

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Лабораторный практикум

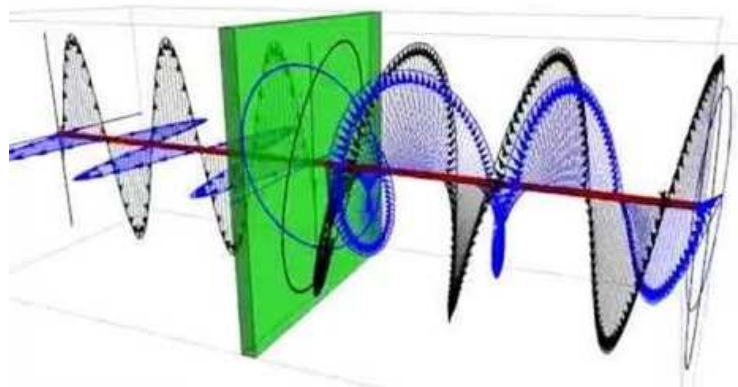


Томск

Методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов специальности 11.05.01 – Радиоэлектронные системы и комплексы.

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра радиотехнических систем
(РТС)



ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ФАЗОВОЙ УГЛОМЕРНОЙ
РАДИОМАЯЧНОЙ СИСТЕМЫ

РАЗРАБОТЧИКИ

Доцент каф. РТС, к.т.н.
В.Л. Гулько

Доцент каф. РТС, к.т.н.
А.А. Мещеряков

Зав. лаб. каф. РТС
Н.К. Блинковский

2017

1. ВВЕДЕНИЕ

В практической навигации в современных угломерных радиомаячных системах (РМС) используются амплитудные, частотные, фазовые или временные методы измерения пеленга подвижного объекта [1]. Такая классификация методов обусловлена тем, что угловая информация, характеризующая положение центра масс подвижного объекта (ПО) в различных системах координат содержится соответственно в амплитудных, частотных, фазовых или временных характеристиках принимаемых на борту ПО сигналов радиомаяка. В РМС пеленг на радиомаяк измеряется бортовым приемником ПО с ненаправленной или слабонаправленной антенной, принимающей сигналы наземного радиомаяка с направленным излучением. Поляризационные же характеристики сигналов радиомаяка, как «носитель» угловой информации в практической навигации не используются. Вместе с тем, одним из перспективных путей улучшения тактико-технических характеристик навигационного бортового оборудования является использование векторных свойств радиоволн, излучаемых наземным радиомаяком.

Настоящее руководство предназначено для подготовки и проведения лабораторной работы, посвященной исследованию возможности использования векторных свойств сигналов радиомаяка для определения пеленга ПО на примере поляризационно-фазовой угломерной РМС.

Целью работы является:

Изучение возможности использования поляризационных характеристик радиоволн излучаемых радиомаяком для улучшения тактико-технических характеристик бортового навигационного оборудования. Изучение принципа работы и особенностей построения поляризационно-фазовой угломерной радиомаячной системы. Ознакомление с работой поляризационно-фазовой угломерной системы при определении пеленга ПО.

Поляризационно-фазовая угломерная система предназначена для определения пеленга ПО на радиомаяк, состоящий из двух разнесенных в горизонтальной плоскости источников излучения радиоволн с равными амплитудами фазами и длины волн, имеющих ортогональные линейные поляризации. Пеленг ПО определяется как угол между нормалью к середине базы, оборудованной источниками излучений и направлением на ПО.

Особенность построения поляризационно-фазовой угломерной системы является то, что для определения пеленга ПО на его борту производится измерение разности фаз излучений двух источников, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. При этом разделение сигналов от этих источников в приемном устройстве осуществляется за счет использования линейного поляризационного разделителя (ЛПР), расположенного в СВЧ части бортовой приемной антенны.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ФАЗОВОЙ УГЛОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ

2.1 Физические принципы измерения пеленга подвижного объекта фазовым методом

Предположим, что радиомаяк из двух точек S_1 и S_2 симметрично расположенных на расстояние d относительно начало прямоугольной системы координат XOY , одновременно излучает ортогонально поляризованные сигналы с вертикальной и горизонтальной поляризациями с равными амплитудами, начальными фазами и длинами волн. (см. рис. 2.1) То разность расстояний Δl от источников S_1 и S_2 до любой удаленной точки A , в которой расположен ПО, однозначно (в пределах одной полуплоскости) связана с направлением на ПО. Причем эта связь задается соотношением

$$\Delta l = d \sin \alpha, \quad (2.1)$$

где d – расстояние (база) между источниками излучений ρ_1 и ρ_2 ;
 α - пеленг ПО.

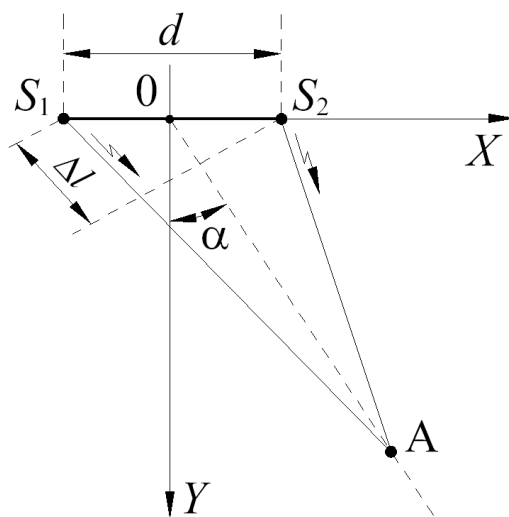


Рис. 2.1 Геометрические соотношения при работе поляризационной угломерной системы

Если расположить в точке A приемное устройство и принимать электромагнитные волны от обоих источников S_1 и S_2 , то, очевидно, что за счет геометрической разности хода Δl электромагнитных волн, сигналы, наведенные в приемной антенне, будут сдвинуты по фазе на величину

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha, \quad (2.2)$$

где λ - длина волны ортогонально линейно поляризованных электромагнитных волн.

Соотношение (2.2) может быть представлено в виде:

$$\alpha = \arcsin \frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi d}. \quad (2.3)$$

Откуда следует, что по измеренной разности фаз $\Delta\varphi$ может быть определен пеленг α ПО в заданной системе координат XOY . Поскольку фазометрические системы обеспечивают однозначное измерение разности фаз в некотором конечном интервале $\pm\varphi_0$, то из (2.3) получим однозначное измерение пеленга α возможно в секторе:

$$\pm\alpha_0 = \arcsin \pm \frac{\varphi_0\lambda}{2\pi d}.$$

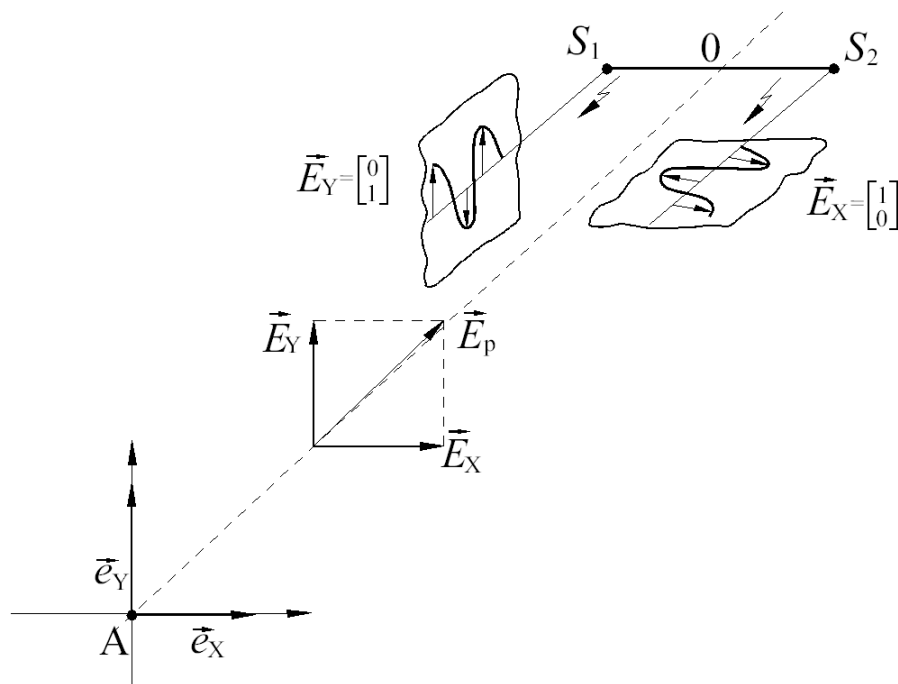


Рис. 2.2 Ориентация линейного поляризационного разделителя относительно плоскостей поляризации излучаемых сигналов

2.2. Особенности построения поляризационно-фазовой угломерной системы

2.2.1 Анализ радиолокационного канала с использованием векторов и матриц Джонса

Используем представление плоской однородной электромагнитной волны вектором Джонса [2], Тогда излучаемые радиомаяком ортогонально поляризованные волны на направлении α могут быть представлены вектором Джонса результирующей волны в линейном поляризационном базисе, опуская временную зависимость, в виде [3]

$$\vec{E}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot e^{j\Delta\varphi} \right\}, \quad (2.4)$$

где $\Delta\varphi$ - фазовый сдвиг между ортогонально поляризованными волнами в точке приема на ПО, определяемый соотношением (2.2)

Наличие множителя $1/\sqrt{2}$ в выражении (2.4) обусловлено принятой для удобства единичной интенсивностью результирующей волны.

Разделив для удобства относительный фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ пополам между суммируемыми ортогонально линейно поляризованными волнами выражение (2.4) примет вид:

$$\vec{E}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot e^{-j\frac{\Delta\varphi}{2}} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot e^{j\frac{\Delta\varphi}{2}} \right\}. \quad (2.5)$$

Предположим, что в СВЧ тракт приемной антенны установлен ЛПР ориентированный так, что орты его базиса \vec{e}_x , \vec{e}_y совпадают с плоскостями поляризации излучаемых радиомаяком сигналов (см. рис.2.2)

Линейный поляризационный разделитель представляет собой переход с волновода круглого сечения на два ортогонально расположенных по отношению друг к другу прямоугольных волноводов.

Для описания взаимодействия результирующей волны (2.5) с элементами высокочастотного тракта приемной антенны бортового 2-х канального приемного устройства с установленным линейным поляризационным разделителем воспользуемся оператором Джонса [2]. Тогда сигналы на выходах линейного поляризационного разделителя можно представить в линейном поляризационном базисе (опуская временную зависимость) как результат преобразования [4]

$$\vec{E}_x = [P_1] \cdot \vec{E}_p, \quad (2.6)$$

$$\vec{E}_y = [P_2] \cdot \vec{E}_p, \quad (2.7)$$

где \vec{E}_p - вектор Джонса результирующей волны в точке приема на ПО, определенный в линейном поляризационном базисе (2.5);

$$[P_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad - \quad \text{оператор Джонса первого плеча линейного}$$

поляризационного разделителя с горизонтальной собственной поляризацией [4];

$$[P_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad - \quad \text{оператор Джонса второго плеча линейного}$$

поляризационного разделителя с вертикальной собственной поляризацией [4].

Проделав в (2.6) и (2.7) необходимые преобразования, получим вектора Джонса сигналов на выходах линейного поляризационного разделителя в виде:

$$\vec{E}_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot e^{-j\frac{\Delta\varphi}{2}}, \quad (2.8)$$

$$\vec{E}_y = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot e^{j\frac{\Delta\varphi}{2}}. \quad (2.9)$$

Тогда сигналы на входах 2-х канального приемного устройства будут иметь вид:

$$\dot{E}_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\cos \frac{\Delta\varphi}{2} - j \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \right), \quad (2.10)$$

$$\dot{E}_y = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\cos \frac{\Delta\varphi}{2} + j \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \right). \quad (2.11)$$

Амплитуды A_x и A_y , а также фазы φ_x и φ_y сигналов (2.10) и (2.11) на выходах приемника с амплитудной линейной характеристикой и линейным детектором будут равны

$$A_x = A_y = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (2.12)$$

$$\varphi_x = -\operatorname{arctg} \frac{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}{\cos \frac{\Delta\varphi}{2}} \quad (2.13)$$

и

$$\varphi_y = \operatorname{arctg} \frac{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}{\cos \frac{\Delta\varphi}{2}}. \quad (2.14)$$

Соответственно разность фаз, с учетом преобразований, равна

$$\Delta\varphi_{yx} = \varphi_y - \varphi_x = \Delta\varphi. \quad (2.15)$$

Подставляя (2.15) в (2.3) получим выражения для определения пеленга α ПО в системе координат XOY в виде

$$\alpha = \arcsin \frac{\Delta\varphi_{yx} \lambda}{2\pi d}. \quad (2.16)$$

2.2.2 Анализ радиолокационного канала с использованием пространственно временных характеристик сигналов радиомаяка

Пусть ПО имеет угловую координату α и радиомаяк излучает из двух пространственно разнесенных точек линейно ортогонально поляризованные гармонические радиосигналы с частотой $\omega_0 = 2\pi f_0$ (см. рис.2.2.). Эти сигналы принимаются на ПО приемной системой, обобщенная функциональная схема которой представлена на рис. 2.3.

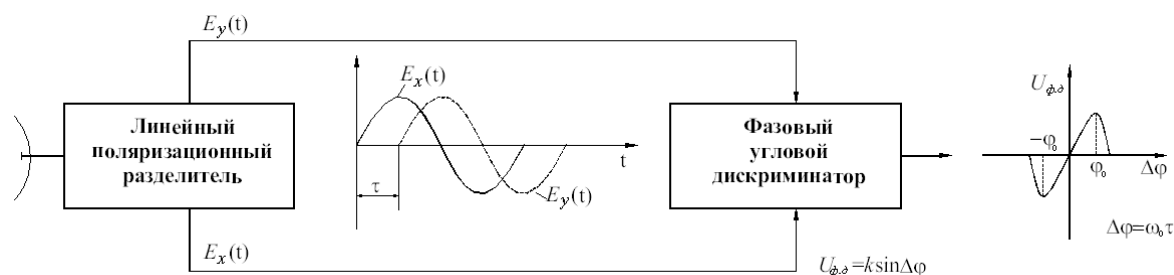


Рис. 2.3 Обобщенная функциональная схема приемной системы ПО

Из рис. 2.3 видно, что радиосигнал $E_y(t)$ на выходе линейного поляризационного разделителя запаздывает по времени по отношению к радиосигналу $E_x(t)$ на время

$$\tau = \frac{\Delta l}{c} = \frac{d \sin \alpha}{c}, \quad (2.17)$$

где c – скорость распространения радиоволн. Тогда сигналы на выходах линейного поляризационного разделителя будут равны

$$E_x(t) = A_0 F(\alpha) \cos(\omega_0 t + \Psi_0) = A_0 F(\alpha) \cos \varphi_x(t), \quad (2.18)$$

$$E_y(t) = A_0 F(\alpha) \cos(\omega_0(t - \tau) + \Psi_0) = A_0 F(\alpha) \cos \varphi_y(t), \quad (2.19)$$

где A_0 и Ψ_0 – амплитуда и начальная фаза радиосигналов на выходах линейного поляризационного разделителя;

$\varphi_x(t)$ и $\varphi_y(t)$ – полные фазы радиосигналов $E_x(t)$ и $E_y(t)$;

$F(\alpha)$ – нормированная функция направленности приемной бортовой антенны по напряжению.

Из анализа (2.18) и (2.19) следует, что временное запаздывание τ приводит к появлению постоянной разности фаз $\Delta\varphi$ радиосигналов

$$\Delta\varphi = \varphi_x(t) - \varphi_y(t) = \omega_0 \cdot \tau = 2\pi f_0 \cdot \frac{d \sin \alpha}{c}. \quad (2.20)$$

Так как $\lambda = c/f_0$, то

$$\Delta\varphi_{xy} = \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sin \alpha.$$

Разность фаз $\Delta\varphi_{xy}$ между радиосигналами $E_x(t)$ и $E_y(t)$ может быть измерена фазометром, а сам измеритель отградуирован в единицах измерения пеленга α .

2.2.3 Некоторые особенности построения фазового углового дискриминатора

В качестве фазометрического устройства часто используется фазовый детектор (ФД). На его выходе формируется напряжение $U_{\phi,d}$, знак и величина

которого в некотором секторе углов позволяет однозначно определить пеленг ПО по формуле:

$$U_{\phi,\delta} = k \sin \Delta\varphi, \quad (2.21)$$

где k - коэффициент, зависящий от параметров радиоэлементов в схеме фазового углового дискриминатора, а также от амплитуд сигналов, между которыми измеряется разность фаз.

Зависимость коэффициента k от амплитуд радиосигналов радиомаяка является характерной особенностью большинства фазометрических устройств и приводит к погрешности измерений.

Для исключения влияния неизвестной амплитуды вводят эффективную автоматическую регулировку усиления (АРУ) или ограничение сигнала, благодаря чему напряжение на входе фазового детектора можно считать постоянным. Подставляя (2.2) в (2.21) получим выражение для напряжения $U_{\phi,\delta}(\alpha)$, которое приобретает вид дискриминационной характеристики:

$$U_{\phi,\delta}(\alpha) = U_0 \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right), \quad (2.22)$$

где $U_0 = const$.

При малых значениях α зависимость (2.21) имеет приближенно линейный характер:

$$U_{\phi,\delta}(\alpha) \approx U_0 \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha. \quad (2.23)$$

Как следует из (2.23), по напряжению на выходе фазового детектора можно найти значение и знак угла рассогласования α .

Зависимость нормированного напряжения рассогласования $U_{\phi,\delta}/U_0$ от угла α называется пеленгационной характеристикой угломера:

$$\Gamma(\alpha) = \frac{U_{\phi,\delta}(\alpha)}{U_0} \approx \frac{2\pi d}{\lambda} \alpha. \quad (2.24)$$

Её производную при $\alpha=0$ называют крутизной пеленгационной характеристики или чувствительностью пеленгования:

$$S(\alpha) = \left| \frac{d\Gamma(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\alpha=0} = \frac{2\pi d}{\lambda}. \quad (2.25)$$

Таким образом, чувствительность, а следовательно, и точность пеленгования растут с увеличением отношения d/λ . Однако при $d/\lambda > 1/2$ появляется неоднозначность измерения угла, что следует из выражения (2.22). Для исключения неоднозначности применяют (так же как в фазовых радиопеленгаторах) несколько шкал, т.е. проводят измерения при различных отношениях d/λ .

3. ЛАБОРАТОРНЫЙ МАКЕТ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ФАЗОВОЙ УГЛОМЕРНОЙ РАДИОМАЯЧНОЙ СИСТЕМЫ

Структурная схема лабораторной установки изображена на рис. 3.1 Макет состоит из излучающей системы (радиомаяк) и приемной 2-х канальной системы, расположенных на расстоянии 4 м друг от друга. Источником излучения служит СВЧ –генератор типа Г4-83, работающий в 3-см диапазоне волн на частоте от 9370 МГц. Излучение генератора по коаксиальному волноводному переходу поступает на волноводный разветвитель, где делится пополам и далее по волноводам поступает на рупорные излучатели. Рупорные излучатели прямоугольные и излучают линейно поляризованную волну, плоскость поляризации которой параллельна узкой стороне раскрыва рупора.

Для того, чтобы излучаемые электромагнитные волны были ортогонально поляризованы, в один из волноводных трактов, питающих рупоры, введена волноводная скрутка на 90 градусов. Для вращения рупорных антенн излучающей системы в плоскости азимута используется поворотное устройство, позволяющее изменять направление излучения через 1 град.

Приемная система представляет собой СВЧ 2-х канальный приемник и содержит в своем составе приемную квадратную рупорную антенну с выхода которой сигналы от рупорных излучателей поступают на вход линейного поляризационного разделителя. С выходов ЛПР с помощью волноводно-коаксиальных переходов сигналы $E_x(t)$ и $E_y(t)$ поступают на входы смесителей 1,2. На смесители поступает также сигнал гетеродина, построенного на частоту $f_r = 9400 \text{ МГц}$. В результате взаимодействия полезного сигнала и сигнала гетеродина на выходах смесителей образуются сигналы промежуточной частоты $f_{n0} = f_n - f_0 = 30 \text{ МГц}$, которые потом усиливаются в усилителях промежуточной частоты УПЧ 1 и УПЧ 2 до уровня, необходимого для нормальной работы фазового детектора.

Для исключения влияния изменения амплитуды радиосигналов на показания измерителя выходные сигналы УПЧ 1 и УПЧ 2 поступают на соответствующие им ограничители, где происходит их ограничение по амплитуде. На выходе фазового детектора формируется напряжение (2.2) $U_{\phi.д} = k \sin \Delta\phi$, которое затем усиливается в усилитель постоянного тока (УПТ). Выходной ток УПТ регистрируется с помощью микроамперметра. В макете предусмотрен контроль сигналов на выходах УПЧ 1 (Гнездо Γ_1), УПЧ 2 (Гнездо Γ_2) и ФД (Гнездо Γ_3).

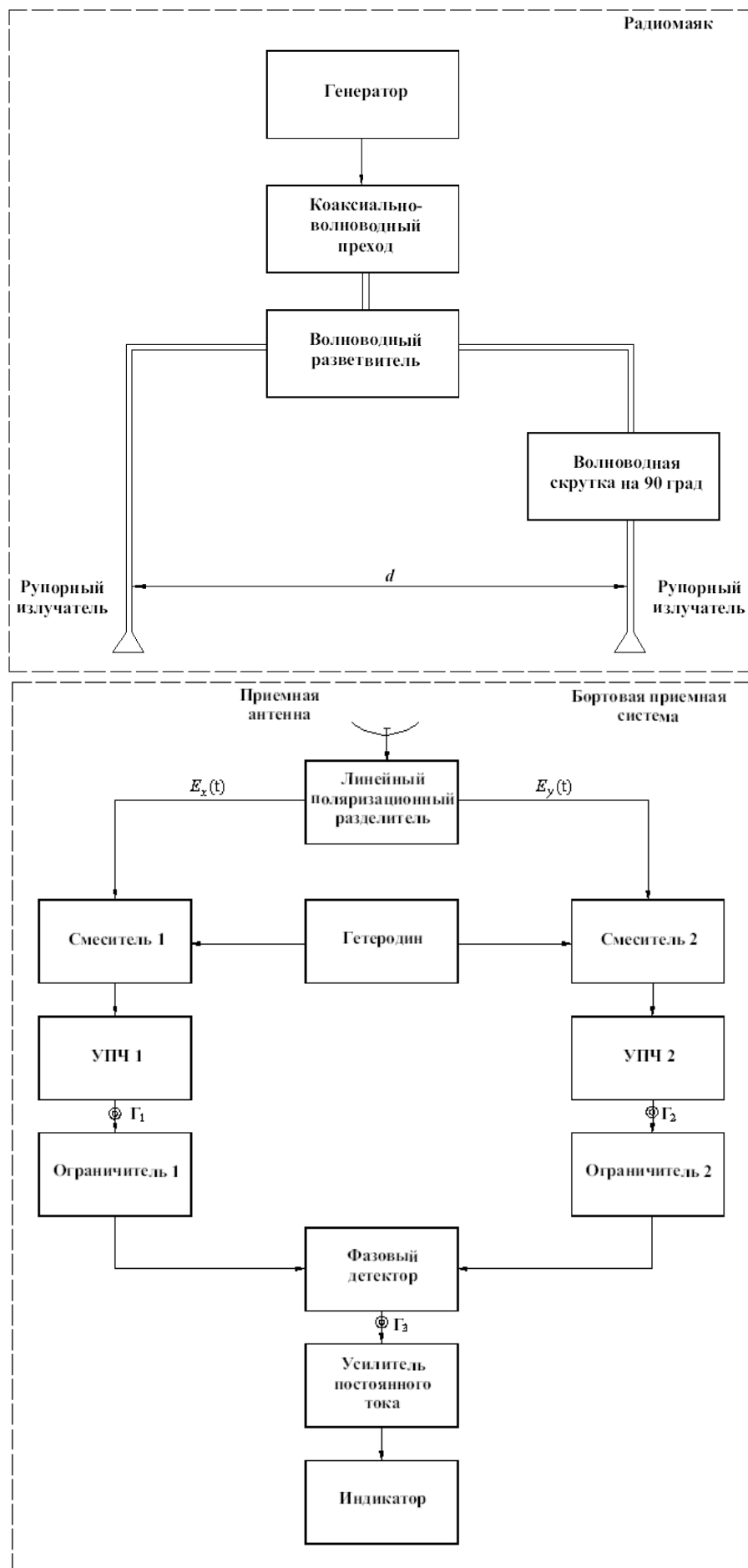


Рис. 3.1. Структурная схема лабораторной установки

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1 На основе какого физического явления в поляризационно-фазовой угломерной системе осуществляется разделение сигналов от двух источников излучения?

4.2 Объясните принцип работы поляризационно-фазовой угломерной системы.

4.3 В чем причина появления неоднозначности измерений пеленга в фазовом методе.

4.4 Какими параметрами системы определяется ширина зоны однозначного отсчета пеленга?

4.5 Какими параметрами системы определяется крутизна пеленгационной характеристики.

4.6 Объясните наличие ограничителей в фазовой угломерной системе.

4.7 К чему приводит неравенство длин кабелей, соединяющих выходы ЛПР со входами приемного устройства.

4.8 Перечислите достоинства поляризационно-фазовой угломерной системы.

5. ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

5.1 Изучить описание лабораторной работы и ответить на контрольные вопросы.

5.2 Ознакомиться с макетом поляризационно-фазовой угломерной системы.

5.3 Включить генератор излучения и источник питания приемной системы.

5.4 Исследовать зависимость амплитуды радиосигнала на выходе одного из каналов от угла поворота излучающей системы радиомаяка в пределах $\pm 45^\circ$. Объяснить результаты и сделать выводы.

5.5 Экспериментально построить пеленгационную характеристику угломера. Определить крутизну характеристики на «нулевом» направлении и угловую ширину сектора однозначности.

5.6 Рассчитать теоретически ширину зоны однозначного отсчета и крутизну пеленгационной характеристики для $d = 8,5$ см. Сравнить с результатами экспериментальных исследований.

6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

6.1 Ярлыков М.С. Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985. 344 с.

6.2 Татаринов В.Н. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Том 1. Из-во Томский университет

6.3 Гулько В. Л., Мещеряков А. А. Поляризационно-модуляционный метод измерения пеленга и угла крена подвижного объекта с использованием радиомаяка // Доклады ТУСУР. 2016. Т. 19, № 1. – С. 5-8.

6.4 Гулько В. Л. Патент № 2507530 РФ МПК G01S3/02 Радионавигационная система для измерения пеленга подвижного объекта.