

Интегрированная антенна для приёма спутниковых навигационных сигналов со встроенным инерциальным измерительным модулем

Н. Н. Василюк

ООО «Топкон Позиционинг Системс», Москва, Российская Федерация, e-mail: nik-vasilyuk@yandex.ru

Предложен подход к обеспечению стабильности взаимного расположения активной спутниковой навигационной антенны и инерциального измерительного модуля при установке инерциально-спутниковой навигационной системы на транспортное средство. Задача определения координат навигационной антенны относительно инерциального модуля решена за счёт объединения инерциального модуля и антенного элемента в единую конструкцию – интегрированную антенну. Такой подход позволяет определять требуемые координаты в заводских условиях при изготовлении интегрированной антенны. Описаны принципы работы отдельных узлов интегрированной антенны и способы её применения в инерциально-спутниковых навигационных системах. Указаны особенности организации двустороннего обмена цифровой информацией между антенной и вычислительным устройством. Показано, что использование одноплатных кабельных модемов позволяет организовать полудуплексный обмен информацией между интегрированной антенной и навигационным приёмником. Предложены способы применения этого обмена для решения служебных задач навигационной системы. Отмечено, что у интегрированной антенны появляется собственный измерительный базис. Описаны способы учёта ориентации этого базиса при практическом применении интегрированной антенны в одноантенных и многоантенных инерциально-спутниковых навигационных системах.

Ключевые слова: интегрированная антенна, смещение навигационной антенны, инерциальный измерительный модуль, инерциальная спутниковая навигационная система.

Введение. Активная антенна для приёма сигналов спутниковых навигационных систем (СНС) представляет собой единую механическую конструкцию, объединяющую в общем корпусе один или несколько антенных элементов и малошумящий усилитель (МШУ) [1]. Каждый антенный элемент предназначен для приёма радиосигналов, излучаемых навигационными спутниками в определённом диапазоне частот, и преобразования этих сигналов в электрические высокочастотные сигналы. Если частотного диапазона одного антенного элемента недостаточно для одновременного приёма всех требуемых навигационных сигналов, то в конструкцию антенны включают несколько антенных элементов. Слабые высокочастотные сигналы, получаемые с выходов отдельных элементов, смешиваются в единый сигнал, который усиливается МШУ и передаётся по антенному кабелю на вход навигационного приёмника. По тому же антенному кабелю от навигационного приёмника на МШУ подаётся напряжение питания.

Навигационный приёмник измеряет фазу навигационного радиосигнала относительно некоторой виртуальной точки, называемой фазовым центром антенного элемента. Если антенный элемент принимает радиосигналы на нескольких несущих частотах, то каждая из них имеет свой собственный фазовый центр. Пространственные положения этих центров задаются радиус-вектором $\mathbf{r}_X$, которые откладываются из общей опорной точки, выбранной на корпусе антенны [1]. Здесь $X=L_1, L_2, \dots$, – указатель несущей

частоты сигнала СНС. Компоненты радиус-вектора для антенн одного типа находят по результатам индивидуальной калибровки нескольких экземпляров и учитывают при настройках программного обеспечения навигационного приёмника.

При определении позиции навигационного приёмника все фазовые измерения, выполненные в различных фазовых центрах, вычислительным способом приводятся к одному общему фазовому центру – как правило, это фазовый центр для частоты $L_1=1575,42$ МГц GPS. Когда говорят о координатах и компонентах вектора скорости, измеренных навигационным приёмником, то имеют в виду координаты и скорость именно этого фазового центра. Все дальнейшие рассуждения относятся только к общему фазовому центру.

Бесплатформенный инерциальный измерительный модуль (ИИМ) состоит из векторных датчиков угловой скорости и линейного ускорения, жёстко смонтированных на общем основании. Оси чувствительности каждого векторного датчика образуют базис механической сборки ИИМ. Этот базис с небольшими погрешностями можно считать прямоугольным. С ИИМ связана правая ортогональная измерительная система координат, начало которой называется измерительным центром. При сборке ИИМ номинальные направления осей чувствительности векторных датчиков устанавливают сонаправлено с одноимёнными осями измерительной системы координат. Для высокоточных ИИМ дополнительно выполняют заводскую калибровку погрешностей

сборки, в ходе которой определяют угловые координаты фактических направлений осей чувствительности датчиков относительно измерительной системы координат [2, 3]. Эти погрешности заносятся в спецификацию ИИМ и используются для вычислительной коррекции измерений векторных датчиков. Все измерения, выполняемые ИИМ, привязываются к его измерительному центру.

Для обеспечения полноты, доступности и непрерывности навигационного решения в условиях помех и кратковременных нарушений приёма спутниковых навигационных сигналов применяют комплексирование измерений, получаемых от навигационного приёмника и ИИМ. Комплексирование выполняется алгоритмически с помощью программного обеспечения навигационного приёмника или отдельного вычислительного устройства. Для совместной обработки инерциальных и спутниковых измерений необходимо учитывать смещение фазового центра приёмной антенны относительно измерительного центра ИИМ [4, 5]. Такое смещение задаётся радиус-вектором $I_{ф.ц}$, компоненты которого должны быть известны в течение всего времени работы навигационной системы и при любом движении её носителя. Погрешность $\delta I_{ф.ц}$ в задании вектора смещения приводит к возникновению погрешностей порядка длины вектора $|\delta I_{ф.ц}|$ при определении координат и порядка $|\omega \times \delta I_{ф.ц}|$ при вычислении поступательной скорости транспортного средства, где ω – мгновенное значение вектора угловой скорости транспортного средства [6].

Если антенна и ИИМ установлены на транспортное средство по отдельности, то для определения радиус-вектора $I_{ф.ц}$ приходится предпринимать специальные меры. Выбор мест установки антенны и ИИМ должен обеспечивать малое изменение координат радиус-векторы $I_{ф.ц}$ при изгибных деформациях и вибрациях кузова [7, 8]. При монтаже ИИМ должна наблюдаться высокая механическая стабильность ориентации измерительной системы координат относительно строительных осей транспортного средства. Производители навигационного оборудования рекомендуют, по возможности определять радиус-векторы $I_{ф.ц}$ геодезическими методами (Lever Arm Calibration Routine: [сайт]. URL: https://docs.novatel.com/OEM7/Content/SPAN_Operation/Lever_Arm_Calibration_Routine.htm). Если использование геодезических инструментов затруднено или невозможно, то компоненты этого вектора могут быть откалиброваны в реальном времени [9–11]. Для выполнения калибровки нужно, чтобы транспортное средство выполняло специальные манёвры, обеспечивающие наблюдаемость оцениваемых компонент радиус-вектора $I_{ф.ц}$ [12–14]. Однако даже при правильно организованной калибровке для наземных транспортных средств погрешности оценки составляют 1–3 см в горизонтальной плоскости и до 15 см по вертикали. Различия в погрешностях вертикальной и горизонтальной проекций обусловлено трудностями выполнения вертикального калибровочного манёвра для транспортного средства, движущегося по дорогам общего пользования. Если инерциальная СНС установлена на летательном аппарате, допускающем

трёхмерное калибровочное маневрирование, то погрешности оценки компонент радиус-вектора $I_{ф.ц}$ можно снизить до сантиметрового уровня по всем трём осям [13].

Проблему точного определения координат радиус-вектора $I_{ф.ц}$ и обеспечения их стабильности можно полностью устранить, если разместить ИИМ внутри активной антенны. В такой конструкции координаты фазового центра относительно ИИМ постоянны и определяются только один раз, т. е. при изготовлении антенны. Для упрощения кабельной структуры антенной системы измерения от ИИМ, встроенного в антенну, могут быть переданы в навигационный приёмник по антенному кабелю совместно с сигналом СНС, принятым этой антенной. Применение частотной манипуляции низкочастотной несущей для передачи цифровой информации между ИИМ и навигационным приёмником обеспечивает разделение сигналов от ИИМ и СНС по частоте и исключает их взаимное искажение. Существование двустороннего канала цифрового обмена между антенной и навигационным приёмником позволяет встраивать в антенну не только ИИМ, но и другие датчики различных физических параметров – давления, влажности, температуры воздуха и т. д.

Двусторонний канал связи позволяет разместить в антенне энергонезависимое запоминающее устройство для хранения различной служебной и калибровочной информации – серийного номера и типа антенны, координат фазового центра относительно измерительной системы координат, масштабные коэффициенты и перекосы осей чувствительности ИИМ и др. Активную антенну со встроенным ИИМ, дополнительными датчиками и средствами цифрового обмена информацией по антенному кабелю будем называть интегрированной антенной.

Схемы электрических и механических соединений интегрированной антенны и однотипной с ней активной антенны полностью совпадают. Это позволяет использовать интегрированные антенны на транспортных средствах без изменения существующей кабельной инфраструктуры [15, 16].

Устройство интегрированной антенны. Рассмотрим механическую конструкцию антенны. Интегрированная антенна представляет собой отдельное устройство в герметичном корпусе, верхняя крышка которого 1 сделана из радиопрозрачного материала (рис. 1). Внутри корпуса размещена несущая печатная плата 2, также выполняющая роль экрана. На верхней стороне платы установлены антенные элементы, в рассматриваемом случае – элемент 3 для частотного диапазона L_1 (GPS $L_1 = 1575,42$ МГц, ГЛОНАСС $L_1 = 1598,0625 \dots 1615,5$ МГц) и элемент 4 для частотного диапазона L_2 (GPS $L_2 = 1227,6$ МГц, ГЛОНАСС $L_2 = 1242,0375 \dots 1256,5$ МГц).

Антенные элементы высокоточных антенн специально проектируют так, чтобы все фазовые центры (точки А, В для антенных элементов 3, 4 соответственно) были расположены вблизи вертикальной оси симметрии антенны. Например, для активной антенны (PG-F1 High Precision Full Wave GNSS Antenna, URL: https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product_files/pg-f1_broch_7010-2228_reva_sm_0.pdf) компоненты векторов смещений фазовых центров

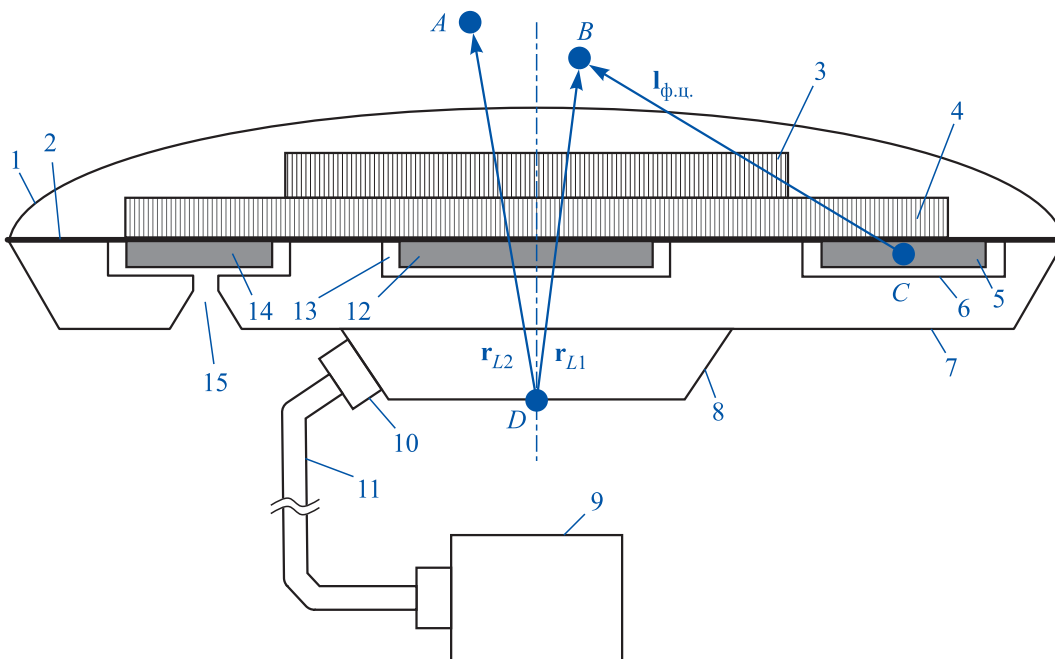


Рис. 1. Устройство интегрированной антенны со встроенным инерциальным измерительным модулем и дополнительными датчиками физических параметров:

1 – радиопрозрачная крышка; 2 – печатная плата; 3, 4 – антенные элементы; 5 – измерительно-связной модуль; 6, 13 – электромагнитные экраны; 7 – металлическое основание антенны; 8 – узел крепления; 9 – приёмник сигналов СНС; 10 – высокочастотный разъём; 11 – высокочастотный кабель; 12 – МШУ; 14 – дополнительные датчики; 15 – отверстие; A, B – фазовые центры элементов 3, 4 соответственно; C – измерительный центр ИИМ; D – опорная точка антенны

Fig. 1. Integrated antenna device with an embedded inertial measurement unit and additional sensors:

1 – antenna cover; 2 – printed circuit board; 3, 4 – antenna elements; 5 – measuring and communication module; 6, 13 – electromagnetic shields; 7 – antenna's metal base; 8 – mounting thread; 9 – GNSS receiver; 10 – RF plug; 11 – RF cable; 12 – LNA; 14 – auxiliary sensors; 15 – orifice; A – phase center of the element 3; B – phase center of the element 4; C – measurement center of the IMU; D – antenna reference point

для частот GPS L_1 , L_2 соответствуют $\mathbf{r}_{L1} = [1,76; 0,37; 48,14]^T$, $\mathbf{r}_{L2} = [0,11; -1,36; 45,45]^T$ (все значения приведены в миллиметрах). Первые две компоненты векторов задают смещение фазового центра в плоскости несущей платы, а третья компонента – смещение вдоль вертикальной оси симметрии. Значения компонент, приведённые в примере, получены в результате «абсолютной» калибровки антенн, выполненной в сертификационной лаборатории Национальной геодезической службы США (National Geodetic Survey, NGS) с методической погрешностью $\sigma = 0,2 \dots 0,4$ мм [17]. Пространственное положение фазовых центров для различных антенн одного типа имеет производственный разброс и зависит от окружающей температуры. Конструкция антенны гарантирует попадание мгновенных фазовых центров в сферы радиусом $a_{ф.ц.} = 2,5$ мм с центрами в точках, указанных в калибровках NGS.

На нижней стороне платы находится измерительно-связной модуль 5, накрытый электромагнитным экраном 6, а также МШУ 12 под экраном 13. Измерительно-связной модуль обеспечивает работу ИИМ (измерительный центр

которого обозначен точкой C) и канала связи с навигационным приёмником 9 через антенный кабель 11. Также на плате могут размещаться датчики 14 других типов, входящие в состав измерительно-связного модуля – датчики давления, влажности и т. д. В последнем случае датчики устанавливают в непосредственной близости от отверстия 15 в металлическом основании, обеспечивающего соприкосновение их чувствительных элементов с окружающим воздухом.

Механическую прочность и жёсткость конструкции обеспечивает металлическое основание 7, на котором расположены узел крепления антенны 8 и высокочастотный разъём 10 для подключения антенного кабеля 11. Как правило, в качестве опорной выбирается точка D пересечения вертикальной оси симметрии антенны и привалочной плоскости узла крепления.

На корпус интегрированной антенны наносят метки, указывающие направление осей измерительной системы координат и положение измерительного центра ИИМ. Эти метки необходимы при установке антенны на транспортное средство для контроля ориентации измерительной системы координат относительно связанной системы координат (ССК) транспортного средства.

Навигационный алгоритм определяет ориентацию измерительной системы координат антенны, а не ориентацию транспортного средства, на котором она установлена [18, 19]. Поэтому угловое рассогласование между связанной и измерительной системами координат должно быть известно и постоянно в течение всего времени работы антенны. Значения параметров этого рассогласования указываются в настройках навигационного алгоритма и применяются для пересчёта ориентации измерительной системы координат в ориентацию транспортного средства.

Измерительно-связной модуль. Блок-схема измерительно-связного модуля показана на рис. 2. Модуль состоит из кабельного модема 1 и измерительного устройства 5.

Кабельный модем работает в полудуплексном режиме и подключается непосредственно к антенному кабелю 13, через который обменивается информацией с аналогичным модемом, установленным в навигационном приёмнике 11. Инерциальный измерительный модуль 7 представляет собой интегральную микросхему размером $3 \times 3 \times 1$ мм (MPU-9150 Nine-Axis (Gyro + Accelerometer + Compass) MEMS MotionTracking(NV) Device: [сайт]. URL: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9150/>), пригодную для поверхностного монтажа. Таким образом, вектор $\mathbf{I}_{\text{ф.ц}}$ можно задать с погрешностью порядка $|\delta \mathbf{I}_{\text{ф.ц}}| \approx (a_{\text{ф.ц}}^2 + 1,5^2 + 1,5^2 + 0,5^2)^{1/2} = 3,3$ мм при номинальных значениях компонент вектора $\mathbf{I}_{\text{ф.ц}} = [10; 30; 18]^T$ мм, установленных для антенны PG-F1.

Инерциальный измерительный модуль включает в себя векторные датчики угловой скорости и углового ускорения, векторный датчик магнитного поля и датчик температуры, а также электронную схему управления. Эта схема считывает измерения с векторных датчиков, преобразует их в цифровой формат и обеспечивает вывод оцифрованных измерений из ИИМ через какой-либо стандартный цифровой интерфейс передачи данных, например UART, SPI или I2C. Выходной интерфейс микросхемы подключён к микроконтроллеру 6, программное обеспечение которого выполняет считывание измерений из ИИМ, их предварительную обработку (фильтрацию, коррекцию температурных дрейфов отдельных датчиков, замену базиса в векторных измерениях и т. д.) и упаковку обработанных измерений ИИМ в пакеты данных. Кроме ИИМ к этому же микроконтроллеру подсоединены модуль энергонезависимой памяти 8 и набор дополнительных датчиков 9 – измерители давления, влажности и т. д. Микроконтроллер подключён к кабельному модему через двунаправленный интерфейс 10 универсального асинхронного приёмопередатчика (УАПП).

Для большинства практических применений достаточно иметь ширину полосы каждого скалярного датчика ИИМ не более 500 Гц и частоту опроса его измерений не более 2 кГц. Выходными данными ИИМ являются три скалярные компоненты вектора угловой скорости, измеряемые датчиком угловой скорости, и три компоненты вектора кажущегося ускорения, измеряемые датчиком линейного ускорения (шесть чисел). Одномоментный набор измерений от всех датчиков ИИМ занимает не более 24 байт, если все измерения представлены в формате с плавающей точкой одинарной точности, что заведомо избыточно для первичных измерений. При передаче измерений через УАПП каждый байт данных передаётся в виде последовательности из 10 бит: старт-бит, 8 бит данных и стоп-бит. Таким образом, скорость передачи данных по антенному кабелю должна быть не менее $10 \text{ бит} \times 24 \text{ байта} \times 2 \text{ кГц} = 480 \text{ кбит/с}$.

Цифровая обработка сигналов в кабельном модеме реализована в программируемой логической интегральной схеме 4.

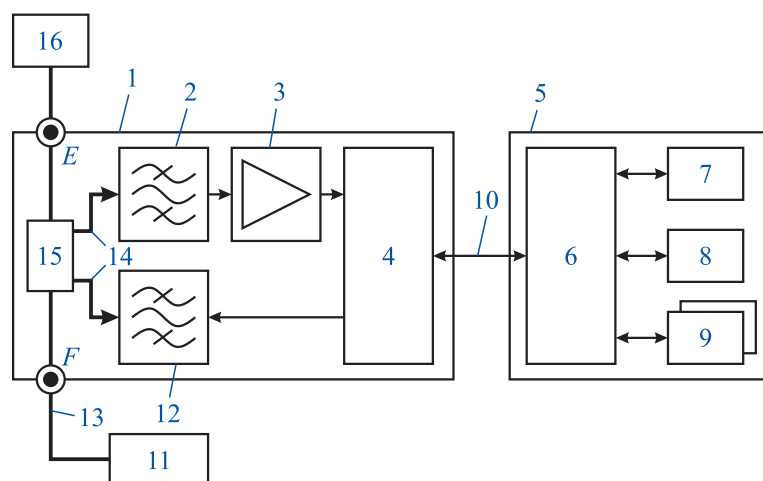


Рис. 2. Блок-схема измерительно-связного модуля интегрированной антенны: 1 – кабельный модем; 2 – полосовой фильтр приёмного канала; 3 – усилитель; 4 – программируемая логическая интегральная схема; 5 – измерительное устройство; 6 – микроконтроллер; 7 – инерциальный измерительный модуль; 8 – постоянное запоминающее устройство; 9 – дополнительные датчики; 10 – последовательный интерфейс; 11 – приёмник сигналов СНС; 12 – полосовой фильтр передающего канала; 13 – высокочастотный кабель; 14 – отводы; 15 – согласующее устройство; 16 – МШУ; E – точка подключения к выходу МШУ активной антенны; F – точка подключения к навигационному приёмнику

Fig. 2. The block diagram of the measuring and communication module of the integrated antenna:

1 – cable modem; 2 – pass-band filter of a receiving channel; 3 – amplifier; 4 – FPGA; 5 – measuring device; 6 – microcontroller; 7 – IMU; 8 – non-volatile memory; 9 – auxiliary sensors; 10 – serial interface; 11 – GNSS receiver; 12 – pass-band filter of a transmitting channel; 13 – RF cable; 14 – taps; 15 – matching device; 16 – LNA; E – point for the LNA output connection; F – point for a GNSS receiver connection

Для передачи данных из микроконтроллера в кабель модулятор принимает на вход последовательный битовый поток УАПП с постоянной длительностью T_B одного бита и преобразует его в частотно-манипулированный сигнал. В таком сигнале логический ноль модулируется одним периодом частоты $f_B = 1/T_B$, а логическая единица – двумя периодами частоты $2f_B$ (рис. 3.). Так, при скорости цифрового последовательного интерфейса 500 кбит/с, $T_B = 2$ мкс, а $f_B = 500$ кГц. Фазы манипулируемых частот назначают так, чтобы в непрерывном частотно-манипулированном сигнале не возникали точки разрыва первого рода на границах битовых интервалов, за счёт чего заметно уменьшается мощность боковых лепестков в его спектре. Для подавления боковых спектральных лепестков, порождаемых цифровым синтезом частотно-манипулированного сигнала и разрывами его нечётных производных на границах битовых интервалов, этот сигнал пропускается через полосовой фильтр 12. В результате на выходе модема формируется сигнал, содержащий только главный лепесток спектра частотно-манипулированного сигнала в диапазоне 0–1500 кГц с подавленной

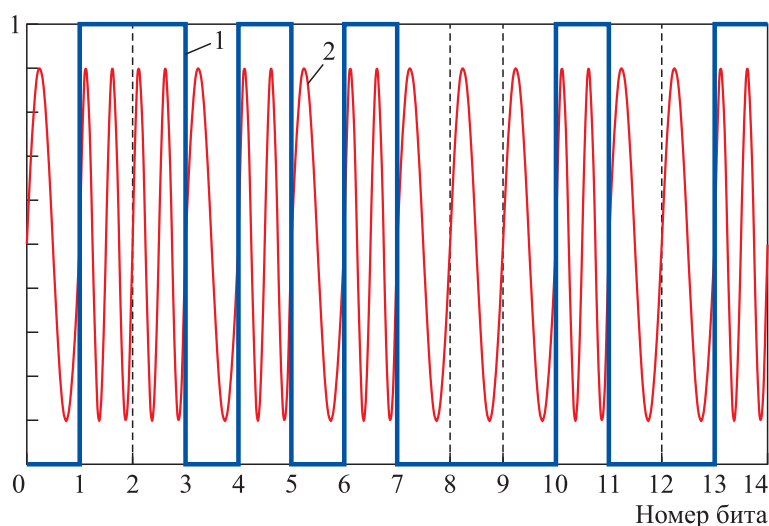


Рис. 3. Частотно-манипулированное представление битового потока:
1 – битовый поток УАПП; 2 – частотно-манипулированный сигнал

Fig. 3. Frequency-manipulated bitstream representation:
1 – UART bitstream; 2 – frequency shift keying signal

постоянной составляющей, который передаётся в антенный кабель.

При поступлении информации из антенного кабеля принимаемый сигнал сначала пропускается через фильтр 2 с полосой пропускания 250–1250 кГц, а затем усиливается усилителем 3, после чего подаётся на вход программируемой логической интегральной схемы 4, снабжённой встроенным компаратором. Выход компаратора, работающего как однобитный аналого-цифровой преобразователь, опрашивается с частотой $64 f_B$ (32 МГц для 500 кбит/с) и демодулируется в виде битового потока УАПП с сохранением длительности битового интервала T_B .

Напряжение для питания МШУ 16 и измерительно-связного модуля подаётся от навигационного приёмника 11 на интегрированную антенну через антенный кабель 13. Таким образом, при нормальной работе системы в антенном кабеле одновременно присутствуют три различных сигнала в непересекающихся частотных диапазонах: напряжение питания в полосе около 0 Гц, низкочастотный частотно-манипулированный сигнал в полосе 0–1500 кГц и высокочастотный сигнал СНС в полосе 1,2–1,5 ГГц. Чтобы кабельный модем не создавал помех при приёме сигнала от СНС, его подключают к антенному кабелю через согласующую цепь 15. Назначение этой цепи следующее:

- создать «короткое замыкание» между разъёмами E , F по постоянному току для передачи питания на МШУ;

- создать «короткое замыкание» между точками E , F и разрыв цепи отводов 14 в диапазонах частот, соответствующих сигналам СНС, для неискажённой передачи этих сигналов от МШУ к навигационному приёмнику;

- исключить «просачивание» частотно-манипулированного сигнала к точке E и гарантировать свободное пропускание его к точке F в диапазоне частот 0–1500 кГц.

Навигационные системы с интегрированной антенной. Большинство современных навигационных приёмников, в которых предусмотрено подключение внешней антенны, подают в антенный кабель напряжение 5 В с ограничением по протекающему току порядка 100–200 мА. Активная антенна содержит только антенные элементы и МШУ и потребляет не более 100 мА при напряжении питания 5 В. Установка в эту антенну измерительно-связного модуля, т. е. превращение её в интегрированную, увеличивает ток потребления активной антенны до 120 мА.

Чтобы при решении навигационных задач можно было применить измерения ИИМ, в состав навигационного приёмника 1 должен входить кабельный модем 2 того же типа, что и в интегрированной антенне 9 (рис. 4). Если модем внутри навигационного приёмника отсутствует, то интегрированная антенна используется как обычная активная антенна для приёма сигналов СНС. Кабельный модем подключают в разрыв антенного кабеля 7 между интегрированной антенной и высокочастотным трактом 6 навигационного приёмника. При этом нужно соблюдать полярность подключения – точка F модема внутри приёмника подключается к точке F модема внутри антенны (см. рис. 2) через антенный кабель. В этом случае обеспечивается изоляция входа высокочастотного тракта от низкочастотного частотно-манипулированного сигнала, присутствующего в кабеле. Высокочастотный тракт выполняет гетеродинирование и квадратурное разложение высокочастотного сигнала, принятого от антенны. Квадратурные сигналы поступают в блок 4 цифровой обработки сигнала, где происходит его оцифровка, извлечение первичной навигационной информации и вычисление навигационного решения – позиции и скорости фазового центра антенны. Кабельный модем соединён с блоком цифровой обработки сигнала через интерфейс УАПП 3. Суммарная задержка передачи информации от момента начала работы УАПП в интегрированной антенне 9 до момента начала его работы в навигационном приёмнике не превышает 4 мкс.

Добавление к этому приёмнику дополнительного высокочастотного тракта 5 позволяет подключить к нему вспомогательную активную антенну 8, что даёт возможность измерять не только позицию и скорость первого фазового центра интегрированной (основной) антенны, но и угловые координаты базового вектора $\mathbf{d}$, построенного между фазовыми центрами основной и вспомогательной антенн [15, 20]. Если обе разнесённые антенны жёстко закреплены на кузове транспортного средства, то такая двухантенная конфигурация позволяет дополнительно измерять два угла ориентации этого средства из трёх. Третий угол поворота вокруг базового вектора $\mathbf{d}$ в двухантенной системе не измеряют. Угловые координаты определяют за счёт когерентной обработки навигационных сигналов, принятых двумя разнесёнными антеннами. Погрешность измерения углов определяют по формуле $\sigma = 0,1/|\mathbf{d}|$, где длина $|\mathbf{d}|$ базового вектора задана в метрах [15].

Навигационный приёмник определяет координаты и скорость своего фазового центра относительно геоцентрической системы координат, начало которой расположено в центре Земли, а оси жёстко связаны с вращающейся Землей. Применение интегрированной антенны для комплексирования инерциальных и спутниковых измерений основано на уравнениях наблюдения, связывающих геоцентрические радиус-векторы и векторы скорости фазового и измерительного центров: $\mathbf{r}_{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{r}_{\text{и.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{и.ц.}}$ соответственно:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_{\text{ГСК}}^{\text{ф.ц.}} &= \mathbf{r}_{\text{ГСК}}^{\text{и.ц.}} + \mathbf{Q} \circ \mathbf{I}_{\text{ИСК}}^{\text{ф.ц.}} \circ \tilde{\mathbf{Q}}; \\ \mathbf{v}_{\text{ГСК}}^{\text{ф.ц.}} &= \mathbf{v}_{\text{ГСК}}^{\text{и.ц.}} + \mathbf{Q} \circ [\boldsymbol{\omega}_{\text{ИСК}} \times \mathbf{I}_{\text{ИСК}}^{\text{ф.ц.}}] \circ \tilde{\mathbf{Q}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\mathbf{r}_{\text{ГСК}}^{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{ГСК}}^{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{r}_{\text{ГСК}}^{\text{и.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{ГСК}}^{\text{и.ц.}}$ – проекции векторов $\mathbf{r}_{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{r}_{\text{и.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{и.ц.}}$ на геоцентрическую систему координат; $\mathbf{Q}$ – кватернион ориентации, вычисляемый из измерений ИИМ и задающий поворот от геоцентрической системы координат к измерительной системе координат; $\boldsymbol{\omega}_{\text{ИСК}}$, $\mathbf{I}_{\text{ИСК}}^{\text{ф.ц.}}$ – вектор угловой скорости транспортного средства и вектор $\mathbf{I}_{\text{ф.ц.}}$, спроектированные на измерительную систему координат; $\circ$ – операция «кватернионного» умножения.

Уравнения наблюдения такого типа повсеместно используют в алгоритмах комплексирования. Конкретная форма записи этих уравнений может различаться для различных алгоритмов и зависит от способа задания ориентации измерительной системы координат относительно геоцентрической системы координат. В уравнениях (1) эта ориентация задана кватернионом $\mathbf{Q}$, но с таким же успехом её можно задать в виде матрицы направляющих косинусов, вектора конечного поворота или углов Эйлера–Крылова. Расположение ИИМ внутри антенны не вносит никаких специфических изменений в алгоритмы комплексирования инерциальных и спутниковых измерений. Применение интегрированной антенны упрощает монтаж навигационной системы на транспортное средство, избавляя пользователя от необходимости самостоятельно измерять компоненты вектора $\mathbf{I}_{\text{ИСК}}^{\text{ф.ц.}}$ и обеспечивать их неизменность в течение всего времени эксплуатации системы.

Если интегрированную антенну используют в двухантенной системе, то после установки пары антенн на транспортное средство необходимо определить координаты вектора $\mathbf{d}$ относительно измерительной системы координат. Эти координаты задают в виде углов φ_1 , φ_2 (см. рис. 4) и расстояния $|\mathbf{d}|$ между фазовыми центрами обеих антенн:

$$\mathbf{d}_{\text{ИСК}} = |\mathbf{d}| [\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \quad \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \quad \sin \varphi_2]^T.$$

Вектор $\mathbf{d}$ применяется в алгоритмах когерентной обработки спутниковых сигналов, поэтому параметры φ_1 , φ_2 , $|\mathbf{d}|$

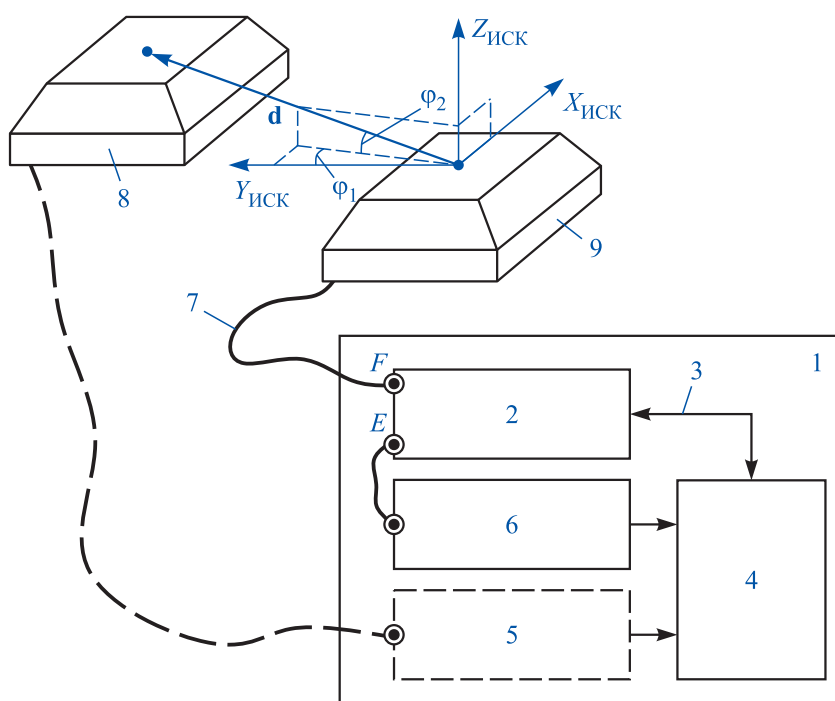


Рис. 4. Инерциально-спутниковая навигационная система с интегрированной антенной:

1 – приёмник сигналов СНС; 2 – кабельный модем; 3 – интерфейс УАПП; 4 – блок цифровой обработки сигналов СНС; 5 – дополнительный высокочастотный тракт; 6 – основной высокочастотный тракт; 7 – высокочастотный кабель основной антенны; 8 – дополнительная активная антенна; 9 – основная интегрированная антенна

Fig. 4. GNSS/Inertial navigation system with the integrated antenna:

1 – GNSS receiver; 2 – cable modem; 3 – UART interface; 4 – GNSS signals digital processing unit; 5 – auxiliary RF frontend; 6 – main RF front-end; 7 – RF cable of the main antenna; 8 – auxiliary active antenna; 9 – main integrated antenna

должны оставаться неизменными в течение всего времени работы двухантенной системы. Для этого антенны нужно установить на недеформируемые части кузова транспортного средства, либо обеспечить между ними жёсткую механическую связь, не зависящую от деформаций кузова. Для получения расстояния $|\mathbf{d}|$ сначала измеряют расстояние между опорными точками обеих антенн, после чего пересчитывают его в расстояние между фазовыми центрами антенн. Значения углов φ_1 , φ_2 назначают при сборке двухантенной системы или калибруют после установки обеих антенн на транспортное средство, после чего записывают в энергонезависимую память интегрированной антенны.

Заключение. Предложенная в статье интегрированная антенна для приёма спутниковых навигационных сигналов со встроенным ИИМ решает проблему, часто возникающую при установке инерциальных СНС на наземные транспортные средства. Проблема состоит в необходимости определения компонент вектора, соединяющего измерительный центр ИИМ с фазовым центром активной антенны. Эти компоненты, как правило, измеряются непосредственно (что не всегда возможно) или калибруются после монтажа системы,

с погрешностями 1–3 см в горизонтальной плоскости и до 15 см по вертикали. Для интегрированной антенны компоненты этого вектора устанавливаются в заводских условиях с разбросом порядка 3,3 мм от номинальных значений. Измерительно-связной модуль интегрированной антенны получает питание и выполняет двусторонний обмен информацией с навигационным приёмником по единственному антенному кабелю. Никаких дополнительных кабелей для подключения ИИМ к этому приёмнику не требуется. Интегрированная антенна может легко заменить однотипную с ней активную антенну без изменения уже существующей на транспортном средстве кабельной инфраструктуры.

Специфической особенностью интегрированной антенны является наличие у неё собственной измерительной системы координат. Поэтому для измерения ориентации транспортного средства при установке антенны особое внимание необходимо уделить выравниваю осей измерительной системы координат с одноимёнными осями связанной системы координат транспортного средства. При использовании интегрированной антенны в многоантенной системе нужно обеспечить постоянство базовых векторов, построенных из её фазового центра. Если в такой системе предъявляются повышенные требования к точности измерения ориентации, то угловые координаты базовых векторов должны быть откалиброваны после установки всех антенн.

Наличие двустороннего обмена цифровой информацией между антенной и навигационным приёмником открывает возможности для индивидуальной идентификации антенны по типу или серийному номеру. Например, в зависимости от типа и (или) серийного номера антенны можно включать или выключать различные режимы работы навигационного приёмника. Также интегрированная антенна позволяет сохранять всевозможную калибровочную информацию в энергонезависимой памяти.

Список литературы

1. Вейцель А. В., Вейцель В. А., Татарников Д. В. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: Высокоточные антенны. Специальные методы повышения точности позиционирования / Под ред. М. И. Жодзишского. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 368 с.
2. Емельянец Г. И., Блажнов Б. А., Драницына Е. В., Степанов А. П. О калибровке измерительного модуля прецизионной БИНС и построении связанного с ним ортогонального трёхгранника // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. № 1 (92). С. 36–48. DOI 10.17285/0869-7035.2016.24.1.036-048
3. Zhang R., Hoflinger F., Reind L. M., *IEEE Sensors Journal*, 2014, vol. 14, no. 6, pp. 1778–1787. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2303642
4. Stovner B. N., Johansen T. A., *18th European Control Conference (ECC)*, Naples, Italy, June 25–28, 2019, pp. 4040–4046. DOI: 10.23919/ECC.2019.8795760
5. Song J. W., Park C. G., *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, no. 9, pp. 3171–3180. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2510545
6. Seo J., Hyung H. K., Lee J. G., Park C. C., *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2006, vol. 4, no. 2, pp. 247–254.
7. Liu C., Deng Z., Gao W., Fu M., *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, Yantai, China, July 22–24, 2011, pp. 1476–1481.
8. Geng C., Wu F., Xu S., Zhang X., Si F., Zhao Y., *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 882–890. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373466
9. Xiong Z., Peng H., Liu J., Wang J., Sun Y., *2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, May 5–8, 2014, pp. 1213–1218. DOI: 10.1109/PLANS.2014.6851495
10. Xiong Z., Peng H., Wang J., Wang R., Liu J., *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 2760–2771. DOI: 10.1109/TAES.2015.140048
11. Montalbano N., Humphreys T., *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 680–687. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373443
12. Hong S., Man H. L., Chun H. H., Kwon S. H., Speyer J. L., *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, vol. 55, no. 2, pp. 431–448. DOI: 10.1109/TVT.2005.863411
13. Ma Y., Fang J., Li J., *Measurement*, 2014. vol 48, no.1, pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.10.020
14. Ramanandan A., Chen A., Farrell J. A., *2010 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Indian Wells, CA, May 4–6, 2010, pp. 1197–1203. DOI: 10.1109/PLANS.2010.5507279
15. Vasilyuk N., Vorobiev M., Tokarev D., *2018 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 267–274. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373390
16. Vasilyuk N. N., Tychinskiy S. I., Doronin A. V., Sandler I. A., Sokolov A. M., US Patent 10088576 (2 October 2018).
17. Bilich A., Mader G. L., *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010)*, Portland, Oregon, USA, September 21–24, 2010, pp. 1369–1377.
18. Péntek Z., Hiller T., Liewald T., Kuhlmann B., Czmerka A., *2017 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium*, Karlsruhe, Germany, September 19–20, 2017, pp. 1–14. DOI: 10.1109/InertialSensors.2017.8171504
19. Hong S., Lee M. H., Kwon S. H., Chun H. H., *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2004, vol. 5, no. 3, pp. 208–218. DOI: 10.1109/TITS.2004.833771
20. Жарков М. В., Веремеенко К. К., Антонов Д. А., Кузнецов И. М. Вычисление параметров ориентации по интерферометрическим неоднозначным фазовым измерениям спутниковых навигационных систем и измерениям абсолютной угловой скорости // Гироскопия и навигация. 2018. Том 26. № 3 (102). С. 54–68. DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.3.054-068

References

1. Veitsel' A. V., Veitsel' V. A., Tatarnikov D. V. *Apparatura vysokotochnogo pozitsionirovaniya po signalam global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem: Vysokotochnye anteny. Spetsial'nye metody povysheniya tochnosti pozitsionirovaniya*, ed. M. I. Zhodzishskii, Moscow, MAI-PRINT, 2010, 368 p. (in Russian).
2. Emelyantsev G. I., Blazhnov B. A., Dranitsyna E. V., Stepanov A. P., *Gyroscopy and Navigation*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 205–213. DOI: 10.1134/S2075108716030044
3. Zhang R., Hoflinger F., Reind L. M., *IEEE Sensors Journal*, 2014, vol. 14, no. 6, pp. 1778–1787. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2303642
4. Stovner B. N., Johansen T. A., *18th European Control Conference (ECC)*, Naples, Italy, June 25–28, 2019, pp. 4040–4046. DOI: 10.23919/ECC.2019.8795760
5. Song J. W., Park C. G., *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, no. 9, pp. 3171–3180. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2510545
6. Seo J., Hyung H. K., Lee J. G., Park C. C., *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2006, vol. 4, no. 2, pp. 247–254.
7. Liu C., Deng Z., Gao W., Fu M., *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, Yantai, China, July 22–24, 2011, pp. 1476–1481.
8. Geng C., Wu F., Xu S., Zhang X., Si F., Zhao Y., *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 882–890. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373466
9. Xiong Z., Peng H., Liu J., Wang J., Sun Y., *2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, May 5–8, 2014, pp. 1213–1218. DOI: 10.1109/PLANS.2014.6851495
10. Xiong Z., Peng H., Wang J., Wang R., Liu J., *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 2760–2771. DOI: 10.1109/TAES.2015.140048
11. Montalbano N., Humphreys T., *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 680–687. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373443
12. Hong S., Man H. L., Chun H. H., Kwon S. H., Speyer J. L., *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, vol. 55, no. 2, pp. 431–448. DOI: 10.1109/TVT.2005.863411
13. Ma Y., Fang J., Li J., *Measurement*, 2014, vol. 48, no. 1, pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.10.020
14. Ramanandan A., Chen A., Farrell J. A., *2010 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Indian Wells, CA, May 4–6, 2010, pp. 1197–1203. DOI: 10.1109/PLANS.2010.5507279
15. Vasilyuk N., Vorobiev M., Tokarev D., *2018 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 267–274. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373390
16. Vasilyuk N. N., Tychinskiy S. I., Doronin A. V., Sandler I. A., Sokolov A. M., US Patent 10088576 (2 October 2018).
17. Bilich A., Mader G. L., *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010)*, Portland, Oregon, USA, September 21–24, 2010, pp. 1369–1377.
18. Péntek Z., Hiller T., Liewald T., Kuhlmann B., Czmerk A., *2017 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium*, Karlsruhe, Germany, September 19–20, 2017, pp. 1–14. DOI: 10.1109/InertialSensors.2017.8171504
19. Hong S., Lee M. H., Kwon S. H., Chun H. H., *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2004, vol. 5, no. 3, pp. 208–218. DOI: 10.1109/TITS.2004.833771
20. Zharkov M. V., Veremeenko K. K., Antonov D. A., Kuznetsov I. M., *Gyroscopy and Navigation*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 277–286. DOI: 10.1134/S2075108718040090

Дата поступления: 19.08.2019.

Дата принятия: 05.11.2019.

Integrated GNSS antenna with an embedded inertial measurement unit

Nikolay N. Vasilyuk

Topcon Positioning Systems, LLC, Moscow, Russian Federation, e-mail: nik-vasilyuk@yandex.ru

When constructing inertial/GNSS navigation systems, it is necessary to determine coordinates of a GNSS antenna relative to an inertial measurement unit. It is proposed to solve this problem by integrating of the inertial unit and GNSS antenna's element into a common structure called an integrated antenna. This approach allows to determine the required coordinates in factory conditions, during a manufacturing of the integrated antenna. Operation principles of design modules of the integrated antenna and ways to use this antenna in the inertial/GNSS navigation systems have been described. Design features of a half-duplex digital data exchange between the antenna and a data processor have been indicated. Approaches to use this exchange to solve some service tasks of the navigation system have been proposed. It is noted that the integrated antenna has its own measuring basis. Methods of accounting of the attitude of this basis in practical applications of the integrated antennas in the single- and multi-antenna inertial/GNSS navigation systems have been described.

Key words: integrated antenna, lever arm, inertial measurement unit, inertial-GNSS coupling.