

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 629.7.052

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА КРЕНА
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

© 2022 г. В. Л. Гулько^а, А. А. Мещеряков^{а,*}, Н. К. Блинковский^а

^а Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40

*e-mail: msch@rts.tusur.ru

Поступила в редакцию 20.01.2022 г.

После доработки 26.01.2022 г.

Принята к публикации 04.02.2022 г.

Для определения угла крена летательного аппарата по пассивному поляризационно-анизотропному радиолокационному уголкового отражателю с горизонтальной собственной поляризацией используются поляризационно-модулированные по углу ориентации плоскости поляризации зондирующие сигналы. Оценка угла крена летательного аппарата осуществляется на выходе приемника по фазе спектральной составляющей на удвоенной частоте вращения плоскости поляризации излучаемых сигналов, содержащейся в спектре огибающей принятых сигналов. Описан макет экспериментальной установки, реализующий этот метод. Приведены экспериментальные результаты измерения угла крена летательного аппарата. Среднеквадратичная ошибка измерения угла крена составила 0.98° .

DOI: 10.31857/S0032816222040048

ВВЕДЕНИЕ

Известные методы измерения угла крена летательного аппарата (л.а.) основаны на использовании инерциальных систем навигации, в частности гироскопических систем ориентации [1–4]. Таким методам измерения и реализующим их устройствам присущ ряд недостатков. Во-первых, с течением времени происходит постоянное накопление ошибки измерений, и за один час полета она составляет несколько единиц градусов [2, 3]. Во-вторых, если л.а. развивает значительные перегрузки, то происходит увеличение собственной скорости прецессии гироскопа, что в ряде случаев может приводить к полной потере его работоспособности [2].

В настоящей работе рассматривается радиолокационный метод измерения угла крена л.а. по пассивному радиомаяку в виде поляризационно-анизотропного уголкового отражателя с заданными поляризационными характеристиками рассеяния с использованием поляризационно-модулированных по углу ориентации плоскости поляризации зондирующих сигналов.

Использование поляризационных характеристик рассеяния пассивного радиомаяка для оценки угла крена л.а. обуславливает необходимость их рассмотрения в конкретных поляризационных базисах и в различных системах координат, связанных с радиомаяком и л.а. При этом выбор

опорной системы координат (о.с.к.), связанной с радиомаяком, собственной системы координат (с.с.к.), связанной со строительными осями л.а., а также алгоритма обработки поляризационно-модулированных принятых сигналов определяется как особенностями решаемой технической задачи, так и удобством анализа с точки зрения физической интерпретации полученных результатов.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Суть радиолокационного метода определения угла крена л.а. заключается в следующем.

Расположим в точке O с известными координатами пассивный радиомаяк в виде поляризационно-анизотропного радиолокационного отражателя с горизонтальной собственной поляризацией (рис. 1). Радиолокационный отражатель выполнен в виде трехгранного уголкового отражателя (UO), состоящего из трех плоских взаимно перпендикулярных металлических или металлизированных треугольных граней одинакового размера, значительно превышающего длину волны. Введем декартову о.с.к., оси OX и OZ которой находятся в горизонтальной плоскости XOZ , а ось OY перпендикулярна ей. Вершину UO поместим в начало о.с.к. — точку O (см. рис. 1). Известно [5, 6], что для придания поляризационно-изотропному трехгранному UO поляризационно-анизотропных свойств с горизонтальной соб-

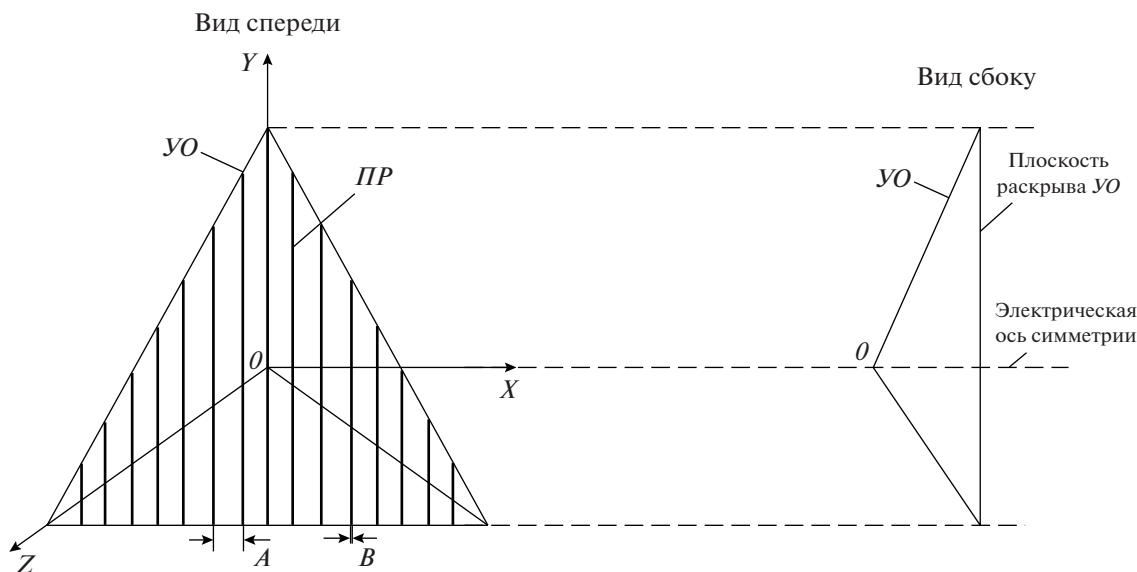


Рис. 1. Поляризационно-анизотропный радиолокационный отражатель. УО – трехгранный уголкового отражатель с треугольными гранями; ПП – поляризационная решетка.

ственной поляризацией необходимо в раскрытие УО разместить вертикально ориентированную поляризационную решетку (ПП) из параллельных металлических стержней (или проволок) с шагом A и диаметром стержней B . Параметры A и B поляризационной решетки выбираются такими [5, 6], чтобы составляющая вектора напряженности электрического поля падающей электромагнитной волны, плоскость поляризации которой ортогональна стержням решетки (проводам), пройдя через ПП, практически не изменялась. После трехкратного отражения от граней УО электромагнитная волна распространяется в направлении, обратном направлению падения. При этом отраженная электромагнитная волна всегда горизонтально поляризована, независимо от угла ориентации плоскости поляризации падающей волны, и ее фазовый центр рассеяния находится в вершине УО, расположенной в точке O [5].

В то же время составляющая вектора напряженности электрического поля, плоскость поляризации которой параллельна стержням (или проволокам), находится в вертикальной плоскости и полностью отражается от ПП, как от плоской металлической пластины [5]. Таким образом, трехгранный УО с размещенной в плоскости раскрытия вертикально ориентированной ПП рассматривается как поляризационно-анизотропный объект с горизонтальной собственной поляризацией, которая всегда совпадает с горизонтальной плоскостью XOZ . Его матрица рассеяния в собственной о.с.к. в линейном поляризационном базисе может быть представлена в виде [6–8]:

$$[S] = \sqrt{\sigma_m} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\sigma_m = \lambda_1^2$ – максимально возможная эффективная поверхность рассеяния поляризационно-анизотропного трехгранного УО при облучении его горизонтально поляризованной электромагнитной волной. Максимум эффективной поверхности рассеяния совпадает с электрической осью симметрии, проходящей через вершину УО в точке O перпендикулярно плоскости раскрытия. λ_1 – модуль собственного числа матрицы рассеяния.

Из формулы (1) следует, что в собственной о.с.к. вырожденная матрица рассеяния трехгранного УО, в раскрытие которого помещена вертикально ориентированная ПП, в линейном поляризационном базисе эквивалентна матрице рассеяния ярко выраженного поляризационно-анизотропного радиолокационного объекта, представляющего собой горизонтальный вибратор [8].

Рассмотрим случай, когда с борта л.а. поляризационно-анизотропный УО с матрицей рассеяния (1) облучается линейно поляризованной электромагнитной волной, вектор напряженности электрического поля которой вращается с частотой Ω . Тогда отраженная от граней трехгранного УО электромагнитная волна, независимо от угла ориентации плоскости поляризации падающей волны, будет всегда иметь горизонтальную поляризацию, вектор напряженности электрического поля \vec{E}_r , которой совпадает с осью OX о.с.к. и находится в горизонтальной плоскости XOZ (рис. 2а). При этом максимум амплитуды отраженной от УО волны будет наблюдаться при сов-

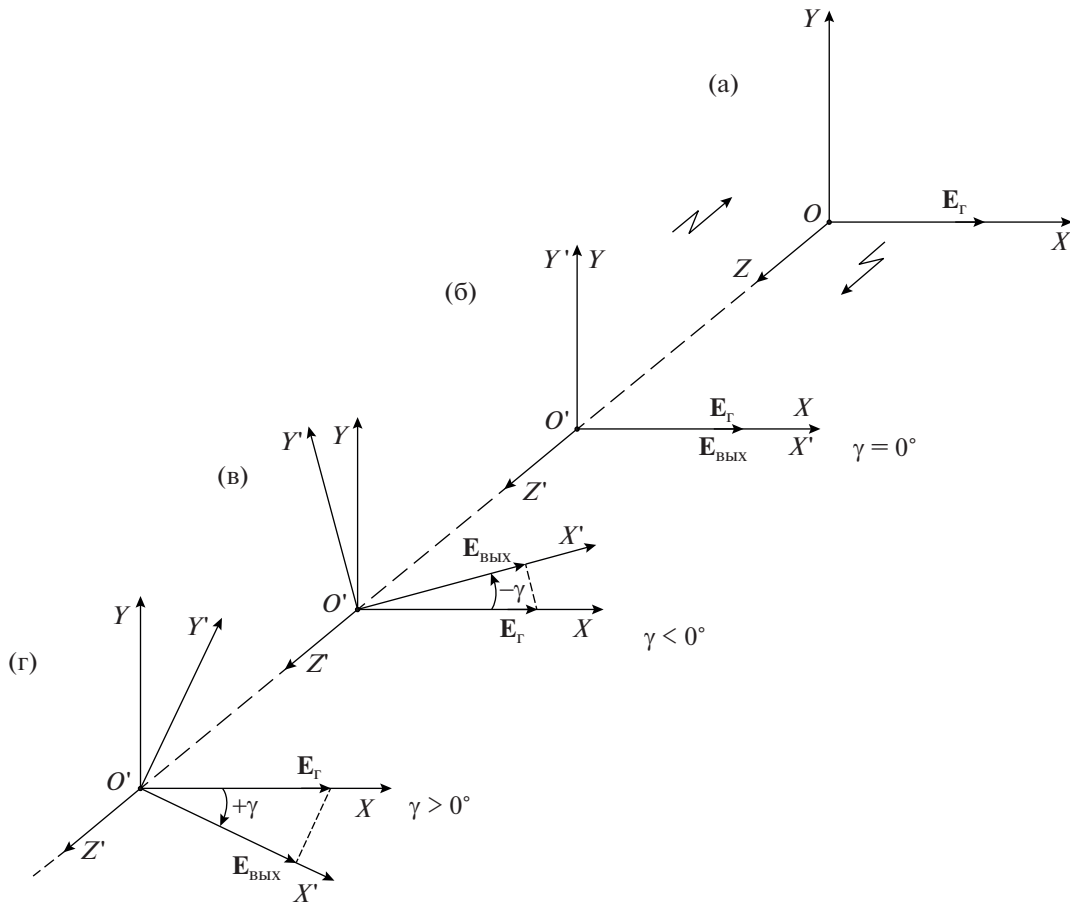


Рис. 2. К пояснению определения угла крена γ л.а.

падении горизонтальной линейной поляризации излученной электромагнитной волны с собственной горизонтальной линейной поляризацией поляризационно-анизотропного УО, которая всегда находится в горизонтальной плоскости XOZ . Минимум амплитуды будет наблюдаться при вертикальной ориентации плоскости поляризации излученной электромагнитной волны. Тогда за полный оборот вращения плоскости поляризации излученной волны с частотой Ω амплитуда отраженной от УО и соответственно принятой на борту л.а. волны будет промодулирована с частотой 2Ω .

Пусть л.а. находится в точке O' и движется в направлении на пассивный радиомаяк, и его углы тангажа и рыскания равны нулю. Определим с.с.к., связанную с корпусом л.а., как подвижную декартову систему координат $X'O'Y'$, образованную поперечной $O'X'$, вертикальной $O'Y'$ и продольной $O'Z'$ строительными осями л.а. Начало ее поместим в точку O' , совпадающую с центром масс л.а. Очевидно, что когда крен л.а. отсутствует, т.е. $\gamma = 0$, направление правой поперечной полуоси $O'X'$ и положительное направление оси OX совпадают с направлением вектора электриче-

ского поля E_Γ отраженной от УО электромагнитной волны, и они лежат в горизонтальной плоскости XOZ (рис. 2б). Соответственно, излученная горизонтально линейно поляризованная электромагнитная волна и принятая на борту л.а. электромагнитная волна с вектором E_Γ совпадают по поляризации и также находятся в горизонтальной плоскости XOZ .

Когда $\gamma \neq 0$, правая поперечная полуось $O'X'$ л.а. будет повернута против часовой или по часовой стрелке в плоскости XOY на угол, равный углу крена $\pm\gamma$ (рис. 2в и 2г). Таким образом, возникновение крена л.а. эквивалентно операции поворота с.с.к. в ту или другую сторону на угол $\pm\gamma$ относительно о.с.к. в плоскости XOY . Сама операция поворота с.с.к. может быть определена с помощью соответствующих операторов поворота [6, 7], которые будут рассмотрены ниже.

Пусть л.а. имеет в общем случае крен $\pm\gamma$. Тогда, используя формализм векторов и матриц Джонса [9], найдем вектор Джонса на выходе линейного поляризатора в линейном поляризационном базисе с помощью преобразований вида [10]:

$$\mathbf{E}_{\text{вых}} = C\{\Pi\}[R(-\alpha)][R(\mp\gamma)][S][R(\pm\gamma)][R(\alpha)]\mathbf{E}\}, \quad (2)$$

где $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ – вектор Джонса исходной горизонтально линейно поляризованной, излучаемой передатчиком электромагнитной волны, совпадающей с правой поперечной полуосью $O'X'$ л.а.; $[R(\alpha)] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$ – оператор вращателя линейной плоскости поляризации излученной электромагнитной волны на угол $\alpha = \Omega t$ (Ω – частота вращения, t – время) [9]; $[R(\pm\gamma)] = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \pm\sin\gamma \\ \mp\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}$ – прямой оператор поворота на угол крена $\pm\gamma$ л.а.; $+\gamma$ – положительный угол крена, когда правое крыло или правая поперечная полуось $O'X'$ л.а. находится ниже горизонтальной плоскости XOZ [4]; $-\gamma$ – отрицательный угол крена, когда правое крыло или правая поперечная полуось $O'X'$ л.а. находится выше горизонтальной плоскости XOZ [4]; $[S] = \sqrt{\sigma_m} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ – матрица рассеяния поляризационно-анизотропного трехгранного YO с горизонтальной линейной собственной поляризацией (1), всегда совпадающей с горизонтальной плоскостью XOZ ; $[R(\mp\gamma)] = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \mp\sin\gamma \\ \pm\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}$ – обратный оператор поворота на угол крена $\mp\gamma$ л.а.; $[R(-\alpha)] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$ – оператор вращателя плоскости поляризации принимаемой на борту л.а. электромагнитной волны на угол $-\alpha$; $[\Pi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ – оператор линейного поляризатора (переход с круглого волновода на прямоугольный волновод) с горизонтальной линейной собственной поляризацией, совпадающей с правой поперечной полуосью $O'X'$ л.а.; C – постоянная величина, учитывающая потенциал передатчика, расстояние от передатчика до поляризационно-анизотропного YO и обратно, его максимально возможную эффективную поверхность рассеяния σ_m и чувствительность приемника.

Выполнив в формуле (2) необходимые матричные преобразования, получим вектор Джонса на выходе линейного поляризатора в виде:

$$\mathbf{E}_{\text{вых}} = C \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha \pm \gamma) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Тогда сигнал непосредственно на входе приемника будет иметь вид:

$$E_{\text{вх}} = C \cos^2(\alpha \pm \gamma). \quad (4)$$

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

$$A(\alpha) = \lg C + \lg |\cos^2(\alpha \pm \gamma)|. \quad (5)$$

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

$$A(\Omega t) [\text{дБ}] = 20 \lg C + 20 \lg \left\{ \frac{1}{2} (1 + \cos(2\Omega t \pm 2\gamma)) \right\}. \quad (6)$$

Соотношение (6) позволяет рассчитать зависимость амплитуды выходного сигнала логарифмического приемника от углового положения α плоскости поляризации излучаемого сигнала для различных значений угла крена γ . Результаты расчета приведены на рис. 3. Кривые 1–3 соответствуют значениям угла крена γ , равным $0, 15^\circ, -15^\circ$.

Согласно рис. 3, амплитуда сигнала на выходе приемника промодулирована удвоенной частотой вращения плоскости поляризации излучаемого сигнала. При этом амплитудная модуляция сигнала достигает 100%-ной глубины и не зависит от крена γ л.а., а сдвиг сигнала по фазе определяет удвоенный угол крена γ л.а. Поэтому в спектре огибающей выходного сигнала логарифмического приемника присутствует спектральная составляющая на частоте 2Ω . Ее амплитуду $A_{2\Omega}$ с учетом формулы (6) можно найти с помощью фурье-преобразования вида:

$$A_{2\Omega} [\text{дБ}] = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} A(\Omega t) \cos 2\Omega t d(\Omega t), \quad (7)$$

и она будет равна $A_{2\Omega} = 17.37$ дБ и не будет зависеть от угла крена, а ее фаза $\varphi_{2\Omega}$, с учетом формулы (6), связана с углом крена γ л.а. соотношением:

$$\gamma [\text{рад}] = \pm \frac{\varphi_{2\Omega}}{2}, \quad (8)$$

где знак “+” соответствует положительному углу крена γ , знак “–” – отрицательному.

Фаза $\varphi_{2\Omega}$ отсчитывается относительно фазы опорного сигнала $\cos(2\Omega t)$, определяемой угловым положением плоскости поляризации излучаемого сигнала.

Необходимо также отметить, что амплитуда $A_{2\Omega}$ и фаза $\varphi_{2\Omega}$ не зависят от потенциала передатчика, чувствительности приемника и расстояния от л.а. до пассивного радиомаяка и его эффективной поверхности рассеяния. Энергетические параметры определяют постоянную составляющую сигнала на выходе логарифмического приемника бортовой радиолокационной станции (р.л.с.).

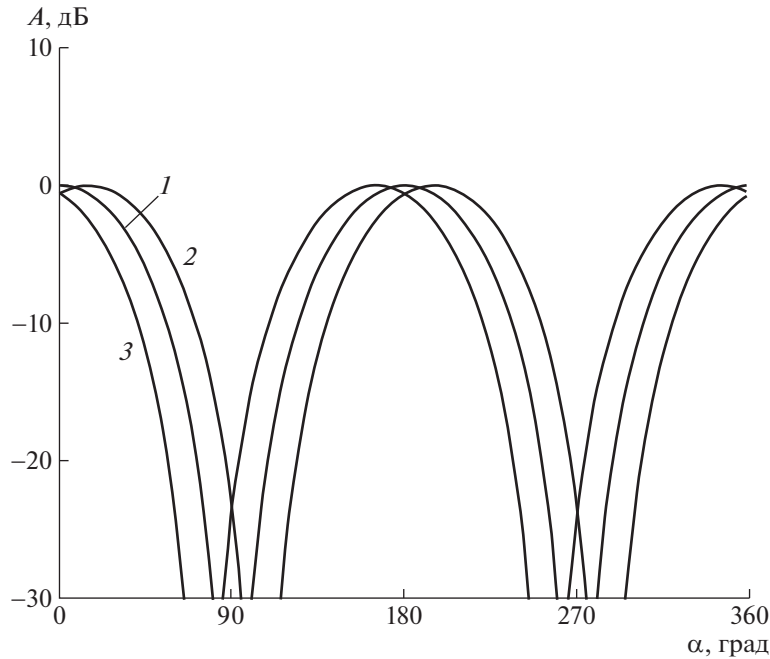


Рис. 3. Зависимости амплитуды выходного сигнала логарифмического приемника от угла ориентации α плоскости поляризации излучаемых сигналов при углах крена γ : 0° (1), 15° (2) и -15° (3).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛЯЦИОННОЙ Р.Л.С.

С целью проверки результатов теоретических исследований и получения экспериментальных оценок точности определения угла крена γ л.а. создан макет поляризационно-модуляционной р.л.с. Функциональная схема макета представлена на рис. 4. Макет включает в себя наземный пассивный радиомаяк, расположенный в точке с известными координатами, а также сверхвысокочастотную (с.в.ч.) одноканальную поляризационно-модуляционную р.л.с. на основе самолетной р.л.с. “Гроза-26”. Пассивный радиомаяк представляет собой поляризационно-анизотропный трехгранный УО, в раскрытие которого помещена вертикально ориентированная ПР в виде проводников с шагом $A = 8$ мм и диаметром проводников $B = 0.8$ мм. Для реализации предложенного метода был доработан штатный облучатель приемно-передающей антенны р.л.с. “Гроза-26” путем установки в него поляризационного модулятора. Поляризационный модулятор включал в себя вращающуюся секцию круглого волновода с полуволновой фазовой пластиной, которая изменяла плоскость поляризации излучаемых сигналов с частотой $\Omega = 20$ Гц. Приемно-передающая антенна представляла собой параболическое зеркало диаметром 760 мм. Ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности составляла 3° , коэффициент усиления антенны 25 дБ, чувствительность приемника -120 дБ/Вт,

длительность излучаемых импульсов 3.5 мкс; частота повторения импульсов 400 Гц; мощность излучения 9 кВт.

Поляризационно-модуляционная р.л.с. работает следующим образом.

В точке с известными координатами устанавливают пассивный радиомаяк, представляющий собой поляризационно-анизотропный трехгранный УО с горизонтальной собственной поляризацией, в раскрытие которого помещена вертикально ориентированная ПР. Внешний вид пассивно-поляризационно-анизотропного радиомаяка представлен на рис. 5.

С борта л.а. передатчик P генерирует исходный радиоимпульс с горизонтальной поляризацией, который через антенный переключатель АП поступает на линейный поляризатор ЛП с горизонтальной собственной поляризацией, совпадающей с поперечной осью л.а. Линейный поляризатор представляет собой переход от волновода с прямоугольным сечением к волноводу с круглым сечением. С выхода ЛП со стороны круглого волновода сигнал через поляризационный модулятор ПМ поступает в бортовую зеркальную приемно-передающую антенну БЗА и излучается в направлении наземного радиомаяка. Поляризационный модулятор осуществляет вращение с частотой Ω плоскости поляризации излучаемых сигналов. Частота вращения Ω удовлетворяет условию:

$$\Omega \ll 2\pi F_n, \quad (9)$$

где F_n — частота повторения импульсов.

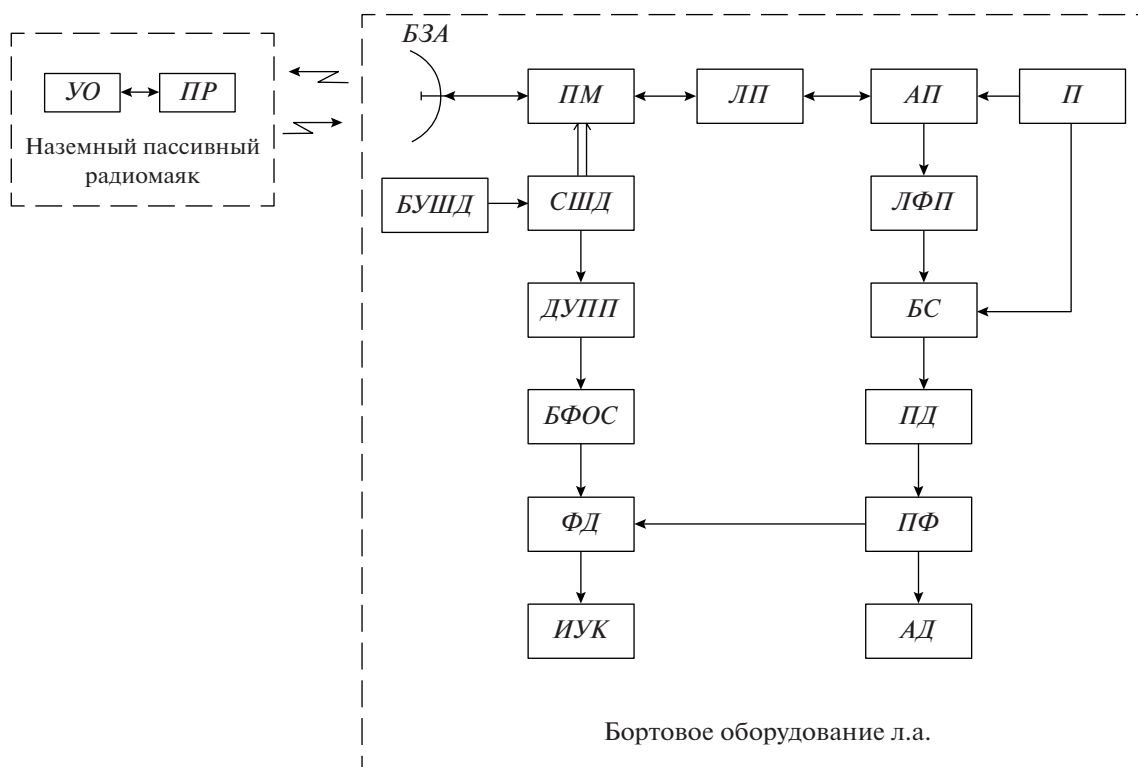


Рис. 4. Функциональная схема поляризационно-модуляционной р.л.с. для определения угла крена л.а. УО – трехгранный угольный отражатель; ПР – поляризационная решетка; БЗА – бортовая зеркальная приемно-передающая антенна; ПМ – поляризационный модулятор; ЛП – линейный поляризатор; АП – антенный переключатель; П – передатчик; БУШД – блок управления шаговым двигателем; СШД – синхронный шаговый двигатель; ЛФП – логарифмический приемник; ДУПП – датчик углового положения полуволновой фазовой пластины; БС – блок стробирования; БФОС – блок формирования опорного сигнала; ПД – пиковый детектор; ФД – фазовый детектор; ПФ – полосовой фильтр; ИУК – индикатор угла крена л.а.; АД – амплитудный детектор.

Выполнение условия (9) необходимо для согласования поляризаций зондирующих и принимаемых сигналов. Вращение плоскости поляризации излучаемого сигнала в ПМ осуществляется за счет механического вращения с частотой

$$\Omega' = \Omega/2 \quad (10)$$

круглой волноводной секции с вмонтированной в нее полуволновой фазовой пластиной. Вращение волноводной секции осуществляется синхронным шаговым двигателем СШД, механически связанным с помощью шестеренной передачи 1:1 с волноводной секцией и датчиком углового положения фазовой пластины ДУПП. Управление СШД осуществляется по сигналам, поступающим от блока управления шаговым двигателем БУШД, который задает механическую частоту вращения волноводной секции, равной $\Omega' = 10$ Гц. Датчик углового положения фазовой пластины выполнен в виде геркона, подключенного через нагрузочное сопротивление к бортовой сети +27 В. Управление герконом осуществляется двумя магнитами, диаметрально расположенными на шестерне СШД. По выходному сигналу ДУПП в бло-

ке формирования опорного сигнала БФОС формируется опорное косинусоидальное напряжение с учетом условия (10) с частотой $4\Omega'$, необходимое для работы фазового детектора ФД. Внешний вид поляризационного модулятора, выполненного на основе штатного облучателя приемно-передающей антенны р.л.с. “Гроза-26”, представлен на рис. 6.

Излученная с борта л.а. в направлении пассивного радиомаяка электромагнитная волна падает на трехгранный УО, в плоскости раскрытия которого помещена ПР. Плоскость поляризации электромагнитной волны вращается с частотой $\Omega = 20$ Гц. Действие ПР сводится к тому, что отраженная от УО волна становится промодулированной по амплитуде удвоенной частотой вращения плоскости поляризации 2Ω . При этом плоскость поляризации отраженной от УО электромагнитной волны всегда горизонтальна и не зависит от ориентации плоскости поляризации падающей на УО волны. Принятая на борту л.а. приемной антенной амплитудно-модулированная волна проходит через ПМ, ЛП и АП на вход логарифмического приемника ЛФП. Продетектированный сигнал на

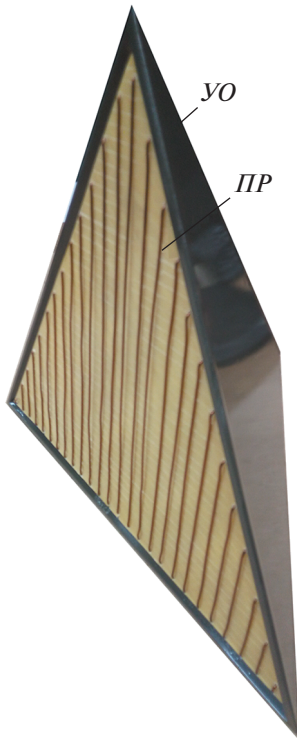


Рис. 5. Внешний вид пассивного радиомаяка. *УО* – трехгранный уголкового отражатель, *ПР* – поляризационная решетка.

его выходе будет иметь вид (6). Поскольку частота вращения Ω плоскости поляризации связана с частотой вращения Ω' *ПМ* соотношением (10), амплитуда на выходе *ЛФП* будет иметь вид:

$$A(\Omega't) [\text{дБ}] = 20 \lg C + 20 \lg \left\{ \frac{1}{2} (1 + \cos(4\Omega't \pm 2\gamma)) \right\}. \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что при использовании *ПМ* в виде вращающейся с частотой Ω' волноводной секции с полуволновой пластиной амплитуда сигнала становится промодулированной учетверенной частотой вращения этой пластины $4\Omega'$.

С выхода *ЛФП* протестированный сигнал поступает на блок стробирования *БС*, где происходит съем информации с дальности, на которой находится пассивный радиомаяк. В пиковом детекторе *ПД* осуществляется запоминание амплитуды сигнала на период повторения зондирующих импульсов. В полосовом фильтре *ПФ* выделяется спектральная составляющая на частоте $4\Omega'$, содержащейся в спектре огибающей выходного сигнала *ЛФП*. Информация об угле крена γ л.а. содержится в фазе этой спектральной составляющей $\varphi_{4\Omega'}$ и, в соответствии с формулой (11), определяется соотношением

$$\gamma [\text{рад}] = \pm \frac{\varphi_{4\Omega'}}{2}. \quad (12)$$

В *ФД* измеряется фаза $\varphi_{4\Omega'}$ относительно фазы опорного сигнала $\cos(4\Omega't)$, поступающего из *БФОС*. Фаза последнего определяется угловым положением полуволновой фазовой пластины. Амплитуда спектральной составляющей $A_{4\Omega'}$ измеряется амплитудным детектором *АД*, а значение угла крена γ л.а., с учетом формулы (12), выводится на индикатор угла крена *ИУК*.

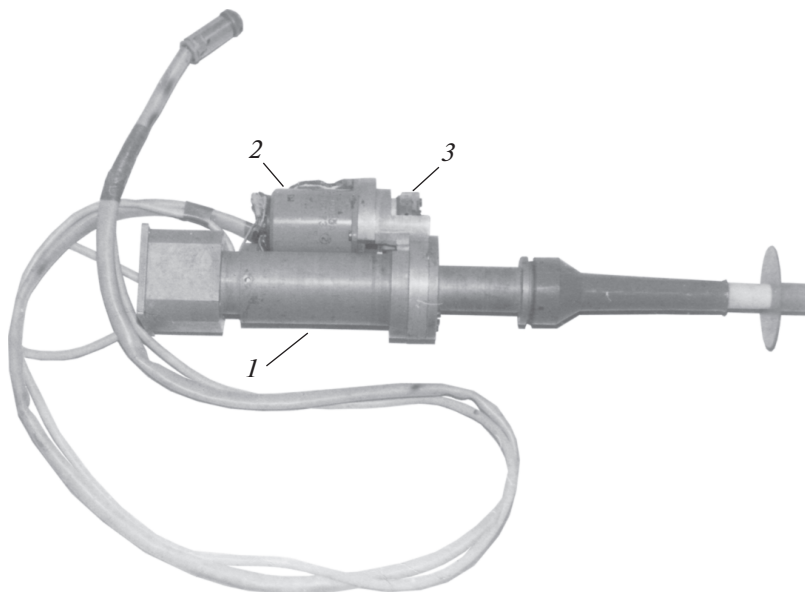


Рис. 6. Внешний вид штатного облучателя бортовой зеркальной антенны р.л.с. “Гроза-26” с поляризационным модулятором. *1* – поляризационный модулятор с вмонтированной внутрь полуволновой фазовой пластиной; *2* – синхронный шаговый двигатель; *3* – датчик углового положения полуволновой фазовой пластины.

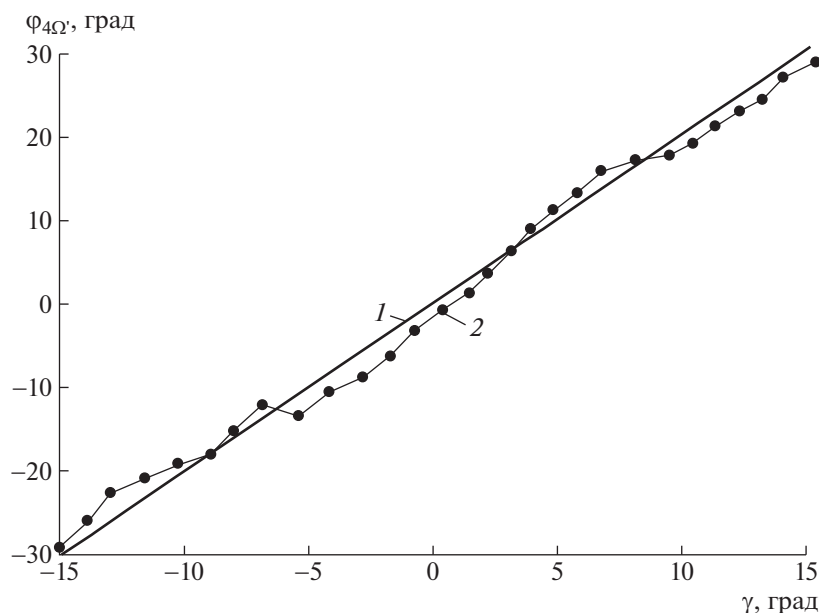


Рис. 7. Зависимость фазы $\phi_{4\Omega'}$ от угла крена γ : 1 – теория; 2 – эксперимент.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проверки работоспособности предложенного метода измерения угла крена л.а. эксперимент проводился на наземной наклонной трассе протяженностью 1300 м. Пассивный радиомаяк (поляризационно-анизотропный трехгранный УО) располагался на земной поверхности. Эффективная поверхность рассеяния УО составляла 420 м². Приемно-передающая антенна поляризационно-модуляционной р.л.с. была установлена на крыше радиотехнического корпуса ТУСУР на высоте 18 м и наведена на пассивный радиомаяк.

Методика измерения заключалась в следующем.

Радиолокационная станция облучала пассивный радиомаяк поляризационно-модулированным сигналом и принимала отраженный от него радиосигнал. На выходе логарифмического приемника р.л.с. регистрировались амплитуда спектральной составляющей $A_{4\Omega'}$ и ее фаза $\phi_{4\Omega'}$, по которой определялся угол крена.

Имитация изменения угла крена осуществлялась путем изменения ориентации пассивного радиомаяка в вертикальной плоскости вокруг его электрической оси симметрии с шагом 1° в пределах $\pm 15^\circ$ относительно исходного вертикально ориентированного положения ПР. Вертикально ориентированное положение ПР соответствовало нулевому значению угла крена.

Измерения фазы $\phi_{4\Omega'}$ проводились для каждого углового положения пассивного радиомаяка в заданном диапазоне углов в течение тридцатисекундного интервала времени с последующим

усреднением. При этом фиксировался и средний уровень отраженного сигнала.

Результаты измерений $\phi_{4\Omega'}$ приведены на рис. 7 (кривая 2). На этом же рисунке представлена теоретическая зависимость (кривая 1), полученная в соответствии с выражением (12). Среднеквадратическое отклонение измеренного угла крена от заданного составило $\sigma_\gamma = 0.98^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен и опробован поляризационно-модуляционный метод измерения угла крена по пассивному поляризационно-анизотропному радиомаяку, основанный на использовании поляризационно-модулированных по углу ориентации плоскости поляризации зондирующих сигналов.

2. Теоретически исследована и экспериментально подтверждена связь фазы спектральной составляющей на частоте $4\Omega'$ с углом крена для исследуемого поляризационного модулятора в виде вращающейся с частотой Ω' полуволновой фазовой пластины.

3. Получены экспериментальные оценки точности измерения угла крена.

4. Описанный метод может найти применение в системах ориентации летательного аппарата при заходе на посадку по приборам. Метод технически прост в реализации, так как измерение навигационного элемента осуществляется на выходе приемника на частоте, кратной частоте поляризационной модуляции.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FEWM-2020-0039 от 01.03.2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Skrypnik O.N.* Radio Navigation Systems for Airports and Airways. Springer, 2019.
2. *Пельпор Д.С., Ягодкин В.В.* Гироскопические системы. М.: Высшая школа, 1988.
3. *Александров А.С., Арно Г.Р.* Современное состояние и тенденции развития зарубежных средств и систем навигации подвижных объектов военного и гражданского назначения. СПб.: ГУНИО МО РФ, 1994.
4. *Ярлыков М.С.* Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985.
5. *Кобак В.О.* Радиолокационные отражатели. М.: Сов. Радио, 1975.
6. *Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И.* Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
7. *Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.* Поляризация радиоволн “Радиолокационная поляриметрия”. М.: Радиотехника, 2007.
8. *Бадудин Н.Н., Гулько В.Л., Масалов Е.В.* // Изв. вузов МВ и ССО СССР. Радиоэлектроника. 1986. Т. 29. № 11. С. 81.
9. *Аззам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир. 1981.
10. *Гулько В.Л.* Патент RU 2537384, МПКG01S13/93 // БИ. № 1 Оpubл. 10.01.2015.