

Перспективная технология определения местоположения воздушных объектов в пассивных системах радиолокации

В.В. Карев, О.В. Король, А.А. Кузнецов, Д.А. Тимаков

В рамках одного из вариантов построения пассивной системы радиолокации – с использованием излучений систем цифрового телевизионного вещания в качестве подсвета, предложен метод определения местоположения подвижных воздушных объектов. Для определения местоположения необходимо измерение углов прихода отражённого излучения и доплеровской частоты.

Ключевые слова: пассивная радиолокация, доплеровская частота, определение местоположения.

1. Введение

Анализ излучений широкоэмиттерных станций показывает, что по своей мощности и структуре сигналов они могут быть использованы в качестве источников радиолокационного подсвета, а по отражённым сигналам возможна пассивная локация воздушных объектов. Принцип действия пассивного радара, на первый взгляд, очень прост: в отличие от обычных радиолокационных станций (РЛС), он не излучает никаких сигналов, а только принимает радиоволны от других источников, таких как традиционные РЛС, теле- и радиостанции, а также средства связи, использующие радиоканал.

Подразумевается, что сторонний источник радиоволн находится на некотором расстоянии от приёмника пассивной РЛС, из-за чего его сигнал, попав на воздушный объект, может быть отражён в сторону последней. Таким образом, главной задачей пассивного радара является сбор всех радиосигналов и правильная их обработка с целью выделения той их части, что отразилась от искомого воздушного объекта.

Предложения использовать пассивную радиолокацию появились достаточно давно, но до недавнего времени такой способ обнаружения целей был попросту невозможен: отсутствовала аппаратура, позволяющая выделять из всех принимаемых сигналов именно тот, что был отражён искомым объектом [1, 2]. При современном уровне развития систем цифровой обработки сигналов реализация такой системы стала возможна.

Анализ работ, проводимых иностранными фирмами по созданию комплексов пассивной локации, показал, что западные учёные продолжают активно разрабатывать средства обнаружения воздушных объектов, принцип работы которых основан на нетрадиционных методах многопозиционной радиолокации. В частности, в США фирма «Lockheed Martin» изготовила экспериментальный образец приёмной станции обнаружения и сопровождения самолетов для новой системы, получивший наименование «Silent Sentry», в которой в качестве источника излучения используется радиовещательная станция УКВ диапазона. Во Франции работы по созданию системы обнаружения воздушных объектов осуществляются в рамках программы «Dark» головным разработчиком – фирмой «Thomson-

CSF», где источником излучения являются сигналы телевизионного передатчика. Специалисты американской фирмы «Raytheon» совместно с европейской компанией «Thales Group» приступили к разработке пассивной когерентной системы обнаружения низколетящих объектов «Homeland Alert 100», принцип работы которой аналогичен вышеописанным. Компания «Cassidian» предложила вариант радиолокационной станции, которая фактически представляет собой приёмную антенну с соответствующей аппаратурой и алгоритмами вычисления [3, 4].

Наибольший интерес для построения систем пассивной радиолокации представляет теле- и радиовещание в УКВ-диапазоне частот. Передачи на таких частотах не подвержены воздействию статических помех и флуктуациям амплитуды из-за отражений сигналов, а также относительно свободны от замираний. Распространение сигнала происходит преимущественно по линии визирования. Расстояние до радиогоризонта примерно такое же, как до оптического горизонта, далее изменения сигнала увеличиваются из-за касания земли и других потерь. Характерной особенностью этих источников излучения является работа в режиме непрерывного излучения, что, с одной стороны, позволит обеспечить высокий уровень излучаемой средней мощности, а с другой – не позволяет получить разрешение по дальности, сравнимое с импульсными РЛС. Кроме того, при непрерывном режиме излучения значительное влияние на результаты измерений оказывают факторы, связанные с отражениями от местных предметов.

В последние годы в США и развитых странах Европы, а также в странах ближнего зарубежья и России получило распространение цифровое телевидение [5], главными особенностями которого являются:

- существенное сужение полосы частот цифрового телевизионного сигнала, достигаемое с помощью эффективного кодирования, то есть сокращения избыточности изображений, и позволяющее передавать 4 и более программ телевидения обычной чёткости или 1–2 программы телевидения высокой чёткости (ТВЧ) по стандартному телевизионному каналу с шириной полосы частот 6...8 МГц;
- единый подход к кодированию и передаче телевизионных сигналов с различной чёткостью изображения: видеотелефон и другие системы с уменьшенной чёткостью, телевидение обычной чёткости, ТВЧ;
- интеграция с другими видами информации при передаче по цифровым сетям связи.

Существует несколько стандартов цифрового телевидения, но основной интерес для реализации пассивной радиолокационной многопозиционной системы представляет стандарт DVB-T2 [6]. Анализ динамики внедрения цифрового телевидения на территории Российской Федерации показывает скорое покрытие основной территориальной части страны вещанием в цифровом формате, что представляет интерес для решения задач контроля воздушного пространства при помощи систем пассивной радиолокации.

Принцип построения системы местоопределения воздушных объектов по сигналам цифрового телевизионного вещания представлен на рис. 1.

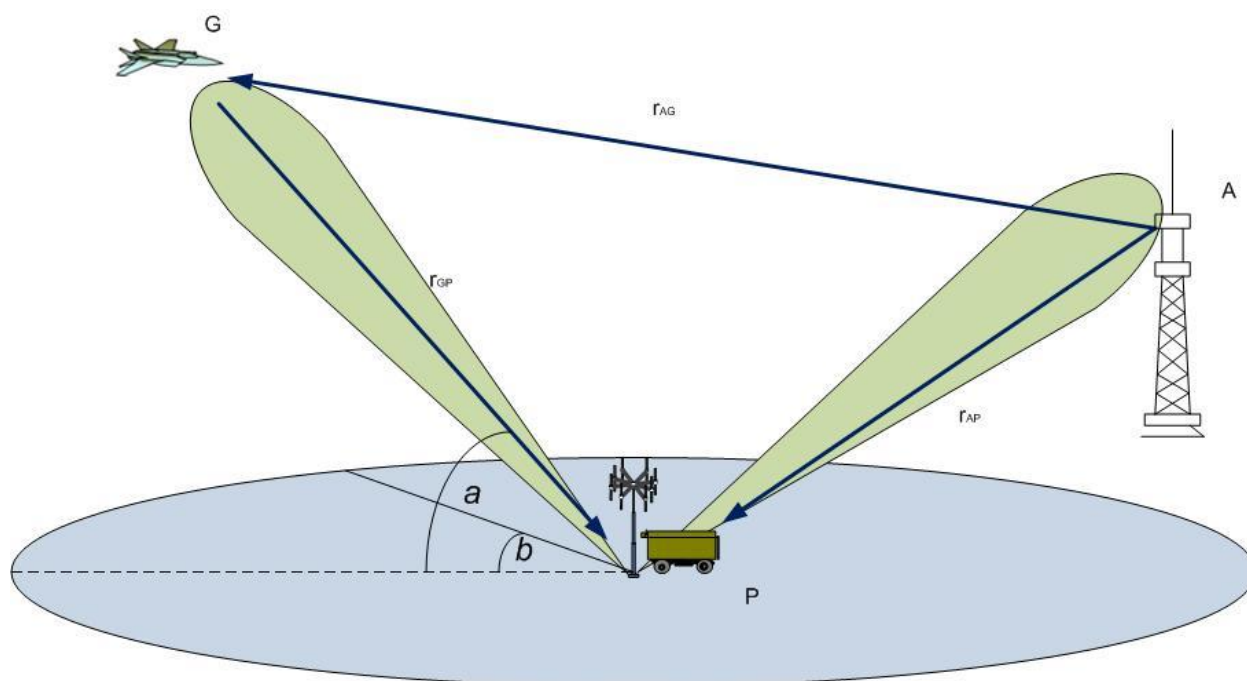


Рис. 1. Принцип построения системы местоопределения воздушных объектов по сигналам цифрового телевизионного вещания

На приёмном посту организуется двухканальный когерентный приём сигналов с выходов диаграммообразующего устройства антенных элементов круговой решётки, обеспечивающего формирование двух узких лучей в направлении воздушного объекта и телевизионной вышки. Методом последовательного цифрового формирования диаграммы направленности осуществляется сканирование пространства одним из лучей в заданном секторе как по углу места, так и по азимуту. При этом на каждом шаге сканирования оценивается наличие объекта в контролируемом секторе воздушного пространства на основе энергетического обнаружения и измеряется доплеровская частота на основе спектрального анализа сигнала по реперным частотным каналам, присутствующим в телевизионном сигнале.

Два и более измерения пеленгов на цель и оценки радиальной скорости, полученные на основе измерения доплеровской частоты, позволяют оценить точки траектории движения цели и реализовать однопозиционное местоопределение воздушного объекта.

2. Исходные данные

Движение воздушного объекта на участке измерений предполагается прямолинейным и равномерным с постоянной скоростью (V). Проекция углов прихода отражённых от воздушного объекта сигналов и траектории его движения может быть представлена плоскостью. Упрощённая схема представлена на рис. 2:

ПМ – приёмный модуль;

A_1, A_2, A_3 – точки пересечения траектории цели и пеленгов;

t_1, t_2 – время между измерениями пеленгов на цель A_1 и A_2 , A_2 и A_3 соответственно;

V_{r_1}, V_{r_2} – радиальные скорости в первой и второй точках измерения;

α_1, α_2 – углы между пеленгами на цель A_1 и A_2 , A_2 и A_3 соответственно;

Рассмотрим прямоугольную систему координат (ПМ расположен в нулевой точке системы), в которой примем первый пеленг – ось Y .

Для данной системы необходимо оценить координаты цели в точке A_1 . Зная, что $x=0$, требуется определить значение y .

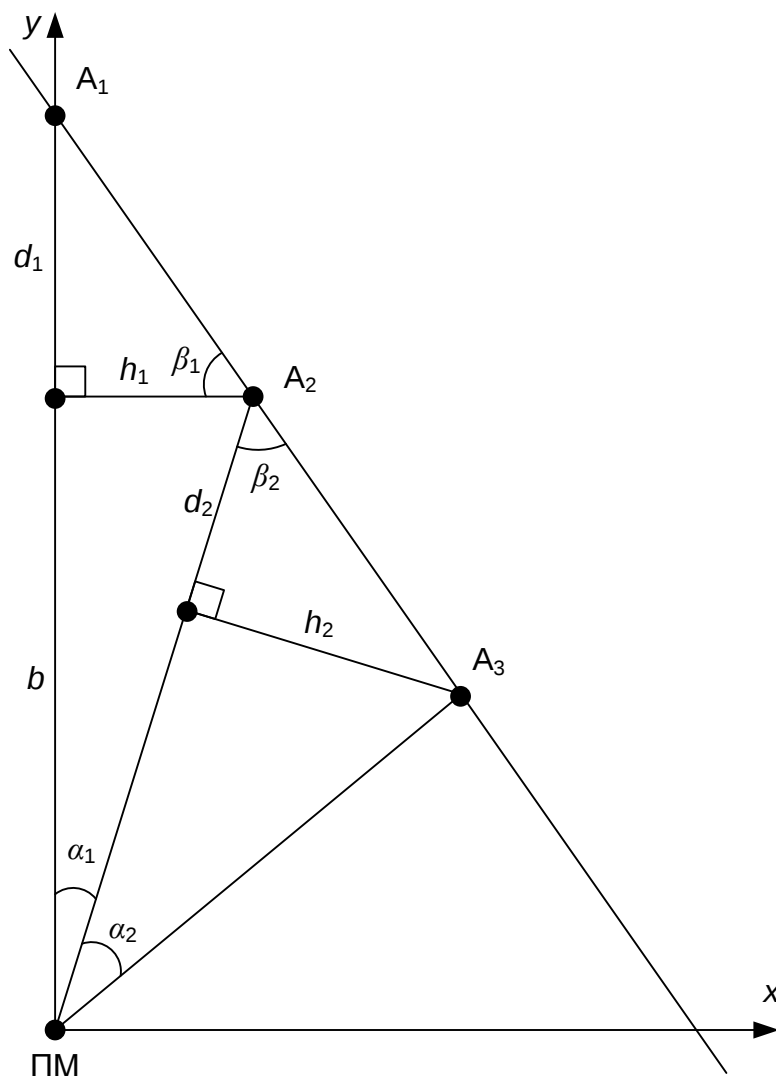


Рис. 2. Схема вычисления координат объекта

3. Метод

Суть метода определения местоположения воздушного объекта в пассивной системе радиолокации состоит в том, что для этого требуется измерение углов прихода отражённого от воздушного объекта и доплеровский сдвиг частоты. Данные параметры могут быть измерены современными техническими средствами с высокой точностью. По значению доплеровской частоты вычисляются радиальные скорости V_{r1} и V_{r2} воздушного объекта в точках A_1 и A_2 (рис. 2).

В соответствии с известными правилами, расстояние между точками A_1 , A_2 и точками A_2 , A_3 равно произведению скорости на время, прошедшее между измерениями в этих точках. Но также данные величины можно представить в соответствии с правилами тригонометрии:

$$Vt_1 = \frac{d_1}{\sin \beta_1} \text{ и } Vt_2 = \frac{d_2}{\cos \beta_2}. \quad (1)$$

Зная значения V_{r_1} , V_{r_2} и t_1 , t_2 , определяем $d_1 = V_{r_1} t_1$ и $d_2 = V_{r_2} t_2$; тогда выражения (1) принимают следующий вид

$$V = \frac{V_{r_1}}{\sin \beta_1} \text{ и } V = \frac{V_{r_2}}{\cos \beta_2} \text{ или } \frac{V_{r_1}}{\sin \beta_1} = \frac{V_{r_2}}{\cos \beta_2} \text{ или } V_{r_1} \cos \beta_2 = V_{r_2} \sin \beta_1. \quad (2)$$

Значение β_2 можно представить через угол β_1

$$\beta_2 = 180^\circ - (\beta_1 + (90^\circ - \alpha_1)) = 90^\circ - \beta_1 + \alpha_1 = 90^\circ + (\alpha_1 - \beta_1) \quad (3)$$

и далее подставляем (3) в (2)

$$V_{r_1} \cos(90^\circ + (\alpha_1 - \beta_1)) = V_{r_2} \sin \beta_1; \quad (4)$$

в соответствии с известными тригонометрическими уравнениями преобразуем (4) в

$$V_{r_1} \sin(\beta_1 - \alpha_1) = V_{r_2} \sin \beta_1; \quad (5)$$

далее преобразуем в разность произведений

$$V_{r_1} \sin \beta_1 \cos \alpha_1 - V_{r_1} \cos \beta_1 \sin \alpha_1 = V_{r_2} \sin \beta_1, \quad (6)$$

делим (6) на $\sin \beta_1$

$$V_{r_1} \cos \alpha_1 - \frac{V_{r_1} \sin \alpha_1}{\operatorname{tg} \beta_1} = V_{r_2}, \quad (7)$$

выводим из (7)

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{V_{r_1} \sin \alpha_1}{V_{r_1} \cos \alpha_1 - V_{r_2}} \quad (8)$$

и определяем значение угла β_1 :

$$\beta_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{V_{r_1} \sin \alpha_1}{V_{r_1} \cos \alpha_1 - V_{r_2}} \right). \quad (9)$$

Значение координаты y представлено суммой $y = d_1 + b$, где значение d_1 известно, а

$$b = \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha_1}. \quad (10)$$

Вычисляем значение h_1 из (10)

$$h_1 = \frac{d_1}{\operatorname{tg} \beta_1} = \frac{V_{r_1} t_1 (V_{r_1} \cos \alpha_1 - V_{r_2})}{V_{r_1} \sin \alpha_1} = \frac{t_1 (V_{r_1} \cos \alpha_1 - V_{r_2})}{\sin \alpha_1}. \quad (11)$$

Далее определяем значение b

$$b = \frac{t_1 (V_{r_1} \cos \alpha_1 - V_{r_2})}{\sin \alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{t_1 V_{r_1} \cos^2 \alpha_1 - t_1 V_{r_2} \cos \alpha_1}{\sin^2 \alpha_1}. \quad (12)$$

Зная значение (12), определяем координату y

$$y = V_{r_1} t_1 + \frac{t_1 V_{r_1} \cos^2 \alpha_1 - t_1 V_{r_2} \cos \alpha_1}{\sin^2 \alpha_1}. \quad (13)$$

Аналогично последовательно определяются все точки траектории по двум соседним измерениям. На основе известных выражений из местной прямоугольной системы координат могут быть рассчитаны географические координаты и высота цели.

4. Предложения по реализации

Данный метод определения местоположения может быть реализован в пассивной системе радиолокации с использованием в качестве подсвета излучений цифрового телевизионного вещания, построенной на основе приёмного модуля, включающего в себя:

1. Восьмизлементную антенную решётку.
2. Диаграммообразующее устройство (ДОУ) (двухканальный выход).
3. Двухканальное радиоприёмное устройство (РПрУ) прямого усиления и фильтрации когерентного приёма в полосе сигнала цифрового телевидения.
4. Двухканальная плата цифрового приёма.
5. Вычислительный модуль.
6. Приёмник навигационных сигналов.

Структура данной системы приведена на рис. 3.

Диаграммообразующее устройство (ДОУ) предназначено для направленного приёма радиосигналов антенной системой. Это обеспечивается тем, что в ДОУ производится сдвиг фазы радиосигналов в каналах таким образом, чтобы сигналы, поступающие с выбранного направления, были синфазны во всех каналах приёма. Суммирование сигналов обеспечивает выигрыш в соотношении сигнал/шум для выбранного направления.

После прохождения через каналные фазовращатели сигналы поступают на сумматор, где формируется суммарный сигнал. Управление коммутаторами и фазовращателями осуществляет контроллер. В качестве антенных элементов возможно применение вертикальных симметричных диполей как активного, так и пассивного типа.

Двухканальное РПрУ должно быть построено на основе модулей фильтрации и прямого усиления без переноса частоты с низким уровнем шума и высоким динамическим диапазоном (не менее 80 дБ).

В качестве модуля ЦОС целесообразно использовать модули цифрового когерентного приема на базе цифровых сигнальных конверторов, обеспечивающих выделение узких участков спектра из общего широкополосного сигнала с высоким динамическим диапазоном. Это необходимо для того, чтобы обеспечить минимальную погрешность измерения доплеровской частоты по реперным частотным каналам телевизионного канала.

Такая реализация системы позволяет осуществлять цифровое сканирование пространства узкой диаграммой направленности и определять углы прихода отражённого от воздушного объекта сигнала и измерять частоту Доплера между опорным и отражённым сигналом для последующего определения местоположения подвижных воздушных объектов.

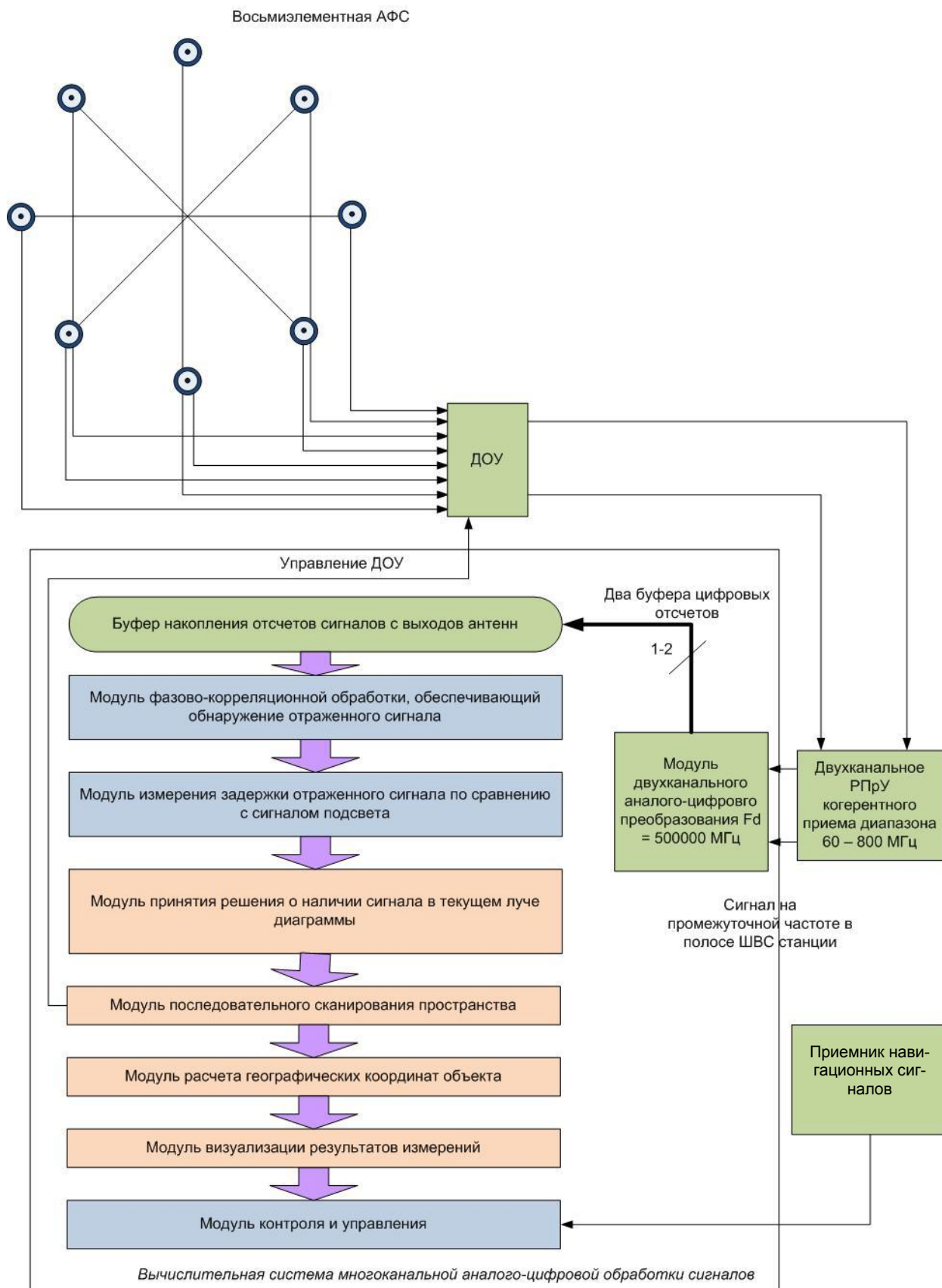


Рис. 3. Структура пассивной системы местоопределения воздушных объектов по сигналам цифрового телевидения

5. Заключение

Структура сигналов, энергетический потенциал и технический уровень реализации приёмных систем позволяют использовать излучения цифрового телевидения в качестве подсвета при создании систем пассивной радиолокации.

Низкая стоимость создания и обслуживания как стационарных, так и мобильных пассивных радиолокационных постов по сигналам широкоэмиттерных станций, позволяют использовать данные системы в качестве вспомогательных или дублирующих к основным (активным) системам контроля воздушного пространства.

Метод определения местоположения воздушных объектов в пассивных системах радиолокации по измерениям углов прихода отражённого сигнала и доплеровской частоты позволяет обеспечить всепогодный круглосуточный контроль воздушного пространства из одной позиции.

Основными недостатками метода являются сложность селекции нескольких объектов и большое влияние мощного основного сигнала на приёмный канал обнаружителя.

Литература

1. Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. Радио, 1970.
2. Аверьянов В. Я. Разнесённые радиолокационные станции и системы - Минск: Наука и техника, 1978.
3. Аношкин И.М. Зарубежные многопозиционные радиолокационные системы скрытного контроля воздушного пространства – Наука и военная безопасность, №1, 2007.
4. Алифанов Р.Н., Стародубцев П.А., Дементьев С.Г., Дементьев С.С. Системы общедоступного радиовещательного передатчика для обнаружения и сопровождения цели – Интернет-журнал «Наукоеведение», 2014, №6, <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN614.pdf>
5. Мамаев Н.С., Мамаев Ю.Н., Теряев Б.Г. Системы цифрового телевидения и радиовещания – М: Горячая линия-Телеком, 2007.
6. Смирнов А.В. Основы цифрового телевидения - М: Горячая линия-Телеком, 2001.
7. Справочник по радиолокации под ред. Н. Сколника Т. 1.- М.: Сов. Радио, 1976.

Статья поступила в редакцию 20.03.2015

Карев Виктор Викторович

к.т.н., помощник генерального директора ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» (105066, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20)

Король Олег Владимирович

д.в.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник научно-тематического отдела ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» (105066, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20), тел. 8(916)6409792, e-mail: korol950@mail.ru

Кузнецов Алексей Алексеевич

инженер ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» (105066, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20), тел. 8(910)5313486, e-mail: alsmit@mail.ru

Тимаков Дмитрий Аркадьевич

к.т.н., доцент, старший научный сотрудник НИЦ (г. Тверь) ЦНИИ ВВКО Минобороны России (170026, г. Тверь, наб. А.Никитина, д. 32), тел. 8(920)6929257,
e-mail: dimtim@km.ru

Leading-edge technology of aircraft position location in passive radar systems

Virtor V. Karev, Oleg V. Korol, Aleksey A. Kuznetsov, Dmitry A. Timakov

As a part of one of the ways to build passive radar system using digital TV broadcasting radiation systems as backlight, the method of position location of moving aerial objects was proposed. It is necessary to measure the angles of arrival of the reflected radiation and Doppler frequency for positioning determination.

Keywords: passive radar, Doppler frequency, location.