

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.2>

УДК: 621.396.663

СИСТЕМА МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА МАЛОГАБАРИТНЫХ МОБИЛЬНЫХ ПЛАТФОРМАХ

Е.А. Макарецкий, А.В. Овчинников, А.С. Гублин

**Тулский государственный университет
300012 Россия, г. Тула, пр. Ленина 92**

Статья поступила в редакцию 15 мая 2024 г.

Аннотация. Проведен анализ методов построения системы местоопределения источников радиоизлучения, размещенной на малогабаритных мобильных платформах. Разработана структурная схема системы пеленгации, произведены оценки зависимостей погрешности измерения угла пеленга и местоопределения координат источника излучения для различных частот радиоизлучения. Предложен метод двухэтапной пеленгации, при котором на первом этапе производится грубое пеленгование амплитудным методом, а на втором – фазовым методом.

Ключевые слова: системы местоопределения, пеленгация источников радиоизлучения, мобильные платформы.

Финансирование: Работы проводились при финансовой поддержке гранта Правительства Тульской области №ДС/120/РЭ/23/ТО

Автор для переписки: Макарецкий Евгений Александрович,
makaretsky@mail.ru

Введение

Сложность решения задачи разработки систем пеленгации и местоопределения ИРИ с помощью ММП зависит от размеров и грузоподъемности платформ. На мобильных платформах среднего и большого размера могут быть размещены пеленгационные антенны больших размеров и аппаратура обработки, но стоимость таких аппаратов высока и количество их ограничено. В то же время очень широкое распространение получили микро и мини ММП, отличающиеся низкой стоимостью и высокой серийностью выпуска. Их основным недостатком для целей пеленгации ИРИ являются небольшие размеры и малая грузоподъемность, затрудняющая размещение на них антенн и блока обработки.

Целью работы является оценка возможностей системы местоопределения источников излучения на основе ММП.

1. Разработка концепции системы местоопределения на малогабаритных ММП

Концепция системы местоопределения на малогабаритных ММП должна включать выбор метода местоопределения и определение структуры системы.

Как известно [4], местоопределение ИРИ может производиться дальномерным, разностно-дальномерным, дальномерно-пеленгационным, пеленгационным методами. Учитывая необходимость использования пассивного режима (для обеспечения скрытности системы), а также габаритные и весовые ограничения целесообразно использовать пеленгационный метод с последующим местоопределением триангуляционным методом. При этом в совокупности оценок пеленгов из разных точек пространства теряется значительная часть информации о принимаемом сигнале, в частности, о взаимной корреляции принимаемых в этих точках сигналах от ИРИ. Учет такой информации может существенно повысить точность местоопределения, но требует точной общей синхронизации системы

пеленгационных ММП и обеспечения учета большого числа временных задержек сигналов при их распространении. В конечном счете, это приводит к значительному усложнению системы.

При использовании пеленгационного метода требуется несколько пеленгаторов, расположенных в различных точках пространства. Учитывая небольшой диапазон изменения вертикальных перемещений ММП (как правило, 100...200 м, что достаточно для обеспечения сложности их визуального и акустического обнаружения, а также возможности обнаружения ИРИ на дистанциях до 50 км), задача пеленгации может рассматриваться как двумерная (азимутальная).

Частотный диапазон работы пеленгатора ИРИ определяется диапазонами, в которых осуществляется связь (управление) ММП и передача видеoinформации. В настоящее время наибольшее распространение получили следующие диапазоны, в которых возможна постройка помех (таблица 1).

Таблица 1. Частотные диапазоны управления и передачи данных ММП.

		Каналы связи и управления		Каналы спутниковых навигационных систем		Каналы передачи данных	
Частота, МГц	430-436	863-870	1575-1602	2400-2495	3550-3700	5160-5340	5600-5975

Как следует из таблицы, пеленгация в общем случае должна производиться в очень широком диапазоне частот, что существенно усложняет создание и размещение пеленгационных антенн на малогабаритных ММП. Выход может состоять в использовании частотно-независимых антенн или размещении антенн на нескольких ММП.

Для осуществления пеленгации на ММП должны быть размещены пеленгационная антенна, сканирующий радиоприемник и блок обработки (рисунок 1).

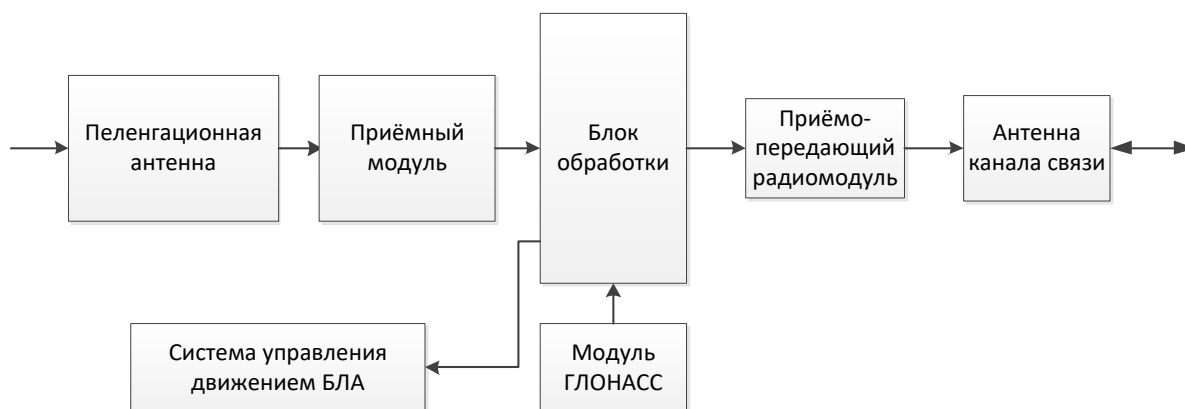


Рис. 1. Структурная схема пеленгатора на ММП.

Определение координат расположения ММП производится модулем ГЛОНАСС, а связь с пунктом управления осуществляется приемно-передатчиком и антенной канала связи.

2. Выбор методики пеленгации ИРИ

Как известно [5], пеленгация источников излучения может производиться различными методами: амплитудным, равносигнальным, фазовым, многоканальным (моноимпульсным).

При выборе методики пеленгации необходимо в первую очередь учитывать ограничения антенной системы по размерам. Для микро и мини ММП максимальный размер антенны (или базы фазометра) могут составлять не более 100...200 мм. Оценки погрешности измерения угла (среднеквадратическое отклонение) могут быть определены по соотношениям [5], рис.2:

$$\text{- амплитудный метод измерения } \sigma_{\theta}^a = \frac{\lambda}{D\sqrt{\pi q}};$$

$$\text{- равносигнальный метод } \sigma_{\theta}^p = \frac{\lambda}{D\sqrt{q}};$$

$$\text{- фазовый метод } \sigma_{\theta}^{\phi} = \frac{\lambda}{2D\pi \cos \alpha \sqrt{q}};$$

$$\text{- моноимпульсный метод } \sigma_{\theta}^m = \frac{\lambda}{2\pi D\sqrt{q}},$$

где q – отношение сигнал-шум; D – размер антенны (или база фазометра);
 λ – длина волны излучения; α – направление на ИРИ от нормали к базе.

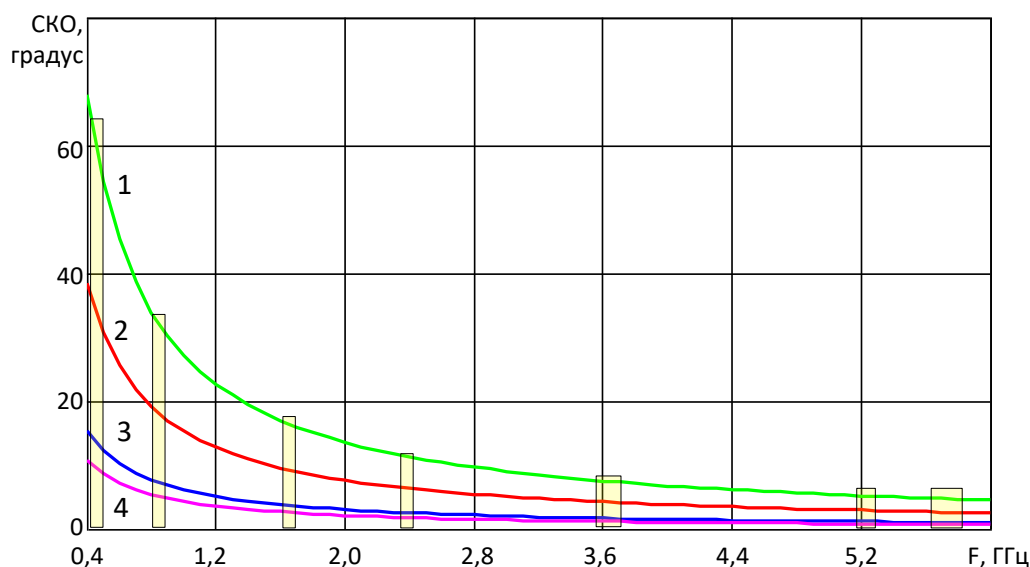


Рис. 2. Оценка СКО погрешности измерения угла пеленгаторами различных типов для $D = 200$ мм (1 – равносигнальный метод; 2 – амплитудный; 3 – фазовый; 4 – многоканальный); прямоугольники показывают расположение частотных диапазонов.

Приведенные графики позволяют сделать следующие выводы:

- СКО погрешности измерения угла пеленга очень сильно изменяются в диапазоне частот, в низкочастотной части диапазона измерения отличаются крайне низкой точностью;
- данные показывают несомненное преимущество фазового метода (фазо-фазовый моноимпульсный измеритель так же является разновидностью фазового метода).

Однако фазовый метод имеет существенный недостаток – узкий диапазон углов пеленгации и неоднозначность измерений в широком диапазоне углов. Поэтому предлагается использовать двухступенчатую методику пеленгации. Пеленгационная система строится по моноимпульсному суммарно-разностному принципу (рис. 3): на первом этапе производится грубая пеленгация амплитудным методом при синфазном включении двух антенн, расположенных на ММП, а на втором – точная пеленгация пеленгационной характеристикой разностного канала.

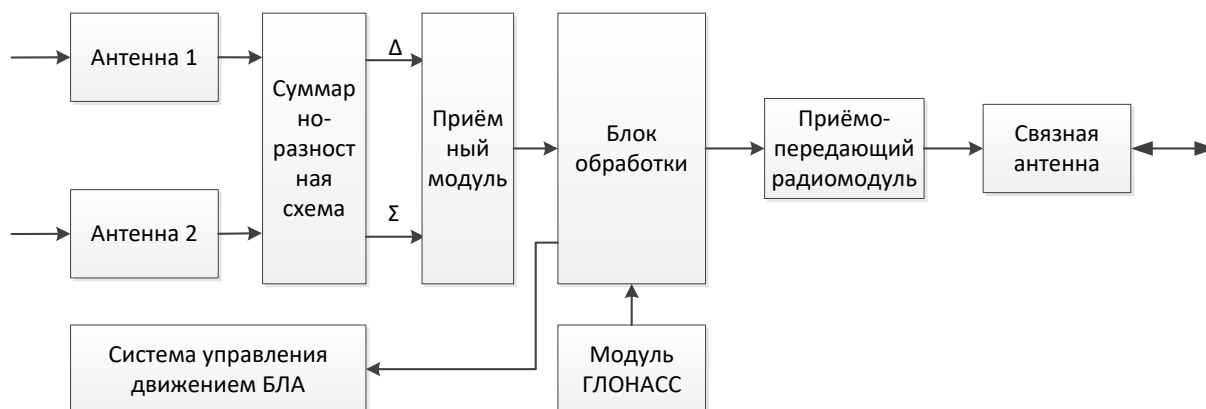


Рис. 3. Структурная схема пеленгатора.

3. Анализ характеристик системы местоопределения

При использовании пеленгационного метода определение азимутальных координат ИРИ производится на основе решения задачи триангуляции на плоскости (рис. 4) [6].

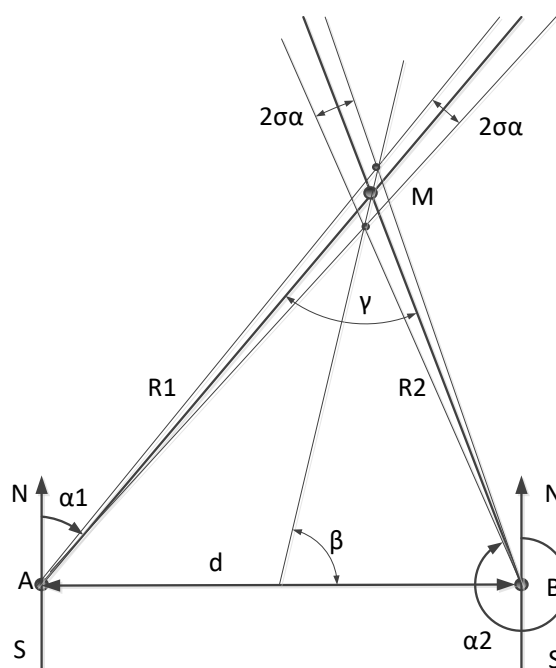


Рис. 4. Схема местоопределения по двум пеленгам.

Погрешности измерения пеленгов на цель неизбежно приводят к появлению погрешностей местоопределения (ошибки места). Размеры полуосей эллипса ошибок заданной вероятности при отсутствии корреляции измерений пеленгов будут равны [4]:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{4\sigma_1^2 \sigma_2^2 w^2}{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}}}{\sqrt{1 - \sqrt{1 - \frac{4\sigma_1^2 \sigma_2^2 \sin^2 \gamma}{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^2}}}}; \quad b = \frac{\sqrt{\frac{4\sigma_1^2 \sigma_2^2 w^2}{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}}}{\sqrt{1 + \sqrt{1 - \frac{4\sigma_1^2 \sigma_2^2 \sin^2 \gamma}{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^2}}}},$$

где σ_1^2, σ_2^2 – дисперсии ошибок линий положения, $\sigma_1^2 = \sigma_\theta^2 R^2$, σ_θ^2 – дисперсия ошибки пеленга, R – расстояние между ИРИ и положением пеленгатора; w – параметр, зависящий от заданной вероятности P : $w = \sqrt{-\ln(1 - P)}$ [4].

На рис. 5 приведены расчетные зависимости размеров полуосей эллипса от СКО пеленгации при $P=0,5$ для направления на ИРИ по нормали к середине базы системы.

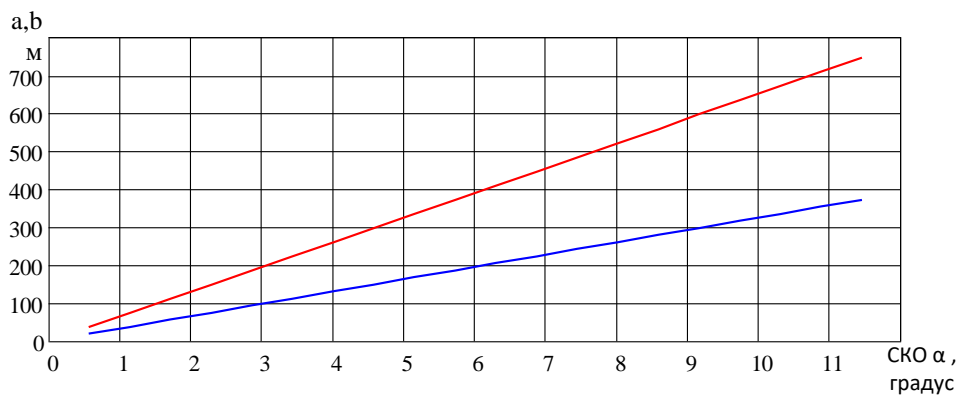


Рис. 5. Зависимости размеров полуосей эллипса от СКО пеленгации при $P = 0,5$ ($R = 2000$ м; $d = 2000$ м).

Данные рис. 5 показывают, что для достижения размеров эллипса ошибок порядка десятков метров СКО измерения пеленга должны быть не более 1...2 угловых градусов. В то же время, как следует из рисунка 2, такие ошибки возможны только для высокочастотных диапазонов. Особенностью пеленгационного метода местоопределения является большое различие размеров полуосей эллипса ошибок для рассмотренного случая, при чем полуось a (красная линия) быстро увеличивается с увеличением дальности. Следствием является целесообразность несимметричного расположения пеленгаторов относительно ИРИ. В этом случае СКО погрешности местоопределения σ , определяется выражением [4]:

$$\sigma_r = \frac{0.0175\sigma_\theta d}{\sin \beta} \sqrt{\left[\left(\frac{R}{d} + \frac{d}{4R}\right)^2 - \cos^2 \beta\right] \left[\frac{2R^2}{d^2} + 0.5\right]},$$

где β – направление на ИРИ (рис. 4).

На рис. 6 показаны зависимости СКО погрешности местоопределения от направления на ИРИ для различного размера базы, а на рис.7 – зависимости СКО погрешности местоопределения от дальности для различных СКО погрешности пеленгации.

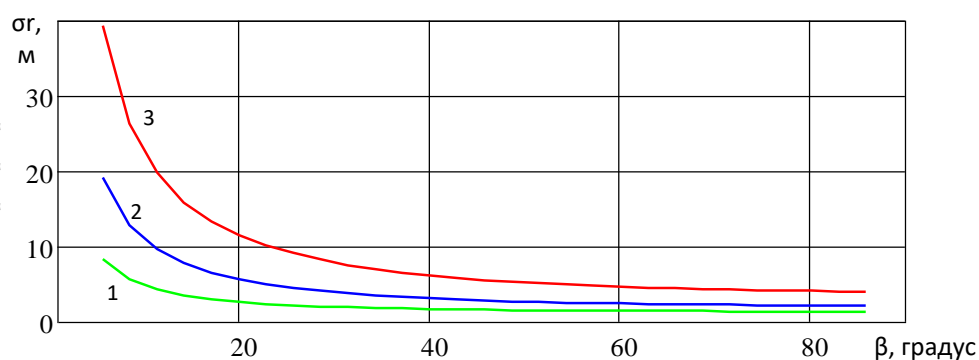


Рис. 6. Зависимость СКО погрешности местоопределения от направления на ИРИ для различного размера базы: 1 – $d = 250$ м; 2 – $d = 500$ м; 3 – $d = 1000$ м; $R = 1000$ м.

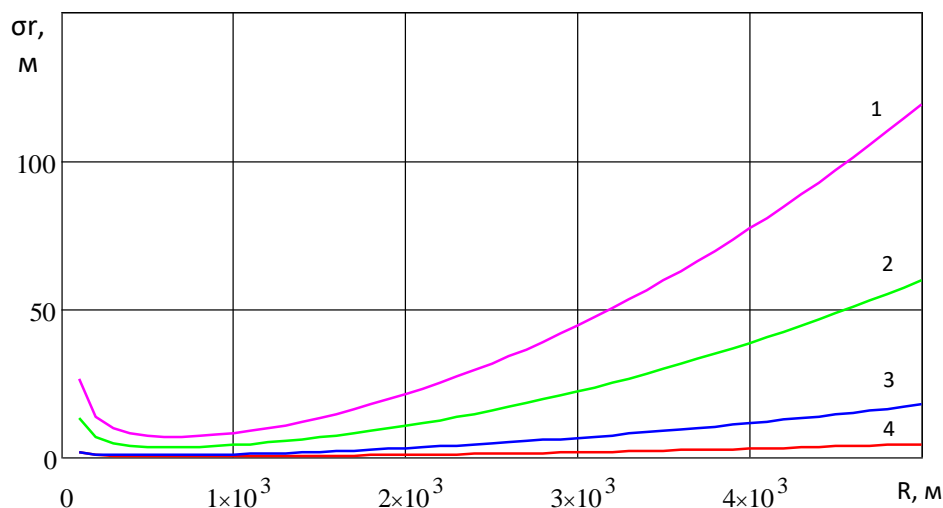


Рис. 7. Зависимость СКО погрешности местоопределения от дальности для различных СКО погрешности пеленгации: 1 – $\sigma_\theta = 10^\circ$; 2 – $\sigma_\theta = 5^\circ$; 3 – $\sigma_\theta = 1^\circ$; 4 – $\sigma_\theta = 0,5^\circ$; $d = 2000$ м.

Полученные данные показывают (рис. 7), что оптимальное отношение дальности к размеру базы составляет 0,5...0,7, при котором на дальностях 1...2 км может быть получено СКО погрешности местоопределения не более 10...20 м даже при больших значениях СКО погрешности пеленгования ($5...10^0$).

Повышение точности местоопределения возможно при использовании многократной пеленгации [6]. На рис. 8 показаны зависимости СКО погрешности определения координат при многократной пеленгации.

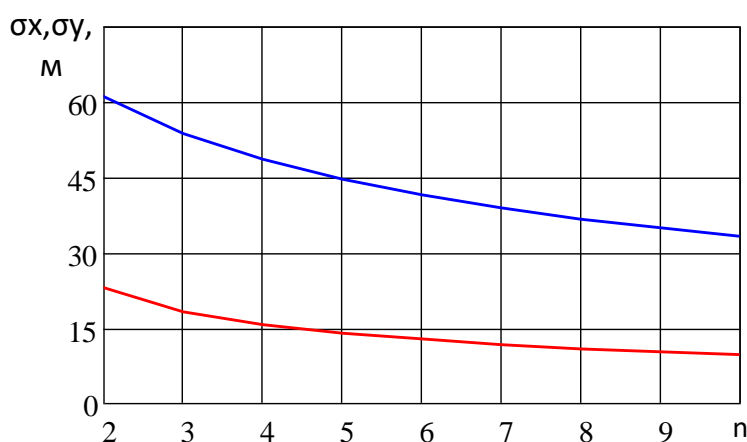


Рис. 8. Зависимости СКО погрешности определения координат при многократной пеленгации ($d = 2000$ м; $R = 2000$ м; $\sigma_\theta = 1^0$).

Как показывает рис. 8, увеличение числа циклов измерений до 10 позволяет снизить СКО погрешности местоопределения в 2 раза.

В таблице 2 приведена оценка предельных параметров системы местоопределения пеленгационного типа, размещенной на ММП в различных диапазонах частот ($R = 2000$ м; $d = 2000$ м; направление на ИРИ 45^0).

Таблица 2. Результаты оценки предельных параметров системы местоопределения пеленгационного типа, размещенной на ММП.

Частота, МГц	430-436	863-870	1575-1602	2400-2495	3550-3700	5160-5340	5600-5975
СКО погрешности пеленгации, градус	11	6	2,7	1,7	1,2	0,8	0,75
СКО погрешности местоопределения, м	15,5	8,5	3,8	2,4	1,7	1,12	1,05

Приведенные в таблице 2 результаты являются предельными, не учитывающими реальные характеристики антенн, параметры системы обработки, погрешности измерения координат ММП на местности, но они показывают принципиальную возможность создания систем местоопределения с приемлемыми характеристиками.

4. Требования к антенной системе пеленгатора

Основным элементом пеленгационной системы на ММП является антенна, определяющая погрешность пеленгования и, соответственно, точность измерения координат ИРИ. К антенной системе ММП предъявляются следующие требования:

- узкая диаграмма направленности;
- широкая полоса рабочих частот;
- минимальные габариты и масса;
- низкое аэродинамическое сопротивление.

Требования по рабочей полосе частот выполнить с помощью одной антенны невозможно, поскольку даже при использовании частотно-независимой антенны (например, логопериодической), длина антенны в этом случае превышает допустимые размеры. Поэтому целесообразно использовать для диапазона 400...900 МГц простые малогабаритные несимметричные вибраторы, а в более высокочастотных диапазонах – антенны на основе излучателя Вивальди и логопериодические антенны.

Требования по ширине диаграммы направленности и габаритам антенны противоположны и требуется поиск компромисса. Он может заключаться для некоторых диапазонов в использовании антенн бегущей волны, имеющих малые поперечные размеры (например, спиральной антенны, для которой длина может быть получена порядка $5...7\lambda$, а диаметр $\lambda / 3$).

Заключение

Проведенный анализ возможности построения системы местоопределения координат ИРИ на малогабаритных мобильных платформах показал, что принципиально возможно создание систем, работающих в диапазоне частот от 0,4 до 6 ГГц с предельным СКО измерения дальности порядка 15...20 м на дальностях 2...3 км. Для уточнения полученных результатов необходимо провести дополнительные исследования с учетом характеристик реальных антенных устройств и параметров системы обработки сигналов.

Финансирование: Работы проводились при финансовой поддержке гранта Правительства Тульской области №ДС/120/РЭ/23/ТО

Литература

1. Симонян А.А., Замуруев С.Н. Исследование и сравнительный анализ современных методов по определению угловых координат источника радиоизлучения // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ Т. – 2022. – Т. 191. – №. 6.
2. Полянских П.А., Мещеряков А.А., Денисов В.П. Оценка точности определения координат наземного источника радиоизлучения с борта летательного аппарата пассивным однопозиционным методом путем компьютерного моделирования // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.5>
3. Буйлов Е.Н., Солонар А.С., Бойкачев П.В., Лях Б.А., Кожабаева И.Б. Алгоритм определения направления на источник радиоизлучения в двухканальном фазовом радиопеленгаторе. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №.10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.7>
4. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. Оборонгиз.- М.: – 1958. 56 с.
5. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. – М.: Радиотехника, – 2004, 320 с.

6. Мельников Ю.П., Попов С.В. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. – М.: Радиотехника. – 2008. 423 с.

Для цитирования:

Макарецкий Е.А., Овчинников А.В., Гублин А.С. Система местоопределения координат источника радиоизлучения на малогабаритных мобильных платформах. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.2>