

УДК 22.08.2013

**О ПОНЯТИЙНЫХ ОСНОВАХ РАДИОНАВИГАЦИИ****А.А. Поваляев**

Российские космические системы, Московский авиационный институт

*На основе критического обзора выявляются противоречия в системе понятий, используемых в современной учебной и научной литературе для описания принципов функционирования радионавигационных систем. Вводится новая система понятий, устраняющая выявленные противоречия.*

**Введение**

В настоящее время во всем мире эксплуатируется несколько родственных по своим понятийным основам типов радионавигационных систем, таких как глобальные навигационные спутниковые системы (ГЛОНАСС, GPS [1-11]), наземные длинноволновые системы (Omega, Альфа, Маршрут [11, 12]), наземные средневолновые системы (Logan-C, Чайка [12]). Все эти системы структурно представляют собою сеть неподвижных либо движущихся радионавигационных точек (РНТ), излучающих синхронно навигационные сигналы. Моменты времени, определяемые этими синхронно излучаемыми сигналами, принято называть шкалой времени системы.

Среди перечисленных систем наиболее сложными и в то же время наиболее совершенными являются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). Соответственно описание принципов функционирования ГНСС требует использования наиболее сложных понятийных основ. Для всех остальных упомянутых выше радионавигационных систем понятийные основы более простые и являются частным случаем понятийных основ ГНСС. Поэтому наш критический обзор начнем с разбора системы понятий, используемых в современной учебной и научной литературе по ГНСС.

**1 Обзор понятий, используемых в современной учебной и научной литературе для описания принципов функционирования ГНСС**

В учебной [5, 6, 11] и научной [7-10] литературе описываются принципы функционирования ГНСС. В [5-9] для простоты полагается, что наземный сегмент контроля и управления ГНСС обеспечивает высокоточную синхронизацию шкал времени всех навигационных спутников, входящих в ее орбитальную группировку, со шкалой времени системы (ШВС). В [10] рассматривается более реальная ситуация, в которой

такая синхронизация достигается за счет введения поправок в измерения. В результате в [5-10] полагается, что шкалы времени всех навигационных спутников (ШВС) синхронизированы с ШВС.

Какое смысловое содержание вкладывается в понятие «шкала времени», чем понятие времени по шкале отличается от обычного понятия времени  $t$ , используемого в учебниках по физике, и что означает синхронизация разных шкал времени, в [3-11] не поясняется.

Для описания принципов функционирования ГНСС, излагаемых в [5-11], воспользуемся рис.1, заимствованным из [11] (аналогичный рисунок приводится в [10]).

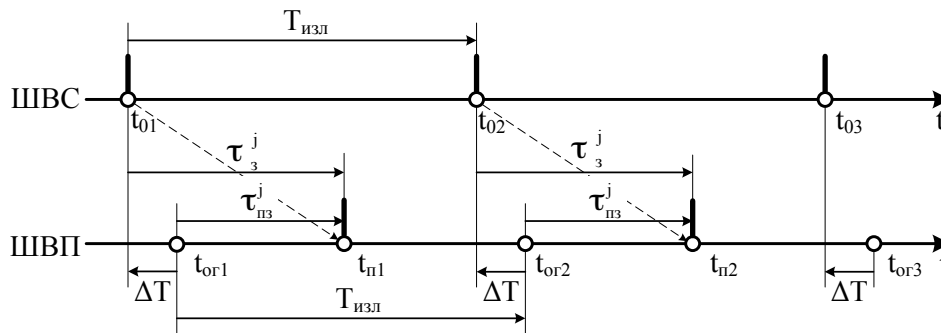


Рис. 1

Навигационные спутники в повторяющиеся с периодом  $T_{изл}$  моменты времени  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  на ШВС излучают навигационные сигналы. Собственный опорный генератор навигационного приемника порождает следующие с тем же периодом  $T_{изл}$  опорные моменты времени  $t_{ог1}, t_{ог2}, t_{ог3}, \dots$ , задающие шкалу времени навигационного приемника (ШВП). В [7,8] моменты времени  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  названы “априори известными”, в [10] моментами времени с “номинальным временем излучения”. Смысловое содержание понятий, обозначаемых этими терминами, в [7,8, 10] не поясняется. Сигналы, излучаемые спутниками в моменты времени  $t_{01}, t_{02}, t_{03}$ , принимаются по ШВП в моменты времени  $t_{п1}, t_{п2}, t_{п3}, \dots$ . Для удобства на рис. 1 моменты времени излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}$ , соединены с моментами приема  $t_{п1}, t_{п2}, t_{п3}, \dots$  наклонными пунктирными стрелками.

В общем случае ШВП смещена относительно ШВС на неизвестную для навигационного приемника величину  $\Delta T$ , показанную на рис. 1 и определяемую в [11] как:

$$\Delta T = t_{0i} - t_{огi}. \quad (1)$$

В связи с тем, что в примере, иллюстрируемом с помощью рис.1, ШВП запаздывает относительно ШВС,  $\Delta T$  на этом рисунке является

отрицательной величиной. Положительным направлением отсчета времени на рис. 1 и всех далее приводимых рисунках является направление слева направо.

Согласно [5-9, 11], навигационный приемник осуществляет измерения задержек спутниковых сигналов в своей шкале, т. е. он полагает, что сигналы со спутников излучаются в опорные моменты времени  $t_{ог1}, t_{ог2}, t_{ог3}, \dots$  на шкале ШВП, в то время, как реально они излучаются в моменты времени  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$ . В результате в навигационном приемнике по каждому  $j$ -му спутнику, находящемуся в зоне видимости, будет измерена не задержка  $\tau_3^j$  распространения сигнала от  $j$ -го спутника до навигационного приемника, а так называемая псевдозадержка  $\tau_{пз}^j$

$$\tau_{пз}^j = \tau_3^j + \Delta T, \quad j = \overline{1, J}, \quad (2)$$

где  $J$  - общее количество спутников, отслеживаемых в навигационном приемнике. Таким образом, согласно [5-9, 11], псевдозадержка  $\tau_{пз}^j$  в навигационном приемнике формируется путем измерения длительности интервала времени, который начинается в моменты времени  $t_{огi}$  и заканчивается в моменты  $t_{пi}$ . Будем далее для краткости называть этот способ формирования псевдозадержки первым.

Каким образом навигационный приемник определяет моменты времени приема  $t_{п1}, t_{п2}, t_{п3}, \dots$  на ШВП, в [5-9, 11] не поясняется. Можно лишь догадываться, что такое определение основано на импульсном характере излучения либо же на том, что под моментами излучения понимаются определенные моменты времени на последовательных периодах сигнала, излучаемого непрерывно, например, начало каждого такого периода. В случае импульсного характера излучения моменты  $t_{п1}, t_{п2}, t_{п3}, \dots$  могут определяться в навигационном приемнике как моменты приема импульсов, излученных в моменты времени  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$ . Если же излучается непрерывный сигнал, то моменты  $t_{п1}, t_{п2}, t_{п3}, \dots$  в навигационном приемнике могут определяться как заранее оговоренные моменты времени на периодах непрерывно излучаемого сигнала, например, начало каждого такого периода в принимаемом сигнале.

В [5-9, 11] также не поясняется, каким образом навигационный приемник ставит в соответствие каждому моменту времени излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  на ШВС один из опорных моментов времени  $t_{ог1}, t_{ог2}, t_{ог3}, \dots$  на ШВП. Исходя из того, что моменты времени излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  в [7,8] названы “априори известными”, можно лишь догадываться, что эти моменты выбираются в навигационном приемнике на ШВП равными “априорно известным” моментам времени  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  на ШВС. Но что означает равенство двух моментов времени на разных шкалах в [3 - 11], не

поясняется. Если предположить что это означает  $t_{0i} = t_{ori}$ , то тогда в соответствии с (1)  $\Delta T=0$ , т. е. ШВП не является смещенной относительно ШВС, и тогда в соответствии с (2) псевдозадержка  $\tau_{пз}^j$  должна быть равна задержке  $\tau_3^j$ . Таким образом, “априорная известность” моментов времени излучения  $t_{0i}$  не может объяснить способ, по которому навигационный приемник каждому моменту времени излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  на ШВС ставит в соответствие опорные моменты времени  $t_{or1}, t_{or2}, t_{or3}, \dots$  на ШВП.

Согласно [10] псевдозадержка  $\tau_{пз}^j$  в навигационном приемнике формируется как «разность между временем прихода сигнала по ШВП (на рис. 1 это моменты времени  $t_{пi}$ ) и номинальным временем его излучения». Этот способ формирования псевдозадержки будем далее для краткости называть вторым. В [10] не поясняется, что такое «номинальное время излучения» и на какой шкале времени оно определяется. Но поскольку излучение сигнала идет по шкале времени системы, то можно предположить, что «номинальные времена излучения» это моменты времени  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  на ШВС, показанные на рис. 1. Вычитание этих «номинальных времен излучения» из моментов приема  $t_{п1}, t_{п2}, t_{п3}, \dots$ , определяемых по ШВП, эквивалентно измерению длительности интервала времени на ШВП, начинающегося в момент, когда время на ШВП равно «номинальным значениям»  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  и заканчивающегося в моменты приема  $t_{п1}, t_{п2}, t_{п3}, \dots$ . Нетрудно видеть, что второе определение понятия псевдозадержки полностью совпадает с первым если положить, что показанные на рис. 1 опорные моменты времени  $t_{or1}, t_{or2}, t_{or3}, \dots$  на ШВП задаются равными «номинальным значениям»  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$ . Таким образом, второе определение понятия псевдозадержки столь же противоречиво, как и первое.

Псевдозадержка (2), будучи умноженной на скорость света  $c$ , порождает так называемую псевдодальность  $\rho^j$

$$\rho^j = c\tau_{пз}^j = c(\tau_3^j + \Delta T) = R + c\Delta T = \sqrt{(x_{п} - x^j)^2 + (y_{п} - y^j)^2 + (z_{п} - z^j)^2} + \Delta R_{п}, \quad j = \overline{1, J} \quad (3)$$

где  $x_{п}, y_{п}, z_{п}$  – неизвестные координаты навигационного приемника,  $x^j, y^j, z^j$  – известные координаты  $j$ -го спутника, извлекаемые из его навигационного сообщения,  $\Delta R_{п} = c\Delta T$  – выраженное в метрах неизвестное смещение ШВП относительно ШВС. Псевдозадержки  $\rho^j$ , измеренные не менее чем по четырем спутникам ( $J \geq 4$ ), позволяют образовать систему уравнений (3) относительно четырех неизвестных  $x_{п}, y_{п}, z_{п}, \Delta R_{п}$ , из решения которой находятся оценки  $\hat{x}_{п}, \hat{y}_{п}, \hat{z}_{п}, \Delta \hat{R}_{п}$ .

## 2. Критика понятийной модели, используемой в современной учебной и научной литературе для пояснения принципов функционирования ГНСС

Изложенная выше понятийная модель радионавигации, которую для удобства дальнейшего изложения будем называть старой, помимо уже рассмотренных противоречий, использует термины, смысловое содержание которых является размытым и иногда бессмысленным. Использование этих терминов приводит в старой модели к дополнительным неразрешимым противоречиям. Рассмотрим несколько примеров, подтверждающих данное утверждение.

В современных ГНСС сигналы навигационных спутников, применяющиеся для измерения псевдодальностей, являются непрерывными периодическими псевдослучайными последовательностями (ПСП). Что в таком случае понимается под моментами излучения и приема непрерывных сигналов, ведь такие сигналы излучаются и принимаются в любой момент времени и в этом смысле любой момент времени является моментом излучения и приема?

Каково смысловое содержание терминов “априори известные” [7,8] моменты излучения либо моменты с “номинальным временем излучения” [10], которые используются в старой модели для описания свойств моментов времени  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$ , показанных на рис. 1? Возможны два варианта толкования этого смыслового содержания.

В первом варианте моменты излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  понимаются как моменты ШВС, кратные определенному периоду, например, секунде или миллисекунде. Иными словами, моменты излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  совпадают с моментами секунд (миллисекунд) ШВС, но численные значения времени на ШВС в моменты излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  в навигационном приемнике не известны. Будем далее для удобства эти численные значения называть оцифровками моментов излучения. Моменты излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$ , определяемые в соответствии с первым вариантом, вполне можно признать «априори известными», либо называть их моментами времени с «номинальным временем излучения».

Во втором варианте подразумевается, что в навигационном приемнике заранее известно не только то, что моменты излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  кратны определенному периоду (например, совпадают с моментами секунд (миллисекунд) ШВС), но в навигационном приемнике известны и их оцифровки. Однако эти оцифровки могут стать известными в навигационном приемнике только при условии, что они каким-то образом закладываются в излучаемый сигнал и затем выделяются из него в навигационном приемнике. Но, во-первых, в старой понятийной модели

ничего не говорится о передаче со спутника оцифровок моментов излучения, и во-вторых, даже если предположить, что эти оцифровки каким-то образом передаются, их никак нельзя назвать «априори известными» либо «номинальными». Таким образом, моменты излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$ , определяемые в соответствии со вторым вариантом, не являются «априори известными» и их оцифровки не являются «номинальными».

Рассмотрим теперь всегда ли возможно формирование в навигационном приемнике измерений псевдозадержек в случае первого варианта определения смыслового содержания моментов излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$ .

Если задержка  $\tau_3^j$  сигнала превышает период  $T_{\text{изл}}$ , то рис. 1 преобразуется к виду, показанному на рис. 2.

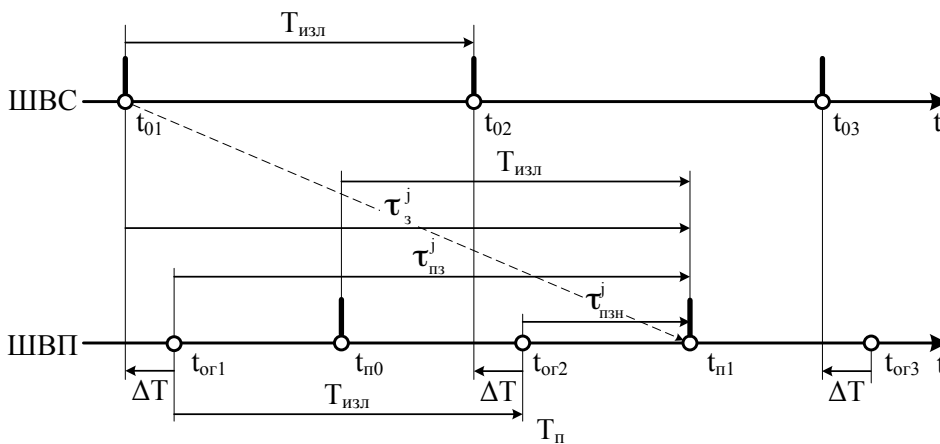


Рис. 2. Неоднозначность измерений псевдозадержки при  $\tau_3^j > T_{\text{изл}}$

Из рис. 2. видим, что при  $\tau_3^j > T_{\text{изл}}$  измерения псевдозадержки становятся неоднозначными. Например, для сигнала, излучаемого на рис. 2 в момент  $t_{01}$  на ШВС, навигационный приемник не имеет информации для отождествления этого момента излучения с моментом  $t_{ог1}$  на своей шкале, и поэтому он может отождествлять момент излучения  $t_{01}$  на ШВС с любым из опорных моментов времени  $t_{ог1}, t_{ог2}, t_{ог3}, \dots$  на ШВП. Это означает, что при  $\tau_3^j > T_{\text{изл}}$  и использовании первого варианта толкования смыслового содержания моментов излучения  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$  измерения псевдозадержки являются неоднозначными и могут быть выражены как

$$\tau_{пз}^j = \tau_{пзн}^j + k^j T_{изл}, \quad j = \overline{1, J} \quad (4)$$

где  $\tau_{пзн}^j$  - неоднозначные измерения псевдозадержки, сформированные в навигационном приемнике при использовании на ШВП в качестве опорного, того момента времени среди  $t_{ог1}, t_{ог2}, t_{ог3}, \dots$ , который является ближайшим и предшествующим моменту приема (на рис. 2 это момент  $t_{ог2}$ ),  $k^j$  - неопределенное целое число, которое может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Такая же неоднозначность измерений псевдозадержки возникает, если модуль  $|\Delta T|$  смещения ШВП относительно ШВС превышает период  $T_{изл}$ . В этом случае рис. 1 преобразуется к виду, показанному на рис. 3.

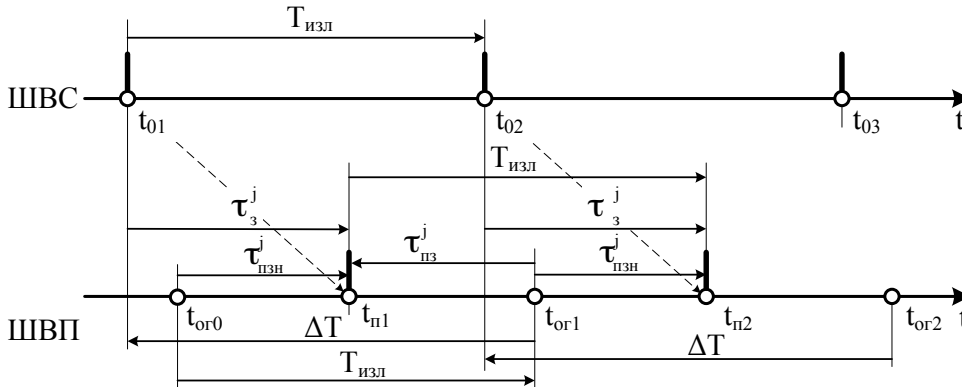


Рис. 3. Неоднозначность измерений псевдозадержки при  $|\Delta T| > T_{изл}$

Как видно из рис. 3, при больших отрицательных смещениях  $\Delta T$  псевдозадержки  $\tau_{пз}^j$  становятся отрицательными, а их значения могут быть выражены с помощью той же формулы (4).

В принципе рассмотренная неоднозначность измерений псевдозадержки может быть разрешена с помощью привлечения грубых априорных сведений о задержке  $\tau_з^j$  и смещении  $\Delta T$  ШВП относительно ШВС. При этом, суммарная ошибка грубых априорных сведений о задержке  $\tau_з^j$  и смещении  $\Delta T$  не должна превышать  $T_{изл}/2$ . По таким априорным сведениям с помощью формулы (2) может быть вычислено грубое значение  $\tau_{пзгр}^j$ . Наличие такой грубой оценки псевдозадержки с учетом (4) позволяет записать следующее приближенное равенство  $\tau_{пзгр}^j \approx \tau_{пзн}^j + k^j T_{изл}$ . Неточность этого равенства не превышает  $T_{изл}/2$ . Отсюда нетрудно получить формулу для вычисления неопределенного целого числа  $k^j$ , знание которого решает проблему разрешения неоднозначности

$$k^j = \left\langle \frac{\tau_{пзгр}^j - \tau_{пзн}^j}{T_{изл}} \right\rangle, \quad j = \overline{1, J}, \quad (5)$$

где операция  $\langle x \rangle$  означает вычисление целого ближайшего к  $x$ . В учебном пособии [5] описывается именно этот способ разрешения неоднозначности измерений псевдозадержки в ГНСС, хотя ни в каких реальных навигационных приемниках он никогда не используется.

В какой момент времени в навигационном приемнике осуществляется измерения псевдозадержек  $\tau_{и}^j$  (2). Согласно рис. 1, эти измерения осуществляется в моменты времени приема  $t_{п1}, t_{п2}, t_{п3}, \dots$  сигналов, излученных в моменты времени  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$ . Но измерения псевдозадержек должны осуществляться одновременно не менее чем по четырем спутникам. На рис. 4б и 4в показано положение моментов приема  $t_{п1}^j, t_{п2}^j, t_{п3}^j, \dots, t_{п1}^k, t_{п2}^k, t_{п3}^k, \dots$  сигналов, излученных  $j$ -м и  $k$ -м спутниками в моменты времени  $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$ .

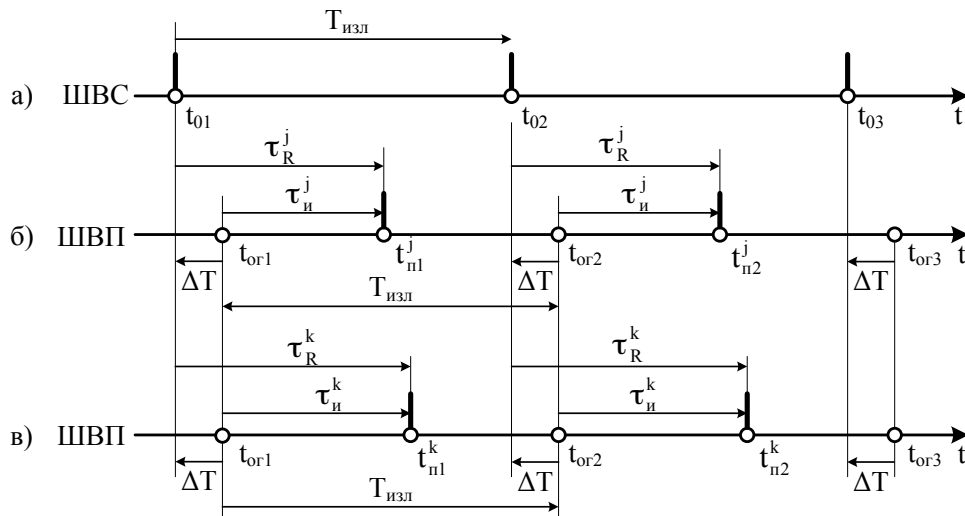


Рис. 4 Моменты приема сигналов  $j$ -го и  $k$ -го навигационных спутников

Из-за различия дальностей до спутников моменты времени  $t_{п1}^j, t_{п2}^j, t_{п3}^j, \dots$  приема сигналов от  $j$ -го спутника в навигационном приемнике не будут совпадать с моментами  $t_{п1}^k, t_{п2}^k, t_{п3}^k, \dots$  приема сигналов от  $k$ -го спутника. Таким образом, если измерения псевдозадержки по каждому спутнику осуществлять в моменты приема сигналов этого спутника, то такие измерения по разным спутникам будут происходить в разные моменты



времени. Тогда к какому моменту времени следует относить оценки  $\hat{x}_п$ ,  $\hat{y}_п$ ,  $\hat{z}_п$ ,  $\Delta\hat{R}_п$ , найденные из решения системы нелинейных уравнений (3).

Ясно, что измерения псевдозадержек по всем спутникам в навигационном приемнике должны осуществляться в единые моменты времени  $t_{изм}$ . В качестве таковых можно использовать, например, опорные моменты  $t_{ог1}$ ,  $t_{ог2}$ ,  $t_{ог3}$ , ..., показанные на рис. 4. Положение этих моментов на ШВП определяется (задается) сигналом собственного генератора навигационного приемника. Однако для того, чтобы измерения псевдозадержек, соответствующих разным НКА, осуществлялись в навигационном приемнике в единые моменты  $t_{изм}$ , необходимо, чтобы соответствующие им моменты излучения сигналов с разных спутников были разными и предшествовали моментам измерения  $t_{изм}$  на время распространения сигналов от разных спутников до навигационного приемника. Для удобства будем далее эти моменты времени называть моментами предшества моменту измерения  $t_{изм}$  и обозначать их как  $t_{пр}^j$ , где верхний индекс  $j$  обозначает номер спутника. Положение единых для  $j$ -го и  $k$ -го спутников моментов измерения  $t_{изм1}$ ,  $t_{изм2}$ ,  $t_{изм3}$  и соответствующих им моментов предшества  $t_{пр}^j$ ,  $t_{пр}^k$  показано на рис. 5.

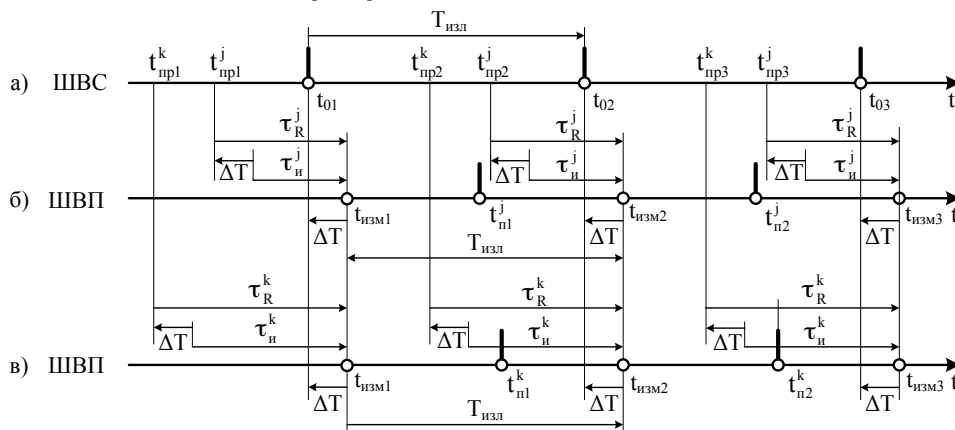


Рис. 5 Положение моментов измерения  $t_{изм}$  и соответствующих им моментов предшества  $t_{пр}^j$ ,  $t_{пр}^k$  для  $j$ -го и  $k$ -го спутников

Из рис. 5 видим, что высказанное ранее предположение о импульсном характере излучения не может быть принято, потому что на рис. 5 в моменты  $t_{пр}^j$ , предшества  $t_{пр}^k$  никаких импульсов не излучается. Предположение о том, что под моментами излучения понимаются определенные моменты времени на периодах сигнала, излучаемого непре-

равно, также не может быть принято, потому что положение моментов предшествования на периодах излучаемого сигнала может быть произвольным и меняется вследствие движения спутников и навигационного приемника. Учитывая сказанное, следует опять признать, что моменты излучения (моменты предшествования в нашей терминологии) не могут быть “априори известными”, либо быть моментами времени с “номинальным временем излучения”.

Для того, чтобы преодолеть описанные выше противоречия старой понятийной модели необходимо ввести новые понятия, рассматриваемые в следующем разделе.

### 3. Определение содержательного значения понятий «шкала времени» и «время по шкале»

Выявленные выше неразрешимые противоречия старой понятийной модели радионавигации не могут быть устранены без определения смыслового содержания понятий «шкала времени» и «время по шкале». Несмотря на широкое использование в литературе [3 - 12] этих терминов, автору не удалось найти в ней определения их смыслового содержания. Поэтому попытаемся определить смысловое содержание понятий «шкала времени» и «время по шкале» самостоятельно.

Далее для исключения путаницы между терминами «время» и «время по шкале» везде вместо термина «время» будем использовать термин «физическое время», под которым будем понимать идеальное, абсолютно равномерно текущее время, используемое в учебниках по физике. Для обозначения физического времени будем использовать символ  $t$ .

Определение смыслового содержания понятий «шкала времени» и «время по шкале» требует определения смыслового содержания понятия фазы, а также введения различий в определении смыслового содержания понятия фазы. Опять, несмотря на широкое использование в литературе термина «фаза», автору не удалось найти определения его смыслового содержания. В учебной литературе [13] приводится математическое определение понятия фазы для гармонического либо в более общем случае квазигармонического процесса, либо сигнала (далее для краткости сигнала)  $a(t) = A(t) \cos \varphi(t)$ . Здесь  $A(t)$  – медленно изменяющаяся амплитуда сигнала,  $\varphi(t)$  – медленно изменяющаяся фаза сигнала (в радианах), которая является аргументом гармонической функции. Аргумент  $\varphi(t)$  связан с мгновенной угловой частотой сигнала  $\omega(t)$  соотношением

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(x) dx + \varphi_0, \quad (6)$$

где  $\omega(t) = 2\pi f(t)$ ,  $f(t)$  – мгновенная частота (в герцах). Первое слагаемое в правой части (6) определяется как приращение фазы на интервале времени  $0 - t$ , а  $\varphi_0$  определяется как начальная фаза, т.е. значение фазы  $\varphi(t)$  в момент  $t=0$ . Понятие мгновенной угловой частоты  $\omega(t)$  при этом является производной от фазы  $\varphi(t)$ .

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (7)$$

Для строго гармонического сигнала частоты  $\omega$  и  $f$  являются константами и фаза  $\varphi(t) = \omega t + \varphi_0$ . В случае квазигармонического сигнала  $\omega(t)$  является медленно меняющейся функцией времени.

Выражения (6, 7) позволяют геометрически интерпретировать фазу квазигармонического сигнала как угол  $\varphi(t)$  вектора переменной длины  $A(t)$ , вращающегося с медленно меняющейся мгновенной угловой скоростью  $\omega(t)$  (рис. 6).

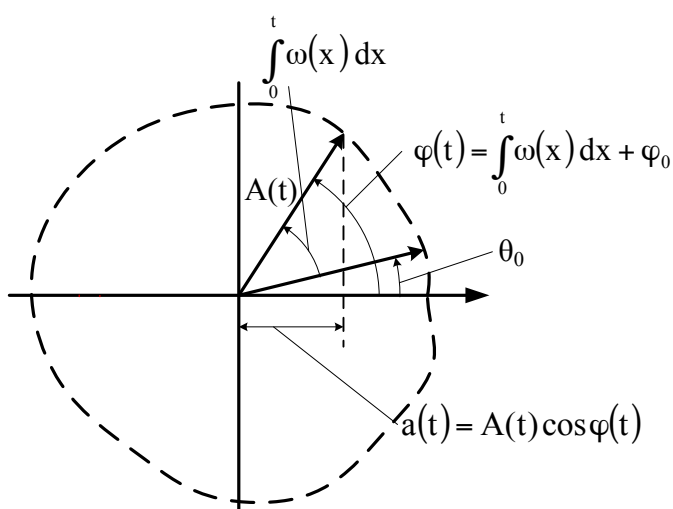


Рис. 6. Фаза  $\varphi(t)$  как угол вращающегося вектора

Ранее упоминавшаяся медленность изменения амплитуды  $A(t)$  и мгновенной угловой частоты  $\omega(t)$  квазигармонического сигнала означает, что их значения слабо изменяются за время, затрачиваемое вектором на один оборот. Фаза гармонического сигнала изменяется строго равномерно, т. е. по линейному закону  $\varphi(t) = \omega t + \varphi_0$ . У квазигармонического сигнала фаза изменяется неравномерно, но по закону, близкому к линейному.

Далее в качестве единицы измерения фазы будем использовать цикл, который является более удобным для нашего дальнейшего рассмот-

рения. 1 цикл равен  $2\pi$  радиан. Выражения (6) и (7) в этом случае преобразуются к виду:

$$\varphi(t) = \int_0^t f(x) dx + \varphi_0, \quad (8)$$

$$f(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (9)$$

На практике часто возникает необходимость вводить в рассмотрение разновидности понятия фазы в виде дольной и полной фазы. Дольная фаза  $\varphi_d(t)$  это фаза, лежащая в пределах 1-го цикла  $0 \leq \varphi_d < 1$ . Полная же фаза  $\varphi_n(t)$  может принимать произвольные значения, т. е. содержать в своем составе помимо дольной фазы  $\varphi_d(t)$  целое число циклов  $n(t)$ , отсчитываемых в каждый момент физического времени  $t$  от некоторого заранее определенного условного начала.

$$\varphi_n(t) = \varphi_d(t) + n(t). \quad (10)$$

При проведении фазовых измерений могут возникать ситуации, когда целое число  $n(t)$ , входящее в состав полной фазы (10), отличается от его истинного значения на неопределенное целое число циклов. Такую полную фазу называют неоднозначной.

Интервал физического времени  $t$ , на котором полная фаза нарастает на 1 цикл, будем называть цикловым интервалом. Соотношения между полной  $\varphi_n(t)$  и дольной  $\varphi_d(t)$  фазами и цикловые интервалы показаны на рис. 7.

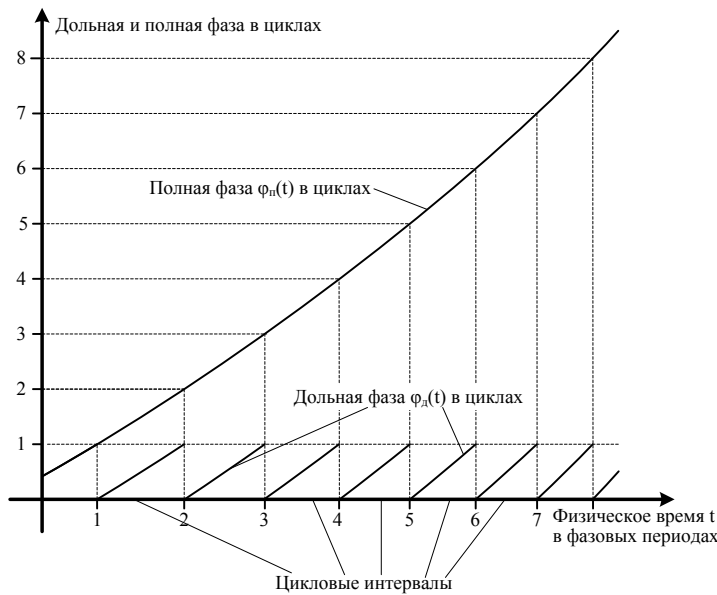


Рис. 7. Соответствие между дольной и полной фазой процесса

Из рис. 7 видим, что цикловые интервалы могут иметь различную длительность.

Дольная фаза сигнала может быть получена из полной фазы добавлением либо вычитанием такого целого числа циклов, чтобы результат лежал в пределах от 0 до 1 цикла. Как известно, добавление целого числа  $2\pi$  (целого числа циклов) к аргументу гармонической функции не изменяет значения этой функции. В этом смысле полная и дольная фазы являются эквивалентными друг другу.

Понятие фазы применимо не только к гармоническим или квазигармоническим сигналам. На рис. 8(б) показано изменение во времени псевдослучайной последовательности (ПСП) 111100010011010 при неравномерном изменении ее фазы, а на рис. 8а показан график этой неравномерно изменяющейся фазы. На рис. 8б показаны две одинаковых по структуре ПСП 111100010011010, располагающиеся на разных по длительности цикловых интервалах физического времени. Каждый из этих цикловых интервалов начинается и заканчивается в момент переднего фронта импульса, соответствующего первой единице в группе из 4-х подряд идущих единиц в структуре ПСП. Приращение фазы этих ПСП на этих разных цикловых интервалах одинаково и равно одному циклу ( $2\pi$  радиан).

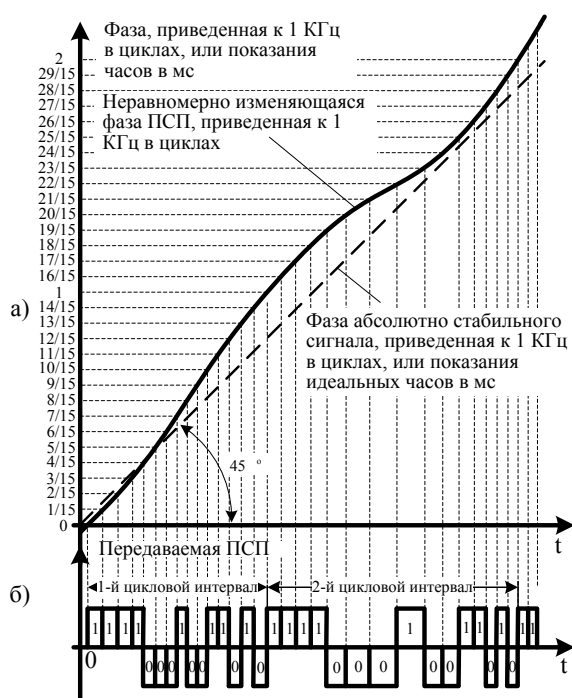


Рис. 8. ПСП с неравномерным изменением фазы

Рассмотренный пример показывает, что для обобщения понятия фазы сигнала следует различать понятие временного и структурного периодов сигнала. Под временным периодом обычно понимается периодически повторяющийся строго одинаковый интервал физического времени. Под структурным периодом следует понимать тот интервал физического времени, на котором повторяются все элементы структуры сигнала. Этот период может иметь переменную длительность, но приращение фазы сигнала на нем всегда равно 1 циклу. В случае равномерно изменяющейся фазы интервалы времени, на которых приращение фазы нарастает на 1 цикл, становятся одинаковыми и тогда понятия структурного и временного периодов совпадают.

Опираясь на понятие структурного периода сигнала, понятие дольной фазы  $\varphi_d(t)$  этого сигнала в циклах можно определить как ту долю его структурного периода (цикла), которая наблюдается в каждый момент времени  $t$ . Полная же фаза сигнала определяются как целое число структурных периодов (циклов) плюс дольная фаза текущего структурного цикла, которые наблюдаются на интервале от начала счета физического времени до текущего момента  $t$ .

В человеческой практике определение количественного значения физического времени  $t$  всегда осуществляется с помощью некоторых часов, под которыми понимается совокупность средств и действий, направленных на определение количественного значения физического времени как полной фазы некоторого периодически повторяющегося процесса, лежащего в основе указанных часов.

В качестве такого процесса могут использоваться колебания маятника, сигнал электрического генератора, вращение Земли, определяющее то, что называют всемирным временем, движение Земли вокруг Солнца, определяющее эфемеридное время, либо излучение, атомов при их переходе между разными энергетическими уровнями, определяющее атомное время. Далее процесс либо сигнал, лежащий в основе часов, для краткости будем называть процессом либо сигналом этих часов. Под количественным определением физического времени  $t$  будем понимать определение для каждого его момента числа  $T(t)$ , обозначающего значение времени в этот момент. Указанное число  $T(t)$  будем называть показаниями соответствующих часов на рассматриваемый момент физического времени  $t$ .

Как известно, разные часы идут с разной точностью. Точность часов определяется стабильностью процесса этих часов. Поэтому возникает необходимость выделить среди известных природных процессов наиболее стабильный и использовать показания часов, построенных на его основе, в качестве эталонных. В соответствии с международными соглашениями в настоящее время, в качестве процесса эталонных часов используется

излучение цезиевого атомно-лучевого стандарта. Секунда как единица физического времени определена равной 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. Однако если сравнивать показания двух эталонных часов, использующих разные экземпляры устройства, осуществляющего счет периодов излучения атомов цезия-133, то со временем и эти часы начнут расходиться. Происходит это потому, что любой периодический процесс, используемый для определения количественного значения физического времени, обладает нестабильностью, и эта нестабильность приводит к тому, что со временем даже очень точные часы расходятся. Таким образом, показания  $T(t)$  любых часов являются лишь приближением к тому, что является физическим временем  $t$ .

Показания любых часов формируются как сумма их начальной установки, приращения полной фазы процесса часов на интервале физического времени от момента начальной установки до текущего момента и возможных коррекций показаний часов на том же интервале физического времени. Если показания часов определяются в секундах, то на интервале времени от момента начальной установки количественное приращение времени определяется как приращение полной фазы процесса часов, приведенной к 1 Гц. Под этим понимается приращение полной фазы процесса часов, деленное на номинальное значение частоты этого процесса. Например, приведенное к 1 Гц приращение полной фазы излучения цезиевого атомно-лучевого стандарта определяется как приращение полной фазы этого излучения, деленной на 9192631770.

Таким образом, показания часов  $T(t)$  являются фазой, значение которой используется для количественного определения физического времени. В момент считывания показаний часов (т. е. в момент определения количественного значения физического времени) фаза трактуется как время, а размерность фазы заменяется на размерность времени.

Определим понятие «шкалы времени» как моментов физического времени  $t$ , задаваемых показаниями часов, лежащих в основе рассматриваемой шкалы [14, 15]. На рис. 9 вдоль оси абсцисс отложено физическое время  $t$ , а вдоль оси ординат показания часов в номинальных периодах, под которыми понимаются приращения показаний часов данной шкалы на интервале приращения полной фазы процесса часов на 1 цикл. Вдоль оси физического времени  $t$  стрелками, направленными вверх и черточками, ориентированными вниз показаны моменты одинаковых показаний двух разных часов, которые задают две разные шкалы времени. Цифры, расположенные над осью  $t$  являются показаниями первых часов или временем по первой шкале. Цифры, расположенные под осью  $t$  являются показаниями вторых часов или временем по второй шкале. Если указанные

показания обозначают, например, секунды, то стрелки направленные вверх, и черточки, ориентированные вниз, являются секундами двух разных шкал времени. Таким образом, понятие времени по шкале определяется как показания часов, лежащих в основе шкалы на любой момент физического времени  $t$ .

Из рис. 9 видим, что при постоянных номинальных периодах, откладываемых вдоль оси ординат, соответствующие им цикловые интервалы имеют разную длительность, и одинаково оцифрованные моменты времени на разных шкалах не обязательно являются совпадающими моментами физического времени  $t$ . Иными словами, в один и тот же момент физического времени разные часы могут иметь разные показания (разное время на разных шкалах) и в разные моменты физического времени разные часы могут иметь одинаковые показания (одинаковое время на разных шкалах). Под смещением шкал времени следует понимать разность показаний часов одной шкалы относительно часов другой в один и тот же момент физического времени. При этом разность показаний часов на один и тот же момент физического времени не следует путать с интервалом между моментами физического времени, в которые показания часов одинаковы. Вследствие того, что любые часы нестабильны разность показаний часов на один и тот же момент физического времени в общем случае не равна интервалу времени между моментами одинаковых показаний этих часов.

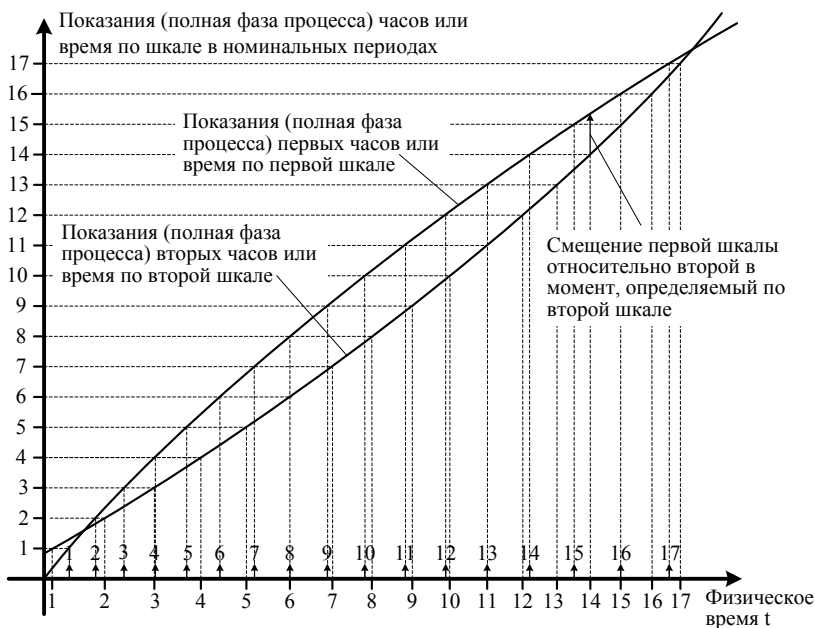


Рис. 9. Моменты, соответствующие двум разным шкалам времени



#### 4. Описание принципов функционирования ГНСС на основе новой понятийной модели

Сигналы, излучаемые навигационными спутниками в современных ГНСС, представляют собою модулированные по фазе высокочастотные несущие колебания в диапазоне  $\sim 1,2 - 1,6$  ГГц. Модуляция несущих колебаний осуществляется двухслойным сигналом. Нижний слой представляет собою непрерывные периодически повторяющиеся ПСП, по которым осуществляется измерение псевдодальностей. Номинальный период этих ПСП в сигналах открытого доступа систем ГЛОНАСС и GPS равен 1 мс. Верхний слой модулирующего сигнала образуют двоичные 20-ти мс символы навигационного сообщения, которые инверсно модулируют периодически повторяющиеся ПСП нижнего слоя. Формирование ПСП в бортовой аппаратуре спутников осуществляется из сигнала высокостабильного атомного стандарта частоты. Полная фаза ПСП, излучаемой каждым спутником, интерпретируемая как показания часов, задает БШВ этого спутника.

В соответствии с определением (6), полная фаза  $\varphi_n(t)$  ПСП на каждый текущий момент физического времени  $t$  задается дольной фазой  $\varphi_d(t)$  этой ПСП и целым числом  $n(t)$  полных периодов ПСП, укладываемых на интервале от некоторого заранее определенного условного начала до текущего момента  $t$ . Например, в системе ГЛОНАСС таким условным началом является 00 часов, 00 мин. 00 с 1 января 1996 г. по московскому декретному времени, определяемому как UTC(SU)+3 часа. Для задания целого числа циклов  $n(t)$  в навигационные сообщения спутников закладываются специальные сигналы меток времени и оцифровки  $\zeta^j$  этих меток. Под сигналом метки времени понимается заранее определенная последовательность импульсов в навигационном сообщении. Момент появления заднего либо переднего фронта определенного импульса в сигнале метки времени является самой меткой времени. Далее, для удобства этот момент будем называть меточным моментом. Например, в системе ГЛОНАСС меточным моментом является момент заднего фронта последнего импульса сигнала метки времени, а в системе GPS меточным моментом является момент переднего фронта первого импульса сигнала метки времени. Под оцифровкой  $\zeta^j$  меточного момента понимаются показания часов  $j$ -го спутника на его борту в этот момент. Оцифровки меточных моментов закладываются в навигационные сообщения спутников. На рис. 10 показаны характерные моменты времени в излучаемом (рис. 10 а) и принимаемом (рис. 10 б) сигнале. Стрелками, ориентированными вверх, на рис. 10 а показаны моменты начала периодов ПСП в излучаемом сигнале, или иными словами, моменты миллисекунд по БШВ. Большой стрелкой

выделен меточный момент. Символ  $\zeta^j$ , показанный над большой стрелкой, обозначает оцифровку этого меточного момента, т. е. цифру, которую показывали часы навигационного спутника в момент излучения фронта импульса, определяющего меточный момент. Моменты времени, соответствующие в принимаемом сигнале ранее рассмотренным, показаны на рис. 10 б в виде черточек с крестиками. Черточками, ориентированными вниз на рис. 10 б, показаны некоторые в общем случае произвольные меточные моменты ШВП. В общем случае не предполагается, что эти моменты времени имеют какую-либо оцифровку.

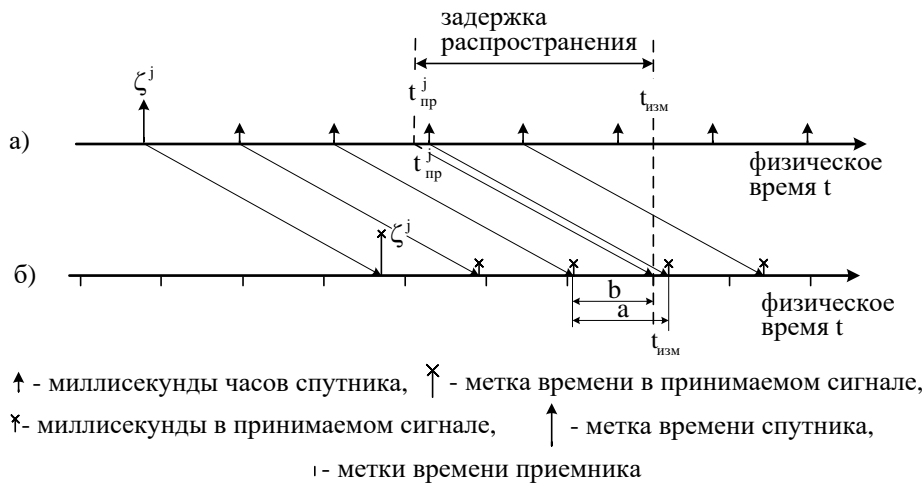


Рис. 10. Метки времени и их оцифровки в излучаемых и принимаемых сигналах ГНСС

В момент времени на ШВП, помеченный на рис. 10 б символом  $t_{изм}$ , в навигационном приемнике проводится измерение дольной фазы  $\hat{\xi}^j(t_{изм})$  ПСП  $j$ -го спутника. Выраженная в циклах, эта фаза равна доле периода  $b/a$  в принимаемом сигнале, прошедшего от начала периода ПСП до момента физического времени  $t_{изм}$ . Величину  $\hat{\xi}^j(t_{изм})$  невозможно отобразить на рис. 9, так как для этого необходимо ввести вертикальную ось, вдоль которой будет откладываться фаза (показания часов). Такое отображение показано на рис. 10, где  $T_n(t)$  и  $T^j(t)$  - изменение во времени показаний часов навигационного приемника и  $j$ -го спутника;  $\hat{T}^j(t)$  - оценка в навигационном приемнике задержанных на время распространения сигнала показаний часов  $j$ -го спутника;  $\zeta_{мс}^j$  - оцифровка последней принятой метки времени, выраженная в миллисекундах;  $n^j$  - целое количество периодов принятой ПСП, лежащих на интервале времени от последней принятой и оцифрованной метки времени, до момента измерения  $t_{изм}$  (в примере,

показанном на рис. 9 и 10,  $n^j = 2$ ). Значение  $\zeta_{мс}^j$  вычисляется в навигационном приемнике из оцифровки  $Z^j$ , метки времени, выделяемой из навигационного сообщения спутника. Целое число  $n^j$  определяется в навигационном приемнике в результате работы алгоритмов синхронизации символов, декодирования и восстановления значений параметров навигационных сообщений спутников. Как видно из рис. 9 и 10, значение  $\zeta_{мс}^j$  с точностью до целого числа миллисекунд и ошибок слежения совпадает с показаниями спутниковых часов на момент предшества  $t_{пр}^j$  моменту измерения  $t_{изм}$ . Оценка  $\hat{T}^j(t_{пр}^j)$  полных показаний часов  $j$ -го спутника в секундах на момент предшества  $t_{пр}^j$  вычисляется в процессоре навигационного приемника по формуле

$$\hat{T}^j(t_{пр}^j) = 10^{-3} [\zeta_{мс}^j + n^j + \xi^j(t_{изм})], \quad j = \overline{1, J} \quad (7)$$

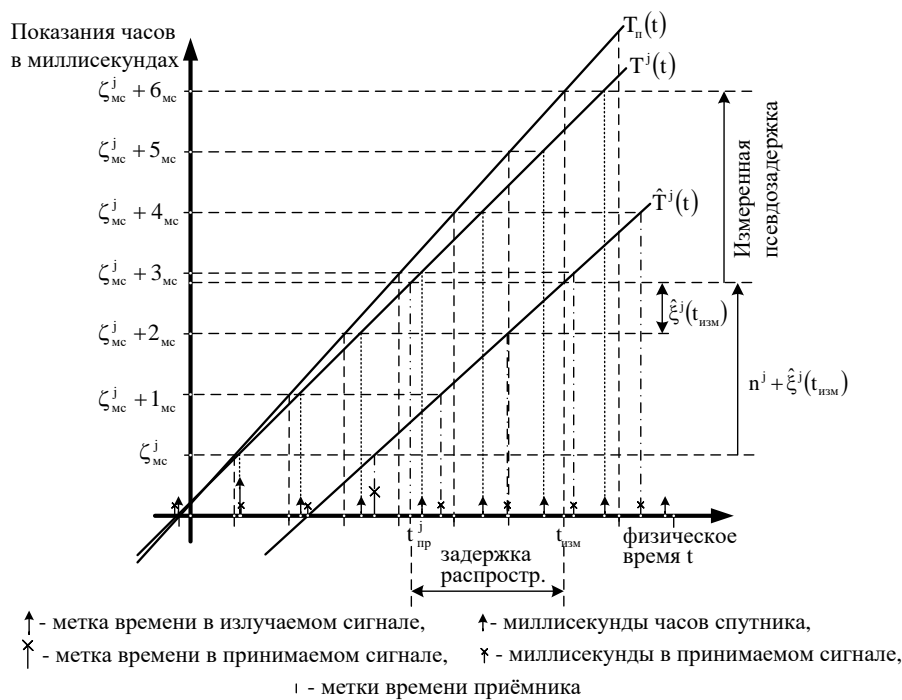


Рис. 10. Показания часов и доляная фаза ПСП как функции физического времени  $t$

Описанные выше действия и привлекаемые для этого средства по оцениванию показаний часов  $j$ -го спутника на момент предшества, можно назвать канальными часами  $j$ -го спутника в навигационном приемнике, а оценки, определяемые по формуле (7) - показаниями этих часов. Для

удобства дальнейшего рассмотрения показания канальных часов, относящиеся к моменту измерения  $t_{\text{изм}}$ , будем обозначать как  $T_{\text{кан}}^j(t_{\text{изм}})$ , т. е.

$$T_{\text{кан}}^j(t_{\text{изм}}) = \hat{T}^j(t_{\text{пр}}^i) = 10^{-3} [\zeta_{\text{мс}}^j + n^i + \hat{\xi}^j(t_m)]. \quad (8)$$

Вычисления по формулам (7), (8) можно интерпретировать так же, как разрешение миллисекундной неоднозначности оценок  $\hat{\xi}^j(t_{\text{изм}})$  показаний спутниковых часов, которые измеряются в АП. Введенные в рассмотрение канальные часы схематично показаны на рис. 11 малыми окружностями. Очевидно, что количество канальных часов навигационного приемника равно числу его каналов.

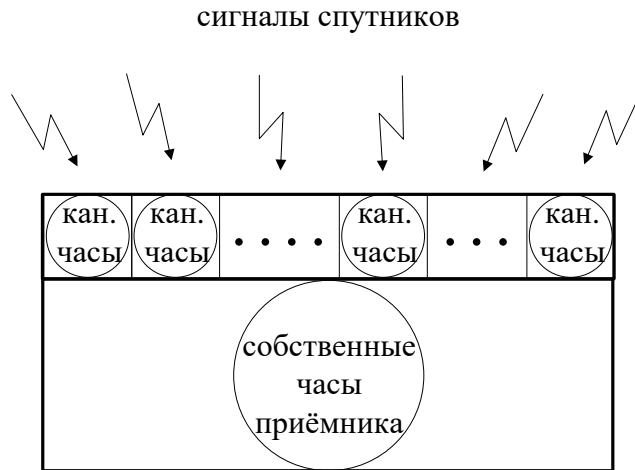


Рис. 11. Модель навигационного приемника как совокупность часов

Помимо канальных часов в навигационном приемнике используются его собственные часы, схематично показанные на рис. 11 нижней большой окружностью. Собственными часами навигационного приемника называются часы, показания которых используются для количественного определения времени на моменты формирования измерений и, следовательно, на моменты определения координат навигационного приемника. Собственные часы можно определить так же, как часы, показания которых определяют моменты проведения измерений, т. е. задают шкалу времени приемника. Например, проведение измерений 10 раз в секунду обычно означает, что измерения формируются в моменты времени, в которые показания  $T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  собственных часов навигационного приемника кратны 100 мс. Иными словами, положение моментов времени формирования измерений  $t_{\text{изм}}$  на оси физического времени  $t$  в навигационном приемнике определяется показаниями его собственных часов.

Координаты навигационного приемника и показания часов системы на момент  $t_{\text{изм}}$  проведения измерений можно определять, опираясь только на показания канальных часов, т. е. без использования собственных часов приемника. Приемник из навигационных сообщений выделяет значения коэффициентов полиномиальных моделей, позволяющих вычислить оценки смещений  $\Delta\hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j)$  показаний часов всех отслеживаемых спутников относительно показаний часов системы на момент предшествования ( $t_{\text{пр}}^j$ ) и далее по этим оценкам вычисляет оценки самих показаний часов системы на моменты предшествования ( $t_{\text{пр}}^j$ ):

$$\hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j) = \hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j) - \Delta\hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j) = T_{\text{кан}}^j(t_{\text{изм}}) - \Delta\hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}. \quad (9)$$

Используя параметры математических моделей движения спутников, передаваемые в навигационных сообщениях, и оценки  $\hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j)$ , приемник вычисляет координаты  $x^j(t_{\text{пр}}^j)$ ,  $y^j(t_{\text{пр}}^j)$ ,  $z^j(t_{\text{пр}}^j)$  каждого  $j$ -го спутника на соответствующий этому спутнику момент предшествования  $t_{\text{пр}}^j$ . Подчеркнем, что для вычисления координат каждого  $j$ -го спутника приемник использует не значение  $t_{\text{пр}}^j$  физического времени на момент предшествования, а оценку  $\hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j)$  показаний часов системы на этот момент, или, иными словами, для вычисления координат навигационных спутников в ГНСС используется не значение физического времени, а время по шкале системы.

Пренебрегая для простоты задержками сигнала в атмосфере, можно записать следующее очевидное равенство для моментов физического времени  $t$ :

$$t_{\text{изм}} - t_{\text{пр}}^j = \frac{R^j}{c}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (10)$$

где  $t_{\text{изм}} - t_{\text{пр}}^j$  – задержка распространения сигнала;  $R^j$  – расстояние между точками, которые занимал  $j$ -й спутник в момент предшествования  $t_{\text{пр}}^j$  и навигационный приемник в момент измерения  $t_{\text{изм}}$ ;  $c$  – скорость света. В связи с тем, что часы системы являются очень точными, моменты физического времени  $t_{\text{изм}}$ ,  $t_{\text{пр}}^j$  в (10) могут быть заменены на показания  $T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}})$ ,  $T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j)$  часов системы в эти же моменты. С учетом этого исходное равенство (10) может быть с высокой точностью представлено в следующей форме:

$$T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) - T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j) = \frac{R^j}{c}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (11)$$

Заменяя в (11) значение  $T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j)$  соответствующей оценкой (9), получаем следующее уравнение для каждого  $j$ -го спутника:

$$T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) - \frac{R^j}{c} = \hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j) - \Delta T_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}. \quad (12)$$

Выражая в (12) расстояние  $R^j$  через координаты навигационного приемника  $x_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ ,  $y_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ ,  $z_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ , в момент измерения  $t_{\text{изм}}$  и координаты  $j$ -го спутника  $x^j(t_{\text{пр}}^j)$ ,  $y^j(t_{\text{пр}}^j)$ ,  $z^j(t_{\text{пр}}^j)$  в момент предшествования  $t_{\text{пр}}^j$ , из (12) получаем следующую систему нелинейных уравнений относительно неизвестных  $T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}})$ ,  $x_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ ,  $y_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ ,  $z_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ :

$$T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) - \frac{1}{c} \sqrt{[x_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - x^j(t_{\text{пр}}^j)]^2 + [y_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - y^j(t_{\text{пр}}^j)]^2 + [z_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - z^j(t_{\text{пр}}^j)]^2} = \hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j) - \Delta \hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}. \quad (13)$$

Для нахождения 4-х неизвестных  $T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}})$ ,  $x_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ ,  $y_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ ,  $z_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  необходимо иметь не менее чем 4-х уравнений вида (13), т. е. осуществлять измерения одновременно не менее чем по четырем спутникам. Решая при этих условиях систему (13), получаем оценки  $\hat{x}_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ ,  $\hat{y}_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ ,  $\hat{z}_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ , координат навигационного приемника и оценку  $\hat{T}_{\text{сис}}(t_{\text{изм}})$  показаний часов системы на момент измерения ( $t_{\text{изм}}$ ), которая далее может использоваться в качестве оцифровки момента времени ( $t_{\text{изм}}$ ).

В системе (13) не используются показания собственных часов навигационного приемника, т. е. не требуется, чтобы метки времени приемника были обязательно оцифрованы. Таким образом, вычисление оценок координат навигационного приемника и показаний часов системы на момент измерения ( $t_{\text{изм}}$ ) можно осуществлять только по показаниям его канальных часов без использования показаний собственных часов навигационного приемника. Однако на практике обычно требуется осуществлять навигационные определения не в произвольно задаваемые моменты измерения ( $t_{\text{изм}}$ ), а через равные промежутки времени. Для отсчета этих промежутков необходимо использовать собственные часы навигационного приемника, показанные на рис. 11 большой окружностью. В этом случае метки времени навигационного приемника оцифровываются показаниями его собственных часов, а вместо показаний канальных часов

используется понятие псевдозадержки. При этом совершенно неважно, насколько точно эти оцифровки совпадают с показаниями часов системы  $T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}})$  в тот же момент  $t_{\text{изм}}$ . Псевдозадержка  $\Pi^j(t_{\text{изм}})$  по  $j$ -му спутнику определяется как разность показаний собственных часов приемника  $T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  на момент измерения  $t_{\text{изм}}$  и показаний часов  $j$ -го спутника  $T^j(t_{\text{пр}}^j)$  на момент предшествования  $t_{\text{пр}}^j$ :

$$\Pi^j(t_{\text{изм}}) = T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - T^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J} \quad (14)$$

Начальное значение  $T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  можно задавать произвольно, извлекать из любого подходящего источника либо просто вычислять по следующей приближенной формуле:

$$T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) = \zeta^j + 0,08 \text{ с}, \quad (15)$$

где  $\zeta^j$  – оцифровка очередной принимаемой метки времени с произвольного спутника. Приемник выделяет очередную метку времени из навигационного сообщения произвольного спутника и соответствующее ей значение оцифровки  $\zeta^j$ . После этого к значению  $\zeta^j$  добавляется среднее время распространения спутниковых сигналов, приблизительно равное 0,08 с. Ошибка начальной оцифровки меток времени приемника по формуле (15) не превышает  $\pm 30$  мс.

Оценивание псевдозадержки в приемнике осуществляется на основе использования показаний канальных часов, соответствующих  $j$ -му спутнику. Поэтому оценка псевдозадержки  $\hat{\Pi}^j(t_{\text{изм}})$ , формируемая в приемнике, определяется как разность показаний собственных часов приемника  $T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  и показаний его канальных часов  $T_{\text{кан}}^j(t_{\text{изм}})$ , соответствующих  $j$ -му спутнику на момент измерения  $t_{\text{изм}}$ :

$$\hat{\Pi}^j(t_{\text{изм}}) = T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - T_{\text{кан}}^j(t_{\text{изм}}) = T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - \hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}. \quad (16)$$

Для произвольного момента физического времени  $t$  выражение (14) можно переписать следующим образом:

$$\Pi^j(t) = T_{\text{п}}(t) - T^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}, \quad (17)$$

где символ  $t_{\text{пр}}^j$  в данном случае обозначает момент предшествования текущему моменту физического времени  $t$ . На любой момент этого времени можно ввести понятия смещений показаний часов спутника  $\Delta T^j(t)$  и собственных часов приемника  $\Delta T_{\text{п}}(t)$ :

$$\Delta T^j(t) = T^j(t) - T_{\text{сис}}(t); \quad j = \overline{1, J}. \quad (18)$$

$$\Delta T_{\text{п}}(t) = T_{\text{п}}(t) - T_{\text{сис}}(t). \quad (19)$$

Используя (18), (19), показания часов  $j$ -го спутника  $T^j(t)$  и показания собственных часов приемника  $T_{\text{п}}(t)$  могут быть следующим образом выражены через смещения  $\Delta T^j(t)$ ,  $\Delta T_{\text{п}}(t)$ :

$$T^j(t) = T_{\text{сис}}(t) + \Delta T^j(t); \quad j = \overline{1, J}. \quad (20)$$

$$T_{\text{п}}(t) = T_{\text{сис}}(t) + \Delta T_{\text{п}}(t). \quad (21)$$

Подставляя (20), (21) в (14), получаем следующее выражение для псевдозадержки:

$$\begin{aligned} \Pi^j(t_{\text{изм}}) &= T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - T^j(t_{\text{пр}}^j) = T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) - T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j) + \Delta T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - \Delta T^j(t_{\text{пр}}^j) = \\ &= \Delta T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j - t_{\text{изм}}) + \Delta T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - \Delta T_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j), \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$\Delta T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j - t_{\text{изм}}) = T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) - T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j) \quad (23)$$

– приращение показаний часов системы на интервале времени  $t_{\text{пр}}^j - t_{\text{изм}}$ , длительность которого равна задержке  $\tau_3^j(t_{\text{изм}}) = t_{\text{изм}} - t_{\text{пр}}^j$  распространения сигнала от точки, занимаемой  $j$ -м спутником в момент предшествования  $t_{\text{пр}}^j$ , до точки, занимаемой приемником в момент измерения  $t_{\text{изм}}$ .

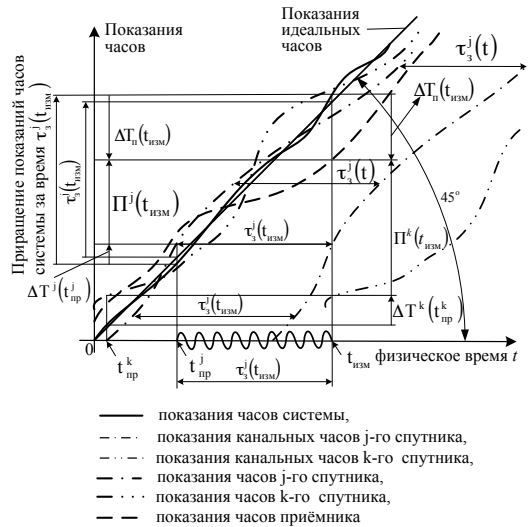


Рис. 12. Изменение псевдозадержек как функций физического времени  $t$



На рис. 12 показано изменение псевдозадержек как функций физического времени  $t$  для двух спутников с номерами  $j$  и  $k$ . Для построения графиков, показанных на этом рисунке, использовано выражение (22).

Оценка псевдодальности  $\hat{\rho}^j(t_{\text{изм}})$  по  $j$ -му спутнику определяется как произведение оценки псевдозадержки  $\hat{\Pi}^j(t_{\text{изм}})$  (16) на скорость света  $c$ :

$$\hat{\rho}^j(t_{\text{изм}}) = c \cdot \hat{\Pi}^j(t_{\text{изм}}) = c [T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - T_{\text{кан}}^j(t_{\text{изм}})] = c [T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - \hat{T}^j(t_{\text{изм}})],$$

$$j = \overline{1, J}. \quad (24)$$

Из (16) и (24) нетрудно видеть, что при строгой синхронности хода часов приемника и спутников, оценка псевдозадержки становится оценкой задержки, а оценка псевдодальности превращается в оценку дальности.

Вычитая показания собственных часов приемника  $T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  из левой и правой частей (13), получаем

$$\sqrt{[x_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - x^j(t_{\text{пр}}^j)]^2 + [y_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - y^j(t_{\text{пр}}^j)]^2 + [z_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - z^j(t_{\text{пр}}^j)]^2} +$$

$$+ c \cdot [T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}})] = c [T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - \hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j)], \quad j = \overline{1, J}. \quad (25)$$

По определению (19), содержимое квадратных скобок, стоящих в левой части выражения (25), является смещением  $\Delta T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  показаний часов приемника относительно показаний часов системы на момент измерения  $t_{\text{изм}}$ . Введем для произведения этого смещения на скорость света  $c$  следующее обозначение:

$$\Delta R_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) = c \cdot [T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}})] = c \cdot \Delta T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}), \quad (26)$$

где  $\Delta R_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  – смещение показаний часов приемника относительно показаний часов системы, выраженное в метрах. Содержимое квадратных скобок, стоящих в правой части (25), по определению (16), является оценкой псевдозадержки, а ее произведение на скорость света в соответствии с (24) является оценкой псевдодальности. В результате (25) можно переписать в следующем виде:

$$\sqrt{[x_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - x^j(t_{\text{пр}}^j)]^2 + [y_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - y^j(t_{\text{пр}}^j)]^2 + [z_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - z^j(t_{\text{пр}}^j)]^2} + \Delta R_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) =$$

$$\hat{\rho}^j(t_{\text{изм}}) + c \cdot \Delta T_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}. \quad (27)$$

Система уравнений (27) полностью эквивалентна ранее полученной системе (13). Неизвестными в этой системе, подлежащими определению, являются координаты приемника  $x_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ ,  $y_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ ,  $z_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  и смещение  $\Delta R_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  (4.20) показаний собственных часов приемника относительно показаний часов системы, выраженное в метрах. Из (26) видим, что имея оценку смещения  $\Delta \hat{R}_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  и показания часов приемника  $T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ , нетрудно вычислить оценку  $\hat{T}_{\text{сис}}(t_{\text{изм}})$  показаний часов системы на момент измерения ( $t_{\text{изм}}$ ) как

$$T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) = T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - \Delta \hat{R}_{\text{п}}/c.$$

### 5. Разрешение неоднозначности измерений псевдозадержек

Выражения (14), (17) определяют смысловое содержание псевдозадержек  $\Pi^j(t_{\text{изм}})$  как разностей между уменьшаемыми  $T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  и вычитаемыми  $T^j(t_{\text{пр}}^j)$ . В принципе псевдозадержки в навигационном приемнике можно формировать как указанные разности. Однако ради упрощения аппаратного построения эти разности в приемнике формируют без образования вычитаемых  $T^j(t_{\text{пр}}^j)$  путем интегрирования кодов корректирующих частот в петлях слежения за фазами принимаемых ПСП [14, 15]. Псевдозадержки, получаемые таким способом, являются неоднозначными, т. е. содержат неопределенное целое число миллисекунд  $k^j$  и поэтому для них справедливо следующее выражение:

$$\Pi_{\text{неодн}}^j(t_{\text{изм}}) = \Pi^j(t_{\text{изм}}) + k^j 10^{-3}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (28)$$

Для разрешения неоднозначности измерений псевдозадержек в навигационных приемниках по формуле, вытекающей из (14), (17), вычисляются неоднозначные показания часов навигационных спутников.

$$T_{\text{неодн}}^j(t_{\text{пр}}^j) = T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - \Pi_{\text{неодн}}^j(t_{\text{изм}}) = T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - \Pi^j(t_{\text{изм}}) - k^j 10^{-3}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (29)$$

Дробные части этих неоднозначных показаний являются оценками  $\hat{\xi}^j(t_{\text{изм}})$  дольных фаз принимаемых ПСП в момент  $t_{\text{изм}}$ . Это позволяет вычислить в навигационном приемнике значения  $\hat{\xi}^j(t_{\text{изм}})$  по формуле

$$\hat{\xi}^j(t_{\text{изм}}) \bmod_1 [10^3 T_{\text{неодн}}^j(t_{\text{пр}}^j)], \quad j = \overline{1, J}, \quad (30)$$

где операция  $\bmod_1(x)$  означает вычисление модуля  $x$  по основанию равному 1.

Имея оценки  $\xi^j(t_{\text{изм}})$  дольных фаз принимаемых ПСП, навигационный приемник по формуле (7) вычисляет однозначные оценки  $\hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j)$  показаний часов спутников и по формуле (14) вычисляет однозначные значения псевдозадержек  $\Pi^j(t_{\text{изм}})$ . После этого, навигационный приемник замещает полученными таким образом однозначными значениями псевдозадержек  $\Pi^j(t_{\text{изм}})$  содержимое ячеек памяти процессора, в которых ранее находились их неоднозначные значения  $\Pi_{\text{неодн}}^j(t_{\text{изм}})$ , и далее продолжает прежний процесс интегрирования в этих ячейках кодов корректирующих частот петель слежения за фазами принимаемых ПСП. В результате проделанной единожды операции разрешения неоднозначностей измерений псевдозадержек в ячейках интегрирования будут находиться их однозначные значения.

Таким образом, разрешение неоднозначности измерений псевдозадержек не требует привлечения каких-либо априорных сведений о местоположении навигационного приемника, как это утверждается в [5], поскольку для разрешения этой неоднозначности в навигационном сигнале предусмотрены специальные средства, предназначенные для разрешения неоднозначности оценок показаний часов навигационных спутников на моменты предшества  $t_{\text{пр}}^j$ ,  $j = \overline{1, J}$ .

После разрешения неоднозначности измерений псевдозадержек на вторичную обработку для навигационных определений поступают два числа - показания собственных часов навигационного приемника  $T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  на момент измерения  $t_{\text{изм}}$  и значение псевдозадержки  $\Pi^j(t_{\text{изм}})$ . Необходимые для вычисления координат  $x^j(t_{\text{пр}}^j)$ ,  $y^j(t_{\text{пр}}^j)$ ,  $z^j(t_{\text{пр}}^j)$   $j$ -го спутника оценки  $\hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j)$  показаний его часов на момент предшества ( $t_{\text{пр}}^j$ ) вычисляются в процессоре приемника по формуле, вытекающей из (14), (17).

$$\hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j) = T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - \hat{\Pi}^j(t_{\text{изм}}), \quad j = \overline{1, J}. \quad (31)$$

Таким образом, оценки  $\hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j)$  показаний часов спутников на моменты предшества ( $t_{\text{пр}}^j$ ) в навигационном приемнике используются дважды: для разрешения неоднозначности измерений псевдодальностей и

для вычисления координат  $x^j(t_{\text{пр}}^j)$ ,  $y^j(t_{\text{пр}}^j)$ ,  $z^j(t_{\text{пр}}^j)$  навигационных спутников.

## 6. Понятие сигнального времени и псевдозадержки в литературе [3, 4]

На общем фоне литературы [3-10], подвергнутой критическому обзору, следует выделить издания книги [3, 4], в которых вводится понятие сигнального времени. Это время в [3, 4] определяется как математическое понятие, исходя из равенства с точностью до амплитуды излучаемого и принимаемого сигналов, с учетом смещения шкал времени навигационных спутников и навигационного приемника. Псевдозадержки в [3, 4] определяется как разность между моментом приема сигнала по шкале времени приемника и сигнальным временем. При этом в [3, 4] отсутствует определение понятия шкалы времени, нет пояснений того, каким образом сигнальное время связано с параметрами принимаемого сигнала, например, с его фазой, и каким образом в навигационном приемнике формируется количественное значение сигнального времени, необходимое для формирования измерений псевдозадержки.

Однако, если понятие момента приема сигнала по шкале времени приемника отождествить с показаниями  $T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  собственных часов приемника на момент измерения  $t_{\text{изм}}$ , и понятие сигнального времени отождествить с показаниями  $T^j(t_{\text{пр}}^j)$  часов навигационного спутника на момент предшествования  $t_{\text{пр}}^j$ , то введенное в [3, 4] понятие псевдозадержки будет совпадать с понятием псевдозадержки, определяемым выражениями (14), (17) данного критического обзора. Это означает, что различия в определении понятия псевдозадержки в изданиях книги [3, 4] и данном критическом обзоре, являются, по-видимому, следствием использования различной терминологии.

## 7. Применение новой понятийной модели к наземным радионавигационным системам

Наземные радионавигационные системы можно рассматривать как упрощенный вариант ГНСС. Упрощение заключается в том, что передатчики навигационных сигналов в этих системах являются неподвижными и поэтому координаты передатчиков могут быть помещены в память навигационных приемников в процессе их изготовления. Шкалы времени всех передатчиков наземных радионавигационных систем, так же

как и в ГНСС, синхронизируются с высокой точностью со шкалой времени системы. Структуры передаваемых навигационных сигналов в различных наземных радионавигационных системах могут сильно различаться, но главный принцип остается неизменным: фазы излучаемых радионавигационных сигналов несут информацию о показаниях часов системы и задают в навигационных приемниках шкалы времени принимаемых сигналов.

Рассмотреть все типы наземных радионавигационных систем в данном критическом обзоре из-за ограниченности его объема не представляется возможным. Поэтому рассмотрим далее в качестве примера применение новой понятийной основы к наземной длинноволновой радионавигационной системе OMEGA [12].

Структура навигационного кадра системы OMEGA, заимствованного из [11, 12, 16], показана на рис. 13.

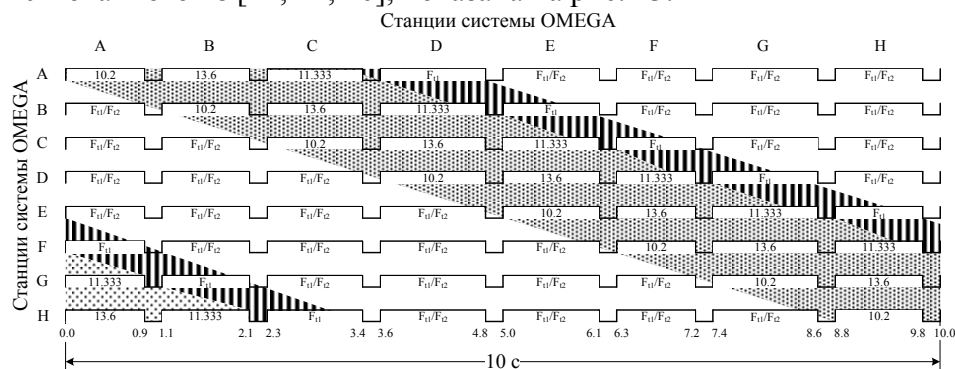


Рис. 13. Структура навигационного кадра системы OMEGA

Латинскими буквами A, B, C, D, T, F, G, H обозначены 8 станций системы OMEGA, излучающих с временным смещением навигационные радиоимпульсы со средней длительностью 1.25 секунды, заполненные когерентными несущими гармоническими колебаниями с частотами соответственно 10.2, 13.6 и 34/3 кГц. Навигационные радиоимпульсы выделены на рис. 13 точечной штриховкой. Вертикальной штриховкой на рис. 13 выделены радиоимпульсы с уникальными частотами, используемыми для распознавания станций. Остальные 4 радиоимпульса каждой строки навигационного кадра применяются, как сказано в [16], для межстанционного обмена.

Основной навигационной частотой в системе является 10.2 кГц, т. е. фаза сигнала этой частоты отождествляется с показаниями синхронно идущих часов станций системы (часов системы). Однако период сигнала частоты 10.2 кГц, равный 0.09804 мс, очень мал и, следовательно, долящая фаза сигнала этой частоты, измеренная в навигационном приемнике, несет

информацию о показаниях часов системы на моменты предшества с точностью до целого числа периодов 0.09804 мс. Иными словами, показания часов системы на моменты предшества, отождествляемые с дольной фазой сигнала частоты 10.2 кГц, измеряются в навигационном приемнике неоднозначно. Для разрешения этой неоднозначности используют измерения дольных фаз на разностных частотах:  $13.6 - 10.2 = 3.4$  кГц (период 0.294117 мс) и  $34/3 - 10.2 = 34/30$  кГц (период 0.88235 мс) [11, 12]. Наименьшее общее кратное этих периодов равно 60/17 мс, т. е. интервал времени, через который дольные фазы гармонических сигналов всех навигационных радиоимпульсов обращаются в ноль, равен 60/17 мс [12].

Моменты времени, следующие по часам системы через 60/17 мс, называют эпохами системы OMEGA. Если для разрешения неоднозначности привлекать еще измерения фазы сигнала навигационного кадра системы OMEGA, который имеет длительность 10 с (см. рис. 13), то фаза сигнала на частоте 10.2 кГц может быть однозначно измерена в навигационном приемнике в пределах 30 с. Разрешение же 30-секундной неоднозначности возможно с помощью обычных часов.

Следует отметить, что в литературе [11, 12] при изложении методов разрешения неоднозначности в системе OMEGA говорится о том, что разрешается неоднозначность измерений дальности либо запаздывания сигнала. Естественно возникает вопрос, о какой дальности либо запаздывании сигнала идет речь, если в беззапросных системах, к которым относится OMEGA, дальность либо запаздывание сигнала принципиально не могут быть измерены. На самом деле, так же, как в ГНСС, разрешается неоднозначность не дальности, а показаний часов станций системы OMEGA на моменты предшества. С учетом того, что часы станций синхронизированы с часами системы, можно говорить о разрешении неоднозначности показаний часов системы на моменты предшества. Показания часов станций передаются непрерывно в фазах гармонических несущих, заполняющих навигационные радиоимпульсы, т. к. излучение этих гармонических несущих синхронизируется, так же как в ГНСС, ходом часов станций, которые в свою очередь синхронизированы с показаниями часов системы. Но в литературе [11, 12] не вводится понятий моментов предшества и показаний часов станций и системы, не указывается на то, что фазы гармонических несущих, заполняющих излучаемые навигационные радиоимпульсы, несут информацию о показаниях часов станций на моменты предшества моментам измерения фаз этих несущих в навигационных приемниках. В результате понятие (показания часов станций на моменты предшества), неоднозначность измерений которого разрешается, в литературе [11, 12] отсутствует. Вероятно, по этой причине

авторы [11, 12] вынуждены говорить о разрешении неоднозначности измерений дальности.

Помимо этого, в литературе [12] указывается, что для полного разрешения неоднозначности псевдодальномерных измерений необходимо иметь априорные данные не только о координатах навигационного приемника, но и о сдвиге его шкалы времени. Необходимость априорных сведений для разрешения неоднозначности измерений псевдодальностей в системе OMEGA, так же как необходимость таких сведений для разрешения неоднозначности измерений псевдодальностей в ГНСС, о котором говорится в учебном пособии [5], является заблуждением. Это заблуждение проистекает из желания авторов литературы [5, 12] разрешать неоднозначность измерений именно псевдодальностей. Такое желание является естественным, поскольку в [5, 12] не используются понятия моментов предшества и показаний часов станций (спутников) на эти моменты. Однако если разрешать неоднозначность не псевдодальностей, а показаний часов станций (спутников) на моменты предшества (что собственно и делается в ГНСС), то никаких априорных сведений в ГНСС не требуется, а в системе OMEGA потребуются только грубые априорные сведения о показаниях часов системы на моменты предшества. Ошибки этих грубых априорных сведений по модулю не должны превышать 15 с. Априорные сведения с такими большими ошибками могут быть получены с помощью обычных часов, периодически выставляемых по сигналам точного времени, передаваемых по радио.

В ГНСС разрешение неоднозначности показаний часов спутников осуществляется с использованием меток времени и их оцифровок (см. раздел 4 данного критического обзора).

В системе OMEGA оцифровки меток времени отсутствуют, а в качестве меток времени могут использоваться моменты начала навигационных кадров (см. рис. 13). Как было показано ранее, использование измерений дольных фаз на основной и разностных частотах и показаний внешних часов, смещение которых относительно показаний часов системы не превышает 15 с, позволяет полностью разрешить неоднозначность показаний часов станций на моменты предшества. После этого могут быть образованы однозначные значения псевдозадержек как разности между показаниями часов навигационного приемника на момент измерения и разрешенными показаниями часов станций на моменты предшества. При этом не имеет значения, насколько шкала времени навигационного приемника смещена относительно шкалы системы. Образующие таким образом разности в общем случае могут получаться отрицательными. Это приведет просто к тому, что оценка смещения шкалы времени навигационного приемника относительно шкалы системы,

получаемая в результате обработки отрицательных значений псевдодальностей, будет отрицательной.

Если в структуру навигационного кадра системы OMEGA ввести оцифровки меток времени, то в этом случае для разрешения неоднозначности показаний часов станций, так же как и в ГНСС, не потребуются никаких априорных сведений. В работе [16] рассматриваются предложения по введению оцифровок меток времени в структуру навигационного кадра системы OMEGA. Для этого предлагается ввести понятие 5-минутного суперкадра, показанного на рис. 14. В суперкадре первые две минуты выделяются для передачи сигнала метки времени, обозначающего начало суперкадра, и оцифровки этой метки. Последние 3 минуты суперкадра выделяются для передачи кодов межстанционного обмена.



Рис. 14. 5-минутный суперкадр системы OMEGA

Каждая строка навигационного кадра системы OMEGA (см. рис. 13) содержит 8 радиоимпульсов, из которых 4 на момент публикации работы [16] не использовались для каких-либо целей. Эти 4 радиоимпульса в работе [16] предложено использовать для передачи двоичным кодом одной десятичной цифры. Единицы и нули двоичного кода предлагается передавать при помощи смены частот радиоимпульсов. Для этих целей каждой станции системы OMEGA выделяются две индивидуальные частоты. На 2-минутном интервале времени, выделенном для передачи сигнала метки времени и ее оцифровки, размещается 12 кадров и, следовательно, на этом интервале возможно передать 12 десятичных цифр. В первом кадре суперкадра передается сигнал метки времени, обозначающий собою начало суперкадра. В кадрах с номерами 2, 3 передается номер минуты. В 4 и 5 кадрах передается номер часа в сутках. Три кадра с номерами 6, 7 и 8 выделены для передачи номера дня в году, и в кадрах с номерами 9 и 10 предлагается передавать номер года в столетии. Использование оставшихся 11-го и 12-го кадров не определено. Структура предложенного в [16] 2-минутного временного кода системы OMEGA показана на рис. 15.



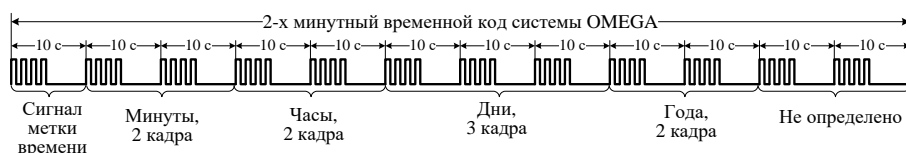


Рис. 15. 2-минутный временной код системы OMEGA

Если метками времени сигналов, излучаемых станциями системы OMEGA, считать моменты начала кадров, то оцифрованной окажется каждая 30-метка. При такой оцифровке, разрешение неоднозначности показаний часов станций, отсчитываемых в секундах от начала текущего года (т. е. с точностью до целого числа лет от начала столетия), следует осуществлять по формуле, аналогичной формуле (7).

$$\hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j) = N_{\text{сут}} \cdot 86400 + N_{\text{чс}} \cdot 3600 + N_{\text{мн}} \cdot 60 + N_{30} \cdot 30 + \xi_c^j(t_{\text{изм}}),$$

$$j = \overline{1, J}, \quad (32)$$

где  $N_{\text{сут}}$  - количество суток в текущем году, завершившихся к моменту начала текущего суперкадра (т. е. суперкадра, на котором расположен момент измерения  $t_{\text{изм}}$ );  $N_{\text{чс}}$  - количество часов в текущих сутках, завершившихся к моменту начала текущего суперкадра;  $N_{\text{мн}}$  - количество минут в текущем часе, завершившихся к моменту начала текущего суперкадра;  $N_{30}$  - количество 30-секундных интервалов, образуемых тремя последовательно идущими кадрами на текущем суперкадре, завершившихся к моменту  $t_{\text{изм}}$  проведения измерений;  $\xi_c^j(t_{\text{изм}})$  - фаза принимаемого сигнала на частоте 10.2 кГц, однозначно измеренная в пределах 30 с, приведенная к 1 Гц. Вычитая из показаний часов приемника  $T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  на момент измерения  $t_{\text{изм}}$  значение  $\hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j)$ , вычисленное по формуле (32), получаем однозначное значение псевдозадержки, соответствующей  $j$ -й станции системы OMEGA.

Проведенное рассмотрение показывает, что понятия, введенные в разделах 3-5 для ГНСС, полностью применимы и для наземной радионавигационной системы OMEGA.

## 8. Выводы

На основе критического обзора, проведенного в разделах 1, 2, новой понятийной модели ГНСС, предложенной в разделах 3-5, и применения

понятий новой модели к наземной радионавигационной системе OMEGA можно сделать следующие выводы:

1. Центральным понятием радионавигации является понятие шкалы времени. Шкалой времени называются моменты физического времени, определяемые показаниями часов, лежащих в основе любой шкалы. Время по шкале в любой момент физического времени определяется как показания часов, лежащих в основе этой шкалы. Под часами понимается совокупность средств и действий, направленных на определение количественного значения времени по шкале как полной фазы некоторого периодически повторяющегося процесса, лежащего в основе часов шкалы. Количественное значение времени, используемое в человеческой практике в качестве независимой переменной в математических моделях, описывающих различные физические процессы, всегда является временем по некоторой шкале, т. е. приведенной к 1 Гц полной фазой процесса часов, лежащих в основе этой шкалы.

2. Не существует никаких “априори известных” [7, 8] моментов времени излучения либо моментов времени с “номинальным временем излучения” [10]. Необходимые для формирования псевдозадержек показания часов спутников в ГНСС либо станций в наземных радионавигационных системах в моменты предшествования (т. е. время по шкале системы в моменты предшествования) доставляются в навигационные приемники в виде фаз излучаемых сигналов.

3. В радионавигационных системах разрешение неоднозначности измерений псевдозадержек осуществляется не непосредственно, как утверждается в [5, 12], а через разрешение неоднозначности показаний часов станций (спутников) на моменты предшествования. Для разрешения этой неоднозначности используются сигналы меток времени и их оцифровки. При этом для разрешения неоднозначности не требуется привлечения какой-либо априорной информации.

При отсутствии оцифровок меток времени в излучаемых сигналах необходимо привлекать априорную информацию в виде показаний внешних часов на моменты предшествования.

После разрешения неоднозначности показаний часов станций на моменты предшествования однозначные значения псевдозадержек формируются путем вычитания этих показаний из показаний  $T_{\Pi}(t_{\text{изм}})$  часов навигационного приемника на момент измерения  $t_{\text{изм}}$ .

4. Понятие псевдозадержки (псевдодальности), широко используемое в литературе по радионавигации, является вторичным по отношению к понятию показаний часов (времени по шкале) по следующим причинам:

Само понятие псевдозадержки  $P^j(t_{\text{изм}})$  определяется через понятие показаний часов как разность между показаниями  $T_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$  часов навигационного приемника на момент измерения  $t_{\text{изм}}$  и показаниями  $T^j(t_{\text{пр}}^j)$  часов  $j$ -й станции (спутника) на момент предшествова  $t_{\text{пр}}^j$  моменту измерения  $t_{\text{изм}}$ , т. е.  $P^j(t_{\text{изм}}) = T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - T^j(t_{\text{пр}}^j)$ .

Показания же часов являются самостоятельным понятием. Как показано в разделе 4 данного критического обзора, оценки показаний часов спутников ГНСС на моменты предшествова (показания канальных часов на моменты предшествова) позволяют осуществлять все навигационные определения без использования понятия псевдозадержки.

Разрешение неоднозначности измерений псевдозадержек в радионавигационных системах осуществляется через разрешение неоднозначности оценок показаний часов станций (спутников) на моменты предшествова.

В режиме синхронизма в регистрах фазы опорных сигналов петель слежения за фазами принимаемых сигналов в навигационном приемнике формируются неоднозначные оценки показаний часов станций (спутников) на моменты предшествова. Т. е. петли слежения навигационного приемника отслеживают не значения псевдозадержек, а показания часов станций (спутников) на моменты предшествова. Измерения же псевдозадержек в навигационном приемнике формируются на вторичной основе путем интегрирования в процессоре приемника кодов корректирующих частот его петель слежения.

### Литература

1. Глобальная навигационная спутниковая система. Интерфейсный контрольный документ, (редакция 5.1), <http://rniikp.ru/ru/pages/about/publ/ikd51ru.pdf>.
2. NAVSTAR Global Positioning System. Interface Specification. IS-GPS-200. Revision D. IRN-200D-001. 7 March 2006. NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces. <http://www.naic.edu/~phil/rfi/gps/AFD-070803-059-1.pdf>.
3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Под редакцией В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. М.: «ИПРЖР».- 1998.
4. ГЛОНАСС. Глобальная спутниковая радионавигационная система. Под редакцией А.И. Перова, В.Н. Харисова.- М.: Радиотехника.- 2005, 2010.

5. Малышев В.В., Куршин В.В., Ревнивых С.Г. Введение в спутниковую навигацию. Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ.- 2008.
6. Информационные технологии в радиотехнических системах. Учебное пособие. Под ред. Федорова И.Б. Издание второе, переработанное и дополненное. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана.- 2004.
7. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. Монография. М.: ЭКО-ТРЕНДЗ.- 2000.
8. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. М.: Изд-во ЭКО-ТРЕНДЗ.- 2003.
9. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС.- М.: Горячая линия-Телеком.- 2005.
10. Борискин А.Д., Вейцель А.В., Вейцель В.А., Жодзишский М.И., Милютин Д.С. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: приемники-потребители навигационной информации. Научное издание.- М.: МАИ-ПРИНТ.- 2010.
11. Бакулев П.А., Сосновский А.А. Радионавигационные системы. Учебник для вузов.- М.: Радиотехника.- 2011.
12. Радионавигационные системы сверхдлинноволнового диапазона. Под ред. П.В. Олянюка П.В. и Г.В. Головушкина. М.: Радио и связь.- 1985.
13. Гоноровский И.С., Демин М.П. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебное пособие для вузов.- М.: Радио и связь.- 1994.
14. Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат.- М.: Радиотехника.- 2008.
15. Поваляев А.А., Вейцель А.В., Мазепа Р.Б. Глобальные спутниковые системы синхронизации и управления движением в околоземном пространстве.- М.: Вузовская книга.- 2012.
16. L. Fey. Time Disseminations Capabilities of the Omega System. Pros. 25th Ann. Symp. Frequency Control (Electron. Indust. Ass. , Washington, D.C.) pp. 167-170, Apr. 1971.