

Навигационно-пилотажные приборы ПНК



Сроки

Время лекций: Четверг 15.40-17.15 (17.25 - 18.10)

Аудитория: 413ю

Лекция					
Пилотажно-навигационные Приборы ПНК	<i>Д.Т.Н. профессор Окоёмов Барит Николаевич</i>	01	10.02.2011	05	10.03.2011
		02	17.02.2011	06	17.03.2011
		03	24.03.2011	07	24.03.2011
		04	03.03.2011		
Глобальные спутниковые навигационные системы (ГСНС)/ Современные ПНК	<i>Братанов Дмитрий Александрович dm.bratanov@gmail.com</i>	л1	31.03.2011	л5	28.04.2011
		л2	07.04.2011	л6	12.05.2011
		л3	14.04.2011	л7	19.05.2011
		л4	21.04.2011	л8	26.05.2011
		дз	05.05.2011	Зачет	



Лекция 4. Линейные разности, модели погрешностей

1. Двойные разности
2. Тройные разности
3. Линейные комбинации
 1. Ionosphere-free Linear Combination
 2. Geometry-free Linear Combination
 3. Widelane Linear Combination
 4. Melbourne-Wubbena Linear Combination
 5. Multipath Linear Combination
4. Атмосферные преломления



RINEX file

RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) 3.01 format

- 1. Observation data File
- 2. Navigation message File
- 3. Meteorological data File



Уравнения наблюдений

Уравнения наблюдений фазы (phase observation equation), включая ошибки часов, атмосферные задержки и ошибки измерений, для двух несущих частот:

$$L_{1r}^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s + T_r^s - I_r^s + \lambda_1(N_{1A}^j - \alpha_1^j + \alpha_{1A}) + \varepsilon_{1r}^s$$

$$L_{2r}^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s + T_r^s - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_r^s + \lambda_2(N_{2A}^j - \alpha_2^j + \alpha_{2A}) + \varepsilon_{2r}^s$$

Geometric Clock Tropo- Iono-
range corections sphere sphere

Уравнения наблюдений псевдорасстояний (pseudorange observation equation), включая ошибки часов, атмосферные задержки и ошибки измерений, для двух несущих частот:

$$P_{1r}^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s + cb_{1r} - cb_1^s + T_r^s + I_r^s + E_{1r}^s$$

$$P_{2r}^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s + cb_{2r} - cb_2^s + T_r^s + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_r^s + E_{2r}^s$$

Примечательны:

1. разные знаки ионосферной компоненты (увеличение фазы, но запаздывание для псевдорасстояний)
2. Геометрия, коррекции часов и тропосферы одинаковы во всех уравнениях



Единичные разности

The assumption is that the receiver measure at the same epoch. In fact, all GPS receivers on the globe measure *within 1 ms at the same time*.

- The satellite clock correction is *not eliminated perfectly*.
- The two reasons for this are that
 - the two receivers may not measure at exactly the same epoch, and
 - even if the receiver measure synchronously the light travel time from the satellite may be different.
- In case of SA *the variations of the satellite clock may be some 300 ns (corresponding to 100 m) in some 5 minutes*.
- If the receivers measure within 1 ms the effect of SA on *short baselines is reduced to*
- The effect of SA on long baselines is usually not considered. Since SA is permanently switched off modeling of the effect is no longer necessary.



Единичные разности

Единичная разность содержит только разности ошибок орбит, ионосферные и тропосферные коррекции.

Влияние этих ошибок практически полностью устраняется при малых базах, поскольку пути сигналов от спутника к двум приемникам проходят через близкие атмосферные области.

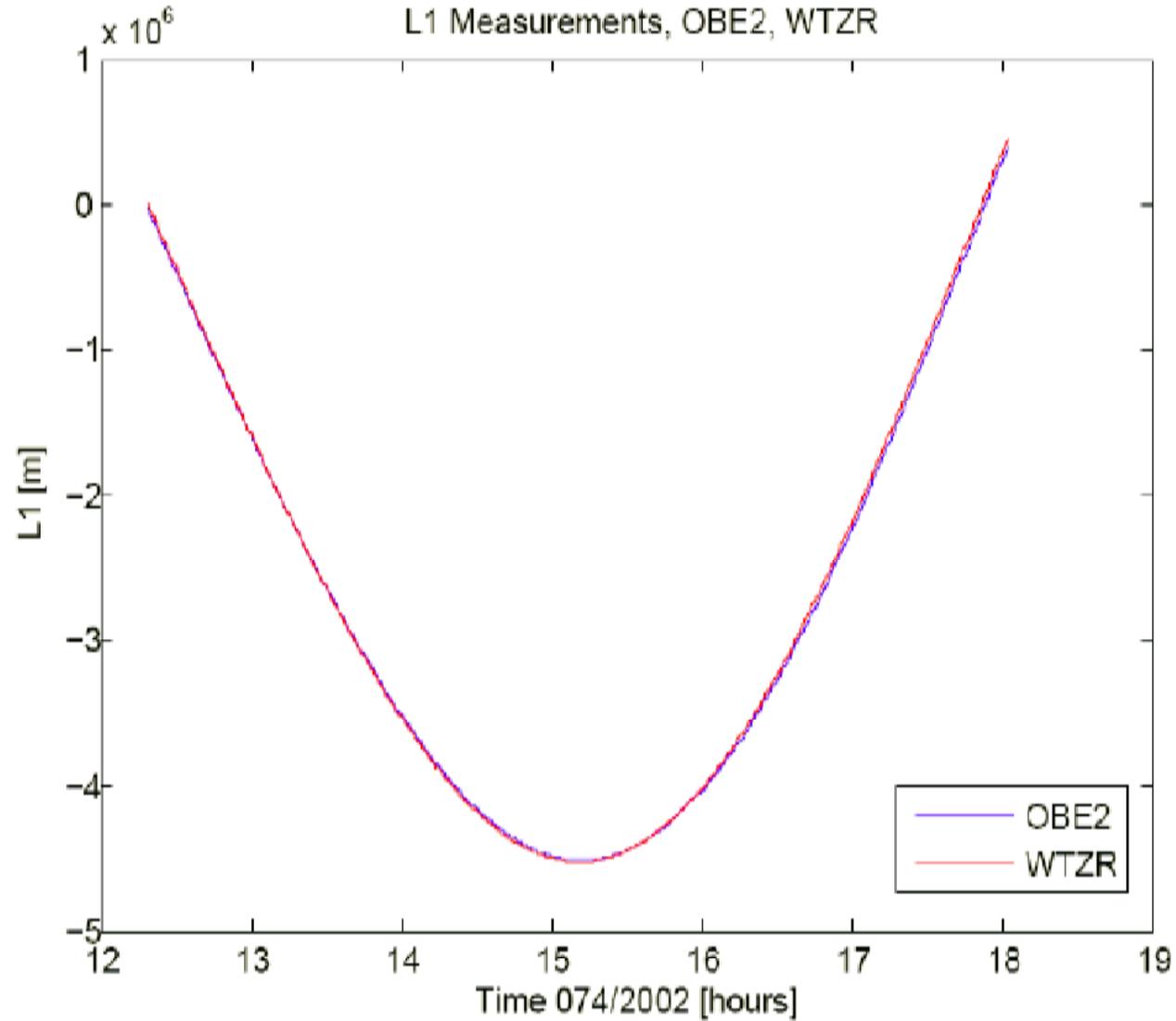
Не устраняются ошибки обусловленные геометрией антенны (напр. multipath эффект).

Шум единичных разностей измерений возрастает в $\sqrt{2}$ раза относительно оригинальных измерений.

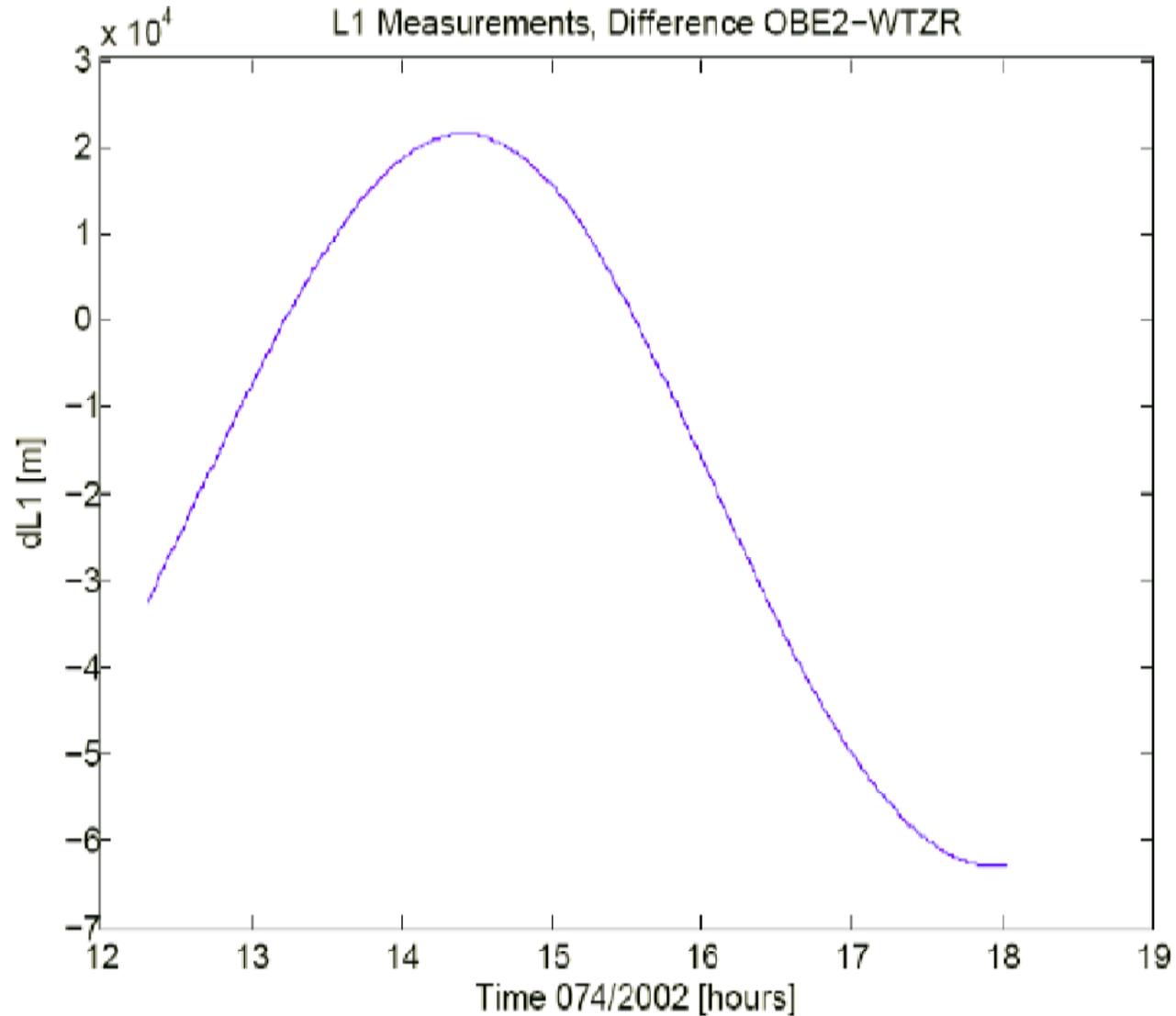
$$\sigma(\Delta\varepsilon_{kl}^i) = \sqrt{\sigma^2(\varepsilon_k^i) + \sigma^2(\varepsilon_l^i)} \cong \sqrt{2\sigma^2(\varepsilon_k^i)} = \sqrt{2}\sigma(\varepsilon_k^i)$$



Единичные разности



Единичные разности



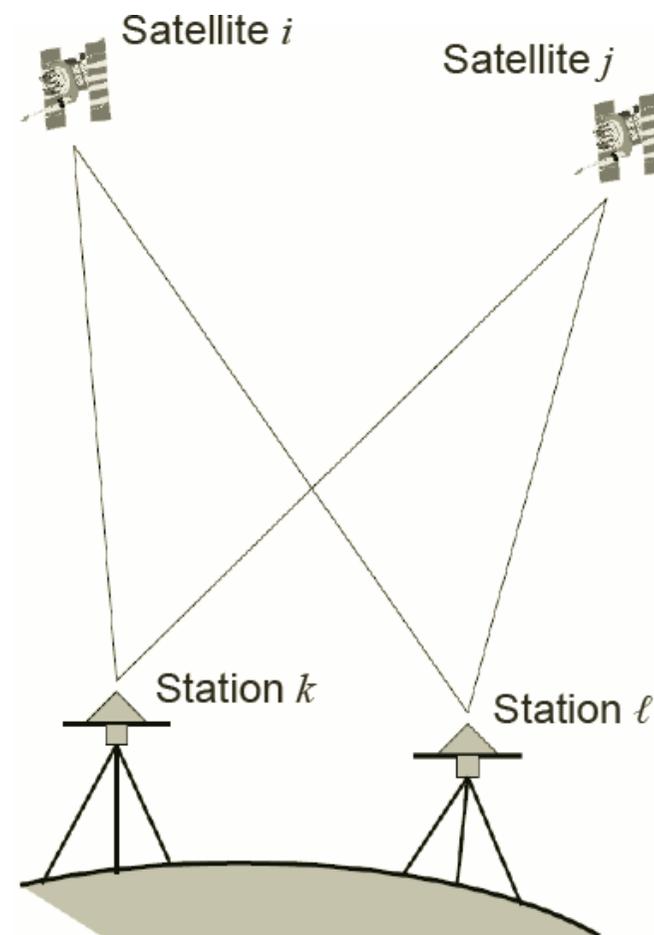
Двойные разности

Двойные разности (*double differences*) получены путем вычитания двух единичных разностей измерений

$$\begin{aligned}\nabla \Delta L_{kl}^{ij} &= \Delta L_{kl}^i - \Delta L_{kl}^j \\ &= \nabla \Delta \rho_{kl}^{ij} + \nabla \Delta T_{kl}^{ij} - \nabla \Delta I_{kl}^{ij} + \\ &\quad + \lambda \nabla \Delta N_{kl}^{ij} + \nabla \Delta \varepsilon_{kl}^{ij}\end{aligned}$$

Ошибки часов приемника полностью устранены

Компонент неопределенности (ambiguity term) является целым числом у двойных разностей



Двойные разности

Компонент неопределенности (*ambiguity term*) является целым числом у двойных разностей

$$\begin{aligned}\nabla\Delta b_{AB}^{jk} &= b_A^j - b_B^j - b_A^k + b_B^k = +\lambda(N_A^j - \alpha^j + \alpha_A) \\ &\quad - \lambda(N_B^j - \alpha^j + \alpha_B) \\ &\quad - \lambda(N_A^k - \alpha^k + \alpha_A) \\ &\quad + \lambda(N_B^k - \alpha^k + \alpha_B) \\ &= \lambda(N_A^j - N_B^j - N_A^k + N_B^k) = \lambda\nabla\Delta N_{AB}^{jk}\end{aligned}$$

На практике компонент неопределенности фазовых измерений (phase ambiguity term) может быть выделен как целое число только в двойных разностях

$$\begin{aligned}\sigma(\nabla\Delta\varepsilon_{kl}^{\bar{ij}}) &= \sqrt{\sigma^2(\varepsilon_k^i) + \sigma^2(\varepsilon_l^i) + \sigma^2(\varepsilon_k^j) + \sigma^2(\varepsilon_l^j)} \\ &\cong \sqrt{4\sigma^2(\varepsilon_k^i)} = 2\sigma(\varepsilon_k^i)\end{aligned}$$

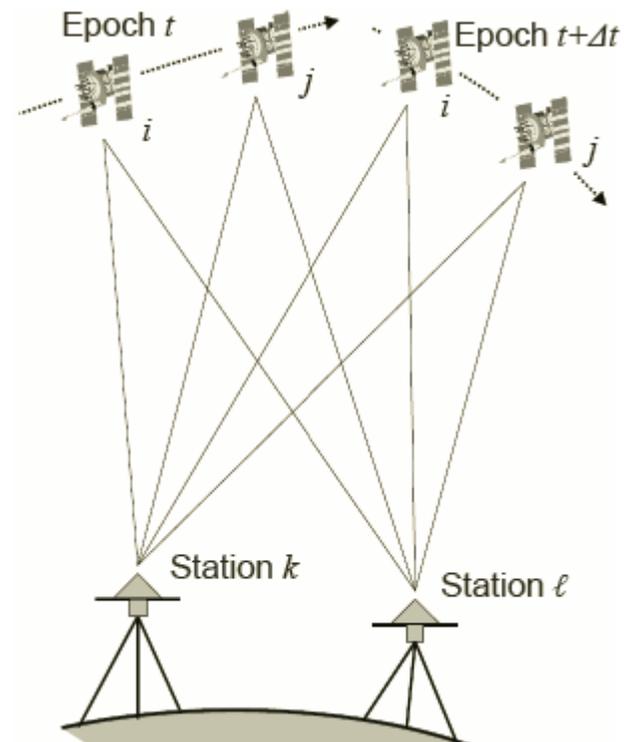


Тройные разности

Тройные разности (triple differences) – разности сигналов двойных разностей между последовательными эпохами.

Тройные разности полезны для идентификации cycle slips, скачков и выбросов.

Шум тройных разностей превосходит шум оригинальных наблюдений в $2\sqrt{2}$ раза.



GLONASS разности

Поскольку *частоты*– ГЛОНАСС сигналов специфичны для каждого спутника, то длина волны обозначена индексом спутника.

Единичные разности выглядят идентичными GPS, поскольку один спутник и поэтому одна частота используются в этой разности.

При формировании двойных разностей *неопределенность (ambiguity term)* $\nabla \Delta b_{AB}^{jk}$ у ГЛОНАСС отличается от GPS

$$\begin{aligned}\nabla \Delta b_{AB}^{jk} &= +\lambda^j (N_A^j - \alpha^j + \alpha_A) - \lambda^j (N_B^j - \alpha^j + \alpha_B) \\ &\quad - \lambda^k (N_A^k - \alpha^k + \alpha_A) + \lambda^k (N_B^k - \alpha^k + \alpha_B) \\ &= \lambda^j (N_A^j - N_B^j) - \lambda^k (N_A^k - N_B^k) + (\lambda^j - \lambda^k) (\alpha_A - \alpha_B) \\ &= \lambda^j (N_A^j - N_B^j) - \lambda^j (N_A^k - N_B^k) + (\lambda^j - \lambda^k) (N_A^k - N_B^k) + (\lambda^j - \lambda^k) (\alpha_A - \alpha_B) \\ &= \lambda^j \nabla \Delta N_{AB}^{jk} + \Delta \lambda^{jk} \Delta N_{AB}^k + \Delta \lambda^{jk} (\alpha_A - \alpha_B)\end{aligned}$$

где: $\Delta \lambda^{jk} = \lambda^j - \lambda^k$



GLONASS разности

Слагаемое $\Delta\lambda^{jk}\Delta N_{AB}^k$ ликвидирует свойство равенства целому числу компоненты неопределенности в сигнале двойных разностей.

Слагаемое $\Delta\lambda^{jk}/\lambda_0$ может быть максимум 0,008 цикла ($j=1, k=24$). Единичная разность неопределенности ΔN_{AB}^k может быть оценена с использованием псевдорасстояний с точностью до 200 циклов.

Ошибка слагаемого $\Delta\lambda^{jk}\Delta N_{AB}^k$ может быть поэтому $0,008 \cdot 200 = 1,6$ цикла.

$$\Delta\lambda^{jk}(\alpha_A - \alpha_B)$$

Кроме этого, аппаратные задержки (hardware delays) приемника НЕ устранены в двойных разностях. Слагаемое неизвестно и требует оценивания.

Аналогичные сложности возникают при формировании разностей между спутниками различных СНС, т.е. между измерениями *GSP* и *GALILEO* на различных частотах.



Линейные комбинации

В данном разделе будем использовать упрощенные уравнения наблюдений (*simplified observation equations*) с всеми нерассеивающими слагаемыми включенными в ρ' и учтем отдельно только ионосферные поправки и неопределенность. Тогда уравнения наблюдения фазы и псевдорасстояний примут вид:

$$L_1 = \rho' - I + \frac{c}{f_1} N_1$$

$$L_2 = \rho' - \frac{f_1^2}{f_2^2} I + \frac{c}{f_2} N_2$$

$$P_1 = \rho' + I + b_1$$

$$P_2 = \rho' + \frac{f_1^2}{f_2^2} I + b_2$$

где:

$$\rho' = \rho + c\delta t_r - c\delta t^s + T$$

Ионосферная коррекция I приведена к первой частоте.

Дифференциальные погрешности (*differential code biases*) приняты пренебрежимо малыми.



3. Линейные комбинации

3.1 Ionosphere-free линейная комбинация

Одна из наиболее важных линейных комбинаций для практических целей является без ионосферная линейная комбинация LC .

Ионосферная поправка пропорциональна $1/f^2$. Следовательно измерения на двух частотах могут устранить вклад ионосферы в запаздывание распространение сигнала и устранить эту ошибку (первый порядок) с использованием коэффициентов:

$$\kappa_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \approx 2.546 \qquad \kappa_2 = -\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \approx -1.546$$

Для фазовых уравнений, получим:

$$\begin{aligned} LC &= \kappa_1 L_1 + \kappa_2 L_2 = \kappa_1 \rho' + \kappa_1 I + \kappa_1 \frac{c}{f_1} N_1 + \kappa_2 \rho' + \kappa_2 \frac{f_1^2}{f_2^2} I + \kappa_2 \frac{c}{f_2} N_2 \\ &= (\kappa_1 + \kappa_2) \rho' + (\kappa_1 + \kappa_2 \frac{f_1^2}{f_2^2}) I + \kappa_1 \frac{c}{f_1} N_1 + \kappa_2 \frac{c}{f_2} N_2 \\ &= \rho' + \frac{c}{f_1^2 - f_2^2} (f_1 N_1 - f_2 N_2) \end{aligned}$$



3. Линейные комбинации

3.1 Ionosphere-free линейная комбинация

Для уравнений фазовых измерений и псевдорасстояний, получим:

$$LC = \rho' + \frac{c}{f_1^2 - f_2^2} (f_1 N_1 - f_2 N_2)$$

$$PC = \rho' + \kappa_1 b_1 + \kappa_2 b_2$$

Важно что единицы измерений также метры, т.к. $\kappa_1 + \kappa_2 = 1$.

Линейная комбинация содержит геометрию, а также коррекцию часов (*clock corrections*), тропосферные коррекции (*troposphere corrections*) и для фазовых измерений фазовую неопределенность (*phase ambiguities*).

Шум данной комбинации примерно в 3 раза выше чем шум основных частот

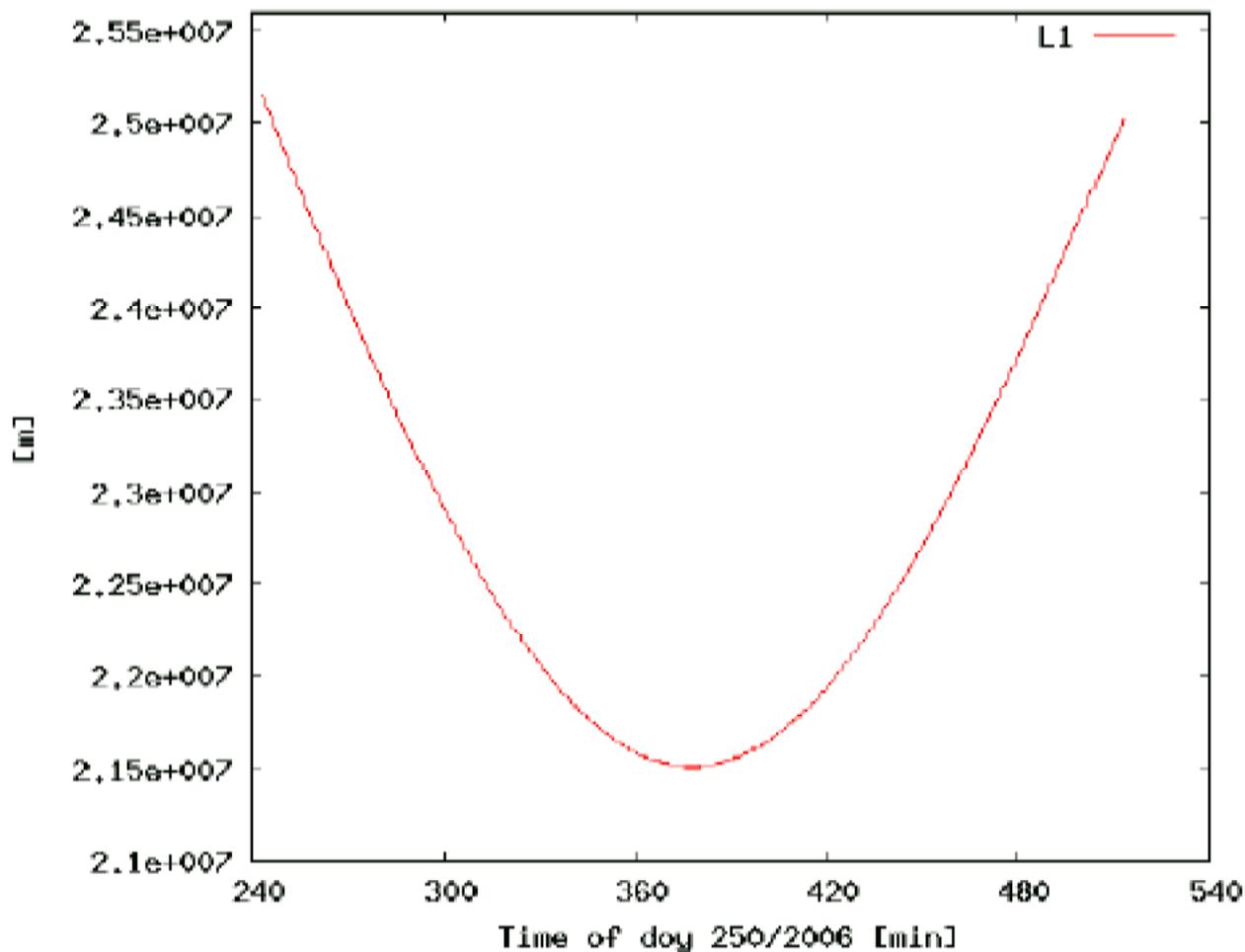
$$\sigma(LC) = \frac{\sqrt{f_1^4 + f_2^4}}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \sigma(L) = 2.978 \cdot \sigma(L)$$



3. Линейные комбинации

3.1 Ionosphere-free линейная комбинация

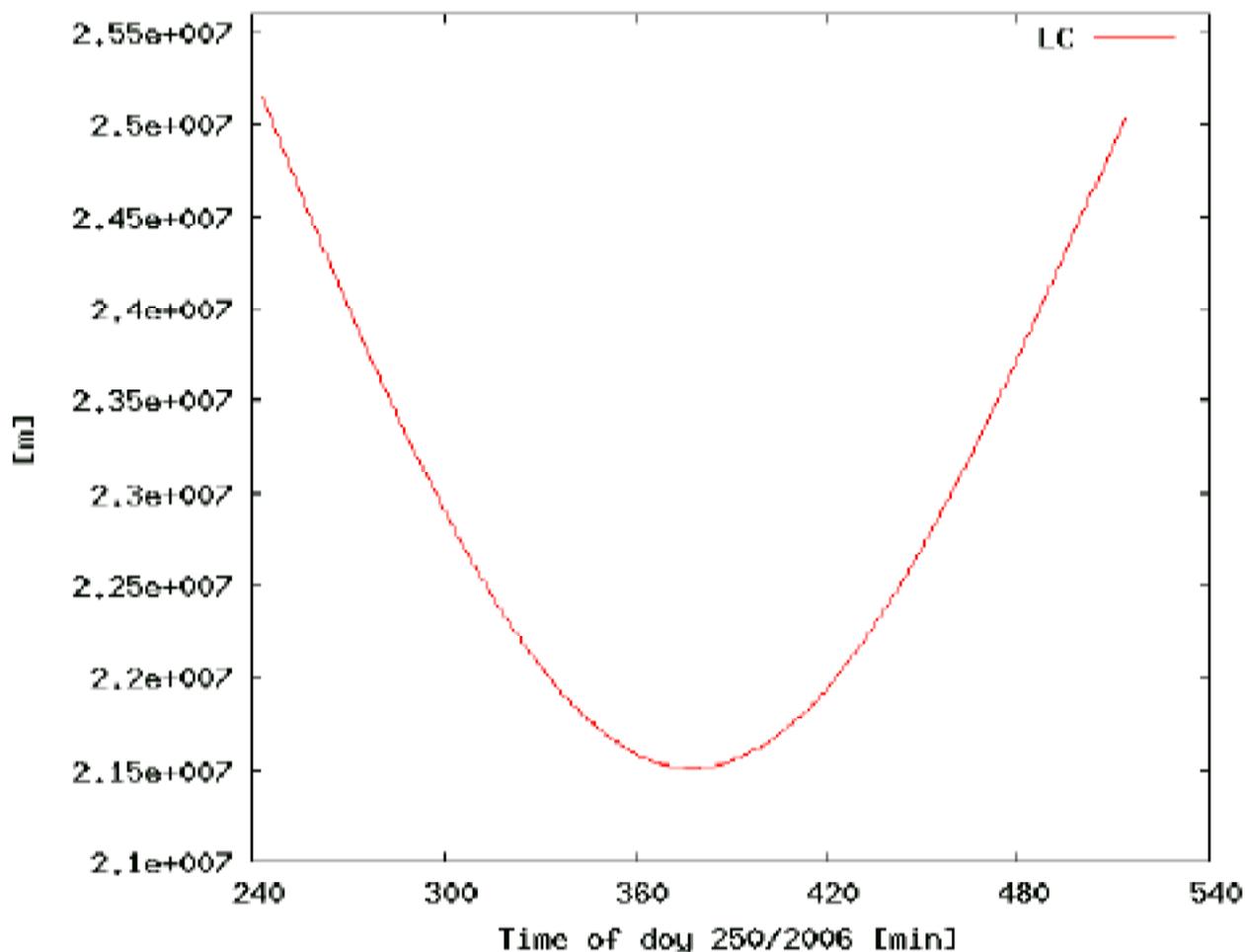
Ionosphere-free линейная комбинация, фазовые измерения L1, Wetzell, PRN 02



3. Линейные комбинации

3.1 Ionosphere-free линейная комбинация

Фазовые измерения L1, Wettzell, PRN 02



3. Линейные комбинации

3.2 Geometry-free линейная комбинация

Не содержащая геометрического расстояния между спутником и приемником (geometry-free) или ионосферная линейная комбинация LI и PI может быть определена как разность оригинальных измерений:

$$LI = L_1 - L_2 = -I \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \right) + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$PI = P_1 - P_2 = I \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \right) + b_1 - b_2$$

Геометрия, коррекция часов (*clock corrections*) и нерассеивающие ошибки удалены и только ионосферные коррекции и неопределенность фазы остались.

Ионосферные слагаемые в geometry-free линейной комбинации для псевдорасстояний и измерений фазы имеют различный знак.

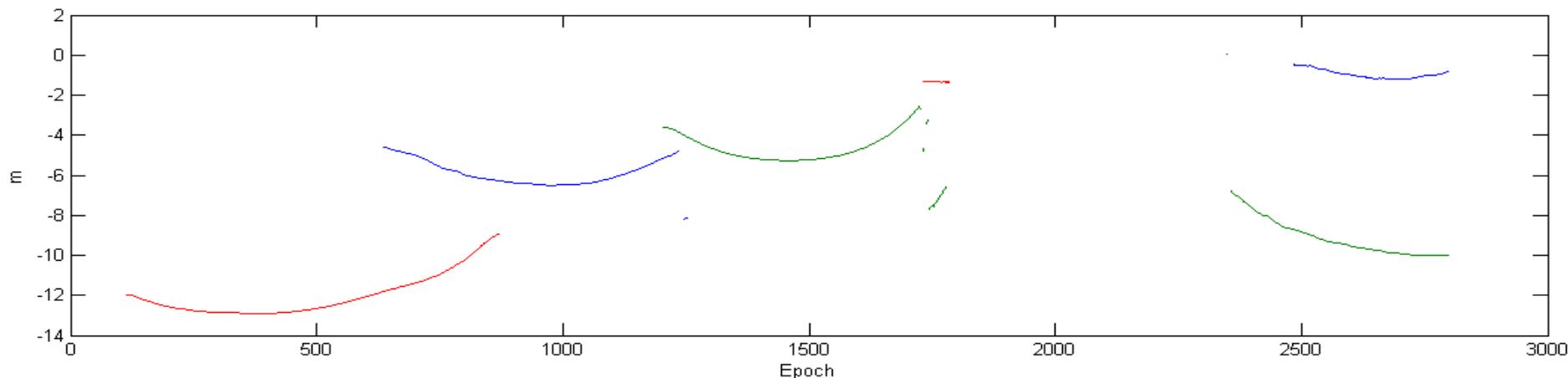
Данная линейная комбинация хорошо подходит для определения ионосферных изменений (*ionospheric variations*), т.е. параметров модели ионосферы.



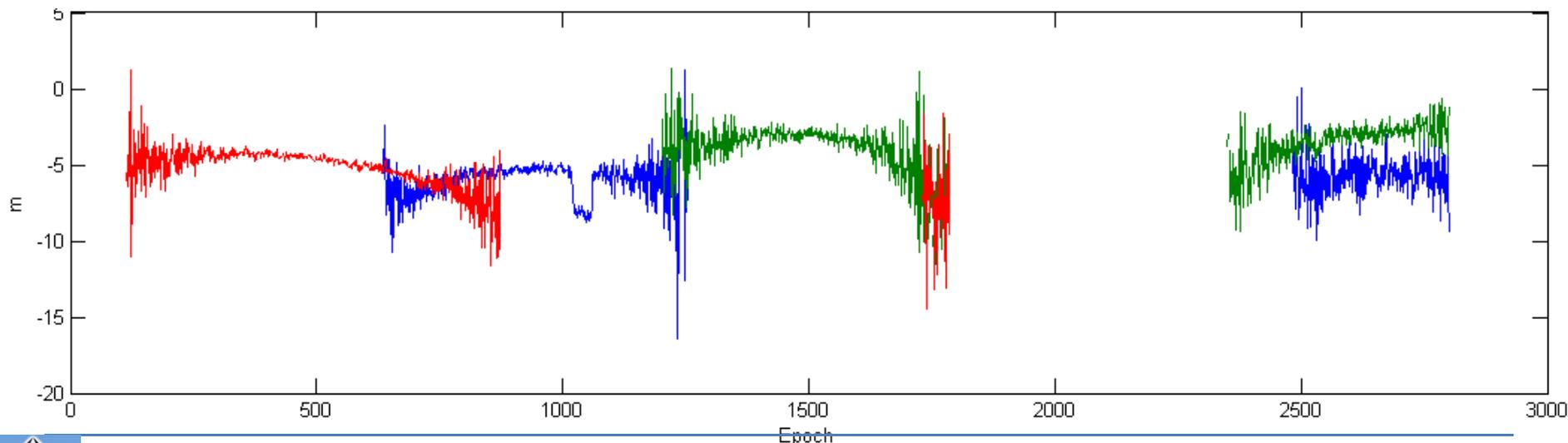
3. Линейные комбинации

3.2 Geometry-free линейная комбинация

Geometry-free линейная комбинация, фазовые измерения, ZIMJ, PRN 01, 02, 03



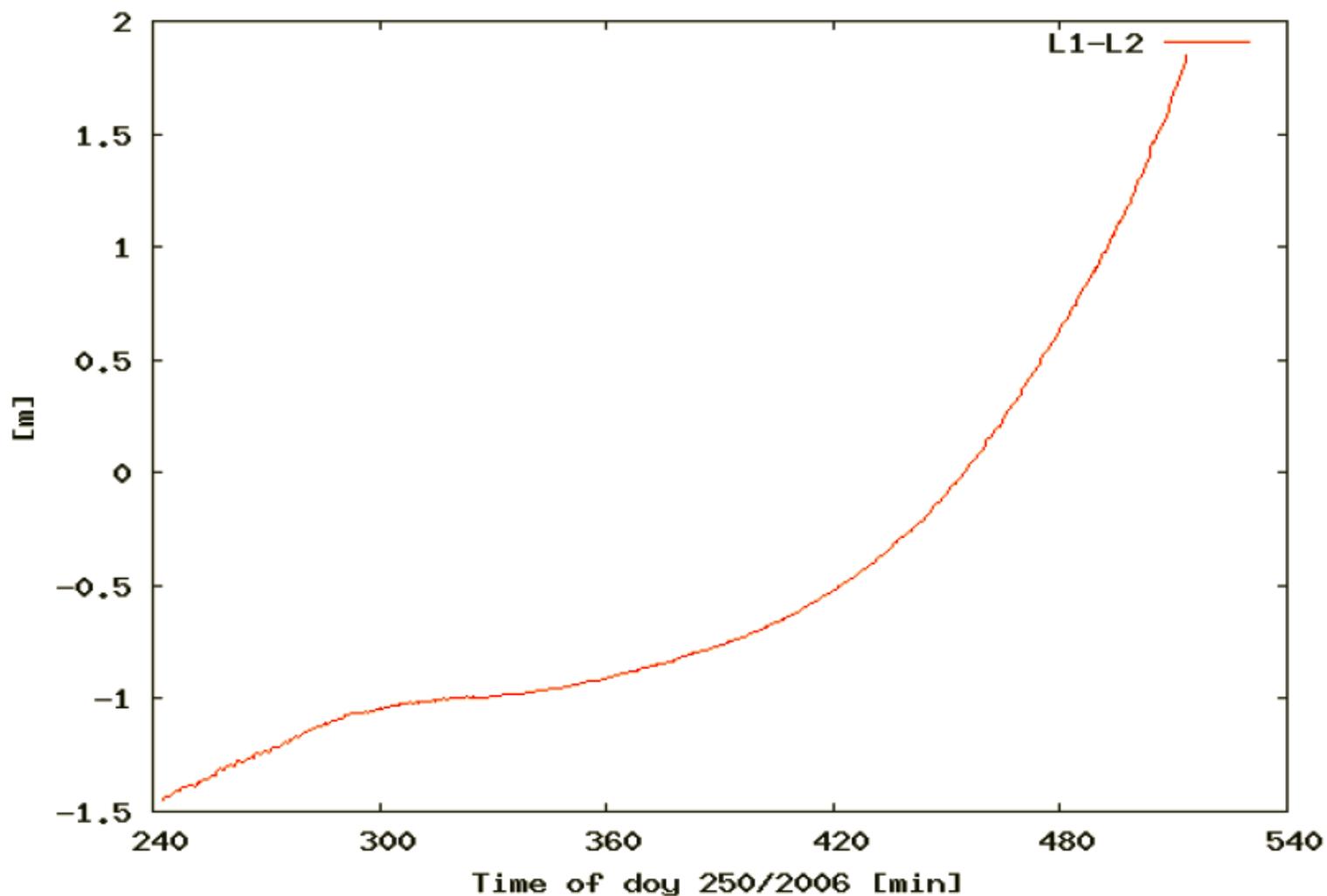
Geometry-free линейная комбинация, псевдорасстояния, ZIMJ, PRN 01, 02, 03



3. Линейные комбинации

3.2 Geometry-free линейная комбинация

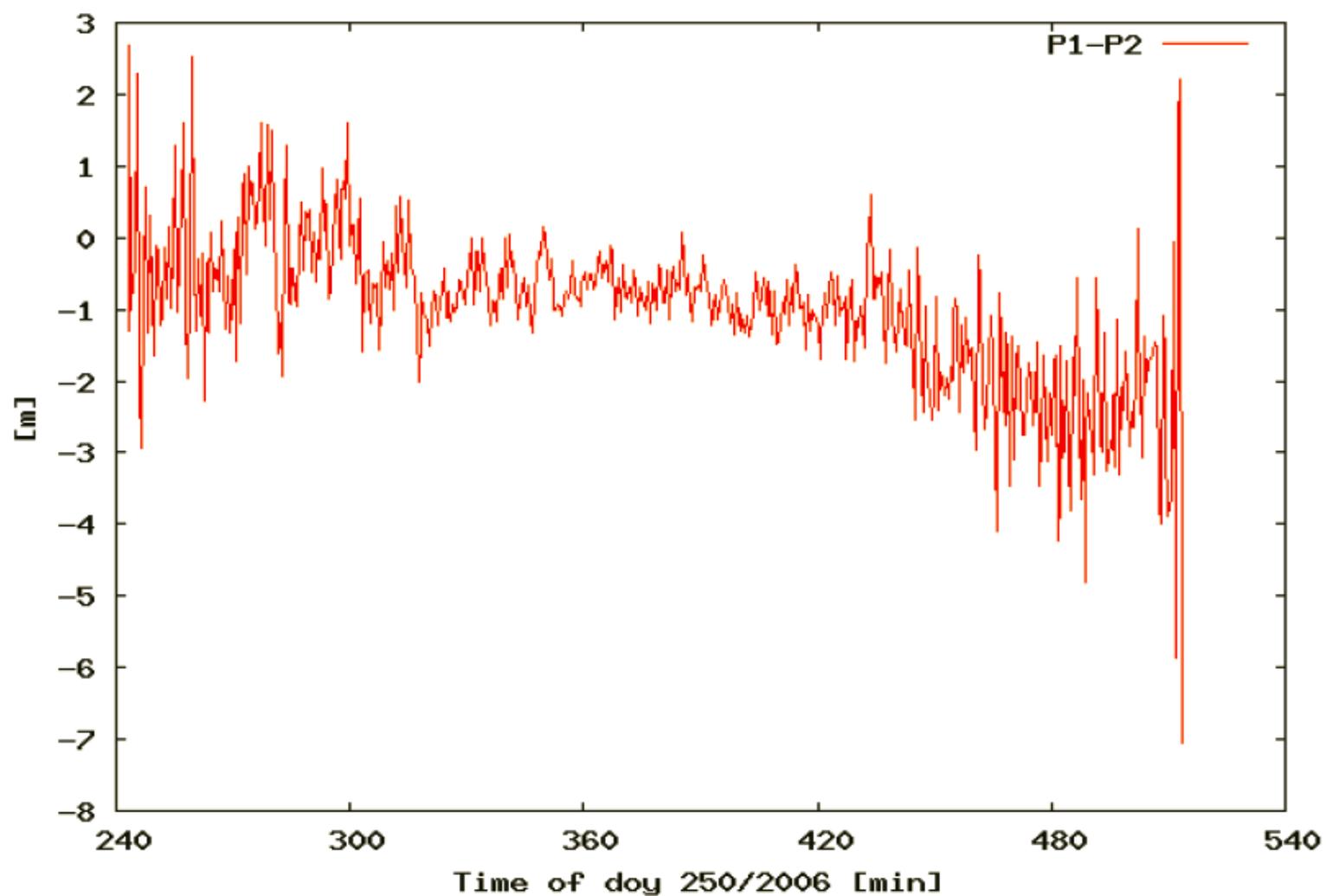
Geometry-free linear combination, phase L1, Wettzell, PRN 02



3. Линейные комбинации

3.2 Geometry-free линейная комбинация

Geometry free linear combination, pseudorange PI, Wetzell, PRN 02



3. Линейные комбинации

3.3 Widelane линейная комбинация

Widelane линейная комбинация LW определена как:

$$LW = \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_1 - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_2 = \rho' - \frac{f_1}{f_2} I + \frac{c}{f_1 - f_2} (N_1 - N_2)$$
$$PW = \frac{f_1}{f_1 + f_2} P_1 + \frac{f_2}{f_1 + f_2} P_2 = \rho' - \frac{f_1}{f_2} I + \frac{f_1 b_1 + f_2 b_2}{f_1 + f_2}$$

Важно, что различные знаки в знаменателях для фазовых измерений и псевдорастояний.

Шум LW превосходит норму в 5,74 раза; Шум PW меньше в 0,71 раза.

Слагаемое неопределенности (ambiguity term) может быть определен как целое число $N_1 - N_2$, умноженное на длину волны.

$$\lambda_{WL} = \frac{c}{f_1 - f_2} \cong 86\text{cm}$$

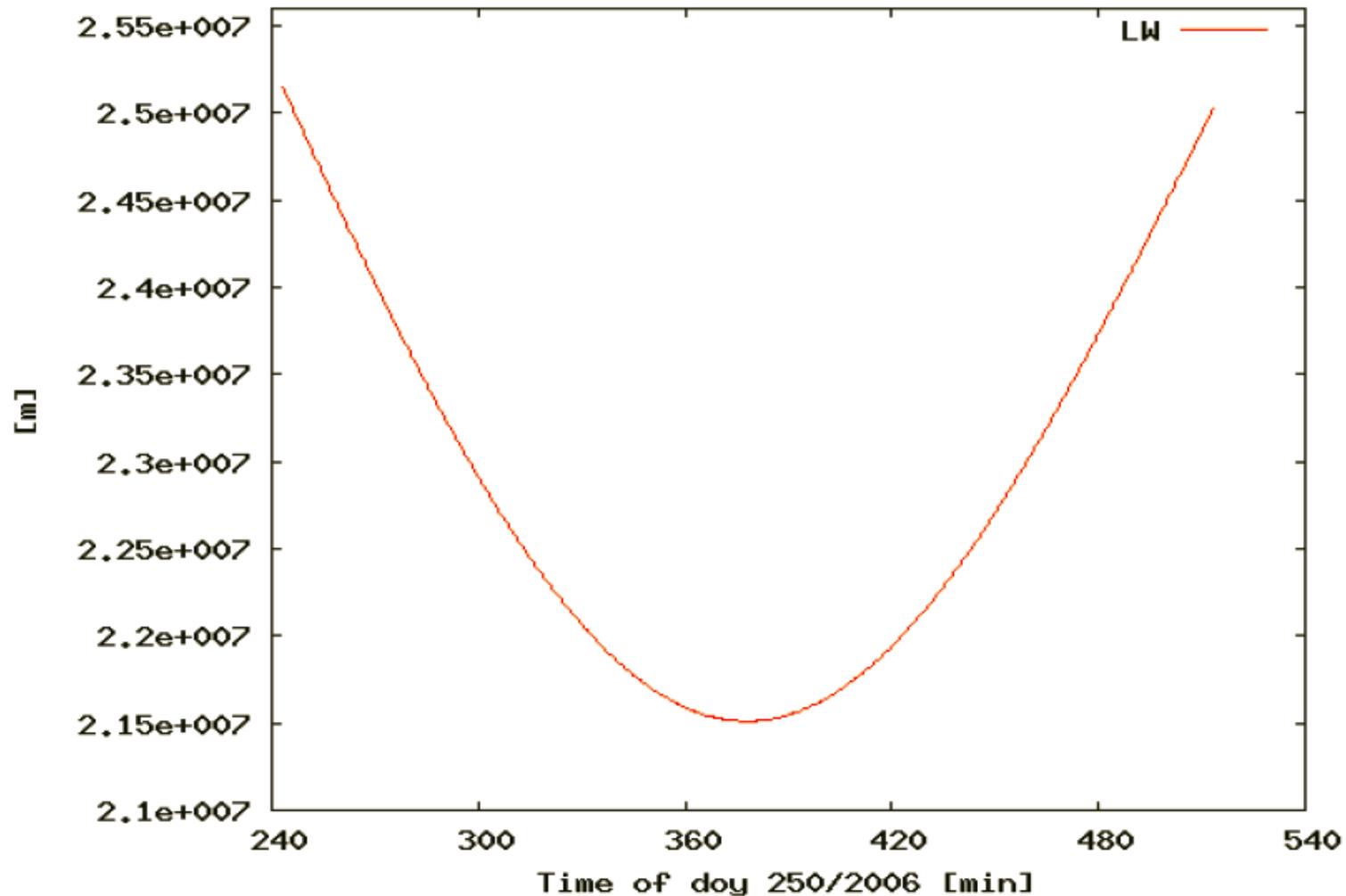
Большие длины волн упрощают поиск малых скачков (small cycle slips).



3. Линейные комбинации

3.3 Widelane линейная комбинация

Widelane linear combination, phase LW, Wettzell, PRN 02



3. Линейные комбинации

3.4 Melbourne-Wübbena линейная комбинация

Melbourne-Wübbena линейная комбинация MW – разница между измерениями фазы $widelane$ комбинации и псевдорасстояний в $widelane$ линейной комбинации:

$$MW = LW - PW = \frac{c}{f_1 - f_2} (N_1 - N_2) + b$$

Присутствуют только скачки (cycle slips). Геометрия, коррекция часов, нерассеивающие и рассеивающие ошибки удалены.

Данная линейная комбинация поэтому замечательно подходит для идентификации скачков на значительных больших базовых расстояний.

С течением времени линейная комбинация без скачков фазы остается на постоянном уровне.

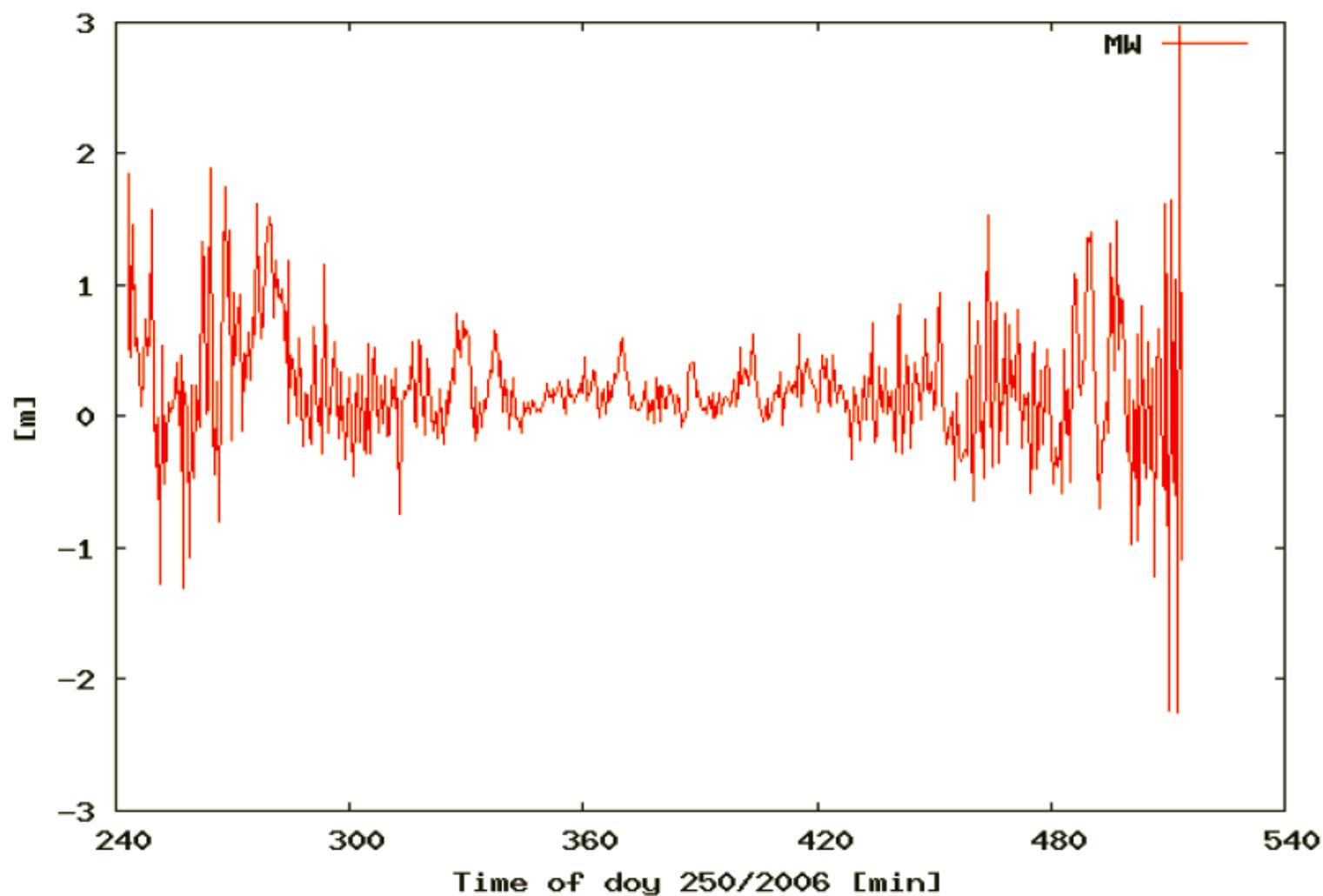
Расплата за эти функции – большой шум, который обеспечивается шумам псевдорасстояний (0,71 оригинального шума). Таким образом, качество линейной комбинации идентификации скачков критично зависит от качества приема приемником псевдорасстояний.



3. Линейные комбинации

3.4 Melbourne-Wübbena линейная комбинация

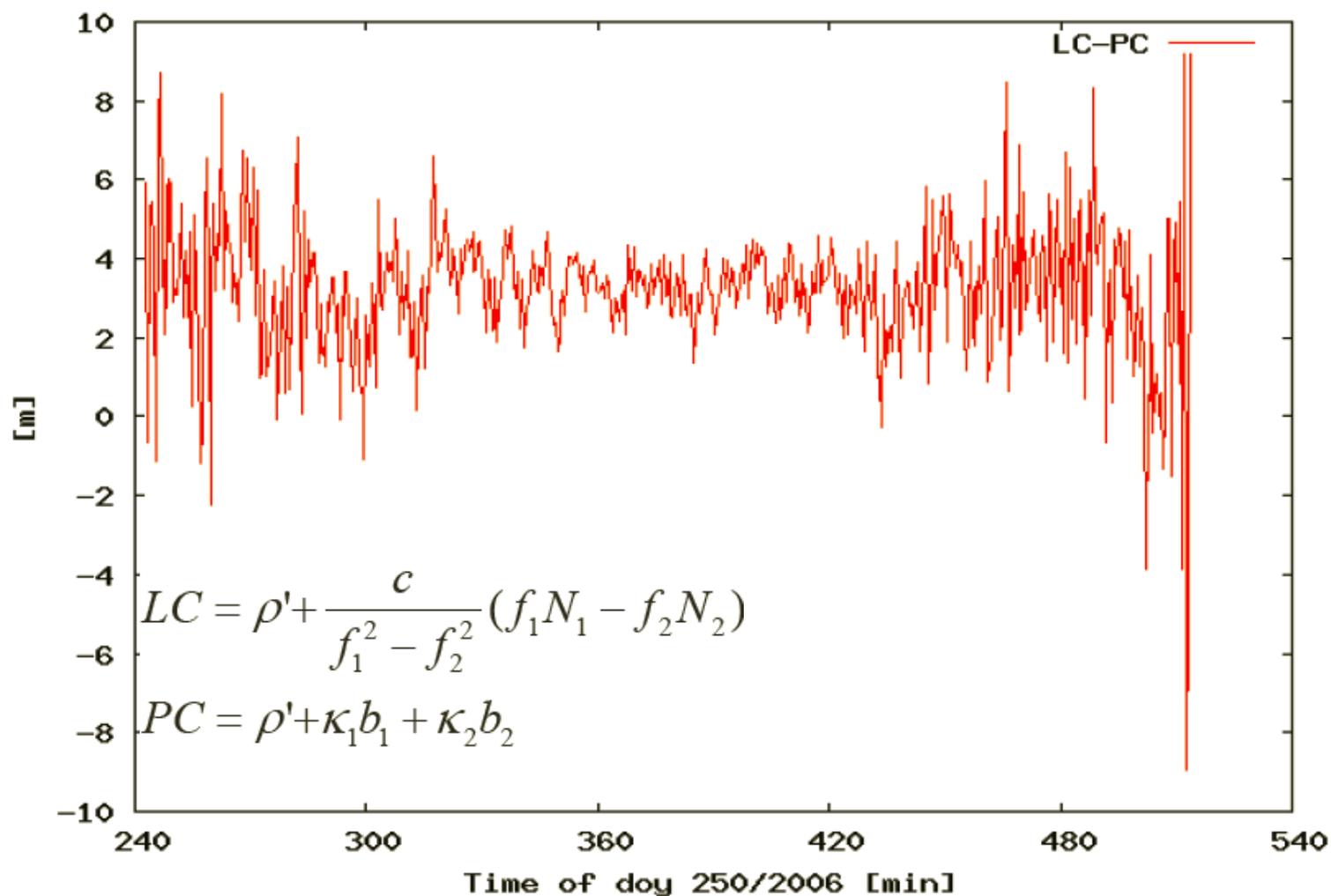
Melbourne-Wübbena linear combination MW, Wettzell, PRN 02



3. Линейные комбинации

3.4 Melbourne-Wübbena линейная комбинация

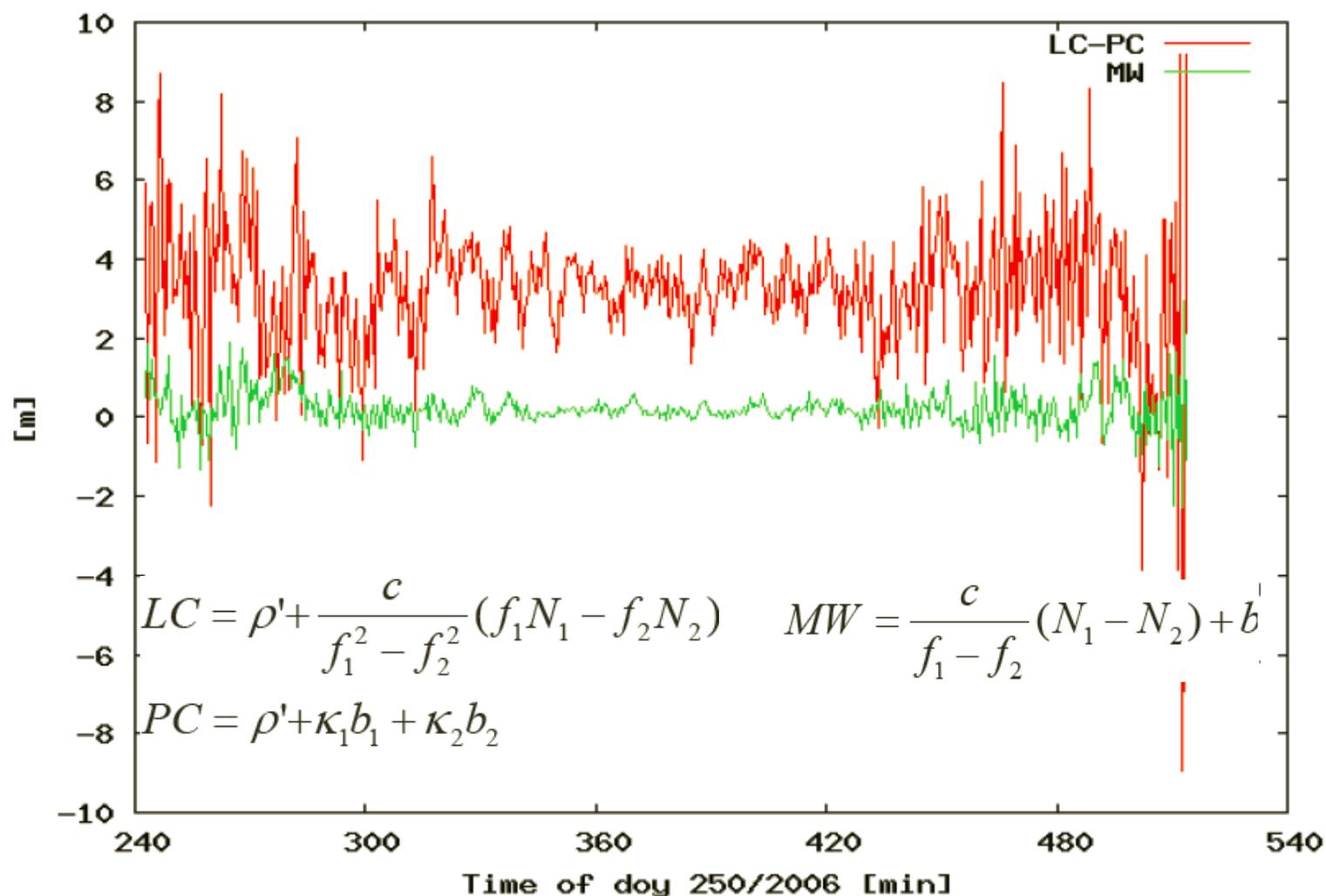
Linear combination LC-PC, Wettzell, PRN 02



3. Линейные комбинации

3.4 Melbourne-Wübbena линейная комбинация

Melbourne-Wübbena vs. LC-PC, Wettzell, PRN 02



3. Линейные комбинации

3.5 Multipath линейная комбинация

Multipath – интерференция прямого непосредственного сигнала с отраженными сигналами, вызывающая запаздывание основного сигнала.

Multipath может исказить псевдорасстояния на десятки метров, и максимум до 5 сантиметров в случае фазовых измерений.

Мы можем добавить соответствующие слагаемые M_1 и M_2 в уравнения для псевдорасстояний

$$L_1 = \rho' - I + \frac{c}{f_1} N_1$$

$$L_2 = \rho' - \frac{f_1^2}{f_2^2} I + \frac{c}{f_2} N_2$$

$$P_1 = \rho' + I + M_1$$

$$P_2 = \rho' + \frac{f_1^2}{f_2^2} I + M_2$$



3. Линейные комбинации

3.5 Multipath линейная комбинация

Сформируем следующие линейные комбинации фазовых измерений

$$\frac{f_1^2+f_2^2}{f_1^2-f_2^2} L_1 - \frac{2f_2^2}{f_1^2-f_2^2} L_2 = \rho' + I + \frac{f_1^2+f_2^2}{f_1^2-f_2^2} \lambda_1 N_1 - \frac{2f_2^2}{f_1^2-f_2^2} \lambda_2 N_2$$

$$\frac{2f_1^2}{f_1^2-f_2^2} L_1 - \frac{f_1^2+f_2^2}{f_1^2-f_2^2} L_2 = \rho' + \frac{f_1^2}{f_2^2} I + \frac{2f_1^2}{f_1^2-f_2^2} \lambda_1 N_1 - \frac{f_1^2+f_2^2}{f_1^2-f_2^2} \lambda_2 N_2$$

Можно наблюдать, что знак ионосферной компоненты изменен. Благодаря этому возможно устранить ρ' и I из уравнений псевдорасстояний:

$$MP_1 = P_1 - \left(\frac{f_1^2+f_2^2}{f_1^2-f_2^2} L_1 - \frac{2f_2^2}{f_1^2-f_2^2} L_2 \right) = M_1 - \left(\frac{f_1^2+f_2^2}{f_1^2-f_2^2} \lambda_1 N_1 - \frac{2f_2^2}{f_1^2-f_2^2} \lambda_2 N_2 \right)$$

$$MP_2 = P_2 - \left(\frac{2f_1^2}{f_1^2-f_2^2} L_1 - \frac{f_1^2+f_2^2}{f_1^2-f_2^2} L_2 \right) = M_2 - \left(\frac{2f_1^2}{f_1^2-f_2^2} \lambda_1 N_1 - \frac{f_1^2+f_2^2}{f_1^2-f_2^2} \lambda_2 N_2 \right)$$

Представленные линейные комбинации содержат multipath и постоянное смещение из-за неопределенностей.

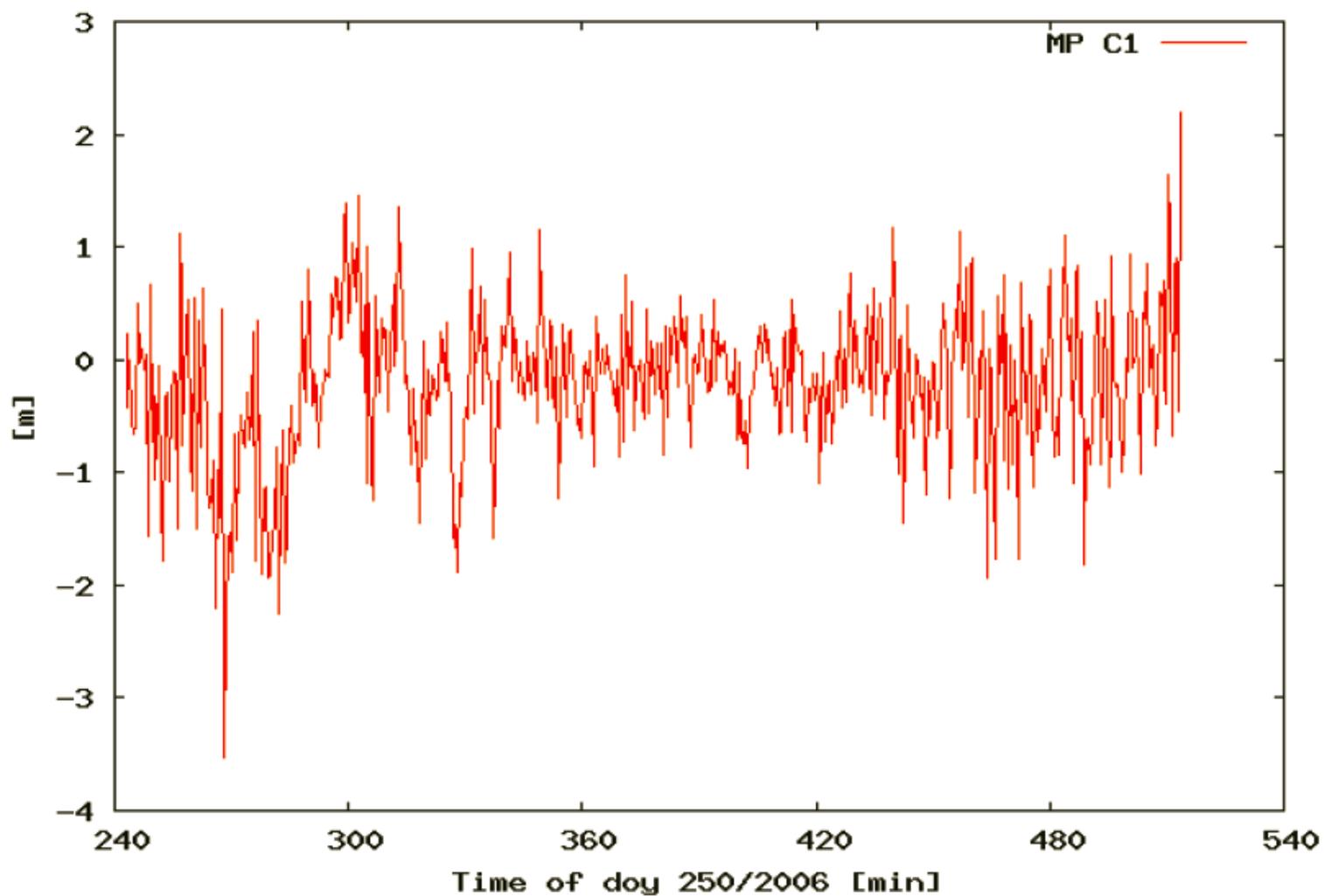
Эта же линейная комбинация может использоваться для расчета шума различных измерений псевдорасстояний.



3. Линейные комбинации

3.5 Multipath линейная комбинация

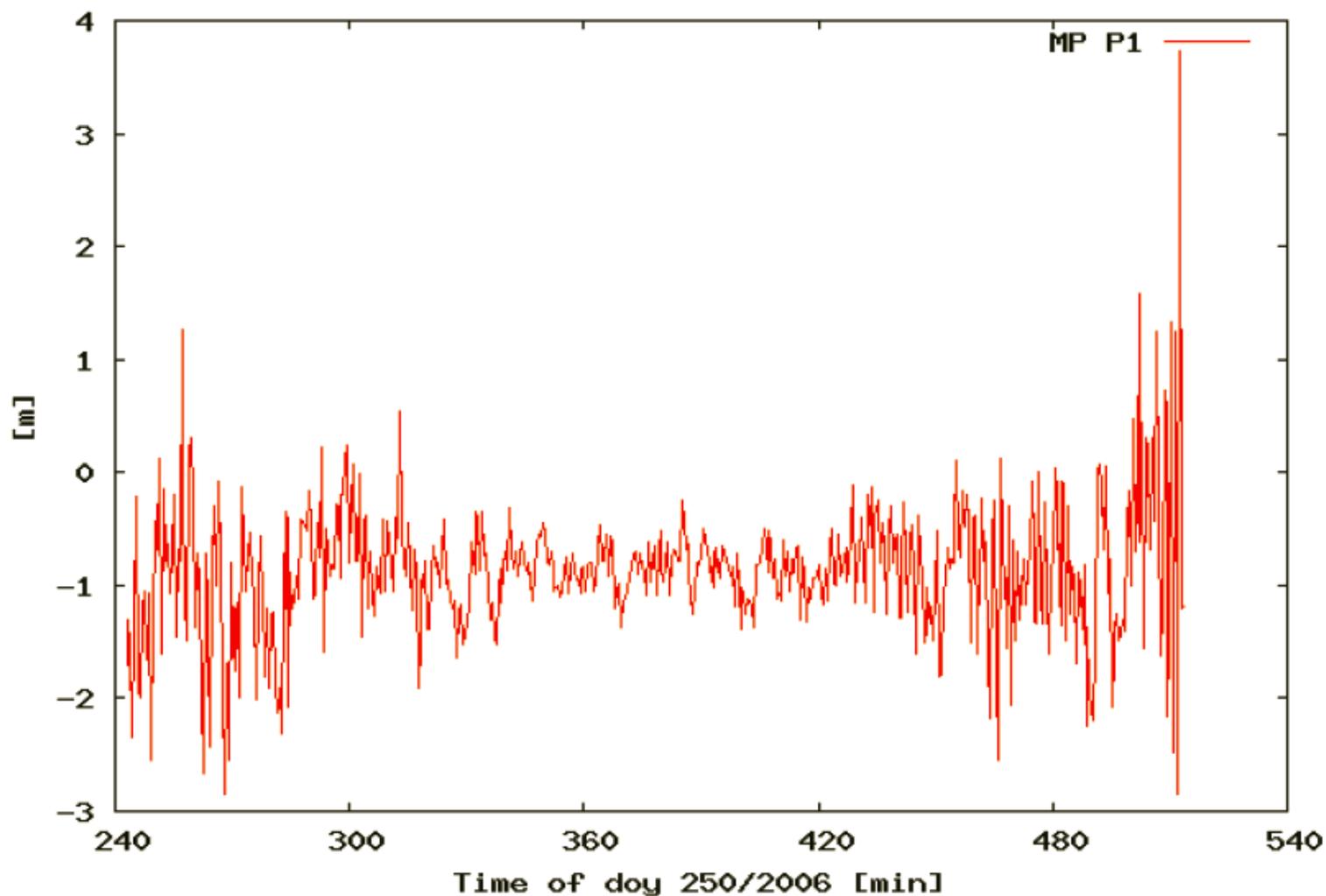
C1 multipath linear combination, Wettzell, PRN 02



3. Линейные комбинации

3.5 Multipath линейная комбинация

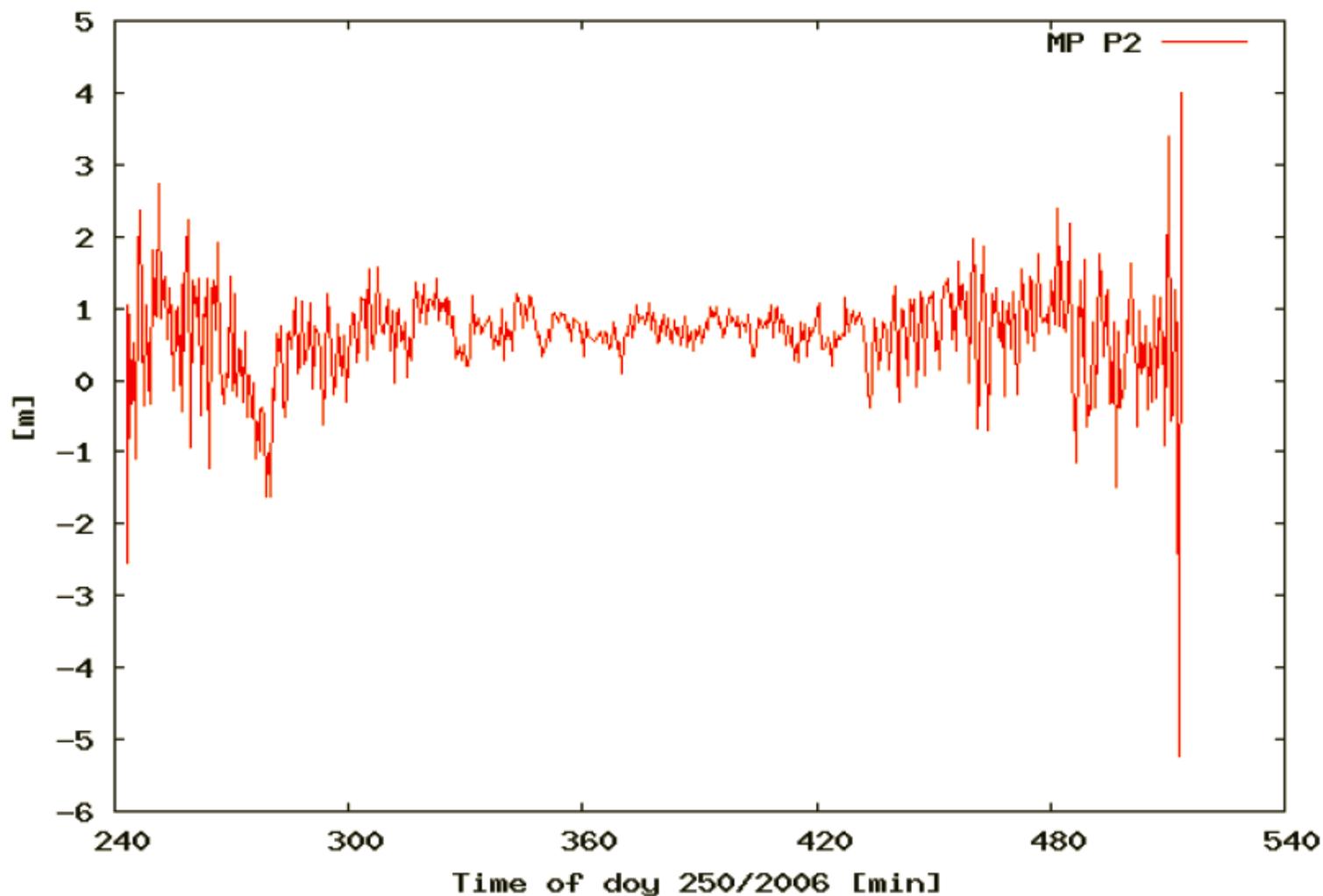
P1 multipath linear combination, Wetzell, PRN 02



3. Линейные комбинации

3.5 Multipath линейная комбинация

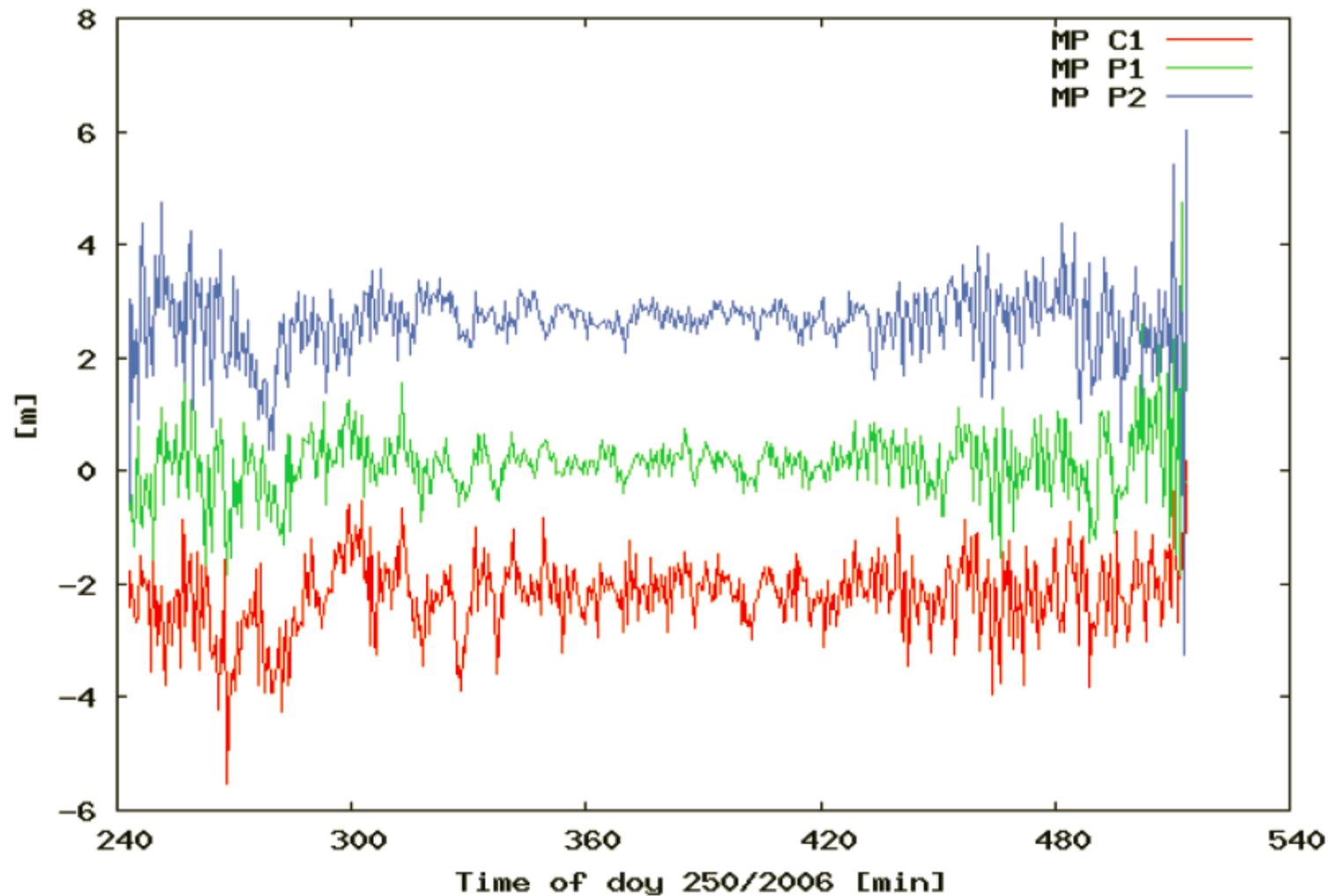
P2 multipath linear combination, Wetzell, PRN 02



3. Линейные комбинации

3.5 Multipath линейная комбинация

Multipath linear combinations, Wettzell, PRN 02



4. Атмосферные преломления

Когда электромагнитная волна проходит сквозь среду, то электроны в среде возбуждаются. Индуцируемое излучение взаимодействует с первичным излучением и вызывает изменения скорости распространения и как следствие направление распространения волны. Этот эффект называют *преломлением* – *refraction*.

Различают:

фазовую скорость – скорость точек волны

$$v_{ph} = f\lambda$$

групповую скорость – скорость группы волн.

$$v_{gr} = -\frac{df}{d\lambda} \lambda^2$$

Только композиция волн с различными длинами волн может переносить информацию (с использованием модуляции). Монохроматическая волна не может переносить информацию. Поэтому для распространения сигналов особую важность имеет *групповая скорость*.

Уравнение Релея (Raleigh)

$$v_{gr} = v_{ph} - \lambda \frac{dv_{ph}}{d\lambda}$$



4. Атмосферные преломления

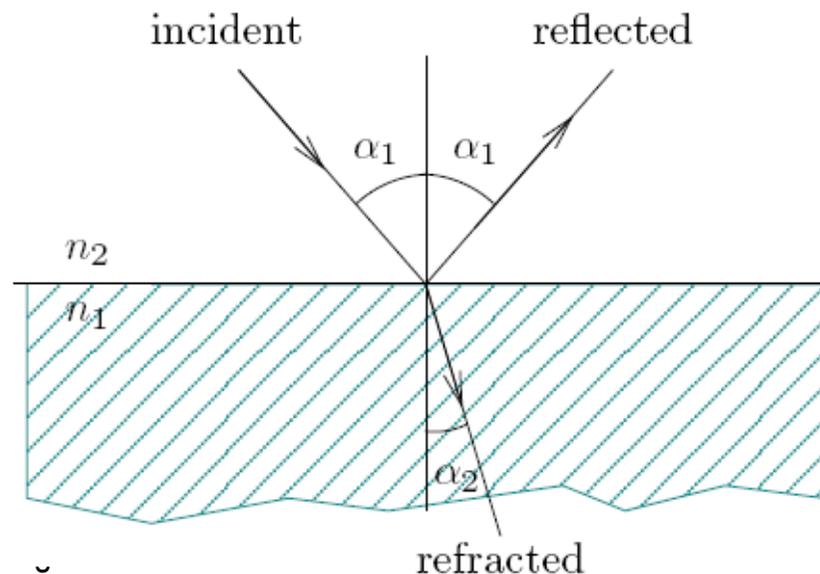
Коэффициент преломления электромагнитного сигнала зависит от атмосферы и частоты сигнала.

$$n = \frac{c}{v}$$

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

$$n_{ph} = \frac{c}{v_{ph}}$$

$$n_{gr} = \frac{c}{v_{gr}}$$



Дифференцируя коэф. преломления фазовый скорости по длине волны n_{ph} из уравнения Релея получим:

$$n_{gr} = n_{ph} - \lambda \frac{dn_{ph}}{d\lambda}$$

$$n_{gr} = n_{ph} + f \frac{dn_{ph}}{df}$$



4. Атмосферные преломления

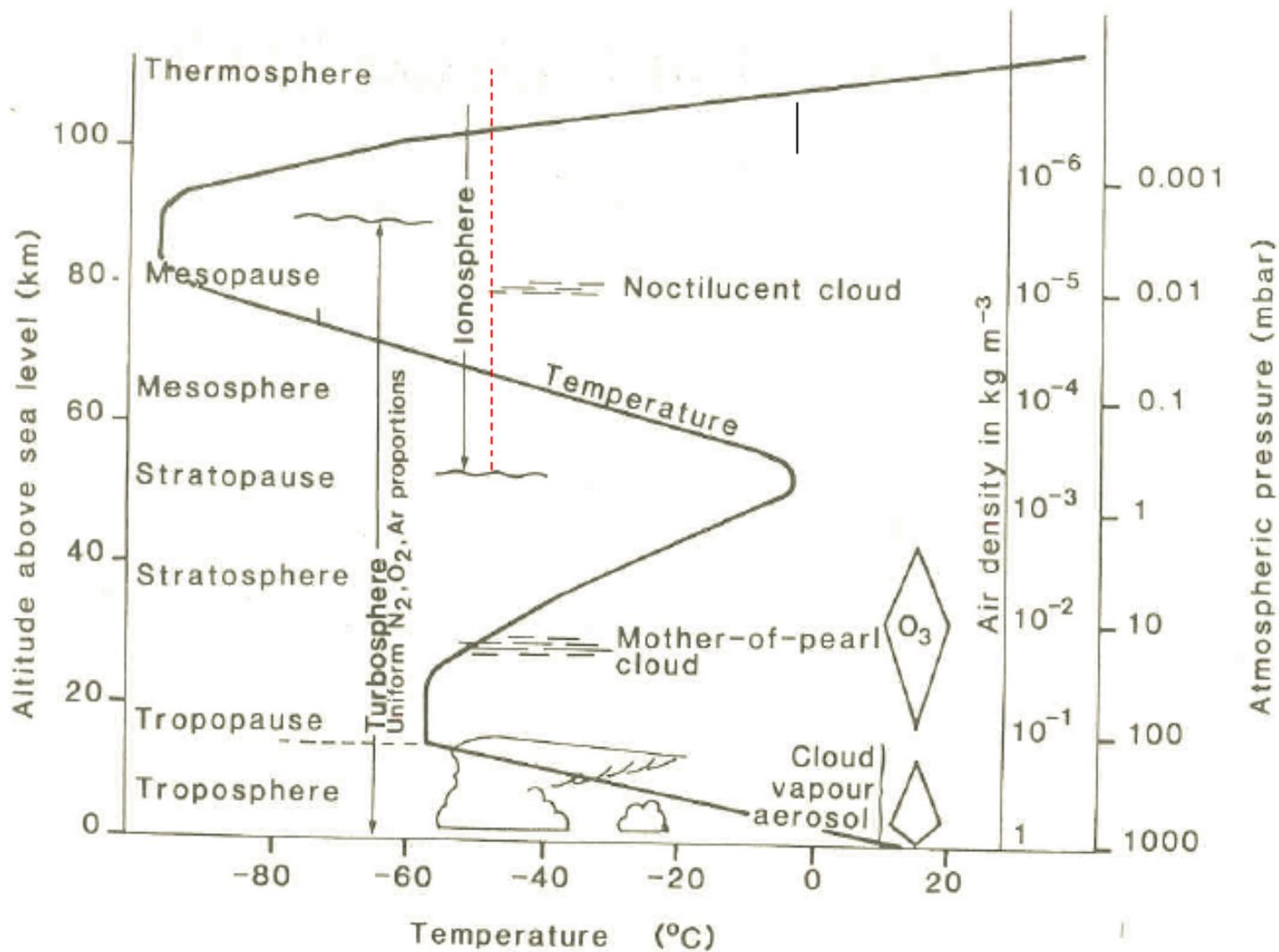
Атмосферная оболочка Земли играет огромную роль в распространении электромагнитных волн.

– *Тропосфера*, нейтральная атмосфера, нижний слой атмосферы (до высоты примерно 20 км). На распространение сигналов главным образом влияет температура, давление и влажность. Преломления не зависят от частоты сигнала

- *Ионосфера*, верхняя часть атмосферы, приблизительно между 70 и 1000 км. На распространение сигнала главным образом влияет число заряженных частиц. Преломления зависят от частоты сигнала.



4. Атмосферные преломления



4. Атмосферные преломления

4.1. Уменьшение Ionosphere эффектов

Пути и условия уменьшения влияния ионосферы:

1. Обработать Ionosphere free linear combination если измерения на двух частотах возможны. Однако, это не возможно для дешевых одночастотных приемников.
2. Использовать ионосферные поправки, которые передаются в навигационном сообщении (navigational message). Эти поправки основаны на простой ионосферной модели – Klobuchar model.
3. Использование региональных или глобальных ионосферных моделей IGS, определенных по данным от стационарных наблюдательных центров. Это позволяет в большей степени компенсировать ошибки масштабного коэффициента (scale error). Коротко-периодические эффекты, однако, не устраняются и следовательно кинематические применения уязвимы.



4. Атмосферные преломления

4.1. Уменьшение Ionosphere эффектов

E – общее содержание электронов (total electron content) TEC

$$\delta\rho_{\text{ion,ph}} = \int_L (n_{\text{ph}}(s) - 1) ds = \int_L \left(-\alpha \frac{N_e(s)}{f^2} \right) ds = -\frac{\alpha}{f^2} \int_L N_e(s) ds = -\alpha \frac{E}{f^2}$$

TEC – количество свободных электронов в столбе, протянувшемся от антенны приемника до спутника с поперечным сечением 1 м².

TEC измеряется в TEC units (TECU): 1 TECU = 10¹⁶ свободных электронов на 1 м²

VTEC – vertical TEC – TEC в направлении зенита.

Получим местный (наклонный) TEC из транслируемого VTEC, используя простейшую модель (mapping function).

Рассмотрим упрощенную single-layer model: считается что все электроны сконцентрированы в бесконечно тонком слое на высоте H = 450 км, получим:

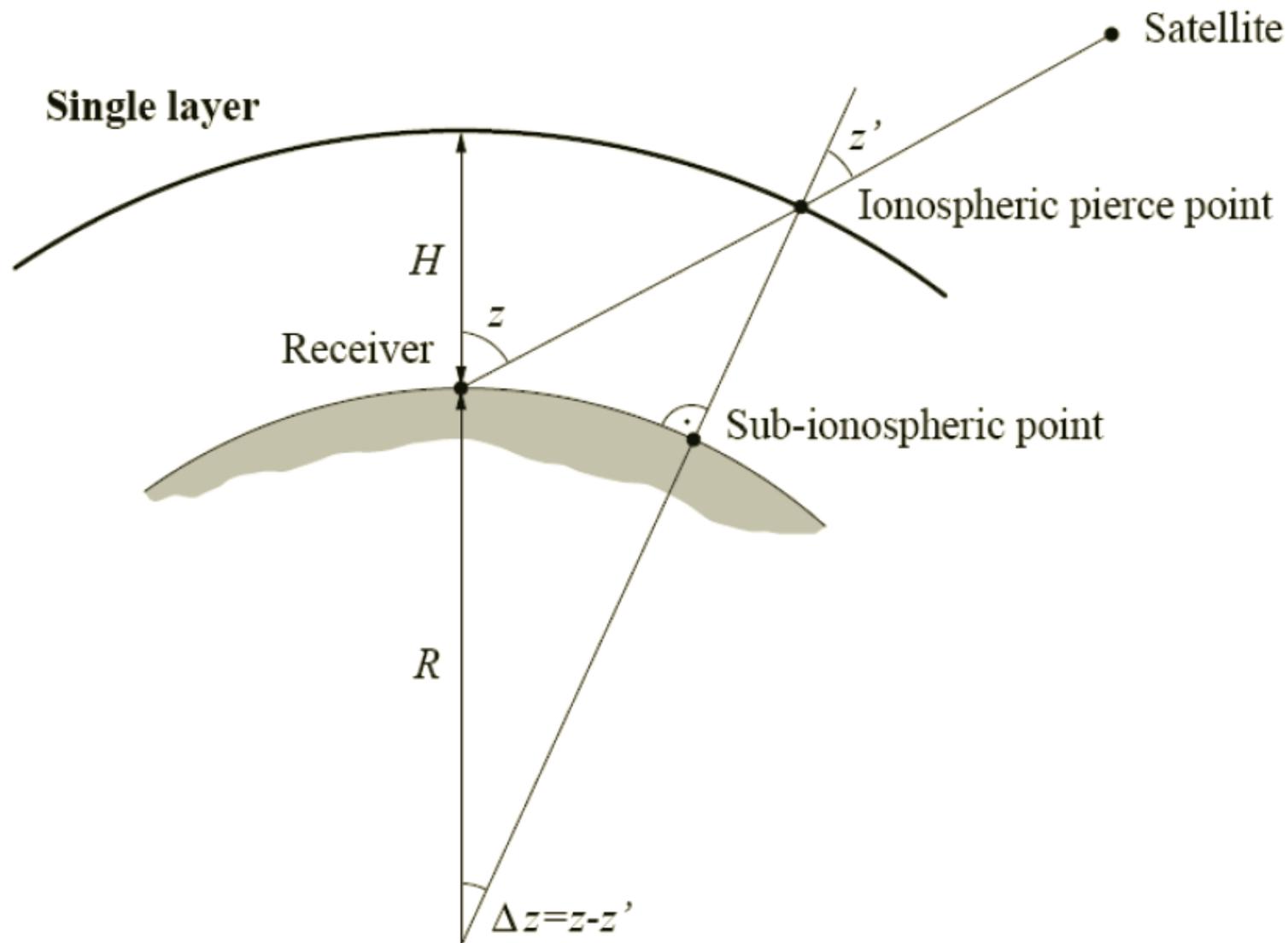
$$E(z) = m_I(z) \cdot E_V; \quad m_I(z) = \frac{1}{\cos(z')} ; \quad \sin z' = \frac{R}{R + H} \sin z ;$$

z' – зенитный угол на высоте электронного слоя соответствующий зенитному углу на поверхности Земли



4. Атмосферные преломления

4.1. Уменьшение Ionosphere эффектов



4. Атмосферные преломления

4.2 Тропосферные эффекты

1. Индекс преломления лучей в тропосфере не зависит от частоты сигналов в пределах от 100 МГц до 15 ГГц.
2. Запаздывание сигнала вызванное тропосферой

$$\delta\rho_{\text{тр}} = 10^{-6} \int_L N(s) ds$$

где $N = (n - 1) \cdot 10^6$ – преломляющая способность (refractivity)

Преломляющая способность зависит от плотности атмосферы и от электрических свойств молекул.

Дипольные молекулы которые взаимодействуют с проходящим излучением, сами начинают колебаться и излучать, что вызывает различную скорость распространения и направление.

Молекулы O_2 и N_2 имеют только индуцируемые дипольные моменты, тогда как молекулы воды H_2O имеют постоянные диполи.

В соответствии с моделью Smith-Weintraub преломляющая способность влажного воздуха

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}$$



4. Атмосферные преломления

4.2 Тропосферные эффекты

В соответствии с моделью Smith-Weintraub преломляющая способность влажного воздуха

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}$$

P_d и e – парциальные давления сухого воздуха (dry) и водных паров (water vapor) соответственно; T – температура в К; Z_d и Z_w – сжимаемость (compressibility) сухого воздуха и водных паров; k_1 , k_2 , k_3 – эмпирические коэффициенты.

$$\delta\rho_{\text{тр}} = 10^{-6} \int_L N(s) ds = 10^{-6} \int_L N_d(s) ds + 10^{-6} \int_L N_w(s) ds = \delta\rho_{\text{dry}} + \delta\rho_{\text{wet}}$$

Общее тропосферное запаздывание (total tropospheric delay (dry and wet)) равняется примерно 2,3 м в зенитном направлении (соответствует 8 нс) и примерно 25 м при возвышениях равных 5 градусам.

Сухая составляющая (dry part) составляет около 90% общего запаздывания и определяется плотностью сухого воздуха и следовательно легко может быть промоделирована по данным наземных замеров давления. (постоянные девиации медленны: 2 см за 12 часов)

Влажная составляющая (wet part) запаздывания составляет максимально 40 см. Она изменяется очень быстро во времени и пространстве и поэтому сложно моделируема и предсказуема из-за неизвестного распределения водных паров в атмосфере (облаках)



4. Атмосферные преломления

4.3 Mapping function

Тропосферные запаздывания зависят от длины пути в атмосфере и поэтому является функцией зенитного угла z спутника.

Зависимость запаздывания часто записывают как произведение зенитного запаздывания $\delta\rho_{trp}$ и отображающей функции (mapping function) $m_t(z)$

$$\delta\rho_{trp}(z) = m_t(z) \cdot \delta\rho_{trp}^0$$

Простейшая отображающая функция:

$$m_t(z) = \frac{1}{\cos z}$$

Поскольку водные пары уменьшаются до 0 к 10 км, а сухой воздух распространяется до 40 км, эти компоненты разделяют

$$\delta\rho_{trp}(z) = m_{dry}(z) \cdot \delta\rho_{dry}^0 + m_{wet}(z) \cdot \delta\rho_{wet}^0$$



Автоматическое управление Летательными Аппаратами и Центральные Навигационные Системы

