



УДК 621.396.96

Р. С. Фадеев, А. В. Мякинников, В. Н. Буров, А. Г. Огурцов  
Нижегородский государственный технический  
университет им. Р. Е. Алексеева

## Возможности обнаружения и определения координат малозаметных целей в многопозиционных радиолокационных системах с размещением позиций на борту беспилотных летательных аппаратов<sup>1</sup>

*Рассчитаны просветные эффективные площади рассеяния некоторых широко распространенных моделей беспилотных летательных аппаратов (БЛА), а также зона обнаружения просветной радиолокационной станции (РЛС) при работе по целям указанного типа. Предложена конфигурация просветной многопозиционной РЛС, повышающая эффективность обнаружения малозаметных целей. Построена общая структурная схема системы обработки сигналов. Получены оценки потенциальной точности определения координат целей в многопозиционных РЛС с размещением позиций на борту БЛА.*

**Многопозиционная просветная радиолокационная система, подвижные позиции, беспилотный летательный аппарат, зона обнаружения, компенсация пассивных помех, многоканальный когерентный накопитель, метод максимального правдоподобия, информационная матрица Фишера**

В последнее время все более широкое применение для решения задач воздушной разведки и нанесения ударов с воздуха находят беспилотные летательные аппараты (БЛА). БЛА, применяемые для разведки, имеют малые габариты; БЛА, используемые для нанесения высокоточных ракетных ударов, обладают большими размерами (порядка 10 м), но изготавливаются как правило, по технологии "Стелс". Для изготовления корпуса БЛА часто используются композитные материалы с высоким коэффициентом поглощения. Из литературных источников известно, что эффективная площадь рассеяния (ЭПР) современных БЛА составляет порядка  $0.001 \text{ м}^2$  [1], вследствие чего их обнаружение наземными моностатическими радиолокационными станциями (РЛС) затруднено. С другой стороны, использование для их обнаружения крупногабаритных РЛС с мощными передатчиками, обеспечивающими приемлемую зону обнаружения, может оказаться затруднительным при необходимости оперативного изменения зоны действия.

Эффективность обнаружения малозаметных целей может быть обеспечена при использовании

принципов просветной радиолокации за счет эффекта резкого увеличения эффективной площади рассеяния (ЭПР) при бистатическом угле (угле между линиями, соединяющими цель с передающей и приемной позициями), близком к  $180^\circ$ . При такой конфигурации просветная ЭПР цели не зависит от наличия радиопоглощающего покрытия, а определяется только теневым силуэтом цели [2], поэтому РЛС с обнаружением "на просвет" позволяют эффективно обнаруживать и измерять координаты малоразмерных целей, в том числе имеющих указанное покрытие [3]. Расширение зоны обнаружения просветной РЛС может быть достигнуто использованием многопозиционной конфигурации [2], при этом также возможно повышение разрешающей способности и точности измерения координат целей [2].

Одной из актуальных задач при проектировании является обеспечение быстрого развертывания радиолокационного комплекса в том месте, где его применение необходимо в данный момент. Одним из вариантов решения указанной задачи является размещение приемных и передающих позиций на

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0061 от 12 февраля 2013 г. (Постановление Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218).

борту БЛА, которые, передвигаясь в заданной области воздушного пространства, обеспечивали бы зону обнаружения необходимого размера и конфигурации. При этом вследствие малой ЭПР БЛА достигается хорошая скрытность самой системы. Кроме того, такое построение многопозиционной РЛС позволяет наилучшим образом использовать энергетический потенциал системы за счет выбора оптимального угла облучения целей.

**Эффективные площади рассеяния беспилотных летательных аппаратов.** На рис. 1 приведены контуры некоторых известных моделей БЛА: "MQ-1 Predator" (а), "RQ-2 Pioneer" (б), "Boeing X48B" (в) и "ZALA 42116" (г), а на рис. 2 – результаты расчета просветной ЭПР этих целей для пары ортогональных ракурсов (углов обзора). Контур 1 (вид "сбоку") соответствует просветной РЛС с расположением позиций на земле, контур 2 (вид "сверху") – при размещении передающей позиции в воздухе, а приемной – на земле. Зависимости просветных ЭПР от угловой координаты (азимута)  $\beta$  для этих же БЛА при движении цели поперек линии базы представлены на рис. 2. Расчеты проведены для длины волны  $\lambda = 0.13$  м методом аппроксимации, описанным в [3]–[5].

Кривые 1, 3 на рис. 2 соответствуют контуру 1 на рис. 1, кривые 2, 4 – контуру 2. Кривые 1, 2 получены для минимального расстояния между траекторией цели и линией базы  $\Delta r_{\min} = 0$ , кривые 3, 4 – для  $\Delta r_{\min} = 1$  км.

При  $\Delta r_{\min} = 0$  (траектория цели пересекает линию базы) просветная ЭПР цели при обзоре "сверху" значительно больше, чем при обзоре "сбоку". Кроме того, ширина основного лепестка больше для контура 2 (см. рис. 1). Это объясняется тем, что размер крыльев цели в направлении координаты  $x$  (см. рис. 1) намного меньше, чем в направлении координаты  $y$ , а ширина главного лепестка определяется в основном размером по координате  $x$ . Таким образом, при обзоре "сверху" наблюдается сумма доминирующего широкого основного лепестка просветной ЭПР крыльев и узких основного и боковых лепестков просветной ЭПР фюзеляжа. В результате формируется достаточно широкий главный лепесток с колебаниями, которые определяются лепестками диаграммы рассеяния контура фюзеляжа.

При смещении относительно линии базы усредненное ЭПР уменьшается, причем оно становится практически одинаковым для обоих направлений обзора, т. е. уменьшение ЭПР гораздо сильнее для обзора "сверху". Это объясняется узостью основного лепестка диаграммы прямого рассеяния цели при облучении "сверху", которая обусловлена большей площадью контура 2 (см. рис. 1).

Учитывая полученные результаты, можно предложить геометрию многопозиционной просветной РЛС (рис. 3). В этой конфигурации воздушные приемные позиции Пр1, Пр2 используются сов-

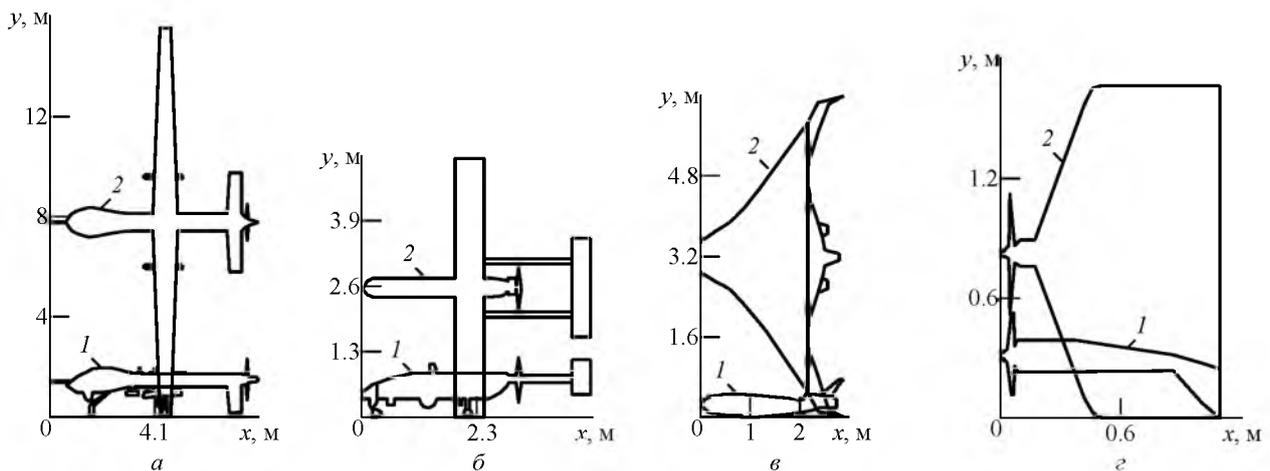


Рис. 1

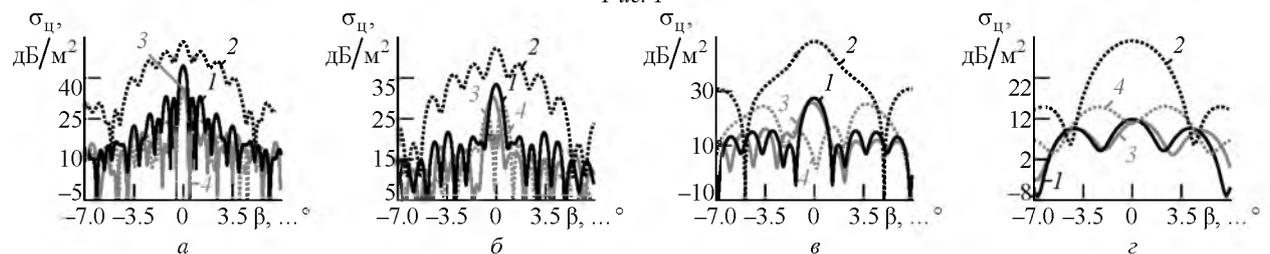


Рис. 2

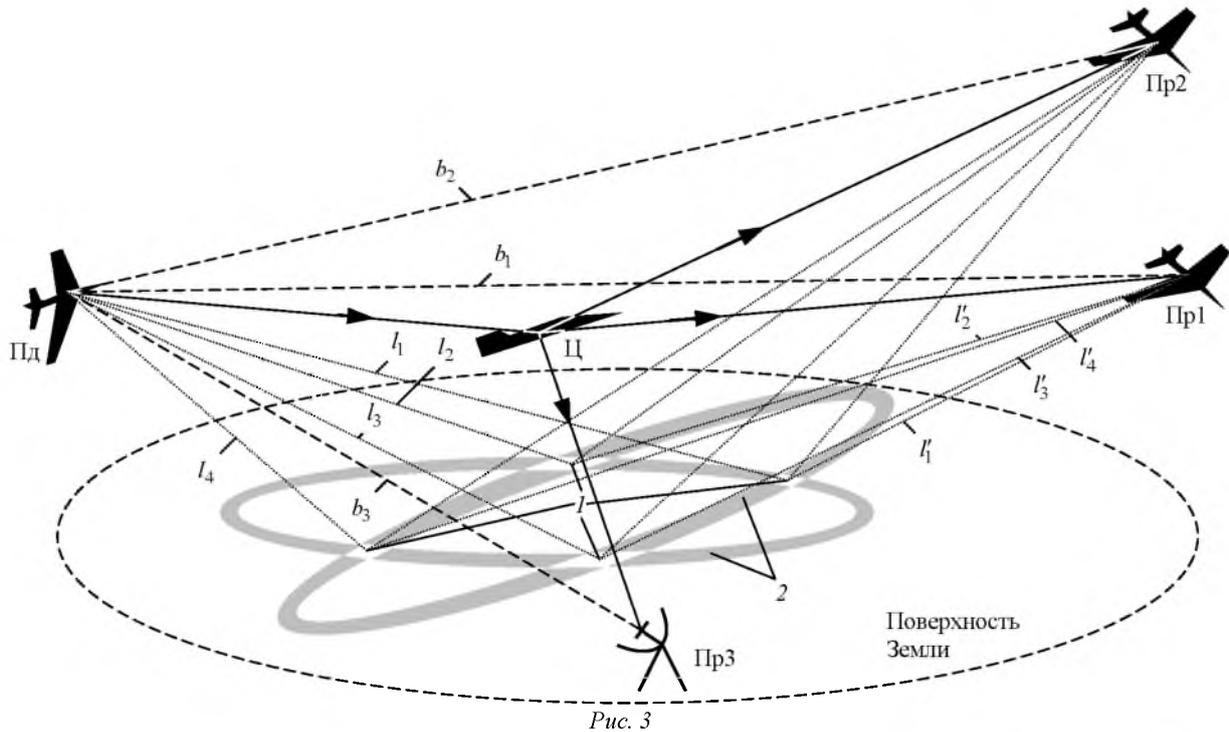


Рис. 3

местно с наземной приемной позицией Пр3. Подсвет цели Ц производится воздушной передающей позицией Пд. На рис. 3 указаны также расстояния  $b_1 - b_3$  между Пд и Пр1–Пр3. Сплошными линиями показано распространение электромагнитной энергии от Пд до Ц и далее распространение отраженной энергии к Пр1–Пр3. Высота полета воздушных позиций должна быть не меньше высоты полета цели. Предложенная конфигурация обладает рядом преимуществ перед конфигурацией с наземным размещением позиций. Во-первых, в ней возможно облучение цели при выгодном ракурсе ("сверху"), во-вторых, поскольку лучи диаграмм направленности наземных приемных антенн ориентированы на воздушные позиции, влияние отражений от поверхности Земли минимально.

При размещении позиций на подвижных носителях спектр пассивной помехи (ПП) от местных предметов и подстилающей поверхности сдвигается за счет взаимного перемещения приемной и передающей антенн, причем для разных участков отражающей поверхности этот сдвиг оказывается различным. Вследствие ограниченности геометрических размеров БЛА на Пр1 и Пр2 предполагается использование слабонаправленных антенн, поэтому измерение угловых координат целей (азимута и угла места) не производится, а измеряемыми параметрами являются временные задержки сигналов. Каждая пара, включающая передающую и одну из приемных позиций, характеризуется пространственными элементами разреше-

ния в виде эллипсоидов равной суммарной дальности. На поверхности Земли эти эллипсоиды отображаются эллипсами равной дальности (см. рис. 3, 2), пересечение которых определяют элементы разрешения системы  $l$ . Лучи  $l_1, l'_1 - l_4, l'_4$  отображают формирование мешающего сигнала отражения от подстилающей поверхности. Антенна наземной позиции Пр3 направлена в сторону передающей позиции, в связи с чем диаграмма направленности имеет положительный угол места. При этом влияние поверхности будет существенно меньше, чем для случая воздушных приемных позиций, и влиянием подстилающей позиции на наземную приемную позицию можно пренебречь.

Важно отметить, что различным участкам поверхности соответствует различная задержка отраженного сигнала. Таким образом, для компенсации ПП необходимо, чтобы РЛС обладала разрешающей способностью по задержке, для чего следует использовать сигналы с широким спектром. Анализ показывает, что ширина полосы сигнала для обеспечения необходимого разрешения по задержке при длине линии базы порядка 10 км и длине волны около 0.5 м должна составлять более 100 МГц, т. е. должны применяться широкополосные или сверхширокополосные зондирующие сигналы. При этом размер элемента разрешения подстилающей поверхности будет составлять, приблизительно,  $100 \times 100$  м.

**Принципы построения системы обработки сигналов.** Рассмотрим общие принципы постро-

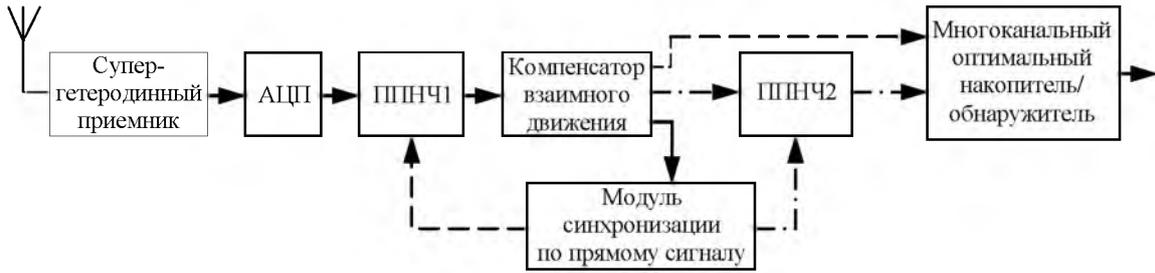


Рис. 4

ения системы обработки широкополосных импульсных сигналов на приемной позиции бистатической (просветной) РЛС. Общая структурная схема системы обработки изображена на рис. 4.

Сигнал промежуточной частоты  $f_{ПЧ}$  с выхода супергетеродинного приемника поступает на первый преобразователь с понижением несущей частоты (ППНЧ1). В ППНЧ1 спектр сигнала переносится на нулевую частоту. Однако вследствие доплеровского смещения частоты, обусловленного взаимным движением позиций, и нестабильности частоты гетеродина  $f_{Г}$ , к тому же не точно совпадающей с центральной частотой сигнала  $f_{ПЧ}$ , прямой сигнал на выходе ППНЧ1 имеет центральную частоту  $\Delta f$ , отличную от нуля.

Необходимо оценить частоту  $\Delta f$  и дополнительно перенести сигнал на нулевую частоту. Возможны два варианта: использование ППНЧ2 (ход сигнала показан штрихпунктирными линиями) или обратной связи для подстройки  $f_{Г}$  в ППНЧ1 (система частотной автоподстройки частоты) (ход сигнала показан штриховыми линиями).

используется режекторный фильтр  $РФ_i$  подавления ПП в элементе разрешения, в каждый момент времени настроенный таким образом, что центральная частота зоны режекции  $f_{ПП}$  соответствует текущим параметрам движения позиций, а ширина зоны режекции  $\Delta f_{ПП}$  определяется разбросом доплеровских частот ПП в элементе разрешения (рис. 6). В рассматриваемом диапазоне длин волн при скоростях движения позиций до 200 м/с ширина спектра помехи в элементе разрешения может составлять до 300 Гц.

После РФ включены когерентный многоканальный (по частоте Доплера рассеянного целью сигнала) накопитель пачки и схема обнаружения цели. Сигналы от каналов обнаружения поступают в схему вторичной обработки. По совокупности обнаружений и измерений параметров сигналов производится вторичная обработка, в результате которой строятся траектории движения целей.

**Пример расчета зоны обнаружения.** Методика расчета зоны обнаружения подробно изложена в [3]. В качестве примера определим срез

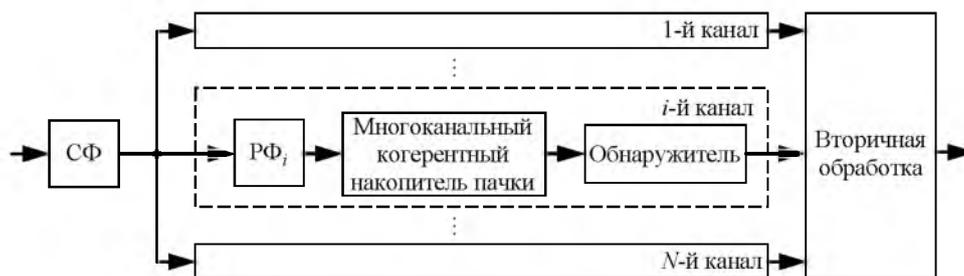


Рис. 5

Далее сигнал поступает в оптимальный накопитель-обнаружитель (рис. 5), состоящий из согласованного фильтра (СФ) для одиночного сигнала и каналов обнаружения для каждого элемента разрешения. Результаты первичных измерений поступают на вход модуля вторичной обработки.

В бистатической системе доплеровский сдвиг частоты обуславливается как движением позиций, так и взаимными скоростями позиций и цели. Поэтому в каждом  $i$ -м канале обнаружения

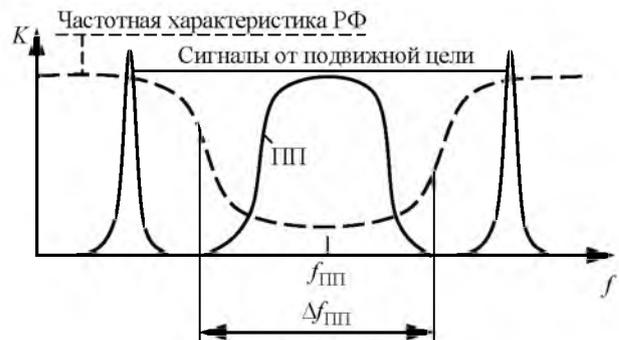


Рис. 6

областей обнаружения цели БЛА "Boeing X48B" для одной пары "передатчик–приемник", которую можно рассматривать как отдельную бистатическую ячейку многопозиционной системы. При расчетах длина линии базы полагалась равной  $b = 5$  км, угловые положения цели  $-15 \leq \alpha_{ц} \leq 15^\circ$ . Рабочая длина волны  $\lambda = 0.13$  м, импульсная мощность излучения передатчика  $P_{Пд} = 50$  Вт. Расчет проведен для двух приемных позиций: приемной позиции на БЛА и наземной приемной позиции. В первом случае вследствие ограниченности геометрических размеров БЛА предусматривалось использование слабонаправленной антенны с коэффициентом направленного действия  $D_{Пр} = 16$  дБ, эквивалентными размерами раскрыва в азимутальной плоскости  $A_3 = 0.52$  м, в угломестной плоскости  $B_3 = 0.13$  м. При расчете параметров системы относительно наземной приемной позиции на последней предусматривалось использование антенны с коэффициентом направленного действия  $D_{Пр} = 33$  дБ и размерами раскрыва  $A_3 = 2.5$  м,  $B_3 = 1.3$  м.

На рис. 7, а представлен срез области обнаружения для случая размещения приемной позиции на БЛА при характерном для этого случая обзоре "сбоку". На рис. 7, б показан аналогичный срез наземной приемной позиции и характерным для этого случая обзором "сверху". Ширина зоны обнаружения цели  $\Delta l$  одной парой позиций при размещении приемной позиции на БЛА составляет 400 м, при наземной приемной позиции – 1500 м.

Используя несколько пар передающих и приемных позиций, входящих в состав МПРЛС, можно обеспечить формирование общей зоны обнаружения системы.

**Потенциальная точность определения координат.** Выясним потенциальную точность определения координат целей для МПРЛС с конфигура-

цией, представленной на рис. 3. На практике число передающих позиций может быть и больше. В этом случае необходимо отдельно принимать сигналы, излученные разными передатчиками, на каждой из приемных позиций. Для этого передающие позиции должны излучать ортогональные (или квазиортогональные) сигналы.

Рассмотрим случай, когда первичными параметрами являются суммарные дальности "передатчик–цель–приемник"  $l_{k,i}$  ( $k = \overline{1, 3}$  – номер приемной позиции;  $i$  – момент выполнения  $i$ -го измерения первичных параметров), которые определяются по измерениям временных задержек рассеянных целью сигналов относительно прямого сигнала передатчика. Будем полагать, что цель движется по прямолинейной траектории. Связь между первичными параметрами и параметрами траектории в декартовой системе координат имеет следующий вид:

$$l_{k,i}(\mathbf{x}_n) = \sqrt{(x_i - x_{Пр_{k,i}})^2 + (y_i - y_{Пр_{k,i}})^2 + (z_i - z_{Пр_{k,i}})^2} + \sqrt{(x_{Пд_i} - x_i)^2 + (y_{Пд_i} - y_i)^2 + (z_{Пд_i} - z_i)^2}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}_n = [x_n, y_n, z_n]^T$  – вектор координат цели при  $n$ -м последовательном измерении;  $x_i, y_i, z_i$  – координаты цели в  $i$ -й момент;  $x_{Пр_{k,i}}, y_{Пр_{k,i}}, z_{Пр_{k,i}}$  – координаты приемных позиций в  $i$ -й момент;  $x_{Пд_i}, y_{Пд_i}, z_{Пд_i}$  – координаты передающей позиции в  $i$ -й момент, причем "Т" – символ транспонирования.

Положим, что выполнено  $N$  последовательных измерений суммарных дальностей "передатчик–цель–приемник"  $l_{1,i}, l_{2,i}, l_{3,i}$ , образующих вектор измерений:

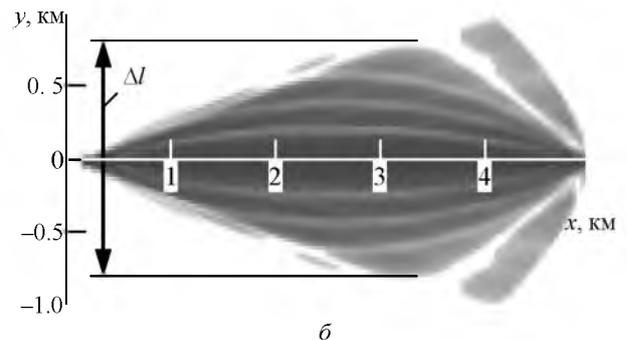
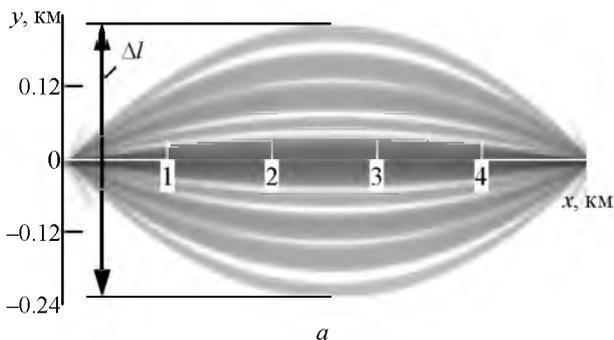


Рис. 7

$$\hat{\mathbf{I}}_N = [\hat{l}_{11}, \hat{l}_{21}, \hat{l}_{31}, \dots, \hat{l}_{1N}, \hat{l}_{2N}, \hat{l}_{3N}]^T = \mathbf{I}_N(\mathbf{x}_N) + \Delta \mathbf{I}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{I}_n$  – нелинейная векторная функция, компоненты которой описываются (1);  $\Delta \mathbf{I}_n$  – вектор ошибок измерений.

Будем считать, что ошибки измерения первичных параметров (суммарных дальностей) независимы для каждого момента времени и распределены по гауссовскому закону с известными дисперсиями  $\sigma_{l_k}^2$ , полагаемыми далее одинаковыми для всех моментов времени. При этом считаем, что координаты приемников и передатчика в каждый момент времени точно известны.

При использовании метода максимального правдоподобия потенциальная точность определения координат цели определяется информационной матрицей Фишера. Для описанной модели наблюдения элементы матрицы Фишера [2], [6] запишем в виде

$$J_{mk}(\mathbf{x}_n) = -M \left\{ \frac{\partial^2 \ln p(\hat{\mathbf{I}}_n | \mathbf{x}_n)}{\partial \theta_{mn} \partial \theta_{kn}} \right\} = \frac{1}{\sigma_{l_1}^2} \sum_{i=1}^N \frac{\partial l_{1,i}(\mathbf{x}_n)}{\partial \theta_{mn}} \frac{\partial l_{1,i}(\mathbf{x}_n)}{\partial \theta_{kn}} + \frac{1}{\sigma_{l_2}^2} \sum_{i=1}^N \frac{\partial l_{2,i}(\mathbf{x}_n)}{\partial \theta_{mn}} \frac{\partial l_{2,i}(\mathbf{x}_n)}{\partial \theta_{kn}} + \frac{1}{\sigma_{l_3}^2} \sum_{i=1}^N \frac{\partial l_{3,i}(\mathbf{x}_n)}{\partial \theta_{mn}} \frac{\partial l_{3,i}(\mathbf{x}_n)}{\partial \theta_{kn}}, \quad (3)$$

где  $M\{\cdot\}$  – знак статистического усреднения;  $p(\hat{\mathbf{I}}_n | \mathbf{x}_n)$  – условная плотность вероятности вектора измерений  $\hat{\mathbf{I}}_n$ ;  $\theta_m, \theta_k, m, k = \overline{1, 3}$  – элементы вектора  $\mathbf{x}_n$ :  $\theta_{1n} = x_n$ ;  $\theta_{2n} = y_n$ ;  $\theta_{3n} = z_n$ .

Используя (3), можно найти дисперсии  $\sigma_{x,N}^2, \sigma_{y,N}^2, \sigma_{z,N}^2$  ошибок определения параметров траектории как диагональные элементы матрицы, обратной матрице Фишера.

Расчеты выполнены для следующих значений параметров системы:  $b_1 = 5020$  м,  $b_2 = 5030$  м,  $b_3 = 5025$  м, скоростях цели  $v_{ц} = 80$  м/с, передающей позиции  $v_{Пд} = 10$  м/с, приемных позиций  $v_{Пр1} = v_{Пр2} = 10$  м/с,  $v_{Пр3} = 0$ . Цель и приемные позиции Пр1 и Пр2 движутся вдоль оси  $Oy$ , начальная высота полета цели 500 м, ее высота полета в конце наблюдения 776 м, полет Пр1 и Пр2 происходит на постоянной высоте. Начальное положение цели задавалось координатами влета в зону обнаружения:  $x_{ц_0} = 2500$  м,  $y_{ц_0} = 200$  м. Начальное положение приемных позиций Пр1:  $x_{Пр1_0} = 0$ ,  $y_{Пр1_0} = 500$  м,  $z_{Пр1_0} = 500$  м; Пр2:  $x_{Пр2_0} = 0$ ,  $y_{Пр2_0} = 1500$  м,  $z_{Пр2_0} = 500$  м; Пр3:  $x_{Пр3_0} = 0$ ,  $y_{Пр3_0} = 1000$  м,  $z_{Пр3_0} = 0$ , начальное положение передающей позиции:  $x_{Пд_0} = 5000$  м,  $y_{Пд_0} = 950$  м,  $z_{Пд_0} = 1000$  м. Среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибок измерения суммарных дальностей положено  $\sigma_l = 0.5$  м.

На рис. 8 представлены зависимости среднеквадратических ошибок (СКО) определения координат цели:  $x$  (а),  $y$  (б) и  $z$  (в) от координаты  $y$  местоположения цели. При расчете кривых 1 в каждой точке траектории движения цели учитывалось только одно измерение набора первичных параметров ( $N = 1$ ), т. е. в (3) суммы заменялась единственным элементом. На зависимостях 1 наблюдается резкий рост ошибок определения координат при пересечения целью линий баз системы. Это обусловлено тем, что эллипс равной суммарной дальности в момент пересечения линии базы вырожда-

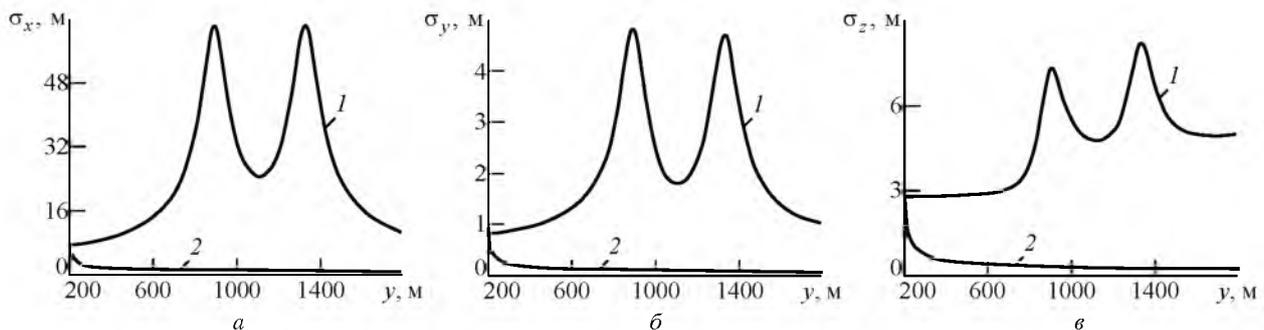


Рис. 8

ется в прямую, что приводит к обращению в ноль производной суммарной дальности по координате  $x$ .

Кривыми 2 на рис. 8 показаны зависимости СКО ошибок определения координат от координаты  $y$  местоположения цели при учете каждой точки траектории движения вектора из  $N$  измерений. При расчете интервал первичных измерений принимался равным  $T = 0.1$  с, интервал времени наблюдения за целью составлял 20 с. Таким образом, в конце наблюдения вектор первичных измерений состоял из 200 элементов. Как следует из полученных зависимостей, использование всех накопленных к текущему моменту измерений первичных параметров при наличии априорной информации о характере траектории движения цели позволяет существенно повысить точность определения координат.

На основании проведенных исследований следует сделать вывод, что цели с малой ЭПР (такие как БЛА) могут эффективно обнаруживаться с помощью многопозиционной просветной РЛС. Для обеспечения требуемой зоны обнаружения передающие позиции должны располагаться на борту воздушных позиций. В качестве таких позиций могут

выступать БЛА или другие летательные аппараты, способные в течение продолжительного времени оставаться на высотах, превышающих высоту движения потенциальных целей. Одним из основных преимуществ этой конфигурации является выгодный угол обзора целей. Обзор "сверху" значительно увеличивает ЭПР малозаметных целей типа БЛА по сравнению с обзором "сбоку", характерном для просветных РЛС с расположением позиций на земле.

Использование нескольких воздушных приемопередающих позиций позволит перекрыть требуемую зону обнаружения, при этом на борту каждой позиции достаточно разместить передатчик небольших размеров с мощностью в пределах десятков ватт.

Потенциальная точность определения координат в такой системе (на примере координаты  $x$  местоположения цели и при расстоянии между позициями порядка 5 км) составляет десятки метров (при использовании одного измерения набора первичных параметров) и единицы метров (при использовании вектора измерения набора первичных параметров).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moses Al., Rutherford M. J., Valavanis K. P. Radar-based detection and identification for miniature air vehicles, // Proc. of int. conf. on control applications (CCA). Denver, CO, USA, 28–30 Sept. 2011. IEEE: Los Alamitos, CA, USA, 2011. P. 933–940.
2. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
3. Bistatic radar: principles and practice / A. B. Blyakhman, A. V. Myakinkov, V. I. Kostylev et al. / ed. by M. Cherniakov. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. 504 p.
4. Blyakhman A. B. Forward scattering bistatic radar // PIERS Workshop on advances in radar methods, Baveno, Italy, 20–22 July 1998. Luxembourg: Europ. com. joint research centre. P. 107–113.
5. Blyakhman A. B., Runova I. A. Forward scattering radiolocation bistatic RCS and target detection // Proc. of the 1999 IEEE radar conference. Waltham, USA, April 1999. IEEE: Hoboken, USA, 1999. P. 203–208.
6. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.

R. S. Fadeyev, A. V. Myakinkov, V. N. Burov, A. G. Ogurtsov  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alekseev

### The capabilities of detection and coordinate measurement of low-observable target in multi-static radar with the placement of positions onboard of the UAV

*Forward scatter radar cross section of the widely spread models of unmanned aerial vehicles are calculated. The coverage of forward scatter radar when detecting targets of this type is estimated. The configuration of multi-static forward scatter radar enabling the improvement of low-observable target detection efficiency is proposed. The general block diagram of digital signal processing system is designed. The estimations of potential coordinate measurement accuracy in multi-static radar with the placement of positions on the UAV are obtained.*

Multi-static forward scattering radar, mobile positions, unmanned aerial vehicle, radar coverage, clutter cancellation, multi-channel coherent integrator, maximum-likelihood method, Fisher Information matrix

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2014 г.