

Система мониторинга беспилотных летательных аппаратов на основе корреляционного интерферометрического измерителя

© Д.А. Зацепин¹, И.В. Сисигин², А.Н. Кренёв³

¹Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны

²ВУЦ при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

³ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Рассмотрен вариант построения пассивной системы мониторинга беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) на основе корреляционного интерферометрического измерителя (КИИ). Показано, что использование пассивных средств локации, которые обладают наибольшей скрытностью в указанных условиях, является наиболее рациональным способом получения координатной информации о БпЛА в режиме непрерывного наблюдения. Описан принцип работы КИИ, а также варианты реализации функциональных компонентов. Подчеркиваются важность и необходимость интеграции нескольких каналов получения информации в единую систему.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, корреляционный интерферометрический измеритель, антенная решетка, цифровая обработка сигналов.

Введение. В ближайшие десятилетия и в особенности в ходе специальной военной операции на Украине наблюдается устойчивый рост применения беспилотных летательных аппаратов (БпЛА), особенно мини-БпЛА, в ходе воздушных ударов по переднему краю линии боевого соприкосновения (ЛБС). Кроме того, БпЛА данного класса используются и на этапе планирования боевых действий, для разведки оперативной зоны. Этому способствовала разработка компактных недорогих систем управления, навигации и связи, без которых невозможно эффективное применение малых БпЛА [1].

Для комплексного решения задач противодействия малым БпЛА необходимо не только их своевременное обнаружение, но и сопровождение. Это позволяет адекватно оценивать степень потенциальных угроз и оперативно реагировать на них путем выдачи координат активным средствам противодействия. Для решения данного комплекса задач коллективом инженеров разрабатывается беспилотный комплекс ПВО ближнего радиуса действия. Он рассчитан на размещение на земной поверхности или подвижной платформе гексакоптерного типа (рис. 1).



Рис. 1. Беспилотный комплекс ПВО ближнего радиуса действия

Комплекс включает в себя активный радиолокационный канал обнаружения и определения координат целей X-диапазона, оптический канал распознавания и пассивный канал пеленгации. Пассивный канал пеленгации можно использовать как самостоятельную систему мониторинга. Именно об этой системе и пойдет речь в статье.

Как известно [2], современные условия ведения боевых действий характеризуются широким применением средств радио- и радиотехнической разведки, радиоэлектронной борьбы (РЭБ), а также противорадиолокационных средств поражения. Поэтому для решения задач непрерывного мониторинга пространства и обнаружения малых БпЛА, имеющих радиоканалы управления и передачи данных, наиболее рациональным является использование пассивных методов пеленгации.

Исходя из этого, для решения поставленной задачи предлагается использовать пассивную радиолокационную систему, основанную на корреляционном интерферометрическом измерителе. Она включает широкополосную или многодиапазонную антенную решетку, состоящую из не менее трех приемных антенных элементов (рис. 2) и двух подключаемых через коммутатор приемных трактов.

Анализ заданного частотного диапазона сигналов от БпЛА осуществляется последовательно с мгновенной полосой частот df (частотный радиоканал). Получение пеленга в каждом частотном канале производится по оценке разности фаз между парами сигналов, принятых от двух антенных элементов (АЭ). Разность фаз радиосигналов, принимаемая любой парой АЭ, определяется выражением [2]

$$\Delta\Phi_{n1,n2} = \Phi_{n1}(t) - \Phi_{n2}(t), \quad (1)$$

где $n1 = 1, 2, 3$; $n2 = 1, 2, 3$; $n1 \neq n2$; $\Phi_{n1(2)}(t)$ — фаза спектральной составляющей сигнала, принимаемого $n1(2)$ антенной.

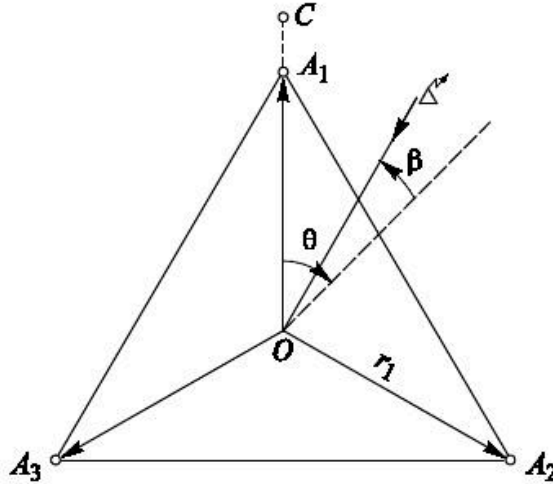


Рис. 2. Однокольцевая эквидистантная антенная решетка:

A_1 – A_3 — ненаправленные антенные элементы, располагаемые на плоскости; O — центр антенной решетки; OC — опорное направление; r_1 — радиус однокольцевой антенной решетки; θ — азимут; β — угол наклона фронта волны принимаемого сигнала

$$\Phi_{n1(2)}(t) = \omega_k t + \varphi_k(t) + \varphi_{ko} + \frac{2\pi}{\lambda} r_{n1(2)} \cos(\beta) \cos(\theta - \alpha_{n1(2)}), \quad (2)$$

где $\alpha_{n1(2)}$ — углы АЭ относительно оси OX прямоугольной системы координат.

Величина $\Delta\Phi$ зависит как от углов θ , β , так и от расстояния между антенными элементами.

Для вычисления разности фаз $\Delta\Phi$ принятые сигналы преобразуются в цифровую форму и переносятся в частотную область путем вычисления БПФ, в результате которого формируются спектры сигналов сигнального и опорного каналов следующего вида:

$$\begin{aligned} \dot{S}_c(k, n1(2), t) &= U_{1k} \exp \left\{ j \left(\Phi_{n1(2)}(t) + \varphi_{\text{пр1}}(k) \right) \right\}; \\ \dot{S}_o(k, n3, t) &= U_{2k} \exp \left\{ j \left(\Phi_{n3}(t) + \varphi_{\text{пр2}}(k) \right) \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где U_{1k} , U_{2k} — амплитуды принятого радиосигнала в сигнальном и опорном k -х каналах; $\varphi_{\text{пр1}}(k)$, $\varphi_{\text{пр2}}(k)$ — фазовая задержка сигнала в сигнальном (первом) и опорном (втором) каналах.

В дальнейшем для каждого df, в котором обнаружен сигнал, производится операция свертки сигнального и комплексно-сопряженного спектров сигналов опорного канала:

$$\dot{S}_{\text{св}}(k, n1(2), n3) = \sum_i \dot{S}_c(k, i, n1(2)) \dot{S}_o^*(k, i, n3), \quad (4)$$

где k — номер частотного радиоканала с сигналом; i — текущий индекс при суммировании по элементарным частотным фильтрам.

В результате выполнения операции свертки получаются комплексные амплитуды сигналов одного из каналов относительно выбранного опорного канала. Эти амплитуды несут в себе информацию о пеленге и неидентичности фазовых сдвигов сигнала в каналах приема:

$$\begin{aligned} \dot{U}(k, n1(2), n3) &= \frac{\dot{S}_{\text{св}}(k, n1(2), n3)}{|\dot{S}_{\text{св}}(k, n1(2), n3)|} = \\ &= \exp\{j(\Phi'_{n1(2)} - \Phi'_{n3} + \Phi_{\text{пр1}}(k) + \Phi_{\text{пр2}}(k))\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Указанные цифровые сигналы поступают на вход вычислителя интерференционных векторов пар сигналов, реализующего операцию свертки комплексных амплитуд пар сигналов в соответствии с выражением

$$\dot{A}(k, n1, n2) = \dot{U}(k, n1, n3)\dot{U}^*(k, n2, n3) = \exp\{j(\Phi'_{n1} - \Phi'_{n2})\}, \quad (6)$$

где $\dot{A}(k, n1, n2)$ — интерференционный вектор пары сигналов с $n1$ -го и $n2$ -го элементов решетки.

В результате выполнения операции свертки над комплексными амплитудами получаются интерференционные векторы пар сигналов, зависящие только от координат антенной решетки и пеленга радиосигнала и не зависящие от неидентичности фазовых сдвигов сигнала в каналах приема. Далее в блоке дискретного преобразования Фурье вычисляются P двумерных угловых спектров сигнала по следующему правилу:

$$\dot{F}_{k,p}(L_\theta d\theta, L_\beta d\beta) = \sum_{lp} \dot{A}(k, n1, n2) \exp(-j(\Phi_{lp}(L_\theta, L_\beta))), \quad (7)$$

где $p = 1, \dots, P$ — порядковый номер углового спектра сигнала, полученного по всем N_p парам сигналов, принятых $n1$ -ми и $n2$ -ми антеннами решетки; $lp = 1, \dots, N_p$ — порядковый номер пары антенных элементов, удовлетворяющих указанному выше условию; $L_\theta d\theta$ — аргумент азимута углового спектра, $d\theta$ — шаг вычисления азимута; $L_\beta d\beta$ — аргумент угла наклона фронта волны углового спектра, $d\beta$ — шаг вычисления угла наклона фронта волны.

Сигналы, соответствующие P двумерным угловым спектрам, поступают на перемножитель, где проводится операция перемножения всех двумерных угловых спектров:

$$F_k(L_\theta d\theta, L_\beta d\beta) = \prod_p \dot{F}_{k,p}(L_\theta d\theta, L_\beta d\beta). \quad (8)$$

Результатом является пространственная диаграмма направленности антенны:

$$Q_{\max}(L_{\theta}d\theta, L_{\beta}d\beta) = \left| \operatorname{Re} \dot{F}_k(L_{\theta}d\theta, L_{\beta}d\beta) \right|_{\max}. \quad (9)$$

Оценка угловых координат источников излучения (пеленгов), проводится по наибольшему значению (9):

$$S(\theta, \beta) = \arg Q = \arg \{ \max q(L_{\theta}d\theta, L_{\beta}d\beta) \}. \quad (10)$$

В результате приема и обработки сигналов от БПЛА в течение одного интервала наблюдения формируются оценки их пеленгов.

Структурная схема пеленгатора, реализующего вышеописанный алгоритм, представлена на рис. 3. Он включает в себя аппаратную и программную части. Аппаратная часть состоит из антенной решетки, коммутатора, двухканального приемника, аналого-цифрового преобразователя, узла управления, оперативно-запоминающего устройства (ОЗУ).

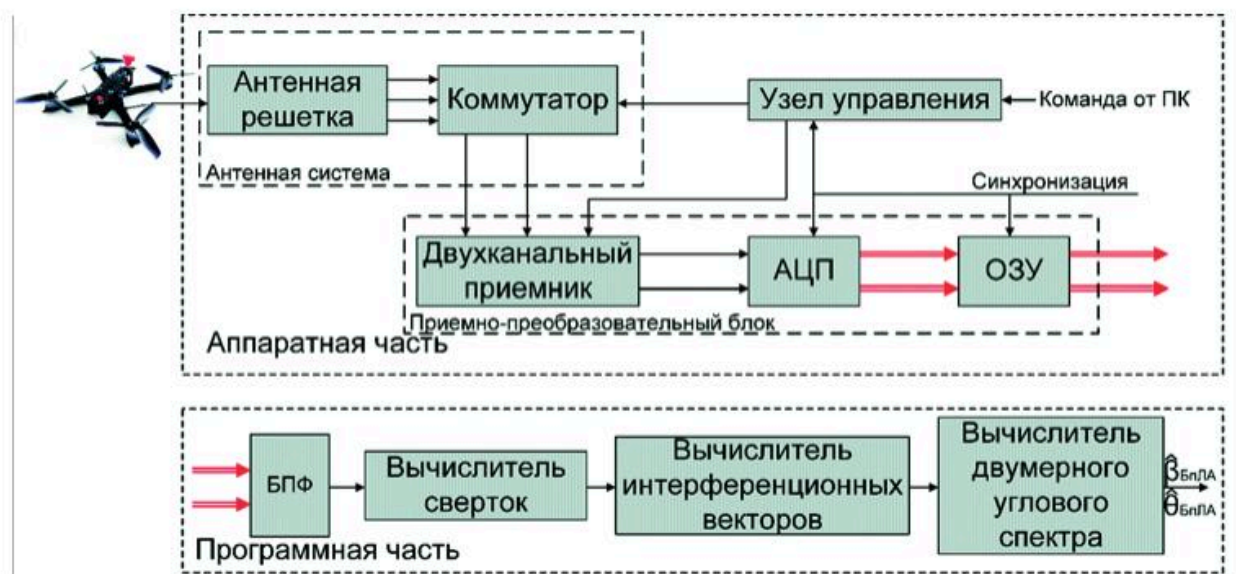


Рис. 3. Структурная схема корреляционного интерферометрического измерителя

Программная часть включает процедуры вычисления быстрого преобразования Фурье, свертка спектров, интерференционных векторов и двумерного углового спектра. Результатом работы системы являются точечные оценки азимута и угла места, характеризующие направление источников излучения.

Для подтверждения теоретически рассчитанных технических параметров системы разработан макет, в котором используются как стандартные блоки, так и специально разработанные устройства. Рассчитанные параметры приведены ниже:

Дальность действия, км	Не менее 3
Рабочий диапазон частот, МГц	300–6000
Мгновенная полоса анализа, МГц	50
Количество сопровождаемых объектов	До 10
Частота обновления информации, Гц	1–5
Зона обзора по азимуту, град.	0–360
Зона обзора по углу места, град.	0–90
Точность (СКО) измерения азимута, град. (при ОСШ 30 дБ).....	Не хуже 0,5
Точность (СКО) измерения угла места, град. (при ОСШ 30 дБ)	Не хуже 1,0

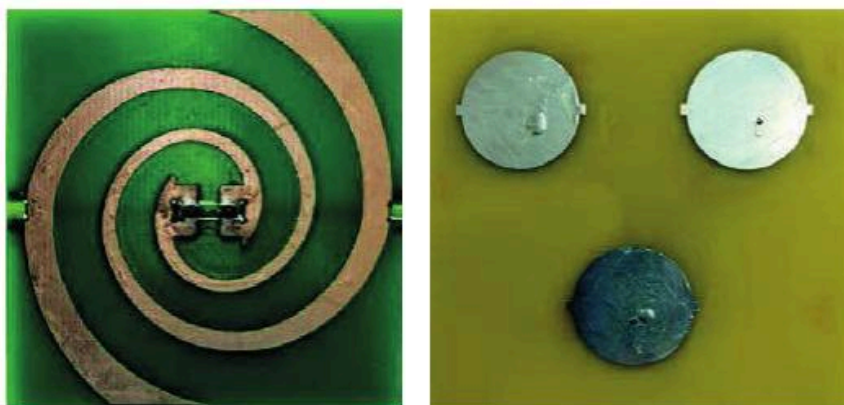


Рис. 4. Элементы антенной решетки

В качестве элементов антенной решетки используются различные конструкции слабонаправленных патч-антенн, представленных на рис. 4. Патч-антенны выбраны исходя из минимальной стоимости изготовления и компактных размеров, а также приемлемых для экспериментов частотных характеристик и диаграмм направленности.

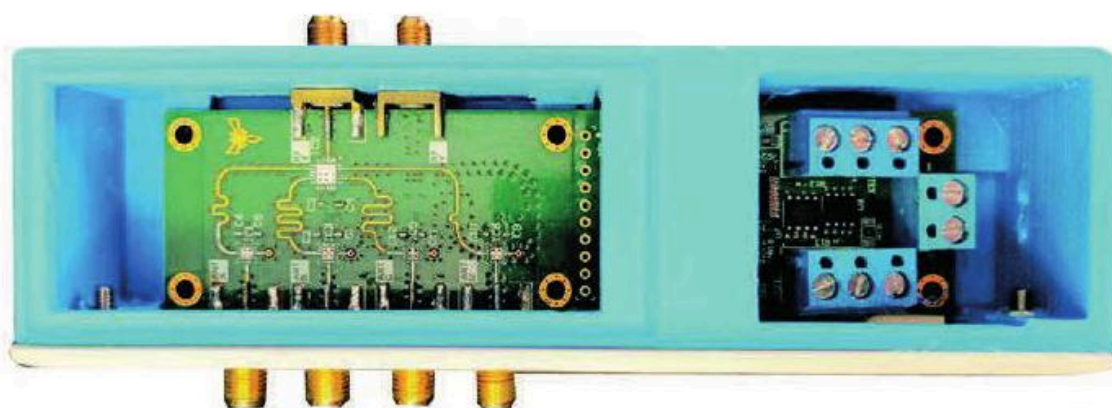


Рис. 5. Антенный коммутатор

Коммутатор, представленный на рис. 5, разработан специально для данного пеленгатора. Он построен на одноканальных радиочастотных переключателях серии ADRF5020. Они имеют достаточное быстродей-

ствие и широкую полосу пропускания. Основная задача коммутатора заключается в последовательном подключение пар антенных элементов к приемным каналам в соответствии с временной диаграммы работы пеленгатора.



Рис. 6. Плата цифровой обработки



Рис. 7. Приемно-преобразовательный модуль

В качестве двухканального приемно-преобразовательного модуля в данной системе используется стандартный модуль радиотехнических исследований МИРТС, разработанный в Ярославском государственном университете имени П.Г. Демидова. Внешний вид платы цифровой обработки и модуля представлены на рис. 6 и 7 соответственно. Он обеспечивает прием и аналого-цифровое преобразование сигналов, поступающих от антенн, а также формирует команды управления для коммутатора. Преобразованные сигналы в цифровом формате передаются на персональный компьютер (ПК), где происходит их дальнейшая обработка в соответствии с установленным алгоритмом сопровождения. Результаты обработки выводятся на индикатор и отображаются в виде таблицы на экране монитора ПК. Примерный вид индикатора показан на рис. 8.

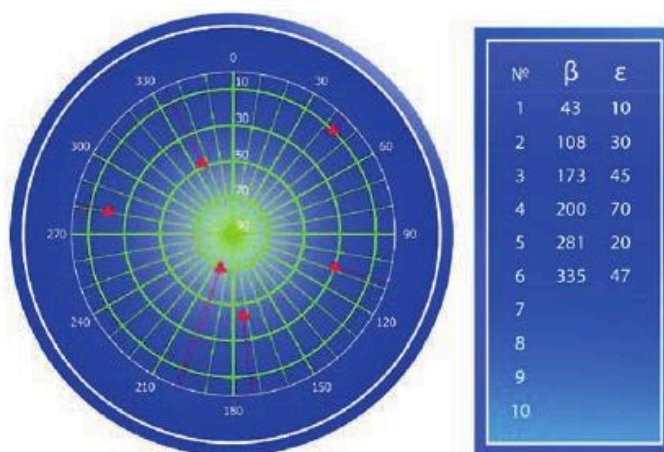


Рис. 8. Индикатор кругового обзора

Таким образом, описанный макет обеспечивает исследование предложенной системы мониторинга на базе КИИ и получение оценок пеленгов на источники излучения в диапазоне частот от 300 до 6000 МГц.

Заключение. Из вышеизложенного можно сделать вывод, что реализация системы мониторинга на единой программно-аппаратной платформе на базе ПЛИС позволит получать оценки угловых координат движущихся источников излучения с точностью, достаточной для наведения на них средств поражения. Сопряжение ее с активным радиолокационным и оптическим каналами сопровождения и средствами поражения дает возможность получить эффективную систему ПВО малой дальности для борьбы с малоразмерными БпЛА.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Еремин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО. *Отвага*. 2015, № 6 (14). URL: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/> (дата доступа 16.10.2019).
- [2] Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. 3-е изд., перераб. и доп. Рембовский А.М., ред. Москва, Горячая линия – Телеком, 2012, 640 с.
- [3] Ростопчин В.В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния. *Беспилотная авиация*. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_problem_y_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения 20.05.2019).

Зацепин Дмитрий Александрович — адъюнкт штатной очной адъюнктуры Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны.
e-mail: dimassss1997@mail.ru

Сисигин Игорь Васильевич — канд. техн. наук, доцент, начальник цикла, старший преподаватель ВУЦ при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». e-mail: sisigin@mail.ru

Кренёв Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент, инженер-конструктор научного центра ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». e-mail: krenev@uniyar.ac.ru

Monitoring system for unmanned aerial vehicles based on a correlation interferometric meter

© D.A. Zatsepin¹, I.V. Sisigin², A.N. Krenev³

¹Yaroslavl Higher Military Institute of Air Defense

²VUC at Moscow Power Engineering Institute

³Moscow Power Engineering Institute

In modern conditions of use of the armed forces, the problem of protection from small unmanned aerial vehicles (UAVs) has increased immeasurably. In this regard, the task of developing and manufacturing radar facilities that ensure reliable detection of small UAVs directly on the line of contact and the issuance of their coordinates has received a new impetus of urgency. The article considers a variant of building a passive monitoring system for unmanned aerial vehicles (UAVs) based on a correlation interferometric meter (CII). It is noted that the use of passive means of location, which have the greatest secrecy in these conditions, is the most rational way to obtain coordinate information about the UAV in continuous surveillance mode. The article describes the principle of operation of the CII, as well as options for the implementation of functional components. In addition, the importance and necessity of integrating several information channels into a single system is emphasized.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, correlation interferometric meter, antenna array, digital signal processing.*

Zatsepin D.A., Adjunct of the full-time staff of the Yaroslavl Higher Military Institute of Air Defense. e-mail: dimassss1997@mail.ru

Sisigin I.V., Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the cycle, Senior lecturer at the VUC Moscow Engineering Institute. e-mail: sisigin@mail.ru

Krenev A.N., Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Design Engineer of the Scientific Center of the Moscow Engineering Institute. e-mail: krenev@uniyar.ac.ru