

УДК 621.369.9

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ НОСИТЕЛЕЙ ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА

В. С. Верба, Б.Г. Татарский, Е. В. Майстренко

АО “Концерн “Вега”, 121170, г. Москва, Кутузовский проспект, д. 34

Статья поступила в редакцию 29 января 2018г.

Аннотация. Рассмотрены особенности прямого синтеза апертуры антенны при вращении фазового центра антенны в целях детального радиолокационного мониторинга земной поверхности. Рассмотрены возможные режимы работы перспективных бортовых РЛС с учетом указанного процесса синтезирования апертуры, включая режимы обзора, картографирования с формированием высокодетального радиолокационного изображения, режимы селекции движущихся целей и интерферометрических измерений объектов зондирования.

Ключевые слова: синтезирование апертуры антенны, радиолокационный мониторинг, высокодетальное радиолокационное изображение, режимы работы бортовой РЛС.

Abstract. The features of direct synthesis of the antenna aperture are considered for the case of rotating the antenna phase center for the purpose of detailed radar monitoring of the earth's surface. At the beginning of this work it is shown that disadvantages of direct aperture synthesizing mode, which are known nowadays, could be solved in case of another, nonlinear, antenna phase center movement. The most important disadvantages of usual aperture synthesizing process are large time period of coherent signal processing, not available high resolution in the front sector of radar carrier. The last one suggests that the front direction is not visible by radar system with proper quality. The antenna phase center circle movement makes it possible to solve known problems and enhance quality of aperture synthesizing process.

This method could be applied without using large base signals with pulse modulation in the case of small distances when the distance is not larger than one hundred of radius of carrier circle movement structure. Moreover high resolution could be achieved in every sector of radar observation. Based on aperture synthesizing, onboard radar system could operate in different modes, such as: observation, mapping with detailed radio image creation, moving target selection, target position determination with high accuracy, interferometry measurements of objects of interest.

Key words: antenna aperture synthesizing, radar monitoring, detailed radar image, onboard radar system operating modes.

1. Введение

Как известно [1], современные технологии радиолокационного мониторинга земной поверхности строятся на базе когерентных РЛС, позволяющих формировать радиолокационное изображение (РЛИ) наблюдаемой поверхности с требуемой детальностью, которая зависит от разрешающей способности РЛС по дальности и азимуту. Обеспечение высокой детальности РЛИ по дальности обеспечивается за счет подбора сложных типов зондирующих сигналов, а высокая детальность по азимуту обеспечивается за счет синтеза искусственной апертуры антенны РЛС.

Радиолокаторы, обладающие высокими разрешающими способностями по дальности и азимуту, при установке их на авиационные носители, например, беспилотные (БЛА), позволяют создавать мобильные системы мониторинга земной поверхности, эффективность функционирования которых не зависит от погодных условий и времени суток.

Потенциальные возможности РЛС по разрешению по шкале дальности целиком и полностью определяются шириной спектра Δf_c зондирующего сигнала [1-3], используемого радиолокатором,

$$\delta D = \frac{c}{2 \Delta f_c}, \quad (1)$$

где C – скорость распространения радиоволн (РВ), что обеспечивается, как отмечалось, выбором зондирующего сигнала со значением базы, существенно большим 1 ($B \gg 1$).

Возможности же разрешения по азимуту определяются используемым способом синтезирования искусственной апертуры, который, главным образом, и определяет технологию радиолокационного мониторинга земной поверхности.

При расположении РЛС на носителе самолетного типа формирование РЛИ при использовании принципа синтезирования апертуры обеспечивается за счет двух взаимосвязанных процессов. Первый состоит в обзоре наблюдаемого участка по шкале дальности вдоль направления, задаваемого углом установки γ_A антенны радиолокатора, который осуществляется за счет естественного распространения зондирующих колебаний РЛС в пределах главного луча (ГЛ) диаграммы направленности (ДН) реальной антенны от минимальной до максимальной дальности действия радиолокатора. Вторым заключается в обзоре наблюдаемой поверхности по азимуту путем перемещения фазового центра реальной антенны (РА) по заданной траектории с известной скоростью при когерентной обработке принимаемых сигналов. При этом, как правило, полагают, что фазовый центр РА антенны РЛС перемещается по прямолинейной траектории с постоянной скоростью V_n , соответствующей скорости полета носителя РЛС (рис.1).

В этих условиях при движении носителя РСА по прямолинейной траектории, точном определении скорости V_n его движения и выдерживании угла установки γ_A ГЛ РА строго 90° , достигается линейное разрешение радиолокатора по азимуту δl_{az} , которое не зависит от значения дальности D до поверхности земли и определяется только линейным размером апертуры РА [2,3]

$$\delta l_{az} = d_A / 2, \quad (2)$$

т.е. в условиях точного знания скорости носителя и строго боковом обзоре потенциально можно достичь линейного разрешения по азимуту, равного половине апертуры РА.

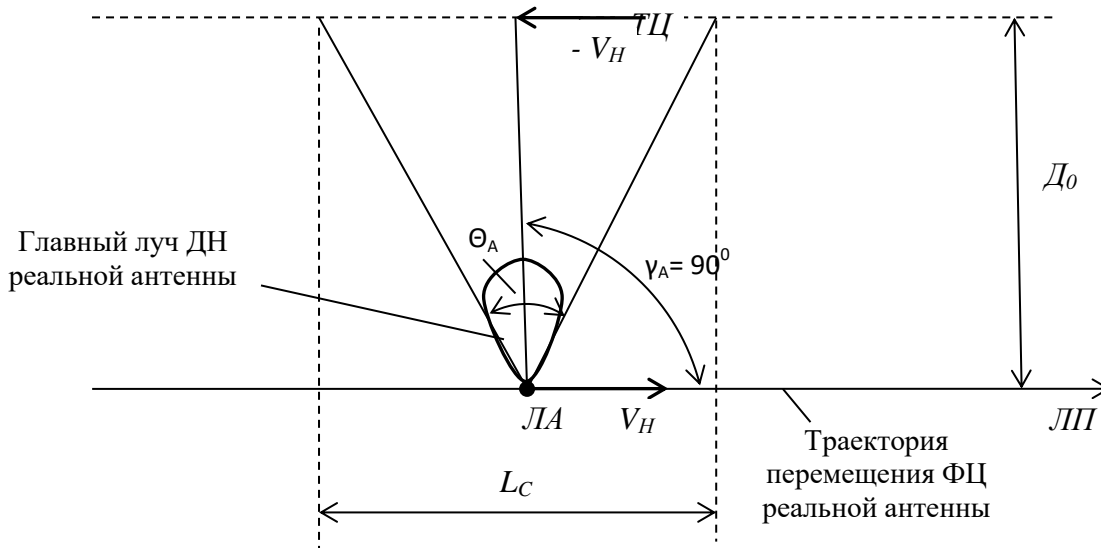


Рис.1

При произвольном угле установки γ_A ГЛ РА в переднебоковом секторе линейное разрешение по азимуту будет зависеть от дальности D и времени когерентной обработки T_c принимаемого сигнала (времени синтезирования апертуры искусственной антенны) и определяться как [3]

$$\delta l_{az} = \frac{\lambda D}{2V_H T_c \sin \gamma_A}. \quad (3)$$

Произведение $V_H T_c \sin \gamma_A$, стоящее в знаменателе выражения (3), представляет собой не что иное, как размер апертуры искусственной антенны, видимый с направления γ_A , которое отсчитывается относительно линии пути носителя РЛС (при этом полагается, что положение вектора скорости носителя совпадает с его продольной осью).

При переднебоковом обзоре процедура синтезирования становится малоэффективной, когда угол установки γ_A ГЛ РА попадает в сектор $\pm 10^\circ..15^\circ$ [3]. В этом случае формирование высокодеталяного РЛИ в передней полусфере носителя, основанное на принципах синтезирования, затруднительно. А это направление особенно важно при решении бортовым

комплексом самолетного носителя ударных задач по малоразмерным наземным целям.

2. Особенности прямого синтеза при вращении фазового центра

В тоже время, при использовании в качестве платформы для ударного бортового комплекса носителя вертолетного типа имеется возможность обеспечить формирование высокодетального РЛИ, в том числе и строго по курсу носителя. Это становится возможным за счет использования технологии формирования высокодетального РЛИ земной поверхности, основанной на синтезе апертуры искусственной антенны, создаваемой за счет вращения ФЦ РА [4]. Поскольку в основу технологии синтеза искусственной апертуры положен тот факт, что для ее получения необходимо сформировать траекторный сигнал и обеспечить его последующую когерентную обработку при взаимном перемещении объекта наблюдения и ФЦ РА. Вращение ФЦ РА можно обеспечить, если в законцовку лопасти вращающейся структуры вертолетного носителя установить слабонаправленную антенну. Тогда при вращении лопастной структуры будет обеспечено и вращение ФЦ РА.

При обеспечении режима когерентного излучения и приема отраженных сигналов от радиолокационного объекта будет сформирована искусственная апертура антенны. Если предположить, что радиус вращения ФЦ антенны равен r , а дальность до точечного объекта наблюдения D_0 (рис.2), то будет обеспечено линейное разрешение по азимуту, равное [4,5].

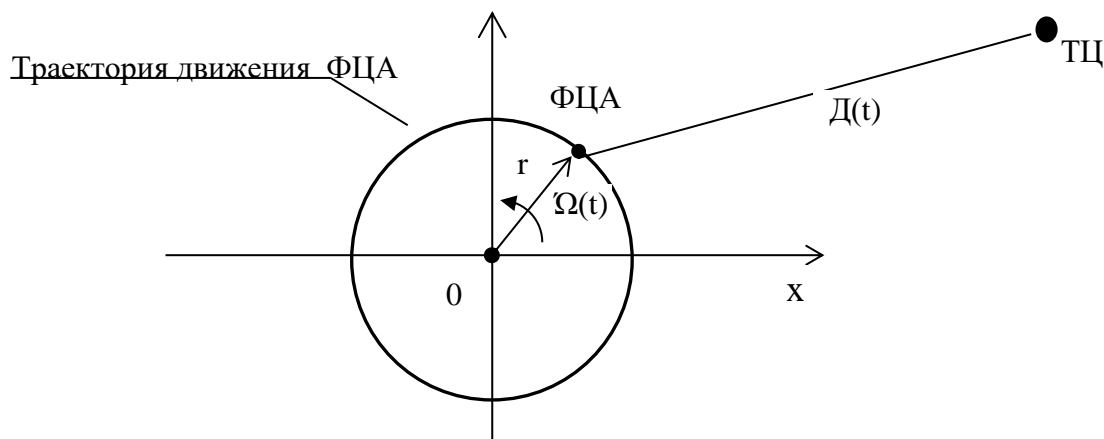


Рис.2

$$\delta_{аз} = \frac{2.3 \lambda D_0}{\pi 4r} . \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что линейная разрешающая способность при синтезировании за счет вращения ФЦ РА, как и при поступательном его движении и переднее-боковом обзоре, определяется размером синтезированной апертуры ($L_c = 2r$) и зависит от дальности до точечного объекта.

Важно, что разрешающую способность, определяемую выражением (4), можно получить в любом пространственном секторе относительно центра вращения ФЦА (при произвольном пространственном положении ТЦ относительно РСА), используя только половину оборота ФЦ вокруг его оси вращения. При этом важно, чтобы диаметр стягивающей описываемой фазовым центром реальной антенны дуги был перпендикулярен линии визирования цели (рис. 3). Данное замечание следует из того факта, что размер синтезированной апертуры при вращении ограничен диаметром вращающей структуры, который и определяет требуемое время синтезирования. Дальнейшее увеличение длительности периода когерентного накопления траекторного сигнала (пути синтезирования) приведёт только к повышению отношения «сигнал-шум», но не к повышению разрешающей способности РСА в азимутальном направлении.

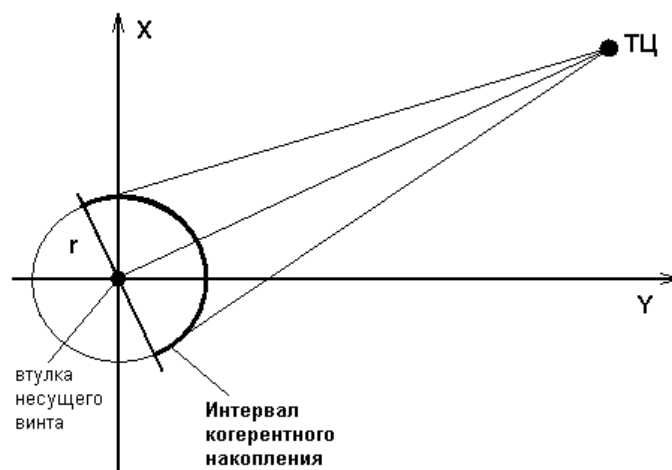


Рис.3

Выбор пространственного сектора при синтезировании обеспечивается за счёт углового стробирования. Введение данного стробирования в алгоритм

согласованной фильтрации траекторного сигнала эквивалентно его умножению на стробирующую функцию $\gamma(t)$ вида:

$$\gamma(t) = \begin{cases} 1, t \in \left[\frac{\Psi_0 - \frac{\pi}{2}}{\Omega}, \frac{\Psi_0 + \frac{\pi}{2}}{\Omega} \right] \\ 0, t \notin \left[\frac{\Psi_0 - \frac{\pi}{2}}{\Omega}, \frac{\Psi_0 + \frac{\pi}{2}}{\Omega} \right] \end{cases}, \quad (5)$$

где Ψ_0 – угловая координата ТЦ.

В результате за один оборот ФЦА вокруг своей оси, путем настройки опорной функции на заданное угловое направление, можно получить РЛИ наблюдаемой поверхности с заданным линейным разрешением по азимуту в любом угловом секторе относительно носителя вертолетного типа.

Ситуация, рассматриваемая на рис.2 и 3, а также выражение (4), определяющее возможности бортовой РСА по разрешению, получено для случая, когда носитель вертолетного типа неподвижен (находится в зависшем состоянии). В тоже время процесс синтеза апертуры за счет вращения ФЦ РА возможен и при поступательном движении носителя вертолетного типа. Особенность данной процедуры в данном случае состоит в том, что ФЦ теперь совершает движение по сложной траектории (рис. 4), совмещая поступательное движение, вызванное движением носителя вдоль линии пути, и вращательное движение, обусловленное вращением лопасти. Другими словами, ФЦ РА совершает поступательно-вращательное движение, перемещаясь по комбинированной траектории.

При комбинированной траектории движения ФЦА синтезированную апертуру можно представить в виде [7]

$$L_c = L_{c1} + \Delta L_c, \quad (6)$$

где L_{c1} соответствует синтезированной апертуре, формируемой за счет поступательного движения ФЦА; ΔL_c – приращение синтезированной апертуры за счет вращения ФЦ РА.

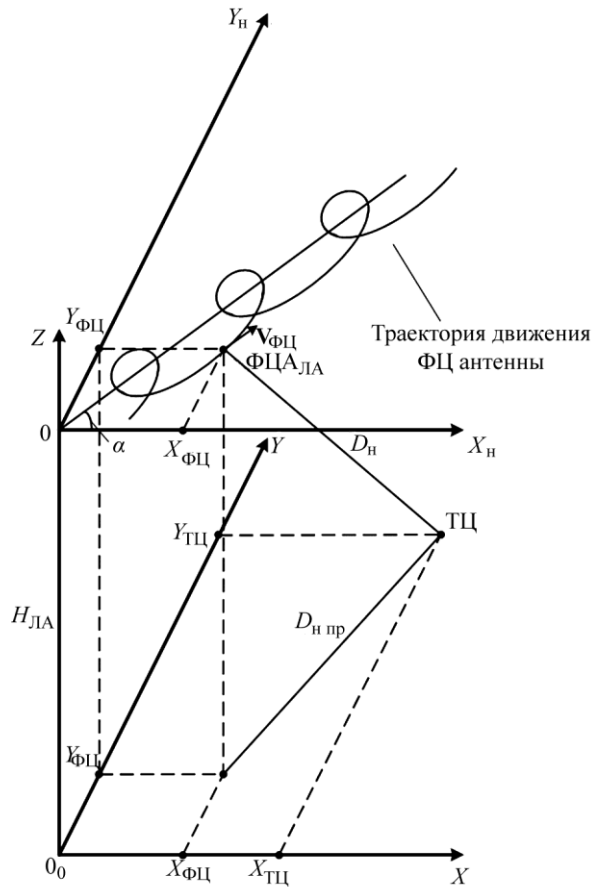


Рис.4

Необходимо заметить, что не все участки комбинированной траектории вносят вклад в приращение синтезируемой апертуры, обусловленное поступательным движением ФЦА. Основной вклад в данное приращение вносят дугообразные части комбинированной траектории. Данные участки образуют некую эффективную синтезированную апертуру. При этом, как показывает анализ сигнала на выходе оптимальной системы обработки траекторного сигнала, вклад вращательной компоненты движения ФЦА в процесс синтеза апертуры при комбинированной траектории зависит от времени синтезирования апертуры. В частности, наибольший вклад существует при малых временах когерентного накопления траекторного сигнала, когда данное время не превышает трех оборотов вращения ФЦА. В тоже время все достоинства РСА, связанные с чисто вращательным движением ФЦА, остаются, а именно:

- синтез апертуры антенны в любом угловом секторе относительно носителя РСА при отсутствии поступательного движения последнего;
- возможность обеспечения высоко линейного разрешения по азимуту строго впереди носителя РСА.

3. Анализ режимов работы РСА

Опираясь на технологию синтезирования апертуры антенны при вращении ФЦ РА в бортовой РЛС носителя вертолетного типа, могут быть реализованы следующие режимы работы [4-7]:

- картографирование земной поверхности при секторном, всеракурсном обзоре и в режиме обзора «под собой»;
- селекция наземных движущихся целей;
- интерферометрический режим;
- режим измерения углового положения цели.

Режим **секторного обзора** позволяет получить РЛИ в заданном оператором РЛС секторе углов. Реализация пространственной селекции в этом случае обеспечивается набором опорных функций, соответствующих заданному сектору наблюдения. Ширина сектора определяется числом формируемых опорных функций, при этом одновременно возможно формирование нескольких «лучей» [7]. Ширина «луча» может варьироваться в широких пределах, обеспечивая просмотр той или иной зоны земной поверхности. Принципиальным, как отмечалось ранее, является то, что формирование РЛИ в режиме синтезирования при вращении ФЦА возможно в любом наблюдаемом секторе углов относительно центра масс как зависшего, так и двигающегося носителя вертолетного типа.

На рис.5 – 11 приводятся иллюстрации, поясняющие возможные режимы секторного обзора подстилающей поверхности.

На рис. 5 приведена модельная наземная обстановка в виде совокупности точечных целей, находящихся на одной дальности относительно центра вращения ФЦА, но расположенных на различных азимутальных направлениях относительно ФЦ реальной антенны, а на рис. 6 - распределение

интенсивности отраженных сигналов для данной модельной ситуации в полоске дальности. При этом полагалось, что фон представляет собой зеркально отражающую поверхность, а отражающая способность всех целей считается одинаковой.

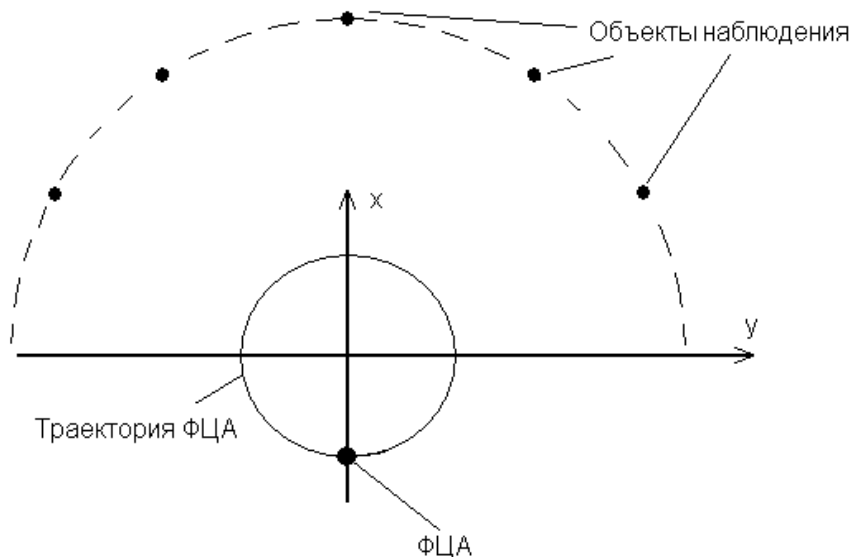


Рис. 5. Положение точечных целей в передней полусфере

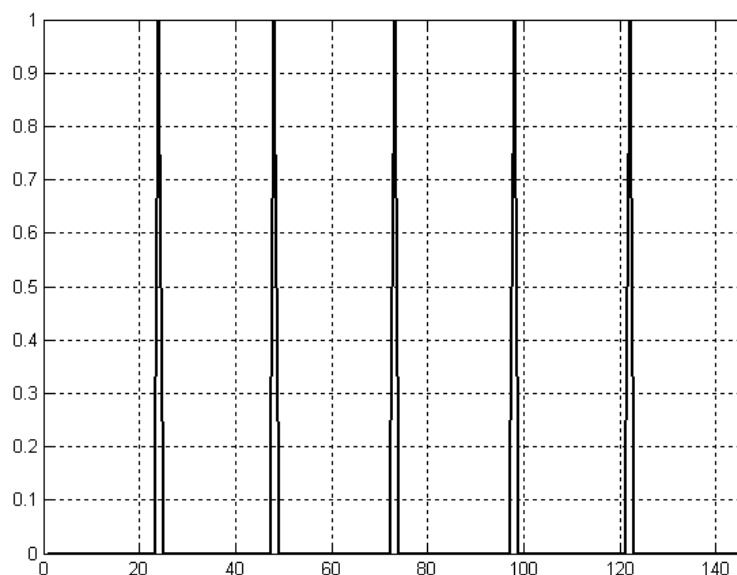


Рис. 6. Сечение канала дальности с точечными целями

На рис. 7 приведен результат обработки траекторного сигнала РЛИ для данной модельной ситуации в рассматриваемом канале дальности. Видно, что сформированное РЛИ адекватно отражает модельную ситуацию. Однако,

помимо главных лепестков, в изображениях ТЦ присутствуют и боковые лепестки высокого уровня (примерно 50% от максимума).

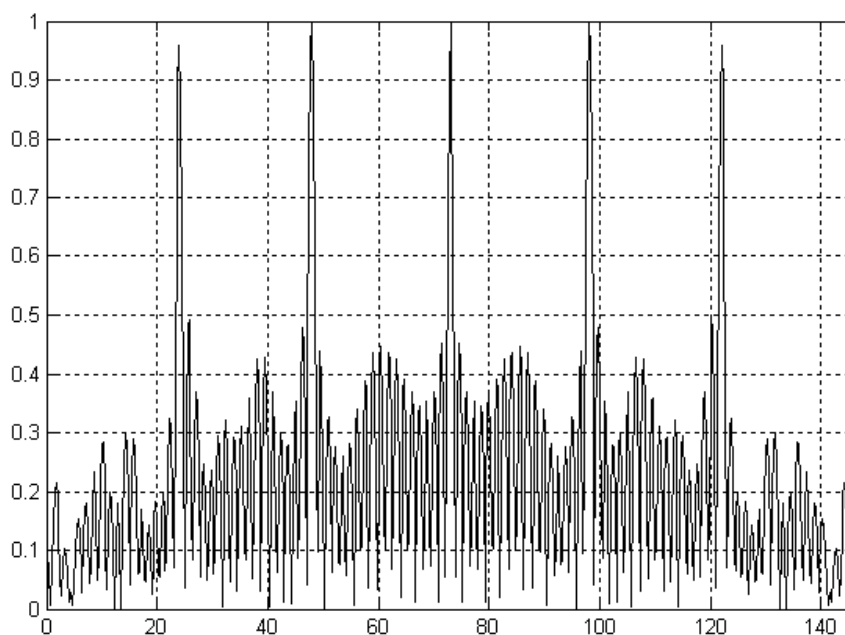


Рис. 7. Сечение РЛИ полосы дальности с точечными целями

Проводя угловое стробирование при реализации обработки траекторного сигнала, можно получить РЛИ в любом пространственном секторе относительно линии пути носителя РСА. В качестве примера на рис.8 выделен узкий сектор в направлении оси X, в котором необходимо сформировать РЛИ наблюдаемой поверхности, а на рис. 9 представлено РЛИ ТЦ, полученное после обработки траекторного сигнала при выполнении операции стробирования, соответствующей данному выбранному сектору.

Из данного рисунка видно, что боковые лепестки откликов точечных целей, расположенных вне сектора обзора, оказывают влияние на получаемое РЛИ выбранной точечной цели, поскольку сигналы, отражённые от этих целей, все равно принимаются слабонаправленной антенной.

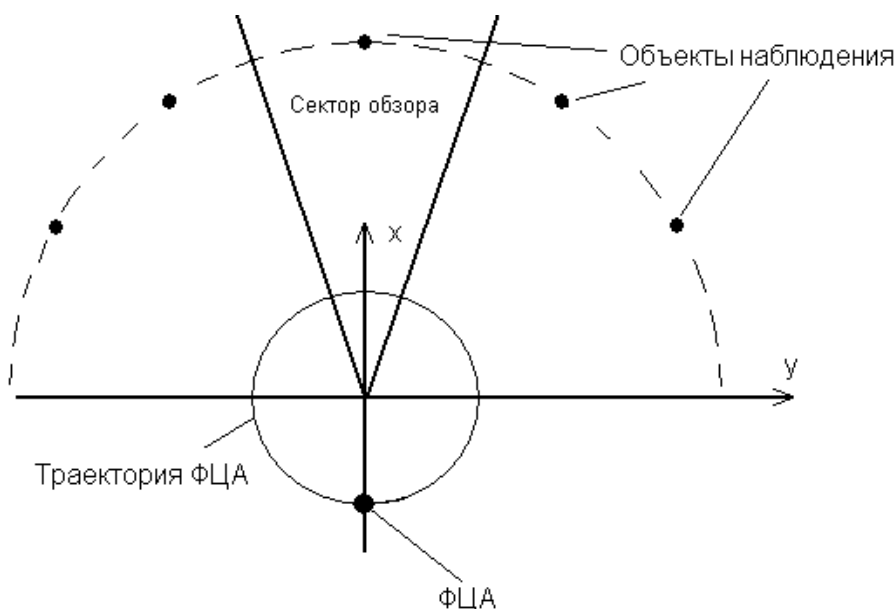


Рис. 8. Режим обзора РСА с формированием одного сектора картографирования

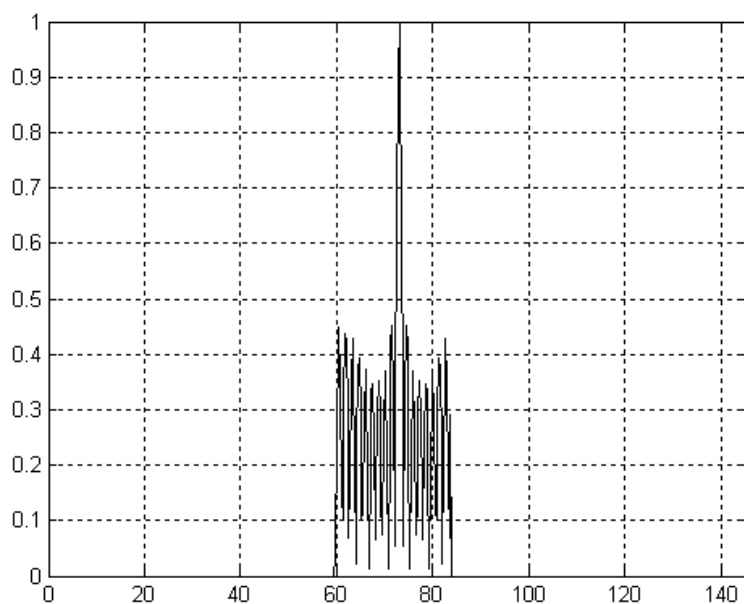


Рис. 9. Изображение ТЦ, полученное в канале дальности в режиме секторного обзора

На рис. 10 приведен пример с выделением 2-х секторов на модельной обстановке, а на рис. 11 – РЛИ, соответствующее одному каналу дальности, после обработки траекторного сигнала при стробировании в соответствии с заданным сектором наблюдения.

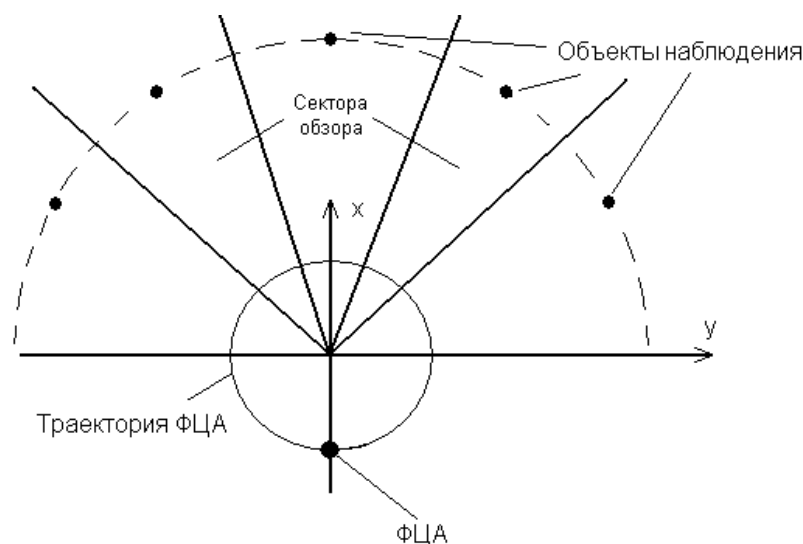


Рис. 10. Режим обзора РСА с формированием двух неперекрывающихся секторов обзора

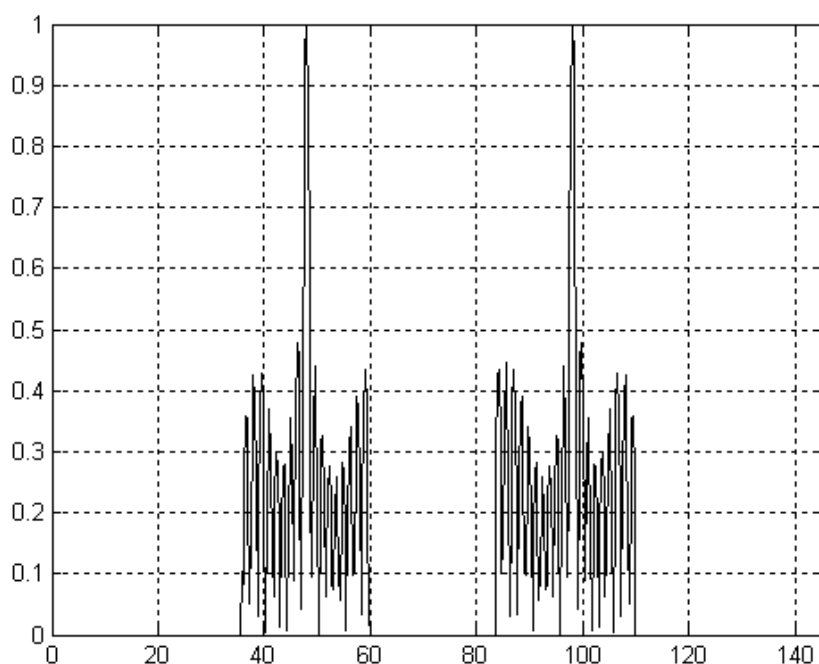


Рис. 11. Изображение полоски дальности с точечными целями в режиме секторного обзора

При **всеракурсном обзоре** имеется возможность получения изображения вокруг носителя вертолётного типа в секторе $0 - 360^0$ за время, соответствующее полутора оборотам вращения его лопастной структуры. Высокая скорость вращения данной структуры позволяет сформировать РЛИ не более, чем за 0.5 секунды. Такой режим является наиболее затратным с точки

зрения вычислительных ресурсов ЦСО (требуется сформировать максимально возможное число опорных функций и для каждой из них выполнить процедуру оптимальной обработки траекторного сигнала).

Режим **обзора «под собой»** представляет вариант реализации так называемой РСА планового обзора [7], при котором обеспечивается получение высокой пространственной разрешающей способности по всем координатам в зоне обзора непосредственно под носителем РЛС.

При вращении ФЦА создаётся не одномерная апертура (как в случае поступательного движения ФЦА), а двумерная. Переход от одномерных синтезированных апертур к двумерным позволяет обеспечивать высокое разрешение не только по азимуту, но и по радиальной дальности без применения специальных типов зондирующих сигналов. Однако при удалении ТЦ от начала координат будет происходить ухудшение разрешающей способности по радиальной дальности, что обусловлено уменьшением углового размера синтезированной апертуры в соответствующей плоскости.

Важно, что двумерная апертура за счет вращения ФЦ РА создается как при движении носителя вертолетного типа, так и при нахождении его в неподвижном (зависшем) состоянии.

Режим **селекции наземных движущихся целей (СНДЦ)** позволяет осуществить подавление сигналов от неподвижного фона и выделение сигналов, отражённых от движущихся целей.

Наиболее подходящим когерентным режимом СДЦ при вращении ФЦ РА является метод с остановленным фазовым центром. Для реализации данного метода целесообразно на носителе вертолетного типа иметь соосную схему его вращающейся структуры, что позволяет установить антенны на разнесенные по высоте лопасти вертолетного носителя и повысить эффективность работоспособности алгоритма СНДЦ.

Исследования показали, что использование единственной приёмопередающей антенны позволяет провести обнаружение движущейся цели и оценку радиальной составляющей вектора её скорости. Особенностью данного

режима является то, что движение цели с постоянной скоростью не приводит к смещению отметки цели относительно её истинного положения, а лишь уменьшает амплитуду отклика вследствие расфокусировки отражённого сигнала.

Для реализации алгоритмов раскрытия неоднозначности «угол-скорость» целесообразно также использовать соосную схему вращающейся структуры носителя вертолётного типа.

Наиболее просто при вращении ФЦА можно реализовать режим СДЦ, опираясь на некогерентный алгоритм обнаружения движущихся целей, основанный на покадровом вычитании формируемых кадров РЛИ, полученных в разных периодах обзора.

Реализация **интерферометрического режима** работы в РСА при вращении ФЦА возможна при соосной схеме вращения лопастной структуры носителя вертолётного типа. При использовании данного режима обеспечивается формирование трёхмерного РЛИ в координатах «азимут-дальность-высота».

В качестве примера на рис.12 приведено РЛИ изображение модельных

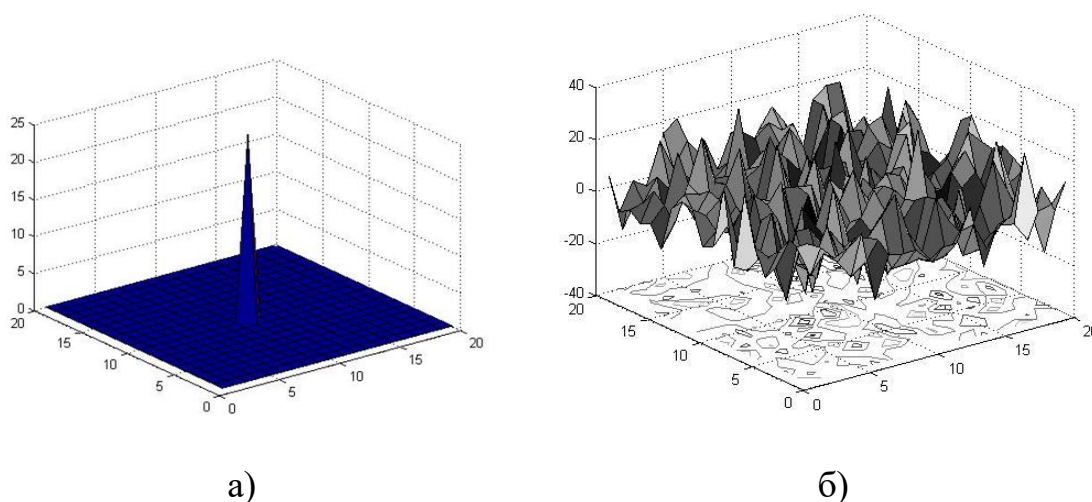


Рис.12

объектов в виде ТЦ (рис12,а) и рельефа поверхности земли (рис12,б), полученных в интерферометрическом режиме СА при вращении ФЦА.

Повышение информативности РЛИ, получаемых в интерферометрическом режиме, позволит решать новые задачи, такие как:

- обнаружение высотных объектов, представляющих опасность при маловысотном полёте носителя РЛС (опоры ЛЭП, трубы, вышки с антеннами сотовой связи и т. п.);
- формирование РЛИ, близких к реальному ландшафту местности за счёт добавления информации о высоте наблюдаемых объектов;
- обнаружение площадок с ровной поверхностью для осуществления посадки носителя при отсутствии видимости (ночью или в плохих метеоусловиях).

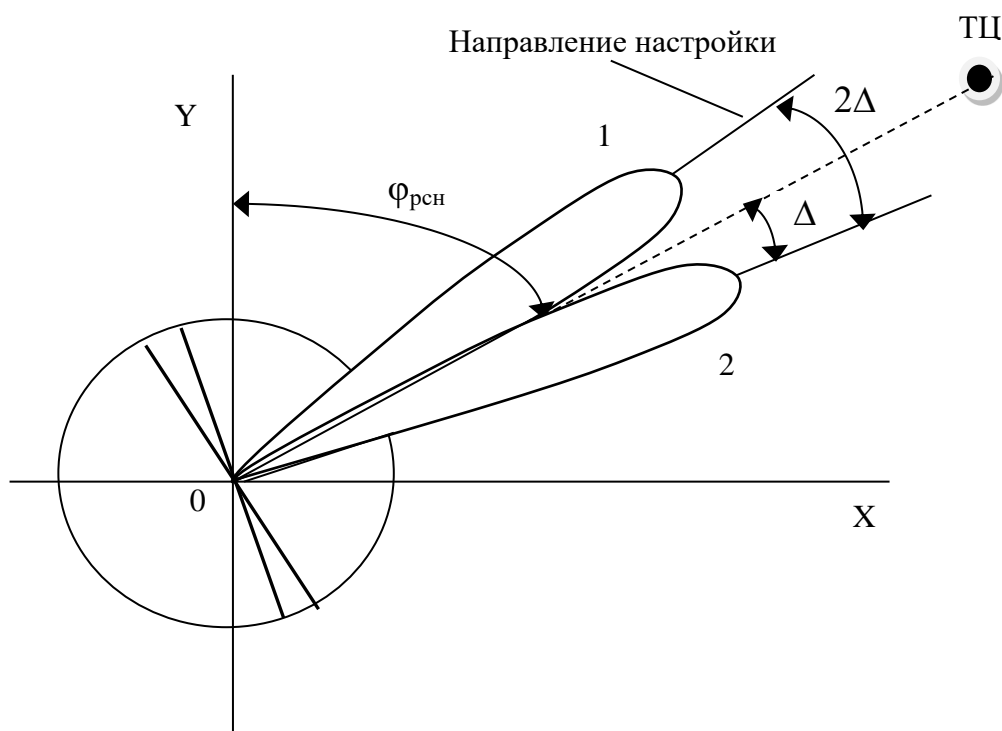


Рис. 13

Реализация **режима измерения углового положения цели** позволяет обеспечить высокоточное измерение угловой координаты объекта, представляющего интерес. Процесс измерения основывается на идее моноимпульсного метода измерения угловой координаты. Для этого формируются две синтезированной апертуры, главные лепестки которых разнесены на угол 2Δ (рис.13). При этом равносигнальное направление (РСН)

соответствует направлению на ТЦ. Формирование синтезированных апертур (1 и 2) осуществляется последовательно во времени через интервал, равный периоду вращения лопастной структуры, а выбор направления максимумов синтезированных апертур осуществляется путем настройки опорных функций на заданное направление. Учитывая, что использование моноимпульсного метода позволяет повысить точность измерения угловой координаты в 2...4 раза по сравнению с методом максимума, при данном способе измерения угловой координаты можно обеспечить точность ее измерения, равную $(0,05 \dots 0,1) \theta_{ca}$, где θ_{ca} – ширина главного лепестка синтезированной апертуры, сформированной при вращении ФЦ РА по окружности с радиусом, равным длине лопасти носителя вертолетного типа.

4. Заключение

Таким образом, использование технологии синтеза апертуры искусственной антенны, формируемой за счет вращения ФЦ РА, позволяет решать задачи мониторинга земной поверхности при высокой степени детализации формируемого РЛИ наблюдаемой поверхности. При этом открываются новые возможности по сравнению с аналогичной технологией при поступательном движении ФЦ РА, а именно:

- формирование РЛИ наблюдаемой земной поверхности с одинаковой детализацией в любом угловом направлении относительно линии пути носителя вертолетного типа, в том числе, и строго впереди носителя РЛС;
- формирование РЛИ наблюдаемой земной поверхности в режиме обзора «под собой»;
- формирование РЛИ земной поверхности высокой детализации как при неподвижном носителе вертолетного типа, так и при его движении;
- обеспечение высокоточного измерения угловой координаты объекта, представляющего интерес, в любом угловом секторе относительно линии пути носителя вертолетного типа.

Литература

1. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г. С. Кондратенкова – М.: Радиотехника, 2005.- 368 с
2. Авиационные системы радиовидения. Монография / Под ред. Г.С.Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2015.–648 с.
3. Дудник П.И., Герасимов А.А., Ильчук А.Р., Кондратенков Г.С., Татарский Б.Г. Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник для слушателей и курсантов ВУЗов ВВС /Под. ред. Дудника П.И. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006, 1112 с.
4. Татарский Б. Г., Ясенцев Д. А. Анализ особенностей формирования и обработки траекторного сигнала в РЛС с синтезированием апертуры антенны при вращении ее фазового центра // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2008, № 9, Т.6,с.3-8.
5. Татарский Б.Г., Ясенцев Д.А. Особенности синтезирования апертуры при вращении фазового центра антенны в режиме обзора «под собой» //Информационно-измерительные и управляющие системы, 2009,№ 1, Т. 7, с. 20-25.
6. Татарский Б.Г., Пилков А.В. Селекция движущихся наземных целей в режиме синтезирования апертуры при вращении фазового центра реальной антенны// Информационно-измерительные и управляющие системы, 2010, №9,т. 8, с. 5-12.
7. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х кн. Кн.1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА. Монография /Под ред. В.С.Вербы, Б.Г. Татарского. – М.: Радиотехника, 2016.- 512 с.

Ссылка на статью:

В. С. Верба, Б.Г. Татарский, Е. В. Майстренко. Новые технологии радиолокационного мониторинга земной поверхности для носителей вертолетного типа. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb18/4/text.pdf>