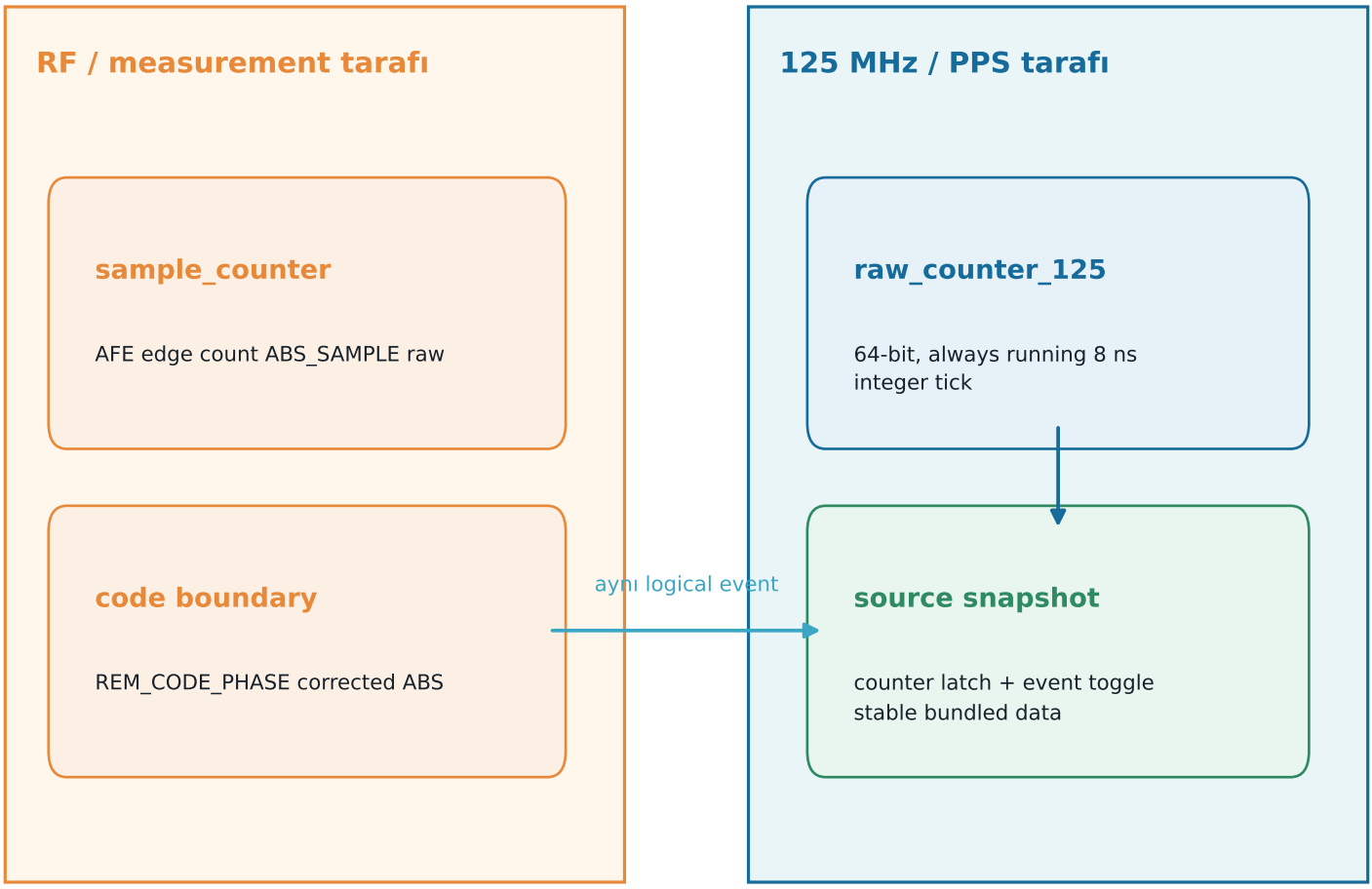
PPS valid politikası

TOW_KNOWN yalnız kaba time-of-week sağlar. Accurate PPS valid bayrağı COARSE_ALIGNED sonrası açılır. Dört uydu çözümü valid olabilir fakat quality düşük raporlanır.

Sayaç reset politikası

Raw counter hiçbir state geçişinde resetlenmez. Coarse alignment yalnız disciplined accumulator'ın anchor/offset'ini değiştirir; TRACK sırasında phase jump yapılmaz.

Cross-timestamp ve clock-domain sınırı



CDC kuralı

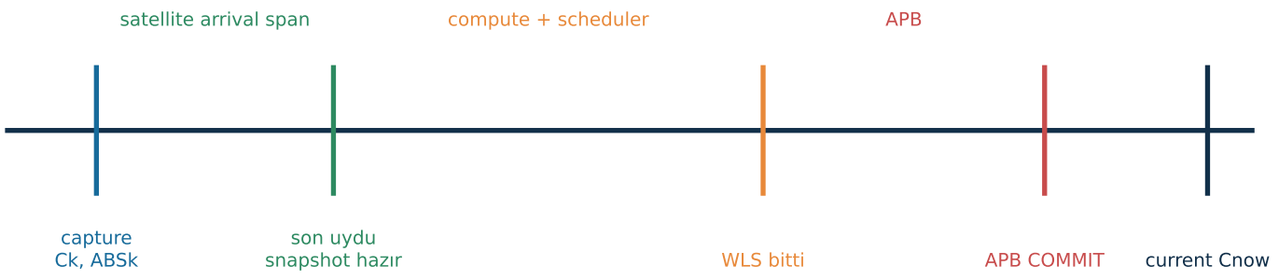
Increment eden 64-bit counter bus'ı doğrudan PCLK'de okunmaz. Source domain latch + toggle/ack veya yeterince uzun stable bundled-data protokolü kullanılır.

Fractional düzeltme

REM correction RF raw edge'den code boundary'ye geri taşır. Aynı süre 125 MHz timestamp'a da Q-format fractional tick olarak uygulanmalıdır.

Önerilen measurement tuple: {epoch_seq, raw_abs, rem_code_phase, tracking_counter_125, SVID}

WLS compute ve APB gecikmesi faza nasıl karışmaz?



$$T_{GPS,now} = T_{GPS,k} + \alpha(C_{now} - C_k)$$

Reference eski epoch'a aittir; peripheral counter farkıyla commit anına taşır

Timestamp yoksa

T_GPS,k değeri APB geldiği anda geçerli sanılır. Capture→commit süresi doğrudan phase offset gibi görünür ve PI oscillator'ı yanlış yönde sürer.

Timestamp varsa

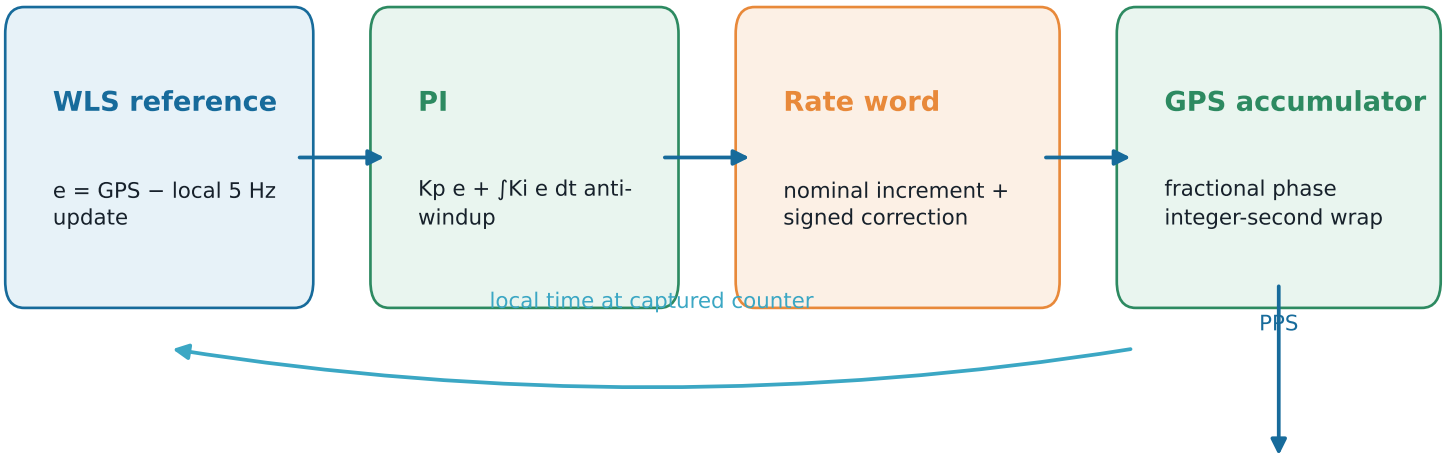
Software latency ölçümden çıkar. Geriye feedback komutunun gecikmesi kalır; düşük bant genişlikli loop içinde yalnız phase margin'i etkiler.

$$E_{used}(s) = E(s)e^{-sD}$$

D sabit feedback delay; bandwidth yükseldikçe phase margin azalır

APB register'ları shadow olmalı; bütün 64-bit/fractional alanlar yazıldıktan sonra tek sequence-tagged COMMIT yapılmalı.

PI kontrollü disciplined PPS mimarisi



$$I_k = clip(I_{k-1} + K_i T_s e_k)$$

$$u_k = clip(I_k + K_p e_k), \qquad f_{disc} = f_{raw}(1 + u_k)$$

Neden raw counter değişmez?

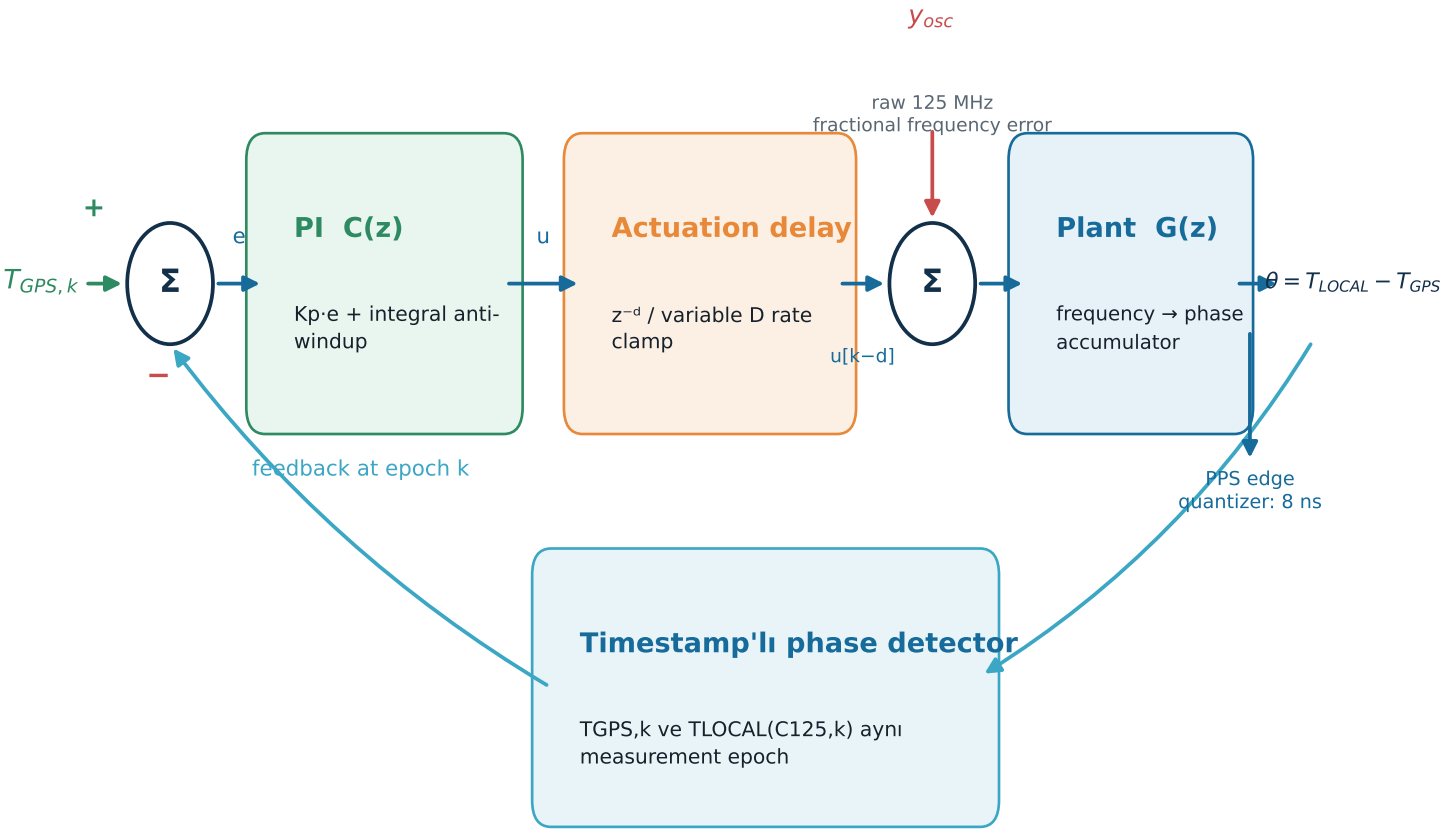
Debug ve timestamp monotonic kalır; phase jump oluşmaz. Coarse alignment ve PI yalnız GPS accumulator mapping'ini değiştirir.

125 MHz ne sağlar?

Fiziksel PPS edge 8 ns grid'dedir.
Fractional accumulator uzun dönem frequency çözünürlüğünü iyileştirir fakat tek edge'i clock kenarları arasına koyamaz.

Python başlangıç parametreleri: natural frequency 0.035 Hz, damping 0.9, max slew 20 ppm. Final değerler kart oscillator logundan seçilmelidir.

Kontrol loop'unun kapalı çevrim modeli



$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}, \qquad G(s) = \frac{1}{s}, \qquad L(s) = \frac{C(s)e^{-sD}}{s}$$

PI rate düzeltmesi üretir; accumulator frequency error'ı phase'e integre eder

$$I_{k+1} = clip(I_k + K_i T_s e_k), \quad u_k = clip(I_k + K_p e_k)$$

Ts = NAV_SOLVE_TIMER × 20 ms = 200 ms; update rate 5 Hz

$$\theta_{k+1} = \theta_k + T_s(y_{osc,k} + u_{k-d}) + w_k, \qquad e_k = -\theta_k + v_k$$

θ local−GPS phase; v WLS/timestamp noise, w unmodelled phase disturbance

Coarse alignment bu lineer TRACK loop'un dışında, bir defalık anchor yüklemesidir. HOLDOVER'da e_k güncellenmez; integrator/rate word dondurulur.

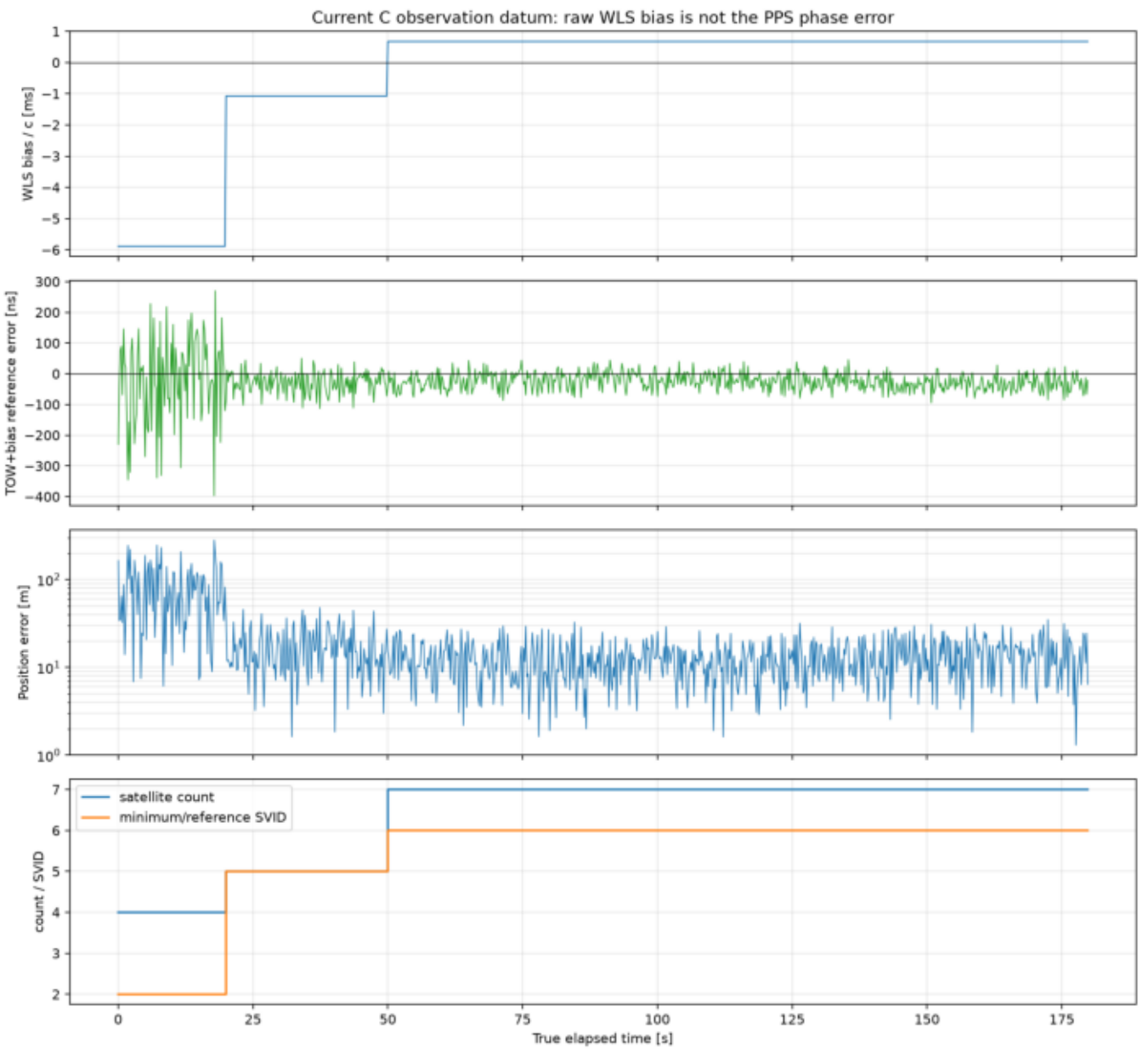
Python event-driven modelinde ne taklit edildi?

RF clock	16.368 MHz, ortak/bağımsız ppm drift, 32-bit wrap, fractional REM correction
Navigation	Ortak 20 ms transmit-bit epoch; NAV_SOLVE_TIMER=10 → 200 ms
Satellite	Sentetik gerçekçi ECEF/az-el geometrisi, satellite clock, path delay
Corrections	Earth rotation, Klobuchar, aktif C troposfer modeli, URA/elevation noise
Firmware	Modulo unwrap, minimum + 68.802 ms, clock correction, cached four-state WLS
Latency	Satellite arrival span, WLS compute, scheduler stall, APB jitter
PPS	125 MHz raw oscillator, coarse mapping, timestamped/untagged PI, 8 ns edge grid

Modelin sınırı

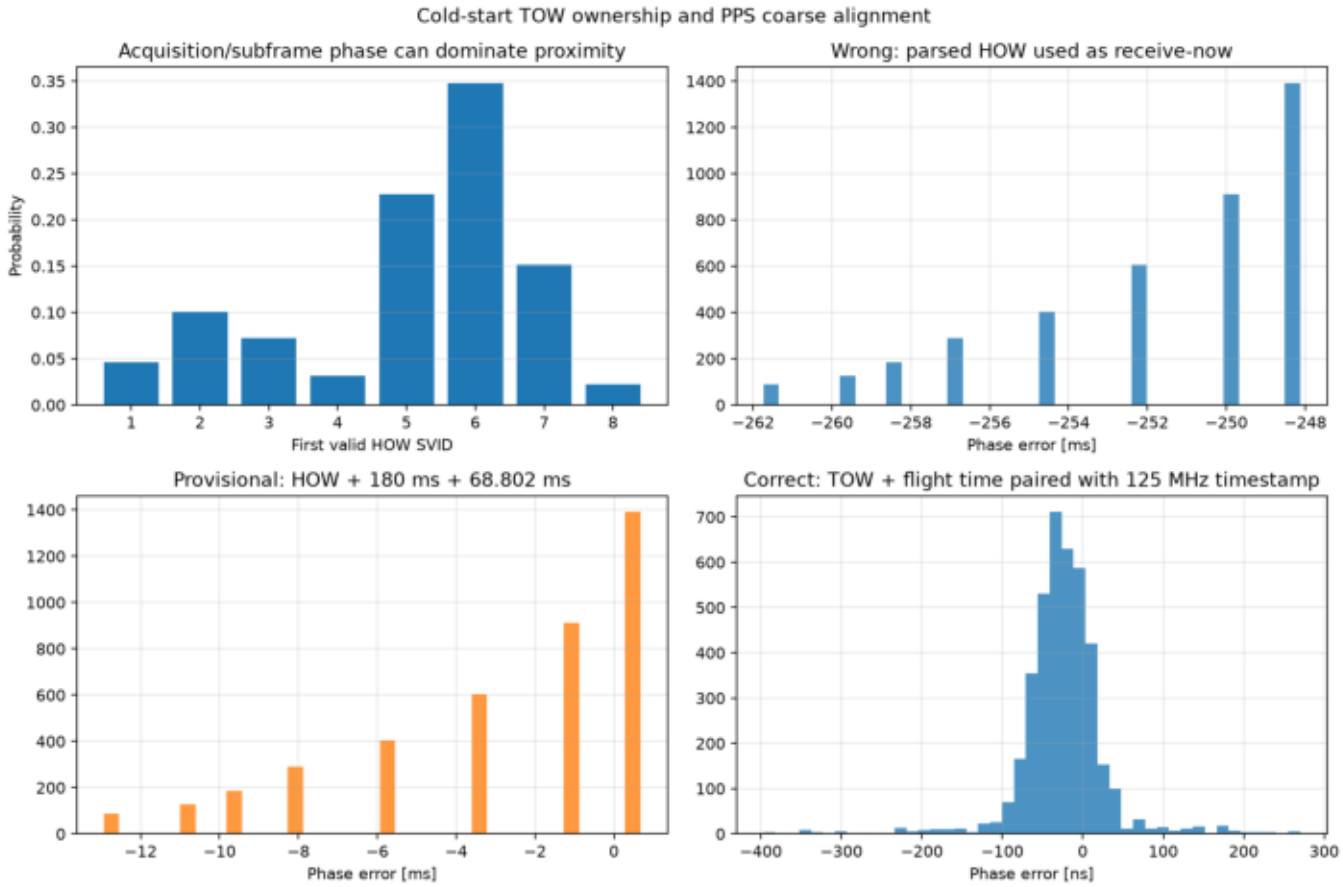
Gerçek broadcast ephemeris ve kart oscillator phase-noise kaydı yerine sentetik geometri/drift kullanılır. Bu rapordaki sayısal PI sonucu mimariyi doğrular; final performans garantisi değildir.

WLS datum, reference değişimi ve cold-start geometri



Raw b/c referans SVID değişince milisaniyelik basamak yaparken TOW+bias ile rekonstrükte edilen zaman hatası ns seviyesinde kalır. Dört uydulu ilk bölüm position/clock açısından belirgin şekilde daha gürültülüdür.

İlk HOW neden PPS receive-now değildir?



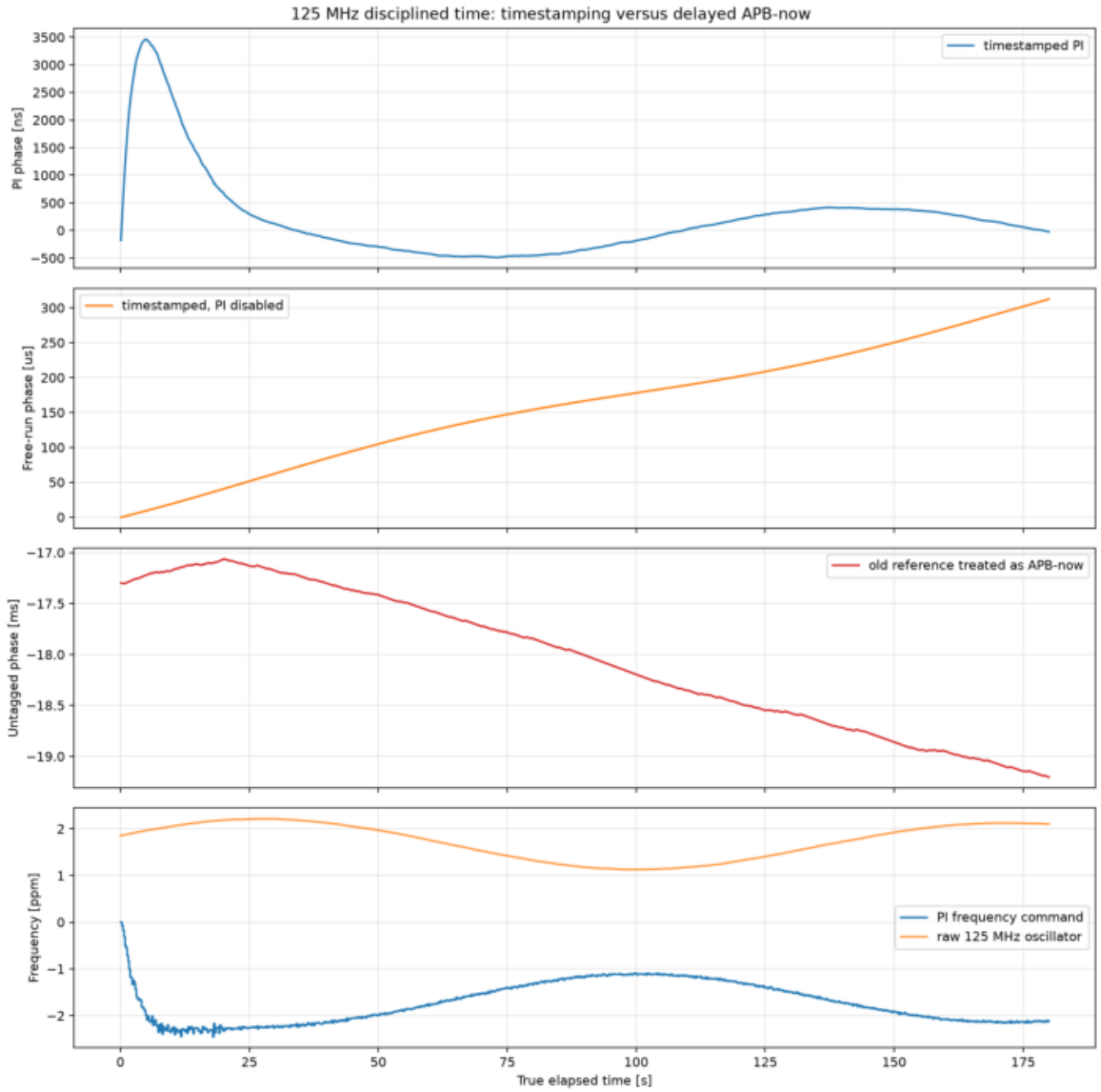
Sentetik acquisition/subframe Monte Carlo: mevcut hardware delivery, dokuzuncu takip eden bit nedeniyle HOW sınırından 180 ms ve signal flight time kadar sonradır. HOW +180 ms +68.802 ms kaba yaklaşım bırakır; WLS flight-time + paired timestamp doğru handover'dır.

Capture-to-commit gecikme bileşenleri



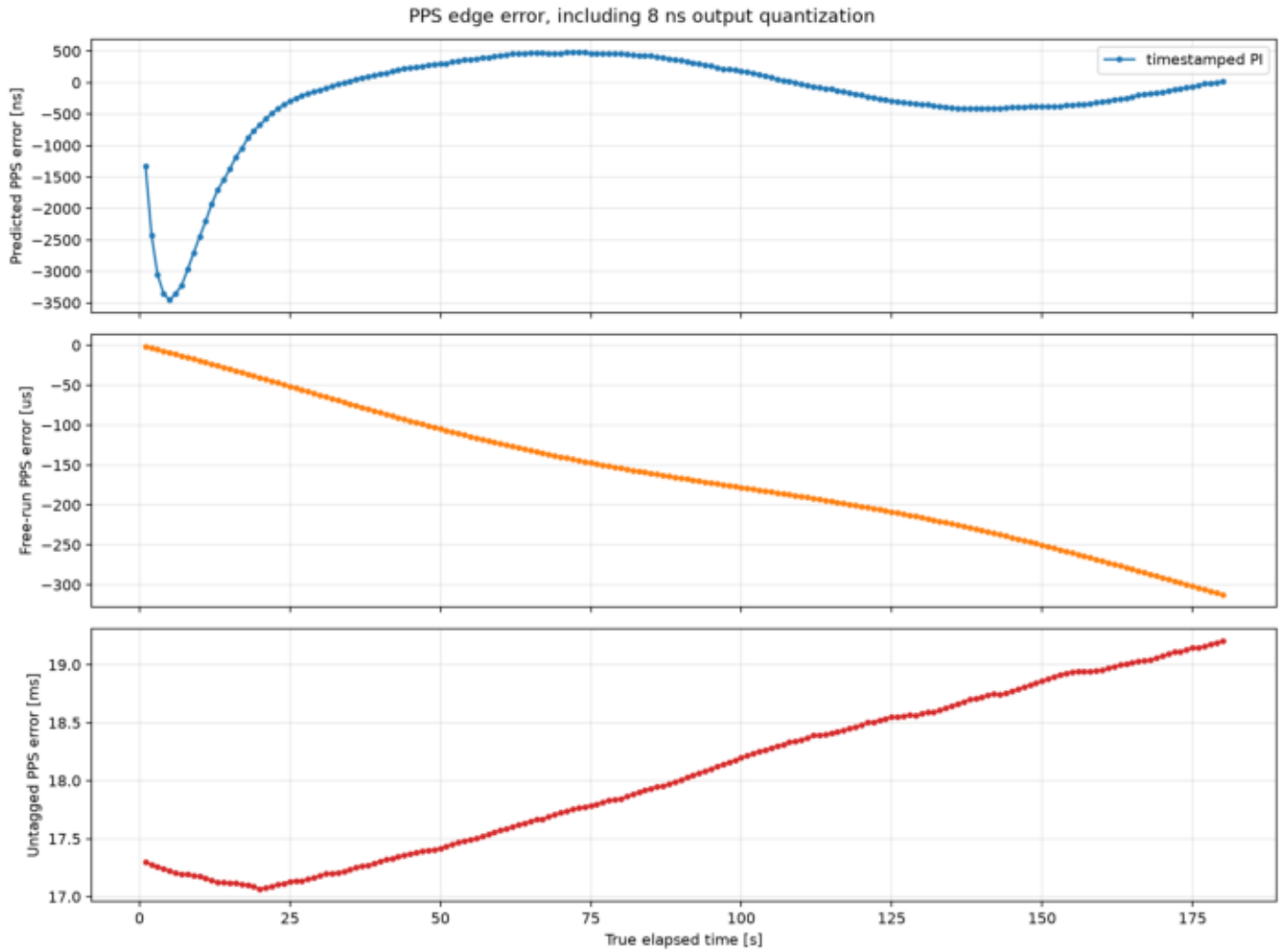
Satellite arrival span, WLS compute ve APB delay aynı epoch'un age bilgisidir. Timestamp varsa phase offset değildir; timestamp yoksa doğrudan PPS hatasına dönüşür.

Timestamp'lı PI loop cevabı



Timestamp'lı PI raw oscillator driftini rate command ile karşılar. PI kapalı clock yüzlerce µs sürüklenir; eski GPS referansını APB-now sanan kontrol ise ms seviyesinde yanlış faza oturur.

PPS edge sonucu ve 8 ns output grid



Timestamp'lı loop ilk transient sonrasında sub-µs bölgeye iner. Bu sentetik katsayı sonucu mimari karşılaştırmadır; gerçek kart noise/drift verisi olmadan final doğruluk iddiası değildir.

Önerilen PPS APB sözleşmesi

Register	Yön/format	Anlam
CONTROL	RW / bitfield	enable, coarse_commit, track_enable, holdover, clear_status
STATUS	RO / bitfield	tow_known, aligned, tracking, pps_valid, stale_seq, saturation
RAW_COUNTER	RO / uint64	Değiştirilmeyen 125 MHz free-running counter
EPOCH_COUNTER	WO shadow / uint64	WLS referansının geçerli olduğu captured counter
GPS_SECONDS	WO shadow / uint64	Baremetal tarafından epoch-aligned edilmiş GPS reference second
GPS_FRACTION	WO shadow / Q0.32	Receive GPS time fractional second
EPOCH_SEQUENCE	WO shadow / uint32	Out-of-order/stale APB commit koruması
KP / KI	RW / fixed point	PI coefficients; units register spec'te açık tanımlanmalı
MAX_SLEW	RW / signed ppm/Q	Rate correction clamp ve anti-windup sınırı
COMMIT	WO / pulse	Bütün shadow alanları tek tracking-clock eventinde aktive eder
PPS_DIAG	RO / signed	Son phase error, integrator, rate word, age/quality

Format ilkesi

Hardware'a double taşınmaz. Counter integer tick, GPS fraction ve rate correction için açık signed/unsigned Q formatları; software conversion ve saturation kuralları birlikte tanımlanır.

Uygulama sırası: ölçülebilir küçük adımlar

1

Measurement contract

WLS result struct: XYZ, b, reference SVID, corrected ABS, C125, TOW, sequence.

2

Timestamp-only RTL

64-bit raw counter ve ABS/REM ile paired per-channel capture; PPS üretme.

3

Cross-check

ΔC125 ≈ ΔABS × 125/16.368 ilişkisi, wrap ve fractional REM testi.

4

Open-loop coarse

İlk HOW + coherent WLS ile affine anchor; PI=0, yalnız PPS scheduling.

5

Latency injection

WLS/APB'ye yapay delay ekle; timestamp'lı PPS fazı değişmemeli.

6

P-only

İşaret, Q format, max slew ve phase response doğrulaması.

7

PI track

Kart drift/noise logundan Kp/Ki seç; saturation ve holdover testleri.

8

System tests

4/5/7 SV, drop/re-acq, reference change, week rollover, stale commit.

Go/no-go kuralı

Bir aşamanın timestamp ve sign testi geçmeden sonraki kontrol katmanı açılmaz. İlk hardware hedefi iyi PPS değil, doğru ölçüm epoch'udur.

Doğrulama matrisi ve beklenen sonuç

Test	Beklenen	Kanıtlanan
ABS common +5 ms	XYZ aynı; normalized b aynı	Observation common phase iptalini kanıtlar
STARTOFFSET +1 ms	XYZ aynı; b +c×1 ms	Datum dönüşüm işaretini kanıtlar
32-bit ABS wrap	Pseudorange süreklidir	Signed modulo unwrap
Reference SVID değişimi	Raw b step; mapped GPS time continuous	Min datum ownership
APB +50 ms delay	Timestamped PPS fazı değişmez	Epoch association
Out-of-order commit	Eski sequence reject	Stale result koruması
4 → 7 satellite	Timing noise azalır; loop stabil kalır	Cold-start geometri
Tracking drop/re-acq	No phase jump; quality/holdover doğru	State transition
GPS week rollover	Continuous seconds ve PPS düzgün	TOW normalization
HOW pipeline sweep	Sabit calibrated offset	POSTPONE/pipeline semantiği

Kart ölçümünde gerekli log

epoch sequence, SVID set, raw/corrected ABS, C125 capture, TOW source, WLS b, mapped phase error, PI integrator/rate, compute/APB age ve PPS edge timestamp.

Projede ölçülerek kapatılacak açık noktalar

HOW boundary semantiği

parse_subframe Z-count × 6 yapıyor. Full-subframe interrupt, bit_gen ABS_SAMPLE ve gerçek transmit next-subframe sınırı arasındaki sabit pipeline cycle sayısı scope/ILA ile ölçülmeli.

POSTPONE_TOW = 0.180

Mevcut RTL readout gecikmesidir: doğrulama dokuzuncu takip eden bitte yapılır; 50 bit/s hızda 180 ms. Mevcut satpos() kullanım anında bir kez ekler; PPS peripheral tekrar eklemez.

RF ↔ 125 MHz bağı

Aynı PLL/reference mı, bağımsız mı? Ortak drift ve independent jitter ölçülmeli; cross-timestamp uncertainty buna göre bütçelenmeli.

Cold-start WLS timing

Dört uyduda vertical/clock korelasyonu yüksek. Coarse alignment yapılabilir; PPS quality düşük işaretlenmeli ve PI bandwidth agresif seçilmemeli.

Atmosfer/multipath

Iono/tropo modele girse de residual b ve position'a sızar. Timing-only mode veya sabit/smoothed position ileride clock çözümünü iyileştirebilir.

Hardware fixed point

Phase, frequency word, Kp/Ki ve fractional timestamp Q formatlarının overflow, saturation ve rounding davranışı bit-accurate Python modeline eklenmeli.

Tasarım sonucu

Bu açık noktalar PPS mimarisini değiştirmez; yalnız sabit offset, uncertainty bütçesi ve final PI katsayılarını belirler.

Sonuç: projeye uygun en yalın PPS zinciri

1 — Raw clocks

16.368 MHz measurement + 125 MHz monotonic counter

2 — Paired capture

ABS / REM / C125 / sequence aynı event

3 — Coherent WLS

minimum datum + all-satellite [XYZ b]

4 — GPS receive time

T_TX(epoch-aligned) + 68.802 ms − b/c

5 — Atomic mapping

(C125,k, TGPS,k, seq) shadow + commit

6 — Disciplined PPS

immutable raw counter + low-bandwidth PI accumulator

$$e_k = (T_{TX,k} + S - b_k/c) - T_{LOCAL}(C_{125,k})$$

Bütün raporun tek satırlık özeti

En önemli mimari karar

İlk uydu PPS'i başlatmaz. Baremetal HOW'a 180 ms readout düzeltmesini bir kez uygular; ilk coherent WLS bu etiketi free-running 125 MHz counter'a bağlar. PPS peripheral 180 ms'yi tekrar eklemez.