

УДК 621.396.969

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ АЗИМУТА ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА ФАЗОВЫМ МЕТОДОМ С НЕПОДВИЖНЫМИ АНТЕННАМИ

А. В. Щеколдин, И. В. Журавлёв*

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Решена задача измерения азимута движущегося объекта с высокой точностью фазовым методом при использовании неподвижных антенн. Приведён алгоритм устранения неоднозначности при вычислении изменения азимута этим методом в случае, когда обнаружение объекта происходит в области однозначного определения азимута радиолокационной системой. Приведены результаты экспериментов по измерению азимута.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение азимутальных положений движущихся объектов является одной из ключевых задач радиолокации. Основой любого метода таких измерений является то, что в точке приёма направление нормали к фазовому фронту электромагнитной волны, отражённой от объекта, совпадает с направлением на сам объект. В зависимости от числа приёмопередающих каналов радиолокационные методы делятся на две категории: одноканальные и многоканальные. Точность измерения азимутального положения движущегося объекта многоканальным методом намного выше, т. к. общим недостатком одноканальных методов является чувствительность к флуктуациям амплитуды принимаемых сигналов.

В ряде технических задач необходимо измерять изменение азимута движущихся объектов с высокой точностью. Например, такие задачи приходится решать на радиолокационной баллистической станции, которая применяется для корректировки стрельбы артиллерийского орудия. При этом радиолокационная станция (РЛС) такого типа не измеряет вертикальный угол, т. к. он рассчитывается с достаточной точностью в баллистическом модуле.

Как известно, фазовый метод с двумя разнесёнными антеннами позволяет достичь высокой точности измерения азимута движущегося объекта по сравнению с другими методами измерения. Особенностью данной задачи является то, что обнаружение движущегося объекта происходит в момент, когда объект находится в области однозначного определения азимута радиолокационной системой.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Описываемая РЛС (см. рис. 1) состоит из двух антенн: приёмной (A_1) и приёмопередающей (A_2). Они разнесены в пространстве на расстояние d . Фазовый метод определения угловой координаты движущегося объекта основан на измерении угла наклона фазового фронта, проходящего в точку приёма волны, путём сравнения фаз сигналов, принятых в двух точках пространства.

Допустим, что на систему под углом θ (см. рис. 1) падает плоская волна, отражённая от движущегося объекта u . Сигналы в каналах антенн A_1 и A_2 отличаются друг от друга по фазе, т. к. волна проходит различные расстояния до фазовых центров антенн. Разность хода лучей 1 и 2 равна $d \sin \theta \cos \psi$, где ψ — угол места исследуемого объекта. Однако описываемая РЛС не

* cawa56@mail.ru

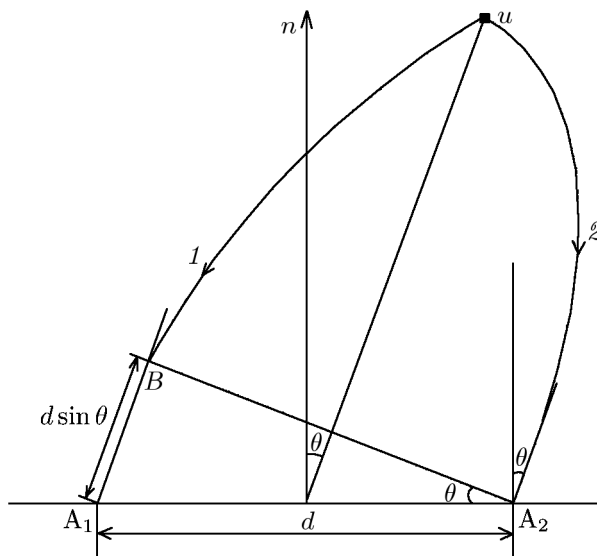


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая фазовый метод

вычисление осуществляется однозначно. Каналы приёма A_1 и A_2 должны иметь идентичные фазовые характеристики. При наличии фазового рассогласования во всех точках траектории движения объекта появляется постоянная ошибка измерения разности фаз.

В классическом виде устранение неоднозначности происходит за счёт того, что апертуры D приёмных антенн делают равными базе d , т. е. ширина диаграммы направленности (ДН) таких антенн делается равной λ/D . При большой апертуре приёмные антенны имеют узкую ДН. Максимальное значение угла θ равно $\theta_{\max} = \lambda/(2d) \ll 1$. Следовательно, азимутальный сектор, в котором происходит однозначное определение разности фаз, совпадает с шириной ДН. Недостаток данного подхода заключается в том, что для увеличения точности измерения азимута требуется увеличить не только базу РЛС, а ещё и апертуру каждой антенны [1].

Другой способ разрешения неоднозначности — это добавление в радиолокационную систему ещё нескольких антенн, которые располагаются на различных расстояниях друг от друга, обеспечивая перекрытие заданного сектора измерения угловых координат. Таким образом, пара антенн с малой базой обеспечивает грубое, но однозначное измерение угла, а пара антенн с большой базой обеспечивает точное, но неоднозначное измерение угла. В итоге можно объединить результаты измерений и однозначно определить угол с высокой точностью. Недостаток данного способа измерения угла заключается в необходимости использования дополнительных антенн.

Основы теории фазового метода подробно изложены в работе [2]. В патенте [3] описан пеленгатор, который измеряет угловые координаты и дальность и состоит из пяти приёмных антенн, расположенных в вершинах и центре симметричного креста. Они образуют в каждой плоскости две измерительные базы, d и $2d$. При этом меньшие базы (d) формируют грубые, но однозначные шкалы отсчёта угла, а большие базы ($2d$) — точные, но неоднозначные шкалы. В патенте [4] описан способ расширения возможностей базового фазового метода. С помощью его можно измерять радиальную скорость и угловые скорости движущегося объекта по азимуту и углу места и тем самым определять модуль вектора скорости.

В современной отечественной и зарубежной литературе существует множество патентов и статей по данной тематике. В основном они посвящены различным конструктивным особенностям построения фазовых пеленгаторов, которые расширяют возможности фазового метода пеленгации: например, приёму сигнала на разных частотах [5] и распознаванию цели в зависимости от

измеряет угломестную координату движения объекта. Таким образом, РЛС определяет изменение азимута движущегося объекта при условии $\psi = 0$. В таком случае разность хода лучей 1 и 2, как следует из треугольника A_1BA_2 (см. рис. 1), равна $d \sin \theta$. Следовательно, разность фаз сигналов равна $\Delta\varphi = kd \sin \theta$, где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны. Измерив $\Delta\varphi$, можно определить определяющий направление прихода волны угол θ :

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\lambda \Delta\varphi}{2\pi d} \right). \quad (1)$$

При этом, как и в любой фазовой системе, возникает проблема однозначности измерений. При увеличении базы РЛС достигается более высокая точность вычисления изменения азимута, но при этом сокращается сектор, в котором это

ракурса её наблюдения по критерию «точечная» или «протяжённая». Последнее повышает точность измерения угловых координат цели за счёт исключения результатов измерений с ошибками, вызванными её протяжённостью [6]. В патенте [7] описан фазовый пеленгатор, принимающий сложный сигнал с комбинированной фазовой и частотной модуляциями и находящийся на борту летательного аппарата. В патенте [8] излагается метод, позволяющий отличать полезный сигнал от остальных. Использование антенных решёток при измерении угловых координат и дальности фазовым методом описано в патенте [9]. Многопозиционная радиотехническая система рассмотрена в патенте [10]. Также существуют патенты на другие способы таких измерений, основанных на фазовом методе.

В данной задаче высокая точность пеленгации обеспечивается за счёт увеличения базы РЛС и устранения неоднозначности при условии обнаружения движущегося объекта в момент, когда он находится в области однозначного определения азимута РЛС.

2. УСТРАНЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ АЗИМУТА

Описываемая баллистическая РЛС имеет азимутальную ширину главного луча ДН 12° (по уровню 3 дБ от максимального значения мощности). Радиолокационная станция работает в импульсном режиме на длине волны 0,1 м. Расстояние между центрами приёмной и приёмопередающей антенн составляет $d = 1,81$ м. Таким образом, максимальный угол однозначного определения изменения азимута равен $\theta_{\max} = \lambda/(2d) \approx 1,58^\circ$, т. е. $-1,58^\circ < \theta < 1,58^\circ$. Поскольку ширина ДН намного больше ширины сектора однозначного определения изменения азимута, описываемая РЛС может определять изменения азимута неоднозначно.

В результате деривации, вращения снаряда, отдачи от выстрела и ветра происходит отклонение снаряда от нормали к апертуре РЛС. Пусть разность фаз определяется как разность фаз в левой и правой приёмных антеннах. Иными словами, если снаряд, удаляясь от РЛС, отклоняется в левую сторону относительно нормали, то $\Delta\varphi < 0$ и $\Delta\varphi$ спадает вдоль траектории снаряда. Если снаряд, удаляясь от РЛС, отклоняется в правую сторону относительно нормали, то $\Delta\varphi > 0$ и $\Delta\varphi$ будет нарастать вдоль траектории.

Проведённые испытания показывают, что выстрел из артиллерийского орудия сопровождается образованием облака плазмы и пороховых газов в области дульного среза, что приводит к экранированию сигнала приблизительно на 60 мс. Таким образом, при начальной скорости вылета снаряда из ствола 1 000 м/с его обнаружение приёмной антенной происходит приблизительно на расстоянии 60 м. Поскольку РЛС состоит из приёмной и приёмопередающей антенн, измерение азимута возможно только тогда, когда последняя работает на приём. Таким образом, момент времени измерения азимута зависит от длительности излучаемого сигнала. «Слепая» зона по дальности для рассматриваемой РЛС в режиме работы по снарядам составляет приблизительно 140 м.

Формулу (1) можно применять, когда исследуемый объект находится в дальней зоне РЛС. Как известно, эта зона определяется формулой

$$r \geq 2D^2/\lambda, \quad (2)$$

где r — расстояние от фазового центра антенны. Для описываемой РЛС апертура D по азимутальному направлению для каждой антенны составляет 60 см. Следовательно, дальняя зона для РЛС лежит в области $r \geq 7,2$ м. Поскольку РЛС измеряет азимут при расстоянии до объекта 140 м, формула (1) справедлива.

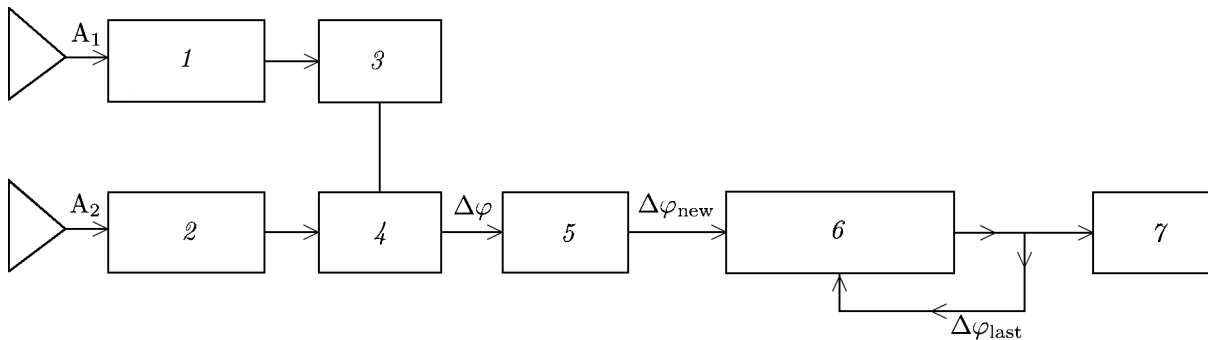


Рис. 2. Структурная схема предлагаемого алгоритма: 1 и 2 — приёмные антенны, 3 — фазовращатель, 4 — фазовый детектор, 5 — приведение разности фаз $\Delta\varphi$ к интервалу $-\pi < \Delta\varphi < \pi$, 6 — ликвидация скачка через $\pm\pi$, 7 — буфер памяти

В силу того, что приёмные каналы могут иметь неидентичные фазовые характеристики, при первом измерении появляется постоянная разность фаз (систематическая ошибка), которая сохраняется вдоль всей траектории движения снаряда. Поэтому после разрешения неоднозначности измеренную разность фаз в первой точке траектории можно вычесть из соответствующих значений во всех других точках, чтобы привести изменение разности фаз к нулю.

Предположим, что по мере удаления от РЛС исследуемый объект отклоняется по азимуту от нормали к апертуре РЛС более чем на $1,58^\circ$. В результате этого снаряд попадает в область неоднозначного определения изменения азимута. Для устранения неоднозначности разность фаз сначала приводится к диапазону значений от $-\pi$ до π (если разность фаз больше π , из неё вычитается 2π ; если разность фаз меньше $-\pi$ к ней прибавляется 2π). Затем анализируются разность фаз в текущей точке траектории и приведённая разность фаз в предыдущей точке траектории. Анализ заключается в том, чтобы ликвидировать скачок через π (или $-\pi$). Приведённая разность фаз в текущей точке траектории определяется как

$$\Delta\varphi_{\text{new}} = \Delta\varphi'_{\text{new}} + 2\pi \left[\frac{\Delta\varphi_{\text{last}} - \Delta\varphi'_{\text{new}}}{2\pi} \right], \quad (3)$$

где $\Delta\varphi'_{\text{new}}$ — измеренная разность фаз в текущей точке траектории, $\Delta\varphi_{\text{last}}$ — приведённая разность фаз в предыдущей точке, квадратные скобки означают округление до ближайшего целого значения. Структурная схема данного алгоритма приведена на рис. 2. Фазовращатель, показанный на этой схеме, смещает фазу сигнала на 90° , обеспечивая тем самым нечётность рабочей характеристики фазового детектора относительно разности фаз $\Delta\varphi$. Без фазовращателя теряется знак величины $\Delta\varphi$, что неприемлемо для измерения угловых координат.

Пусть исследуемый объект, удаляясь от РЛС, смещается вправо от нормали, т. е. разность фаз возрастает. Когда значение $\Delta\varphi$ превысит π , т. е. изменение азимута превысит $1,58^\circ$, например будет равно $1,6^\circ$, тогда разность фаз вместо $1,01\pi$ составит $-0,99\pi$ и при этом произойдёт неоднозначное определение изменения азимута. Для разрешения неоднозначности необходимо к значениям фазы в точке траектории, в которой случился скачок через π , и в дальнейших точках до следующего скачка через π прибавлять 2π . В процессе отклонения исследуемого объекта по азимуту более чем на $3,16^\circ$ для разрешения неоднозначности нужно к разности фаз в этих точках траектории прибавлять 4π и так далее.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЁННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Для испытания алгоритма на точность измерения азимута был проведён эксперимент на территории авиационно-технического спортивного клуба «Сокол» в г. Богородске Нижегородской области. В ходе испытаний было выполнено обнаружение, сопровождение и измерение координат (дальности, скорости, изменения азимута) движения самолёта Ан-2. Для его обнаружения использовалась описываемая радиолокационная баллистическая станция. Целью испытаний являлась экспериментальная проверка эффективности предлагаемого алгоритма измерения азимута, а также оценка потенциальных характеристик изделия.

В эксперименте РЛС располагалась на стендовой установке и работала не в штатном режиме. В качестве зондирующего сигнала использовался сигнал с линейной частотной модуляцией. Станция вычисляет изменение азимута фазовым методом, т. е. определяет угол отклонения направления на движущийся объект от нормали к апертуре РЛС. Поскольку в рассматриваемой задаче обнаружение движущегося объекта происходит в области однозначного определения азимута РЛС, азимут при первом измерении лежит в диапазоне $-1,58^\circ < \theta < 1,58^\circ$.

Самолёт Ан-2 набрал высоту 2000 м и удалился от РЛС примерно на расстояние 40 000 м. Во время полёта он не изменял высоту, т. к. РЛС не измеряет угловую координату в вертикальной плоскости. В эксперименте лучи РЛС непрерывно переключались по очереди каждые 1,5 с на углы места 6° , 15° , 24° , 33° и 42° . Таким образом, по мере удаления самолёта от РЛС его обнаружение произошло при угле места 42° , затем он непрерывно находился в одном из переключаемых лучей. Поскольку самолёт удалился от РЛС на 40 000 м при высоте полёта 2000 м, основное время полёта он был виден в луче, направленном под углом 6° в угломестной плоскости. В прототипе РЛС не было реализовано быстрое переключение лучей, поэтому сигнал когерентно накапливался в течение 1 с и за 0,5 с проводилось переключение направления луча.

Удаляясь от РЛС, самолёт совершал манёвры по азимуту, отклоняясь от условной прямой нашего слежения (нормали к апертуре РЛС). Положение антенн РЛС за весь период слежения оставалось неизменным. На борту Ан-2 находился GPS-навигатор «Garmin 64ST», который регистрировал координаты самолёта. Погрешность измерения координат, заявленная производителем GPS-навигатора, составляет не более 10 м.

На рис. 3 показан график полученной с помощью РЛС зависимости разности фаз сигналов в приёмной и приёмопередающей антеннах от дальности. Разность фаз приведена к диапазону от $-\pi$ до π . Измерение разности фаз происходило только в точках, которые соединены сплошными линиями. Для ликвидации неоднозначности измерения азимута к измеренной разности фаз был применён описанный выше алгоритм. На рис. 4 показан график зависимости приведённой (с помощью формулы (3)) разности фаз от дальности.

На рис. 5 дан график зависимости изменения азимута самолёта от дальности. Штриховая линия соответствует данным GPS-навигатора, точки — несглаженным значениям, которые измерены одним лучом РЛС, направленным в угломестной плоскости под углом 6° . Из этого рисунка видно, что самолёт, совершая манёвры по азимуту, отклонялся от условной прямой нашего слежения на измеренные с помощью РЛС углы от $-4,28^\circ$ до $5,17^\circ$. В данном эксперименте сектор однозначного определения изменения азимута РЛС составлял $-1,58^\circ < \theta < 1,58^\circ$. Таким образом, с помощью описанного алгоритма устранение неоднозначности при отклонении направления на самолёт от нормали к апертуре РЛС в правую сторону происходит 3 раза (для угла $5,17^\circ$), а в левую сторону — 2 раза (для угла $-4,28^\circ$).

На рис. 6 показан график зависимости разности между значениями азимута, полученными по GPS-навигатору и измеренными РЛС при дальностях начиная с 8 000 м, от дальности. Среднеквадратичное отклонение этой разности от нуля составляет 4,78016 мин.

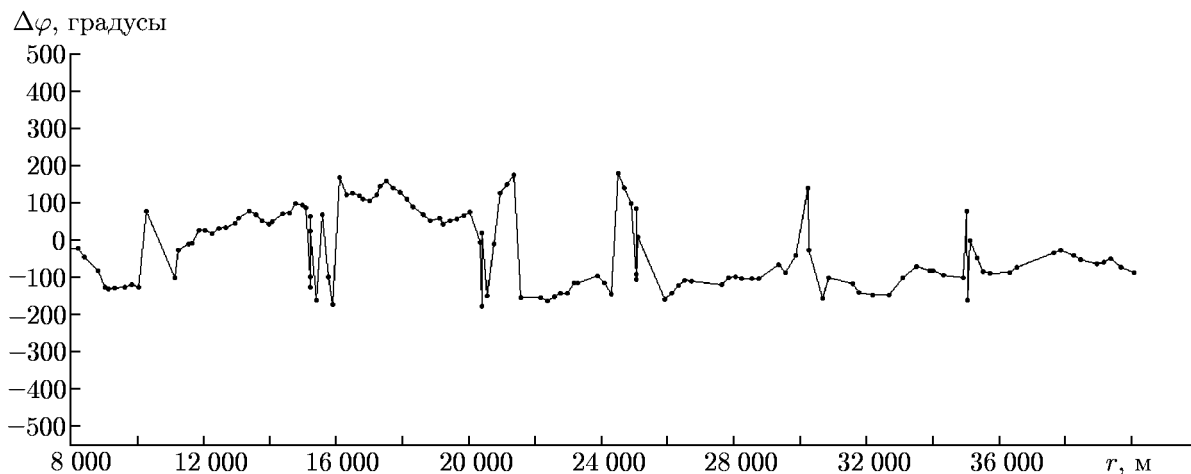


Рис. 3. Зависимость разности фаз, измеренной с помощью РЛС, от дальности

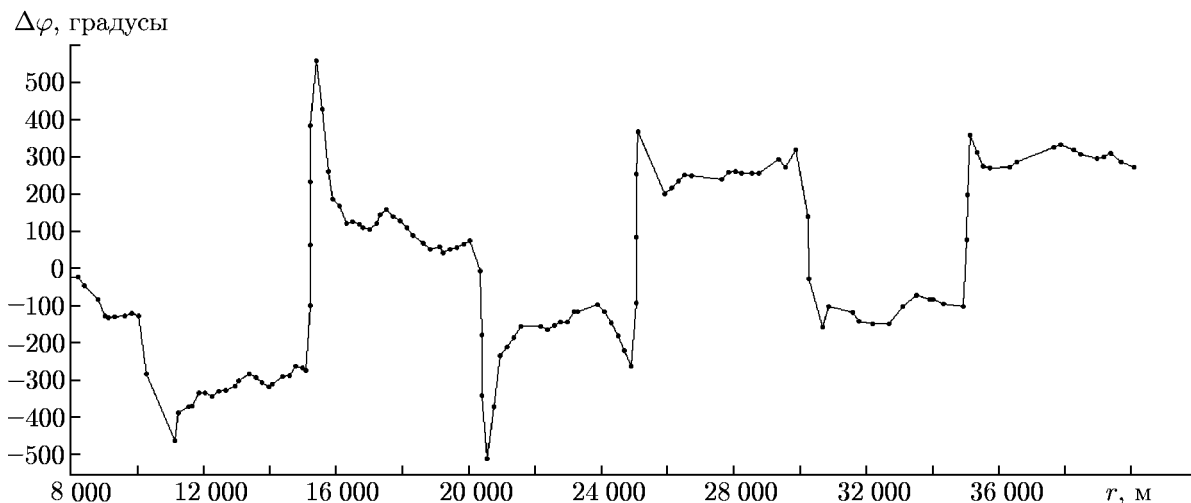


Рис. 4. Зависимость приведённой разности фаз, измеренной с помощью РЛС, от дальности

Эффективная площадь рассеяния артиллерийского снаряда меньше, чем у самолёта Ан-2. Таким образом, сигнал, отражённый от снаряда, необходимо накопить для достижения необходимого отношения сигнала к шуму. Однако ускорение торможения снаряда не позволяет оптимально накапливать сигнал в течение 1 с, как для самолёта. Поэтому описываемая РЛС для работы по артиллерийским снарядам должна функционировать в другом режиме: в ней в качестве зондирующего сигнала должен использоваться простой сигнал. Данный режим работы тестировался с использованием артиллерийского орудия. В эксперименте были произведены несколько выстрелов. Описываемый выстрел был сделан под углом места 12° . Табличная начальная скорость данного типа артиллерийского снаряда составляет 795 м/с. На рис. 7 показан график зависимости результатов измерения изменения азимута артиллерийского снаряда от дальности.

Несмотря на то, что артиллерийский снаряд имеет малую эффективную площадь рассеяния и время накопления сигнала составляет 0,1 с, уровень сигнала при обнаружении снаряда равняется примерно 70 дБ.

Поскольку скорость ухода снаряда по азимуту от направления нормали к апертуре РЛС невелика, его обнаружение всегда происходит в области однозначного определения азимута. При

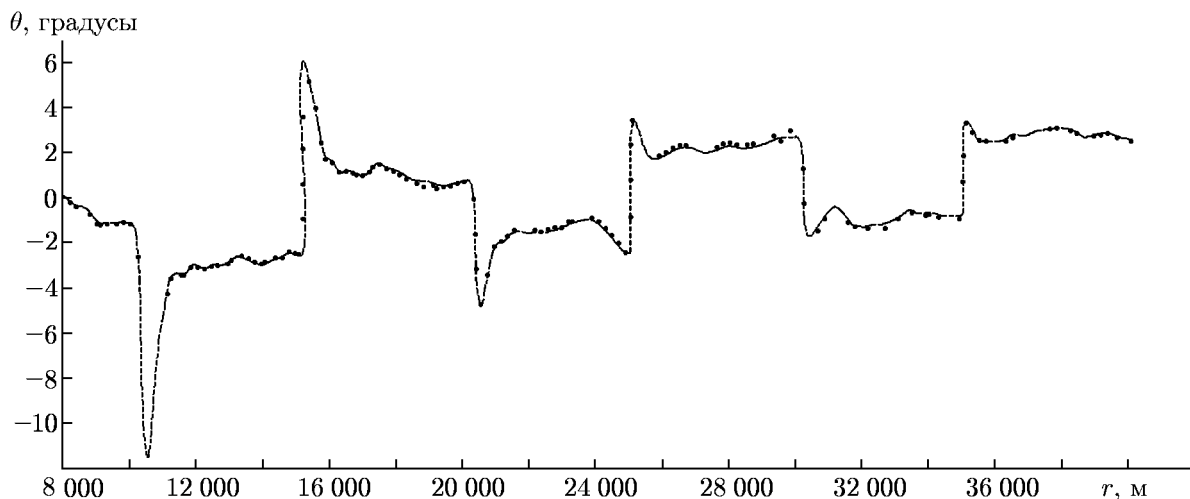


Рис. 5. Изменение азимута самолёта в зависимости от дальности

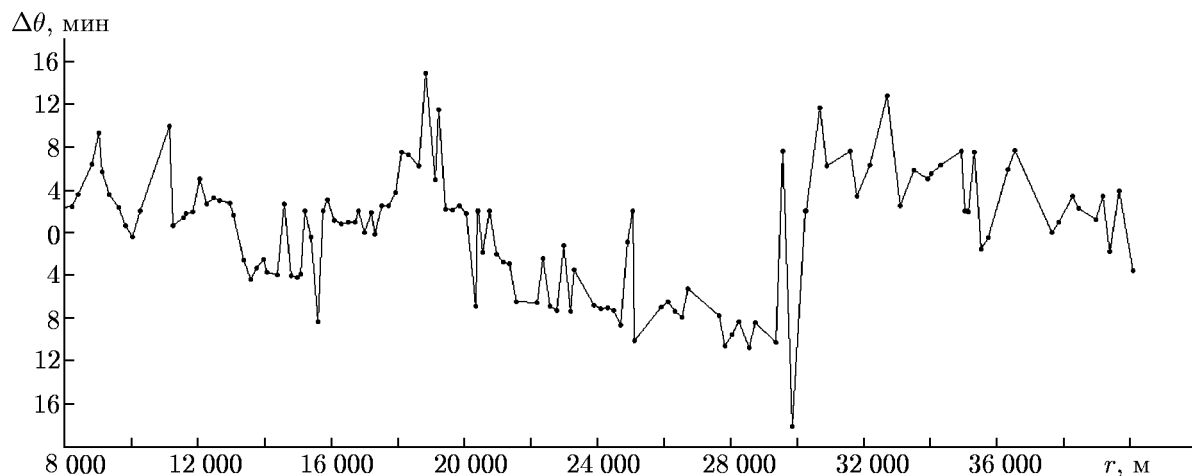


Рис. 6. Разность между значениями азимута, полученными по GPS-навигатору и измеренными РЛС, в зависимости от дальности

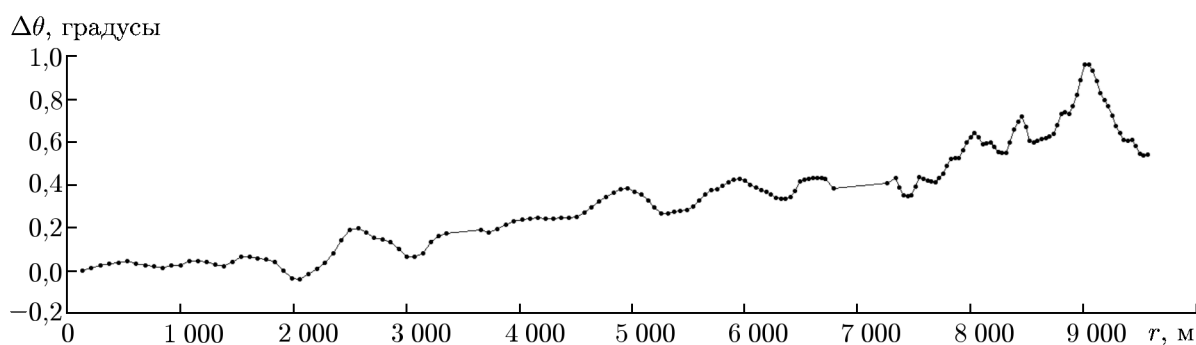


Рис. 7. Результаты радиолокационного измерения изменения азимута артиллерийского снаряда в зависимости от дальности

стрельбе из артиллерийского орудия под другим углом и с другим типом снаряда с большей начальной скоростью снаряд может сместиться на больший угол, чем угол однозначного измерения

азимута ($1,58^\circ$). В результате нужно применить описанный алгоритм устранения неоднозначности определения изменения азимута.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точность определения изменения азимутального положения фазовым методом намного выше по сравнению с другими методами. Большое отношение базы РЛС к длине волны позволяет обеспечить высокую точность вычисления изменения азимута. Увеличение базы РЛС ведёт к уменьшению влияния приёмопередающей антенны на приёмную антенну в момент излучения. Описанный алгоритм позволяет устранить неоднозначность измерения азимута для случая, когда обнаружение исследуемого объекта происходит при его нахождении в зоне однозначного определения азимута РЛС.

Проведённые испытания подтвердили хорошую точность вычисления изменения азимутального положения исследуемого объекта фазовым методом. Для полёта самолёта Ан-2 среднеквадратичное отклонение разности между значениями азимута, полученными по GPS-навигатору и измеренными РЛС, составило 4,78 мин. Испытания с использованием артиллерийского орудия показали, что скорость ухода снаряда по азимуту от направления нормали к апертуре РЛС невелика. Поэтому обнаружение снаряда всегда происходит в области однозначного определения азимута РЛС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1992. 304 с.
2. Кинкулькин И. Е., Рубцов В. Д., Фабрик М. А. Фазовый метод определения координат. М.: Сов. радио, 1979. 280 с.
3. Пат. 2134429 РФ. Фазовый способ пеленгации / В. И. Дикарев, И. Н. Карелов, А. И. Замарин. Заявл. 12.11.1997; Оpubл. 10.08.1999.
4. Пат. 2155352 РФ. G01S3/46. Фазовый способ пеленгации и фазовый пеленгатор для его осуществления / В. И. Дикарев, С. Г. Гумен, В. В. Журкович и др. Заявл. 23.11.1999; Оpubл. 27.08.2000.
5. Пат. 2526533 РФ. G01S3/46. Фазовый пеленгатор / В. А. Березовский, И. Д. Золотарёв, Д. Д. Привалов. Заявл. 03.12.2012; Оpubл. 27.08.2014. Бюл. № 24. С. 11.
6. Пат. 2363962 РФ. G01S3/10. Способ измерения угловых координат цели и радиолокационный координатор цели / В. И. Винокуров, Д. В. Винокуров. Заявл. 07.03.2007; Оpubл. 27.09.2008. Бюл. № 22. С. 9.
7. Пат. 2518428 РФ. G01S3/46. Фазовый способ пеленгации и фазовый пеленгатор для его осуществления / А. В. Жуков, В. Л. Гогин, О. В. Зайцев, В. И. Дикарев. Заявл. 26.06.2012; Оpubл. 10.06.2014. Бюл. № 16. С. 18.
8. Пат. 8532207 US. H04L27/28, H04K1/10. Methods and systems for distinguishing a signal of interest from interference signals / Hanson C. S., Winstead B. J. Заявл. 27.05.2011; Оpubл. 10.09.2013.
9. Пат. 7498976 US. G01S7/52, G01S7/48, G01S19/22, G01S19/47. System and method for passively estimating angle and range of a source using signal samples collected simultaneously from a multi-aperture antenna / Schober M. B. Заявл. 11.10.2007; Оpubл. 3.03.2009.

10. Пат. 2521084 РФ. G01S3/46. Разностно-дальномерный способ определения координат источника радиоизлучения / Л. А. Овчаренко, А. В. Панков, В. А. Погорелов и др. Заявл. 24.09.2012; Оpubл. 27.06.2014. Бюл. № 18. С. 10.

Поступила в редакцию 10 ноября 2015 г.; принята в печать 13 февраля 2017 г.

DETERMINATION OF VARIATION IN THE MOVING-OBJECT AZIMUTH BY THE PHASE METHOD WITH FIXED ANTENNAS

A. V. Shchekoldin and I. V. Zhuravlev

We solve the problem of the high-accuracy measurement of the moving-object azimuth by the phase method using the fixed antennas. The algorithm for eliminating the ambiguity when calculating the azimuth variation by the above-mentioned method in the case where the object is detected in the region of unambiguous azimuth determination by a radar system is proposed. The experimental azimuth-measuring results are shown.