

Анализ одностанционной системы пассивного позиционирования с длинной базовой линией

А.Ю. Унгер

МИРЭА - Российский технологический университет, Москва

Аннотация: В этой статье подвергнута анализу проблема определения местоположения объекта, основанного на методе пассивного позиционирования одностанционных систем с длинной базовой линией. Метод, который предложен в статье, подразумевает, что антенная решетка встроена в одностанционную систему с длинной базовой линией с помощью трех антенн. Упомянутый метод способен определить фактическое местоположение объекта излучения и параметры положения объекта с помощью оценки разности фаз и фактического направления объекта излучения. Результаты моделирования подтверждают обоснованность предложенного метода.

Ключевые слова: антенная решетка, пассивная система позиционирования, разность фаз, пеленгация, азимут, погрешность.

Введение

Технология пассивного позиционирования — это технология, которая использует электромагнитные волны, излучаемые объектом, для определения его местоположения. Благодаря этому такая технология позиционирования имеет более высокую дальность действия, чем активная, т.к. она принимает прямые волны от объекта излучения, при этом величина принимаемого сигнала обратно пропорциональна квадрату расстояния. Пассивные системы позиционирования можно разделить на два типа: многостанционные системы и одностанционные системы. Многостанционная система пассивного позиционирования состоит из нескольких пространственно разнесенных станций наблюдения, которые одновременно принимают и обрабатывают сигналы источников излучения, при этом происходит совместное взаимодействие нескольких станций наблюдения и передача большого объема данных [1]. Практическая реализация многостанционной системы пассивного позиционирования довольно сложна, так как реализация такой системы занимает большую площадь и увеличивает себестоимость затрат, поэтому реализация одностанционных систем пассивного позиционирования

является более приоритетной, ввиду более простой конструкции и уменьшенных затрат. Современные тенденции таковы, что из-за повышения точности определения пространственных координат и вероятности обнаружения объектов, выходит на первый план технология пассивного позиционирования, основанная на основе измерения разности фаз. При этом одностанционная система пассивного позиционирования с длинной базой использует антенную решетку с базовой длиной от десятков до сотен метров для обнаружения и идентификации сигналов источников излучения [2]. В то же время вычисление параметров положения объекта источника излучения опирается на параметры разности фаз антенной решетки, используя для этого модель измерения сферического волнового фронта. Учитывая пассивное позиционирование одностанционной системы, в данной статье рассмотрим метод быстрого пассивного позиционирования одностанционной системы с длинной базовой линией. Этот метод позволяет достичь пассивного позиционирования объекта за один импульс, что дает масштабные возможности в определении местоположения объекта.

Принцип позиционирования с короткой базовой линией

Система позиционирования с короткой базовой линией определяет местоположение источника излучения путем измерения разности фаз наземной антенны. При нормальных обстоятельствах, погрешность измерения разности фаз преобразуется в разницу во времени, составляющую всего лишь несколько пикосекунд или несколько десятков пикосекунд, что намного меньше, чем погрешность разницы во времени в десятки наносекунд в системе позиционирования с разницей во времени на длинной базовой линии, которая способна обеспечить точное позиционирование объекта на большом расстоянии при более короткой базовой линии [3]. При измерении разности фаз существует много периодов неоднозначности, при этом для устранения периодов неоднозначности используют комбинацию длинных и

коротких базовых линий, а для этого требуется большое количество антенн. Для того чтобы уменьшить количество антенн, спроектирована длинная антенная решетка со специфической конфигурацией, которая приведена на рисунке 1. При этом вся длина апертуры антенны равна $2d$, расстояние от объекта до обоих концов антенны определяется, как r_1 и r_2 , а расстояние до центра антенны равно r , угол обзора α от объекта до обоих концов антенны, который соответствует параметру разности фаз, а азимут объекта к центру антенны равен β .

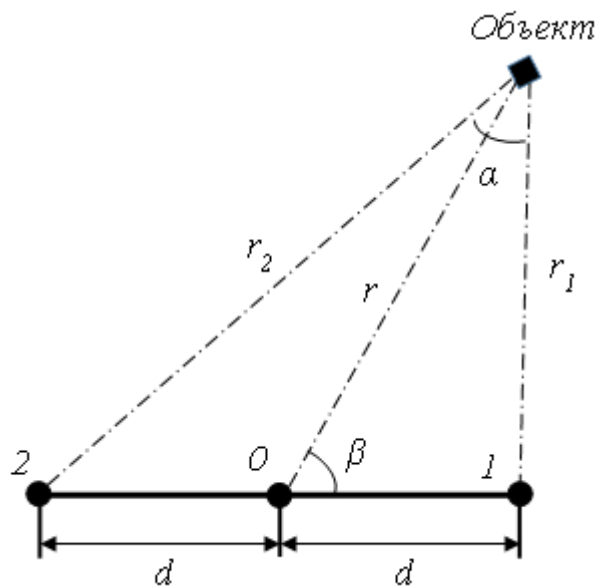


Рис. 1. – Взаимосвязь антенны и объекта излучения

Поскольку расстояние до объекта намного больше, чем длина апертуры антенны, угол обзора α очень мал, и соответствующая разность фаз имеет несколько периодов неоднозначности, поэтому, используя тригонометрическое соотношение треугольника, получаем:

$$r^2 + d^2 - 2rd \cos \beta = r_1^2, \quad (1)$$

$$r^2 + d^2 + 2rd \cos \beta = r_2^2, \quad (2)$$

Следовательно, предположим, что сигналы, которые были приняты на обоих концах антенны и в центре антенны, равны s_1 , s_2 и s_0 , то формула измерения разности фаз между видимыми углами имеет вид:

$$\varphi = \arg \left[s_1 \times (s_0^*)^2 \times s_2 \right], \quad (3)$$

При этом уравнение дальности для разности фаз между углом обзора объекта излучения равна:

$$r \approx \frac{\pi d^2 \sin^2 \beta}{2\lambda\varphi}, \quad (4)$$

где λ - длина волны сигнала.

В тоже время конкретные координаты (x_t, y_t) объекта могут быть получены из:

$$x_t = x_0 + r \sin \beta, \quad y_t = y_0 + r \cos \beta, \quad (5)$$

где: (x_0, y_0) координаты центра антенны.

Анализ погрешностей измерения дальности

Требования, которые предъявляются к одностанционным системам позиционирования для точного определения дальности в границах 100-метрового диапазона, полностью удовлетворяет уравнению (4). Таким образом, анализируя формулу определения дальности [4], приходим к выводу, что погрешность определения дальности появляется главным образом из-за фазовой погрешности $\delta\varphi$ и угловой погрешности $\delta\beta$, при этом погрешность шага решетки δd приведет к некоторому смещению диапазона определения дальности, поэтому формула распространения ошибки имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta r &= -\frac{2\pi d^2 \sin^2 \beta}{\lambda\varphi^2} \times \delta\varphi + \frac{4\pi d^2 \sin \beta \cos \beta}{\lambda\varphi} \times \delta\beta + \frac{4\pi d \sin^2 \beta}{\lambda\varphi} \times \delta d = \\ &= -\frac{\lambda r^2}{2\pi d^2 \sin^2 \beta} \times \delta\varphi + \frac{2r \cos \beta}{\sin \beta} \times \delta\beta + \frac{2r}{d} \times \delta d \end{aligned} \quad (6)$$

При этом погрешность шага решетки δd является фиксированной величиной и контролируется до миллиметрового уровня с помощью современного оборудования. Отсюда получается, что для интерферометров с

длинной базовой линией и с шагом в несколько десятков или сотен метров относительная погрешность измерения дальности δd будет меньше одной десятитысячной. Таким образом, эффект от δd настолько мал, что на практике им можно пренебречь. На самом деле, эффект δd является в основном систематической ошибкой, которая появляется при измерении фазы.

Этапы построения одностанционной системы пассивного позиционирования

Конкретные этапы реализации процесса одностанционной системы пассивного позиционирования для всей системы с длинной базовой линией следующие [5]:

1. С помощью высокоточного измерительного оборудования производят точные измерения апертуры антенны наземной длинной базовой решетки для получения длины d апертуры антенны;

2. Для достижения точной ориентации объекта излучения и получения направления объекта β используется измерение решетки в центре базовой линии антенны;

3. Сигналы s_1 и s_2 , принятые антеннами на обоих концах длинной базовой линии, обрабатываются согласованно с сигналом s_0 , который принят центральной антенной, а затем вычисляется разность фаз между видимым

углом:
$$\varphi = \arg \left[s_1 \times (s_0^*)^2 \times s_2 \right];$$

4. Расстояние объекта излучения от центра длинной наземной базовой линии оценивается с помощью формулы дальности $r \approx \frac{\pi d^2 \sin^2 \beta}{2\lambda \varphi}$ для разности фаз видимого угла объекта излучения;

5. После решения задачи определения расстояния от центра антенны на основе измерений направленности объекта излучения можно вычислить координаты расстояния до объекта.

Этот метод позволяет мгновенно получить координаты объекта излучения и подходит для быстрого пассивного позиционирования радиолокационных целей на местности [6]. Состав проектируемой одностанционной системы позиционирования на длинной базовой линии показан на рисунке 2.

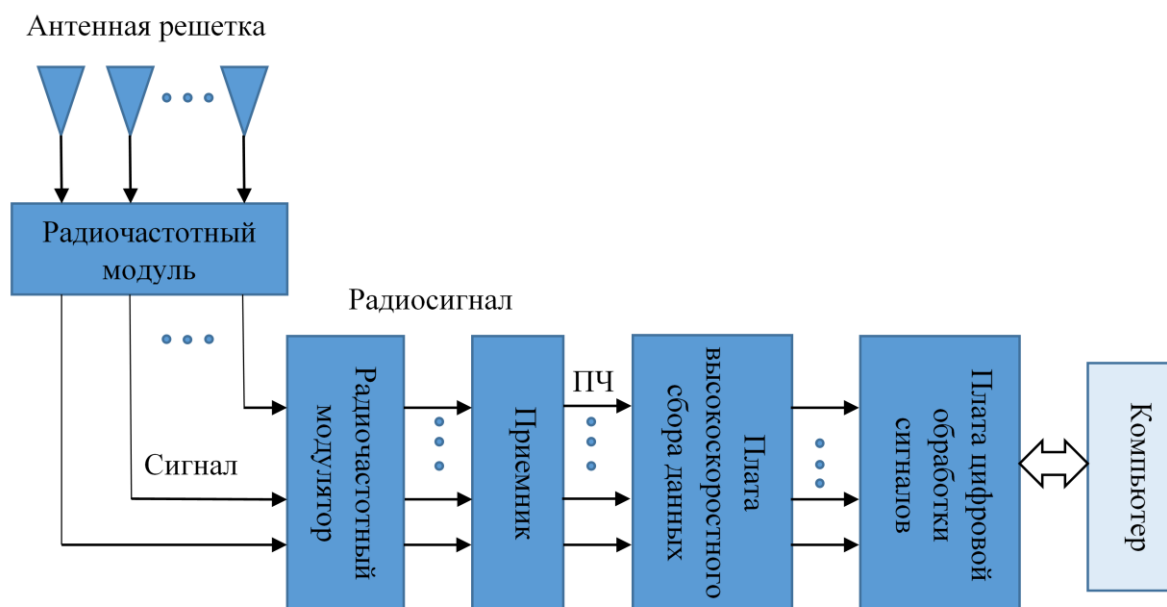


Рис. 2. – Общая архитектура наземного пассивного позиционирования с длинной базовой линией

Антенная решетка состоит из интерферометра горизонтальной дальности и массива направленных антенных подрешеток. Интерферометр горизонтальной дальности состоит из трех антенных решеток, размещенных в двух крайних точках антенной апертуры и в центре для пассивного определения дальности источника излучения; а высокоточная направленная решетка используется для измерения азимута источника излучения. Для передачи радиочастотных сигналов, между антенной, решеткой и

приемником используется линия передачи микроволнового оптического волокна: сигнал, принятый антенной, сначала фильтруется, усиливается, электрически и оптически модулируется, затем преобразуется в оптический сигнал и передается по оптическому волокну на процессор обработки сигналов [7]. В центре обработки оптический сигнал преобразуется в радиочастотный сигнал посредством оптической и электрической демодуляции и подается в многоканальный приемник для обработки. Сигнальный процессор состоит из радиочастотного приемника, платы высокоскоростного сбора данных и платы цифровой обработки сигналов. Многоканальный радиочастотный приемник использует унифицированный локальный генератор для понижающего преобразования радиочастотного сигнала в промежуточную частоту, а многоканальная плата синхронного сбора данных преобразует промежуточную частоту в аналоговую и цифровую для получения цифрового сигнала промежуточной частоты, плата же цифровой обработки сигнала выполняет обнаружение сигнала, измерение параметров и расчет позиционирования, а результаты обработки отображаются и сохраняются в терминальном ПК.

По сравнению с многостанционными методами позиционирования по разнице во времени (расстояние между станциями составляет более 10 км), базовая линия обычно составляет от 100 м до нескольких сотен метров [8]. Массив обладает высокой адаптивностью, простотой установки и развертывания, быстрым позиционированием, высокой точностью, одноимпульсным позиционированием и адаптивностью к формам сигналов по сравнению с традиционным массовым кинематическим одностанционным пассивным позиционированием; кроме того, этот метод не имеет проблем с общим видом объекта излучения и проблем неоднозначности с высокочастотным размытием, и подходит для объектов с узконаправленными антеннами и объектов с высокой частотой повторения.

Результаты моделирования

Для этапа моделирования был принят X -диапазон от 10 до 15 ГГц. При этом нужно учесть [9], что антенны настроены с точностью дальности 10 см., с точностью пеленгации не более $0,5^\circ$, а погрешность измерения разности фаз сигнала между антеннами составляет не более 10° . Для моделирования используется радар воздушного базирования с типичной длиной волны 0,033 м., объект излучения расположен в 200 км от центра наземной антенной решетки под углом 70° к нормали антенной решетки. На рисунках 3 и 4 (а) показаны результаты пассивного позиционирования объекта ошибки позиционирования с использованием предложенного метода, где точность измерения фазы составляет 10° , а точности пеленгации – $0,5^\circ$. Для достижения высокой точности позиционирования было проведено около 200 экспериментов Монте-Карло на всей длине базовой линии [10].

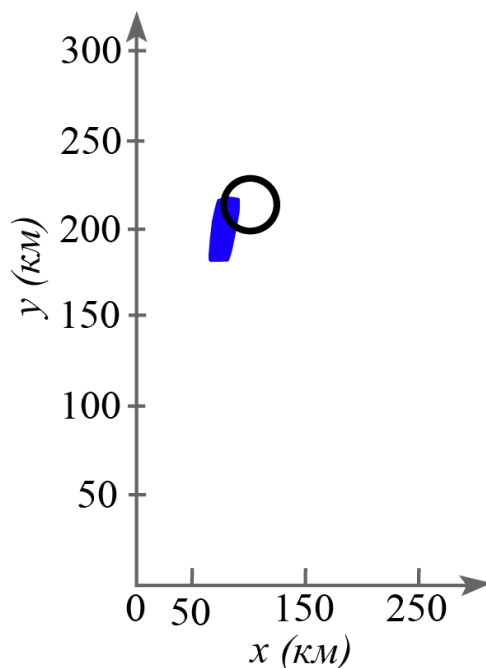


Рис. 3. – Результат позиционирования объекта излучения

На рисунке 4(а) показана вероятность круговой ошибки объекта, которая, составляет около 3% от расстояния до объекта. Для дальнейшей проверки взаимосвязи между предлагаемым наземным пассивным позиционированием

и точностью измерения фазы сигналов между антеннами и точностью пеленгации, результаты которого показаны на рисунке 4(б) для точности измерения фазы не более 5° и точности пеленгации - $0,5^\circ$. На рисунке 4(в) показаны результаты моделирования пассивного позиционирования с точностью измерения фазы - 5° и точностью пеленгации - $0,2^\circ$.

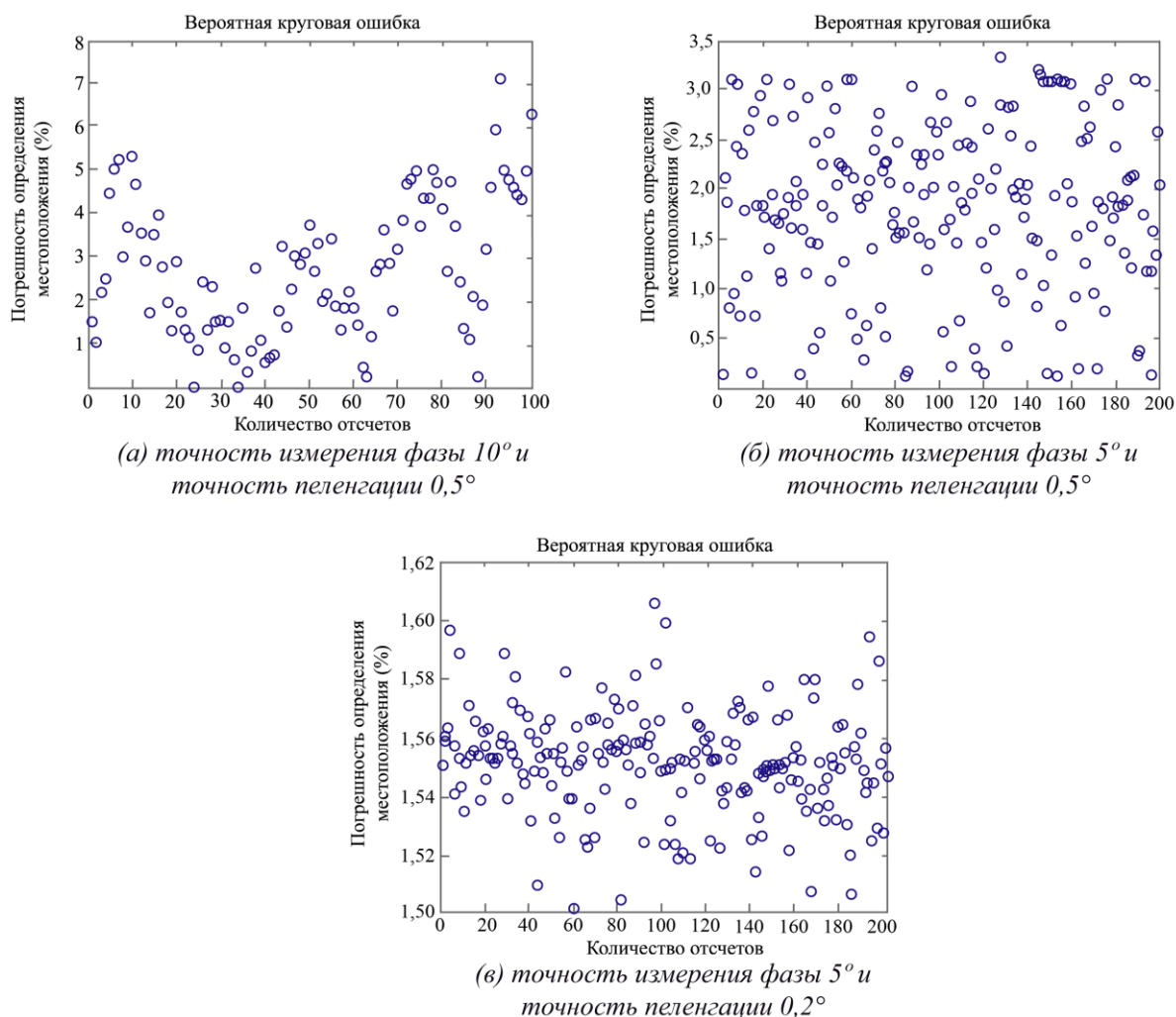


Рис. 4. – Результаты ошибки позиционирования объекта излучения

Из результатов моделирования можно увидеть, что, с увеличением точности фазы и точности пеленгации объекта излучения, может быть улучшена точность позиционирования, а поскольку ошибка пеленгации представляет собой случайную характеристику, то наблюдается определенное сближение в точности позиционирования при увеличении

результатов до 200 испытаний. Согласно уравнению (6), распределение ошибки позиционирования объекта моделируется для точности измерения фазы 5° и точности пеленгования $0,5^\circ$. Результаты такого моделирования показаны на рисунке 5.

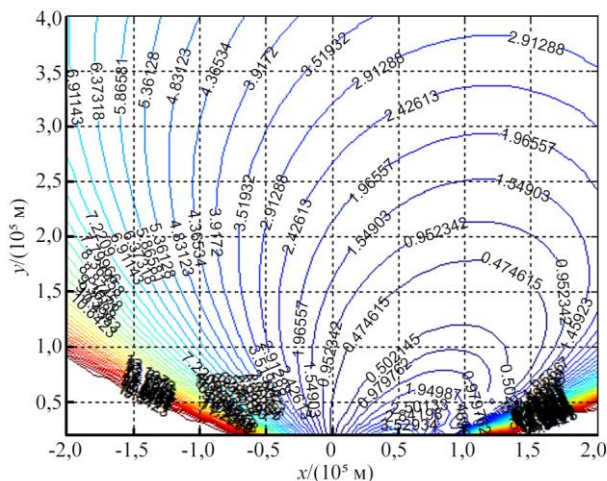


Рис. 5. – Контуры ошибок позиционирования объекта излучения

Как видно из рисунка 5, по мере увеличения расстояния до объекта контуры ошибки дальности быстро становятся плотнее, а ошибка дальности становится больше. В то же время, по мере отклонения азимута объекта от нормального направления антенны, контурная линия ошибки определения дальности постепенно становится плотной, и дальность не может быть эффективно измерена в базовом направлении. Можно видеть, что эффективная площадь действия системы лежит в пределах угла примерно 60° по обе стороны от нормали антенной решетки.

Заключение

С учетом потребностей пассивного позиционирования, предложен метод быстрого пассивного позиционирования наземной одностанционной антенной решетки с длинной базовой линией. Метод предусматривает размещение антенных решеток в системе длинных базовых линий и использует принцип, согласно которому кажущийся угол объекта излучения

к двум концам длинной базовой линии подразумевается параметром разности фаз, и оценивает изменение угла по разности фаз кажущегося угла. Этот метод определяет местоположение источника излучения путем измерения разности фаз наземной антенны. При нормальных обстоятельствах погрешность измерения разности фаз обычно преобразуется в разницу во времени, которая составляет всего несколько пикосекунд или десятков пикосекунд, что намного меньше, чем ошибка разности времени в десятки наносекунд в системе позиционирования с длинной базовой линией. Таким образом, можно достичь более точного позиционирования дальних объектов при более коротких исходных условиях, что является важным направлением развития в области пассивного позиционирования.

Литература

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Москва: Радиотехника, 2004. С.10-37.
2. Griffiths H.D., Baker C.J. An Introduction to Passive Radar. London, Artech House, 2017. PP.129-143.
3. Ключко В.К., Смирнов С.А. Алгоритм траекторного сопровождения объектов пассивной системой позиционирования // Компьютерная оптика, 2020. Т.44, №2. С. 244-251.
4. Mervin C. Budge, Jr. Shawn R. German Basic Radar Analysis Artech House, Norwood, 2015. PP.327-371.
5. Villano Michelangelo, Colone Fabiola, Lombardo Pierfrancesco Antenna Array for Passive Radar: Configuration Design and Adaptive Approaches to Disturbance Cancellation // International Journal of Antennas and Propagation, 2013. № 920639. URL: downloads.hindawi.com/journals/ijap/2013/920639.pdf
6. Giusti Elisa, Samczynski Piotr, Jarabo-Amores Maria-Pilar, Capria Amerigo Recent Advances in Array Antenna and Array Signal Processing for Radar //

International Journal of Antennas and Propagation, 2018. № 6195704. URL: downloads.hindawi.com/journals/ijap/2018/6195704.pdf

7. Hu Hang, Nickel Ulrich, Kulpa Krzysztof Advances in Antenna Array Processing for Radar // International Journal of Antennas and Propagation, 2013. № 416096. URL: downloads.hindawi.com/journals/ijap/2013/416096.pdf

8. Манжула В.Г., С.Г. Крутччинский С.Г., Савенко А.В., Воронин В.В. Интерферометрический интерфейс системы определения относительных координат радиоизлучающих объектов // Инженерный вестник Дона, 2012, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1027.

9. Воропай М.Н., Иванов С.В. Синтез структуры и реализация радиоприемного устройства в диапазоне частот 0,02... 18,00 ГГц для комплексов радиомониторинга // Инженерный вестник Дона, 2010, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2010/194.

10. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. Москва: Наука, 1973. С.224-229.

References

1. Bakulev P.A. Radiolokacionnye sistemy [Radar systems]. Moskva: Radiotekhnika, 2004. PP.10-37.

2. Griffiths H.D., Baker C.J. An Introduction to Passive Radar. London, Artech House, 2017. PP.71-89.

3. Klochko V.K., Smirnov S.A. Komp'yuternaja optika, 2020, T.44, №2. PP. 244-251.

4. Mervin C. Budge, Jr. Shawn R. German Basic Radar Analysis Artech House, Norwood, 2015. PP.49-63.

5. Villano Michelangelo, Colone Fabiola, Lombardo Pierfrancesco International Journal of Antennas and Propagation, 2013. № 920639. URL: downloads.hindawi.com/journals/ijap/2013/920639.pdf



6. Giusti Elisa, Samczynski Piotr, Jarabo-Amores Maria-Pilar, Capria Amerigo International Journal of Antennas and Propagation, 2018. № 6195704. URL: downloads.hindawi.com/journals/ijap/2018/6195704.pdf
7. Hu Hang, Nickel Ulrich, Kulpa Krzysztof International Journal of Antennas and Propagation, 2013. № 416096. URL: downloads.hindawi.com/journals/ijap/2013/416096.pdf
8. Manzhula V.G., S.G. Krutchinskij S.G., Savenko A.V., Voronin V.V., Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1027.
9. Voropaj M.N., Ivanov S.V., Inzhenernyj vestnik Dona, 2010, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2010/194.
10. Sobol' I.M. Chislennye metody Monte-Karlo [Monte Carlo Numerical Methods]. Moskva: Nauka, 1973. PP.224-229.