

УДК 623.74

## Способ однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения с использованием бортового радиопеленгатора беспилотного летательного аппарата вертолетного типа

Ашихмин А. В., Виноградов А. Д., Рембовский А.М., Сладких В. А.

**Постановка задачи:** эффективность применения существующей наземной мобильной техники радиоконтроля с ограниченной высотой размещения их антенных устройств существенно уменьшается, а традиционно используемые в настоящее время наземные многопозиционные системы местоопределения становятся практически неработоспособными, так как в условиях использования «маломощными» наземными источниками радиоизлучения (ИРИ) направленных антенн и ограниченного времени излучения радиосигналов вероятность одновременной электромагнитной доступности наземных ИРИ до нескольких (не менее двух) пунктов приема многопозиционных систем местоопределения становится крайне низкой. В этой связи актуальной является разработка способов местоопределения источников с использованием беспилотного летательного аппарата вертолетного типа, которые позволяют существенно увеличить зону покрытия с обнаружением и определением координат ИРИ. **Целью работы** является разработка способа однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения с использованием однопозиционной азимутально-угломестной системы местоопределения, размещенной на беспилотном летательном аппарате вертолетного типа, а также обоснование структуры пеленгаторной антенной решетки и принципов построения локальных угломерных навигационных систем, обеспечивающих в условиях потери сигналов глобальной спутниковой навигации возможность функционирования станции радиоконтроля на беспилотном летательном аппарате вертолетного типа (БЛА ВТ). **Новизна:** в отличие от аналогов в предложенном способе линии положения наземного ИРИ находятся в свободном пространстве, а не на поверхности Земли, за счет чего обеспечивается возможность не только многопозиционного, но и однопозиционного определения координат наземных ИРИ при одновременном повышении точности определения координат наземных ИРИ и снижении вычислительных затрат. **Результат:** реализация предложенного способа в разработанной широкодиапазонной станции радиоконтроля на БЛА ВТ легкого класса по сравнению с известными наземными станциями радиоконтроля или станциями, размещенными на БпЛА, обеспечивает возможность высокоточного однопозиционного определения координат наземных источников радиоизлучения, в том числе, в условиях потери сигналов глобальной спутниковой навигации. По сравнению с наземными станциями радиоконтроля при многопозиционном местоопределении радиус рабочей зоны увеличивается не менее чем в 4 раза. **Практическая значимость:** предложенный способ может быть использован для однопозиционного и многопозиционного определения координат наземных ИРИ на базе БЛА ВТ.

**Ключевые слова:** источник радиоизлучения, беспилотный летательный аппарат вертолетного типа, определение координат, станция радиоконтроля.

---

### Библиографическая ссылка на статью:

Ашихмин А. В., Виноградов А. Д., Рембовский А.М., Сладких В.А. Способ однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения с использованием бортового радиопеленгатора беспилотного летательного аппарата вертолетного типа // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 40-57. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-40-57

### Reference for citation:

Ashikhmin A. V., Vinogradov A. D., Rembovskij A. M., Sladkikh V. A. Method for single-position positioning of radio emission sources using an on-board radio direction finder of an unmanned aerial vehicle of a helicopter type. Systems of Control, Communication and Security, 2021, no. 4, pp. 40-57 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-40-57

## Введение

Функциональные возможности наземной мобильной техники радиоконтроля наземных источников радиоизлучения существенно зависят от высоты размещения антенных устройств над земной поверхностью, определяющей дальность их действия и рабочую зону [1-3]. Широкомасштабное использование в настоящее время помехозащищенных наземных радиосредств для управления силами и средствами при ведении боевых действий, функционирующих в различных диапазонах частот при пониженных мощностях и с использованием направленных антенн, приводит к существенному уменьшению вероятности их своевременного обнаружения и пространственной локализации (определение местоположения) с требуемой точностью наземными средствами радиоконтроля (РК) [2]. При этом в условиях реального рельефа местности рабочая зона и эффективность применения существующей наземной мобильной техники радиоконтроля с ограниченной высотой размещения их антенных устройств существенно уменьшаются, а традиционно используемые в настоящее время наземные многопозиционные системы местоопределения наземных ИРИ становятся практически неработоспособными, так как в условиях использования «маломощными» наземными ИРИ направленными антеннами и ограниченного времени излучения радиосигналов вероятность одновременной электромагнитной доступности наземных ИРИ до нескольких (не менее двух) пунктов приема многопозиционных систем местоопределения становится крайне низкой.

В качестве примера на рис. 1а показан рельеф участка карты среднепересеченной местности в виде четырехугольника размером  $20 \times 20$  км с высотами  $h$  над уровнем моря, отмеченными различными цветами, в двух вершинах которого, отмеченных точками, размещены пункты приема двухпозиционной триангуляционной системы местоопределения (ТСМ). При этом на рис. 1б приведены, полученные расчетным путем и обозначенные соответственно зеленым и коричневым цветом, зоны электромагнитной доступности одноваттного ИРИ на частоте 1 ГГц, антенна которого расположена на высоте 1,5 м над земной поверхностью, соответственно при обнаружении и определении координат ИРИ с использованием двухпозиционной ТСМ, антенны азимутального обнаружителя-пеленгатора пунктов приема которой размещены в вышеупомянутых вершинах четырехугольника на высоте 15 м над земной поверхностью.

Из рис. 1б следует, что зона покрытия двухпозиционной наземной ТСМ участка местности размером  $20 \times 20$  км с обнаружением и определением координат наземного ИРИ не превышает 25-30% и 5-8% соответственно.

В данной работе представлен способ однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения с использованием однопозиционной азимутально-угломестной системы местоопределения (АУСМ), основанной на приеме сигналов наземных ИРИ антенной азимутально-угломестного обнаружителя-пеленгатора, размещенной на высоте несколько км над земной поверхностью [1, 4].

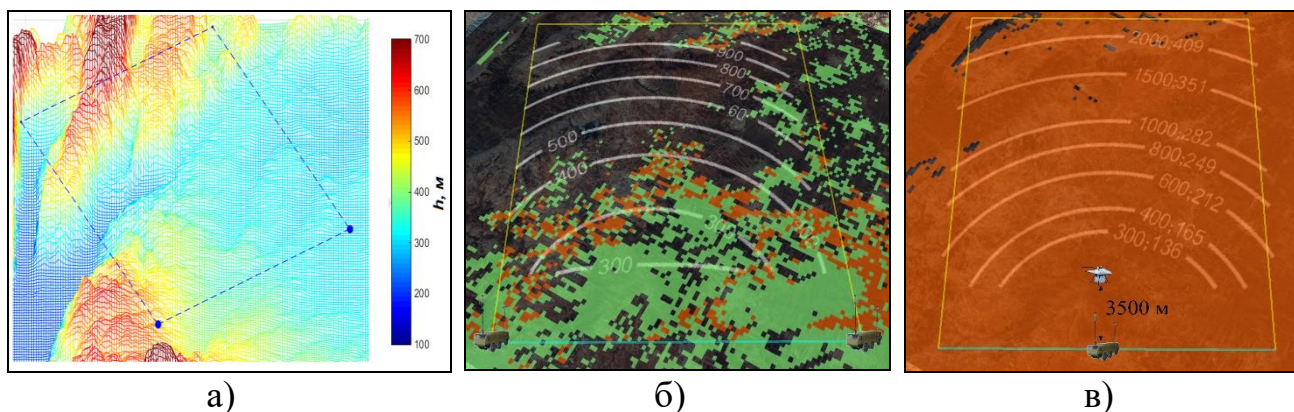


Рис. 1. Рельеф участка карты местности (а) и соответствующие зоны определения координат одноваттного наземного ИРИ с использованием наземной двухпозиционной ТСМ (б) и однопозиционной АУСМ (в), реализуемых при приеме радиосигнала ИРИ на высотах соответственно 15 м и 3500 м над земной поверхностью

Применение предлагаемого способа позволяет существенно (практически до 100%) увеличить зону покрытия с обнаружением и определением координат современных и перспективных наземных радиоэлектронных средств. Для сравнения на рис. 1в приведена зона электромагнитной доступности того же наземного одноваттного ИРИ при обнаружении и определении координат ИРИ с использованием однопозиционной АУСМ, антенна пункта приема которой размещена в центре базы вышеупомянутой двухпозиционной ТСМ на высоте 3500 м над земной поверхностью.

Подъем антенных устройств наземной техники различного назначения на высоты до 3–4 км в настоящее время в принципе может быть реализован такими известными классами летно-подъемных средств как привязные аэростаты и беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного или вертолетного типов (СТ или ВТ) [5]. Однако многократные попытки совершенствования наземной техники различного назначения в направлении увеличения дальности действия на основе ее оснащения привязными аэростатами не дали желаемого результата из-за существенного ухудшения важнейших эксплуатационных характеристик наземных комплексов, таких как мобильность, живучесть, возможность функционирования в сложных метеорологических условиях, сложность эксплуатации и обслуживания, число транспортных средств и требуемая численность экипажа. Для БПЛА СТ характерными являются следующие недостатки [5]:

- 1) существенная зависимость аэродинамических характеристик БПЛА от формы и предельно допустимых размеров целевой нагрузки, ограничивающая возможность размещения на БПЛА антенных устройств с оптимальными для решения поставленной задачи структурами и характеристиками;
- 2) ограниченный диапазон возможностей выбора высот размещения, скоростей полета и контролируемой угловой ориентации в пространстве БПЛА;

- 3) ограничения на предельно допустимый уровень воздействия ветровой нагрузки при запуске, функционировании и посадке БПЛА;
- 4) необходимость специального стартового оборудования и ограниченные возможности запуска и посадки БПЛА на неподготовленные и ограниченные по размерам участки местности;
- 5) низкая кратность применения БПЛА. Наиболее эффективное сочетание достоинств наземной техники РК и летно-подъемных средств может быть обеспечено при использовании в БПЛА ВТ, для которых не являются характерными вышеупомянутые недостатки БПЛА СТ [1-3].

Одним из важнейших ограничений на конструкцию и эксплуатационные характеристики БПЛА ВТ, предназначенных для оснащения наземных мобильных станций РК, является возможность размещения БПЛА в походном положении совместно с «основной» аппаратурой наземных станций РК на соответствующей транспортной базе без ухудшения мобильности. При этом, как показывает анализ типовой номенклатуры и массо-габаритных характеристик целевых нагрузок БПЛА, способных за счет подъема антенных устройств повысить качество функционирования современной и перспективной наземной техники РК, допустимая масса целевой нагрузки БПЛА ВТ должна быть не менее 30 кг, а дальность применения БПЛА, определяемая дальностью его радиоканала управления, – не менее 40 км. Кроме того, конструкция БПЛА ВТ должна позволять размещать целевое оборудование как внутри каркаса БПЛА, так и навешивать его снаружи на специальных установочных местах. Не менее важные требования к БПЛА ВТ, предназначенным для функционирования в составе современной и перспективной техники РК, являются требования к помехозащищенности и помехоустойчивости как систем управления БПЛА, так систем информационного обмена между целевой нагрузкой БПЛА и наземным пунктом управления (НПУ). Обладающие такими характеристиками БПЛА ВТ с взлетной массой до 200 кг принято считать БПЛА ВТ легкого класса [6].

Основными задачами разработки широкодиапазонной станции РК на БПЛА ВТ являются следующие:

- разработка алгоритмов азимутально-угломестного радиопеленгования и однопозиционного и многопозиционного определения координат наземных ИРИ на реальной земной поверхности при различных режимах полета БПЛА ВТ (полет по маршруту; зависание; зависание с вращением БПЛА ВТ вокруг оси несущего винта с высокой угловой скоростью) в условиях ограничений на время излучения радиосигналов пеленгуемых ИРИ;
- обоснование структуры пеленгаторной антенной решетки, обеспечивающей в широком диапазоне частот в круговых азимутальном и угломестном секторах однозначность и одинаковую крутизну пеленгационных характеристик в азимутальной и угломестной плоскостях при наличии ограничений на число антенных каналов, габариты массу антенной решетки;
- обоснование принципов построения, структуры и алгоритмов функционирования локальных угломерных навигационных систем, основан-



ных на использовании азимутально-угломестного радиопеленгования радиоориентиров с борта БпЛА ВТ, обеспечивающих в условиях потери сигналов глобальной спутниковой навигации возможность функционирования станции РК на БпЛА ВТ.

### **Способ однопозиционного местоопределения источников и особенности построения широкодиапазонной станции радиоконтроля на базе БпЛА ВТ**

Рассматриваемая станция РК обеспечивает реализацию однопозиционного и повышение точности многопозиционного определения координат наземных ИРИ в широком диапазоне частот за счет разработки нового способа определения координат наземного ИРИ при радиопеленговании с борта летательного аппарата и размещения БпЛА ВТ легкого класса автоматического азимутально-угломестного радиопеленгатора с объемной бортовой пеленгаторной антенной решетки, характеризующейся нечетной симметрией структуры, и высокоточной системы определения координат и угловой ориентации БпЛА.

Предложенный способ определения координат наземного ИРИ основан на формировании линии положения наземного ИРИ (линии, проходящей через фазовые центры бортовой пеленгаторной антенной решетки и антенны пеленгуемого ИРИ) как линии пересечения пары независимых полуплоскостей положения, соответствующих последовательным во времени или одновременным измерениям пар независимых азимутов или одновременным измерениям азимута и угла места наземного ИРИ при радиопеленговании с борта летательного аппарата, и определении координат наземного ИРИ в виде координат точки пересечения линии положения с поверхностью Земли, вычисляемых с использованием итерационной процедуры, параметры которой зависят от изрезанности рельефа земной поверхности в зоне радиопеленгования. При этом в отличие от аналогов [7-12] линии положения наземного ИРИ находятся в свободном пространстве, а не на поверхности Земли, за счет чего обеспечивается возможность не только многопозиционного, но и однопозиционного определения координат наземных ИРИ при одновременном повышении точности определения координат наземных ИРИ и снижении вычислительных затрат.

Применение при реализации предложенного способа определения координат наземного ИРИ объемной бортовой пеленгаторной антенной решеткой, представляющей собой совокупность двух плоских антенных решеток, расположенных в параллельных или пересекающихся плоскостях, обеспечивает возможность повышения точности радиопеленгования в азимутальной и угломестной плоскостях, что при совместном применении с высокоточной системой определения координат и угловой ориентации БпЛА позволяет повысить точность однопозиционного определения координат наземных ИРИ. Выполнение структуры бортовой пеленгаторной антенной решетки в виде симметричной структуры с нечетным порядком симметрии обеспечивает возможность расширения рабочего диапазона антенной решетки при наличии ограничений на ее габариты и массу.

Размещение азимутально-угломестного радиопеленгатора на БпЛА вертолетного типа легкого класса обусловлено тем что, во-первых, аэродинамиче-

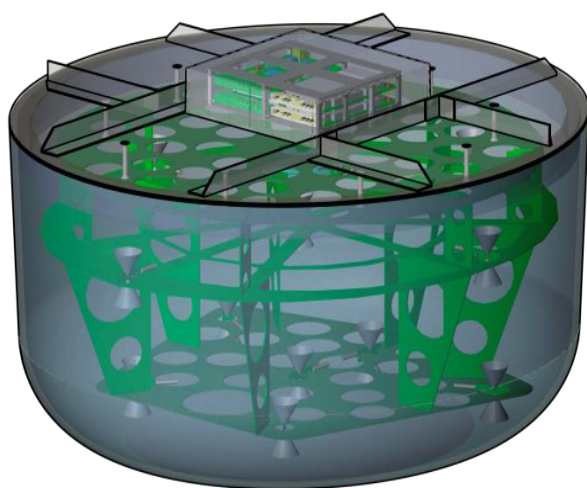
ские характеристики БпЛА ВТ в отличие от БпЛА СТ с аналогичной взлетной массой существенно меньше зависят от формы и предельно допустимых размеров бортовой пеленгаторной антенной решетки, увеличение которых необходимо для повышения точности определения координат ИРИ, во-вторых, увеличение объема бортовой пеленгаторной антенной решетки относительно объема БпЛА приводит к уменьшению методических ошибок радиопеленгования, обусловленных влиянием проводящих элементов конструкции БпЛА, и, соответственно, приводит к повышению точности местоопределения ИРИ, что определяет целесообразность размещения бортовой пеленгаторной антенной решетки на БпЛА ВТ с минимально возможными габаритными размерами. Наконец, возможность вращения БпЛА ВТ легкого класса вокруг оси несущего винта с высокой угловой скоростью (один оборот в секунду) обеспечивает возможность существенного (на порядок) уменьшения девиационных ошибок бортового радиопеленгатора в азимутальной и угломестной плоскостях с соответствующим повышением точности определения координат наземных ИРИ.

Основное конструктивное решение для обеспечения работы БпЛА ВТ в составе комплексов различного назначения – это модульное разделение беспилотного вертолета, как носителя целевой нагрузки, и целевого оборудования, сменные модули которого выполняются в виде ферменной конструкции, одновременно являющейся шасси вертолета. Такое техническое решение позволяет:

- 1) устанавливать на беспилотном вертолете различные сменные модули для выполнения ряда различных задач, обеспечивая тем самым его многофункциональность;
- 2) существенно уменьшить габаритные размеры комплексов с БпЛА ВТ в походном положении;
- 3) осуществлять развертывание/свертывание комплексов в полевых условиях экипажем из 2-4 человек за короткое время без привлечения специальных устройств.

Структура бортового широкодиапазонного азимутально-угломестного радиопеленгатора с объемной пеленгаторной антенной решеткой и внешний вид ненаправленных биконических антенн пеленгаторной антенной решетки представлены на рис. 2. Объемная пеленгаторная антенная решетка представляет собой двухъярусную кольцевую антенную решетку из ненаправленных биконических антенн и характеризуется нечетной симметрией структуры в азимутальной плоскости.

Наземная компонента включает наземную аппаратуру управления вертолетом и бортовым радиопеленгатором с устройствами управления и отображения в виде ноутбуков, а также контейнеры для транспортировки целевой нагрузки. Внешний вид наземной компоненты экспериментального образца широкодиапазонной станции радиоконтроля на БЛА ВТ представлен на рис. 3.



а)



б)

Рис. 2. Структура бортового азимутально-угломестного радиопеленгатора с объемной пеленгаторной антенной решеткой (а) и внешний вид антенн пеленгаторной антенной решетки (б) экспериментального образца широкодиапазонной станции радиоконтроля на БЛА ВТ



а)



б)

Рис. 3. Внешний вид наземной компоненты экспериментального образца широкодиапазонной станции радиоконтроля на БПЛА ВТ: а) аппаратура автоматического управления БПЛА и бортовым радиопеленгатором; б) устройства управления и отображения аппаратуры управления БПЛА и целевой нагрузкой

Наибольшая эффективность применения широкодиапазонной станции РК на БЛА ВТ достигается за счет реализации однопозиционного способа определения координат наземных ИРИ. Соизмеримые физические объемы антенной решетки и проводящих элементов конструкции малоразмерного вертолета, обеспечивают возможность функционирования бортовой объемной антенной решетки в условиях приема плоской электромагнитной волны, практически не



искаженной из-за влияния проводящей подстилающей поверхности больших (относительно антенной решетки) размеров. Это позволяет повысить точность определения направления распространения радиоволны не только в горизонтальной (азимутальной), но и в вертикальной (угломестной) плоскостях при широкоугольном сканировании по пространству с использованием антенных решеток из ненаправленных в азимутальной плоскости антенн. При этом радиус рабочей зоны, в которой обеспечивается заданная точность однопозиционного определения координат наземных ИРИ, увеличивается пропорционально высоте размещения БПЛА над земной поверхностью.

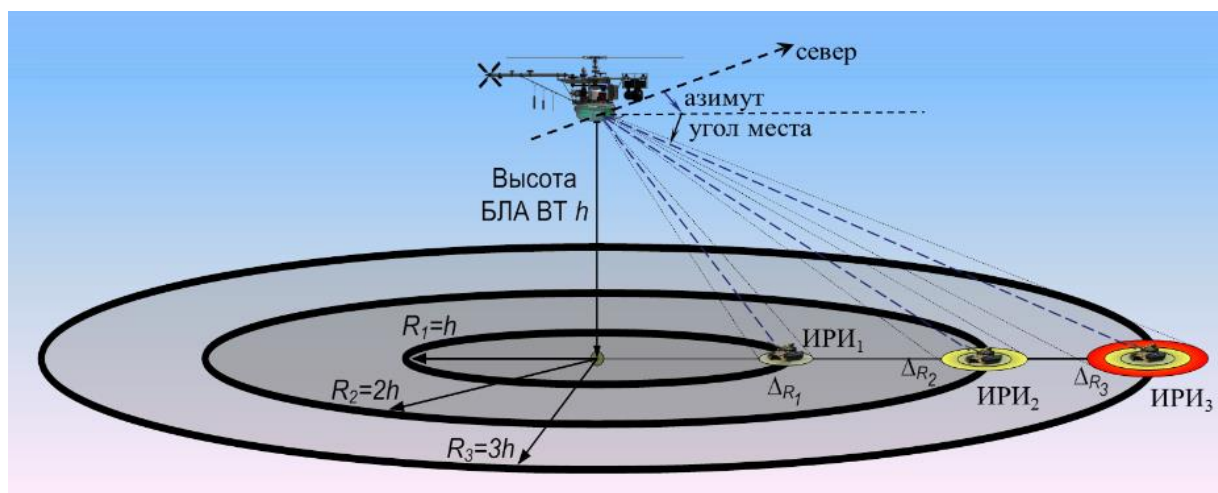


Рис.4. Графическое представление границ рабочих зон на земной поверхности для соответствующих точностей однопозиционного определения координат наземных ИРИ с использованием бортового азимутально-угломестного радиопеленгатора

На рис. 4 приведено графическое представление границ трех рабочих зон на земной поверхности для соответствующих точностей однопозиционного определения координат наземных ИРИ с использованием бортового азимутально-угломестного радиопеленгатора, которые представляют собой концентрические окружности с центром, совпадающим с проекцией центра БПЛА на земную поверхность, где обозначено:  $h$  – высота размещения центра БЛА над земной поверхностью;  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  – радиусы вышеупомянутых концентрических окружностей, превышающие высоту  $h$  соответственно в один, два и три раза;  $\Delta_{R_1}$ ,  $\Delta_{R_2}$  и  $\Delta_{R_3}$  – средние квадратические радиальные ошибки определения координат первого, второго и третьего наземных источников радиоизлучения ИРИ1, ИРИ2 и ИРИ3, расположенных на границах концентрических окружностей с радиусами  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  соответственно. Зависимость радиальной составляющей точности однопозиционного определения координат наземных ИРИ с использованием бортового азимутально-угломестного радиопеленгатора аналогична зависимости радиальной составляющей точности определения координат наземного ИРИ с использованием двухпозиционной триангуляционной наземной системы местоопределения с базой (расстоянием между наземными ази-



тальными радиопеленгаторами), равной удвоенной высоте размещения бортового азимутально-угломестного радиопеленгатора над земной поверхностью, при размещении ИРИ на главном направлении триангуляционной наземной системы местоопределения (на одинаковом расстоянии от пары азимутальных радиопеленгаторов) [6].

На рис. 5 приведены частотные зависимости средних квадратических ошибок (СКО) радиопеленгования по азимуту  $\sigma_\theta$  и углу места  $\sigma_\beta$ , полученные при экспериментальной проверке широкодиапазонной станции РК на БЛА ВТ.

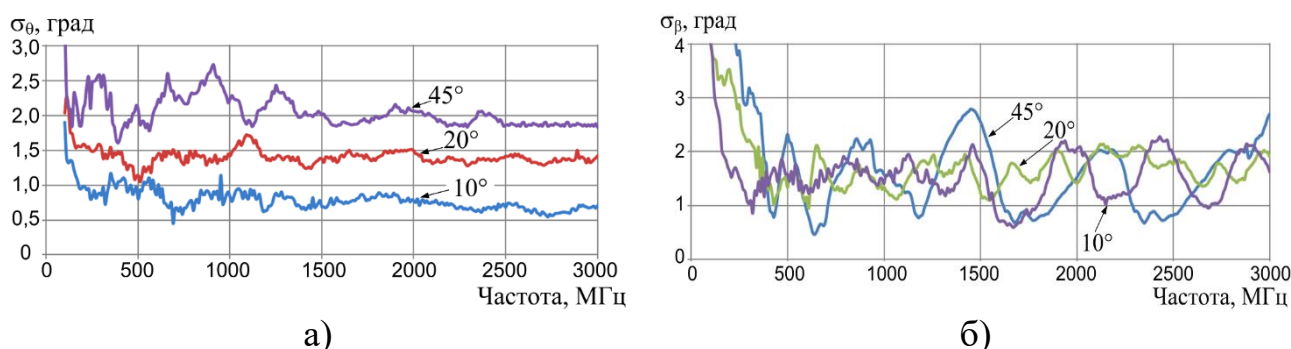


Рис. 5. Частотные зависимости СКО радиопеленгования по азимуту (а) и по углу места (б) при углах места пеленгуемого ИРИ, равных 10°; 20° и 45°

На рис. 6 представлены графики зависимостей нормированных к горизонтальной дальности  $R_r$  до наземного ИРИ СКО оценивания абсциссы  $\sigma_x$  и ординаты  $\sigma_y$  плоских прямоугольных координат и радиальной (круговой) СКО  $\sigma_r$  определения координат наземного ИРИ, выраженные в процентах, от нормированной к высоте  $h$  размещения фазового центра бортовой пеленгаторной антенной решетки (ФЦ БПАР) над земной поверхностью горизонтальной дальности  $R_r$  до наземного ИРИ, обусловленные ошибками измерения собственных координат ФЦ БПАР, угловой ориентации осевых линий БПАР и ошибками азимутально-угломестного радиопеленгования, которые рассчитаны при следующих ошибках измерений параметров: СКО измерения координат ФЦ БПАР  $\sigma_{x_{ц}}$ ,  $\sigma_{y_{ц}}$  и  $\sigma_{z_{ц}}$ , нормированные на высоту  $h$  подъема ФЦ БПАР над горизон-

тальной плоскостью ( $h = z_{ц}$ ), имеют значения  $\frac{\sigma_{x_{ц}}}{h} = \frac{\sigma_{y_{ц}}}{h} = \frac{\sigma_{z_{ц}}}{h} = 0,02$  для рис. 6а

и  $\frac{\sigma_{x_{ц}}}{h} = \frac{\sigma_{y_{ц}}}{h} = 0,002$  и  $\frac{\sigma_{z_{ц}}}{h} = 0,02$  для рис. 6б; СКО измерения углов курса  $\psi$ , тангажа  $\mu$  и крена  $\vartheta$  имеют значения  $\sigma_\psi = \sigma_\mu = \sigma_\vartheta = 1^\circ$  для рис. 6а и  $\sigma_\psi = \sigma_\mu = \sigma_\vartheta = 0,2^\circ$  для рис. 6б; СКО измерения азимута  $\alpha$  и угла места  $\varepsilon$  составляют  $\sigma_\alpha = \sigma_\varepsilon = 1^\circ$  и  $\sigma_\alpha = \sigma_\varepsilon = 0,7^\circ$  для рис. 6б.

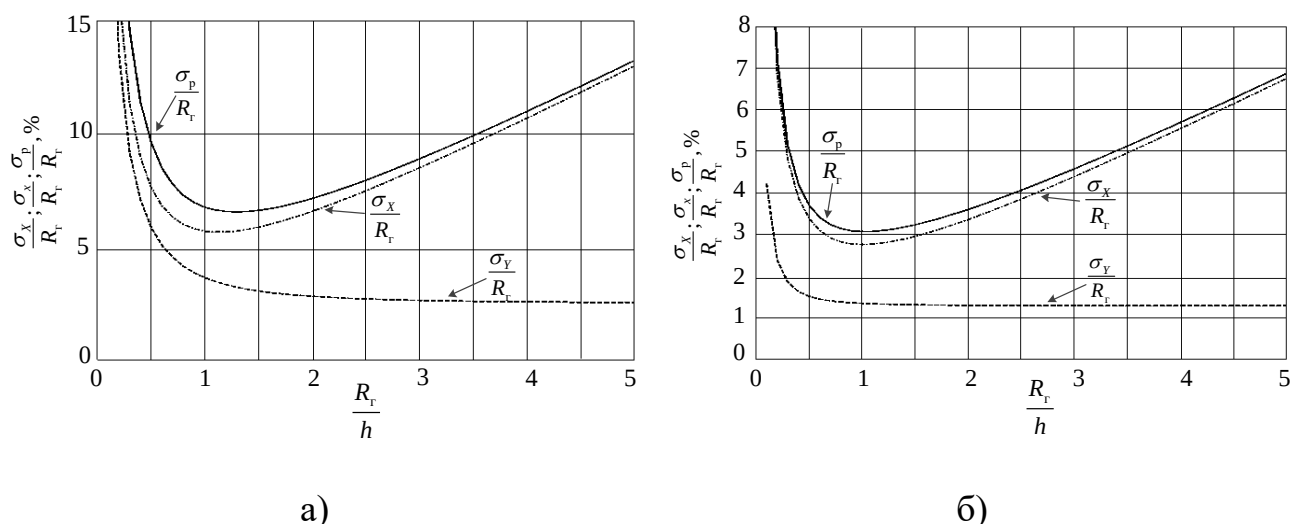


Рис. 6. Зависимости нормированных к горизонтальной дальности до наземного ИРИ СКО определения координат наземного ИРИ от нормированной горизонтальной дальности до наземного ИРИ, обусловленные средними (а) и малыми (б) значениями ошибок измерения координат БПАР, угловой ориентации осевых линий БПАР и азимута и угла места пеленгуемого ИРИ

Для обеспечения возможности функционирования одной станции РК на БпЛА ВТ в условиях потери сигналов глобальной спутниковой навигации предлагается использовать локальную угломерную радионавигационную систему (ЛУНС), предназначенную для определения координат и угловой ориентации в пространстве одного БпЛА угломерным методом на основе азимутально-угломестного радиопеленгования с борта БпЛА трех наземных радиоориентиров (РО). Для обеспечения возможности функционирования двух станций РК на БпЛА ВТ в условиях потери сигналов глобальной спутниковой навигации предлагается использовать автономную угломерную радионавигационную систему (АУНС), предназначенную для определения координат и угловой ориентации в пространстве двух БпЛА, оснащенных высотомерами и бортовыми РО, угломерным методом на основе азимутально-угломестного радиопеленгования с борта БпЛА одного наземного РО и высокоточного азимутально-угломестного радиопеленгования с наземного пункта управления (НПУ) двух бортовых РО. Схемы размещения на местности БпЛА, НПУ и РО для реализации ЛУНС и АУНС приведены на рис. 7, где обозначено: РО<sub>1</sub>, РО<sub>2</sub> и РО<sub>3</sub> – соответственно первый, второй и третий РО;  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  – частоты излучения соответственно РО<sub>1</sub>, РО<sub>2</sub> и РО<sub>3</sub>; БпЛА<sub>1</sub> и БпЛА<sub>2</sub> – первый и второй БпЛА;  $h$ ,  $h_1$  и  $h_2$  – высоты размещения БпЛА, БпЛА<sub>1</sub> и БпЛА<sub>2</sub> соответственно;  $R$  – радиус окружности, проходящей через проекции трех РО на земной поверхности;  $\alpha_i$  и  $\varepsilon_i$  – азимут и угол места  $i$ -го наземного РО при радиопеленговании с борта БпЛА, где  $i=1,2,3$ ;  $x_i$ ,  $y_i$  и  $z_i$  – координаты  $i$ -го РО;  $\alpha_{ni}$  и  $\varepsilon_{ni}$  – азимут и угол места  $i$ -го РО при радиопеленговании с борта  $n$ -го БпЛА, где  $n=1,2$ ;  $i \neq n$ ;  $\theta_n$

и  $\beta_n$  – радиопеленг и угол возвышения  $n$ -го бортового РО при радиопеленговании с НПУ, где  $n = 1, 2$ .

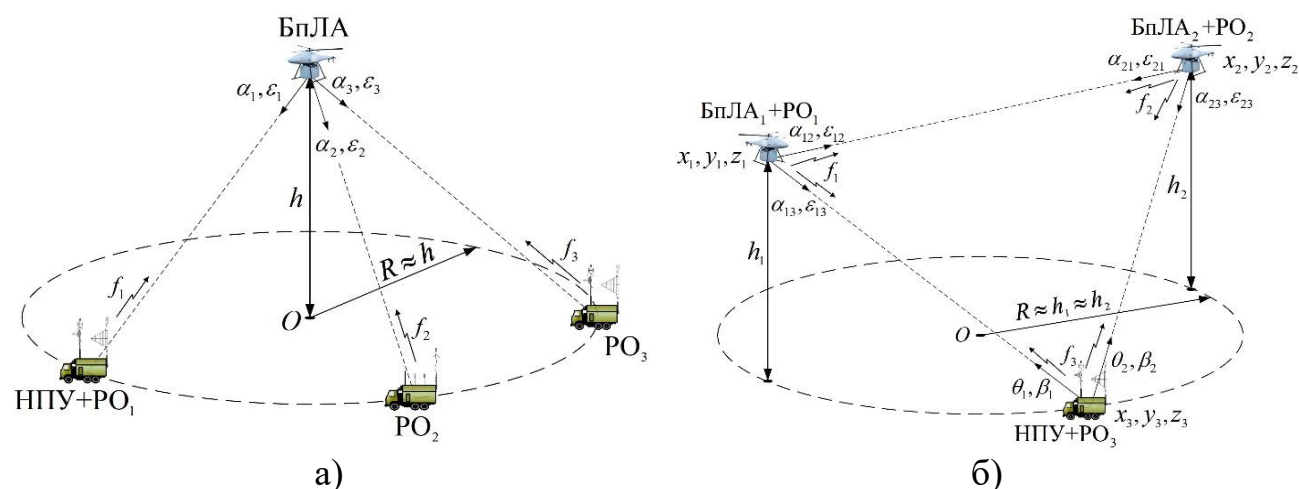


Рис. 7. Схемы размещения на местности БПЛА, НПУ и РО для реализации ЛУНС (а) и АУНС (б)

На рис. 8 приведены распределения нормированной (к точности радиопеленгования по азимуту и углу места, равных  $1^\circ$ ) СКО определения координат БПАР и беспилотного вертолета в пространстве и в сечении горизонтальной плоскости в рабочей зоне ЛУНС для варианта размещения на земной поверхности трех радиоориентиров в вершинах равнобедренного треугольника. Распределения ошибок построены при радиусе окружности, проходящей через три радиоориентира 5 км и высоте полета беспилотного вертолета над земной поверхностью, равной 5 км.

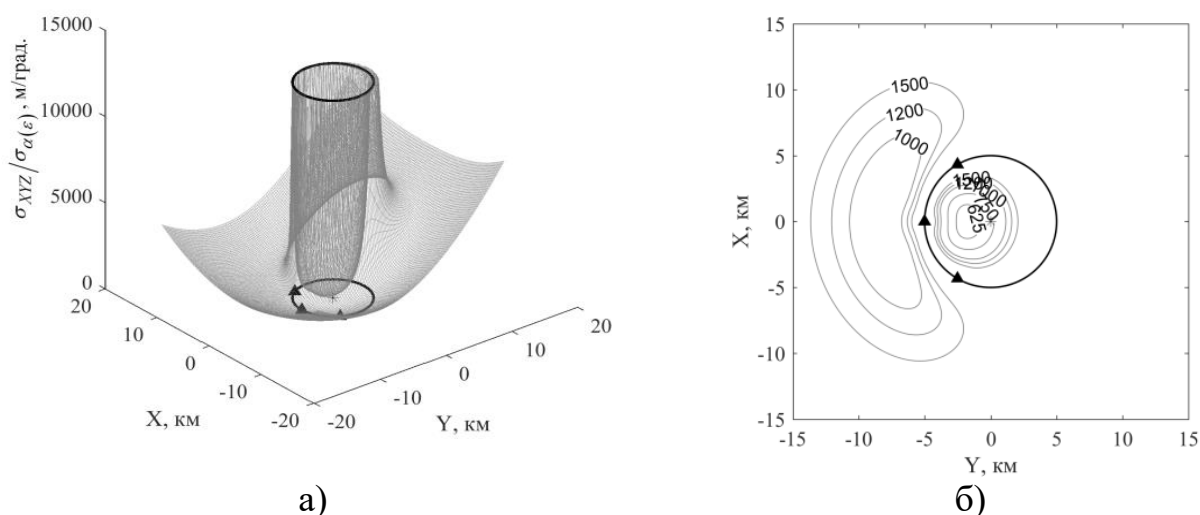


Рис. 8. Нормированные СКО определения координат БПАР и беспилотного вертолета в пространстве (а) и в сечении горизонтальной плоскости (б) в рабочей зоне ЛУНС для варианта размещения на земной поверхности трех радиоориентиров в вершинах равнобедренного треугольника

Кроме того, в виде таблицы 1 представлены значения нормированных к одному градусу ошибок радиопеленгования по азимуту и углу места средних квадратических ошибок определения координат в пространстве и угловой ориентации (тангаж, крен, курс) беспилотного вертолета для различных соотношений высоты  $h$  размещения беспилотного вертолета и радиуса  $R$  окружности, проходящей через проекции трех радиоориентиров ЛУНС на земной поверхности.

Таблица 1 – Значения нормированных к одному градусу ошибок радиопеленгования по азимуту и углу места СКО определения координат и угловой ориентации беспилотного вертолета

| Высота $h$ размещения БПЛА, км | Нормированная СКО определения координат БПЛА $\sigma_{xyz} / \sigma_{\alpha(\varepsilon)}$ , м/град. | Нормированная СКО определения тангажа (крена) БПЛА $\sigma_{\mu(\vartheta)} / \sigma_{\alpha(\varepsilon)}$ , град./град. | Нормированная СКО определения курса БПЛА $\sigma_{\psi} / \sigma_{\alpha(\varepsilon)}$ , м/град. |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $0,25 \cdot R [км]$            | $24,5 \cdot R [км]$                                                                                  | 0,88                                                                                                                      | 0,58                                                                                              |
| $0,5 \cdot R [км]$             | $30,9 \cdot R [км]$                                                                                  | 1,11                                                                                                                      |                                                                                                   |
| $0,75 \cdot R [км]$            | $42,5 \cdot R [км]$                                                                                  | 1,41                                                                                                                      |                                                                                                   |
| $1,0 \cdot R [км]$             | $60,5 \cdot R [км]$                                                                                  | 1,71                                                                                                                      |                                                                                                   |
| $1,25 \cdot R [км]$            | $86,3 \cdot R [км]$                                                                                  | 2,31                                                                                                                      |                                                                                                   |
| $1,5 \cdot R [км]$             | $122 \cdot R [км]$                                                                                   | 2,89                                                                                                                      |                                                                                                   |
| $2 \cdot R [км]$               | $231 \cdot R [км]$                                                                                   | 4,36                                                                                                                      |                                                                                                   |

В отличие от рассмотренной ЛУНС в АУНС один наземный радиоориентир размещается только на наземном пункте управления и не требуется размещение двух дополнительных наземных ориентиров на определенном удалении от наземного пункта управления, что существенно повышает мобильность, надежность, живучесть, помехозащищенность и оперативность применения наземной мобильной техники, оснащенной БПЛА.

Фрагмент первичных наземных (а; б) и летных (в) испытаний экспериментального образца широкодиапазонной станции РК на БПЛА ВТ приведен на рис. 9.



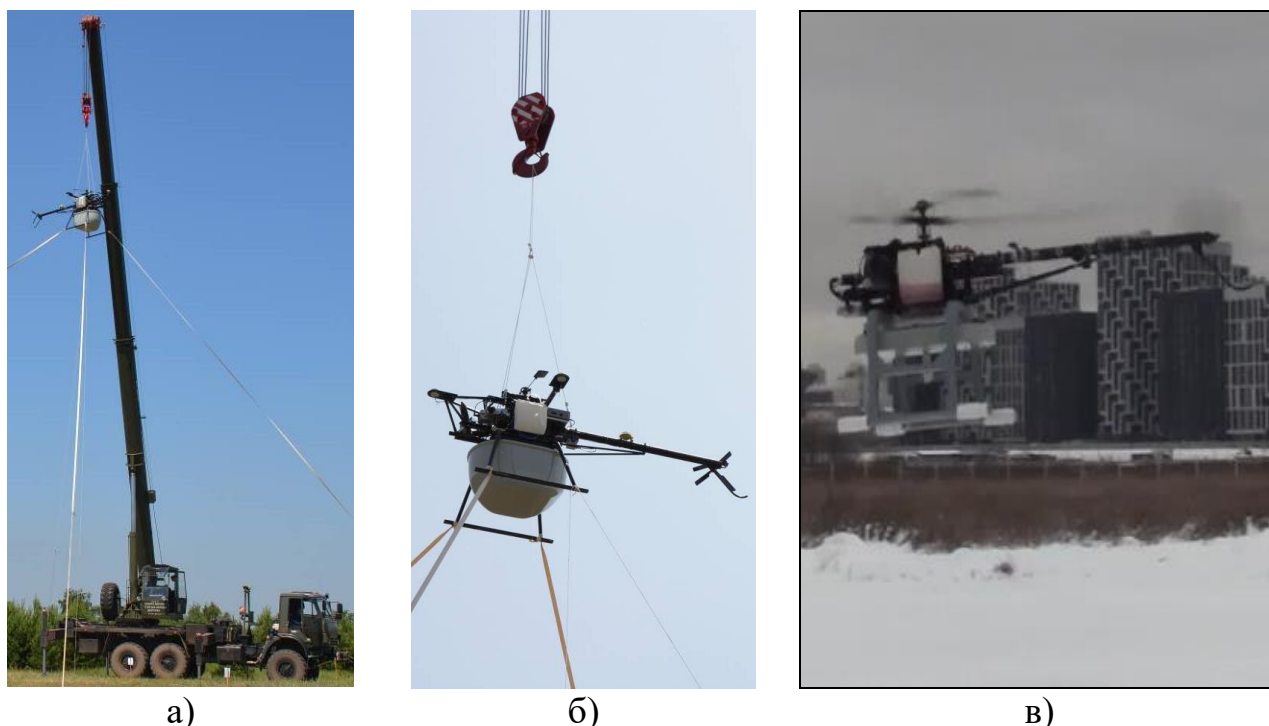


Рис. 9. Фрагменты первичных наземных (а; б) и летных (в) испытаний экспериментального образца широкодиапазонной станции РК на БпЛА VT

### Заключение

Предложенный способ определения координат обеспечивает возможность не только многопозиционного, но и однопозиционного определения координат наземных ИРИ при одновременном повышении точности определения координат и снижении вычислительных затрат.

Реализация предложенного способа в разработанной широкодиапазонной станции радиоконтроля на БЛА VT легкого класса по сравнению с известными наземными станциями радиоконтроля или станциями, размещенными на БпЛА, обеспечивает возможность высокоточного однопозиционного определения координат наземных источников радиоизлучения, в том числе, в условиях потери сигналов глобальной спутниковой навигации. По сравнению с наземными станциями радиоконтроля при многопозиционном местоопределении радиус рабочей зоны увеличивается не менее чем в 4 раза, а также обеспечивается возможность функционирования станции в сложных природно-географических условиях.

Сравнение станций радиоконтроля на БпЛА легкого класса вертолетного и самолетного типа показывает, что станции VT обеспечивают:

- возможность определения координат быстродействующих помехозащищенных ИРИ;
- способность функционирования при повышенной ветровой нагрузке;
- возможность взлета и посадки на неподготовленные площадки.

### Литература

1. Виноградов А. Д., Зайцев И. В., Молев А. А. Направления развития наземной мобильной техники радиоподавления радиосвязи на основе

оснащения беспилотными летательными аппаратами вертолетного типа // Сборник докладов и выступлений научно-деловой программы Международного военно-технического форума «Армия-2016». М., 2016. С. 25-40.

2. Виноградов А. Д., Зайцев И. В., Молев А. А. Развитие наземной мобильной техники радиоподавления радиосвязи на основе ее оснащения беспилотными вертолетами // Военная мысль. 2017. № 4. С. 56-60.

3. Широков Д. В., Виноградов А. Д., Зайцев И. В., Молев А. А. Беспилотные летательные аппараты вертолетного типа – основа расширения возможностей наземной мобильной техники РЭБ // Тематический сборник «Радиоэлектронная борьба в Вооруженных Силах Российской Федерации». 2017. С. 64-66.

4. Виноградов А. Д., Зайцев И. В., Коровин А. В., Молев А. А., Мыльников В. А., Дьяконов Д. А., Завалов О. А., Туркин И. К. Широкодиапазонная станция радиоразведки на беспилотном летательном аппарате вертолетного типа легкого класса // Авионика: материалы II Всероссийской научно-практической конференции. 2017. – С. 36-43.

5. Виноградов А. Д., Зайцев И. В., Калачев В. В., Молев А. А., Мыльников В. А., Рябков П. В. Направления развития наземной мобильной техники радиоэлектронной борьбы, радио-, радиотехнической разведки и радиосвязи на основе оснащения беспилотными летательными аппаратами вертолетного типа легкого класса // Авионика: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. 2018. – С. 67-76.

6. Фетисов В. С. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / под ред. В. С. Фетисова. – Уфа: Фотон, 2014. – 217 с.

7. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А., Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты / под ред. А. М. Рембовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2017. – 424 с.

8. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A., Smolskiy S. M. Radio Monitoring Automated Systems and Their Components. – Springer, 2018. – 467 p.

9. Мельников Ю. П., Попов С. В. Радиотехническая радиоразведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. – М.: Радиотехника, 2008. – 432 с.

10. Южаков В. В. Современные методы определения местоположения источников электромагнитного излучения // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 8. С. 67-79.

11. Булычев Ю. Г., Коротун А. А., Манин А. П., Моторкин В. А. Определение координат цели по угломерным данным подвижного приемного пункта // Радиотехника. 1992. № 4. С. 14-19.

12. Вассенков А. В., Гузенко О. Б., Дикарев А. С., Изюмов В. А., Скобелкин В. Н. Способ определения координат источника радиоизлучений при амплитудно-фазовой пеленгации с борта летательного аппарата // Патент РФ № 2432580, опубл. 27.10.2011, бюл. № 30.

13. Аршакян А. А., Будков С. А., Ельчанинов А. Ф., Комаревцев Н. В. Способ определения координат источника радиоизлучения с борта летательного аппарата // Патент РФ № 2510618, опубл. 10.04.2014, бюл. №10.

14. Наумов А. С., Елизаров В. В. Определение координат источника радиоизлучения при пеленговании с летно-подъемного средства // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 7. С. 56-61.

### References

1. Vinogradov A. D., Zaitsev I. V., Molev A. A. Napravlenija razvitija nazemnoj mobil'noj tehniki radiopodavlenija radiosvjazi na osnove osnashhenija bespilotnymi letatel'nymi apparatami vertoletnogo tipa [Directions of development of ground mobile technology of radio suppression of radio communications based on equipping with unmanned aerial vehicles of helicopter type]. *Sbornik dokladov i vystupenij nauchno-delovoj programmy Mezhdunarodnogo voenno-tehnicheskogo foruma «Armija-2016»* [Collection of reports and speeches of the scientific and business program of the International Military and Technical Forum "Army-2016"], Moscow, 2016, pp. 25-40 (in Russian).

2. Vinogradov A. D., Zajcev I. V., Molev A. A. Razvitie nazemnoj mobil'noj tehniki radiopodavlenija radiosvjazi na osnove ee osnashhenija bespilotnymi vertoletami [Development of ground mobile technology for radio suppression of radio communications based on its equipping with unmanned helicopters]. *Military Thought*, 2017, no. 4, pp. 56-60 (in Russian).

3. Shirokov D. V., Vinogradov A. D., Zajcev I. V., Molev A. A. Bespilotnye letatel'nye apparaty vertoletnogo tipa – osnova rasshirenija vozmozhnostej nazemnoj mobil'noj tehniki RJeB [Unmanned aerial vehicles of the helicopter type - the basis for expanding the capabilities of ground mobile equipment for electronic warfare]. *Tematicheskij sbornik «Radioelektronnaja bor'ba v Vooruzhennyh Silah Rossijskoj Federacii* [Thematic collection "Electronic warfare in the Armed Forces of the Russian Federation"], 2017, pp. 64-66 (in Russian).

4. Vinogradov A. D., Zajcev I. V., Korovin A. V., Molev A. A., Myl'nikov V. A., D'jakonov D. A., Zavalov O. A., Turkin I. K. Shirokodiapazonnaja stancija radiorazvedki na bespilotnom letatel'nom apparate vertoletnogo tipa legkogo klassa [Wide-range radio reconnaissance station on an unmanned aerial vehicle of a helicopter type of light class]. *Avionika* [Conference "Avionika"], 2017, pp. 36-43 (in Russian).

5. Vinogradov A. D., Zajcev I. V., Kalachev V. V., Molev A. A., Myl'nikov V. A., Rjabkov P. V. Napravlenija razvitija nazemnoj mobil'noj tehniki radioelektronnoj bor'by, radio-, radiotekhnicheskij razvedki i radiosvjazi na osnove osnashhenija bespilotnymi letatel'nymi apparatami vertoletnogo tipa legkogo klassa [Directions for the development of ground mobile equipment for electronic warfare, radio and electronic reconnaissance and radio communications based on equipping with unmanned aerial vehicles of a helicopter type of a light class]. *Avionika* [Conference "Avionika"], 2018, pp. 67-76 (in Russian).

6. Fetisov V. S. *Bespilotnaja aviacija: terminologija, klassifikacija, sovremennoe sostojanie* [Unmanned aircraft: terminology, classification, state of the art]. Ufa, Foton, 2014. 217 p. (in Russian).

7. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V.A. *Avtomatizirovannyye sistemy radiokontrolya i ikh komponenty* [Automated radio monitoring systems and their components]. Moscow, Hotline-Telecom, 2017. 424 p. (in Russian).
8. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A., Smolskiy S. M. *Radio Monitoring Automated Systems and Their Components*. Springer, 2018. 467 p.
9. Mel'nikov Ju. P., Popov S. V. *Radiotekhnicheskaja radiorazvedka. Metody ocenki jeffektivnosti mestoopredelenija istochnikov izlucheniya* [Radio engineering radio intelligence. Methods for assessing the effectiveness of location of radiation sources]. Moscow, Radiotekhnika, 2008, 432 p. (in Russian).
10. Juzhakov V. V. *Sovremennye metody opredelenija mestopolozheniya istochnikov jelektromagnitnogo izlucheniya* [Modern methods for determining the location of sources of electromagnetic radiation]. *Zarubezhnaja radiojelektronika*, 1987, no. 8, pp. 67-79. (in Russian).
11. Bulychev Ju. G., Korotun A. A., Manin A. P., Motorkin V. A. *Opredelenie koordinat celi po uglomernym dannym podvizhnogo priemnogo puncta* [Determination of target coordinates by goniometric data of a mobile receiving station]. *Radiotekhnika*, 1992, no. 4, pp. 14-19 (in Russian).
12. Vassenkov A. V., Guzenko O. B., Dikarev A. S., Izjumov V. A., Skobelkin V. N. *Sposob opredelenija koordinat istochnika radioizlucheniya pri amplitudno-fazovoj pelengacii s borta letatel'nogo apparata* [Method for determining the coordinates of a radio emission source with amplitude-phase direction finding from an aircraft]. Patent Russia, no. 2432580, 27.10.2011. (in Russian).
13. Arshakjan A. A., Budkov S. A., El'chaninov A. F., Komarevcev N. V. *Sposob opredelenija koordinat istochnika radioizlucheniya s borta letatel'nogo apparata* [Method for determining the coordinates of a radio emission source from an aircraft]. Patent Russia, no. 2510618, 10.04.2014. (in Russian).
14. Naumov A. S., Elizarov V. V. *Opredelenie koordinat istochnika radioizlucheniya pri pelengovanii s letno-podyemnogo sredstva* [Determination of the coordinates of the source of radio emission during direction finding from the flight-lifting device]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2015, no. 7, pp. 56-61.

Статья поступила 31 мая 2021 г.

### Информация об авторах

*Ашихмин Александр Владимирович* – доктор технических наук, профессор. Директор обособленного структурного подразделения. АО «ИРКОС». Область научных интересов: радиомониторинг, антенны, алгоритмы приема и обработки сигналов. E-mail: info@ircos.ru

*Виноградов Александр Дмитриевич* – доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Область научных интересов: антенны, алгоритмы радиоразведки и пеленгации. E-mail: mvvad@mail.ru



*Рембовский Анатолий Маркович* – доктор технических наук. Генеральный директор. АО «ИРКОС». Область научных интересов: радиомониторинг, антенны, алгоритмы приема и обработки сигналов. E-mail: info@ircos.ru

*Сладких Владимир Александрович* – кандидат технических наук. Начальник научно-исследовательского сектора. АО «ИРКОС». Область научных интересов: радиомониторинг, цифровая обработка сигналов. E-mail: sladkihva@ircos.vrn.ru

Адрес: 129626, Россия, г. Москва, а/я 30.

---

## Method for single-position positioning of radio emission sources using an on-board radio direction finder of an unmanned aerial vehicle of a helicopter type

A. V. Ashikhmin, A. D. Vinogradov, A.M. Rembovskij, V. A. Sladkikh

**Problem statement:** Nowadays "low-power" ground-based radio emission sources (RES) with directional antennas and a limited time of radiation of radio signals are increasingly used. For such RES the efficiency of the existing ground-based mobile radio monitoring equipment, which has a limited height of placement of antenna devices, is significantly reduced. Ground-based multipoint positioning systems also become practically inoperable, since the probability of simultaneous electromagnetic availability of ground-based RES from several (at least two) reception points of multipoint positioning systems becomes extremely low. Accordingly, the development of methods for locating sources through the use of a helicopter-type unmanned aerial vehicle (HT UAV), which can significantly increase the coverage area with the detection and determination of the coordinates of the IRI, becomes very relevant. **The aim of the work** is to develop a method for single-position radio emission sources positioning using a single-position azimuth-elevation system located on a helicopter-type unmanned aerial vehicle. It is also planned to substantiate the direction-finding antenna array structure and the principles of constructing local goniometric navigation systems that provide the possibility of radio monitoring station operation on HT UAV. **Novelty:** in contrast to analogs in the proposed method the RES positioning lines are located not on the surface of the Earth, but in free space. This makes possible not only multi-position, but also single-position coordinates definition of ground-based RES. At the same time, the accuracy of RES coordinates estimation is increased and computational costs are reduced. **Result:** the implementation of the proposed method in the developed wide-range radio monitoring station on light-class UAVs provides the possibility of more accurate determination of the locations of single-position RES in comparison with known ground-based radio monitoring stations or stations located on UAVs. This improvement is maintained even if the global satellite navigation signals are not available. Compared to ground-based radio monitoring stations with multipoint positioning the radius of the working area increases by at least 4 times. **Practical relevance:** the proposed method based on HT UAVs can be used for single-position and multi-position determination of the ground-based radio emission sources coordinates.

**Keywords:** radio emission source, helicopter-type unmanned aerial vehicle, determination of coordinates, radio monitoring station.

### Information about Authors

*Aleksandr Vladimirovich Ashihmin* – holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor. Director of a separate structural unit. JSC «IRCOS». Field of research: radiomonitoring, antennas, algorithms for receiving and processing signals. E-mail: info@ircos.ru

*Aleksandr Dmitrievich Vinogradov* – holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor. Chief Researcher. Military Educational and Scientific

Center of the Air Force "Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin". Field of research: antennas, radio intelligence and direction finding algorithms. E-mail: mvvad@mail.ru

*Anatolij Markovich Rembovskij* – holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences. General Director. JSC «IRCOS». Field of research: radiomonitoring, antennas, algorithms for receiving and processing signals. E-mail: info@ircos.ru

*Vladimir Alexandrovich Sladkikh* – Ph.D. of Engineering Sciences. Head of the Research Sector. JSC «IRCOS». Field of research: radiomonitoring, digital signal processing. E-mail: sladkihv@mail.ru

Address: Russia, 129626, Moscow, POB 30.