2. Библиотека математических таблиц / под ред. А. С. Барк; ВЦ АН СССР. — М., 1970. — Т. II: Таблицы вероятности функций.

3. *Красников В. В.* Особенности использования модели закона Максвелла при расчете дальности и зон действия речных АИС / В. В. Красников, Ю. В. Петухов, А. А. Сикарев // Информост. Радиоэлектроника и коммуникации. — М., 2006. — Вып. 4 (46).

УДК 59.03.05

Г. Н. Ульянов,
д-р техн. наук, профессор,
Михайловская военная артиллерийская академия;

С. В. Колесниченко,
канд. техн. наук, доцент,
СПГУВК;

С. А. Иванов,
канд. техн. наук,
Михайловская военная артиллерийская академия

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

DEVELOPMENT OF RELATIVE NAVIGATION SYSTEMS

В статье излагаются некоторые вопросы по развитию и совершенствованию систем локальной (относительной) навигации применительно к решению актуальных задач современными и перспективными потребителями.

The article reflects some main problems of substantiation and working out systems of navigation and time securing for high-dynamic object. The authors propose conceptual, circuit, technical and constructive solutions to increase the possibilities of the control systems by means of using the factors of alternative navigational systems.

Ключевые слова: радионавигационные системы, система управления высокодинамичным объектом, комплексирование, альтернативные навигационные системы, точность определения параметров.

Key words: radionavigation systems, control system of high-dynamic object, complexation, alternative navigational systems, accuracy of parameterization.

РАДИОСИСТЕМЫ дальней навигации (дальномерные, квазидальномерные, разностно-дальномерные) представляют собой многопозиционные системы, основу которых составляет сеть опорных станций, размещенных в точках с известными координатами. Суть процедуры, реализуемой при дальномерном методе, заключается в следующем. Опорные станции в моменты времени t_{o_i} излучают навигационные сигналы, по которым потребитель, имеющий только приемную аппаратуру и устройства обработки сигналов, находит свое местоположение. При этом он использует собственный эталон времени, с помощью которого измеряется время прихода от опорной станции навигационного сигнала. Моменты времени излучения t_{o_i} и приема синхронизированы со шкалой Всемирного координированного времени [1; 2].

В случае расхождения временных шкал системы опорных станций и потребителя используют квазидальномерный метод определения местоположения.

Квазидальномерный метод реализован в отечественной глобальной навигационной спутниковой системе «ГЛОНАСС» и в американской “NAVSTAR”. При этом, кроме координат, необходимо определить и величи-

ну временно́го расхождения шкалы системы опорных станций (искусственных спутников Земли) и шкалы потребителя. Число уравнений, решаемых вычислительным устройством потребителя, увеличивается на единицу по сравнению с дальномерным методом.

Таким образом, дальномерный метод определения местоположения потребителя информации исходит из того, что на каждой опорной станции и на потребителе имеются высокостабильные эталоны времени.

Для квазидальномерного метода необходимо лишь на каждой опорной станции иметь высокостабильный эталон времени.

В случае, когда потребителю информации требуется определить только свои координаты и не требуется определения составляющих скорости, в системе «ГЛОНАСС» (“NAVSTAR”) основными задачами, решаемыми аппаратурой потребителя, являются [3]:

— выбор рабочего созвездия искусственных спутников Земли (ИСЗ);

— введение в синхронизм систем слежения по времени запаздывания;

— измерение времени запаздывания;

— выделение и расшифровка информационного сообщения;

— расчет координат ИСЗ на момент навигационных измерений;

— определение координат и поправки к сдвигу шкал времени;

— отображение вычисленных данных на табло.

При выполнении перечисленных задач координаты потребителя могут быть определены с интервалом не менее 5…10 с.

Величина такого интервала является достаточно большой и порой неприемлемой для решения таких важных задач, как определение и корректировка параметров движения высокоскоростных высокоманевренных объектов.

Следует также учитывать, что в периоды «конфликтных ситуаций» на безпомеховое воздействие на систему «ГЛОНАСС» вряд ли приходится рассчитывать.

В известных разностно-дальномерных системах навигации (определения координат местоположения потребителя информации) реализованы фазовые методы, при использовании которых может быть получен требуемый темп измерений. При этом система также содержит опорную станцию и несколько ведомых. На опорной и ведомых станциях имеются эталонные генераторы, которые синхронизируют передатчики. В аппаратуре потребителя информации принятые сигналы после усиления подаются на коммутатор, работающий синхронно с переключениями опорной и ведомых станций. В структуре потребителя имеется опорный генератор, который совместно с измерителями фаз обеспечивает измерение разности фаз сигналов от опорной станции и от ведомой станции. По разности фаз сигналов от опорной и ведомой станций находится разность дальностей между ними и потребителем информации, а также строится линия (поверхность) положения.

Аналогично по разности фаз сигналов от опорной станции и от другой ведомой станции находится разность дальностей между ними и потребителем информации и строится еще одна линия (поверхность) положения.

Для определения своих координат потребитель информации, кроме линий (поверхностей) положения, имеет в базе данных координаты опорной и ведомых станций.

Однозначность измерения дальности в фазовых системах навигации обеспечивается только в пределах длины волны несущего колебания. Для разрешения многозначности измерений используют импульсно-фазовые системы; их навигационный сигнал представляет собой пачку когерентных импульсов, несущая частота которых служит для точного, а огибающая — для грубого измерения разности дальностей с целью устранения многозначности точных измерений.

По сущности технического решения наиболее близким к предлагаемой системе является система “LORAN–C” [2]. В системе “LORAN–C” все опорные станции работают на фиксируемой частоте, стабилизируемой с помощью цезиевых стандартов частоты. Навигационный сигнал ведущей опорной станции отличается от сигнала ведомых станций числом импульсов в пачке и законом фазового кодирования, что используется для опознавания сигнала и повышения его помехоустойчивости. В системе “LORAN–C” для исключе-

ния одновременного приема потребителем информации сигналов разных опорных станций осуществляется их дополнительная задержка. Измерительные импульсы имеют временное положение, совпадающее с концом третьего периода несущих колебаний.

Существенное влияние на точность определения координат потребителя оказывает стабильность эталонов частоты в аппаратуре опорных станций и потребителя. Например, при уходе частот приводящее к ошибке в определении разности времени равном 15 мс даст ошибку определения координат 4,5 м.

Темп формирования навигационного поля в системах типа "LORAN–C" является постоянным и не может регулироваться в соответствии с задачами, решаемыми потребителями информации.

Точность разностно-дальномерных систем зависит от геометрического фактора. Для стационарных разностно-дальномерных систем геометрический фактор варьироваться не может.

В целях устранения указанных противоречий предлагается использовать мобильные системы локальной (относительной) навигации, в которых перечисленные выше недостатки отсутствуют.

Мобильной системой локальной навигации будем называть такую, которая обладает свойством экстренного развертывания на локальной части земной поверхности и предназначена для решения следующих задач:

— обеспечения навигационными данными наземных потребителей (объектов техники, транспортных средств, людей и т. д.) в пределах прямой радиовидимости;

— обеспечения навигационными данными пилотируемых воздушных средств, беспилотных летательных аппаратов;

— формирования навигационного поля для указанных потребителей.

Указанная цель достигается формированием позиционного навигационного сигнала аппаратурой опорной и ведомых станций соответствующей структуры.

Сущность функционирования подобного рода систем заключается в следующем. Для формирования навигационного поля разворачиваются три станции, опорная и две ведомых в случае необходимости определения координат на плоскости и четыре — в случае трехмерного пространства.

Подход к раскрытию сущности функционирования систем идентичен для обоих случаев, поэтому остановимся на рассмотрении случая определения координат на плоскости (см. рис. 1).

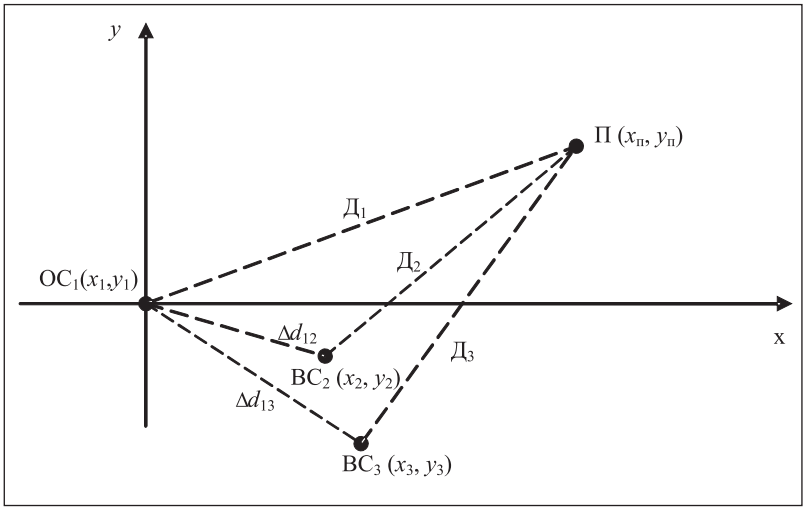

Рис. 1. Схема взаимного расположения опорной и ведомых станций и потребителя информации

При развертывании опорной и ведомых станций на местности определяются их прямоугольные координаты x_i, y_i (i = 1, 2, 3) известными в топогеодезии методами. Опорная станция ($ОС_1$) излучает радиосигнал, в структуре которого присутствуют признак принадлежности к $ОС_1$, координаты $ОС_1$ и синхронизирующий импульс. $ОС_1$ работает только в режиме излучения. Вторая и третья ведомые станции принимают сигналы только по признаку принадлежности его к первой. При выполнении этого условия $ВС_2$ ($ВС_3$) излучает сигнал, в структуре которого, так же как и для $ОС_1$, содержатся признак принадлежности к $ВС_2$ ($ВС_3$), координаты $ВС_2$ ($ВС_3$) и синхронизирующий импульс. Таким образом в каждой точке электромагнитного навигационного поля присутствуют признаки опорной и ведо-

мых станций, их координаты и синхронизирующие импульсы.

Покажем достаточность перечисленных данных для определения координат потребителем информации $x_п$, $y_п$ (см. рис. 2 и 3).

На временной диаграмме показаны:

— o_1 t_1 — время прохождения синхронизирующего импульса от $ОС_1$ до потребителя (дальности $Д_1$);

$$Д_1 = \left[(x_1 - x_n)^2 + (y_1 - y_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}};$$

— τ_{12} — время прохождения электромагнитной энергией отрезка Δd_{12} — расстояния от $ОС_1$ до $ВС_2$;

$$\Delta d_{12} = \left[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}};$$

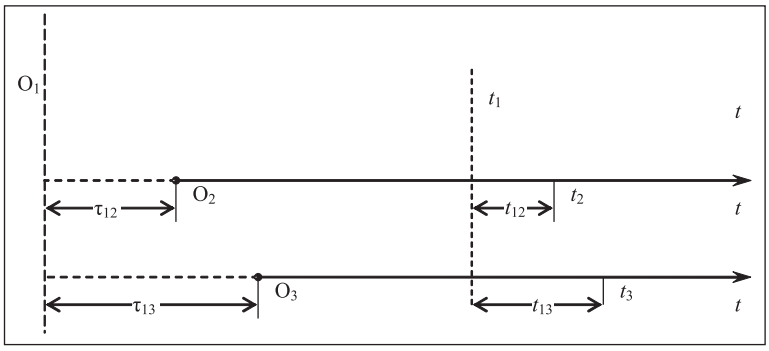

Рис. 2. Временная диаграмма формирования моментов излучения и приема сигнала

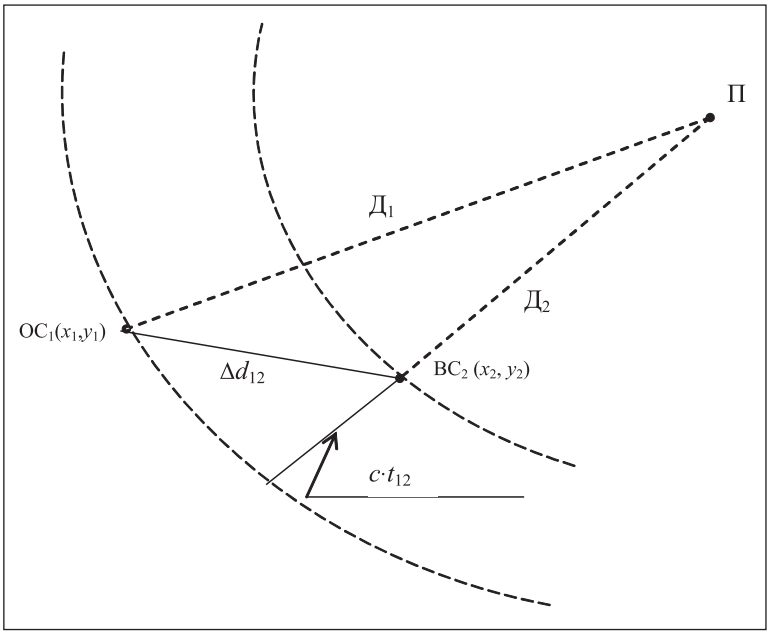

Рис. 3. Схема прохождения волн между потребителем опорной и ведомой станциями

— o_2 t_2 — время прохождения электромагнитной энергией отрезка $Д_2$ — расстояния от $ВС_2$ до потребителя;

$$Д_2 = \left[(x_2 - x_n)^2 + (y_2 - y_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Потребитель информации после приема фиксирует моменты прихода сигнала от $ОС_1$ — t_1 и от $ВС_2$ — t_2 и вычисляет разность t_{12}, а также произведение $c \cdot t_{12}$, c — скорость распространения электромагнитной энергии [4; 5].

Из рис. 2 и 3 следует зависимость

$$Д_1 = \Delta d_{12} + (Д_2 - c \cdot t_{12})$$

или

$$Д_1 - Д_2 = \Delta d_{12} - c \cdot t_{12}.$$

С учетом представленных выше зависимостей получим уравнение вида (1)

$$\left[(x_1 - x_n)^2 + (y_1 - y_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(x_2 - x_n)^2 + (y_2 - y_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - c \cdot t_{12}, \quad (1)$$

в котором неизвестными являются $x_п$, $y_п$.

Для формирования второго уравнения воспользуемся аналогичными связями, но между $ОС_1$ и $ВС_3$. В результате получим следующее уравнение:

$$\left[(x_1 - x_n)^2 + (y_1 - y_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(x_3 - x_n)^2 + (y_3 - y_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - c \cdot t_{13}. \quad (2)$$

В результате совместного решения уравнений (1) и (2) вычисляют $x_п$, $y_п$.

Для трехмерного случая система уравнений по определению координат потребителя будет иметь вид (3)

$$\left[(x_1 - x_n)^2 + (y_1 - y_n)^2 + (z_1 - z_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(x_2 - x_n)^2 + (y_2 - y_n)^2 + (z_2 - z_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2) \right]^{\frac{1}{2}} - c \cdot t_{12}; \quad (3)$$

$$\left[(x_1-x_n)^2+(y_1-y_n)^2+(z_1-z_n)^2\right]^{\frac{1}{2}}-$$
$$-\left[(x_3-x_n)^2+(y_3-y_n)^2+(z_3-z_n)^2\right]^{\frac{1}{2}}=$$
$$=\left[(x_1-x_3)^2+(y_1-y_3)^2+(z_1-z_3)\right]^{\frac{1}{2}}-c\cdot t_{13};$$
$$\left[(x_1-x_n)^2+(y_1-y_n)^2+(z_1-z_n)^2\right]^{\frac{1}{2}}-$$
$$-\left[(x_4-x_n)^2+(y_4-y_n)^2+(z_4-z_n)^2\right]^{\frac{1}{2}}=$$
$$=\left[(x_1-x_4)^2+(y_1-y_4)^2+(z_1-z_4)\right]^{\frac{1}{2}}-c\cdot t_{14},$$

где x_1, y_1, z_1 — координаты опорной станции ($ОС_1$); x_k, y_k, z_k (k = 2, 3, 4) — координаты второй, третьей и четвертой ведомых станций ($ВС_2$, $ВС_3$, $ВС_4$); x_n, y_n, z_n — координаты потребителя информации; t_{12}, t_{13}, t_{14} — разность времени прихода синхронизирующего сигнала на потребителя информации от первой и соответственно второй, третьей, четвертой опорных станций; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Исходя из предлагаемой идеи построения системы навигации, в структуре навигационного сигнала и опорной и ведомых станций должны быть позиции в следующей временной последовательности:

— позиция кода станции;

— позиция синхронизирующего сигнала;

— позиция координат станции.

Вариант структуры позиционного навигационного сигнала опорной и ведомых станций, представлен на рис. 4.

С приходом навигационного сигнала от опорной станции к потребителю информации запоминаются ее координаты и временно́е положение синхронизирующего сигнала. Следует указать, что аппаратура опорной станции работает только на передачу, режим приема отсутствует.

Аппаратура ведомых станций имеет режимы приема и излучения (передачи). В режиме приема аппаратура ведомых станций реагирует только на код опорной станции. В режиме передачи излучает код и координаты станции. Формирование синхронизирующего сигнала ведомых станций осуществляется под действием синхронизирующего сигнала опорной станции. Аппаратура потребителя информации при приеме сигнала ведомых станций запоминает временно́е положение синхронизирующего сигнала и координаты.

Таким образом, практическая реализация рассмотренных положений при создании систем локальной (относительной) навигации позволит:

— существенно повысить эффективность применения методов и систем навигации высокодинамичных объектов;

— значительно расширить диапазон возможного применения систем относительной навигации (например, при технической реализации современных курсоглиссадных систем, полигонного и испытательного оборудования высокодинамичных высокоманевренных аппаратов и др.);

— повысить скрытность процессов обработки информации бортовыми навигационными системами;

— в режиме реального времени осуществлять коррекцию начальных условий местоположения и последующего наведения высокодинамичного объекта.

Статья выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

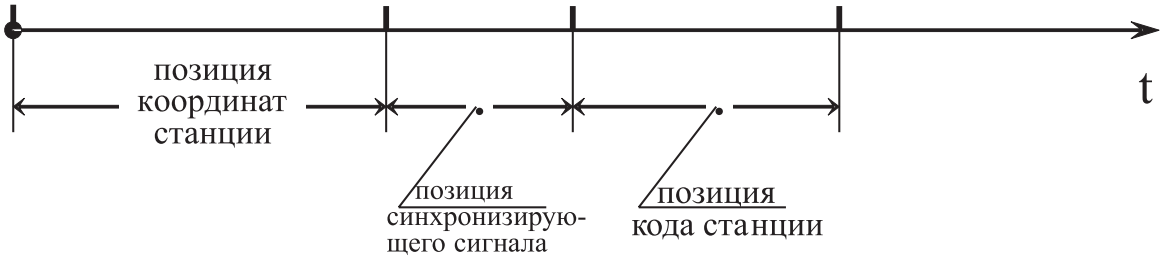

Рис. 4. Структура позиционного навигационного сигнала

Список литературы

1. Радиотехнические системы: учеб. для вузов / под ред. Ю. М. Казаринова. — М.: Высш. шк., 1990. — 496 с.

2. *Бакулев А. П.* Радиолокационные и радионавигационные системы: учеб. пособие для вузов / А. П. Бакулев, А. А. Сосновский. — М.: Радио и связь, 1994. — 296 с.

3. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / под ред. В. С. Шебшаевича. — М.: Радио и связь, 1993. — 408 с.

4. Пат. на полезную модель. Система навигации / Ульянов Г. Н., Колесниченко С. В., Сулима А. А. [и др.]. № 44190. — Заявл. 28.10.04.

5. Пат. на полезную модель. Устройство наведения / Ульянов Г. Н., Колесниченко С. В., Сулима А. А. [и др.]. № 59277. — Заявл 10.12.06.