

УДК 629.78

О понятийных основах радионавигации

А. А. Поваляев

д. т. н., АО «Российские космические системы»

e-mail: povalyaev_aa@spacecorp.ru

Аннотация. В современной учебной и научной литературе по спутниковой навигации для описания принципов функционирования системы используются понятия псевдодальности и псевдозадержки. Псевдодальность определяется как произведение псевдозадержки на скорость света. Псевдозадержка $\tau_{пз}$ определяется как разность $\tau_{пз} = t_r - t^{tr}$ между временем t_r приема навигационного сигнала в шкале времени приемника и временем t^{tr} его излучения в шкале времени навигационного спутника. Каким образом навигационный приемник узнает значение t^{tr} , каково смысловое содержание терминов «шкала времени» и «момент времени в той или иной шкале», чем время по шкале отличается от физического времени, используемого в учебниках по физике, в литературе не раскрывается. Более того, во многих работах в явной или неявной форме псевдозадержку $\tau_{пз}$ трактуют как интервал времени без пояснений того, имеется ли при этом в виду интервал физического времени или же интервал времени по какой-либо шкале.

На основе критического обзора выявляются противоречия в системе понятий, используемых в современной учебной и научной литературе для описания принципов функционирования ГНСС. Вводится новая система понятий, основанная на определении понятий шкалы времени и показаний спутниковых часов, устраняющая выявленные противоречия. На основе использования вновь введенных понятий предлагаются существенные упрощения в построении наземных РНС.

Ключевые слова: ГНСС, псевдодальность, псевдозадержка, шкала времени, спутниковые часы

On Conceptual Fundamentals of Radio Navigation

A. A. Povalyaev

doctor of engineering science, Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: povalyaev_aa@spacecorp.ru

Abstract. The current educational material and academic literature dedicated to satellite navigation describe the operating principles of the ground positioning systems and the satellite radio-navigation systems. Such terms as pseudorange and pseudodelay are used in the aforementioned sources. Pseudorange is defined as being the product of pseudodelay by light speed. The pseudodelay $\tau_{пз}$ is defined as being the $\tau_{пз} = t_r - t^{tr}$ difference between reception time t_r of the navigation signal on the receiver timescale and the signal transmission time t^{tr} on the satellite timescale. However, the aforementioned sources do not contain any explanation regarding the following issues: how does the receiver determine the value of t^{tr} , what do the terms “timescale” and “epoch on any given timescale” mean, and what is the difference between the time according to timescale and the actual wall-clock time, which is used in physics textbooks. Moreover, many aforementioned sources define the pseudodelay $\tau_{пз}$, either expressly or implicitly, as the time interval without explaining, whether it is meant to be an interval of the actual time or the time interval within any particular timescale.

Nowadays the most difficult and at the same time the most accomplished ones are the global navigation satellite systems (GNSS). Based on the critical review the contradictions have been revealed in the paradigm used in modern educational material and academic literature, which focus on the operating principles of the GNSS. The new paradigm is introduced based on defining the notions of the timescale and satellite clock time. This new paradigm eliminates the revealed contradictions. The substantial simplification of the system development of the ground positioning systems is suggested based on the newly reintroduced notions and paradigms.

Key words: GNSS, pseudorange, pseudodelay, timescale, satellite clock time

Введение

В настоящее время во всем мире эксплуатируются несколько родственных по своим понятийным основам типов радионавигационных систем (РНС), таких как глобальные навигационные спутниковые системы (ГЛОНАСС, GPS [1–14]), наземные сверхдлинноволновые системы (Omega, Альфа, Маршрут [4, 15]), наземные длинноволновые системы (Logan-C, Чайка [4]). 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 сложные и в то же время наиболее совершенные — глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). Соответственно описание принципов функционирования ГНСС требует использования наиболее сложных понятийных основ. Для остальных РНС понятийные основы более простые и являются частным случаем понятийных основ ГНСС.

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

В литературе [1–14] описываются принципы функционирования ГНСС. При этом используются термины псевдодальности и псевдозадержки. Псевдодальность во всех источниках определяется как произведение псевдозадержки на скорость света. Псевдозадержка $\tau_{пз} = t_r - t^{tr}$ в [1–14] определяется как разность между временем t_r приема навигационного сигнала в шкале времени приемника и временем t^{tr} его излучения в шкале времени навигационного спутника. Каким образом навигационный приемник узнает значение t^{tr} , каково смысловое содержание терминов «шкала времени» и «момент времени в той или иной шкале», чем время по шкале отличается от физического времени, используемого

в учебниках по физике, в [1–14] не раскрывается. Более того, в работах [1–9] в явной или неявной форме псевдозадержку $\tau_{пз} = t_r - t^{tr}$ трактуют как интервал времени без пояснений того, имеется ли при этом в виду интервал физического времени или же интервал времени по какой-либо шкале.

Для описания принципов функционирования ГНСС в [1–14] в явной или неявной форме используется рис. 1, который мы заимствовали из учебника [4]. Аналогичные рисунки в тех же целях используются в [2, 8, 9, 12].

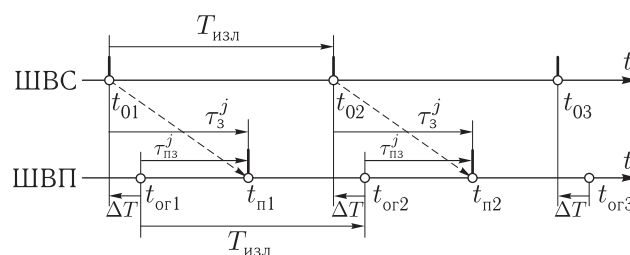


Рис. 1. Представление псевдозадержки в виде интервала времени

Принципы функционирования ГНСС и понятие псевдозадержки с помощью рисунков, аналогичных рис. 1, поясняются следующим образом. Навигационные спутники в повторяющиеся с периодом $T_{изл}$ моменты времени $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$ на шкале времени системы (ШВС) излучают навигационные сигналы (т.е. неявно предполагается, что навигационный сигнал является импульсным). 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). Сигналы, излучаемые спутниками в моменты времени t_{01}, t_{02}, t_{03} , принимаются по ШВП в моменты времени $t_{п1}, t_{п2}, t_{п3}, \dots$ (т.е. еще раз неявно предполагается импульсный характер навигационного сигнала). 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 ΔT , показанную на рис. 1 и определяемую в [4] как $\Delta T = t_{0i} - t_{огi}$.

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 τ_3^j распространения сигнала от j -го спутника до навигационного приемника, а псевдозадержка $\tau_{пз}^j$

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

где J — общее количество спутников, отслеживаемых в навигационном приемнике. Таким образом, согласно рис. 1, псевдозадержка $\tau_{пз}^j$ в навигационном приемнике формируется путем измерения длительности интервала времени, который начинается в моменты времени $t_{огi}$ и заканчивается в моменты $t_{пи}$.

Псевдозадержка (1), будучи умноженной на скорость света c , порождает псевдодальность ρ^j

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

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 ρ^j , измеренные не менее чем по четырем спутникам ($J \geq 4$), позволяют образовать систему уравнений (2) относительно четырех неизвестных $x_{п}, y_{п}, z_{п}, \Delta R_{п}$, из решения которой находятся оценки $\hat{x}_{п}, \hat{y}_{п}, \hat{z}_{п}, \hat{\Delta R}_{п}$.

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

Показанная в разд. 1 понятийная модель, которую для удобства дальнейшего изложения будем

называть старой, использует термины, смысловое содержание которых является размытым и иногда бессмысленным. Применение этих терминов приводит в старой модели к противоречиям. Рассмотрим несколько примеров, подтверждающих данное утверждение.

1. В современных ГНСС сигналы навигационных спутников 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?

2. Если задержка τ_3^j сигнала на рис. 1 превышает период $T_{изл}$, то измерения псевдозадержки становятся неоднозначными и могут быть выражены как $\tau_{пз}^j = \tau_{пзн}^j + k^j T_{изл}$, $j = \overline{1, J}$, где $\tau_{пзн}^j$ — неоднозначные измерения псевдозадержки, сформированные 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, k^j — неопределенное целое число. Такая же неоднозначность возникает, если модуль $|\Delta T|$ смещения ШВП относительно ШВС превышает период $T_{изл}$.

В принципе, рассмотренные неоднозначности измерений псевдозадержки могут быть разрешены с помощью привлечения грубых априорных сведений о задержке τ_3^j и смещении ΔT ШВП относительно ШВС. При этом суммарная ошибка грубых априорных сведений о задержке τ_3^j и смещении ΔT не должна превышать $T_{изл}/2$. По таким априорным сведениям с помощью формулы (1) может быть вычислено грубое значение $\tau_{пзгр}^j$. Наличие такой грубой оценки псевдозадержки 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 $k^j = \langle (\tau_{пзгр}^j - \tau_{пзн}^j) / T_{изл} \rangle$, $j = \overline{1, J}$, где операция $\langle x \rangle$ означает вычисление целого ближайшего к x . В учебном пособии [7] описывается именно этот способ разрешения неоднозначности измерений псевдозадержки в ГНСС, хотя ни в каких реальных навигационных приемниках он никогда не используется.

3. Согласно рис. 1 измерения псевдозадержек осуществляются в моменты времени приема $t_{п1}$, $t_{п2}$, $t_{п3}$, ... сигналов, излученных в моменты времени t_{01} , t_{02} , t_{03} , Но измерения псевдозадержек должны осуществляться одновременно не менее чем по четырем спутникам. Из-за различия дальностей до спутников моменты времени $t_{п1}^j$, $t_{п2}^j$, $t_{п3}^j$, ... приема сигналов от j -го спутника в навигационном приемнике не будут совпадать с моментами $t_{п1}^k$, $t_{п2}^k$, $t_{п3}^k$, ... 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 (2)?

4. Измерения псевдозадержек по всем спутникам в навигационном приемнике должны осуществляться в единые моменты времени $t_{изм}$. В качестве таковых можно использовать, например, опорные моменты $t_{ор1}$, $t_{ор2}$, $t_{ор3}$, ..., показанные на рис. 1. Положение этих моментов на ШВП определяется (задается) сигналом собственного генератора навигационного приемника. Однако для того, чтобы измерения псевдозадержек, соответствующих разным НКА, осуществлялись 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. Времена распространения сигналов разных спутников могут быть произвольными в пределах определяемых положением потребителя и высотами орбит спутников. Отсюда видим, что введенное неявно предположение о импульсном характере навигационного сигнала не может быть принято потому, что спутники не могут излучать импульсы в моменты времени, предшествующие моментам проведения измерений в приемниках всего множества потребителей.

Для того, чтобы преодолеть описанные выше противоречия старой понятийной модели,

необходимо ввести новые понятия, рассматриваемые в следующем разделе.

3. Определение смыслового содержания понятий «шкала времени» и «время по шкале»

Выявленные выше 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 [1–14] 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 определение смыслового содержания понятия фазы. Опять, несмотря на широкое использование в литературе термина «фаза», автору не удалось найти определения его смыслового содержания. В учебнике [16] приводится математическое определение понятия фазы для гармонического или в более общем случае квазигармонического процесса либо сигнала (далее 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

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(x) dx + \varphi_0, \quad (3)$$

где $\omega(t) = 2\pi f(t)$, $f(t)$ — мгновенная частота (в герцах). Первое слагаемое в правой части (3)

определяется как приращение фазы на интервале времени $0-t$, а φ_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 $\varphi(t)$:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (4)$$

Для строго гармонического сигнала частоты ω и f являются константами и фаза меняется равномерно или линейно $\varphi(t) = \omega t + \theta_0$. В случае квазигармонического сигнала $\omega(t)$ — медленно меняющаяся функция физического времени t и фаза изменяется неравномерно. Выражения (3), (4) позволяют геометрически интерпретировать фазу квазигармонического сигнала как угол $\varphi(t)$ вектора переменной длины $A(t)$, вращающегося с медленно меняющейся мгновенной угловой скоростью $\omega(t)$.

Далее в качестве единицы измерения фазы будем использовать цикл, который является более удобным для нашего дальнейшего рассмотрения. 1 цикл равен 2π радиан. Выражения (3) и (4) в этом случае преобразуются к виду $\varphi(t) = \int_0^t f(x) dx + \varphi_0$, $f(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}$.

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 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 начала:

$$\varphi_n(t) = \varphi_d(t) + n(t). \quad (5)$$

При проведении фазовых измерений могут возникать ситуации, когда целое число $n(t)$, входящее в состав полной фазы (5), отличается от его истинного значения на неопределенное целое число циклов. Такую полную фазу будем называть неоднозначно полной.

Интервал физического времени t , на котором полная фаза нарастает на 1 цикл, будем называть цикловым интервалом. В случае неравномерного

изменения фазы цикловые интервалы будут 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 2π (целого числа циклов) к аргументу гармонической функции не изменяет значения этой функции. В этом смысле полная и дольная фазы эквивалентны друг другу.

Понятие фазы применимо не только к гармоническим или квазигармоническим сигналам. На рис. 2,б показано изменение во времени псевдослучайной последовательности (ПСП) 11110 00100 11010 при неравномерном изменении ее фазы, а на рис. 2,а показан график этой неравномерно изменяющейся фазы.

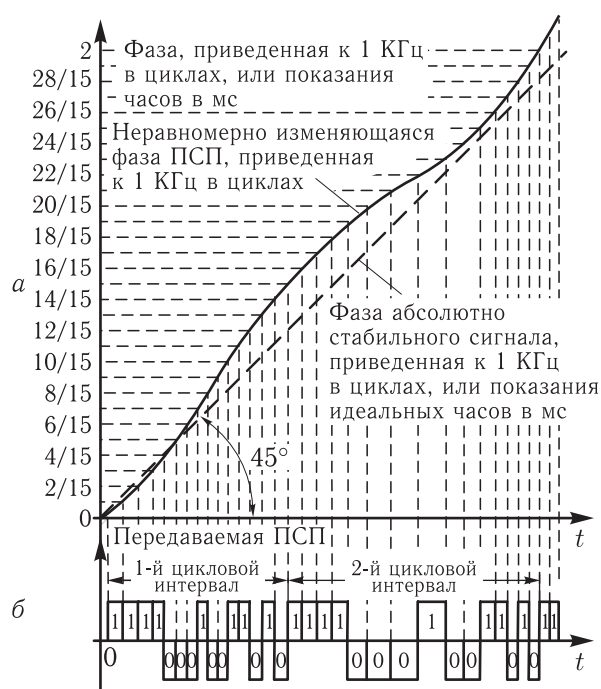


Рис. 2. ПСП с неравномерным изменением фазы

На рис. 2,б показаны две одинаковые по структуре ПСП 11110 00100 11010, 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 подряд

идущих единиц в структуре ПСП. Приращение фазы этих ПСП на этих разных цикловых интервалах одинаково и равно одному циклу (2π радиан).

Рассмотренный пример показывает, что для определения 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 физического времени t . Полная же фаза сигнала определяется 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 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 .

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 9 192 631 770 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, деленное на 9 192 631 770.

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 [17, 18]. Тогда понятие времени по шкале определяется как показания часов, лежащих в основе шкалы, на любой момент физического времени t . 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 будем 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.

4. Описание принципов функционирования ГНСС на основе новой понятийной модели

Сигналы, излучаемые навигационными спутниками в современных ГНСС, представляют собой модулированные по фазе высокочастотные несущие колебания в диапазоне $\sim 1,2\text{--}1,6$ ГГц. Модуляция несущих колебаний осуществляется двухслойным сигналом. Нижний слой представляет собой непрерывные, периодически повторяющиеся ПСП, по которым осуществляется измерение псевдодалейностей. Номинальный период этих ПСП в сигналах открытого доступа систем ГЛОНАСС и GPS равен 1 мс. Верхний слой образуют двоичные символы

навигационного сообщения длительностью 20 мс, 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 бортовую шкалу времени (БШВ) этого спутника.

В соответствии с определением (5) 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, укладывающихся на интервале от некоторого заранее определенного условного начала до текущего момента t . Например, в системе ГЛОНАСС таким условным началом является 00 ч 00 мин 00 с 1 января 1996 г. по московскому декретному времени, определяемому как UTC(SU)+3 ч. Для задания целого числа циклов $n(t)$ в навигационные сообщения спутников закладываются специальные сигналы меток времени и оцифровки ζ^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 этот момент будем называть меточным моментом. Например, в системе ГЛОНАСС меточным моментом является момент заднего фронта последнего импульса сигнала метки времени, а в GPS меточный момент — момент переднего фронта первого импульса сигнала метки времени. Под оцифровкой ζ^j меточного момента понимаются показания часов j -го спутника на его борту в этот момент. На рис. 3 показаны характерные моменты времени в излучаемом (рис. 3, а) и принимаемом (рис. 3, б) сигнале. Стрелками, ориентированными вверх, на рис. 3, а показаны моменты начала периодов ПСП в излучаемом сигнале, или, иными словами, моменты миллисекунд по БШВ. Большой стрелкой выделен меточный момент. Символ ζ^j , показанный над большой стрелкой, обозначает оцифровку этого меточного момента. Соответствующие моменты времени в принимаемом сигнале показаны на рис. 3, б в виде черточек с крестиками. Черточками, ориентированными вниз, на рис. 3, б показаны

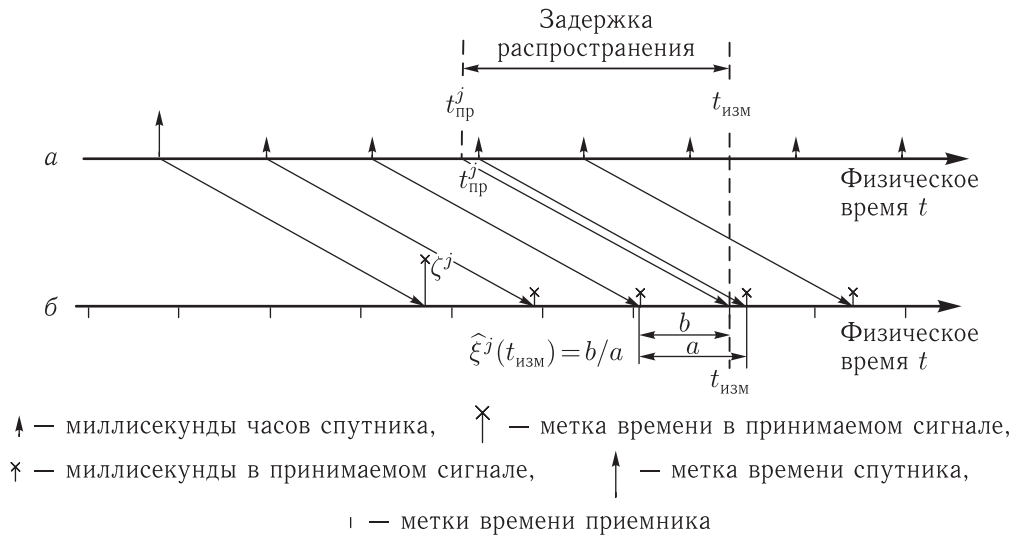


Рис. 3. Метки времени и их оцифровки в излучаемых и принимаемых сигналах ГНСС

некоторые в общем случае произвольные меточные моменты ШВП. В общем случае не предполагается, что эти моменты времени имеют какую-либо оцифровку.

В момент времени на ШВП, помеченный на рис. 3, б символом $t_{\text{изм}}$, в навигационном приемнике проводится измерение дольной фазы $\hat{\xi}^j(t_{\text{изм}})$ ПСП j -го спутника. Выраженная в циклах, эта фаза равна доле периода b/a в принимаемом сигнале, прошедшей от начала периода ПСП до момента физического времени $t_{\text{изм}}$. Величину $\hat{\xi}^j(t_{\text{изм}})$ невозможно отобразить на рис. 3, так как для этого необходимо ввести вертикальную ось, вдоль которой будет откладываться фаза (показания часов). Такое отображение будет сделано далее на рис. 5 в виде показаний часов.

Как видно из рис. 3, измеренное в приемнике значение дольной фазы $\hat{\xi}^j(t_{\text{изм}})$ с точностью до целого числа миллисекунд и ошибок слежения совпадает с показаниями спутниковых часов на момент предшествова $t_{\text{пр}}^j$ моменту измерения $t_{\text{изм}}$. Оценка $\hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j)$ полных показаний часов j -го спутника в секундах на момент предшествова $t_{\text{пр}}^j$ вычисляется в процессоре навигационного приемника по формуле

$$\widehat{T}^j(t_{\text{np}}^j) = 10^{-3} \left(\zeta_{\text{MC}}^j + n^j + \widehat{\xi}^j(t_{\text{изМ}}) \right), \quad j = \overline{1, J}, \quad (6)$$

где $\xi_{\text{мс}}^j$ — 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 $t_{\text{изм}}$ (в примере, показанном на рис. 3, $n^j = 2$). Описанные выше действия и привлекаемые для этого средства по оцениванию показаний часов j -го спутника на момент предшествования можно назвать канальными часами j -го спутника в навигационном приемнике, а оценки, определяемые по формуле (6), — 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. $T_{\text{кан}}^j(t_{\text{изм}}) = \widehat{T}^j(t_{\text{пр}}^j)$. Вычисления по формуле (6) можно интерпретировать так же, как разрешение миллисекундной неоднозначности оценок $\widehat{\xi}^j(t_{\text{изм}})$ показаний спутниковых часов.

Введенные в рассмотрение канальные часы схематично показаны на рис. 4 малыми окружностями. Очевидно, что количество канальных часов навигационного приемника равно числу его каналов.

Помимо канальных часов, в навигационном приемнике используются его собственные часы, схематично показанные на рис. 4 нижней большой окружностью. Собственными часами приемника называются часы, показания которых определяют

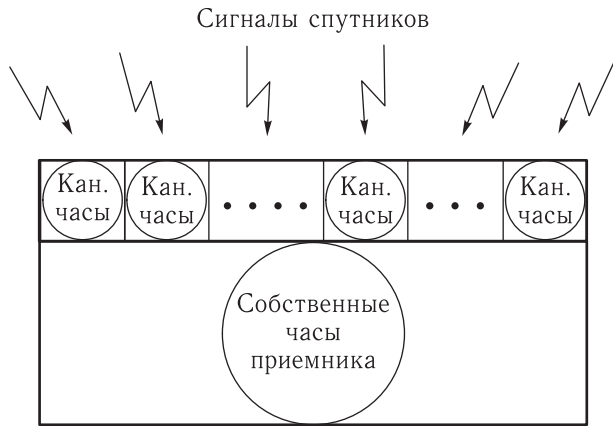


Рис. 4. Модель навигационного приемника как совокупность часов

моменты проведения измерений, т. е. задают шкалу времени приемника.

Координаты навигационного приемника и показания часов системы на момент $t_{\text{изм}}$ можно определять, опираясь только на показания канальных часов. 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 предшествова $t_{\text{пр}}^j$ и далее по этим оценкам вычисляет оценки самих показаний часов системы на моменты предшествова $t_{\text{пр}}^j$:

$$\begin{aligned} \hat{T}_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j) &= \hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j) - \Delta \hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j) = \\ &= T_{\text{кан}}^j(t_{\text{изм}}) - \Delta \hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}. \end{aligned} \quad (7)$$

Применяя параметры математических моделей движения спутников, передаваемые в навигационных сообщениях, и оценки $\hat{T}_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j)$, 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 предшествова $t_{\text{пр}}^j$. Подчеркнем, что для вычисления координат каждого j -го спутника приемник использует не значение $t_{\text{пр}}^j$ физического времени на момент предшествова, а оценку $\hat{T}_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j)$ 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 :

$$t_{\text{изм}} - t_{\text{пр}}^j = \frac{R^j}{c}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (8)$$

где $t_{\text{изм}} - t_{\text{пр}}^j$ — задержка распространения сигнала; R^j — расстояние между точками, которые занимал j -й спутник в момент предшествова $t_{\text{пр}}^j$ 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 (8) 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 (8) может быть с высокой точностью представлено в следующей форме:

$$T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) - T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j) = \frac{R^j}{c}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (9)$$

Заменяя в (9) значение $T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j)$ соответствующей оценкой (7), получаем уравнение для каждого j -го спутника:

$$T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) - \frac{R^j}{c} = \hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j) - \Delta T_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}. \quad (10)$$

Выражая в (10) 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 предшествова $t_{\text{пр}}^j$, из (10) получаем следующую систему нелинейных уравнений относительно неизвестных $T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}})$, $x_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$, $y_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$, $z_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$:

$$\begin{aligned} T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) - \frac{1}{c} \left((x_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - x^j(t_{\text{пр}}^j))^2 + \right. \\ \left. + (y_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - y^j(t_{\text{пр}}^j))^2 + (z_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - z^j(t_{\text{пр}}^j))^2 \right)^{1/2} = \\ = \hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j) - \Delta \hat{T}_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}. \end{aligned} \quad (11)$$

Для нахождения 4 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 4 уравнений вида (11), т. е. осуществлять измерения одновременно не менее чем по четырем спутникам. Решая при этих условиях систему (11),

получаем оценки $\hat{x}_\Pi(t_{\text{изм}})$, $\hat{y}_\Pi(t_{\text{изм}})$, $\hat{z}_\Pi(t_{\text{изм}})$ координат навигационного приемника и оценку $\hat{T}_{\text{сис}}(t_{\text{изм}})$ показаний часов системы на момент измерения $t_{\text{изм}}$, которая далее может применяться в качестве оцифровки момента времени $t_{\text{изм}}$.

В системе (11) не используются показания собственных часов навигационного приемника, т. е. не требуется, чтобы метки времени приемника были обязательно оцифрованы. 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. 4 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 $\tau_{\text{пз}}^j(t_{\text{изм}})$ по j -му спутнику определяется как разность показаний собственных часов приемника $T_\Pi(t_{\text{изм}})$ на момент измерения $t_{\text{изм}}$ и показаний часов j -го спутника $T^j(t_{\text{пр}}^j)$ на момент предшествова $t_{\text{пр}}^j$:

$$\tau_{\text{пз}}^j(t_{\text{изм}}) = T_\Pi(t_{\text{изм}}) - T^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}. \quad (12)$$

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

$$T_\Pi(t_{\text{изм}}) = \zeta^j + 0,08c, \quad (13)$$

где ζ^j — оцифровка очередной принимаемой метки времени с произвольного спутника. Ошибка начальной оцифровки меток времени приемника по формуле (13) не превышает ± 30 мс.

Оценка псевдозадержки $\hat{\tau}_{\text{пз}}^j(t_{\text{изм}})$, формируемая в приемнике, определяется как разность показаний собственных часов приемника $T_\Pi(t_{\text{изм}})$ и показаний его канальных часов $T_{\text{кан}}^j(t_{\text{изм}})$, соответ-

ствующих j -му спутнику на момент измерения $t_{\text{изм}}$:

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_{\text{пз}}^j(t_{\text{изм}}) &= T_\Pi(t_{\text{изм}}) - T_{\text{кан}}^j(t_{\text{изм}}) = \\ &= T_\Pi(t_{\text{изм}}) - \hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для произвольного момента физического времени t выражение (12) можно переписать следующим образом:

$$\tau_{\text{пз}}^j(t) = T_\Pi(t) - T^j(t_{\text{пр}}^j), \quad j = \overline{1, J}, \quad (15)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta T^j(t) &= T^j(t) - T_{\text{сис}}(t), \quad j = \overline{1, J}, \\ \Delta T_\Pi(t) &= T_\Pi(t) - T_{\text{сис}}(t). \end{aligned} \quad (16)$$

Используя (16), показания часов j -го спутника $T^j(t)$ и показания собственных часов приемника $T_\Pi(t)$ могут быть следующим образом выражены через смещения $\Delta T^j(t)$, $\Delta T_\Pi(t)$:

$$\begin{aligned} T^j(t) &= T_{\text{сис}}(t) + \Delta T^j(t), \quad j = \overline{1, J}, \\ T_\Pi(t) &= T_{\text{сис}}(t) + \Delta T_\Pi(t). \end{aligned} \quad (17)$$

Подставляя (17) в (12), получаем следующее выражение для псевдозадержки:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{пз}}^j(t_{\text{изм}}) &= T_\Pi(t_{\text{изм}}) - T^j(t_{\text{пр}}^j) = \\ &= T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) - T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j) + \Delta T_\Pi(t_{\text{изм}}) - \Delta T^j(t_{\text{пр}}^j) = \\ &= \Delta T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j \div t_{\text{изм}}) + \Delta T_\Pi(t_{\text{изм}}) - \Delta T_{\text{сис}}^j(t_{\text{пр}}^j), \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\Delta T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j \div t_{\text{изм}}) = T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) - T_{\text{сис}}(t_{\text{пр}}^j) \quad (19)$$

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

На рис. 5 показано изменение псевдозадержек как функций физического времени t для двух спутников с номерами j и k .

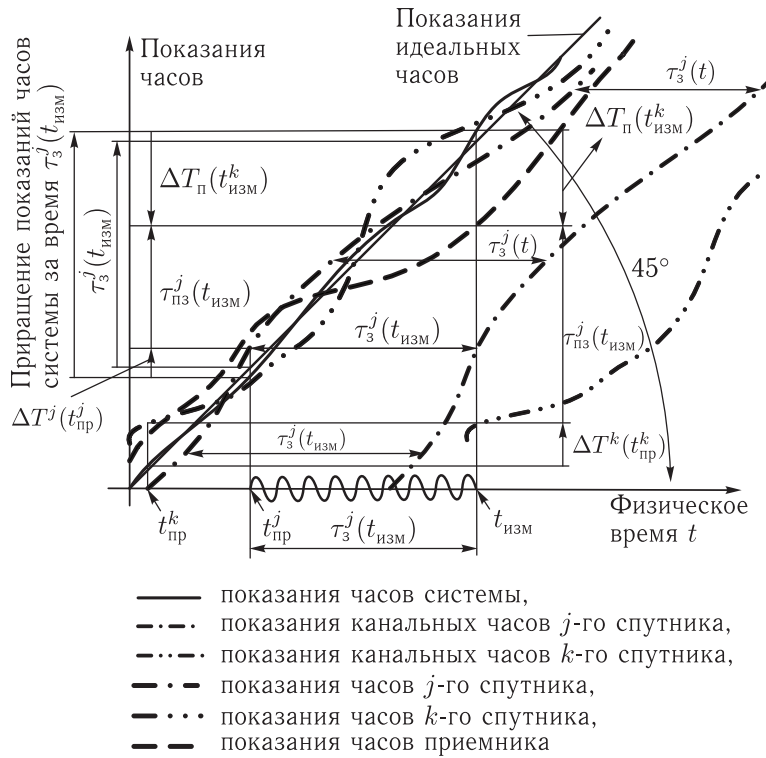


Рис. 5. Изменение псевдозадержек j -го и k -го спутников как функций физического времени t

Оценка псевдодальности $\hat{\rho}^j(t_{изм})$ по j -му спутнику определяется как произведение оценки псевдозадержки $\hat{\tau}_{пз}^j(t_{изм})$ (14) на скорость света c :

$$\begin{aligned} \hat{\rho}^j(t_{изм}) &= c \cdot \hat{\tau}_{пз}^j(t_{изм}) = c (T_{\pi}(t_{изм}) - T_{кан}^j(t_{изм})) = \\ &= c (T_{\pi}(t_{изм}) - \hat{T}^j(t_{изм})), \quad j = \overline{1, J}. \end{aligned} \quad (20)$$

Из (14) и (20) 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 $T_{\pi}(t_{изм})$ из левой и правой частей (11), получаем

$$\begin{aligned} & \left((x_{\pi}(t_{изм}) - x^j(t_{пр}^j))^2 + (y_{\pi}(t_{изм}) - y^j(t_{пр}^j))^2 + \right. \\ & \quad \left. + (z_{\pi}(t_{изм}) - z^j(t_{пр}^j))^2 \right)^{1/2} + \\ & \quad + c \cdot (T_{\pi}(t_{изм}) - T_{сис}(t_{изм})) = \\ & = c \cdot (T_{\pi}(t_{изм}) - \hat{T}^j(t_{пр}^j)) + c \cdot \Delta T_{сис}^j(t_{пр}^j), \quad j = \overline{1, J}. \end{aligned} \quad (21)$$

По определению (16), содержимое круглых скобок, стоящих в левой части выражения (21), является смещением $\Delta T_{\pi}(t_{изм})$ показаний часов приемника относительно показаний часов системы на момент измерения $t_{изм}$. Введем для произведения этого смещения на скорость света c следующее обозначение:

$$\begin{aligned} \Delta R_{\pi}(t_{изм}) &= c \cdot (T_{\pi}(t_{изм}) - T_{сис}(t_{изм})) = \\ &= c \cdot \Delta T_{\pi}(t_{изм}), \end{aligned} \quad (22)$$

где $\Delta R_{\pi}(t_{изм})$ — смещение показаний часов приемника относительно показаний часов системы, выраженное в метрах. Содержимое круглых скобок, стоящих в правой части (21), по определению (14) является оценкой псевдозадержки, а ее произведение на скорость света в соответствии с (20) — оценка псевдодальности. В результате (22) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \left((x_{\pi}(t_{изм}) - x^j(t_{пр}^j))^2 + (y_{\pi}(t_{изм}) - y^j(t_{пр}^j))^2 + \right. \\ & \quad \left. + (z_{\pi}(t_{изм}) - z^j(t_{пр}^j))^2 \right)^{1/2} + \Delta R_{\pi}(t_{изм}) = \\ & = \hat{\rho}^j(t_{изм}) + c \cdot \Delta T_{сис}^j(t_{пр}^j), \quad j = \overline{1, J}. \end{aligned} \quad (23)$$

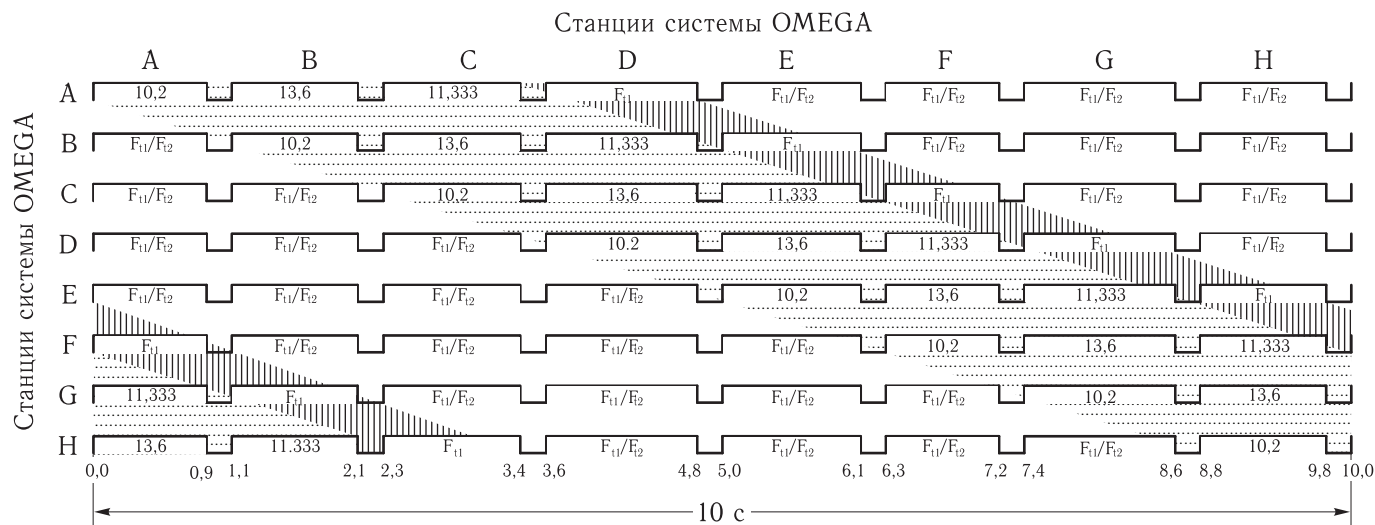


Рис. 6. Структура навигационного кадра РНС OMEGA

Система уравнений (23) полностью эквивалентна ранее полученной системе (11). Незвестными 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 $\Delta R_{\text{п}}(t_{\text{изм}})$ (22) показаний собственных часов приемника относительно показаний часов системы, выраженное в метрах. Из (22) 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 $T_{\text{сис}}(t_{\text{изм}}) = T_{\text{п}}(t_{\text{изм}}) - \Delta \hat{R}_{\text{п}}(t_{\text{изм}})/c$.

5. Применение новой понятийной модели к наземным радионавигационным системам

Наземные РНС 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 РНС, так же, как и в ГНСС, синхронизируются с высокой точностью со шкалой времени системы. Структуры передаваемых навигационных сигналов в различных наземных

РНС 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 РНС в рамках статьи не представляется возможным. Поэтому рассмотрим далее в качестве примера применение новой понятийной основы к наземной сверхдлинно-волновой РНС OMEGA [15].

Структура навигационного кадра РНС OMEGA показана на рис. 6 [4, 15, 19].

Латинскими буквами А, В, С, D, Е, F, G, Н обозначены 8 станций РНС OMEGA, излучающих с временным смещением навигационные радиоимпульсы со средней длительностью 1,25 с, заполненные когерентными несущими гармоническими колебаниями с частотами соответственно 10,2, 13,6 и 34/3 кГц. Навигационные радиоимпульсы выделены на рис. 6 точечной штриховкой. Вертикальной штриховкой на рис. 6 выделены радиоимпульсы с уникальными частотами, используемыми для распознавания станций. Остальные 4 радиоимпульса каждой строки навигационного кадра применяются для межстанционного обмена [19].

Основная навигационная частота в РНС OMEGA — 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, доляная 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) [4, 15]. 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 [15].

Моменты времени, следующие по часам системы через 60/17 мс, называют эпохами РНС ОМЕГА. Если для разрешения неоднозначности привлекать еще измерения фазы сигнала навигационного кадра, который имеет длительность 10 с (см. рис. 6), 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 [4, 15] при изложении методов разрешения неоднозначности в РНС ОМЕГА 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 РНС ОМЕГА, 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 РНС ОМЕГА 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 навига-

ционные радиоимпульсы. Но в литературе [4, 15] не вводится понятие моментов предшества и показаний часов станций и системы, не указывается на то, что фазы гармонических несущих, заполняющих излучаемые навигационные радиоимпульсы, дают 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 [4, 15] отсутствует. Вероятно, по этой причине авторы [4, 15] вынуждены говорить о разрешении неоднозначности измерений дальности.

Помимо этого, в литературе [15] указывается, что для разрешения неоднозначности псевдодальномерных измерений необходимо иметь априорные данные не только о координатах навигационного приемника, но и о сдвиге его шкалы времени. Необходимость имения априорных сведений для разрешения неоднозначности измерений псевдодальномерных в РНС ОМЕГА, так же, как и необходимость имения таких сведений для разрешения неоднозначности измерений псевдодальномерных в ГНСС, о котором говорится в учебном пособии [7], является заблуждением. Это заблуждение происходит из желания авторов литературы [7, 15] разрешать неоднозначность измерений именно псевдодальномерных. Такое желание естественно, поскольку в [7, 15] не используются понятия моментов предшества и показаний часов станций (спутников) на эти моменты. Однако если разрешать неоднозначность не псевдодальномерных, а показаний часов станций (спутников) на моменты предшества (что, собственно, и делается в ГНСС), то никаких априорных сведений в ГНСС не требуется, а в РНС ОМЕГА нужны 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, передаваемым по радио.

В ГНСС разрешение неоднозначности показаний часов спутников осуществляется с использованием меток времени и их оцифровок (см. разд. 4

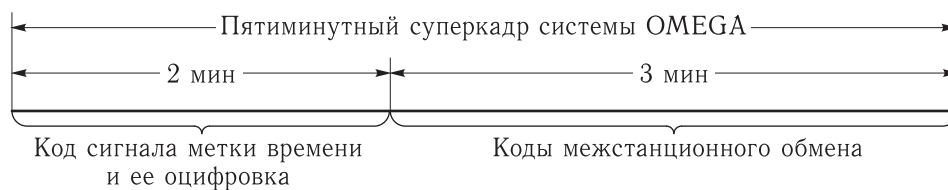


Рис. 7. Пятиминутный суперкадр РНС OMEGA

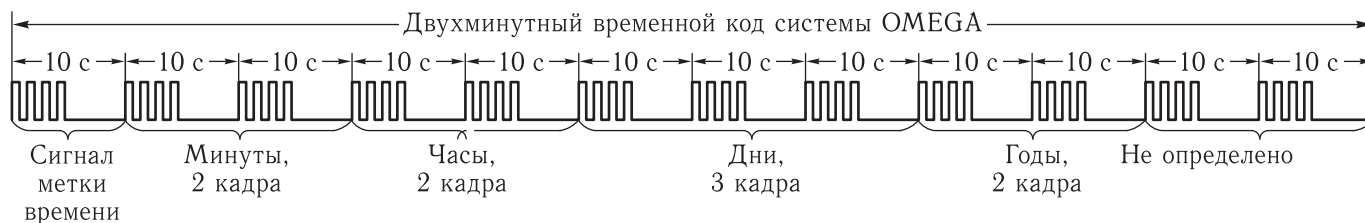


Рис. 8. Двухминутный временной код РНС OMEGA

данной статьи). В РНС OMEGA оцифровки меток времени отсутствуют, а в качестве меток времени могут использоваться моменты начала 30-секундных интервалов, совпадающие с моментами эпох РНС OMEGA. На каждом таком интервале последовательно располагается три подряд идущих кадра. 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 предшествования. После разрешения неоднозначности могут быть образованы однозначные значения псевдозадержек как разности между показаниями часов навигационного приемника на момент измерения и разрешенными показаниями часов станций на моменты предшествования. При этом не имеет значения, насколько шкала времени навигационного приемника смещена относительно шкалы системы.

Если в структуру навигационного сигнала РНС OMEGA ввести оцифровки меток времени, то в этом случае для разрешения неоднозначности показаний часов станций, так же как и в ГНСС, не потребуется никаких априорных сведений. В работе [19] рассматриваются предложения по введению оцифровок меток времени в структуру навигационного кадра РНС OMEGA. Для этого предлагается ввести понятие пятиминутного суперкадра,

показанного на рис. 7. 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.

Каждая строка навигационного кадра РНС OMEGA (см. рис. 6) содержит 8 радиоимпульсов, из которых 4 на момент публикации работы [19] не использовались для каких-либо целей. Эти 4 радиоимпульса в работе [19] 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 РНС OMEGA выделяются две индивидуальные частоты. На двухминутном 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 часе. 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 [19]

двухминутного временного кода РНС OMEGA показана на рис. 8.

Если метками времени сигналов, излучаемых станциями РНС OMEGA, считать моменты начала 30-секундных интервалов, совпадающие с моментами эпох РНС OMEGA, то оцифрованной окажется каждая 10-я 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 (6):

$$\hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j) = N_{\text{ст}} \cdot 86\,400 + N_{\text{чс}} \cdot 3600 + N_{\text{мн}} \cdot 60 + N_{30} \cdot 30 + \xi_{\text{с}}^j(t_{\text{изм}}), \quad j = \overline{1, J}, \quad (24)$$

где $N_{\text{ст}}$ — количество суток в текущем году, завершившихся к моменту начала текущего суперкадра; $N_{\text{чс}}$ — 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 (значения $N_{\text{ст}}$, $N_{\text{чс}}$, $N_{\text{мн}}$ извлекаются из принимаемого суперкадра); N_{30} — количество 30-секундных интервалов от начала текущего суперкадра, завершившихся к моменту $t_{\text{изм}}$ проведения измерений (значение N_{30} подсчитывается в приемнике); $\xi_{\text{с}}^j(t_{\text{изм}})$ — фаза принимаемого сигнала на частоте 10,2 кГц, однозначно измеренная в пределах 30 с, приведенная к 1 Гц (значение $\xi_{\text{с}}^j(t_{\text{изм}})$ определяется путем разрешения неоднозначности измеренного значения дольной фазы сигнала частоты 10,2 кГц с использованием измерений дольных фаз на различных частотах [4, 15]).

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 (24), получаем однозначное значение псевдозадержки, соответствующей j -й станции РНС OMEGA.

Можно предложить еще более простой способ разрешения неоднозначности измерений дольной фазы сигнала частоты 10,2 кГц для восстановления полного значения показаний $T^j(t_{\text{пр}}^j)$ часов станций на моменты предшествования $t_{\text{пр}}^j$. Для этого положим, что метками времени сигналов, излучаемых станциями РНС OMEGA, являются моменты начала 10-секундных кадров, показанных

на рис. 6. В этом случае оцифрованной окажется каждая 30-я метка. В аппаратуру приемника добавим два счетчика. Первый счетчик будет определять целое число $N_{\text{к}}$ кадров, укладываемых на интервале времени от начала суперкадра до момента измерения $t_{\text{изм}}$ дольной фазы сигнала частоты 10,2 кГц. Второй счетчик будет определять целое число $N_{10,2}$ периодов сигнала частоты 10,2 мГц, укладываемых на интервале времени от начала кадра до момента измерения $t_{\text{изм}}$. В этом случае разрешение неоднозначности показаний часов станций, отсчитываемых в секундах от начала текущего года (т. е. с точностью до целого числа лет от начала столетия) можно будет осуществлять по формуле, аналогичной формулам (6), (24):

$$\hat{T}^j(t_{\text{пр}}^j) = N_{\text{ст}} \cdot 86\,400 + N_{\text{чс}} \cdot 3600 + N_{\text{мн}} \cdot 60 + N_{\text{к}} \cdot 10 + \frac{N_{10,2} + \xi_{10,2}^j(t_{\text{изм}})}{10,2} \cdot 10^{-3}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (25)$$

Отметим, что в (25) для разрешения неоднозначности $T^j(t_{\text{пр}}^j)$ не используются измерения дольных фаз на измерительных частотах 13,6 и 34/3 кГц. Таким образом, использование нового фундаментального понятия показаний $T^j(t_{\text{пр}}^j)$ часов станций на моменты предшествования $t_{\text{пр}}^j$ позволяет путем введения в структуру навигационного сигнала РНС OMEGA оцифровок меток времени и в аппаратуру приемника двух дополнительных счетчиков отказаться от проведения измерений на частотах 13,6 и 34/3 кГц и тем самым существенно упростить РНС OMEGA.

Проведенное рассмотрение показывает, что понятия, введенные в разд. 3–4 для ГНСС, полностью применимы и для наземной РНС OMEGA.

Выводы

На основе критического обзора, проведенного в разд. 1, 2, новой понятийной модели ГНСС, предложенной в разд. 3, 4 и применения понятий новой модели к наземным РНС, можно сделать следующие выводы.

1. Центральными понятиями радионавигации являются понятия шкалы времени и показаний

часов РНТ (время по шкале РНТ) на моменты предшества. 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 этих часов. Под часами понимается совокупность средств и действий, направленных на определение количественного значения времени по шкале как приведенной к 1 Гц полной фазы периодического процесса, лежащего в основе часов шкалы.

2. Понятие псевдозадержки (псевдодальности) является вторичным по отношению к понятию показаний часов (времени по шкале) по следующим причинам:

- само понятие псевдозадержки $\tau_{пз}^j(t_{изм})$ определяется через понятие показаний часов как разность между показаниями $T_{п}(t_{изм})$ часов навигационного приемника на момент измерения $t_{изм}$ и показаниями $T^j(t_{пр}^j)$ часов j -й станции (спутника) на момент предшества $t_{пр}^j$ моменту измерения $t_{изм}$, т. е. $\tau_{пз}^j(t_{изм}) = T_{п}(t_{изм}) - T^j(t_{пр}^j)$. Показания же часов являются самостоятельным понятием. Как показано в разд. 4 данной статьи, оценки показаний часов спутников ГНСС на моменты предшества (показания канальных часов на моменты измерения) позволяют осуществлять все навигационные определения без использования понятия псевдозадержки;
- 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 предшества. То есть петли слежения навигационного приемника отмечают не значения псевдозадержек, а показания часов станций (спутников) на моменты предшества. Измерения же псевдозадержек в навигационном приемнике формируются на вторичной основе путем интегрирования в процессоре приемника кодов корректирующих частот его петель слежения;
- в РНС разрешение неоднозначности измерений псевдозадержек осуществляется не непо-

средственно, как утверждается в [7, 15], а через разрешение неоднозначности показаний часов станций (спутников) на моменты предшества. 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 предшества.

3. Использование нового фундаментального понятия показаний $T^j(t_{пр}^j)$ часов станций на моменты предшества $t_{пр}^j$ позволяет путем введения в структуру навигационного сигнала РНС ОМЕГА оцифровок меток времени и в аппаратуру приемника двух дополнительных счетчиков отказаться от проведения измерений на частотах 13,6 и 34/3 кГц и тем самым существенно упростить РНС ОМЕГА.

Список литературы

1. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. Монография. М.: Эко-Трендз, 2000.
2. Липкин И. А. Спутниковые навигационные системы. М.: Вузовская книга, 2001.
3. Информационные технологии в радиотехнических системах. Учеб. пособ. Под ред. И. Б. Федорова. Издание второе, перераб. и доп. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
4. Бакулев П. А., Сосновский А. А. Радионавигационные системы. Учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2005.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Издание 3-е, перераб. Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2005.
6. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. М.: Горячая линия–Телеком, 2005.
7. Малышев В. В., Куришин В. В., Ревнивых С. Г. Введение в спутниковую навигацию. Учеб. пособ. М.: Издательство МАИ-ПРИНТ, 2008.

8. 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 изд. М.: Издательство МАИ-ПРИНТ, 2010.
9. Guide to GPS Positioning. Prepared under the leadership of David Wells. Canadian GPS Associates. Second printing, with corrections. May 1987.
10. Hoffman-Wellenhof B., Lichtenegger H., and Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice. Springer-Verlag Wien, New York, 1992.
11. Seeber G. Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1993.
12. Understanding GPS. Principles and Application. Editor Elliot D. Kaplan, 1996.
13. Leick A. GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons. New York, 1990.
14. Global Positioning System: Theory and Applications. Volume I and II. Edited by B. W. Parkinson and J. J. Spilker Progress in astronautics and aeronautics. Volume 163. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 370. L'Enfant Promenade, SW, Washington, DC 20024-2518, 1996.
15. Радионавигационные системы сверхдлинноволнового диапазона. Под ред. П. В. Оленюка и Г. В. Головушкина. М.: Радио и связь, 1985.
16. Гоноровский И. С., Демин М. П. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1994.
17. Поваляев А. А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. М.: Радиотехника, 2008.
18. Поваляев А. А., Вейцель А. В., Мазена Р. Б. Глобальные спутниковые системы синхронизации и управления движением в околоземном пространстве. М.: Вузовская книга, 2012.
19. Fey L. Time Disseminations Capabilities of the Omega System. Pros. 25th Ann. Symp. Frequency Control (Electron. Indust. Ass., Washington, D.C.), p. 167–170. Apr. 1971.