

УДК 631.365.22

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-21-32

Для цитирования: Мусонов В. М., Романов А. П. Уменьшение погрешностей местоопределений объектов радионавигационной системы // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 1. С. 21–32. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-21-32.

For citation: Musonov V. M., Romanov A. P. Errors reduction in the location of objects of the radio navigation system. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 1, P. 21–32. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-21-32.

Уменьшение погрешностей местоопределений объектов радионавигационной системы

В. М. Мусонов*, А. П. Романов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

* E-mail: musonov_vm@mail.ru

В представленной работе рассмотрен метод повышения точности местоопределения бортовой станции по сигналам радионавигационных систем наземного базирования. В радионавигационной системе на основе излучения сигнала ведущей опорной станцией производится приём сигналов ведомыми опорными станциями с определением моментов их прихода относительно собственных шкал времени. С другой стороны, на основе излучения сигналов ведомыми опорными станциями производится приём сигналов ведущей опорной станцией с определением моментов их прихода относительно собственной шкалы времени. Согласно измеренным моментам прихода излучённых сигналов, вычисляются временные поправки к шкалам времени ведомых опорных станций относительно ведущей опорной станции. Так как вычисление временной поправки производится за время не более 10 с, то исключаются случайные составляющие, обусловленные непостоянством скорости распространения поверхностной электромагнитной волны в следствие непостоянства параметров окружающей среды и параметров приповерхностного слоя участка распространения электромагнитной волны. При превышении вычисленного значения временной поправки длительности тактового интервала формируемого сигнала проводят коррекцию момента (с точностью до такта) формирования модулирующего кода сигнала, излучаемого ведомой опорной станцией, и коррекцию вычисленного значения временной поправки на величину скорректированных ранее длительностей тактов. Откорректированные значения временных поправок (предварительно закодированных) передаются каждой из ведомых опорных станций в составе их навигационных сигналов. Потребитель навигационной информации принимает сигналы, излучённые опорными станциями, через декодирование выделяет из сигналов опорных станций информацию о рассогласовании временных шкал и проводит измерения радионавигационных параметров с повышенной точностью, обусловленной компенсацией погрешности несинхронности сигналов излучения ведомых опорных станций радионавигационной системы.

Ключевые слова: радионавигационная система, опорные станции, бортовая станция, точность измерение координат.

Errors reduction in the location of objects of the radio navigation system

V. M. Musonov^{*}, A. P. Romanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

^{*}E-mail: musonov_vm@mail.ru

In the present paper, a method for improving the accuracy of the dead reckoning position of a board station based on signals from ground-based radio navigation systems is considered. In the radio navigation system, based on the radiation of the signal by the master fixed station, signals are received by the slave fixed stations with the determination of the moments of their arrival relative to their own time scales. On the other hand, based on the radio frequency radiation of signals by the slave fixed stations, signals are received by the master fixed station with the determination of the moments of their arrival relative to their own time scale. According to the measured moments of arrival of the radio frequency radiation signals, time corrections to the time scales of the slave fixed stations relative to the master fixed station are calculated. Since the time correction is calculated for a time of no more than 10 seconds, a random components are excluded due to the variability of the propagation velocity of the surface electromagnetic wave due to the variability of the environmental parameters and the parameters of the near-surface layer of the electromagnetic wave propagation area. If the calculated value of the time correction of the duration of the clock interval of the generated signal is exceeded, the moment correction (up to a clock) of the formation of the modulating code of the signal radiated by the slave fixed station is carried out and the calculated value of the time correction is corrected by the value of the previously corrected clock durations. The corrected values of the time corrections (pre-coded) are transmitted to each of the slave fixed stations as part of their navigation signals. The navigation information user receives the radio navigation signals radiated by the fixed stations, through decoding highlights information about the mismatch of time scales from the signals of the fixed stations and measures the radio navigation parameters with heightened accuracy due to compensation for the error of the out-of-sync radiation signals of the slave fixed stations of the radio navigation system.

Keywords: radio navigation system, fixed station, board station, accuracy of the dead reckoning position.

Введение

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области координатно-временного обеспечения при помощи спутниковых радионавигационных систем (СРНС), радионавигационные системы (РНС) наземного базирования продолжают играть немаловажную роль в координатном обеспечении объектов авиации, наземных транспортных средств и объектов морского базирования.

В настоящее время к РНС наземного базирования предъявляются повышенные требования к точности и достоверности радионавигационных определений, кроме того, РНС должны позволять решать задачи наземной поддержки потребителей СРНС. Такая поддержка может быть реализована путем возложения на РНС функций передачи дифференциальных поправок к сигналам СРНС, что реализуется путем размещения в составе опорных станций (ОС) РНС контрольно-корректирующих станций (ККС) СРНС. При этом выбираемая структура сигналов РНС должна позволять передавать в составе навигационных сигналов блоки цифровой информации, несущие данные дифференциальной коррекции и служебные сообщения с заданной скоростью.

Уменьшение погрешности радионавигационных определений в РНС невозможно без решения другой проблемы – синхронизации шкал времени (ШВ) опорных станций, что обеспечивается заданием единой системной шкалы времени (СШВ) радионавигационной системы.

Методы синхронизации опорных станций радионавигационных систем

Рассмотрим известные методы реализации системной шкалы времени в СРНС и РНС. В СРНС ГЛОНАСС и GPS реализация СШВ осуществляется путем установки на борт каждого из навигационных космических аппаратов (НКА) высокоточных стандартов частоты и времени и определения параметров ухода шкалы времени НКА по результатам измерений, выполняемых станциями наземного комплекса управления (НКУ). Информация о значениях корректирующих коэффициентов полиномов, аппроксимирующих уход часов, закладывается на борт навигационных космических аппаратов СРНС с передающих станций НКУ по выделенному радиоканалу [1].

В РНС для реализации единой СШВ могут быть использованы следующие способы:

1) дифференциальный режим РНС, требующий наличия контрольного пункта (КП), находящегося в точке с известными заранее координатами. При этом результаты измерений КП используются для вычисления корректирующих поправок для каждой из опорных станций к СШВ. Полученные значения корректирующих поправок каждой из опорных станций к СШВ передаются по выделенному радиоканалу в эфир. Потребители РНС измеряют значения радионавигационных параметров и принимают сигналы КП, несущие информацию о поправках к шкалам времени ОС или к значениям радионавигационных параметров (РНП). Используя принятую корректирующую информацию, потребитель исправляет результаты собственных измерений, в результате чего устраняются погрешности, вызванные рассогласованием временных шкал ОС, а также коррелированные составляющие погрешностей на трассе распространения сигналов [2];

2) использование в составе ОС высокостабильных квантовых стандартов частоты и использование возимых стандартов частоты для периодических сличений шкал времени ОС и введения поправок в СШВ [3; 4];

3) калибровка РНС по методам взаимного контроля ОС и по измерениям на контрольной точке [2].

Первый способ реализуется путем определения значений корректирующих поправок на основе взаимного контроля сигналов ОС и ввода полученных поправок в сигналы каждой из ОС. Второй способ реализуется путем определения поправок к сигналам всех ОС РНС в контрольном пункте с известными координатами, после чего полученные при калибровке значения поправок вводятся в состав излучаемых сигналов ОС;

4) синхронизация РНС, основанная на использовании внешних источников, например, СРНС.

Недостатки существующих методов синхронизации радионавигационных систем

Существующие способы синхронизации сигналов навигационных пунктов РНС имеют следующие недостатки:

– дифференциальный метод ввода поправок имеет недостаток, состоящий в необходимости выделения специального радиоканала для передачи поправок в реальном времени, организации и обслуживании КП, разработки аппаратуры потребителей РНС с учетом необходимости приема дополнительных сигналов, излучаемых КП;

– второй метод синхронизации требует наличия возимого стандарта частоты, организации перевозок этого стандарта между станциями системы, проведения сличений временных шкал возимого стандарта и стандартов частоты ОС;

– недостатком третьего метода является то, что во время проведения калибровки требуется выводить РНС из штатного режима, что приводит к прерыванию обеспечения потребителей информацией о координатах. Кроме того, с течением времени, прошедшего от момента последней калибровки, информация о поправках устаревает, вследствие взаимного расхождения ШВ опорных станций, обусловленного долговременной нестабильностью частоты используемых стандартов частоты и времени, что приводит к постепенной деградации точности определений;

– реализация четвертого метода возможна лишь при наличии приеме сигналов СРНС. Но одной из особенностей СРНС является зависимость точности измерения РНП от солнечной активности [5]. К тому же, РНС с синхронизацией по СРНС теряет автономность.

Наличие указанных недостатков явилось побудительным мотивом для разработки метода формирования единой системной шкалы времени и её коррекции посредством опорных станций наземной РНС, позволяющего в значительной степени снизить влияние указанных недостатков на точность измерения радионавигационных параметров.

Метод расчета расхождения шкал времени ОС

На рис. 1. представлена геометрическая структура РНС. Антенны передающих устройств опорных станций $ОС_A$ (является ведущей опорной станцией), $ОС_B$ и $ОС_C$ (являются ведомыми опорными станциями), расположенных в пунктах А, В и С с известными с геодезической точностью координатами (x_A, y_A) , (x_B, y_B) и (x_C, y_C) , излучают радионавигационные сигналы. В пункте М находится бортовая станция (БС), местоположение (координаты x_M, y_M) которой необходимо определить. С учётом известных моментов излучения сигналов опорными станциями ($ОС_A$, $ОС_B$ и $ОС_C$) и измеренных временах распространения излучённых радионавигационных сигналов (первичная обработка радионавигационных сигналов [6]) при известных скоростях распространения электромагнитных волн вдоль трасс АМ, ВМ и СМ посредством аппаратуры (вторичная обработка радионавигационных сигналов [6]) бортовой станции определяются дальности d_{AM} , d_{BM} и d_{CM} трасс АМ, ВМ и СМ и по известным координатам пунктов А, В и С определяются координаты x_M, y_M местоположения БС.

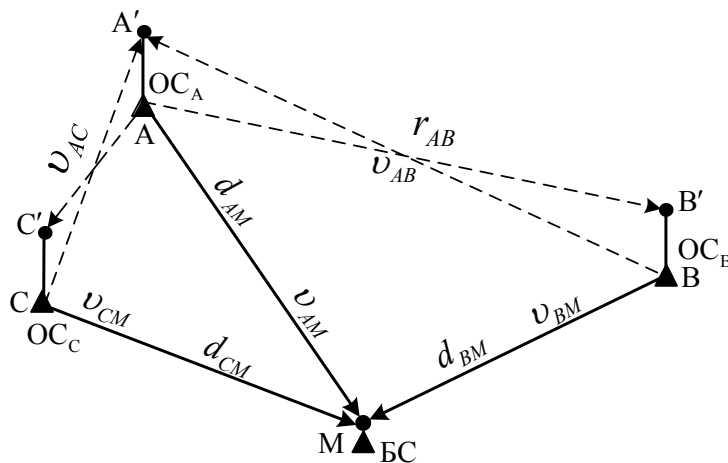


Рис. 1. Геометрическая структура наземной РНС

Fig. 1. Geometric structure of the ground-based RNS

В навигационной системе используются широкополосные сигналы с минимальной частотной манипуляцией [7] (далее по тексту – сигналы), обеспечивающие сужения основной полосы частот спектра сигнала, уменьшение уровня боковых составляющих, а также исключение необходимости специального радиоканала для передачи необходимой информации посредством использования дополнительной кодовой фазовой манипуляции (ФМ). В этом случае наиболее эффективным способом разделения широкополосных сигналов, излучаемых опорными станциями, является кодовый метод разделения таких сигналов на приёмной стороне. Кодовый метод разделения сигналов предусматривает формирование и излучение сигналов, модулированных кодами псевдослучайных последовательностей (ПСП). Если на $ОС_A$ в качестве модулирующего кода выбрана ПСП [8], то на $ОС_B$ ($ОС_C$) в качестве модулирующих кодовых ПСП используются циклические сдвиги на n_B (n_C) двоичных символов одной и той же исходной

кодовой ПСП, выбранной на ОС_А. Если необходимо использовать три сигнала, то циклический сдвиг для каждой из ОС определяется как $n_i \approx (i-1)L/j$ (здесь i – номер одной из j опорных станций; $L = 2^m - 1$ – длина исходного M -кода ПСП, формируемого посредством m -разрядного регистра сдвига, охваченного обратной связью через схему ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ-ИЛИ). Следует добавить, что при работе с кодовым разделением сигналов все ОС работают на одной частоте, а излучаемые сигналы ОС перекрываются во времени.

Каждая из ОС включает в себя передающее и приёмное устройства. Посредством передающего устройства производится формирование и излучение сигнала через излучающую антенну. Посредством приёмного устройства осуществляется приём и обработка сигналов, излучённых соседними ОС. Результатом первичной обработки принятого сигнала станет формирование *момента приёма* принятого сигнала с учётом задержки, связанной с групповой задержкой сигнала в высокочастотном тракте и задержкой, обусловленной следящими системами за задержкой кода и фазой радиосигнала [9]. В качестве приёмной антенны (с фазовыми центрами в точках A' , B' и C') опорной станции используется укороченная несимметричная вертикальная антенна, расположенная с разнесом по вертикали на 1 м относительно вершины излучающей антенны (с фазовыми центрами в точках A , B и C), что создаёт развязку относительно излучающей антенны не менее 20 дБ [10]. Кроме того, дополнительная развязка обеспечивается за счёт использования кодового разделения излучаемого сигнала $s_A(t, d_i)$ (d_i – модулирующий код ПСП) опорной станцией ОС_А и принимаемого сигнала $s_B(t - \tau_p, d_{i_n})$ (d_{i_n} – модулирующий код d_i ПСП с n циклическим сдвигом) от опорной станции ОС_В. Величина задержки τ_p распространения ЭМВ на трассе АВ определяется скоростью v_{AB} распространения поверхностной электромагнитной волны в свободном пространстве [11] и выбранным расстоянием r_{AB} между опорными станциями. В данном случае, кодовое разделение предполагает вычисление значения взаимной корреляции сигналов $s_A(t, d_i)$ и $s_B(t - \tau_p, d_{i_n})$. Как выше было показано, второй сигнал отличается от первого модулирующим кодом, соответствующему циклическому сдвигу на n двоичных символов и тогда необходимо вычислить значение автокорреляции сигналов $s_A(t, d_i)$ и $s_B(t - \tau_p, d_{i_n})$ при их относительной задержке $\tau = \tau_p + n\tau_3$ (τ_3 – длительность символа в коде ПСП). Необходимо также учесть использование дополнительной кодовой ФМ на указанные сигналы. По формулам [12] для МЧМ-сигнала с модулирующим M -кодом ПСП длины $L = 2^{14} - 1 = 16383$ и с дополнительной ФМ получен график модуля нормированной периодической ($T = L\tau_3$ – период) автокорреляционной функции (ПАКФ) от относительного числа задержки k ($k = \tau / \tau_3$) – целое число сдвигов на длительность символов ПСП). На рис. 2 представлен график сегмента (с целью получения высокого разрешения) модуля нормированной ПАКФ при ФМ на интервале [5308, 5476] числа сдвигов. Как видно из рис. 2, при задержке $5398\tau_3$ возможно минимальное значение $-1/L \approx 10^{-4}$. Если опорные станции удалены друг от друга на расстояние $r_{AB} = 300$ км, то при этом задержка распространения сигнала составит $\tau_p \approx 1$ мс (используя скорость $v_{AB} \approx 3 \cdot 10^8$ м/с, совершаем ошибку порядка 0,1 %) и при $\tau_3 = 2,5 \cdot 10^{-6}$ с будет соответствовать задержке $k_3 = r_{AB} / (v_{AB}\tau_3)$ на 400 двоичных символов ПСП. Согласно рис. 2, чтобы обеспечить минимальное значение модуля нормированной ПАКФ (для $k = 5398$), необходимо использовать модулирующий код ПСП опорной станции ОС_В с циклическим сдвигом на $n_B = 4998 = 5398 - 400$ символов. Можно сказать, что сигналы $s_A(t, d_i)$ и $s_B(t - \tau_p, d_{i_n})$ в пункте их обработки (а также в точках, принадлежащих поверхности круга, радиусом $\tau_3 v_{AB} / 2 \approx 350$ м, с центром расположения приёмно-излучающей антенны) будут существенно разделены, что эквивалентно обеспечению дополнительной развязки антенн не более -42 дБ $\approx 10 \lg(1/L)$.

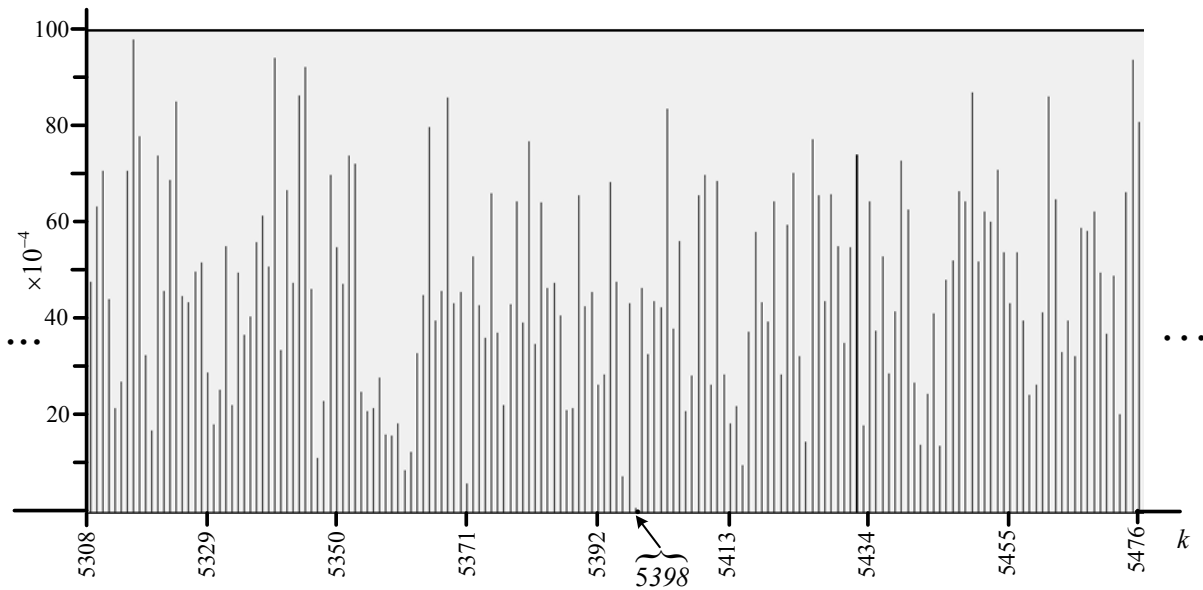


Рис. 2. Фрагмент модуля нормированной ПАКФ для МЧМ сигналов с дополнительной ФМ

Fig. 2. Fragment of the normalized PACF module for MSK signals with additional FM

На рис. 3 изображены временные диаграммы, соответствующие моментам приёма и излучения сигналов РНС при действующих шкалах времени (ШВ*). Шкала времени каждой из ОС представляет собой непрерывную последовательность интервалов, равных длительности $L\tau$, сигнала, отсчитываемых от начала момента $t=0$ времени. Шкалы времени, у которых на любом интервале длительности сигнала начальные фазы и комплексные огибающие сигналов совпадают с требуемой точностью, называются синхронными [2] и в течение измерения навигационных параметров необходимо поддерживать эту синхронность. В нашем случае в моменты времени t_A , t_B и t_C опорные станции $ОС_A$, $ОС_B$ и $ОС_C$ излучают радиосигналы относительно собственных шкал времени (ШВ_A, ШВ_B, ШВ_C) и моменты t_* времени не равны нулю. Это обусловлено тем, что в инерционных цепях формирования высокочастотного сигнала возникает групповое запаздывание, что приводит к отставанию момента излучения «заданной» фазы модулирующего кода относительно момента его формирования в генераторе кода и, соответственно, к отличию действительного момента излучения относительно того, которое передаётся в навигационном сообщении [13]. В связи с идентичностью исполнения формирователей радиосигналов, это время для всех ОС одинаково, т. е. $t_A = t_B = t_C$ относительно собственных шкал времени (ШВ_A, ШВ_B и ШВ_C).

Относительно шкалы времени ШВ_A опорной станции $ОС_A$ определяются моменты $t_{A'B}$ и $t_{A'C}$ времени прихода сигналов, излучённых опорными станциями $ОС_B$ и $ОС_C$ в моменты времени t_B и t_C относительно собственных шкал времени ШВ_B и ШВ_C [9]. Относительно шкалы времени ШВ_B опорной станции $ОС_B$ определяется момент времени $t_{B'A}$ прихода сигнала, излучённого опорной станцией $ОС_A$ в момент времени t_A относительно собственной шкалы времени ШВ_A. Относительно шкалы времени ШВ_C опорной станции $ОС_C$ определяется момент времени $t_{C'A}$ прихода сигнала, излучённого опорной станцией $ОС_A$ в момент времени t_A относительно собственной шкалы времени ШВ_A. Относительно шкалы времени ШВ_M бортовой станции БС определяются моменты времени t_{MA} , t_{MC} и t_{MB} прихода сигналов, излучённых опорными станциями $ОС_A$, $ОС_C$ и $ОС_B$ в моменты времени t_A , t_C и t_B относительно собственных шкал времени ШВ_A, ШВ_C и ШВ_B.

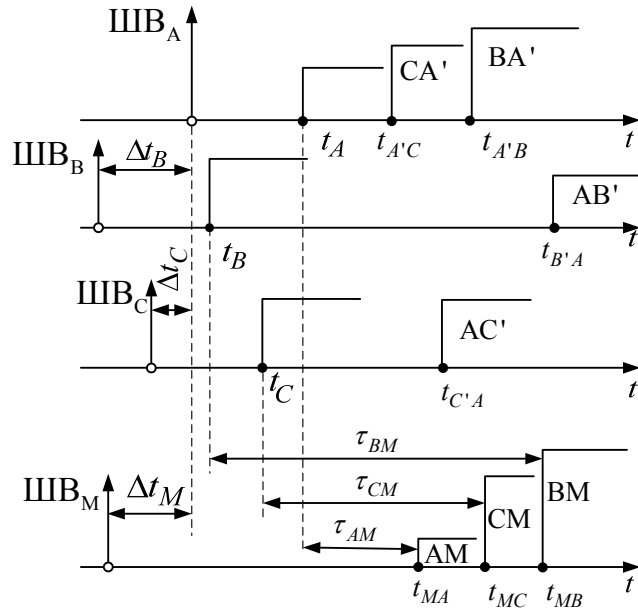


Рис. 3. Временные диаграммы приёма и передачи сигналов РНС

Fig. 3. Time diagrams of reception and transmission of RNS signals

Время $\tau_{AB'}$ распространения сигнала от пункта A к точке B' определяется как $\tau_{AB'} = r_{AB'} / v_{AB'}$ (здесь $r_{AB'}$ – географическое расстояние между опорными станциями $ОС_A$ и $ОС_B$, известное с геодезической точностью; $v_{AB'}$ – скорость распространения электромагнитной волны (ЭМВ) на трассе AB'). В наземных РНС измерение навигационных параметров осуществляется посредством измерения задержки распространения поверхностной ЭМВ. В этом случае скорость $v_{AB'}$ распространения ЭМВ будет зависеть как от параметров окружающей среды (температуры, влажности, давления), так и параметров приповерхностного слоя участка распространения ЭМВ (диэлектрической и магнитной проницаемости, проводимости). Точно предсказать значения всех этих параметров в момент распространения поверхностной ЭМВ практически невозможно. Отсюда следует, что как бы точно мы не измеряли время $\tau_{AB'}$ [14], в нем всегда будет присутствовать случайная составляющая $\Delta\tau_{AB'}$, обусловленная непостоянством во времени параметров трассы распространения ЭМВ (при расчёте дальностей это приведёт к ошибке в связи с использованием расчётного значения скорости вместо фактически существующей скорости $v_{AB'}$). В соответствии с этим, измеренную задержку распространения ЭМВ на трассе AB' можно представить в виде суммы точного значения задержки $\hat{\tau}_{AB'}$ и ошибки $\Delta\tau_{AB'}$ в форме $\tau_{AB'} = \hat{\tau}_{AB'} + \Delta\tau_{AB'}$.

С учётом выше сказанного для времени распространения сигнала на трассе BA' задержку на трассе BA' можно представить в виде суммы точного значения задержки $\hat{\tau}_{BA'}$ и ошибки $\Delta\tau_{BA'}$ в форме $\tau_{BA'} = \hat{\tau}_{BA'} + \Delta\tau_{BA'}$.

По шкале времени $ШВ_B$ (рис. 3) относительно момента времени t_B можно измерить псевдозадержку [9] распространения сигнала на трассе AB' как

$$\tau_B^* = t_{AB'} - t_B + \Delta\tau_{AB'} = \hat{\tau}_B + \Delta\tau_{AB'}, \quad (1)$$

где $\hat{\tau}_B$ – точное значение измеренной псевдозадержки согласно $ШВ_B$. В измеренной псевдозадержке τ_B^* также будет присутствовать случайная составляющая $\Delta\tau_{AB'}$, обусловленная выше-

указанными причинами. На сегодня выделенный временной интервал $[t_B, t_{AB'}]$ можно измерить с точностью до 0,05 нс [15].

На опорной станции ОС_В, при аппаратурной обработке сигнала, излученного с ОС_А, погрешность вычисленного значения псевдозадержки τ_B^* при известном моменте t_B будет определяться среднеквадратической ошибкой (СКО) σ_{τ_B} слежения за временем в следящей системе ОС_В. В установившемся режиме СКО будет определяться $\sigma_{\tau_B}^2 = 1 / (\omega_s^2 q^2)$ [13], где $q^2 = 30$ дБ – отношение сигнал/ шум в полосе Δf_c сигнала, действующего на входе приёмника ОС_В (ОС_А разнесена в пространстве от ОС_В на 300 км и $\Delta f_c = 0,78 f_T$); $\omega_s = 2\pi f_s$ – эффективная (среднеквадратическая) ширина спектра комплексной огибающей ПС сигнала МЧМ ($\Delta f_s = 0,19 f_T \approx 76$ кГц [12] при тактовой частоте $f_T = 0,4$ МГц). Отсюда СКО слежения за задержкой в следящей системе за временем составит не более 6,5 нс. Так как опорные станции статически устойчивые, то для k измеренных выделенных временных интервалов можно использовать *плавающее* усреднение. Измеритель временных интервалов [15] позволяет производить измерения с периодом не менее 1 мкс. В нашем случае используется сигнал, длительностью $T = L\tau_s \approx 40$ мс. При использовании $k = 100$ усреднений, СКО слежения за временем составит $\tilde{\sigma}_{\tau_B} = 6,5 / \sqrt{k} \approx 0,65$ нс.

При приёме в точке A' в момент времени $t_{A'B}$ шкалы времени ШВ_А сигнала, излученного от пункта B в момент времени t_B шкалы времени ШВ_В, по шкале времени ШВ_А (рис. 3) можно определить псевдозадержку распространения сигнала на трассе BA' как

$$\tau_{AB}^* = t_{BA'} - t_A + \Delta\tau_{BA'} = \hat{\tau}_{BA'} + \Delta\tau_{BA'}, \quad (2)$$

где $\hat{\tau}_{BA'}$ – точное значение измеренной псевдозадержки согласно ШВ_А. В этой измеренной псевдозадержке также будет присутствовать случайная составляющая $\Delta\tau_{BA'}$, обусловленная вышеуказанными причинами.

Здесь погрешность вычисления τ_{AB}^* также будет определяться СКО σ_A слежения за временем в следящей системе ОС_А и которая составит также не более 0,65 нс (в связи с идентичностью параметров следящей системы за временем на ОС_А и для $k = 100$ усреднений).

Расхождение ШВ_В относительно ШВ_А составит

$$\Delta t_B = [\bar{\tau}_B^* - \bar{\tau}_{AB}^*] / 2 = [\bar{\tau}_B + \Delta\tau_{AB'} - (\bar{\tau}_{AB} + \Delta\tau_{BA'})] / 2 \cong (\bar{\tau}_B - \bar{\tau}_{AB}) / 2. \quad (3)$$

Здесь в Δt_B совместное воздействие случайных составляющих будет минимально, так как за время измерения (не более 0,1 с) псевдозадержек параметры трасс AB' и BA' распространения ЭМВ практически остаются неизменными. Тогда можно сказать, что расхождение шкал времени будет определяться равноточными значениями измеренных псевдозадержек. Погрешность вычисления Δt_B , определяемая погрешностью разности измеренных временных интервалов с равной СКО, составит $\sigma_{\text{рш}} = \sqrt{2}\sigma_{\tau_B} \approx 0,92$ нс.

Аналогичные вычисления псевдозадержек τ_C^* и τ_{AC}^* можно получить для трасс AC' и CA' распространения ЭМВ (рис. 1) и тогда расхождение ШВ_С относительно ШВ_А составит

$$\Delta t_C = [\bar{\tau}_C^* - \bar{\tau}_{AC}^*] / 2 = [\bar{\tau}_C + \Delta\tau_{AC'} - (\bar{\tau}_{AC} + \Delta\tau_{CA'})] / 2 \cong (\bar{\tau}_C - \bar{\tau}_{AC}) / 2, \quad (4)$$

где $\bar{\tau}_C^* = \bar{\tau}_C + \Delta\tau_{AC'}$ – усреднённая псевдозадержка распространения сигнала на трассе AC' , измеренная относительно шкалы времени ШВ_С; $\bar{\tau}_{AC}^* = t_{CA'} - t_A + \Delta\tau_{CA'}$ – усреднённая псевдоза-

держка распространения сигнала на трассе CA' , измеренная относительно шкалы времени ШВ_А (рис. 3).

Погрешность вычисления Δt_C , определяемая разностью измеренных временных интервалов с равной СКО, составит также $\sigma_{рш} \sqrt{2} \sigma_{\tau C} \approx 0,92$ нс (в связи с идентичностью параметров следящей системы за временем на ОС_С с ОС_А).

Согласно рис. 3, ШВ_А «отстаёт» от ШВ_В и ШВ_С и расхождение шкал времени Δt_B и Δt_C имеет положительный знак, при «опережении» шкалы времени ШВ_А расхождение шкал времени Δt_* будет иметь отрицательный знак. Если для вычисленного значения расхождения шкалы времени будет выполняться условие $|\Delta t_*| < \tau_3$, то посредством кодирования значения Δt_* и дополнительной фазовой манипуляции производится передача кодированной информации (о поправке к ШВ*) бортовой станции. Если для вычисленного значения расхождения шкалы времени будет выполняться условие $|\Delta t_*| \geq k\tau_3$ (здесь k – целое число), то сначала производится коррекция моментов формирования модулирующего кода ПСП. В этом случае, при $\Delta t_* < 0$ производится циклический сдвиг модулирующего кода ПСП на k циклов «влево», при $\Delta t_* > 0$ производится циклический сдвиг модулирующего кода ПСП на k циклов «вправо». После этого, посредством кодирования разности $|\Delta t_*| - k\tau_3$ (знак разности соответствует знаку Δt_*) и дополнительной фазовой манипуляции, производится передача кодированной информации (об откорректированной поправке к ШВ*) бортовой станции. В общем, передача информации (о поправках к ШВ*) бортовой станции может быть осуществлена в виде резервных сообщений стандарта передачи дифференциальных поправок RTCM SC-104 [16].

Что касается системной шкалы времени ШВ_М, то здесь также необходимо проводить коррекцию вычисленного значения Δt_M (как будет показано ниже) расхождения ШВ_М (рис. 3) только в случае, если для вычисленного значения расхождения шкалы времени Δt_M будет выполняться условие $|\Delta t_M| \geq k\tau_3$ (здесь k – целое число). Здесь производится коррекция моментов формирования модулирующего кода ПСП для опорных сигналов систем слежения за фазой и временем на БС. В этом случае при $\Delta t_M < 0$ производится циклический сдвиг модулирующего кода ПСП на k циклов «влево», при $\Delta t_M > 0$ производится циклический сдвиг модулирующего кода ПСП на k циклов «вправо».

Для поддержания допустимой погрешности синхронизации требуется периодическое проведение коррекции ШВ. Определим допустимый интервал времени между двумя последовательными во времени коррекциями ШВ. Пусть с момента времени, когда синхронизация временных шкал опорных станций осуществлена идеально (расхождение шкал времени отсутствует), задающими генераторами опорных станций в течение времени Δt порождается совместный частотный сдвиг Δf опорных частот f (здесь f – номинальные значения частот) задающих генераторов опорных станций. Сообразно с этим частотный сдвиг Δf приведёт к ошибке Δr измерения дальности, которая будет обусловлена ошибкой измерения времени $\Delta \tau = \Delta r / c$ (c – скорость распространения ЭМВ [14]). Тогда частотный сдвиг Δf можно представить как доплеровский сдвиг по частоте $\Delta f = \Delta f_{\text{доп}} = f v / c$, обусловленный скоростью $v = \Delta r / \Delta t$ изменения ошибки Δr измерения дальности. Таким образом, можно сказать, что за время Δt наблюдения частотный сдвиг Δf порождает расхождение $\Delta \tau$ шкал времени, и записать $\Delta f = f \Delta \tau / \Delta t$. Таким образом, допустимый межкоррекционный интервал для расхождения $\Delta \tau$ шкал времени будет определяться выражением

$$\Delta t = \Delta \tau / (\Delta f / f). \quad (5)$$

Допустимая погрешность синхронизации ШВ ($\Delta\tau = 0,92$ нс) обуславливает погрешность измерения расстояния $\Delta d < 0,3$ м. При использовании на опорных станциях рубидиевых стандартов частоты FE5650A с относительной нестабильностью частоты $\Delta f / f = 10^{-12}$, значение требуемого периода Δt коррекции ШВ составит $(0,92 \cdot 10^{-9} / 10^{-12} = 0,2 \cdot 10^3$ с) не более 15 мин. Этого времени достаточно, чтобы обеспечить передачу информации о поправках к ШВ бортовой станции с минимальной вероятностью ошибок (не более $1 \cdot 10^{-5}$), что обеспечит допустимую погрешность синхронизации шкал времени навигационной системы.

Алгоритм вычисления координат БС

Координаты расположения БС (рис. 1, пункт М) можно определить путем решения системы трех уравнений для квазидальностей, отличающихся от геометрических дальностей (d_{AM} , d_{BM} и d_{CM} , рис. 1) на величину, пропорциональную расхождению шкал времени (Δt_B и Δt_C) и системной шкалы времени (Δt_M , рис. 3) при скоростях (v_{AM} , v_{BM} и v_{CM}) распространения сигналов, которые могут быть определены по метеопараметрам [14], соответствующим трассам (AM , BM и CM) распространения сигналов, в форме

$$\begin{aligned} v_{AM}\tau_{AM} &= \sqrt{(x_A - x_M)^2 + (y_A - y_M)^2} + v_{AM}\Delta t_M, \\ v_{BM}(\tau_{BM} + \Delta t_B) &= \sqrt{(x_B - x_M)^2 + (y_B - y_M)^2} + v_{BM}\Delta t_M, \\ v_{CM}(\tau_{CM} + \Delta t_C) &= \sqrt{(x_C - x_M)^2 + (y_C - y_M)^2} + v_{CM}\Delta t_M, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\tau_{AM} = t_{MA} - t_A$ – псевдозадержка распространения сигнала на трассе AM , измеренная по шкале времени ШВ_М; $\tau_{BM} = t_{MB} - t_B$ – псевдозадержка распространения сигнала на трассе BM , измеренная по шкале времени ШВ_М; $\tau_{CM} = t_{MC} - t_C$ – псевдозадержка распространения сигнала на трассе CM , измеренная по шкале времени ШВ_М; Δt_M – расхождение системной шкалы времени ШВ_М относительно шкалы времени ШВ_А опорной станции ОС_А – искомое значение.

Приведенная система уравнений (6) содержит три уравнения с тремя неизвестными x_M , y_M , Δt_M и может быть разрешена на практике, например, при помощи итерационного метода Ньютона [1]. Точность полученного решения будет определяться погрешностью измеренных значений псевдозадержек (τ_{AM} , τ_{BM} и τ_{CM}). Погрешность измеренных значений псевдозадержек будет определяться СКО слежения за временем принимаемых сигналов в приёмнике бортовой станции. СКО слежения за временем в когерентной системе слежения за временем определяется по формуле [17] $\sigma_\tau = 1 / (2\pi f_c q) \approx 8$ нс (на предельной дальности 600 км относительно опорной станции отношение Сигнал/Шум в полосе информационного символа составляет $q^2 = 10$ дБ и центральная частота ПС сигнала с МЧМ $f_c = 2$ МГц). С учётом СКО синхронизации ШВ (<1 нс), максимальная СКО σ_M измерения псевдозадержки t_{*M} составит не более 10 нс. Это позволяет реализовать измерение РНП (дальности при удалении БС от опорной станции на 600 км) временным методом в автономной наземной РНС с точностью не хуже 3 м.

Заключение

Таким образом, предложенный в данной статье метод измерения местоопределения бортовой станции при известной несинхронности излучений сигналов опорных станций позволяет решать задачу определения местоположения бортовой станции без необходимости задания единой системной шкалы времени РНС. При этом путем приема цифровой информации от каждой из ведомых опорных станций, несущих наряду со служебной информацией информацию о поправках к шкалам времени тех же опорных станций, аппаратурой бортовой станции

производится компенсация погрешностей, обусловленных несинхронностью излучения сигналов опорных станций РНС. Предложенный метод уменьшения погрешности определения координат бортовой станции и повышения метрологических характеристик РНС в целом могут найти применение в современных наземных РНС с широкополосными сигналами.

Библиографические ссылки

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцевич и др. / под ред. В. С. Шебшаевича. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1993. 408 с.
2. Радионавигационные системы сверхдлинноволнового диапазона / С. Б. Болошин и др. М. : Радио и связь, 1985. 263 с.
3. Nard G. Geoloc: Spread spectrum concept applied in new accurate medium-long range radio-positioning system. Sercel, France, 1984.
4. Syledis network design. Sercel, France, 1985.
5. Демьянов В. В. Особенности функционирования спутниковых РНС в неблагоприятных гелио-географических условиях. Иркутск : ИрГУИС, 2010. 212 с.
6. Информационные технологии в радиотехнических системах / В. А. Васин, И. Б. Власов, Ю. М. Егоров и др. / под ред. И. Б. Фёдорова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 768 с.
7. Методы модуляции и приёма цифровых частотно-манипулированных сигналов с непрерывной фазой / В. Б. Крохин, В. Ю. Беляев, А. В. Гореликов и др. // Зарубеж. Радиоэлектроника. 1982. № 4. С. 58–72.
8. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. М. : Техносфера, 2007. 487 с.
9. Цифровые радиоприёмные системы / М. И. Жодзишский, Р. Б. Мазепа и др. М. : Радио и связь, 1990. 208 с.
10. Лавров Г. А. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. М. : Связь, 1975. 130 с.
11. Кинкулькин И. Е., Рубцов В. Д., Фабрик М. А. Фазовый метод определения координат. М. : Сов. Радио, 1979. 280 с.
12. Simon M. K. The autocorrelation function and power spectrum of PCM/FM with random binary modulating waveforms // IEEE Trans. 1976. Vol. COM-24, No. 10. P. 1576–1584.
13. Перов А. И. Основы построения спутниковых радионавигационных систем. М. : Радиотехника, 2012. 240 с.
14. Агафонников А. М. Фазовые радиогеодезические системы для морских исследований. М. : Наука, 1979. 164 с.
15. TDC – GP2 Universal 2 Channel Time – to – Digital Converter.
16. RTCM Recommended Standards For Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service. Future Version 2.2. Future successor to RTCM recommended standards for differential NAVSTAR GPS Service Version 2.1 // RTCM Special Committee. 1996. No. 104.
17. Радиотехнические системы / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др. / под ред. Ю. М. Казаринов. М. : Высш. шк., 1990. 496 с.

References

1. Shebshaevich V. S., Dmitriev P. P., Ivantsevich N. V. et al. *Setevye sputnikovye radio navigatsionnye sistemy* [Network satellite radio navigation systems]. Ed. by V. S. Shebshaevich. 2nd ed., reprint. and extra. Moscow, Radio and communication, 1993, 408 p.
2. Bolothin S. B., Semenov G. A., Guzman A. S. *Radio navigatsionnye sistemy sverkhdlinnovogo diapazona* [Radionavigation system of superlong waves range]. Moscow, Radio and communication, 1985.

3. Nard G. Geoloc: Spread spectrum concept applied in new accurate medium-long range radio-positioning system. Sercel, France, 1984.
4. Syledis network design. Sercel, France, 1985.
5. Demyanov V. V. *Osobnosti funkcionirovaniya sputnikovih RNS v neblagopriyatnih helio-geograficheskikh usloviyakh* [Features of the functioning of satellite RNS in unfavorable helio-geographical conditions]. Irkutsk, IrGUIS Publ., 2010, 212 p.
6. Vasin V. A., Vlasov I. B., Egorov Yu. M. et al. *Informazionye tekhnologiyi v radiotekhnicheskikh sistemah* [Information technologies in radio engineering systems]. Ed. by I. B. Fedorov. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2004, 768 p.
7. Krokhin V. B., Belyaev V. Yu., Gorelikov A. V. et al. [Methods of modulation and reception of digital frequency-manipulated signals with continuous phase]. *Abroad. Radio electronics*. 1982, No. 4, P. 58–72 (In Russ.).
8. Ipatov V. P. *Shirokopolosnye sistemy i kodovoe razdelenie signalov* [Broadband systems and code separation of signals]. Moscow, Technosphere Publ., 2007, 487 p.
9. Zhodzishsky M. I., Mazepa R. B. et al. *Zyfpovye radiopriemnye sistemy* [Digital radio receiving systems]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1990, 208 p.
10. Lavrov G. A. *Vzaimnoe vliyanie vibratornykh anten* [Mutual influence of linear vibratory antennas]. Moscow, Svyaz Publ., 1975, 130 p.
11. Kinkulkin I. E., Rubtsov V. D., Fabrik M. A. *Phazovyi metod opredeleniya kordinat* [Phase method of determining coordinates]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1979, 280 p.
12. Simon M. K. The autocorrelation function and power spectrum of PCM/FM with random binary modulating waveforms. *IEEE Trans.* 1976, Vol. COM-24, No. 10, P. 1576–1584.
13. Perov A. I. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem* [Statistical theory of radio engineering systems]. Moscow, Radio Engineering Publ., 2003, 400 p.
14. Agafonnikov A. M. *Phazovye radiogeodezicheskie sistemy dlya morskikh issledovaniy* [Phase radio-geodesic systems for marine research]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 164 p.
15. TDC – GP2 Universal 2 Channel Time – to – Digital Converter.
16. RTCM Recommended Standards For Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service. Future Version 2.2. Future successor to RTCM recommended standards for differential NAVSTAR GPS Service Version 2.1 // RTCM Special Committee. 1996. No. 104.
17. Grishin Yu. P., Ipatov V. P., Kazarinov Yu. M. et al. *Radio engineering systems* [Radio engineering systems]. Ed. by Yu. M. Kazarinov. Moscow, Higher School, 1990, 496 p.

© Мусонов В. М., Романов А. П., 2022

Мусонов Владимир Михайлович – кандидат технических наук, профессор кафедры ПНК; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sen@sibsau.ru.

Романов Александр Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры РЭС, институт ИФ и РЭ; Сибирский федеральный университет. E-mail: offic@sfu-krus.ru.

Musonov Vladimir Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences, Professor of the APG Department; Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev. E-mail: sen@sibsau.ru.

Romanov Alexander Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Docent of the RES Department, Institute of IF and RE; Siberian Federal University. E-mail: offic@sfu-krus.ru.
