ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 1, с. 147–153

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 629.7.052

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ТАНГАЖА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ ПО СИГНАЛАМ РАДИОМАЯКА

© 2025 г. В. Л. Гулько[a], А. А. Мещеряков[a], Н. К. Блинковский[a,*]

[a] *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40
** e-mail: nkblink@yandex.ru*

Поступила в редакцию 19.06.2024 г.
После доработки 12.07.2024 г.
Принята к публикации 11.09.2024 г.

Рассмотрен поляризационно-модуляционный метод определения угла тангажа летательного аппарата по излученным горизонтально-поляризованным сигналам радиомаяка. Поляризационный модулятор выполнен в виде фарадеевского вращателя плоскости поляризации принятых сигналов радиомаяка и установлен в СВЧ-тракте бортовой приемной антенны. Угол тангажа определяется по фазе второй гармоники частоты вращения плоскости поляризации, содержащейся в спектре огибающей выходного сигнала приемника. Описан макет экспериментальной установки, реализующей этот метод. Приведены экспериментальные результаты измерения угла тангажа летательного аппарата и получены оценки точности измерений.

DOI: 10.31857/S0032816225010196, **EDN:** GHXDUD

1. ВВЕДЕНИЕ

В существующих системах навигации по сигналам радиомаяка (РМС) такие навигационные элементы летательного аппарата, как крен и тангаж, не измеряются [1, 2]. Традиционно в практической навигации для их измерения используются дорогостоящие бортовые автономные гироскопические системы ориентации [3], в которых с течением времени происходит постоянное накопление ошибок измерений [3, 4]. Перспективным направлением совершенствования бортового навигационного оборудования является разработка комплексных систем навигации, объединяющих в своем составе как радиотехнические, так и не радиотехнические системы определения одних и тех же навигационных элементов [4]. В работах [5, 6] предлагаются радиотехнические методы измерения навигационных элементов летательного аппарата (ЛА). Рассматриваются поляризационно-амплитудный [5] и поляризационно-модуляционный [6] методы измерения угла крена, основанные на использовании горизонтально-поляризованных сигналов радиомаяка; не исследуется возможность измерения угла тангажа ЛА. В работе [7] предложен поляризационно-амплитудный метод определения угла тангажа ЛА с использованием векторных свойств сигналов радиомаяка. Суть метода заключается в том, что радиомаяк из точки с известными координатами излучает горизонтально-поляризованные сигналы, вектор напряженности электрического поля которых лежит в горизонтальной плоскости. На борту ЛА приемная антенна осуществляет боковой по отношению к направлению движения прием сигналов радиомаяка в линейном поляризационном базисе (ЛПБ). Угол тангажа ЛА определяется по отношению амплитуд синфазных линейно-поляризованных ортогональных составляющих принятых сигналов радиомаяка с выходов плеч линейного поляризационного разделителя (ЛПР), ориентированного под углом $\pi/4$ к вертикальной и продольной строительным осям ЛА. Предложенный поляризационный метод определения тангажа ЛА имеет один существенный недостаток – бортовое приемное СВЧ-оборудование является двухканальным, что увеличивает его габариты и массу и ограничивает практическое использование метода.

В статье предложен поляризационно-модуляционный одноканальный СВЧ-метод определения угла тангажа ЛА по излученным горизонтально-поляризованным сигналам радиомаяка.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Разработка поляризационных методов определения навигационных элементов ЛА предусматривает представление излучаемых и принимаемых векторных сигналов в определенных поляризационных базисах и в нескольких системах координат [5, 6]. При этом выбор опорной системы координат (ОСК), связанной с радиомаяком, и собственной системы координат (ССК) ЛА, связанной с его строительными осями, а также выбор типа поляризационного модулятора определяется физическим смыслом решаемой задачи.

Сущность рассматриваемого метода определения угла тангажа ЛА заключается в следующем.

Поместим радиомаяк в начало декартовой системы координат (в начало неподвижной ОСК), оси OX и OZ которой лежат в горизонтальной плоскости XOZ, а ось OY перпендикулярна этой плоскости (рис. 1а). Пусть радиомаяк излучает в направлении оси OZ сигнал в виде плоской монохроматической волны горизонтальной поляризации. Представим излучаемую волну в ЛПБ, орты которого совпадают с положительными направлениями осей OX и OY, как проекцию вектора электрического поля **E** на плоскость XOY, перпендикулярную направлению распространения волны OZ. Тогда графическое представление горизонтально поляризованной волны есть вектор **E**, совпадающий с положительным направлением оси OX, находящийся в горизонтальной плоскости XOZ (рис. 1а). Представим горизонтально поляризованную волну в ЛПБ (опуская временную зависимость) вектором Джонса в виде [8]

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Предположим, что ЛА движется в направлении, перпендикулярном направлению излучения OZ. На борту ЛА приемная антенна, ось симметрии диаграммы направленности которой перпендикулярна направлению движения ЛА, осуществляет боковой прием сигналов радиомаяка (1) в ЛПБ.

Определим ССК, связанную с корпусом ЛА, как подвижную декартовую систему координат $X_C O' Y_C$, образованную продольной $O'X_C$ и вертикальной $O'Y_C$ строительными осями ЛА. Ее начало поместим в точку O', совпадающую

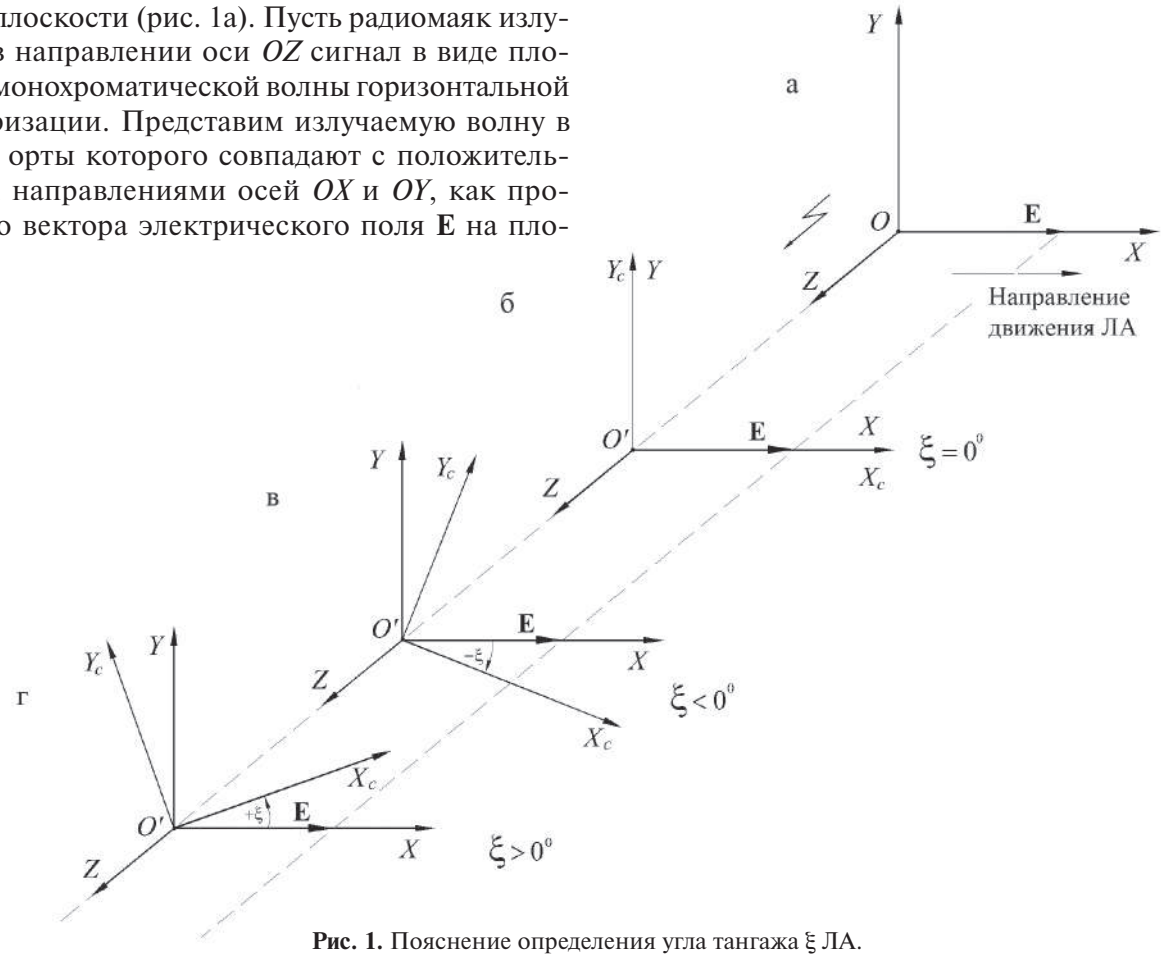

Рис. 1. Пояснение определения угла тангажа ξ ЛА.

с центром масс ЛА. Ось $O'Z$ будем считать направленной по направлению излучения OZ. Направление осей $O'X_C$ и $O'Y_C$ в плоскости XOY ОСК свяжем с углом тангажа ЛА ξ. Ось $O'Y_C$ при отсутствии тангажа примем направленной вертикально вверх и совпадающей с осью OY. Ось $O'X_C$ продольна и совпадает с осью OX ОСК. Очевидно, когда тангаж ЛА отсутствует, направления продольной оси $O'X_C$ и вектора напряженности электрического поля излучения **E** совпадают (см. рис. 1б).

В случае появления тангажа ЛА продольная ось $O'X_C$ будет повернута в ту или другую сторону в плоскости XOY. Угол между вектором **E** и направлением продольной оси $O'X_C$ составит величину, равную углу тангажа ξ, что и определяет физическую основу его измерения. При этом если продольная ось $O'X_C$ находится ниже горизонтальной плоскости XOZ, то тангаж отрицателен (–ξ) (рис. 1в), а если выше, то тангаж положителен (+ξ) (рис. 1г) [4].

Предположим, что в СВЧ-тракт приемной антенны бортового одноканального радиоприемного СВЧ-устройства установлен поляризационный модулятор в виде фарадеевского вращателя плоскости поляризации (ФВПП) принимаемых сигналов радиомаяка. Для описания взаимодействия горизонтально поляризованных сигналов радиомаяка с СВЧ-элементами бортовой приемной антенны воспользуемся формализмом векторов и матриц Джонса [8]. Тогда вектор Джонса на выходе ФВПП на борту ЛА, имеющего тангаж ±ξ, можно найти с помощью преобразований вида [9]

$$\mathbf{E}_{\text{вых}} = C\left[\Pi\right]\left[R\left(\alpha\right)\right]\left[R\left(\pm\xi\right)\right]\cdot\mathbf{E}, \qquad (2)$$

где **E** – вектор Джонса (1) излучаемой горизонтально поляризованной волны [6],

$$\left[R\left(\pm\xi\right)\right] = \begin{bmatrix} \cos\xi & \pm\sin\xi \\ \mp\sin\xi & \cos\xi \end{bmatrix} -$$

оператор поворота на угол тангажа ±ξ; +ξ – положительный угол тангажа ЛА, когда продольная ось $O'X_C$ ЛА находится выше горизонтальной плоскости XOZ [4], –ξ – отрицательный угол тангажа ЛА, когда продольная ось $O'X_C$ ЛА находится ниже горизонтальной плоскости XOZ [4],

$$\left[R\left(\alpha\right)\right] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} -$$

оператор ФВПП на угол $\alpha = \Omega t$ (Ω – частота вращения) [10],

$$\left[\Pi\right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} -$$

оператор поляризатора [6] (переход с круглого волновода на прямоугольный) с горизонтальной собственной поляризацией, совпадающей с продольной осью $O'X_C$ ЛА, C – постоянная величина, учитывающая потенциал передатчика радиомаяка, расстояние от передатчика до ЛА и чувствительность приемника.

Проделав в формуле (2) необходимые матричные преобразования, получим

$$\mathbf{E}_{\text{вых}} = C\begin{bmatrix} \cos\left(\alpha\pm\xi\right) \\ 0 \end{bmatrix}. \qquad (3)$$

С учетом формулы (3) сигнал на входе приемника как функцию угла ориентации α плоскости поляризации можно описать выражением

$$\mathbf{E}_{\text{вх}}\left(\alpha\right) = C\cos\left(\alpha\pm\xi\right). \qquad (4)$$

Амплитуда сигнала на выходе приемника с логарифмической амплитудной характеристикой и линейным детектором равна

$$A\left(\alpha\right) = \lg C + \lg\left|\cos\left(\alpha\pm\xi\right)\right|. \qquad (5)$$

После преобразований выражения (5) с учетом того, что уровень сигнала в случае логарифмического приемника обычно измеряется в децибелах, при $\alpha = \Omega t$ получим

$$A(\Omega t)[\text{дБ}] = 20\lg C + 10\lg\{0.5[1 + \cos(2\Omega t \pm 2\xi)]\}. \qquad (6)$$

Соотношение (6) позволяет рассчитать зависимость амплитуды выходного сигнала логарифмического приемника от углового положения плоскости поляризации α для различных значений угла тангажа ξ. Результаты расчета приведены на рис. 2. Кривые *1–3* соответствуют значениям угла тангажа ξ, равным 0, 15°, –15°.

На рис. 2 видно, что амплитуда сигнала на выходе приемника промодулирована удвоенной частотой вращения плоскости поляризации принятых сигналов радиомаяка, причем амплитудная модуляция сигнала достигает 100% глубины.

При этом угол тангажа не влияет на форму этой зависимости и на глубину амплитудной модуляции, а определяет только ее сдвиг по фазе на удвоенный угол тангажа ЛА. Поэтому в спектре огибающей выходного сигнала логарифмического приемника присутствует спектральная составляющая на частоте 2Ω. Ее амплитуду $A_{2\Omega}$ можно найти с помощью преобразования Фурье вида

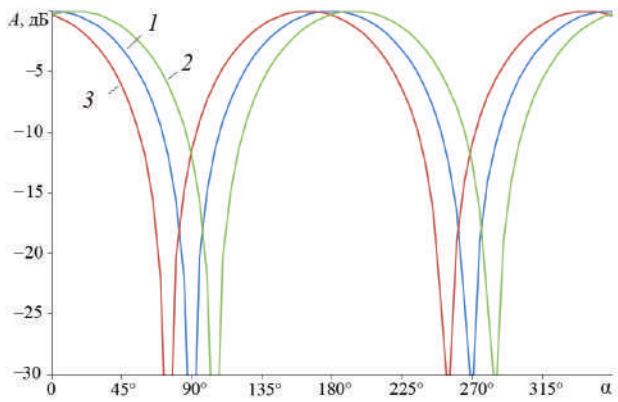

Рис. 2. Зависимости амплитуды выходного сигнала логарифмического приемника от угла ориентации плоскости поляризации α принятых сигналов при тангаже ξ, равном: 0 – кривая *1*, 15° – кривая *2*, −15° – кривая *3*.

$$A_{2\Omega}\left[\text{дБ}\right]=\frac{1}{\pi}\cdot\int_{0}^{2\pi}A\left(\Omega t\right)\cos 2\Omega t d\left(\Omega t\right), \qquad (7)$$

т. е. $A_{2\Omega}$ = 8.69 дБ ($A_{2\Omega}$ не зависит от угла тангажа ЛА), фаза $\varphi_{2\Omega}$ с учетом формулы (6) связана с углом тангажа ξ ЛА соотношением

$$\xi\left[\text{рад}\right]=\pm\frac{\varphi_{2\Omega}}{2}, \qquad (8)$$

где знак “+” соответствует положительному углу тангажа ξ, а знак “–” – отрицательному углу тангажа ξ.

Фаза $\varphi_{2\Omega}$ отсчитывается относительно фазы опорного сигнала, определяемой угловым положением плоскости поляризации принятого сигнала радиомаяка.

Необходимо также отметить, что с учетом формулы (6) амплитуда $A_{2\Omega}$ и фаза $\varphi_{2\Omega}$ спектральной составляющей на частоте 2Ω не зависят от потенциала передатчика, чувствительности приемника и расстояния от ЛА до радиомаяка. Энергетические параметры определяют постоянную составляющую сигнала на выходе бортового логарифмического устройства.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАКЕТ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛЯЦИОННОЙ РМС

Для проверки результатов теоретических исследований и получения экспериментальных оценок точности определения угла тангажа ξ был создан макет поляризационно-модуляционной РМС. Функциональная схема макета приведена на рис. 3. Макет включал в себя наземный радиомаяк, расположенный в точке с известными координатами, а также бортовое приемное оборудование, реализованное на базе самолетной РЛС “Гроза-26”, работающей в пассивном режиме приема сигналов радиомаяка.

Наземный радиомаяк включал в себя передатчик (ПРД), первое и второе вращающиеся

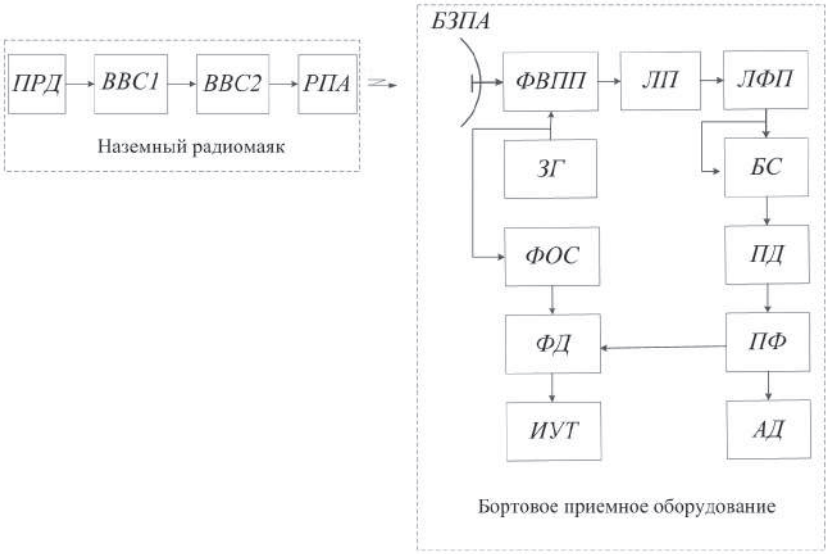

Рис. 3. Функциональная схема макета поляризационно-модуляционной РМС для определения угла тангажа: ПРД – передатчик, ВВС1 и ВВС2 – первое и второе волноводные вращающиеся сочленения, РПА – рупорная передающая антенна, БЗПА – бортовая зеркальная приемная антенна, ФВПП – фарадеевский вращатель плоскости поляризации, ЛФП – логарифмический приемник, ЗГ – задающий генератор, БС –блок стробирования, ФОС – формирователь опорного сигнала, ПД – пиковый детектор, ФД – фазовый детектор, ПФ – полосовой фильтр, ИУТ – индикатор угла тангажа ЛА, АД – амплитудный детектор, ЛП – линейный поляризатор.

волноводные сочленения (ВВС1, ВВС2) и рупорную передающую антенну (РПА). ПРД представлял собой стандартный высокочастотный генератор сигналов типа Г4-83, работающий в импульсном режиме. Частота следования импульсов F_n равнялась 400 Гц, а длительность импульсов τ_n – 3.5 мкс. Величина несущей частоты f_n составляла 9370 МГц. Мощность излучения P_n равнялась 10 мВт. ВВС1 позволяло изменять направление излучения в горизонтальной плоскости, а ВВС2 – устанавливать угол наклона плоскости поляризации излучаемых сигналов через 1° в вертикальной плоскости для имитации изменения угла тангажа ЛА.

РПА радиомаяка имела горизонтальную собственную поляризацию с эффективной площадью раскрыва 80 см^2. Внешний вид макета наземного радиомаяка представлен на рис. 4.

Для реализации предложенного поляризационно-модуляционного метода штатный облучатель с ФВПП бортовой зеркальной приемной антенны (БЗПА) РЛС “Гроза-26” (рис. 5) работал в режиме непрерывного вращения плоскости поляризации с частотой $\Omega = 20$ Гц принятых сигналов радиомаяка.

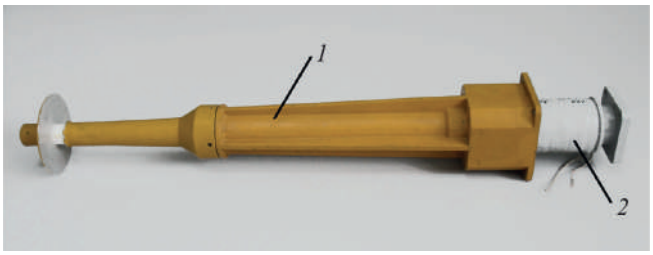

Рис. 5. Внешний вид штатного облучателя БЗПА с ФВПП: *1* – облучатель БЗПА, *2* – ФВПП.

БЗПА имела ширину диаграммы направленности 3° и представляла собой параболическое зеркало диаметром 760 мм. Коэффициент усиления антенны равнялся 25 дБ, а чувствительность логарифмического приемника – 120 дБ/Вт. Внешний вид макета бортового оборудования поляризационно-модуляционной РМС представлен на рис. 6.

Наземный радиомаяк излучал горизонтально линейно-поляризованные электромагнитные волны. Начальное положение вектора напряженности электрического поля **E** излучаемых волн совпадало с горизонтальной плоскостью. Направление излучения в горизонтальной плоскости устанавливалось с помощью ВВС1.

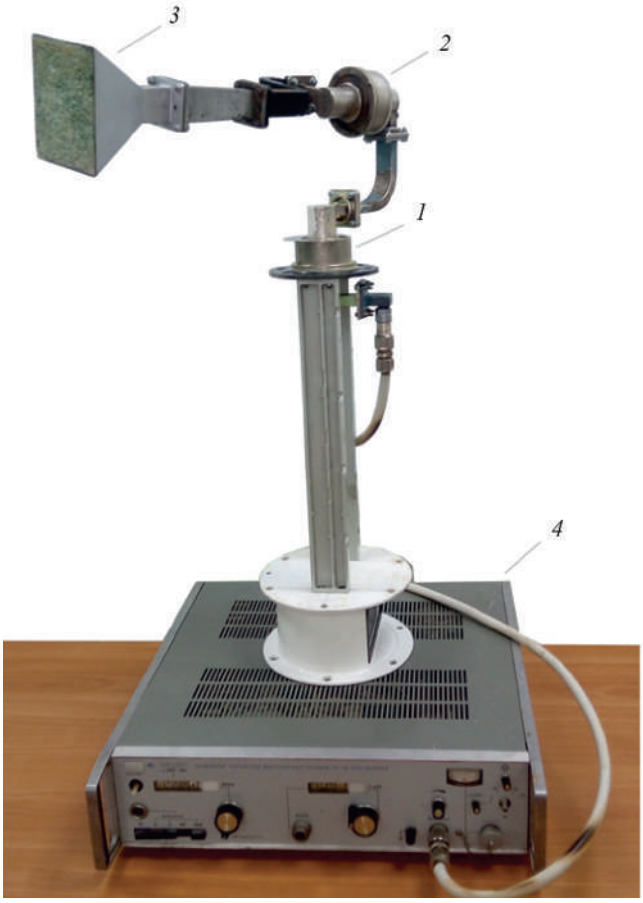

Рис. 4. Внешний вид макета наземного радиомаяка: *1* – ВВС1, *2* – ВВС2, *3* – РПА, *4* – ПРД (Г4-83).

Рис. 6. Внешний вид макета бортового оборудования поляризационно-модуляционной РМС.

Прием сигналов наземного радиомаяка осуществлялся БЗПА, с выхода которой сигнал поступал на вход ФВПП. Частота вращения плоскости поляризации Ω задавалась частотой ЗГ. С выхода ФВПП, представляющего собой переход с волновода круглого сечения на волновод прямоугольного сечения с горизонтальной собственной поляризацией сигнал поступал на вход ЛП. С выхода ЛП со стороны прямоугольного волновода сигнал поступал на вход ЛФП.

В результате вращения плоскости поляризации с частотой Ω на выходе ЛФП формировалась последовательность импульсов, модулированных по амплитуде удвоенной частотой вращения плоскости поляризации 2Ω. С выхода ЛФП сигнал поступал на БС и далее на ПД, где осуществлялось запоминание амплитуды сигнала на период повторения излучаемых импульсов. В полосовом фильтре ПФ выделялась спектральная составляющая на частоте 2Ω, содержащаяся в спектре огибающей выходного сигнала ЛФП. Ее фаза $\varphi_{2\Omega}$ измерялась в ФД относительно фазы опорного сигнала cos $2\Omega t$, поступающего из ФОС. В АД измерялась амплитуда спектральной составляющей $A_{2\Omega}$, а значение угла тангажа ξ, определенного по фазе спектральной составляющей $\varphi_{2\Omega}$, выводилось на индикатор угла тангажа.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проверки работоспособности предложенного метода измерения угла тангажа эксперимент проводился на наземной наклонной трассе протяженностью 1300 м. Макет радиомаяка располагался на земной поверхности. Макет бортового приемного оборудования был установлен на высоте 18 м. Приемная бортовая антенна БЗПА была наведена на радиомаяк.

Имитация изменения угла тангажа ЛА осуществлялась путем поворота угла ориентации плоскости поляризации излучаемых сигналов. Угол ориентации плоскости поляризации задавался ВВС2 с шагом 1° в пределах ±15° относительно исходного положения, соответствующего горизонтальной ориентации плоскости поляризации. Горизонтальное положение вектора электрического поля **E** излучаемых сигналов соответствовало нулевому значению угла тангажа.

Измерение фазы $\varphi_{2\Omega}$ проводилось для каждого углового положения плоскости поляризации излучаемых сигналов в течение тридцатисекундного интервала времени с последующим усреднением. При этом фиксировались средний уровень принятых сигналов и амплитуда спектральной составляющей $A_{2\Omega}$.

Результаты измерений $\varphi_{2\Omega}$ при изменении угла тангажа приведены на рис. 7 (кривая *2*). На этом же рисунке представлена теоретическая зависимость (кривая *1*), полученная в соответствии с выражением (8). Среднеквадратическое отклонение измеренного угла тангажа от заданного составило $\sigma_\xi = 0.92°$.

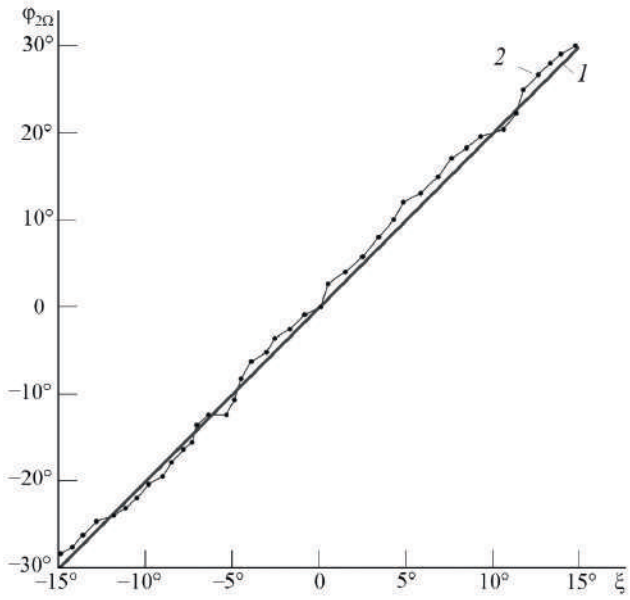

Рис. 7. Зависимости фазы $\varphi_{2\Omega}$ от угла тангажа ξ: *1* – теория, *2* – эксперимент.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен и опробован поляризационно-модуляционный метод измерения угла тангажа ЛА по горизонтально-поляризованным сигналам наземного радиомаяка.

2. Теоретически исследована и экспериментально подтверждена связь фазы спектральной составляющей на частоте 2Ω, содержащейся в спектре огибающей принятых сигналов, с углом тангажа для исследуемого поляризационного модулятора в виде ФВПП.

3. С помощью созданного макета поляризационно-модуляционной РМС получены экспериментальные оценки точности измерения угла тангажа.

4. Метод может найти применение в системах ориентации ЛА при заходе на посадку,

а совместное его использование с инерциальными средствами навигации позволит повысить достоверность получаемой навигационной информации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FEWM-2023-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Skrypnik O.N.* Radio Navigation Systems for Airports and Airways. Singapore: Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7201-8
2. *Bestugin A.R., Eshenko A.A., Filin A.D., Plyasovskikh A.P., Shatrakov A.Y., Shatrakov Y.G.* Air Traffic Control Automated Systems. Singapore: Springer, 2019.
3. *Пельпор Д.С., Ягодкин В.В.* Гироскопические системы. Ч. 1: Системы ориентации и навигации. М.: Высшая школа, 1977.
4. *Ярлыков М.С.* Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985.
5. *Гулько В.Л., Мещеряков А.А.* // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 2. С. 81.
6. *Гулько В.Л., Мещеряков А.А.* // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 5. С. 412.
7. *Gulko V.L., Mescheryakov A.A.* // Telecommunications and Radio Engineering. 2022. V. 81. № 1. P. 33. https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.2022038430
8. *Аззам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
9. *Гулько В.Л.* РФ. Патент № 2521137 РФ, 2014.
10. *Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И.* Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.