

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С НЕЭКВИДИСТАНТНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

О. В. Семёнова, С. Н. Замуруев

В настоящее время особое внимание уделяется многопозиционным радиолокационным системам, состоящим из одной передающей и одной или нескольких приемных станций. При этом регистрируемая информация будет зависеть от пространственного положения приемных станций и способа ее обработки, в частности, применяемых математических моделей. Обработка единого сигнала может осуществляться как суммарно-дальномерным, так и разностно-дальномерным методами. Создание многопозиционной радиолокационной системы сопряжено со сложностью математического моделирования их работы, обусловленной функцией неопределенности сигналов, используемых в качестве «подсветки» целей. В работе рассмотрены вопросы моделирования многопозиционной радиолокационной системы с неэквидистантным распределением приемно-передающих радиолокационных станций.

Ключевые слова: многопозиционная радиолокационная система, суммарно-дальномерный метод, разностно-дальномерный метод, неэквидистантность, погрешность измерения.

Введение

Информация об объектах, наблюдаемых посредством радиолокационных систем, формируется в результате анализа характеристик электромагнитного поля, излучаемого или переизлучаемого лоцируемым объектом [1 – 3]. Получить данную информацию можно с помощью как однопозиционной радиолокационной станции (РЛС), так и группой разнесенных в пространстве РЛС. Рассмотрим преимущества и особенности многопозиционных радиолокационных систем (МПРЛС). В случае реализации моноимпульсной РЛС качественный показатель ее работы в общем виде характеризуется размерами зоны неопределенности обнаружения объекта, что представлено на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что при известной ширине диаграммы направленности антенны θ и дальности R до лоцируемого объекта, ширина зоны неопределенности ΔD и глубина ΔR будут определяться соотношениями:

$$\Delta D = 2R \sin\left(\frac{\theta}{2}\right); \quad (1)$$

$$\Delta R = \frac{c\tau_{\text{и}}}{4}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{и}}$ – длительность зондирующего импульса; c – скорость света.

При сканировании под углом зона неопределенности будет иметь размеры ΔX и ΔY .

Особенности построения многопозиционной радиолокационной системы

Увеличение числа приемных станций позволит уменьшить размеры зоны неопределенности. Так, на рис. 2 показана схема работы двух станций. Как видно из рис. 2, ширина диаграммы направленности антенны не имеет принципиального значения, так

как координаты цели определяются через измерения дальности, а размеры зоны неопределенности зависят от погрешности измерения дальности и от угла пересечения зон неопределенности отдельных позиций (то есть от положения цели, размера базы РЛС и длительности зондирующего импульса).

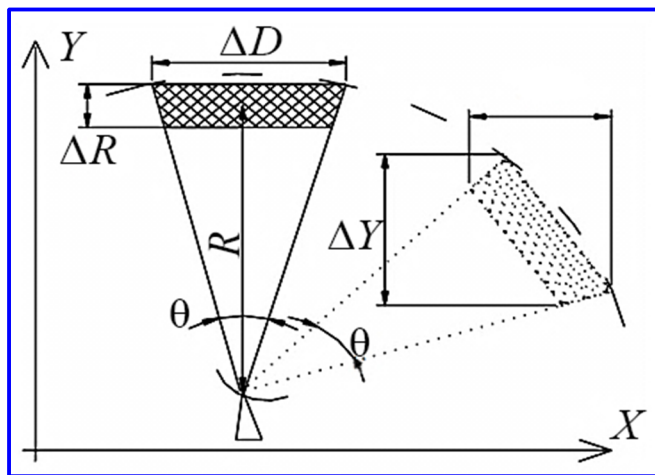


Рис. 1. Моноимпульсная радиолокационная станция

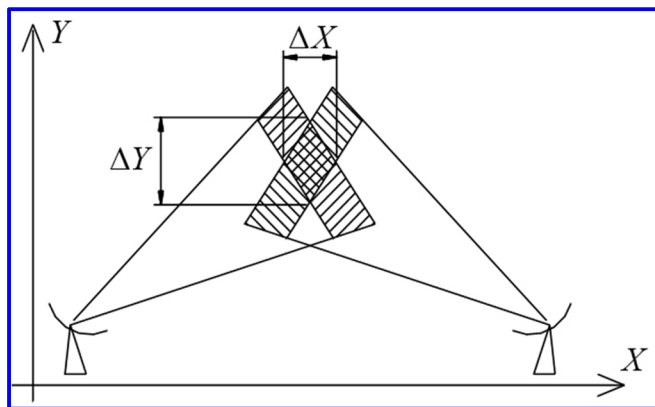


Рис. 2. Совместная работа двух моноимпульсных радиолокационных станций

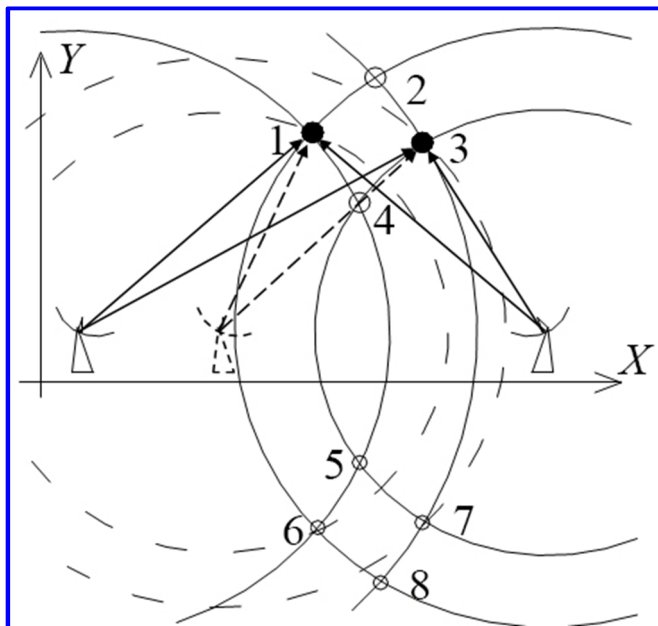


Рис. 3. Обнаружение целей в многопозиционной радиолокационной системе

При таком рассмотрении наличие направленных свойств антенны создает дополнительные сложности в виде необходимости синхронизировать позиции станций МПРЛС, направляя их на одни и те же участки пространства.

Если для моноимпульсной РЛС антенну считать всенаправленной, то зона неопределенности трансформируется в поверхность сферы заданного радиуса и толщины и пересечение двух сфер дает окружность. А при рассмотрении плоской (двумерной) задачи образуются две точки, зеркальные относительно базы МПРЛС (например, точки 1 и 6 на рис. 3).

Рост числа целей увеличивает неопределенность. Если зеркальные относительно базы МПРЛС отметки о цели (точки 5 – 8 на рис. 3) можно исключить на основании априорных знаний, то для поиска целей среди отметок 1 – 4 на рис. 3 необходимы дополнительные измерения с использованием еще одной моноимпульсной РЛС (на рис. 3 показана пунктиром). Таким образом, количество позиций МПРЛС должно превышать возможное количество целей, одновременно находящихся в зоне обзора. Обеспечить соблюдение этого условия можно как путем наращивания числа позиций, так и за счет уменьшения мгновенной зоны обзора путем применения направленных антенн. Каждое пересечение окружностей на рис. 3 соответствует «боковому лепестку» в диаграмме направленности МПРЛС. Уровень бокового лепестка пропорционален количеству окружностей, пересекающихся в данной точке и определяется по уровню 0,5. При-

менение направленных антенн позволяет снизить уровень боковых лепестков, удаленных от главного максимума на расстояние большее чем ΔD , определяемое по выражению (1).

В общем случае регистрируемая информация зависит от пространственного положения приемных позиций, а также от способа ее обработки, в частности, применяемых математических моделей.

Каждая позиция принципиально может работать со своим сигналом, но гораздо больший эффект достигается при использовании единого сигнала. Во-первых, общий сигнал можно излучать из любой точки пространства и менять координаты источника, защищая структуру МПРЛС от обнаружения. Во-вторых, можно добиться большей энергетической эффективности за счет того, что отражение от цели будет происходить под большими углами, по касательной.

Обработка единого сигнала может осуществляться двумя способами: суммарно-дальномерным и разностно-дальномерным. Однако суммарно-дальномерный способ позволяет достичь большей точности при той же длительности зондирующего импульса. При этом измеряется суммарное время распространения сигнала от передающей позиции до цели и от цели до приемной позиции:

$$\begin{cases} \tau_i = \frac{(R_{\text{прдп-ц}} + R_{\text{ц-прмп},i})}{c} \\ R_{\text{прдп-ц}}^2 = (x_{\text{прд}} - x_{\text{ц}})^2 + (y_{\text{прд}} - y_{\text{ц}})^2 + (z_{\text{прд}} - z_{\text{ц}})^2, \\ R_{\text{ц-прмп},i} = (x_i - x_{\text{ц}})^2 + (y_i - y_{\text{ц}})^2 + (z_i - z_{\text{ц}})^2 \end{cases} \quad (3)$$

где c – скорость света; $R_{\text{прдп-ц}}$ – расстояние от передающей позиции до цели; $R_{\text{ц-прмп},i}$ – расстояние от i -й приемной позиции до цели; x_i, y_i, z_i – координаты i -й приемной позиции; $x_{\text{прд}}, y_{\text{прд}}, z_{\text{прд}}$ – координаты передающей позиции; $x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}}, z_{\text{ц}}$ – координаты цели.

Оценить точность метода можно взяв частную производную от выражения (3):

$$\frac{d\tau_i}{dx_{\text{ц}}} = \frac{1}{c} \left[\frac{x_{\text{ц}} - x_{\text{прд}}}{\sqrt{(x_{\text{прд}} - x_{\text{ц}})^2 + (y_{\text{прд}} - y_{\text{ц}})^2}} + \frac{x_{\text{ц}} - x_i}{\sqrt{(x_i - x_{\text{ц}})^2 + (y_i - y_{\text{ц}})^2}} \right] \quad (4)$$

Разрешающая способность по координате x описывается выражением (5), справедливым при малых значениях $\Delta\tau$.

$$\Delta x = \Delta\tau \left| \frac{dx_{\text{ц}}}{d\tau_i} \right| \quad (5)$$

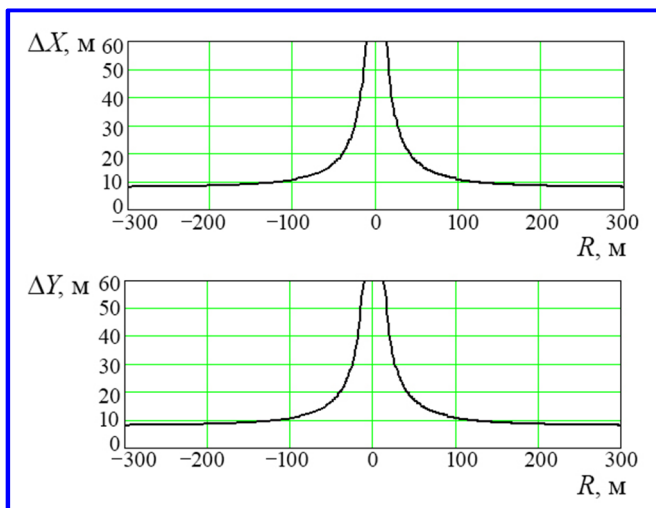


Рис. 4. Погрешность измерения дальности суммарно-дальномерным методом

Зависимость погрешности измерения дальности до цели суммарно-дальномерным методом показана на рис. 4.

На рис. 4 по оси абсцисс отложены координаты цели от центра приемно-передающей позиции, взятой для примера с базой 10 км. Видно, что при $\tau_{\text{н}} = 10^{-7}$ с максимально достижимая точность составляет 7,5 м. Однако при малых дальностях до цели погрешность Δx резко возрастает, а Δy , напротив, уменьшается. Из этой особенности следует, что позиции МПРЛС надо располагать нелинейно и неэквидистантно: должны быть пары близко расположенных позиций и удаленные позиции. Это обеспечит высокую точность определения обеих координат.

Основой МПРЛС как совокупности передающих и приемных пунктов, обеспечивающих создание радиолокационного поля с требуемыми параметрами, должны быть бистатические РЛС в составе одного и более передатчика и одного и более приемников, разнесенных в пространстве. В пассивном режиме (передатчики выключены) такая система при наличии соответствующих линий связи между приемниками способна определять координаты объектов, обладающих собственным электромагнитным излучением или переизлучающих от других источников. Проводимые в данной области за рубежом исследования и разработки направлены на повышение информативности, помехозащищенности и живучести МПРЛС за счет использования в их работе бистатических и многопозиционных режимов работы. Кроме того, такой режим обеспечивает надежное наблюдение за малозаметными воздушными целями (ВЦ), действующими в условиях радиоэлектронного и огневого подавления со стороны противника, а также пе-

реотражений от подстилающей поверхности и местных предметов. Для обеспечения повышенной скрытности работы подобных систем в боевых условиях рассматриваются различные принципы их базирования (наземного, воздушного, космического и смешанных вариантов). А в качестве зондирующего излучения могут быть использованы излучения многих иных радиотехнических систем: различных средств радиосвязи, постановщиков помех, задействованных РЛС и средств наведения, а также нетрадиционных для радиолокации источников, например, радиовещательных и телевизионных передающих станций, систем мобильной и сотовой связи, а также космических навигационных систем [4].

Принимая во внимание тот факт, что высота антенн радиовещательных и телевизионных станций может составлять более 200 метров, зона подсвета низколетящих аппаратов (вертолеты, БПЛА и др.) может достигать в поле покрытия радиусом до 70 км. Здесь следует учитывать, что на размер зоны обнаружения целей посредством МПРЛС, помимо условий радиолокационного наблюдения и энергетического потенциала, существенно влияет количество и взаимное положение передающих и приемных пунктов, также геометрия их построения. Поэтому максимальная дальность обнаружения целей в данном случае однозначно не определяется энергетическим потенциалом, как это имеет место для совмещенных РЛС. Как отмечено в [5], максимальная дальность обнаружения целей бистатической РЛС как элементарной ячейки МПРЛС определяется формой овала Кассини (линий постоянных отношений «сигнал/шум»), которому соответствует семейство изодальностных кривых или линий постоянных суммарных дальностей (эллипсов), определяющих положение цели на овале в соответствии с выражением:

$$r_2 = \frac{(r_1 + r_2)^2 - L^2}{2(r_1 + r_2 + L \sin \theta_r)}, \quad (6)$$

где L – длина линии базы (расстояние от передатчика до приемника); r_1, r_2 – дальность от передатчика до цели и от цели до приемника; θ_r – угол на цель для приемника.

Уравнение радиолокации для определения максимальной дальности действия бистатической РЛС имеет вид:

$$r_1^2 r_2^2 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_b}{(4\pi)^3 P_{\min} q k v_1 v_2}, \quad (7)$$

где P_t – мощность передатчика, Вт; G_t, G_r – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; P_{\min} – предельная чувствительность приемного устройства; k – постоянная Больцмана; ν_1, ν_2 – коэффициенты потерь при распространении радиоволн на пути от передатчика к цели и от цели к приемнику.

При этом, если МПРЛС состоит из одного передающего и нескольких приемных пунктов, то площадь зоны обнаружения существенно может превосходить площадь зоны обнаружения эквивалентной совмещенной РЛС. Следует иметь в виду, что для одной и той же цели значение эффективной площади рассеяния (ЭПР), измеренной в однопозиционной РЛС, отличается от аналогичного параметра в бистатической РЛС и при ее приближении к линии базы (линия «передатчик – приемник») наблюдается эффект резкого возрастания ЭПР, причем максимальное значение последней наблюдается при нахождении цели на линии базы и определяется согласно выражению:

$$\sigma_b = 4\pi(A^2/\lambda^2), \quad (8)$$

где A – площадь поперечного сечения цели, перпендикулярная направлению распространения радиоволн; λ – длина волны.

Названный эффект весьма важен в современных условиях, когда в больших масштабах применяются беспилотные летательные аппараты малоразмерных классов или в случае перехвата таких целей, как ракеты РСЗО или даже артиллерийские снаряды больших калибров.

Радиосигналы с точки зрения их использования в МПРЛС характеризуются функцией неопределенности (время-частотной функцией рассогласования или так называемым телом неопределенности). Эта функция определяет разрешающую способность системы МПРЛС по времени запаздывания, характеризующей дальность, и по частоте Доплера, характеризующей радиальную скорость. Функция неопределенности в общем случае описывается следующим выражением:

$$|\chi(\tau, \nu)|^2 = \left| \int u(x)u^*(x + \tau) \exp(-j2\pi\nu x) dx \right|^2. \quad (9)$$

Создание МПРЛС сопряжено со сложностью математического моделирования их работы, обусловленной функцией неопределенности сигналов, используемых в качестве «подсветки» целей. Так, например, функция неопределенности телевизионного сигнала имеет многопиковый характер, обусловленный его структурой – кадровой и строчной

разверткой. И хотя непрерывный характер телевизионного сигнала позволяет осуществлять частотную селекцию эхо-сигналов с высокой точностью, наличие в нем периодичности кадров приводит к появлению мешающих составляющих в его функции рассогласования, что обязательно придется учитывать при математическом моделировании. Так, изменение средней яркости передаваемого телевизионного изображения обуславливает необходимость учета изменения как средней мощности излучения, так и изменения уровня главного и боковых пиков его время-частотной функции рассогласования. Важным достоинством телевизионного сигнала звукового сопровождения и частотно-модулированных сигналов УКВ-радиовещания является однопиковый характер их тел неопределенности, что облегчает интерпретацию эхо-сигналов как по времени запаздывания, так и по частоте Доплера. Однако их нестационарность по ширине спектра оказывает сильное влияние на форму и ширину центрального пика функций неопределенности.

Заключение

В настоящее время в мировой практике пока не накоплен в достаточной мере опыт использования подобных сигналов в традиционном применении для задач радиолокации и продолжают исследования в целях повышения разрешающей способности и точности определения координат объектов локации. Однако признано, что комплексная обработка в реальном масштабе времени от различных разнотипных излучающих средств сигналов, отраженных от целей и одновременно принимаемых в нескольких пунктах приема, позволяют обеспечивать требуемые точностные характеристики МПРЛС в целом. Кроме того, особенностью МПРЛС с внешними источниками подсвета ВЦ является наличие мощных прямых (проникающих) сигналов передатчиков, уровень которых может на 40 – 90 дБ превышать уровень сигналов [5], отраженных от целей. Для снижения мешающего влияния проникающих сигналов передатчиков и переотражений от подстилающей поверхности и местных предметов с целью расширения зоны обнаружения необходимо при разработке математических моделей учитывать необходимость:

- пространственной режекции мешающих сигналов;
- автокомпенсации с частотно-селективной обратной связью на высокой и промежуточной частоте;
- подавление сигналов на частотах, не несущих информацию (например, на видеочастоте и др.).

Для решения такого рода задач требуется со-

вершенствование математических моделей для описания функционирования МПРЛС с использованием адаптивных алгоритмов цифровой обработки данных и применение высокопроизводительных вычислительных средств. Кроме того, математическое моделирование МПРЛС должно учитывать необходимость объединения видов поступающей информации:

– когерентное объединение (наивысший уровень объединения);

– объединение траекторий (низший уровень объединения).

Показана возможность разнесения энергетической и информационной составляющих в МПРЛС, возможность комплексирования с другими радиотехническими системами – телевидения, содовой связи и др.

Литература

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов [и др.]. – Москва : Радиотехника, 2010. – 676 с. : ил. – (Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности).

2. Автоматизированные информационные системы: Методы построения и исследования / А. П. Реутов, М. В. Черняков, С. Н. Замуруев. – Москва : Радиотехника, 2010. – 324 с. : ил.

3. Zamuruev S. N. In laboratory hardware emulation of radiofrequency propagation / S. N. Zamuruev, A. A. Sudakov, K. V. Avdeev // Conference Proceedings – 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW. – 2021. – P. 301–307. – DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494025.

4. Патент на изобретение РФ № 2730184 С1, МПК G01S 13/87 (2006.01), H04B 7/26 (2006.01). Многопозиционная радиолокационная система : № 2019136237 : заявл. 11.11.2019 : опублик. 19.08.2020 / Быков А. В. – Бюл. № 23. – 13 с.

5. Аношкин И. М. Зарубежные многопозиционные радиолокационные системы скрытного контроля воздушного пространства / И. М. Аношкин // Наука и военная безопасность. – 2007. – № 1. – С. 28–33.

Поступила в редакцию 05.12.2022

*Ольга Викторовна Семёнова, аспирант, ассистент кафедры РЭСК, e-mail: semyonova@mirea.ru.
Сергей Николаевич Замуруев, доктор технических наук, заведующий кафедрой РЭСК,
e-mail: zamuruevsn@mail.ru.
Т. (499) 215-65-65.*

(МИРЭА – Российский технологический университет).

MODELING OF A MULTI-POSITION RADAR SYSTEM WITH A NON-EQUIDISTANT DISTRIBUTION OF TRANSCIVER RADARS

O. V. Semyonova, S. N. Zamuruev

Currently, special attention is paid to multi-position radar stations (MPRLS), consisting of one transmitting and one or more receiving stations. Thus the registered information will depend on a spatial position of receiving stations and a way of its processing, in particular, applied mathematical models. Processing of a single signal can be carried out both by total-dimensional and difference-dimensional methods. The creation of MPRLS is associated with the complexity of mathematical modeling of their work, due to the uncertainty function of the signals used as "illumination" targets. This work considers the issues of modeling a multi-position radar system with non-equidistant distribution of receiving and transmitting radars.

Keywords: multi-position radar station, total-distance method, difference-distance method, non-equidistance, measurement error.

References

1. Radar systems for space-based land surveying / V. S. Verba, L. B. Neronskij, I. G. Osipov [et al.]. – Moscow : Radio engineering, 2010. – 676 p.: silt. – (Air, space and earth surface monitoring systems).

2. Automated information systems: Methods of construction and research / A. P. Reutov, M. V. Chernyakov, S. N. Zamuruev. – Moscow : Radio engineering, 2010. – 324 p. : silt.

3. Zamuruev S. N. In laboratory hardware emulation of radiofrequency propagation / S. N. Zamuruev, A. A. Sudakov, K. V. Avdeev // Conference Proceedings – 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW. – 2021. – P. 301–307. – DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494025.

4. Patent for the invention of the Russian Federation No. 2730184 C1, IPC G01S 13/87 (2006.01), H04B 7/26 (2006.01). Multi-position radar system : № 2019136237 : application 11.11.2019 : published on 19.08.2020 / Bykov A. V. – Bulletin No. 23. – 13 p.

5. Anoshkin I. M. Foreign multi-position radar systems for covert airspace control // Science and Military Security. – 2007. – No. 1. – P. 28–33.

*Olga Viktorovna Semyonova, Assistant at the Department of RSC, e-mail: semyonova@mirea.ru.
Sergey Nikolaevich Zamuruev, Head of Department of RSC, e-mail: zamuruevsn@mail.ru.
Tel. (499) 215-65-65.*

(MIREA – Russian Technological University).