

Радиолокационные и радионавигационные системы

УДК 621.396.96

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТРЁХМЕРНЫХ КООРДИНАТ И ВЕКТОРА СКОРОСТИ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПОЛЕ СУММАРНО-ДАЛЬНОМЕРНЫХ СТАНЦИЙ РАЗНЕСЁННОГО ПРИЁМА

Терсин Владимир Владимирович

кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов» (АО «МЗ РИП»).

E-mail: vvtersin@yandex.ru.

Адрес: 602267, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, Карачаровское шоссе, д. 2.

Аннотация: Рассматриваются особенности организации радиолокационного поля, создаваемого суммарно-дальномерными системами разнесённого приёма, измеряющими долготу, широту и высоту воздушных объектов. Указанные координаты определяются с помощью метода Ньютона, находящего решение системы уравнений, связывающих неизвестные географические координаты объектов с измеренными суммарными дальностями. Анализируется возможность измерения трёхмерного вектора скорости воздушного объекта с помощью решения системы нелинейных уравнений, связывающих в локальной декартовой системе координат сумму проекций вектора скорости объекта на направления от передатчика к объекту и от объекта к каждому приёмнику с измеренными частотами Доплера. Оцениваются энергетические характеристики анализируемой трёхкоординатной суммарно-дальномерной системы с помощью её сравнения с двухкоординатной однопозиционной РЛС.

Ключевые слова: разнесённый приём, суммарно-дальномерный алгоритм, географическая система координат, метод Ньютона, смещение оценки, среднеквадратическая ошибка, долгота, широта, высота, полоса сигнала, частота Доплера, вектор скорости, многолучевое распространение, энергетические характеристики.

Введение

С момента появления однопозиционных радиолокационных станций (РЛС) всегда стремились обеспечить максимально возможную дальность обнаружения воздушных целей, которая из-за сферической поверхности Земли определялась высотой полета этих объектов. Так цель, летящую на высоте 10 км, можно было обнаружить на дальности, не превышающей 415 км с учётом рефракции.

Для увеличения дальности обнаружения низколетящих целей приёмно-передающую антенную решетку и, как правило, устройство первичной обработки принимаемого сигнала трёхкоординатной РЛС дальнего обнаружения приходится поднимать на соответствующую высоту. Так при подъёме антенны на высоту полёта цели дальность обнаружения увеличи-

вается в 2 раза, и при высоте цели в 50 м составляет около 60 км.

Возможность подъёма антенны на пятидесятиметровую высоту определяется, прежде всего, её размерами, зависящими от частотного диапазона РЛС и ширины диаграммы направленности, которая определяет точность измерения угловых координат цели. Если в начале дециметрового диапазона это затруднительно и, следовательно, дорого, то с середины дециметрового и, тем более, в метровом диапазоне просто невозможно. Увеличение же длины волны желательно, так как это повышает мощность сигналов, отражаемых от целей, созданных по stels-технологии.

Как показал опыт последних локальных конфликтов, однопозиционная РЛС дальнего обнаружения с последовательным сканировани-

ем пространства может быть очень быстро, в свою очередь, обнаружена, а затем подавлена средствами радиоэлектронной борьбы [1–3] или разрушена специальными противоракетами [4].

Для снижения вероятности обнаружения излученного сигнала РЛС средствами радио-разведки, необходимо уменьшать мгновенную мощность сигнала и увеличивать уровень собственного шума. Если последнего можно добиться расширением полосы сигнала, то для снижения излучаемой мощности следует увеличивать количество импульсов в пачке и длительность каждого импульса при сохранении прежней суммарной энергии сигнала.

К сожалению, ничего и выше указанного невозможно осуществить для однопозиционной РЛС с последовательным сканированием трёхмерного пространства. Так расширение полосы приводит к уменьшению длительности дискрета по дальности и, следовательно, времени, выделяемого на первичную обработку каждого отсчёта по дальности, а именно на подавление коррелированной помехи, сжатие и когерентное накопление принятого сигнала. Увеличение длительности сложного сигнала приводит росту времени блокирования приёмника в начале дистанции. Увеличение же количества импульсов в пачке вообще невозможно без снижения точности измерения угловых координат и роста времени обзора пространства.

Альтернативой является использование параллельного обзора пространства с помощью РЛС, использующей суммарно-дальномерный алгоритм разнесённого приёма. Если из таких станций организовать радиолокационное поле без перекрытия зон обзора, то можно дополнительно уменьшить мощность излучения за счёт снижения дальности с 415 км до 90 км при высоте мачт приёмников 50 м. При изотропной диаграмме направленности передающей и приёмных антенн такое поле может измерять трёхмерные координаты целей до высот в 30 км, а не только низколетящих. Такое поле имеет ограниченное применение, так как может использоваться только на собственной территории, не позволяя заглянуть за её границы.

В настоящее время РЛС с последовательным сканированием пространства, как правило, работают в трёхмерном пространстве, измеряя полярные координаты воздушных объектов, тогда как алгоритм измерения координат объектов суммарно-дальномерным методом обычно работает в двумерном пространстве, используя декартову систему координат [5–7].

Измеренные активной РЛС в трёхмерной полярной системе координат дальность, азимут и угол места, конечно позволяют получить высоту полёта воздушного объекта в геоцентрической системе координат, учитывающей кривизну поверхности Земли.

Для того чтобы измерить высоту точечного источника излучения с помощью разнесённого приёма, придётся непосредственно использовать либо трёхмерную геоцентрическую систему координат [8], где расстояния измеряются длинами дуг по поверхности Земли, либо трёхмерную географическую систему координат [9] с определением, кроме высоты, долготы и широты источника излучения.

Географическая система координат плохо работает в полярных областях поверхности Земли, тогда как геоцентрическая система свободна от этого недостатка. В тоже время, географическая система позволяет измерить абсолютные координаты источника излучения, а геоцентрическая — только относительные (относительно центральной позиции).

1. Структура радиолокационного поля, алгоритмы оценки координат, направления и скорости движения воздушного объекта

Для измерения трёхмерных географических (глобальных геоцентрических) координат воздушных объектов суммарно-дальномерным методом разнесённого приёма требуется, как минимум, одна активная и три пассивные позиции, трёхмерные координаты точек передачи или приёма сигналов которых должны быть известны. Любая из трёх точек приёма пассивных позиций должна находиться не ниже плоскости, проходящей через точки приёма

двух оставшихся пассивных позиций и касающейся поверхности Земли в точке расположения передающей позиции. При мачтах приёмных позиций высотой 50 м, радиус окружности прямой видимости, на которой должны быть симметрично расположены приёмные позиции, примерно равен 30 км.

Диаграммы направленности антенн передающей и приёмных позиций должны быть изотропными в верхней полуплоскости. Такую антенну, возможно, можно создать, объединив в одну систему штыревую и кольцевую антенны с взаимно перпендикулярными диаграммами направленности.

В отличие от однопозиционных радиолокационных станций, в радиолокационном поле, построенном с использованием разнесённого приёма, нет блокирования приёма на время передачи сложного ФКМ сигнала большой длительности, однако появляется проблема прямого прохождения сигналов передатчиков соседних активных позиций на входы приёмников общих пассивных позиций, которая решается заменой обычно используемого знакового коррелятора ранговым, обладающим сверхразрешением [10] при достаточно больших базах ФКМ сигналов. Дополнительно исключаются потери, имеющие место в знаковом корреляторе, которые равны 2 дБ, а также подавление сигнала синусоидальной помехой.

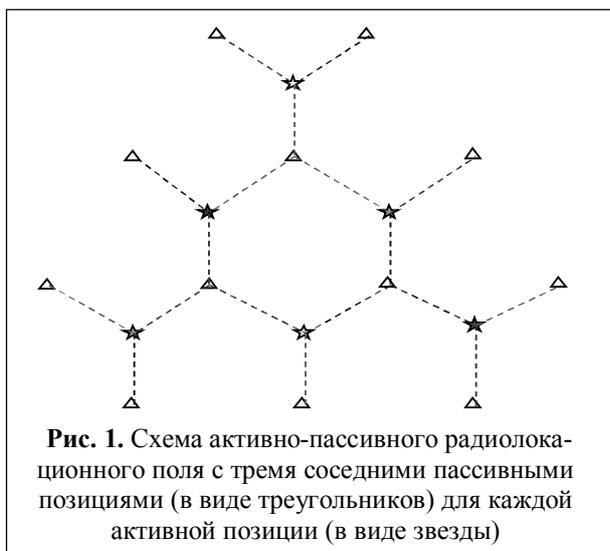
Ко всему прочему прямой сигнал должен ослабляться системой селекции движущихся целей, так как не имеет доплеровского смещения. Поэтому, с учётом указанных ограничений, возможность использования существенно более простого знакового коррелятора в качестве фильтра сжатия сложного ФКМ сигнала сохраняется. При этом частоты передатчиков соседних ячеек поля должны совпадать, так как каждый приёмник принимает прямые сигналы трёх передатчиков.

При объединении приёмных и передающих позиций в единое радиолокационное поле каждая приёмная позиция будет обслуживать три передающие позиции, которые излучают различные М-последовательности или работа-

ют на разных частотах. Такое поле позволяет измерять долготу, широту и высоту низколетящих объектов, чем составляет конкуренцию полю из однопозиционных трехкоординатных радиолокационных станций с вертикальными антенными решетками, поскольку ненаправленные антенные системы приёмных позиций при разнесённом приёме будут иметь существенно меньший вес и могут быть подняты на большую высоту при существенно меньших затратах. Антенну передающей позиции поднимать не надо. Фактически в качестве приёмной позиции может использоваться доработанная радиорелейная станция связи, используемая для организации поля из однопозиционных радиолокационных станций.

Для очередного расширения радиолокационного поля, согласно рис. 1, достаточно добавить две активные и три пассивные позиции, так как каждая из пассивных позиций способна ретранслировать сигнал на три активные позиции, где и производится вычисление географических координат целей, облучаемых из соответствующей активной позиции. При расширении радиолокационного поля следует учитывать, что число различных М-последовательностей должно быть не менее 12-ти, чтобы сигнал, излученный одной активной позицией, не обнаруживался после отражения от высоколетящего объекта всеми приёмными позициями соседней ячейки радиолокационного поля, использующей такую же М-последовательность. Возможно, проще использовать псевдослучайные последовательности, дополнительно ухудшая противнику условия для радиоразведки.

С целью определения долготы, широты и высоты воздушного объекта его неизвестные географические координаты должны быть связаны с известными географическими координатами передающей и приёмных позиций, а также с измеренными суммарными дальностями от передающей позиции до объекта и от объекта до приёмных позиций. Получение точного значения трёхмерных географических координат передающей и приёмных позиций



обеспечивается усреднением результатов многократных измерений координат позиций с помощью системы глобального геопозиционирования «ГЛОНАС» в процессе развертывания очередной ячейки радиолокационного поля.

Полученная после отождествления система из трёх трансцендентных уравнений (по числу неизвестных координат), относящихся к одному и тому же воздушному объекту, может быть решена методом Ньютона, адаптированным к условиям задачи.

Необходимость модернизации метода Ньютона обусловлена наличием равномерно распределённых ошибок измерения суммарных дальностей приёмными позициями. При нахождении очередных изменений трёхмерных координат цели в линейном приближении используется регуляризованный метод наименьших квадратов, который позволяет также находить решение переопределённой системы линейных уравнений, когда количество приёмных позиций больше числа определяемых координат. Стандартный контроль сходимости итерационного алгоритма по величине изменений каждой координаты и сравнения этих изменений с заданными величинами дополняется определением минимального значения среди всех сумм квадратов очередных изменений координат. Найденное значение используется для нахождения приближённого решения системы нелинейных уравнений в том случае,

когда метод Ньютона расходится, и заданные значения изменений координат не достигаются. Такие приближённые решения отличаются от точных оценок координат цели наличием смещения.

Отождествление воздушных объектов осуществляется полным перебором суммарных дальностей, измеренных тремя приёмными позициями. Возможность отбраковки комбинации из трёх измерений, не относящихся к одному и тому же воздушному объекту, обеспечивается отсутствием решения соответствующей этой комбинации системы трансцендентных уравнений методом Ньютона.

Результаты измерений суммарных дальностей независимыми приёмными позициями считаются отождествлёнными, если итерационный процесс поиска решения методом Ньютона завершается, что происходит, когда очередные изменения координат цели будут меньше некоторых заданных величин. Поиск решения также должен быть прекращён, когда сумма квадратов следующих изменений координат будет больше суммы квадратов предыдущих. Если минимум указанной суммы совпадает с начальным значением, то процесс поиска расходится и отождествления не будет. Если минимум суммы меньше начального значения, но больше некоторой пороговой величины, то процесс поиска решения также считается расходящимся. В противном случае процесс сходится к приближённому решению со смещением. Пороговая величина здесь определяется используемой шириной полосы сигнала.

Количество отождествляемых воздушных объектов не будет большим из-за малого размера зоны обзора, радиус которой составляет 30 км, что в 5 раз меньше максимального радиуса обзора однопозиционной двухкоординатной РЛС дециметрового диапазона длин волн «Каста-2Е2», используемой для сравнения в качестве примера. При норме для последней в 200 сопровождаемых воздушных объектов внутри окружности радиусом 150 км, получим, что при одинаковой плотности заполнения зоны обзора, внутри окружности

радиусом 30 км окажется всего 8 объектов. Если уменьшить радиус зоны обзора до 75 км, то количество отождествляемых объектов увеличится до 32.

После проведения экспериментов с имитационной моделью ячейки радиолокационного поля было выяснено, что оценка высоты является смещённой. С ростом полосы излучаемого сигнала и высоты полёта воздушного объекта смещение и ошибка оценки высоты уменьшаются, а с ростом расстояния от передающей позиции — увеличиваются.

В таблице 1 для различных значений полосы сигнала и истинной высоты приведены смещение и среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки высоты воздушного объекта, расположенного между двумя соседними приёмными позициями над окружностью радиусом 30 км с центром в активной позиции, в которую вписан равносторонний треугольник, образованный приёмными позициями. Из приведённых результатов следует, что, начиная с истинной высоты полёта воздушного объекта в 2000 м, когда смещение оценки высоты практически будет отсутствовать, расширение полосы с 10 МГц до 20 МГц, то есть в 2 раза, приводит к уменьшению СКО оценки высоты также в 2 раза.

Угловые координаты (долгота и широта) низколетящего воздушного объекта измеряются по сравнению с его высотой с гораздо более высокой (более чем на порядок) точностью и существенно меньшим смещением. Для объекта с теми же угловыми координатами при полосе 20 МГц СКО долготы меньше 0,3 сек, а СКО широты меньше 0,14 сек. Учитывая, что на широте 50 градусов, где проводились измерения координат, величина секунды долготы в длинах дуги почти в 2 раза меньше величины секунды широты, которая совпадает с величиной секунды долготы на экваторе, получаем для широты и долготы примерно одинаковую СКО, величина которой меньше 5 м.

Рассмотренным выше трём возможным размещениям воздушного объекта на окружности, радиусом 30 км, соответствуют наименее

Таблица 1

Полоса (МГц)	Высота (м)	Смещение (м)	СКО (м)
10	100	+ 338	363
	500	+ 21	392
	1000	- 76	381
	2000	- 10	160
	4000	0	78
20	100	+ 196	266
	500	- 47	296
	1000	- 16	171
	2000	0	79
	4000	0	39

точные результаты измерения его высоты по сравнению с другими его положениями внутри окружности. Более чем на порядок точные результаты измерения высоты воздушного объекта получаются, если объект расположен над передающей или приёмными позициями, то есть там, где высота объекта является частью измеряемой суммарной дальности.

Если в указанных точках окружности, то есть там, где имеют место наихудшие результаты измерений высоты воздушного объекта, разместить дополнительные каналы приёма, увеличив тем самым количество приёмных позиций с трёх до шести, то, как показано в таблице 2, точность оценки на высотах более 1 км при наихудшем расположении воздушного объекта увеличится от 2,5 до 3 раз, а смещение станет равным нулю уже на высоте 1 км, что в 2 раза ниже, чем при трёх приёмных позициях.

Из результатов имитационного моделирования, приведённых в таблице 2, следует, что и при шести приёмных позициях для высот, где отсутствует смещение, расширение полосы сигнала в 2 раза, приводит к уменьшению СКО высоты также в 2 раза.

СКО оценки угловых координат воздушного объекта, то есть его долготы и широты, при увеличении количества пассивных позиций секции радиолокационного поля с трёх до шести и сохранении прежней полосы сигнала в 20 МГц ожидаемо уменьшается также в 2 раза, слабо завися от высоты полета воздушного объекта над уровнем моря. СКО оценки высо-

Таблица 2

Полоса (МГц)	Высота (м)	Смещение (м)	СКО (м)
10	100	+ 193	205
	500	– 35	234
	1000	– 9	119
	2000	0	56
	4000	0	27
20	100	+ 118	150
	500	– 24	145
	1000	– 1	58
	2000	0	29
	4000	0	14

ты, наоборот, сильно зависит от истинного значения высоты. При отсутствии смещения оценки СКО высоты уменьшается в 2 раза с каждым двукратным увеличением истинного значения высоты полёта воздушного объекта над уровнем моря.

Заметим, что в дальней зоне на расстоянии 60 км от центральной позиции при наихудшем расположении воздушного объекта относительно приёмных позиций, то есть на прямой, проходящей от центральной позиции строго между ними, СКО оценки высоты увеличивается примерно в 4 раза, начиная с высоты прямой видимости в 200 м. Однако, работа на таком расстоянии приводит к уменьшению мощности отражённого сигнала в 9 раз в той приёмной позиции, которая противоположна центральной позиции ячейки радиолокационного поля (ЯРП), что требует соответствующего увеличения мощности передатчика. Положительным эффектом здесь является то, что радиолокационное поле становится двухслойным за счёт перекрытия рабочих зон и, следовательно, устойчивым к отказам отдельных ячеек.

Поскольку алгоритм, измеряющий суммарную дальность корреляционным методом, позволяет, как правило, измерять ещё и доплеровское смещение частоты отражённого сигнала, то наличие не менее трёх приёмных позиций в ячейке радиолокационного поля даёт возможность измерить трёхмерный вектор скорости воздушного объекта. Измеренное относительно каждой приёмной позиции доплеровское смещение частоты определяется суммой ради-

альных скоростей воздушного объекта относительно передающей и соответствующей приёмной позиций. Зная точные координаты передающей и всех приёмных позиций, а также вычисляя, пусть даже с некоторой ошибкой, трёхмерные координаты воздушного объекта, можно связать неизвестные компоненты трёхмерного вектора скорости с его проекциями на каждое направление от объекта к передающей или приёмным позициям в собственной (локальной) декартовой системе координат объекта, определив тем самым зависимости радиальных скоростей от трёх неизвестных компонент вектора скорости. Осталось только подставить найденные выражения в систему уравнений, связывающих радиальные скорости и измеренные суммарные доплеровские смещения частоты. Количество уравнений равно количеству приёмных позиций. Возможно совместное вычисление трёхмерных координат и вектора скорости цели, используя суммарное количество уравнений.

При последовательном сканировании трёхмерного пространства обрабатываются только сигналы, приходящие от цели напрямую. При параллельном обзоре пространства суммарно-дальномерными РЛС может возникнуть ситуация, когда придется учитывать сигналы, отражённые от поверхности Земли. Если эта поверхность была бы идеальной сферой, то для каждой приёмной позиции имелся бы только один переотражённый сигнал. В реальном случае их будет несколько. Разность хода между прямым и переотражённым сигналами от цели зависит от направления на источник излучения и равна удвоенной высоте приёмника при угле в 90 градусах на цель и нулю при 0 градусах. Если эта удвоенная высота будет меньше пути, который проходит радиосигнал за время, соответствующее одному дискрету по дальности, то переотражения только искажают диаграммы направленности приёмников за счёт интерференции, но не приводят к появлению дополнительных обнаруженных сигналов.

Для того, чтобы можно было бы исключить переотражённые сигналы по уровню или вре-

мени прихода, необходимо сначала идентифицировать их общий источник, образующий группу. Поскольку направления падения прямого и переотражённого сигналов от цели будут, как правило, близкими по величине, а направления на передатчик совпадают, то частоты Доплера, которые определяются проекциями вектора скорости цели на указанные направления, также будут близкими и могут быть использованы для идентификации источника излучения отдельным приёмником.

В то же время отражённый от Земли сигнал может иметь большую задержку и заметное изменение частоты, например, в горной местности. Если его нельзя отнести к какой-либо группе, то можно посчитать его за сигнал, отражённый от новой цели. Однако он не будет отождествляться с сигналами, полученными от других приёмников, так как похожих отражений для их позиций не будет.

При выборе ширины полосы сигнала следует учитывать, что с уменьшением длительности дискрета по дальности стенки эллипсоида вращения, являющегося элементом разрешения в суммарно-дальномерной системе, становятся тоньше. Отсюда появляется возможность, что за время излучения пачки сигналов воздушная цель поменяет элемент разрешения. Поскольку период, соответствующий максимальной дальности в 90 км, равен 300 мкс, а с учётом возбуждения периода повторения в среднем больше в полтора раза [11], то при скорости низколетящей цели меньше 1000 км/час количество импульсов, отражённых от цели за время её перемещения в пределах элемента разрешения, толщина которого при полосе в 20 МГц составляет не менее 7,5 м, будет не меньше 60. Таким образом, если излучать пачку из 60 импульсов, то она будет делиться между двумя соседними дискретами по дальности пополам в худшем, с точки зрения энергии, случае. Заметим, что обнаруженные в двух соседних дискретах воздушные объекты соответствуют одной и той же цели, если их доплеровские смещения совпадают.

2. Энергетические характеристики ячейки радиолокационного поля

При выборе энергетических параметров многопозиционной трёхкоординатной ЯРП будем исходить из необходимости получения такого же отношения сигнал/шум, как и у однопозиционной двухкоординатной РЛС «Каста-2Е2», которая на дальности 150 км обеспечивает вероятность правильного обнаружения воздушного объекта, равную 0,5, при вероятности ложной тревоги, равной 10^{-5} .

Главной энергетической проблемой разнесённого приёма является параллельный просмотр трёхмерного пространства, который обеспечивается изотропностью по азимуту диаграмм направленности (ДН) антенн как передающей, так и приёмных позиций. Поэтому при одинаковой форме ДН по углу места коэффициент направленного действия (КНД) передающей и приёмных антенн многопозиционной трёхкоординатной ЯРП в 80 раз меньше КНД антенны однопозиционной двухкоординатной РЛС «Каста-2Е2», ширина ДН которой по азимуту составляет 4,5 град. Здесь учитывалась обратная пропорциональная зависимость КНД от ширины ДН.

КНД антенн передающей G_0 и приёмных позиций G_i входит в числитель выражения (6) для отношения сигнал/шум $q_{\text{вых } i}^2$ на выходе каждого приёмного канала после первичной обработки сигнала [5]:

$$q_{\text{вых } i}^2 = \frac{P_u \tau_u G_0 G_i \sigma_\sigma \lambda^2 \eta_i}{(4\pi)^3 k T_{\text{эфф } i} R_0^2 R_i^2}, \quad (1)$$

где P_u — мощность передатчика; τ_u — длительность импульса передатчика; R_0 — расстояние от передающей позиции до воздушного объекта; R_i — расстояние от воздушного объекта до приёмной позиции; λ — длина волны; $T_{\text{эфф } i}$ — шумовая температура приёмника; η_i — коэффициент энергетических потерь; k — постоянная Больцмана; σ_σ — эффективная поверх-

ность рассеяния цели.

Это приводит к существенному снижению отношения сигнал/шум, которое не компенсируется уменьшением радиуса зоны обзора ячейки радиолокационного поля, где максимальное расстояние R_0 от передающей позиции до воздушного объекта меньше в $150 / 30 = 5$ раз, а максимальное расстояние R_i от воздушного объекта до приёмной позиции — в $150 / 60 = 2,5$ раза.

Повысить отношение сигнал/шум в 36 раз позволяет соответствующее увеличение длительности импульса передатчика τ_u за счёт алгоритма когерентного накопления пачки из 36 импульсов прежней длительности, причём это в режиме подавления пассивных помех, то есть не в амплитудном, что довольно обычно, а в когерентном режиме.

Увеличение длительности импульса передатчика вместе с уменьшением расстояний от передатчика до воздушного объекта и от воздушного объекта до самого дальнего приёмника почти полностью компенсирует уменьшение отношения сигнал/шум за счёт существенного снижения КНД ненаправленных (по азимуту) антенн передатчика и приёмников многопозиционной трёхкоординатной ЯРП по сравнению с зеркальной антенной однопозиционной двухкоординатной РЛС «Каста-2Е2». Получается незначительный проигрыш в $5625 / 6400 = 0,88$ раза.

Отношение сигнал/шум можно ещё повысить в 11,76 раза, если увеличить длину волны λ с 35 см до 1,2 м. Такая возможность обусловлена тем, что антенны передатчика и приёмников многопозиционной трёхкоординатной ЯРП ненаправленные и их размеры не ограничиваются величиной апертуры, зависящей от длины волны и необходимой для создания нужной ширины ДН. Дальнейшее увеличение длины волны ограничено тем, что необходимо сохранить возможность обработки сигнала как узкополосного (комплексного), полоса которого в этом случае должна быть не менее чем в 10 меньше несущей частоты. В нашем случае

полоса сигнала равна 10 или 20 МГц, а частота несущей — 250 МГц, что требует применения приёмника прямого усиления.

Дополнительное увеличение отношения сигнал/шум обусловлено снижением шумовой температуры $T_{эфф i}$ приёмника из-за перемещения последнего непосредственно к антенне. В этом случае коэффициент шума K с 5 дБ, что было у однопозиционной двухкоординатной РЛС «Каста-2Е2» из-за разнесения антенны и приёмника на 14,5 м, снижается, как минимум, до 2 дБ для предлагаемой многопозиционной трёхкоординатной ЯРП, где это разнесение отсутствует. Шумовая температура зависит от коэффициента шума в соответствии с выражением:

$$T_{эфф i} = (K_i - 1)T_0,$$

где $T_0 = 293^\circ$ Кельвина — некоторая базовая температура, а K_i выражено в размах. Следовательно, из-за снижения шумовой температуры приёмника отношение сигнал/шум увеличится ещё в 3,7 раза.

Таким образом, общее увеличение отношения сигнал/шум относительно однопозиционной двухкоординатной РЛС «Каста-2Е2» при указанных энергетических характеристиках многопозиционной трёхкоординатной ЯРП составит 38,3 раза. Для того чтобы сохранить прежнюю вероятность правильного обнаружения, следует либо уменьшить во столько же раз импульсную мощность передатчика, которая при длительности импульса в 212 мкс и периоде повторения 2120 мкс для однопозиционной двухкоординатной РЛС «Каста-2Е2» составляет 4000 Вт, либо уменьшить предполагаемую ЭПР воздушного объекта с 2 до $0,052 \text{ м}^2$.

Если учесть дополнительно снижение потерь η_i в отношении сигнал/шум в ранговом фильтре сжатия по сравнению со знаковым на 2 дБ, то есть в 1,6 раза, то можно снизить мощность передатчика уже не в 38,3, а в 61,3 раза, или уменьшить ЭПР до $0,0325 \text{ м}^2$ при той же мощности.

Заметим, что переход с дециметрового в метровый диапазон уменьшает зеркальную и увеличивает диффузионную составляющую вторичного излучения, величина которого определяет ЭПР воздушного объекта. Если зеркальная составляющая подчиняется законам геометрической оптики, то диффузионная составляющая представляет собой вторичное излучение, направленное из некоторого центра воздушного объекта во все стороны. А раз так, то размер элемента разрешения, локализирующего в пространстве источник вторичного излучения, может быть меньше линейных размеров воздушного объекта. Размер элемента разрешения по суммарной дальности для полосы 10 МГц составляет 15 м, а для полосы 20 МГц — 7,5 м. Дальнейшее уменьшение размера элемента разрешения потребует уменьшения длины волны с целью сохранения узкополосности сигнала, что повлияет на энергетические соотношения в ЯРП.

Заключение

Рассмотрение особенностей реализации суммарно-дальномерной РЛС разнесённого приёма с целью её использования для измерения длины, ширины и высоты, в частности, низколетящих воздушных объектов, обнаруживает помимо несомненных достоинств наличие определённых проблем.

Так, при малых высотах полёта цели, в силу указанных выше причин, имеется заметное смещение оценки высоты, которое, как и СКО этой оценки, уменьшается с расширением полосы сигнала, ограниченным сверху величиной скорости движения цели. Кроме того, необходимость отождествления с каждым воздушным объектом результатов независимых измерений суммарных дальностей приёмными позициями накладывает определённые ограничения на производительность оборудования РЛС или количество объектов в зоне обзора ячейки радиолокационного поля. Отождествление дополнительно усложняется наличием многолучевого распространения сигнала, отражённого от цели. И, наконец, системы разнесённого приёма тре-

буют точного измерения трёхмерных координат позиций, что невозможно без космических систем глобального позиционирования.

В тоже время суммарно-дальномерная система разнесённого приёма, также как и разностно-дальномерная, позволяет измерить вместо радиальной скорости, единственно доступной однопозиционным системам, истинную скорость и направление движения воздушного объекта. Здесь также возможно использование ненаправленных антенн метрового диапазона, которое приводит к облегчению мачт и снижению стоимости антенных систем, а также улучшает обнаружение целей, созданных по технологии Stels. Кроме того, возможность увеличения длины волны, энергии сигнала и его полосы, а также уменьшения размера зоны обзора и коэффициента шума в суммарно-дальномерной системе, позволяет существенно снизить излучаемую мощность или ЭПР обнаруживаемой цели, не смотря на то, что однопозиционная РЛС, которая использовалась для сравнения, имеет существенно более высокий КНД антенны.

Литература

1. Вакин С.А., Шустов Л.Н. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. М.: Советское радио, 1968. 448 с.
2. Атражес М.П., Ильин В.А., Марьин Н.П. Борьба с радиоэлектронными средствами. М.: Воениздат, 1972. 272 с.
3. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. М.: Военное издательство, 1989. 350 с.
4. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: ракеты против РЛС. М.: Вузовская книга, 2016. 182 с.
5. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 744 с.
6. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы. Под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
7. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. Минск: Наука и техника, 1978. 184 с.
8. Терсин В.В. Применение разнесенного приема для измерения третьей координаты в поле двухкоординатных радиолокационных станций // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 4. С. 39–46.
9. Терсин В.В. Использование разнесенного приема для измерения географических координат около-

земного источника излучений космическими аппаратами // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. № 1. 2017. С. 39–47.

10. Костров В.В., Терсин В.В. Сверхразрешение в комплексном ранговом фильтре сжатия фазокодоманипулированного сигнала // Методы и устрой-

ства передачи и обработки информации. 2006. Вып. 7. С. 95–101.

11. Костров В.В., Терсин В.В. Последовательная оптимизация межимпульсных интервалов неэкви-стантной последовательности отсчетов комплексной синусоиды // Методы и устройства передачи и обра-ботки информации. 2009. Вып. 11. С. 262–272.

Поступила 3 августа 2020 г.

English

FEATURES OF MEASURING THREE-DIMENSIONAL COORDINATES AND VELOCITY VECTOR OF AIR OBJECTS WITHIN COVERAGE OF OVERALL RANGE-FINDING FACILITIES FOR DIVERSITY RECEPTION

Tersin Vladimir Vladimirovich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lead Engineer, JSC "Murom Plant of Radio Measuring Instruments" (JSC "MP RMI").

E-mail: vvtersin@yandex.ru.

Address: 602267, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Karacharovskoe Highway, 2.

Abstract: The features of managing radar coverage formed by overall range-finding systems for diversity reception that measure longitude, latitude and altitude, including those of low-flying air objects using broad-band phase-code manipulated (PCM) signals are considered. The named coordinates are defined by Newton's method, which finds solution to the system of three transcendental equations binding unknown coordinates of objects with measured overall ranges from transmitter to object and from object to each of the receivers. Dependences for estimation accuracy of altitude on true flight altitude of objects are given for signal bandwidth of 10 or 20 MHz and for three or six receivers of radar range cells. Possibility of measuring three-dimensional velocity vector of air object is analyzed by solving a system of nonlinear equations binding the sum of projections of object's velocity vector to directions from transmitter to object and from object to each receiver with measured Doppler frequencies in local Cartesian coordinate system. Besides, operating features of overall range-finding algorithm for diversity reception involving multipath signal reflected from air object are examined. Output performance of the analyzed three-coordinate overall range-finding system is estimated by comparing it with a two-coordinate single radar. It is demonstrated that increasing pulse train, decreasing scanned area, increasing wavelength and decreasing noise ratio does not only make up for a significant drop in directivity factor of isotropic transceiver antennas in overall range-finding system, but also enables to reduce significantly transmitter power or target scattering cross-section.

Keywords: diversity reception, overall range-finding algorithm, geographic coordinate system, Newton method, bias of estimate, root-mean-square error, longitude, latitude, altitude, signal bandwidth, Doppler frequency, velocity vector, multipath propagation, output performance.

References

1. Vakin S.A., Shustov L.N. Fundamentals of radiocounteraction and radiotechnical intelligence. Moscow: Sovetskoe radio, 1968. 448 p.
2. Atrazhev M.P., Ilyin V.A., Maryin N.P. Struggle with radio-electronic means. Moscow: Voenizdat, 1972. 272 p.
3. Paliy A.I. Radio-Electronic warfare. Moscow: Voennoe izdatelstvo, 1989, 350 p.
4. Kupriyanov A.I. Radioelectronic warfare: missiles against radar. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2016. 182 p.
5. Chernyak V.S. Multi-position radar. Moscow: Radio i svyaz, 1993, 744 p.
6. Kondratev V.S., Kotov A.F., Markov L.N. Multi-position radio engineering systems. Edited by V.V. Tsvetnov, Moscow: Radio i svyaz, 1986. 264 p.
7. Averyanov V.Ya. Spaced radar stations and systems. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1978, 184 p.
8. Tersin V.V. Application of spaced reception for measuring the third coordinate in the field of two-coordinate radar stations. Radio engineering and telecommunication systems. 2012. No. 4. Pp. 39–46.
9. Tersin V.V. Use of spaced reception for measurement of geographical coordinates of a near-earth radiation Source by spacecraft. Radio and telecommunication systems. No. 1. 2017. Pp. 39–47.
10. Kostrov V.V., Tersin V.V. Superresolution in a complex rank filter of compression of a phase-coded signal. Methods and devices for transmitting and processing information. 2006. Issue 7. Pp. 95–101.
11. Kostrov V.V., Tersin V.V. Sequential optimization of inter-pulse intervals of a non-equidistant sequence of complex sinusoid samples. Methods and devices for transmitting and processing information. 2009. Iss. 11. Pp. 262–272.