

УДК 621.396.96

Синхронизация передающих устройств распределенных радиотехнических систем навигации и посадки летательного аппарата

Кишко Д.В.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: dvkishko@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрен алгоритм синхронизации передатчиков пространственно-разнесенных модулей псевдоспутниковых радионавигационных систем посадки летательного аппарата. Предлагаемый алгоритм исключает процедуры калибровки приемо-передающих трактов модулей, относится к двухсторонним методам синхронизации и позволяет осуществлять синхронизацию передатчиков одновременно с реализацией целевой функции системы. Показано, что ошибка синхронизации пространственно-разнесенных модулей зависит от точности оценки измерений параметров радиосигналов каждого модуля, а также от точности определения расстояний между фазовыми центрами антенн приемо-передающих модулей. Предлагаемый алгоритм обеспечивает среднеквадратическую ошибку синхронизации пространственно-разнесенных порядка 0.01-0.06 нс.

Ключевые слова: синхронизация, фазовая привязка, сличение шкал времени, пространственно-разнесенные системы, псевдоспутниковые системы.

Принципы синхронизации в пространственно-разнесенных радиосистемах

К пространственно-разнесенным радиосистемам относят спутниковые радионавигационные системы (СРНС), радиосистемы дальней навигации (LORAN-C, OMEGA), бурно развивающиеся в последнее время псевдоспутниковые радионавигационные системы (Locata, DeckFinder), многопозиционные радиолокационные системы (MLAT) и т.д. Аппаратура потребителя данных систем определяет собственное положение (радионавигационные системы) или положение объекта (радиолокационные системы) на основе оценки параметров радиосигналов излученных от пространственно-разнесенных модулей (космических аппаратов, наземных радиолокационных станций, ретрансляторов, псевдоспутников). Для обеспечения функционирования таких систем радиосигналы, излучаемые модулями должны быть когерентны и соответственно начальные фазы излучаемых радиосигналов от модулей должны быть функционально взаимосвязаны. Согласно [1], если рассматривать пространственно-разнесенные модули, как набор собственных и канальных часов, то задача обеспечения когерентности сводится к сведению шкал времени собственных часов модулей к единой системной шкале времени. Данная задача в литературе называется задачей фазовой привязки или синхронизации пространственно-разнесенных модулей [2].

Для синхронизации модулей используют различные методы передачи сигнала синхронизации, которые делятся на односторонние и двусторонние [2]. Сигнал синхронизации представляет собой радиосигнал, параметры (к примеру, фаза несущего колебания) которого жестко связаны с системной шкалой времени. В односторонних методах сигнал синхронизации передается в направлении от часов с системной шкалой времени (базовый модуль) к часам, шкалу времени которой приводят к системной (привязываемый модуль). К таким методам прежде всего относят синхронизацию с помощью СРНС. В двусторонних методах используют не только прямое направление передачи, но и обратное. В результате оценки расхождения шкал времени на двух модулях (на базовом и привязываемом) удается повысить точностью синхронизации по сравнению с односторонними методами.

Среднеквадратическая погрешность синхронизации в односторонних методах синхронизации достигает порядка 1-50 нс, в двусторонних - порядка 0.001-2 нс [3].

Основным фактором, влияющим на ошибку синхронизации в рассмотренных методах, является погрешность калибровки приемо-передающих трактов каждого модуля [2]. В данной работе рассматриваются методы синхронизации в псевдоспутниковых радионавигационных системах, в которых исключаются процедуры калибровки приемо-передающих трактов. Потенциальная точность синхронизации при использовании предложенных алгоритмов достигает порядка 0.01 нс. Рассматриваемый алгоритм может быть адаптирован для других пространственно-разнесенных систем.

Псевдоспутниковые пространственно-разнесенных радиосистемы и математические модели измерений сигналов

Общая структурная схема псевдоспутниковых пространственно-разнесенных радиосистем приведена на рисунке 1 и включают в себя два сегмента: системный и пользовательский.

Системный сегмент состоит из N модулей с известными координатами, каждый из которых в зависимости от вариантов построения радиосистемы может быть приемо-передающим (ППМ), только передающими (ПрдМ) или только приемными (ПрмМ). Также в состав системного сегмента входит подсистема управления и мониторинга (ПУМ), которая обеспечивает синхронизацию и контроль работы всей системы и имеет связь с каждым модулем, например, в соответствии с протоколом Ethernet. Системный сегмент может располагаться, например, на поверхности Земли или на палубе корабля. Он обеспечивает покрытие навигационным полем зоны обслуживания системы.

Пользовательский сегмент состоит из навигационной аппаратуры потребителя (НАП), являющейся N канальным приемником, в каждом канале которого производится поиск, захват и слежение за параметрами радиосигналов от передатчиков модулей.

Несущие гармонические колебания передатчика каждого модуля модулируются по фазе двоичной последовательностью, образованной суммированием по модулю два псевдошумового сигнала дальномерного кода (ПШС_j, j=1..N) с периодом T_c и импульсов цифрового двоичного сигнала навигационного сообщения длительностью τ , которая удовлетворяет условию $\tau = T_c$. Сигналы различных передатчиков отличаются структурой ПШС_j, которая выбирается из условия взаимной ортогональности любой пары ПШС_j.

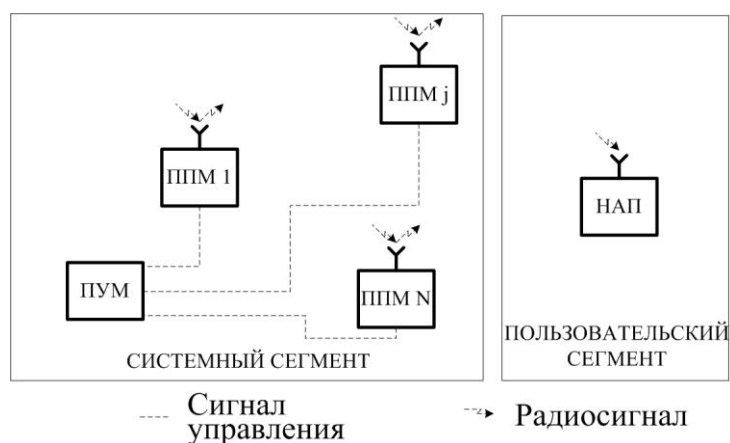


Рисунок 1. Общая структурная схема псевдоспутниковой пространственно-разнесенной радиосистемы с приемо-передающими модулями

На рисунке 2 приведен один из вариантов построения приемо-передающего модуля псевдоспутниковой системы. Каждый модуль содержит передатчик (ПРД), параметрами радиосигнала (частотой, начальной фазой и задержкой) которого можно управлять, а также блок управления, который обеспечивает выдачу команд управления в ПРД и результатов измерения в ПУМ по каждому из каналов приема. Рассматриваемый модуль содержит $N-1$ каналный приемник. Каждый канал приема включает в себя петли поиска, захвата и слежения за параметрами радиосигналов от каждого из модулей, которые структурно входят в систему фазовой автоподстройки частоты (ФАП) и систему слежения за задержкой сигнала (ССЗ). Принципы построения данных систем детально описаны в [4], и в данной работе не рассматриваются.

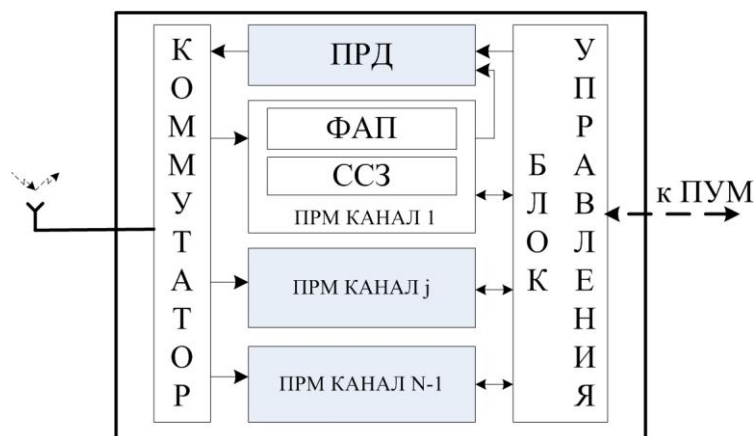


Рисунок 2. Структура приемо-передающего модуля

Коммутатор производит переключение модуля с приема на передачу и обратно. Излучение каждого модуля производится в строго определенное время. Таким образом, в каждый момент времени работает на излучение только один модуль, а другие модули производят поиск, захват и слежение за параметрами радиосигнала от излучающего модуля.

Синхронизация пространственно-разнесенных модулей проводится циклически в три этапа.

На первом этапе каждый j -ый модуль подстраивает сигнал опорного генератора передатчика под сигнал, принятый от базового модуля, и производит коррекцию с учетом управляющего сигнала от ПУМ.

Радиосигнал с выхода передатчика базового модуля запишем в общепринятом виде

$$S^b = A^b(t + \tau_{tx}^b) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0^b + \varphi_{tx}^b) \quad (1)$$

где индекс b указывает принадлежность сигнала к базовому модулю; $A^b(t + \tau_{tx}^b)$ - модулирующая функция базового модуля; τ_{tx}^b - задержка модулирующего сигнала в передающем тракте базового модуля; f_0 - несущая частота радиосигнала базового модуля; φ_0^b - начальная фаза радиосигнала базового модуля; φ_{tx}^b - сдвиг фазы несущего колебания, вызванный аппаратурными задержками в передающем тракте базового модуля.

Тогда с учетом (1) и того, что каждый модуль производит подстройку под сигнал базового модуля, скорректированный радиосигнал с выхода передатчика j -го модуля можно представить в виде

$$S^j = A^j \left(t + \tau_{tx}^b + \frac{R^{b,j}}{c} + \frac{d_{mult}^{b,j} + d_{trop}^{b,j} + d_{rx}^j + d_{tx}^j}{c} - \tau_{ctrl}^j \right) \times \cos \left(2\pi f_0 t + \varphi_0^b + \varphi_{tx}^b + \frac{R^{b,j}}{\lambda} + \varphi_{mult}^{b,j} + \varphi_{trop}^{b,j} + \varphi_{rx}^j + \varphi_{tx}^j - \varphi_{ctrl}^j + 2\pi N_{\varphi}^j \right) \quad (2)$$

где $R^{b,j}$ - геометрическое расстояние между фазовыми центрами антенн базового и j -го модуля; $d_{mult}^{b,j}$ -смещение модулирующего сигнала, вызванное многолучевым распространением сигнала в направлении от базового модуля к j -ому модулю; $d_{trop}^{b,j}$ - тропосферные искажения модулирующего сигнала j -го модуля; d_{rx}^j, d_{tx}^j - искажения модулирующего сигнала соответственно в передающем и приемном трактах j -го модуля; τ_{ctrl}^j - задержка модулирующего сигнала вызванное управляющим воздействием от ПУМ; $\varphi_{mult}^{b,j}$ - смещение фазы несущего колебания, вызванное многолучевым распространением сигнала; $\varphi_{trop}^{b,j}$ - смещение фазы несущего колебания, вызванное распространением сигнала в тропосфере; $\varphi_{rx}^j, \varphi_{tx}^j$ -смещение фазы несущего колебания сигнала вызванное в приемном и передающим трактах j -го модуля; φ_{ctrl}^j - смещение фазы несущего колебания вызванное управляющим воздействием от ПУМ ; N_{φ}^j - неопределенное целое число, характеризующее неоднозначную природу фазы гармонического колебания; c - скорость света; λ - длина волны;

На втором этапе каждый модуль формирует измерения псевдодальности и псевдофазы по каждому каналу приема. Математические модели измерений псевдодальности и псевдофазы, с учетом (1)-(2) и согласно [1] описываются следующими выражениями

$$\rho^{i,j} = R^{i,j} + R^{b,j} + d_{\text{mult}}^{b,j} + d_{\text{trop}}^{b,j} + d_{\text{rx}}^j + d_{\text{tx}}^j - c\tau_{\text{ctrl}}^j + c\left(\tau_0^b + \tau_{\text{tx}}^b + \Delta T^i\right) + d_{\text{mult}}^{i,j} + d_{\text{trop}}^{i,j} + d_{\text{rx}}^i + \xi_{\rho}^{i,j}, \quad (3)$$

$$\varphi^{i,j} = \frac{R^{i,j} + R^{b,j}}{\lambda} + \varphi_{\text{mult}}^{b,j} + \varphi_{\text{trop}}^{b,j} + \varphi_{\text{rx}}^j + \varphi_{\text{tx}}^j - \varphi_{\text{ctrl}}^j + f\Delta T^i + \varphi_{\text{mult}}^{i,j} + \varphi_{\text{trop}}^{i,j} + \varphi_{\text{rx}}^i - \varphi_0^i + 2\pi N_{\varphi}^j + \xi_{\varphi}^{i,j}, \quad (4)$$

$i = 1..N_a, i \neq j$

где ΔT^i - смещение показаний часов НАП относительно показаний часов системы (базового модуля); $\xi_{\rho}^{i,j}$ - ошибки формирования псевдодальномерных измерений; $\xi_{\varphi}^{i,j}$ - ошибки формирования псевдофазовых измерений.

Компенсация влияния многолучевого распространения сигнала на измерения псевдодальности ($d_{\text{mult}}^{i,j}$) и псевдофазы ($\varphi_{\text{mult}}^{i,j}$) осуществляется разными способами, обзор которых достоин отдельного исследования и не рассматривается в данной работе. Далее искажения, вызванные многолучевым распространением сигналов, считаются скомпенсированными, а члены, характеризующие их и входящие в (2)-(4), считаются равными нулю.

Заметим, что при синхронизации периодического сигнала необходимо подстраиваться под фазу в пределах одного цикла колебаний, поэтому далее эффекты, связанные с неоднозначностью измерений полагаются скомпенсированными.

На третьем этапе производится совместная обработка измерений в ПУМ от каждого из модулей и оценка коррекции управляющих сигналов. Коррекция управляющих сигналов производится таким образом, чтобы сигнал с выхода передатчика j -го модуля (2) был близким к сигналу с выхода базового модуля (1). Степень близости (2) к (1) характеризуется ошибкой синхронизации.

Для вычисления оценки коррекции управляющих сигналов необходимо сформировать разностные измерения путем вычитания из измерений каждого канала приема измерения по базовому каналу согласно следующим выражениям

$$\Delta\rho^{i,j} = \rho^{i,j} - \rho^{i,b} = \Delta R^{i,j} + R^{b,j} + d_{\text{rx}}^j + d_{\text{tx}}^j - c\Delta\tau_{\text{ctrl}}^j + \Delta\xi_{\rho}^{i,j}, \quad (5)$$

$$\Delta\varphi^{i,j} = \varphi^{i,j} - \varphi^{i,b} = \frac{\Delta R^{i,j}}{\lambda} + \Delta\varphi_{\text{ctrl}}^j + \Delta\xi_{\varphi}^{i,j}, \quad (6)$$

$$\Delta R^{i,j} = R^{i,j} - R^{i,b}, \quad (7)$$

$$i = 1..N_a - 1, i \neq j$$

где $\Delta\xi_{\rho}^{i,j}$ и $\Delta\xi_{\varphi}^{i,j}$ - ошибки формирования разностных измерений псевдодальностей и псевдофаз соответственно.

Оценка коррекции управляющего сигнала по модулирующему сигналу $\Delta\tau_{\text{ctrl}}^j$ и по фазе опорного генератора $\Delta\varphi_{\text{ctrl}}^j$ вычисляются на основе (5) и (6) для j -го ($j \neq b$) модуля с использованием измерений i -ого ($i \neq j \neq b$) модуля путем формирования невязок измерений разности псевдодальности и псевдофазы согласно следующим выражениям

$$\Delta\tau_{\text{ctrl}}^j = \frac{\Delta\rho^{i,j} - \Delta R^{i,j}}{c} + \varepsilon_{\rho}^{i,j}, \quad (8)$$

$$\Delta\varphi_{\text{ctrl}}^j = \Delta\varphi^{i,j} - \frac{\Delta R^{i,j}}{\lambda} + \varepsilon_{\varphi}^{i,j}, \quad (9)$$

$$i = 1..N_a - 1, i \neq j$$

где $\varepsilon_{\rho}^{i,j}$, $\varepsilon_{\varphi}^{i,j}$ - ошибки формирования оценок коррекции управляющего сигнала по модулирующему сигналу и фазе несущего колебания.

Выражения (8) и (9) оцениваются $N-2$ раз для каждого модуля. Избыточность измерений позволяет производить статистическое оценивание коррекции управляющих сигналов, объединяя все доступные измерения и вычисляя математическое ожидание для каждой величины. Известно, что математическое ожидание случайной величины можно оценить как среднее арифметическое значений данной величины, таким образом, оценка коррекции управляющих сигналов определяется следующими выражениями

$$\tilde{\Delta\tau}^j = \frac{1}{N-2} \sum_i^{N-1} (\Delta\rho^{i,j} - \Delta R^{i,j}), \quad i \neq j \neq b \quad (10)$$

$$\tilde{\Delta\varphi}^j = \frac{1}{N-2} \sum_i^{N-1} \left(\Delta\varphi^{i,j} - \frac{\Delta R^{i,j}}{\lambda} \right), \quad i \neq j \neq b \quad (11)$$

Добавляя (10) и (11) к соответствующим управляющим сигналам, удается произвести синхронизацию пространственно-разнесенных модулей. Ошибка синхронизации в таком случае определяется ошибкой формирования разностей псевдодальностей и псевдофаз, а также ошибкой задания $\Delta R^{i,j}$ (7).

Системы ФАП позволяют производить оценку псевдофазы сигнала с погрешностью порядка 0.06 от цикла несущего колебания [1]. Системы ССЗ имеют шумовую ошибку определения псевдодальности большую, чем системы ФАП. Для уменьшения шумовой ошибки псевдодальности используют различные способы, наиболее простым из которых является накопление и выдача усредненной оценки. Далее остановимся на рассмотрении ошибки синхронизации по фазе несущего колебания, так как именно она характеризуется потенциальную точность применяемого алгоритма.

Оценка расстояния между модулями может осуществляться разными топографическими способами, так например, использование лазерных дальномеров позволяет определять расстояние со среднеквадратической погрешностью не хуже 2 мм.

В таблице 1 представлены зависимости СКО оценки псевдофазы (σ_φ), СКО оценки расстояния между модулями (σ_R) и СКО суммарной ошибки σ_Σ , характеризующая ошибку синхронизации, в зависимости от длины волны (частоты) несущего колебания, в предположении, что все ошибки являются независимыми.

Таблица 1. Зависимость СКО оценки псевдофазы сигнала, СКО оценки расстояния между модулями и суммарной ошибки синхронизации в зависимости от длины волны (частоты) несущего колебания

$\lambda(f_0)$, см (ГГц)	30 (1)	12 (2.5)	6 (5)	3 (10)
σ_φ , см	1.8	0.72	0.36	0.18
σ_R , см	0.2	0.2	0.2	0.2
$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_\varphi^2 + 2\sigma_R^2}$, см (нс)	1.8 (0,06)	0.8 (0,02)	0.5 (0,017)	0.34(0,01)

Из таблицы 1 видно, что максимальная ошибка синхронизации по фазе несущего колебания предложенного метода уменьшается по мере роста частоты сигнала и варьируется от 0,06 до 0,01 нс.

Выводы:

- 1) Представленный алгоритм синхронизации пространственно-разнесенных модулей относится к классу двухсторонних методов и обеспечивает максимальную точность синхронизации по фазе несущего колебания радиосигнала порядка 0.01 нс без использования процедур калибровки приемо-передающих трактов модулей;
- 2) Увеличение точности синхронизации производится за счет увеличения точности определения расстояний между модулями и увеличения точности измерений;
- 3) Фазовая привязка пространственно-разнесенных модулей осуществляется за счет коррекции сигналов управления, не требует введения специальных режимов работы системы и осуществляется параллельно с обеспечением целевой функции системы. Таким образом, обеспечивается возможность уменьшения шумовой ошибки оценки измерений параметров радиосигналов за счет различных алгоритмов фильтрации, влияние которых является отдельной темой исследования.

Библиографический список

1. Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы. Время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. – М.: Радиотехника, 2008, - 328с.
2. Крючков И.В., Филатов А.А. Синхронизация подвижных модулей распределенных радиолокационных комплексов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. – №8: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/316.html>
3. Remote Atomic Clock Synchronization via Satellites and Optical Fibers / D. Piester, M. Rost, M. Fujieda et al. // Adv. Radio Sci. – 2011. – Vol. 9. – P. 1–7.
4. Борискин А.Д., Вейцель А.В., Вейцель В.А., Жодзишский М.И., Милютин Д.С. / Под ред. Жодзишского М.И. Аппаратура высокоточного

позиционирования по сигналам глобальных навигационных систем:
приемники-потребители навигационной информации – М.: МАИ-ПРИНТ,
2010, 292 с.