

УДК 621.396

Потенциальные характеристики многолучевой радиолокационной станции в режиме обнаружения малоскоростных малозаметных целей

© Авторы, 2017

© ООО «Издательство «Радиотехника», 2017

И.К. Антонов

к.т.н., директор по информационным технологиям, ООО «БГ-Оптикс»; ООО «БГ-Маркет»

Описана структура многолучевой радиолокационной станции, предназначенной для обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены ее диаграммы направленности, зоны обнаружения целей и потенциальная точность измерения их координат.

Ключевые слова: многолучевой радиолокатор, охранная система.

The structure of a multi-beam radar designed for detection of small UAVs. We consider it of the radiation pattern, the objectives of the detection zone and the potential accuracy of the measurement of their coordinates.

Keywords: multi-beam radar, security system.

Одним из направлений повышения эффективности радиолокаторов, входящих в состав комплексов защиты важных объектов от нападения с применением малоразмерных беспилотных летательных аппаратов, является использование радиолокационных станций (РЛС) с многолучевыми приемными антеннами [1]. Принцип обзора пространства и варианты структуры и параметров такой РЛС описаны в [2, 3]. Особенностью многолучевой РЛС, определяющей ее потенциальные характеристики при обнаружении малоскоростных малоразмерных целей, является возможность обеспечить длительное когерентное накопление отраженного от цели сигнала при быстром, составляющем единицы секунд, времени обзора широкой контролируемой зоны.

Ц е л ь р а б о т ы – рассмотреть потенциальные характеристики многолучевой РЛС при обнаружении цели на фоне внутренних шумов приемной аппаратуры, без учета влияния отражений от подстилающей поверхности.

Представленные методы расчета и характеристики справедливы при линейном приближении характеристик функциональных узлов радиолокатора. Такой подход необходим для выбора облика РЛС – размеров антенны, диапазона и мощности излучения, формы и параметров зондирующего сигнала.

Расчет потенциальных характеристик выполнен на примере многолучевого радиолокатора с цифровым формированием приемной диаграммы направленности (ДН), структура которого описана в [3]. Основные элементы структуры приемного модуля РЛС показаны на рис. 1.

В рассматриваемом примере структуры РЛС приемная антенная решетка включает в себя не менее двух горизонтальных линеек приемных элементов для сканирования в угломестной плоскости, каждая линейка состоит из K_n приемных элементов. Блок сканирования, включающий управляемые фазовращатели, предназначен для сканирования ДН в угломестной плоскости. Блок приемников состоит из K_n субблоков (приемных каналов), переводящих принимаемые сигналы на промежуточную частоту и усиливающих их. АЦП, стоящие в каждом приемном канале, могут конструктивно располагаться как в блоке приемников, так и на входе вычислительного модуля. Диаграммообразующая

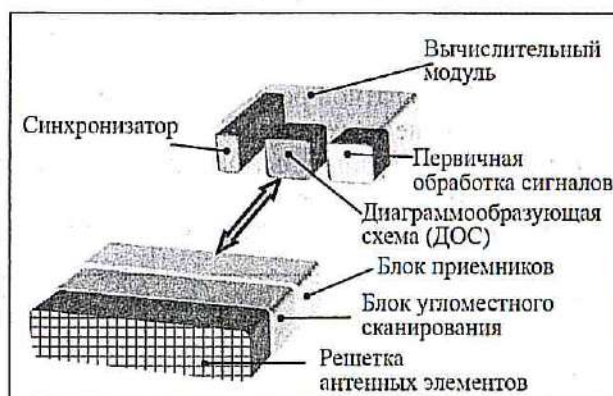


Рис. 1. Структура приемного модуля многолучевой РЛС

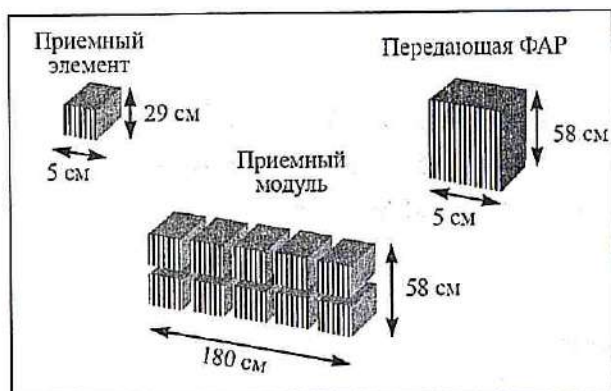


Рис. 2. Параметры антенных систем многолучевой РЛС

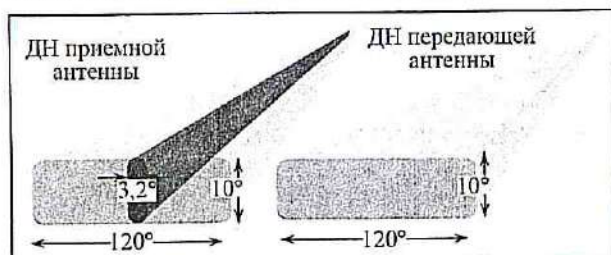


Рис. 3. Диаграммы направленности РЛС

чают и принимают сигналы из широкой зоны обзора. При обработке сигналов в ДОС формируется веер узких лучей ДН. Ширина центрального луча в веере $\theta_x = 3,2^\circ$, к краям зоны обзора ширина луча возрастает.

Обзор в угломерной плоскости выполняется путем синхронного сканирования приемных и передающей ДН, вариант позиций сканирования показан на рис. 4. Темп смены позиции наблюдения в угломерной плоскости составляет десятые доли секунды. Показанное на рисунке расширение ДН для верхних зон вполне допустимо, так как в этой области дальность до цели не может быть большой вследствие ограничения высоты ее полета. Вызываемое расширением ДН падение энергетического потенциала все же позволяет обеспечить обнаружение целей во всей контролируемой зоне. Обзор зоны тремя позициями ДН обеспечивает время контроля всего пространства, не превышающее 1 с.

Вариант аппаратной реализации одного из приемных каналов РЛС показан на рис. 5. Сигналы с выхода пары приемных антенных элементов через малошумящие усилители (МШУ) поступают в управляемый фазовращатель (ФВ) для сканирования ДН в угломерной плоскости. После усиления в приемнике (ПРМ), главное требование к которому – широкий динамический диапазон, сигналы поступают в вычислитель, где происходит их аналогово-цифровое преобразование (АЦП), формирова-

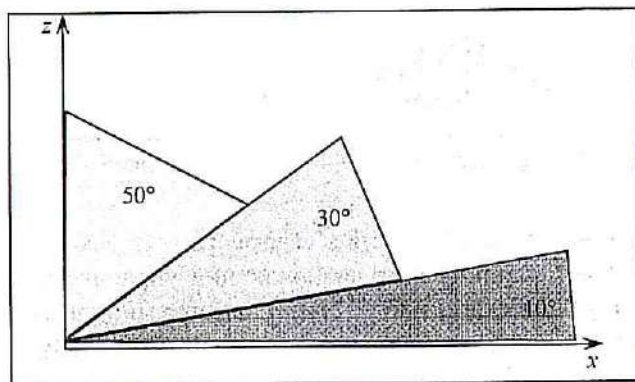


Рис. 4. Зоны обзора РЛС в угломерной плоскости



Рис. 5. Структура одного из 36 приемных каналов

схема (ДОС) формирует цифровым методом в азимутальной плоскости веер приемных ДН, число которых K в этом примере равно K_a . Блок первичной обработки выполняет сжатие принимаемых сигналов по дальности, формирование каналов дальности и когерентное накопление принимаемых сигналов.

Радиолокационная станция излучает сигнал в диапазоне $\lambda = 10$ см в зоне одновременного обзора размером $\theta_x \times \theta_y = 120^\circ \times 10^\circ$, обзор всей зоны в угломерной плоскости выполняется за счет электронного сканирования передающей и приемной ДН. Параметры используемых антенных систем показаны на рис. 2. Передатчик нагружен на ФАР размером 5×58 см (здесь и везде далее приводится эффективный размер антенны, рассчитываемый как $d = \lambda/\theta$). Приемная антенна содержит две линейки антенных элементов по 36 элементов в каждой, расположенных с шагом 5 см. Общий размер приемной антенны 180×58 см.

Формируемые многолучевой РЛС с описанной антенной системой ДН показаны на рис. 3. Передающая и приемная антенны одновременно облучают

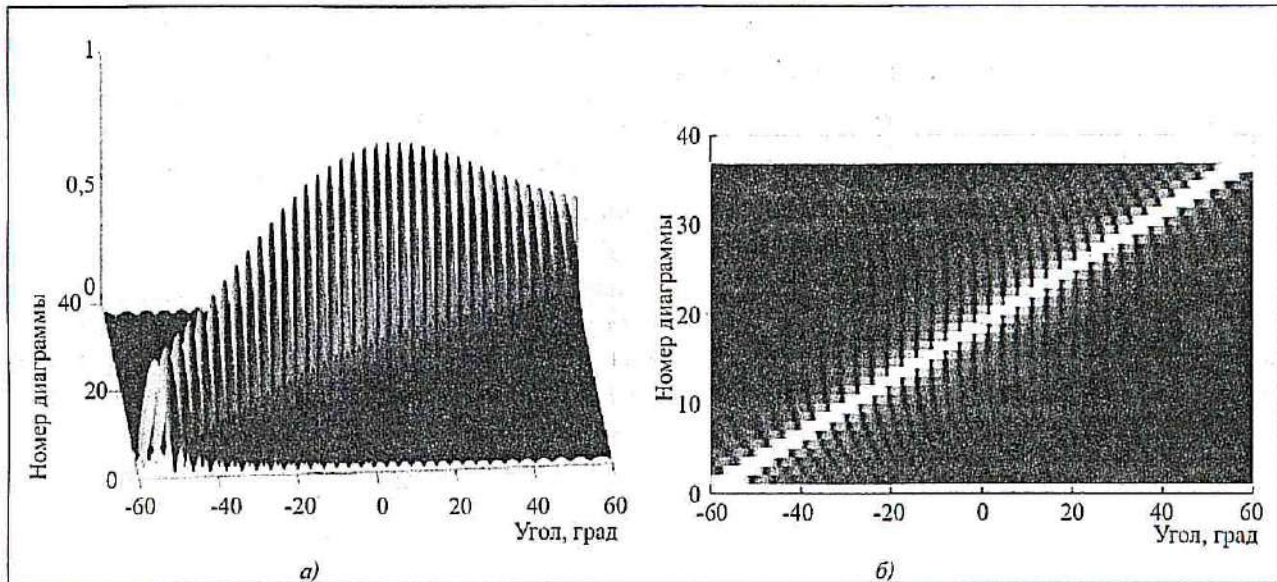


Рис. 6. Диаграммы направленности веера из 36 приемных лучей: а – 3D-изображение; б – яркостная индикация

ние ДН путем совместной обработки 36 каналов в ДОС, отдельное в 36 лучах сжатие по дальности и когерентное накопление.

Сечения в азимутальной плоскости формируемых ДН показаны на рис. 6. Изображения диаграмм приведены в 3D-формате и в плоскостной проекции. Как видно из рисунка, существенного расширения лучей и роста уровня боковых лепестков ДН на краях заданной зоны одновременного обзора не происходит.

Вид и параметры излучаемого сигнала могут изменяться в широких пределах в зависимости от решаемой радиолокатором тактической задачи. Для режима «обзор» – обнаружения и измерения параметров воздушной цели, один из используемых сигналов имеет вид и параметры, показанные на рис. 7.

Изображена огибающая сигнала на одном интервале когерентного накопления длительностью $T_c = 200$ мс. Излучаются импульсы длительностью $\tau_u = 1,5$ мкс с периодом следования $T_n = 66,7$ мкс. Импульсы широкополосные, в данном случае ЛЧМ-модулированные, с коэффициентом сжатия $M = 22,5$. Излучение зондирующего сигнала на нескольких частотах повторения для раскрытия неоднозначности по дальности не предусматривается, поэтому на облучение каждой из трех позиций по углу места затрачивается время когерентного накопления $T_c = 0,2$ с. С учетом переходных процессов в аппаратуре при переключении позиций, время формирования одного кадра в зоне обзора достигает $T_n = 4T_c = 0,8$ с.

Выбранные характеристики зондирующего сигнала, определяющие потенциальные технические и тактические характеристики РЛС:

$Q = 44,5$ – скважность импульсной последовательности;

$F_n = 15$ кГц – частота повторения зондирующих импульсов;

$R_{одн} = 10$ км – диапазон однозначного измерения дальности;

$V_{одн} = 375$ м/с (1350 км/ч) – диапазон однозначного измерения скорости;

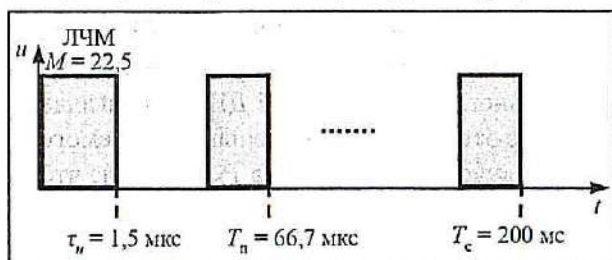


Рис. 7. Вид зондирующего сигнала на интервале когерентного накопления

- $R_{сл} = 225$ м – длина «слепой зоны», минимального расстояния, на котором обнаруживается цель;
- $\delta_R = 10$ м – разрешающая способность по дальности после сжатия импульса;
- $\Delta_f = 5$ Гц – ширина полосы пропускания доплеровского фильтра;
- $\Delta_v = 0,25$ м/с (0,9 км/ч) – разрешающая способность по скорости;
- $\Delta_f = 15$ МГц – ширина спектра зондирующего сигнала.

Потенциальную дальность действия многолучевой РЛС оценим при обнаружении точечной цели на фоне внутренних шумов аппаратуры, без учета влияния помеховых отражений от земли. Рассчитаем зависимость отношения сигнал/внутренний шум от положения цели в зоне обзора для выбранных параметров системы радиолокационного наблюдения. Рассмотрим «идеализированные» условия наблюдения в предположении, что цель находится в максимуме соответствующего ее положению луча ДН, и что доплеровский сдвиг частоты отраженного от цели сигнала совпадает с центральной частотой настройки фильтра, в котором она обнаруживается. Для учета возможной в реальности несогласованности этих параметров цели и РЛС в формулы расчета дальности вводится дополнительный коэффициент потерь, в результате на практике обнаружение цели может происходить и на больших дальностях, чем рассчитанные.

Отношение сигнал/шум по мощности вычисляется для одного интервала когерентного накопления сигнала. Рассматривается вариант РЛС с цифровым формированием ДН [3], когда количество приемных каналов равно половине количества приемных антенных элементов $K = 0,5K_a$. Характеристики обнаружения рассчитываются для целей с эффективной площадью отражения (ЭПО) $\rho_{ц} = 0,1$ м² и $\rho_{ц} = 0,01$ м².

Задаваемые параметры приемного тракта РЛС:

- $k_{ш} = 3$ дБ – коэффициент шума входного тракта;
- $k_T = 4 \times 10^{-21}$ Вт/Гц – спектральная плотность мощности шума;
- $\alpha_p = 4$ дБ – коэффициент потерь мощности полезного сигнала в приемном тракте;

$q_0 = 10$ дБ – заданное для обеспечения характеристик обнаружения отношение сигнал/шум по мощности.

Расчет потенциального отношения сигнал/внутренний шум выполняется по формуле, модифицированной для многолучевой РЛС из выражения для дальности, используемого в [4]:

$$q = \frac{P_{ср} T_c S_{прм} S_{прд} \cos \theta_k \rho_{ц}}{4\pi \lambda^2 k_T k_{ш} \alpha_p R^4 \sqrt{K_a}}, \quad (1)$$

где R – текущая дальность до цели; $S_{прм}$, $S_{прд}$ – эффективные площади приемной и передающей антенн; $\cos \theta_k$ – угол отклонения от нормали к раскрытию антенны k -го приемного луча в веере.

На рис. 8 приведены графики изменения отношения сигнал/внутренний шум в зоне обзора и для центрального луча приемной ДН. Для наглядного представления дальности действия РЛС на графике величине этого параметра меньше требуемого $q_0 = 10$ дБ присвоено значение 0. Задана средняя мощность излучения передатчика $P_{ср} = 50$ Вт, что при выбранной скважности требует импульсной мощности сигнала $P_{ц} = 2,2$ кВт.

Радиолокационная станция с заданными параметрами потенциально обеспечивает обнаружение цели с ЭПО $\rho_{ц} = 0,1$ м² на дальности до 10 км во всей заданной зоне обзора. Дальность обнаружения цели с ЭПО $\rho_{ц} = 0,01$ м² на краях зоны обзора падает до 5 км, что вызвано расширением лучей приемной ДН, то есть уменьшением их КНД.

На рис. 9 показано рассчитанное для выбранных параметров РЛС распределение по зоне обзора значений линейной (выраженной в метрах) разрешающей способности РЛС по азимуту. На краях зо-

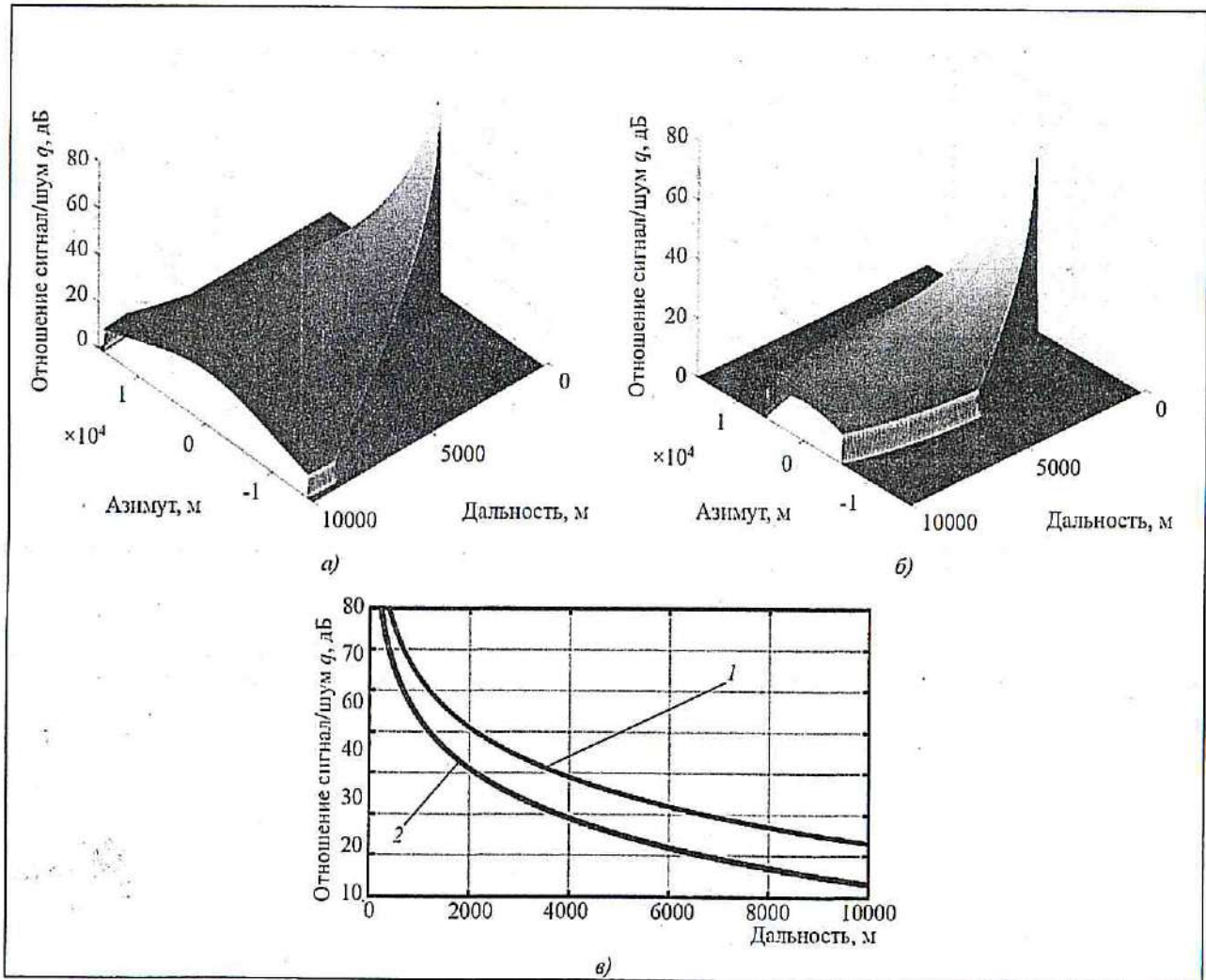


Рис. 8. Графическое представление изменения отношения сигнал/шум при $P_{\text{ср}} = 50$ Вт: а – зона обнаружения целей при $\rho_c = 0,1 \text{ м}^2$; б – зона обнаружения целей при $\rho_c = 0,01 \text{ м}^2$; в – центральный луч ДН (1 – $\rho_c = 0,1 \text{ м}^2$; 2 – $\rho_c = 0,01 \text{ м}^2$)

ны обзора разрешение падает, так как в этих направлениях падает эффективная длина несканирующей многолучевой антенны.

В режиме «обзор» многолучевой РЛС возможно измерение угловых координат цели в вычислителе, без изменения режима излучения и сканирования, например с применением моноимпульсного угломерного метода. Потенциальная точность измерения угла, выраженная как среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибки измерения σ_θ , определяется шириной луча ДН θ_n и отношением сигнал/шум q : $\sigma_\theta = \theta_n / \sqrt{q}$.

На рис. 10 показана выраженная в метрах зависимость от дальности потенциальной ошибки измерения азимута и высоты цели для центрального луча веера приемных ДН. Потенциальная точность измерения координат цели существенно превышает разрешающую способность РЛС, особенно на малых дальностях, где велико отношение сигнал/шум. Такая точность позволяет обеспечивать целеуказание для управляемого оружия, а на малых дальностях – для неуправляемого.

При разработке и производстве аппаратуры, а также при ее эксплуатации, важным является вопрос средней и импульсной излучаемой передатчиком мощности. Их снижение позволяет существенно уменьшить стоимость радиолокатора и его эксплуатации, обеспечить электромагнитную совместимость и экологическую безопасность. Кроме того, для многих защищаемых объектов вследствие конфигурации

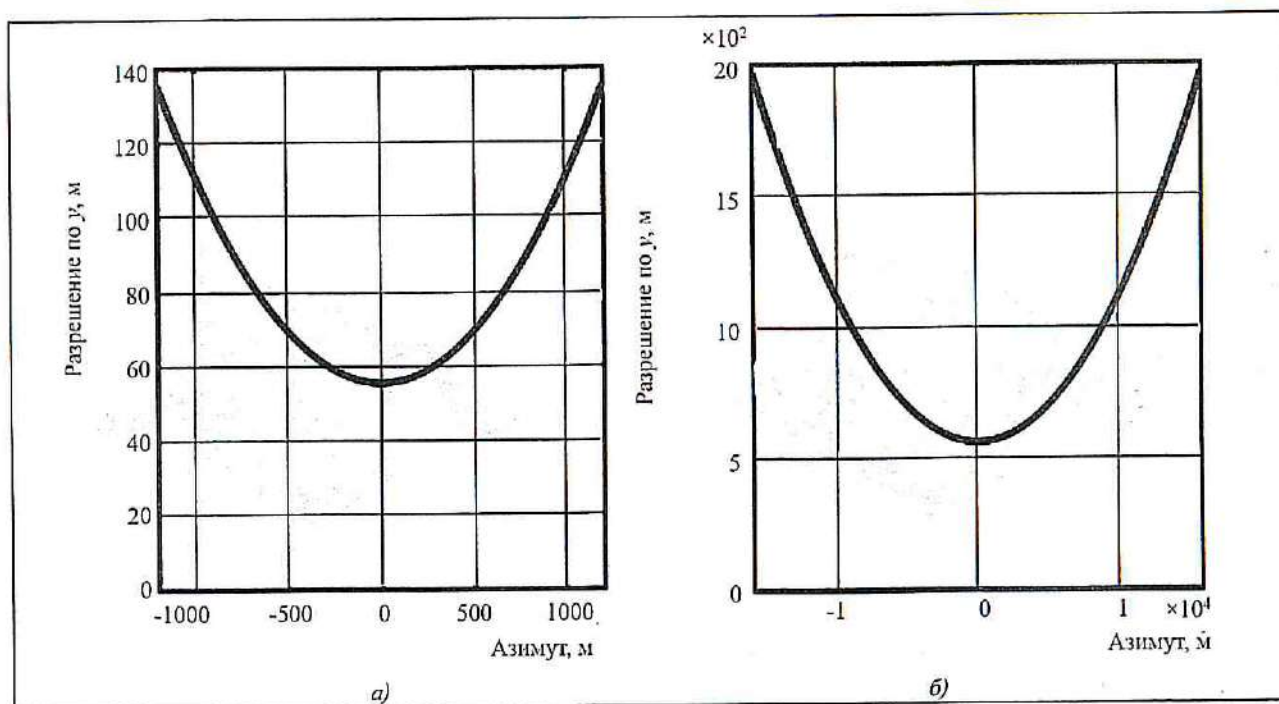


Рис. 9. Графическое представление линейной разрешающей способности РЛС по азимуту: а – на дальности $R = 1$ км; б – на дальности $R = 10$ км

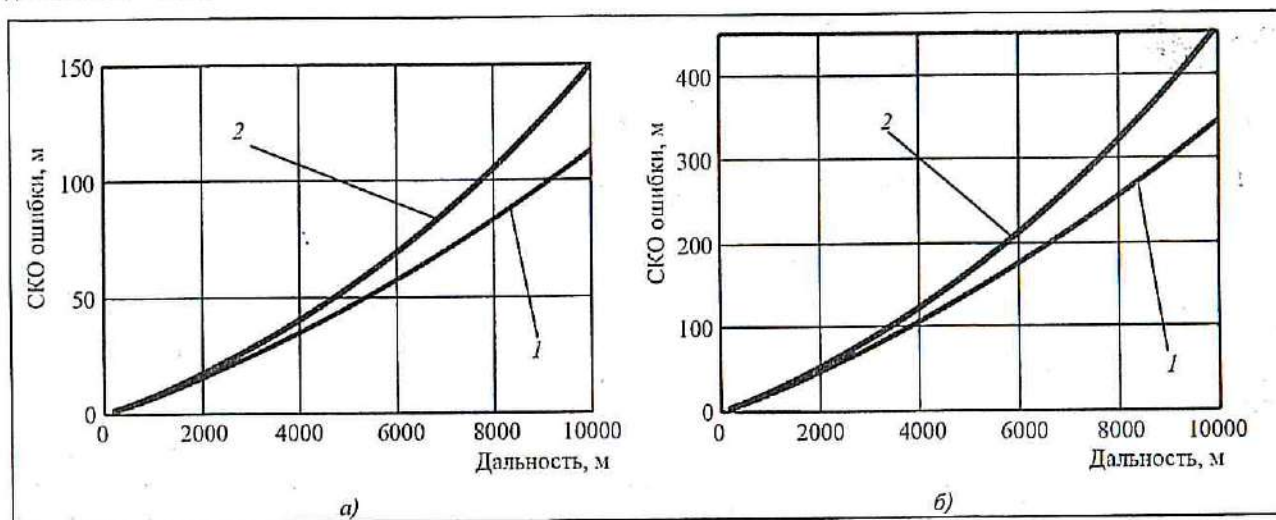


Рис. 10. Графическое представление потенциальной точности измерения координат цели: а – СКО ошибки измерения азимута; б – СКО ошибки измерения высоты (1 – $\rho_c = 0,1 \text{ м}^2$; 2 – $\rho_c = 0,01 \text{ м}^2$)

местности и особенностей организации комплекса охраны нет необходимости вести радиолокационный обзор на больших дальностях. На рис. 11 приведены характеристики зоны обзора для «маломощной» многолучевой РЛС, со средней мощностью излучения $P_{\text{ср}} = 10$ Вт при импульсной мощности $P_{\text{и}} = 0,45$ кВт. Зоны обнаружения целей сужаются по сравнению с РЛС при $P_{\text{ср}} = 50$ Вт, однако сохраняют размеры, достаточные для организации противодействия малоразмерным беспилотным летательным аппаратам.

- Потенциальные характеристики многолучевых РЛС позволяют обнаруживать малоразмерные воздушные цели типа «беспилотный летательный аппарат» на дальностях не менее 8...10 км в широкой угловой зоне обзора. Обзор всего контролируемого пространства выполняется за время менее 1 с.

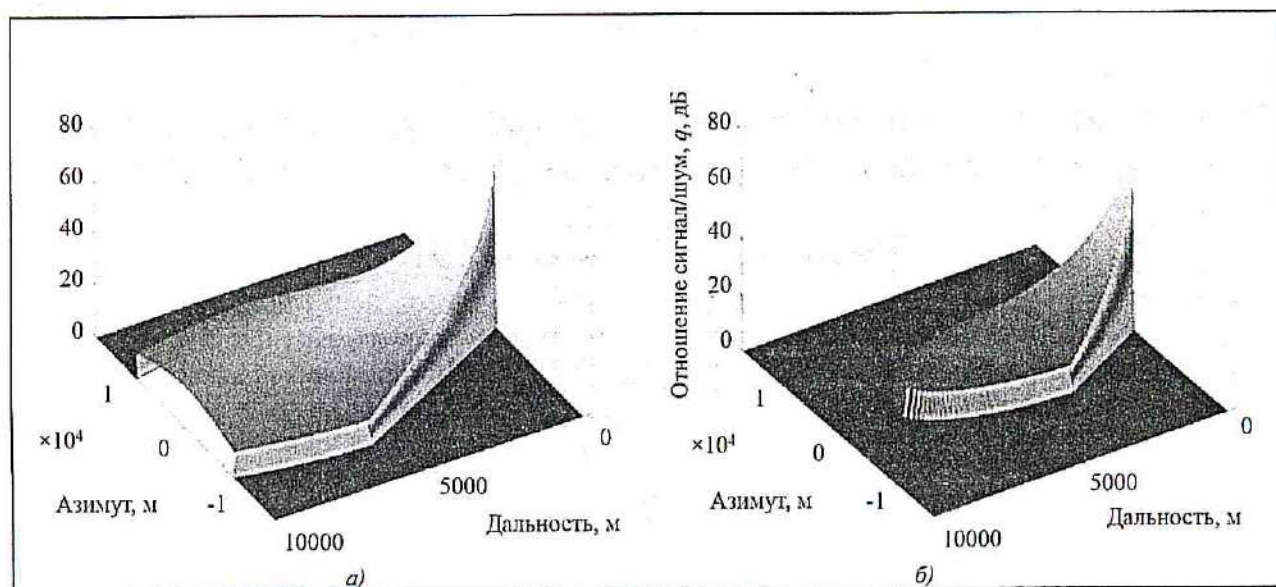


Рис. 11. Графическое представление отношения сигнал/шум при $P_{\text{ср}} = 10$ Вт: а – зона обнаружения целей при $\rho_{\text{ц}} = 0,1 \text{ м}^2$; б – зона обнаружения целей при $\rho_{\text{ц}} = 0,01 \text{ м}^2$

Точность измерения координат цели позволяет обеспечивать целеуказание для управляемого оружия, а на малых дальностях – для неуправляемого.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klare J., Saalman O. First Experimental Results with the Imaging Radar MIRA-CLE X // EUSAR 2010. Eurogress. Aachen, Germany.
2. Антонов И.К. Принцип обзора пространства в многолучевом радиолокаторе при обнаружении малозаметных воздушных целей // Радиотехника. 2017. № 3 (в печати).
3. Антонов И.К. Структура и базовые характеристики многолучевого радиолокатора охранного комплекса // Радиотехника. 2017. № 4 (в печати).
4. Кондратенков Г.С., Лавров А.А. и др. Авиационные системы радиовидения. М.: Радиотехника. 2015.

Поступила 21 февраля 2017 г.

Potential characteristics multibeam radar in low-speed mode, the detection of subtle purposes

© Authors, 2017
© Radiotekhnika, 2017

I.K. Antonov

Ph.D. (Eng.), Director of Information Technology, Ltd. "BG Optics"; Ltd. "BG Market"

The structure of a multi-beam radar designed for detection of small UAVs. We consider it of the radiation pattern, the objectives of the detection zone and the potential accuracy of the measurement of their coordinates.

REFERENCES

1. Klare J., Saalman O. First Experimental Results with the Imaging Radar MIRA-CLE X // EUSAR 2010. Eurogress. Aachen, Germany.
2. Antonov I.K. Prinzip obzora prostranstva v mnogoluchevom radiolokatore pri obnaruzhenii malozametny'x vozdushny'x czelej // Radiotekhnika. 2017. № 3 (v pechati).
3. Antonov I.K. Struktura i bazovy'e karakteristiki mnogoluchevogo radiolokatora ohrannogo kompleksa // Radiotekhnika. 2017. № 4 (v pechati).
4. Kondratenkov G.S., Lavrov A.A. i dr. Aviacionny'e sistemy' radiovideniya. M.: Radiotekhnika. 2015.