

УДК 621.396.97

Применение многоантенных систем для повышения помехозащищенности систем спутниковой радионавигации на подвижных объектах

А.С. Зимин

Г.В. Криницкий

Аннотация: объектом исследований в настоящей работе является применение многоантенных систем для повышения помехозащищенности систем спутниковой радионавигации на подвижных объектах.

Целью исследований является разработка помехозащищенной радионавигационной системы с многоэлементной антенной системой для определения углового положения подвижного объекта в пространстве. В работе рассмотрены способы построения и применения адаптивных антенных систем для решения задач подавления помех, как непреднамеренных, так и специально созданных. Приведены схемы диаграммообразующего устройства, многолучевой антенной системы.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, определения ориентации объектов в пространстве, динамический диапазон, помеха, приемное устройство, диаграмма направленности, адаптивные антенны, диапазон частот, цифровое управление, адаптивная фильтрация.

Введение

В ближайшие годы резко увеличилась значимость информации координатно-временного обеспечения, получаемой различными системами при их функционировании.

Действующие в настоящее время глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) используются сегодня не только для определения положения и скорости объектов относительно Земли, но и для определения ориентации объектов в пространстве[1]. Это обусловлено, в первую очередь, такой их характеристикой, как возможность определения с высокой точностью координат, скорости и ориентации объекта, расположенного в любой точке земного шара.

Одно из существенных аппаратных отличий систем определения ориентации - необходимость обработки одним спутниковым навигационным приемником сигналов от нескольких антенн (традиционно приемники рассчитаны на подключение одной антенны). Соответствующие системы в настоящее время разрабатываются, также имеются серийные

образцы (например, фирмы Javad и красноярского радиозавода), однако алгоритмы обработки измерений не публикуются, подробных описаний результатов не приводится.

Анализ технических характеристик навигационной аппаратуры потребителей (НАП), представленной на рынке, показал присущие такой аппаратуре проблемы (особенно отечественной разработки):

- Недостаточный динамический диапазон приемного устройства;
- Длительное время получения первого отсчета местоположения;
- Неустойчивость к помехам, как индустриального происхождения, так и преднамеренным.

При этом неустойчивость к помехам приемного устройства связана с его недостаточным динамическим диапазоном. Динамический диапазон может быть повышен за счет применения современных многоразрядных быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП), это в какой-то степени повысит помехоустойчивость НАП[2].

Проблема длительного времени получения первого отсчета местоположения может быть решена при помощи различных алгоритмов быстрого поиска, например, применения метода согласованной фильтрации при обработке фазо-кодоманипулированного (ФКМ) сигнала, использования схем быстрого преобразования Фурье (БПФ) для поиска сигнала по частоте. Наибольшую сложность представляет проблема повышения помехоустойчивости аппаратуры спутниковой навигации, которая чрезвычайно актуальна для специальных пользователей (работа НАП в условиях преднамеренных помех)[3].

Способы повышения помехозащищенности

Как любое радиоприёмное устройство, навигационная аппаратура потребителя подвержена воздействию преднамеренных помех.

Навигационные приемные устройства должны проектироваться с учетом необходимости противодействия помехам, как непреднамеренным, так и организованным. Примером может быть попадание в рабочую полосу частот радиоприемного устройства высших гармонических составляющих излучения передатчиков систем связи.

Для борьбы с помехами спектр которых весьма обширный и известный применяются методы[4]:

- пространственная адаптивная фильтрация;
- применение адаптивных режекторных фильтров в рабочей полосе частот;
- использование схем компенсации помех;

- пространственная селекция сигналов и помех.

Существует ряд технических решений, реализованных в таких устройствах и алгоритмах, но как показал опыт, эффективных реализаций методов адаптивной фильтрации и пространственной селекции для широкого применения не разработано.

Несмотря на законченность существующей теории формирования адаптивных антенн, практическая реализация их связана с целым рядом трудностей, так как при разработке адаптивных приемных систем спутниковых радио-навигационных систем (СРНС) нужно учитывать[4]:

- особенности носителей аппаратуры с адаптивной антенной, ограничения по массогабаритным характеристикам для ряда пользователей СРНС и доступность элементной базы;
- диапазон частот принимаемых сигналов, требования к устойчивости и сходимости алгоритмов адаптации, влияние дестабилизирующих факторов и дискретности управляющих элементов;
- ограничения по стоимости и степень приближения к оптимальным решениям.

Современные адаптивные антенны строятся на основе адаптивных антенных решеток (ААР) в основном с цифровым управлением. Цифровая ААР в отличие от обычной антенной решетки обеспечивает[5]:

- одновременное формирование заданного числа нулей диаграмм направленности (ДН) в рабочем секторе приема (в направлении на источник помех);
- расширение мгновенного динамического диапазона аппаратуры;
- преобразование сигналов в цифровые коды с последующей цифровой и логической программной обработкой, в том числе адаптивной;
- реализацию адаптивных алгоритмов на основе многоканальной пространственной обработки сигналов.

Проблема создания ААР для НАП интенсивно исследуется в связи с ее высокой актуальностью для улучшения помехоустойчивости аппаратуры.

Методы борьбы с помехами опираются в основном на различия между полезным и помеховым сигналом.

Существует множество различных способов построения и применения адаптивных антенных систем. Наиболее эффективно они позволяют решать задачи, связанные с подавлением помех[5].

Существуют следующие виды преднамеренных помех:

- Шумовая, или иначе маскирующая помеха с шириной спектра согласованной с полосой спектра сигнала.
- Помеха со сложным законом модуляции. По эффекту воздействия подобна шумовой помехе.
- Сигнал с немодулированной несущей частотой.
- Имитационная помеха. Сигнал помехи согласованной по спектру, то есть является структурно подобным. Одним из видов имитационной помехи является ретрансляционная (переизлучение принятого сигнала). При этом НАП обнаруживает и принимает сигналы с дополнительной задержкой за счет распространения, которые изменяют результаты решения навигационной задачи или делают ее решение вообще невозможным.

В настоящее время наиболее широко используются несколько методов подавления помех[6]:

- адаптивные решетки, формирование нулей ДН. Преимущество – подавление помехи любого вида, как узкополосной, так и широкополосной. Недостаток – ограниченное число подавляемых помех, которое определяется числом элементов в антенне (степенями свободы) $N_n = N_a - 1$.
- автокомпенсаторы помех;
- адаптивная узкополосная фильтрация, которая, по сути, является реализацией режекторных фильтров.
- Адаптивная антенная система представляет собой антенную решетку с N элементами. Это позволяет сформировать нули ДН, число которых на единицу меньше, чем количество направлений в которых создаются нули диаграммы направленности.

Возможно использовать антенную решетку по общепринятому назначению – формирование ДН, максимум которой ориентирован в направлении полезного сигнала. НАП должна принимать n спутников, то есть необходимо синтезировать многолучевую ДН. Это соответствует формированию многолучевой диаграммы направленности антенной системы, каждый луч которой направлен в направлении ожидаемого прихода сигнала. При известных координатах местоположения, даты и времени углы ориентирования лучей диаграммы направленности на спутники известны.

Существуют различные схемы формирования многолучевых диаграмм. При двухмерном управлении лучами наиболее перспективно применение диаграммообразующих схем[7].

Формирование диаграммы направленности антенной системы

Устройство, в котором производится векторное сложение сигналов нескольких приёмных каналов, называется диаграммообразующим. На рис. 1 показана функциональная схема диаграммообразующего устройства(ДОУ).

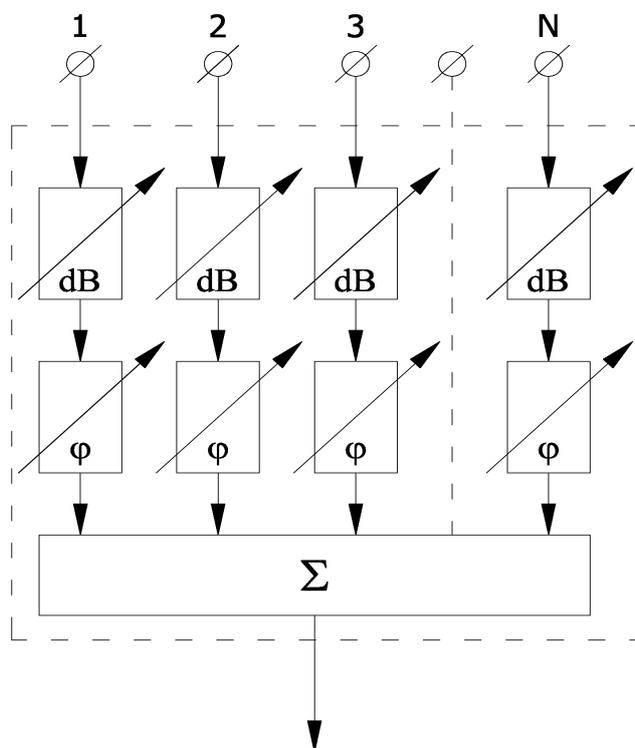


Рис. 1. Функциональная схема диаграммообразующего устройства

Применение ДОУ позволяет управлять положением диаграммы направленности антенной системы в обеих плоскостях, что в свою очередь реализует функцию пространственной селекции. Применение ДОУ позволяет уменьшить влияние мешающих сигналов за счёт снижения влияния многопутного распространения и повысить отношение сигнал/шум[5].

Объединение в рамках одного устройства нескольких ДОУ и антенных элементов позволяет реализовать многолучевую антенную систему, в которой одновременно существует несколько пространственно разнесенных диаграмм направленности с возможностью независимого управления их угловым положением. На рис. 2 показана функциональная схема многолучевой антенны с многоканальным ДОУ.

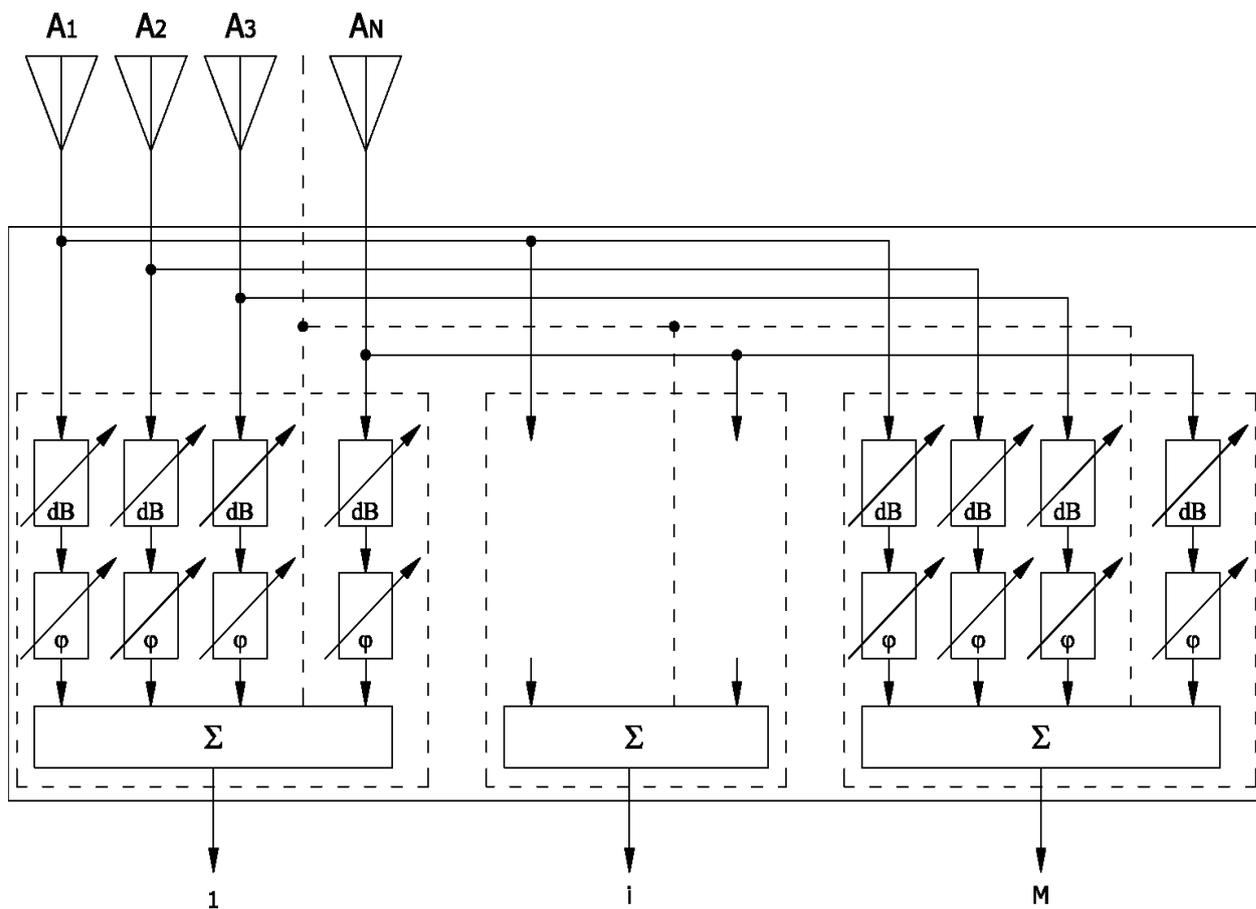


Рис. 2. Структурная схема многолучевой антенной системы с многоканальным ДОУ

Структурная схема многоканального приёмного устройства с многолучевой антенной системой показана на рис. 3.

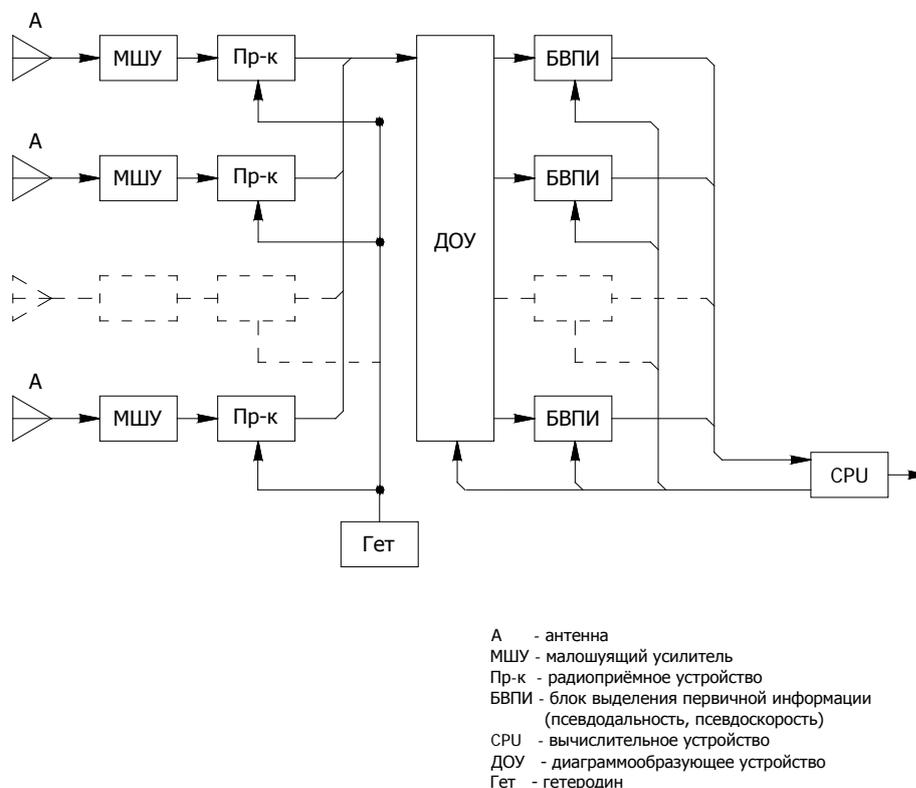


Рис. 3. Структурная схема многоканального приёмного устройства с диаграммообразующим устройством

Расчёт значений комплексных коэффициентов каналов ДОУ является тривиальной задачей – задачей формирования диаграммы направленности антенной системы, состоящей из m элементов, в заданном направлении. Эти коэффициенты определяют направление когерентного суммирования принятых сигналов.

Недостатком таких диаграммообразующих устройств является низкая точность суммирования радиосигналов на сумматоре обусловленная амплитудно-фазовыми различиями радиоканалов, которые могут быть откорректированы только при предварительной настройке. Появление амплитудно-фазовых различий радиоканалов ДОУ может быть также обусловлено условиями эксплуатации радиотехнической системы.

Эффективное применение диаграммообразующих устройств возможно только в

случае, когда коэффициенты передачи радиоприемных трактов имеют равные значения, то есть без применения схем выравнивания коэффициентов передачи трактов применение пространственной селекции в практических схемах невозможно.

Применение автокомпенсаторов помех и диаграммообразующих схем эффективно против мешающих сигналов, временная структура которых отлична от структуры полезного сигнала, и не обеспечивает достаточной эффективности защиты от структурно идентичных мешающих сигналов и помех ретрансляционного типа в том числе с уводом по дальности и скорости[7,8].

Реализация многолучевых антенных решеток невозможна без устранения амплитудно-фазовой неоднозначности приемных каналов[9].

Измерение ориентации объектов по сигналам систем ГНСС

Все современные способы решения задачи ориентирования объектов с помощью ГНСС сводятся к измерению разности фаз сигналов, принимаемых от спутника на разнесенные антенны[9,10,11].

Наиболее перспективным способом определения угловой ориентации является использование радиоинтерферометров с большой базой, где расстояние между соседними антеннами больше длины волны принимаемого сигнала. Основным источником погрешностей определения угла ориентации для данного метода являются флуктуационные и систематические ошибки измерения разности фаз принимаемых сигналов.

Суть интерферометрического способа использующего фазу несущей частоты показана на рис. 4.

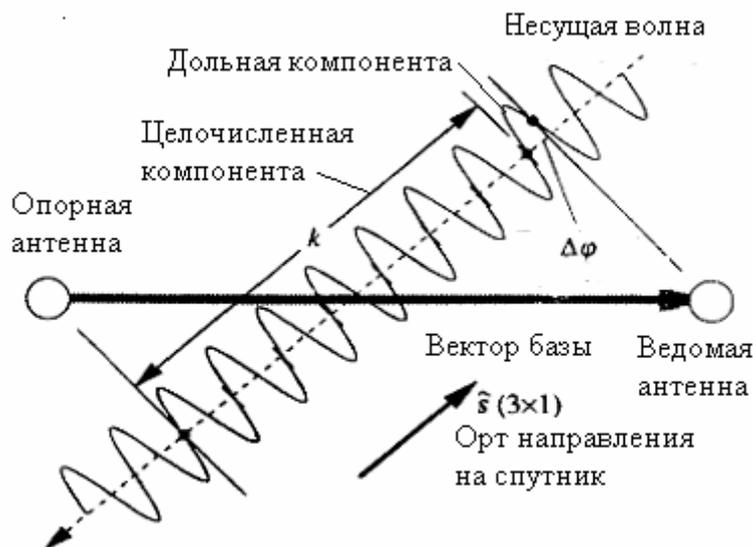


Рис. 4 Фазовый метод

Из рис. 4 видно, что полная разность фаз сигналов, принимаемых опорной и ведомой антеннами, может быть представлена в виде

$$\varphi_{ij} = \Delta\varphi_{ij} + \lambda \cdot k_{ij} + \varepsilon_{ij}, i=1 \dots m, j=1 \dots n, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi_{ij}$ – дольная часть длины волны, λ – длина несущей волны, k_{ij} – целое число волн, ε_{ij} – ошибка измерения, i – номер вектора базы, j – номер навигационного спутника. В единицах длины эта разность фаз может быть выражена также через модуль вектора базы \bar{b}^i

$$\varphi_{ij} = \left| \bar{b}^i \right| \cdot \cos \beta_{ij}, \quad (2)$$

где β_{ij} – угол между i -м вектором базы и ортом направления от антенны на j -ый спутник. Из сравнения (1) и (2) вытекает, что по величине разности фаз можно вычислить ориентацию вектора базы в плоскости, проходящей через базу антенн и местоположение спутника, относительно орта \bar{S}^j . Проблема состоит в том, что непосредственно может быть измерена только дольная часть фазы.

Присутствие в (1) целого числа длин волн приводит к неоднозначности фазовых измерений, разрешение которой представляет собой сложную задачу. Возможно использование алгоритма, где это не требуется [12].

Данная задача может быть решена несколькими способами.

На рис. 5 показаны четыре антенны А, В, С, D, два источника сигналов S1 и S2 и углы соответствующие угловым расстояниям между векторами образованными направлениями на источники излучения и векторами, образованными парами антенн.

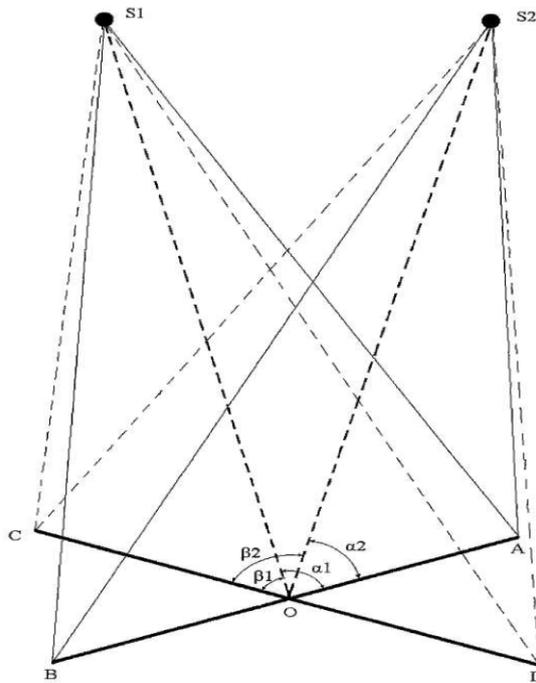


Рис. 5. Схема пеленгации источников излучения

Суть алгоритма заключается в измерении разности фаз несущей частоты для сигналов, принимаемых от спутников на разнесенные антенны. В этих разностях, обусловленных неодинаковым расстоянием до спутников, содержится информация об угле между направлением на спутники и вектором, образованным антеннами. С использованием данных об углах между направлениями на несколько спутников тремя и более антеннами с известным их расположением относительно объекта удастся решить задачу ориентации. Для решения этой задачи необходимо, чтобы антенны, в количестве не менее трех, расположенные на объекте так, чтобы они не лежали на одной прямой, принимали сигналы от спутников. В разностях фаз принимаемых сигналов содержится информация об углах между направлениями на спутники и векторами, образованными антеннами, на основе, которой с привлечением информации о расположении антенн относительно объекта, о координатах объекта, о координатах спутников решается задача ориентации. При этом достаточно принимать сигналы только от двух спутников.

Определение координат объекта достаточно с точностью единиц километров. Погрешность определения угловой ориентации, вследствие неточности знания координат объекта, будет малой, это объясняется тем, что спутники находятся на высоких орбитах (20000 км). При возможности приема одновременно нескольких сигналов от спутников (в количестве не менее четырех) измерение координат объекта можно выполнить с помощью НАП.

Пусть на объекте установлены четыре антенны A, B, C, D (антенн может быть три и более, но для простоты понимания рассмотрим четыре антенны), причем направления

векторов АВ и CD совпадают с направлением осей связанной с объектом системы координат (антенн может быть три и более, но для простоты понимания сущности предлагаемого способа рассмотрим четыре антенны, они могут располагаться на объекте произвольным образом, главное чтобы все они не лежали на одной прямой). Антенны принимают сигналы от двух спутников S1 и S2. Потом определяются углы между направлениями на спутники S1 и S2 и базами антенн АВ и CD:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \frac{\Delta\varphi_{11} \cdot \lambda_1}{2\pi \cdot d_1} & \cos \alpha_2 &= \frac{\Delta\varphi_{21} \cdot \lambda_2}{2\pi \cdot d_1} \\ \cos \beta_1 &= \frac{\Delta\varphi_{12} \cdot \lambda_1}{2\pi \cdot d_2} & \cos \beta_2 &= \frac{\Delta\varphi_{22} \cdot \lambda_2}{2\pi \cdot d_2} \end{aligned} \quad (3)$$

- угол между АВ и направлением на спутник S1;

де

- угол между АВ и направлением на спутник S2;

- гол между CD и направлением на спутник S1;

- угол между CD и направлением на спутник S2;

- длина волны сигналов излучаемым спутником S1;

- длина волны сигналов излучаемым спутником S2;

- разница фаз сигналов, принимаемых антеннами А и В от спутника S1;

- разница фаз сигналов, принимаемых антеннами А и В от спутника S2;

- разница фаз сигналов, принимаемых антеннами С и D от спутника S1;

- разница фаз сигналов, принимаемых антеннами С и D от спутника S2;

- расстояние между антеннами А и В;

- расстояние между антеннами С и D.

Зная координаты спутников $S_1(x_1, y_1, z_1)$ и $S_2(x_2, y_2, z_2)$ в базовой системе координат и примерные координаты точки $O(x, y, z)$ (определяемые с помощью НАП) в базовой системе координат, вычисляем векторы $\overline{OS1}\{x_1 - x; y_1 - y; z_1 - z\}$ и $\overline{OS2}\{x_2 - x; y_2 - y; z_2 - z\}$.

Зададим векторы, определяющие положение \overline{AB} и \overline{CD} , то есть положение двух осей связанной с объектом системы координат: $\overline{AB}\{l_1, m_1, n_1\}$, $\overline{CD}\{l_2, m_2, n_2\}$.

Запишем выражения, характеризующие углы между векторами $\overline{OS1}$, $\overline{OS2}$ и \overline{AB} , \overline{CD} :

между $\overline{OS1}$ и \overline{AB} :

$$\cos \alpha_1 = \frac{(x_1 - x) \cdot l1 + (y_1 - y) \cdot m1 + (z_1 - z) \cdot n1}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \cdot \sqrt{l1^2 + m1^2 + n1^2}} \quad (4)$$

между $\overline{OS2}$ и \overline{AB} :

$$\cos \alpha_2 = \frac{(x_2 - x) \cdot l1 + (y_2 - y) \cdot m1 + (z_2 - z) \cdot n1}{\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} \cdot \sqrt{l1^2 + m1^2 + n1^2}} \quad (5)$$

между $\overline{OS1}$ и \overline{CD} :

$$\cos \beta_1 = \frac{(x_1 - x) \cdot l2 + (y_1 - y) \cdot m2 + (z_1 - z) \cdot n2}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \cdot \sqrt{l2^2 + m2^2 + n2^2}} \quad (6)$$

между $\overline{OS2}$ и \overline{CD} :

$$\cos \beta_2 = \frac{(x_2 - x) \cdot l2 + (y_2 - y) \cdot m2 + (z_2 - z) \cdot n2}{\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} \cdot \sqrt{l2^2 + m2^2 + n2^2}} \quad (7)$$

Из условия перпендикулярности между \overline{AB} и \overline{CD} запишем:

$$l1 \cdot l2 + m1 \cdot m2 + n1 \cdot n2 = 0 \quad (8)$$

Вектора \overline{AB} и \overline{CD} имеют длины d_1 и d_2 :

$$\sqrt{l1^2 + m1^2 + n1^2} = d_1; \quad \sqrt{l2^2 + m2^2 + n2^2} = d_2; \quad (9)$$

Решая систему уравнений (21)-(26) с учетом (20), находим $l1, m1, n1$ и $l2, m2, n2$ векторов $\overline{AB}\{l1, m1, n1\}$, $\overline{CD}\{l2, m2, n2\}$, которые совпадают с осями связанной с объектом системы координат, и определяют их положение в базовой системе координат. Положение третьей оси связанной системы координат \overline{a} можно найти как векторное произведение векторов \overline{AB} и \overline{CD} :

$$\overline{a} = \{\overline{AB} \times \overline{CD}\}$$

то есть

$$\overline{a} = \{(m2 \cdot n1 - n2 \cdot m1); (l2 \cdot n1 - n2 \cdot l1); (l2 \cdot m1 - m2 \cdot l1)\}$$

Таким образом, есть три компланарных вектора \overline{AB} , \overline{CD} и \overline{a} , которые совпадают с осями связанной с объектом системы координат, и определяют ориентацию объекта относительно выбранной базовой системы координат. Отсюда можно составить матрицу направляющих косинусов, определяющую разворот связанной с объектом системы координат $O\xi\eta\zeta$ (причём положительное направление оси $O\xi$ совпадает с направлением

\overline{CD} , положительное направление оси $O\zeta$ совпадает с направлением \overline{AB} , а положительное направление оси $O\eta$ совпадает с направлением \overline{a}) относительно базовой системы координат $Oxyz$:

	x	y	z
ξ	C_{11}	C_{12}	C_{13}
η	C_{21}	C_{22}	C_{23}
ζ	C_{31}	C_{32}	C_{33}

где

$$C_{11} = \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}}$$

$$C_{12} = \frac{m_2}{\sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}}$$

$$C_{13} = \frac{n_2}{\sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}}$$

$$C_{21} = \frac{(m_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot m_1)}{\sqrt{(m_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot m_1)^2 + (l_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot l_1)^2 + (l_2 \cdot m_1 - m_2 \cdot l_1)^2}}$$

$$C_{22} = \frac{(l_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot l_1)}{\sqrt{(m_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot m_1)^2 + (l_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot l_1)^2 + (l_2 \cdot m_1 - m_2 \cdot l_1)^2}}$$

$$C_{23} = \frac{(l_2 \cdot m_1 - m_2 \cdot l_1)}{\sqrt{(m_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot m_1)^2 + (l_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot l_1)^2 + (l_2 \cdot m_1 - m_2 \cdot l_1)^2}}$$

$$C_{31} = \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}$$

$$C_{32} = \frac{m_1}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}$$

$$C_{33} = \frac{n_1}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}$$

Углы курса, тангажа и крена ψ , θ , γ объекта относительно базовой системы координат (земной системы координат) равны:

$$\psi = -\arctg\left(\frac{C_{31}}{C_{11}}\right) \quad \theta = \arctg(C_{21}) \quad \gamma = -\arctg\left(\frac{C_{23}}{C_{22}}\right)$$

Вывод аналогичного алгоритма возможен при использовании интерферометра состоящего из трех антенн не лежащих на одной прямой. Точность метода может быть повышена за счет избыточного числа КА.

Этот метод выгодно отличается от всех рассмотренных выше. Достоинство этого метода, в том, что не требуются громоздкие вычисления для устранения фазовой неоднозначности. Не требуется решение навигационной задачи. Достаточное число сопровождаемых спутников минимально – два[12].

Минусом данной системы является подверженность системы фазовым шумам. К недостаткам данного способа можно отнести необходимость получения дополнительной информации о положении объекта при наблюдении двух спутников, от инерциальной системы, либо стартовые координаты.

Макет помехозащищенного НАП ГНСС

С целью подтверждения реализуемости и практической оценки характеристик навигационной аппаратуры, разработанной с учетом применения описанных выше методов повышения помехоустойчивости и методов определения углового положения объекта, создается макет НАП с 8-и элементной антенной системой. Структурная схема макета показана на рис. 6.

Сигналы с элементов антенной системы поступают на малошумящие усилители, и переносятся на первую промежуточную частоту. Сигнал первого гетеродина формируется синтезатором частоты на кольце ФАПЧ, при этом в качестве опорного сигнала используется сигнал кварцевого термостатированного генератора.

Сигнал на первой промежуточной частоте (ПЧ) усиливается и переносится на вторую ПЧ, притом сигнал второго гетеродина формируется из сигнала первого при помощи синтезатора частоты прямого цифрового синтеза из сигнала первого гетеродина.

Далее сигнал на второй ПЧ дискретизируется при помощи массива 12-и битных аналого-цифровых преобразователей. Дальнейшая обработка сигналов производится в цифровом виде. Каналы приема реализуются в двух программируемых логических интегральных схемах Xilinx Spartan 6.

Каждый канал приема включает в себя подсистему переноса на нулевую промежуточную частоту, функционирующую по принципам, сходным с прямым

цифровым синтезом. На каждый из восьми цифровых комплексных смесителей подается сигнал цифрового гетеродина, с учетом сдвига фазы, задаваемого отдельно для различных антенных элементов. После переноса сигналы суммируются покомпонентно и поступают на коррелятор или систему быстрого поиска в зависимости от назначения данного приемного канала.

Для реализации алгоритмов определения местоположения и формирования диаграммы направленности применено вычислительное устройство на базе микропроцессора Texas Instruments OMAP.

Внешний вид платы макета представлен на рисунке 7.

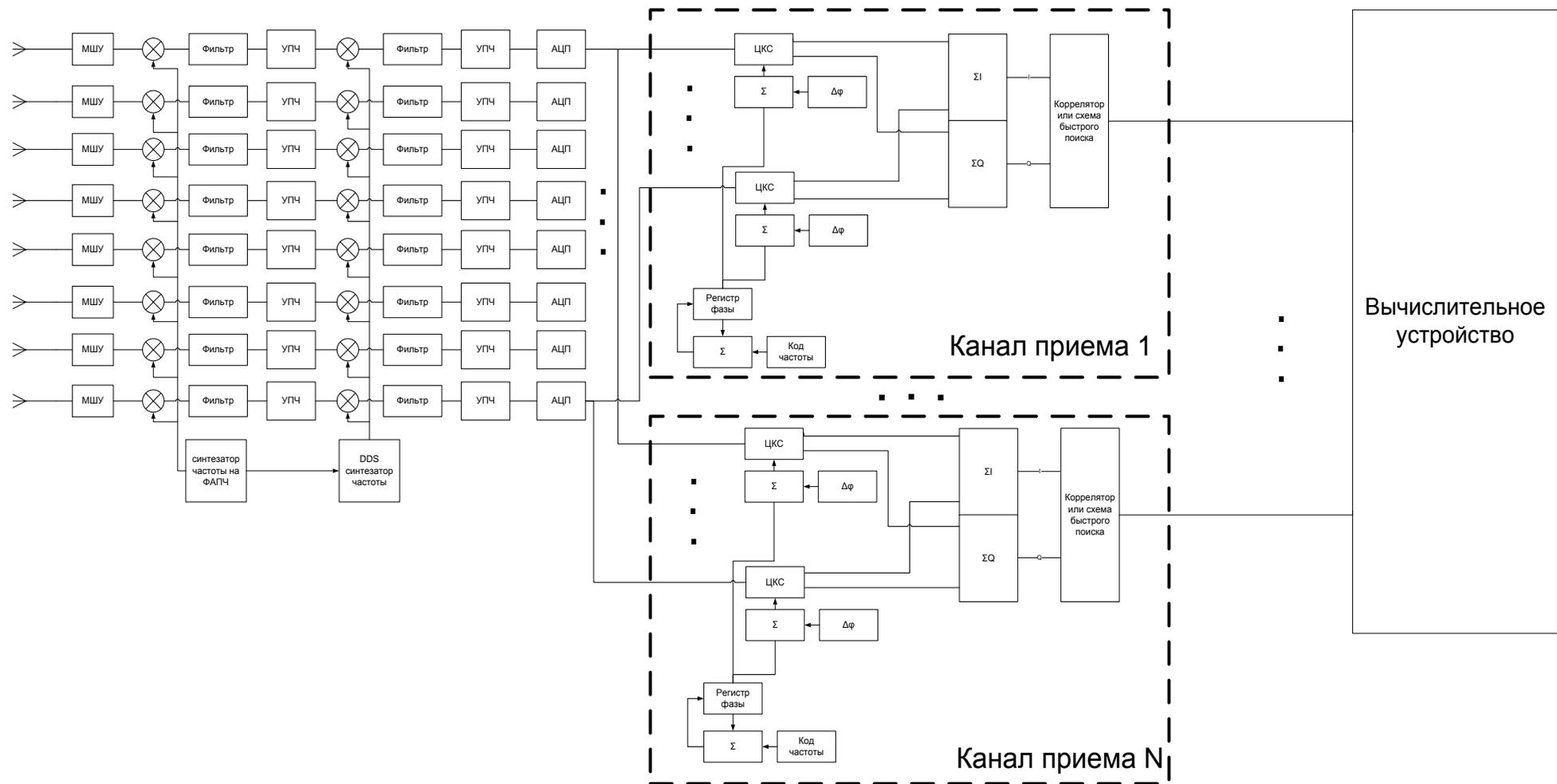


Рис. 6. Структурная схема макета НАП с 8-и элементной антенной системой.

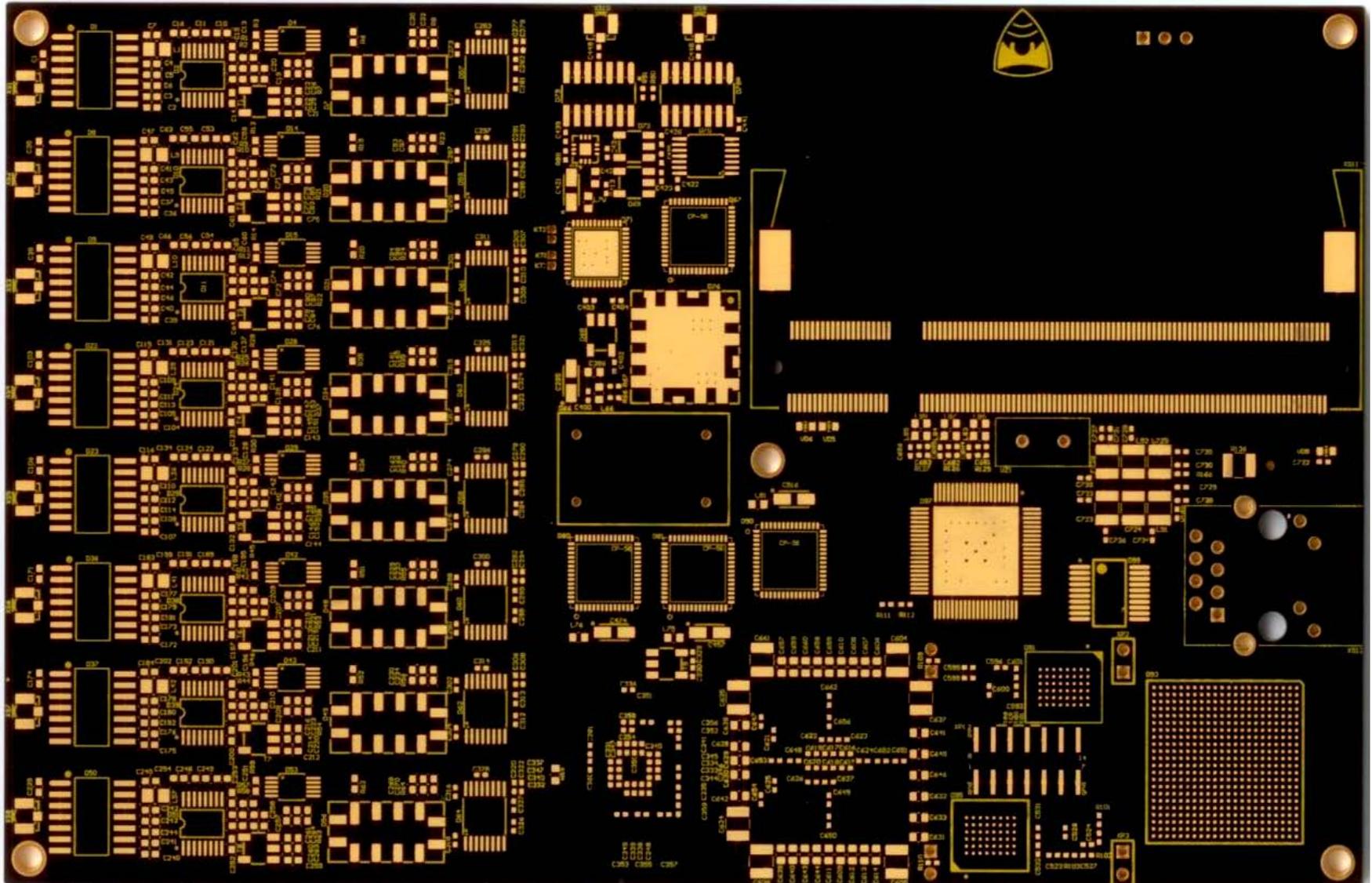


Рис. 7. Печатная плата макета НАП с 8-и элементной антенной системой.

Заключение

В работе показана возможность реализации алгоритмов определения ориентации объекта и повышения помехозащищенности в навигационной аппаратуре. Проведена разработка макета аппаратных и программных средств навигационной аппаратуры с их применением.

Разработан логический проект устройства формирования многолучевой диаграммы направленности для обработки сигналов космических радионавигационных систем на современных программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС).

Библиографический список

1. Алёшин Б.С., Веремеенко К.К., Черноморский А. И. «Ориентация и навигация подвижных объектов» // М.: издательство «ФИЗМАТЛИТ» 2006.
2. Белов В.И. «Теория фазовых измерительных систем». // Под ред. Г.Н. Глазова. -Томск: Томская государственная академия систем управления и радиоэлектроники, 1994.
3. Степанов О.А., Кошаев Д.А. «Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем» // Гироскопия и навигация. 1999. №2. С.30-55.
4. «Адаптивная компенсация помех в каналах связи» / Под. ред. Ю.И. Лосева. // М.: Радио и связь, 2000. – 208 с.
5. Монзинго Р.А., Миллер Т.У., «Адаптивные антенные решетки» // М.: Радио и Связь. 1986, 448 с.
6. «Адаптивная компенсация помех в каналах связи» / Под. ред. Ю.И. Лосева // М.: Радио и связь, 2000. – 208 с.
7. Баранов Г.Л., Скорик Е.Т., «Анализ принципов и алгоритмы построения средств автокомпенсации помех контрольно-корректирующей станции спутниковой радионавигации» // Киев, 2009 УДК 621.396.98
8. Б. Уидроу, Дж. Гловер, Дж. Кауниц и др., «Адаптивные компенсаторы помех. Принципы построения и применения» // ТИИЭР. – 1975. – № 12, т. 63. – С. 37-41.
9. Пономарев В.А., Пономарев А.В., Пономарева Т.М., Бахолдин В.С., «Разрешение неоднозначности в информационно-измерительных приборах и системах» // СПб.: ВИКУ, 2001. -164с.
10. Серегин В.В., Ющенко В.И., «Одномоментное разрешение неоднозначности фазовых измерений при определении ориентации подвижного объекта» // Гироскопия и навигация. 2004. №4. С.88.
11. Фатеев Ю.Л., « Разрешение фазовой неоднозначности в многобазовом интерферометре» // Исследовано в России. 2004. №73. С.802-811.

12. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., «Способ определения угловой ориентации объекта» // Патент RU 2276384 С2.

13. D. Williams, S. Clark, J. Clark., «Four-Element Adaptive Array Evaluation for United States Navy Airborne Applications» // ION GPS 2000, 19-22 September 2000, Salt Lake City, UT.

Зимин Алексей Сергеевич, инженер первой категории Научно-исследовательского института точных приборов, Москва, ул. Декабристов вл. 51, тел: +7 495 7375215(2035).

Креницкий Георгий Викторович, ведущий инженер, Научно-исследовательского института точных приборов, Москва, ул. Декабристов вл. 51, тел: +7 495 7375215(2035)