

УДК 621.396.96

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ЗОН ДЕЙСТВИЯ ПАССИВНЫХ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ИНТЕРВАЛА ОБЗОРА ПО РАЗНОСТИ ХОДА

А.А. ДМИТРЕНКО, С.Ю. СЕДЫШЕВ

Военная академия Республики Беларусь  
Минск, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 17 апреля 2014

Представлены результаты анализа зон действия, точностных и энергетических характеристик различных вариантов реализации разностно-дальномерного алгоритма определения пространственных координат источников радиоизлучения с взаимнокорреляционной обработкой в частотной области и минимизацией интервала обзора по разности времен запаздывания в сравнении с другими пассивными системами.

*Ключевые слова:* базово-корреляционная обработка, минимизация интервала обзора по разности хода, разностно-дальномерный способ определения координат, псевдообзор по угловому положению.

### Введение

Многопозиционные пассивные радиолокационные комплексы (МП РЛК) позволяют решать весь перечень задач обеспечения безопасности воздушного пространства и управления воздушным движением. Кроме этого, МП РЛК обладают рядом преимуществ по сравнению с активными однопозиционными радиолокационными системами (РЛС), такими как скрытность, помехозащищенность, живучесть и т.д. [1–6]. По этой причине исследования, направленные на упрощение организации обзора пространства радиолокационного наблюдения (РЛН) в многопозиционных пассивных комплексах, сокращение числа приемных позиций (ПП) и объема аппаратуры, являются актуальными.

В статье приведены методика расчета и результаты сравнения зон действия комплексов пассивной локации (КПЛ) с различными способами определения пространственных координат: угломерным, разностно–дальномерным (РД) и различного рода их комбинаций. Также в статье показана перспективность применения в КПЛ минимизации интервала обзора по разности времен запаздывания между приемными позициями за счет использования априорной информации об угловом положении реальной или виртуальной диаграммы направленности антенны (ДНА). Такой способ построения КПЛ позволяет значительно упростить устройства обзора пространства РЛН, системы обнаружения источников радиоизлучения (ИРИ) и измерения их пространственных координат.

### Пассивная разностно-дальномерная система обнаружения ИРИ с минимизацией интервала обзора по разности хода

Комплексное использование угломерного и разностно–дальномерного способов может позволить повысить точность определения местоположения излучающих целей и увеличить дальность действия КПЛ [6–10]. В качестве центрального приемного пункта (ЦПП) может использоваться ПП с узконаправленной диаграммой направленности антенны (ДНА) и последовательным обзором по азимуту. В качестве периферийных позиций используются приемные пункты с невращающимися слабонаправленными ДНА.

Значение разности времен запаздывания сигналов ИРИ относительно ПП системы находится в функциональной зависимости от углового положения ИРИ (рис. 1), что позволяет осуществлять обзор не всего интервала возможных значений разности времен запаздывания, а только незначительной его части [11, 12]:

$$\Delta\tau_k(r,\beta) = \frac{1}{c} \cdot \left[ r - \sqrt{r^2 - 2r \cdot d_k \cos(\beta - \beta_{d_k})} + d_k^2 \right],$$

где  $\beta$  – значение текущего азимута ИРИ,  $\beta_{d_k}$  – азимут  $k$ -го ПП,  $d_k$  – расстояние от ЦПП до  $k$ -го ПП,  $r$  – текущая дальность,  $c$  – скорость света,  $\Delta\tau_k(r,\beta)$  – разность времен запаздывания комплексных огибающих сигналов ИРИ между ЦПП и  $k$ -м ПП. Получив данное значение, можно значительно уменьшить интервал обзора по разности времен запаздывания на выходе устройства вычисления максимума взаимнокорреляционной функции (ВКФ).

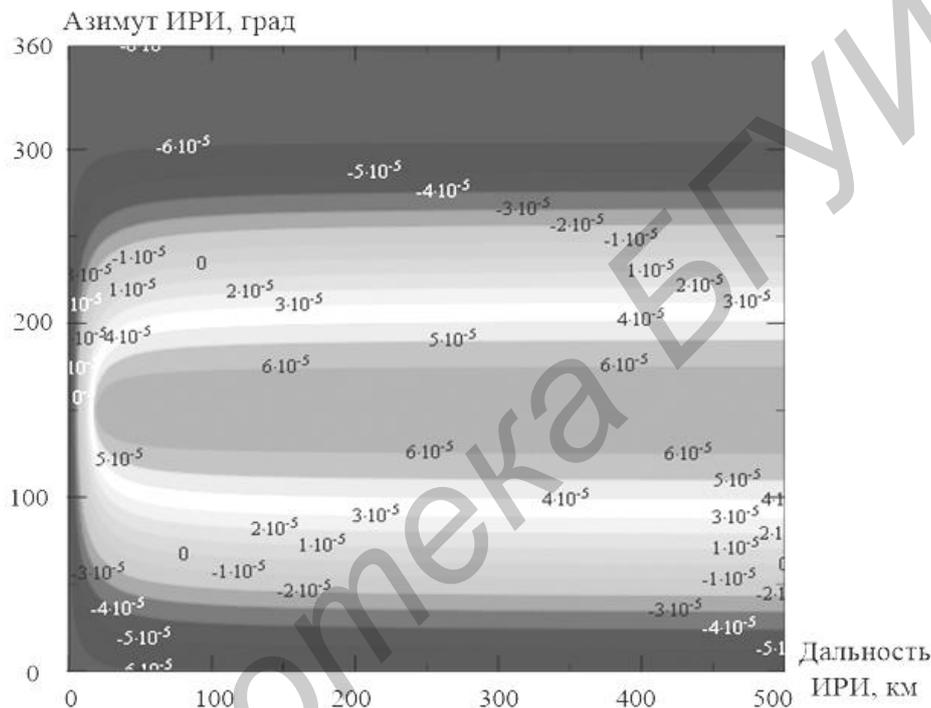


Рис. 1. Зависимость разности времен запаздывания от азимута и дальности местонахождения ИРИ для одной пары приемных позиций

Использование априорной информации об угловом положении ИРИ может позволить значительно снизить временные и вычислительные затраты на обработку сигналов [13], решить вопросы неоднозначности оценки пространственных координат ИРИ в многоцелевой ситуации и, кроме того, за счет высокого потенциала приемного канала ЦПП получение ВКФ возможно при меньших значениях отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе ПП. Все это может обеспечить выигрыш в дальности обнаружения, сравнимом с дальностью действия угломерной системы при сохранении точности определения координат ИРИ как в разностно-дальномерном КПЛ [10].

Однако введение в состав МП РЛК направленной антенной системы (АС) с последовательным обзором по азимуту влечет значительное усложнение всей системы в целом. Стоимость направленной АС с возможностью пространственного сканирования в современных комплексах достигает 70 % от стоимости всего изделия. Также, в результате последовательного обзора по азимуту, вероятность обнаружения сигналов ИРИ, работающих на излучение непродолжительное время, уменьшается.

Реализация электронного псевдообзора по азимуту в базово-корреляционном КПЛ в совокупности с применением дешевых ненаправленных АС на всех ПП системы может позволить сохранить относительно низкую себестоимость МП КПЛ и одновременно предоставит возможность сокращения интервала возможных значений разности времен запаздывания относительно разнесенных в пространстве ПП, устранения неоднозначности измерений в многоцелевой ситуации [14]. Ведение последовательного обзора по псевдоугловой

координате дает возможность также получать оценку ее значения при отсутствии реального пеленгатора в составе системы [15].

### **Сравнительный анализ пространственных и энергетических характеристик различных вариантов реализации алгоритмов разностно-дальномерной взаимнокорреляционной обработки**

С целью проведения сравнительного анализа по точностным возможностям определения пространственных координат различными способами был осуществлен модельный вычислительный эксперимент применительно к комплексам пассивной локации, реализованным на основе угломерного, разностно-дальномерного и угломерно-разностно-дальномерного (УРД) способов. Наиболее общей интегральной характеристикой того или иного способа обработки является рабочая зона КПЛ – часть пространства, в пределах которой отклонение оценок координат целей от их истинных значений не превышает максимально допустимых  $\Delta_{\max}$  значений с вероятностью не хуже заданной  $P_{\Delta}$ . При расчетах принималось, что для горизонтальной плоскости  $\Delta_{\max} = 2500$  м при  $P_{\Delta} = 0,9$ .

Характеристики антенн и приемных устройств пеленгатора с узкой ДНА и ПП с ненаправленными антеннами оставались неизменными. При реализации угломерного и угломерно-разностно-дальномерного способов система представляла собой два разнесенных в пространстве на 20 км ПП. В случае расчета зон действия разностно-дальномерных КПЛ с направленной и ненаправленной АС на ЦПП геометрия системы представляла собой три ПП в углах равностороннего треугольника с расстояниями до ЦПП 12,5 км. В качестве источников радиоизлучения рассматривались ответчик системы Мк-12 (длина волны 0,3 м, мощность передатчика 500 Вт, ненаправленная антенна) и обладающая более высокой скрытностью многофункциональная (МФ) РЛС истребителя (длина волны 0,03 м, мощность передатчика 100 Вт, излучение принимается по боковым лепесткам ДНА). Все рабочие зоны строились при идеализированных условиях, в которых не учитывались влияние кривизны земной поверхности, углы закрытия и другие факторы. Значения ОСШ принимались к обработке без учета ограниченности линейного участка тракта обработки сигналов.

Методика проведения вычислительного эксперимента включала в себя следующие этапы.

1. Задавалась пространственная конфигурация ПП КПЛ на плоскости;
2. Определялась зона исследования в виде квадрата размером  $\pm X_{\max}$  и  $\pm Y_{\max}$ ;
3. Проводилось многократное последовательное генерирование координат источника излучения равномерно во всей зоне с координатами  $\pm X_{\max}$  и  $\pm Y_{\max}$ ;
4. Производился расчет величины отношения сигнал/шум на выходе линейной части тракта обработки для каждой из сгенерированных координат ИРИ [7–9]:  $\gamma = P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \lambda^2 T_0 / N_0 (4\pi)^2 r_c^2 K_z$ , где  $P_{\text{пер}}$  – импульсная мощность передатчика,  $G_{\text{пер}}$  – коэффициент усиления передающей антенны,  $G_{\text{пр}}$  – коэффициент усиления приемной антенны,  $N_0$  – спектральная плотность мощности внутренних шумов приемника,  $K_z$  – коэффициент затухания радиоволн в атмосфере,  $\lambda$  – длина волны,  $T_0$  – длительность импульса,  $r_c$  – дальность до ИРИ.
5. Проводился расчет флуктуационных ошибок измерения углов [7–9]:  $\sigma_{\beta, \Delta} = \sqrt{\Delta\theta(1+\gamma)/4\pi\gamma^2}$ , где  $\Delta\theta$  – разрешающая способность по азимуту,  $\gamma$  – ОСШ.
6. Проводился расчет флуктуационных ошибок измерения разности хода [7–9]:  $\sigma_{\beta, \Delta} = \sqrt{c^2 \Delta\alpha^2 (1+\gamma_{\text{pp}} \gamma_{\text{cpp}}) / 4\pi(\gamma_{\text{pp}} \gamma_{\text{cpp}})^2}$ , где  $\Delta\alpha$  – разрешающая способность по разности хода,  $\gamma_{\text{pp}}$  – ОСШ на входе периферийного ПП,  $\gamma_{\text{cpp}}$  – ОСШ на входе ЦПП.
7. Проводился расчет ошибок измерения линий положения угломерных ПП [7–9]:  $\sigma_{\beta} = r_c \sigma_{\beta, \Delta}$ ;
8. Проводился расчет ошибок измерения линий положения РД ПП [7–9]:  $\sigma_{\Delta} = \sigma_{\beta, \Delta} / \left[ 2 \sin(\Psi/2) \right]$ , где  $\Psi$  – угол между направлениями на ПП от ИРИ.

9. Проводился расчет ошибок определения пространственных координат ИРИ [7–9]:

– для угломерного КПЛ (УКПЛ):  $\sigma_{\Sigma} = \frac{1}{\sin(\Psi)} \sqrt{\sigma_{1\beta}^2 + \sigma_{2\beta}^2 + 2 \cos(\Psi) \sigma_{1\beta} \sigma_{2\beta} \rho}$ ,

– для разностно-дальномерного КПЛ (РДКПЛ):  $\sigma_{\Sigma} = \frac{1}{\sin(\Psi)} \sqrt{\sigma_{1\Delta}^2 + \sigma_{2\Delta}^2 + 2 \cos(\Psi) \sigma_{1\Delta} \sigma_{2\Delta} \rho}$ ,

– для угломерно-разностно-дальномерного КПЛ (УРДКПЛ):

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{1}{\sin(\Psi)} \sqrt{\sigma_{1\Delta}^2 + \sigma_{2\beta}^2 + 2 \cos(\Psi) \sigma_{1\Delta} \sigma_{2\beta} \rho},$$

где  $\rho$  – коэффициент корреляции измерений линий положения. Для всех рассматриваемых случаев  $\rho$  принимался равным нулю по причине фактического отсутствия корреляции между измеряемыми параметрами.

10. Производилось сравнение рассчитанного значения ошибки определения пространственных координат ИРИ для каждой из сгенерированных точек на плоскости с максимально допустимым значением  $\Delta_{\max}$ . Если для  $i$ -го положения источника выполнялось условие  $\sigma_{\Sigma} \leq \Delta_{\max}$ , то такая точка включалась в рабочую зону и отображалась на рисунке.

Результаты математического моделирования представлены на рис. 2.

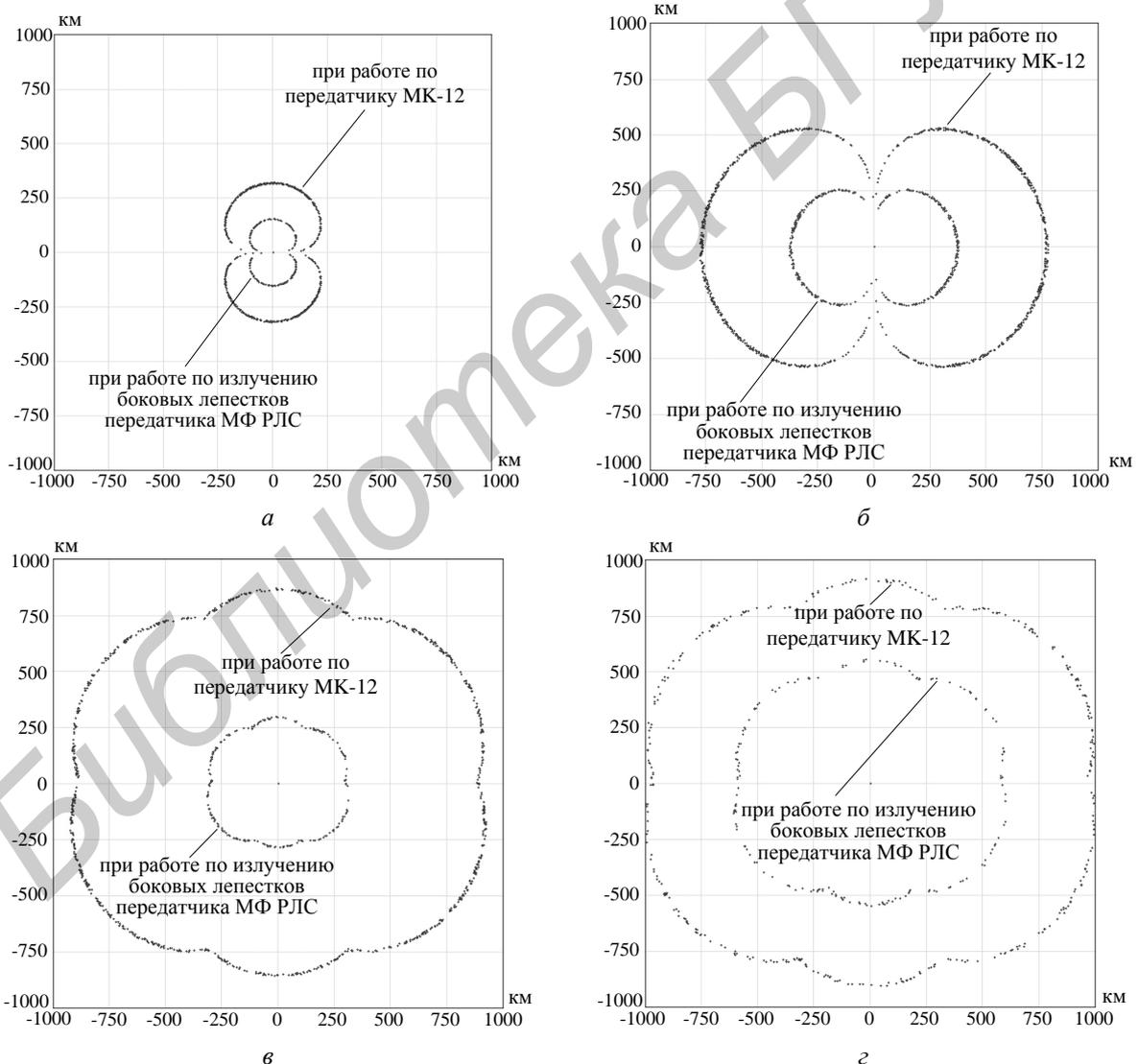


Рис. 2. Рабочие зоны КПЛ с различными способами определения пространственных координат ИРИ: *а* – угломерный; *б* – угломерно-разностно-дальномерный; *в* – разностно-дальномерный; *г* – разностно-дальномерный с высоконаправленной антенной системой на ЦПП.

Расчет величины отношения сигнал/шум (рис. 3) и значений среднеквадратичного отклонения (СКО) ошибок измерения пространственных координат (рис. 4) являлись этапами построения рабочих зон КПЛ. Условия расчета ОСШ и СКО ошибок измерения являются частными для каждого из вариантов. Однако в совокупности с анализом результатов моделирования зон действия различных типов КПЛ представление зависимостей ОСШ и СКО ошибок измерения координат от дальности до ИРИ, получаемых в КПЛ различного типа, представляет дополнительную информацию для проведения сравнительного анализа различных способов измерения пространственных координат в КПЛ.

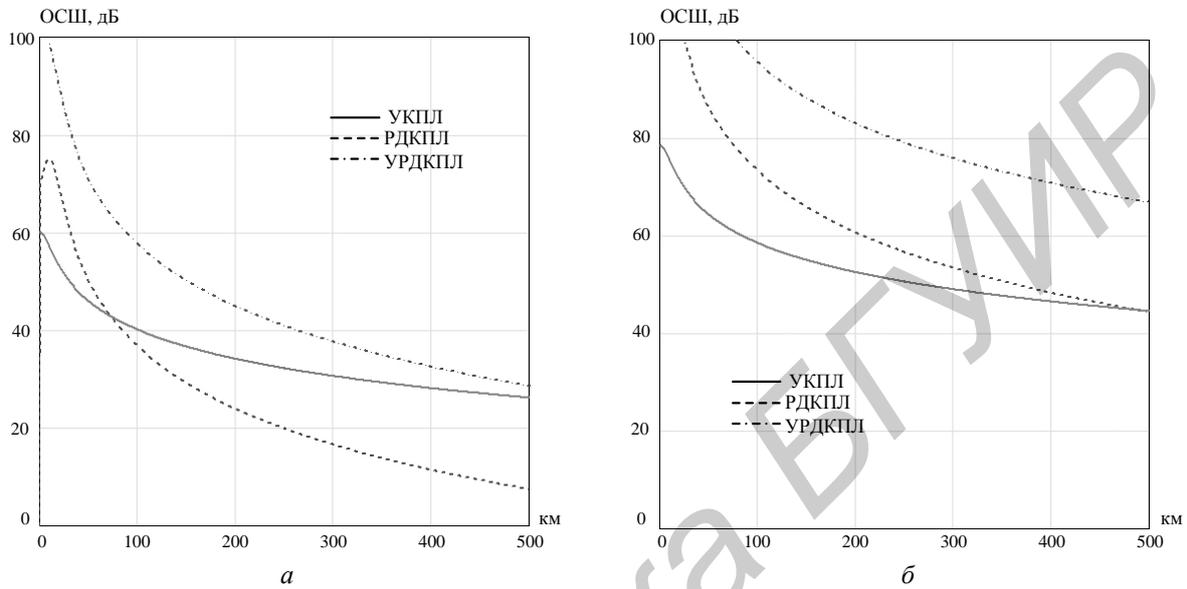


Рис. 3. Зависимость величины отношения сигнал/шум от дальности до ИРИ применительно к УКПЛ, РДКПЛ и УРДКПЛ: *a* – при работе по боковым лепесткам ДНА МФ РЛС; *б* – при работе по передатчику Мк–12

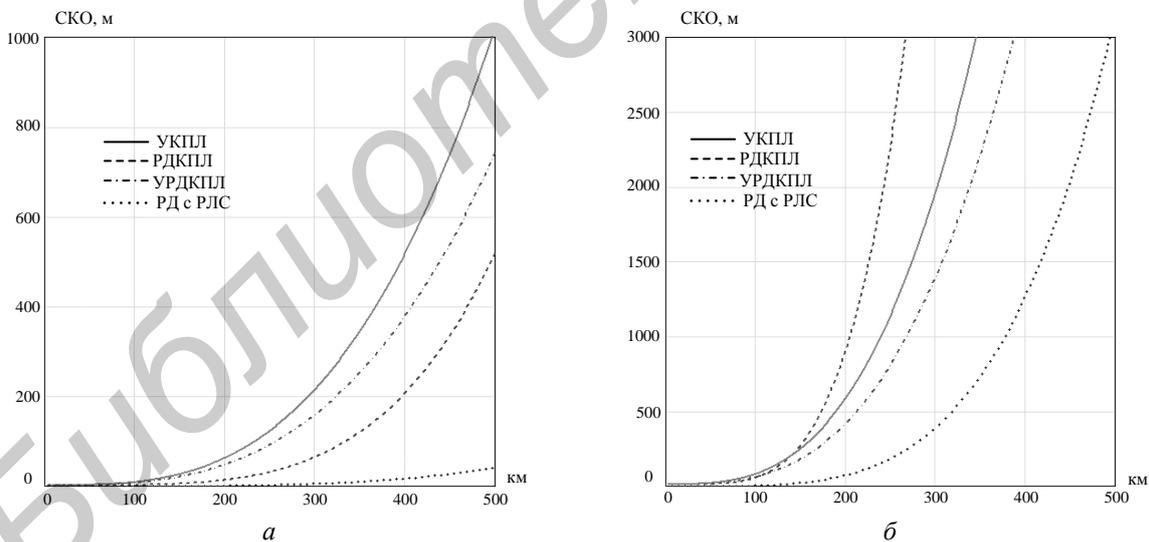


Рис. 4. Зависимость величины СКО ошибок определения пространственных координат от дальности до ИРИ применительно к УКПЛ, РДКПЛ и УРДКПЛ: *a* – при работе по боковым лепесткам ДНА МФ РЛС; *б* – при работе по передатчику Мк–12

Из представленных зависимостей видно, что угломерный КПЛ [8] является наименее точным. Разностно-дальномерный КПЛ является высокоточным комплексом, однако при достижении значения сигнал/шум менее 16...15 дБ ошибки измерений резко возрастают. Применительно к сигналам системы Мк–12 это проявляется на дальностях более 300 км, а в 3-сантиметровом диапазоне длин волн – на дальностях до 100 км. Использование радиопеленгатора с узкой ДНА в составе комплекса позволяет повысить точность определения координат и увеличить дальность обнаружения сигналов ИРИ.

## Заключение

Проведя сравнительный анализ полученных характеристик и зависимостей, можно сделать следующие выводы. Дальность обнаружения ИРИ угломерным комплексом (рис. 2, а) является наименьшей из анализируемых способов. Стоимость же комплекса может оказаться самой высокой вследствие необходимости применения двух и более пеленгаторов. Также необходимость согласования обзора пространства РЛН по угловым координатам увеличивает сложность системы.

Повысить пространственные возможности по обнаружению ИРИ представляется возможным путем реализации угломерно-разностно-дальномерного способа определения пространственных координат. Однако дальность обнаружения сигналов с малой энергией увеличивается незначительно и составляет порядка 250 км (рис. 2, б). Также вследствие использования высоконаправленной антенной системы стоимость и сложность реализации скорее всего превысят аналогичные комплексы с применением ненаправленных антенн.

Комплексы пассивной локации, использующие разностно-дальномерный способ определения пространственных координат, позволяют с высокой точностью определять местоположение ИРИ. Однако дальность обнаружения сигналов с малой энергией не превышает 270 км (рис. 2, в) и оказывается недостаточной для выполнения ряда задач.

Использование в качестве одного из приемных пунктов высоконаправленной антенной системы при реализации разностно-дальномерного способа может улучшить возможности по обнаружению сигналов с малой энергией (рис. 2, в). Также информация об угловом положении ИРИ позволяет минимизировать интервал обзора по разности времен запаздывания, устранить неоднозначность оценок пространственных координат ИРИ в многоцелевой ситуации за счет избыточности РЛИ. Реализация данного способа позволит реализовать зону действия порядка 580 км по большинству источников излучений.

Введение в базово-корреляционную систему определения разности времен запаздывания виртуальной антенной системы с имитацией вращения может позволить значительно упростить и снизить стоимость системы за счет отказа от использования реального пеленгатора при сохранении преимуществ его использования. Дальность обнаружения в этом случае уменьшается и становится сравнимой с дальностью обнаружения РД КПЛ с ненаправленными антеннами, однако вышеперечисленные преимущества использования пеленгатора остаются.

## ANALYSIS OF OPERATIVE RANGES OF PASSIVE TIME DELAY ESTIMATION OF MULTI-STATIC PRIMARY SURVEILLANCE RADAR WITH TIME DELAY SECTOR MINIMIZATION

A.A. DMITRENKO, S.Y. SEDUSHEV

### Abstract

Results of the analysis operative ranges, accuracy and energetic characteristics various passive surveillance systems with time delay sector minimization are compared.

### Список литературы

1. *Dave H., Philip G.* // Multi-Static Primary Surveillance Radar – An examination of Alternative Frequency Bands. Roke Manor Research Limited. Report № 72/07/R/376/U. July, 2008. Issue 1.2. P. 186.
2. *Kaczur M.* Passive Coherent Location. Brno, 2010.
3. *Bezousek P.* // Radioengineering. 2008. Vol. 17, № 3. P. 53–59.
4. *Zubkov A.* // Information Aspects of Multispectral Active–Passive Radio Monitoring System. TCSET'2010. Lviv–Slavske. Ukraine. February 23–27 2010. P. 96–97.
5. Special Report: Iran tests passive radar in aerial drill. [Electronic resource]. 2011. Mode of access: <http://English.news.cn>. Date of access: 05.01.2012.

6. *Савенко С.А.* Теория и техника совместной адаптивной обработки сигналов в обзорных активно-пассивных радиолокационных системах. Минск, 2000.
7. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1. Основы радиолокации. М., 1983.
8. *Охрименко А.Е.* Основы обработки и передачи информации. Минск, 1990.
9. *Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Гориков С.А. и др.* Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. М., 2007.
10. *Перетягин И.В., Полюхин И.Ф.* // Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Ч.2. Воронеж, 2006. С. 10.
11. *Дмитренко А.А., Седышев С.Ю., Гориков С.А.* // Сб. науч. трудов ГУ «НИИ ВС РБ». 2012. № 1 (1). С. 104–109.
12. *Дмитренко А.А.* // Сравнительный анализ способов построения комплексов пассивной локации, Дисс. ... маг. техн. наук. Минск, 2012.
13. *Дмитренко А.А., Седышев С.Ю., Гориков С.А.* Устройство быстрого обзора по разности времен запаздывания в корреляционно-базовых комплексах пассивной локации. Патент РБ № 9543.
14. *Дмитренко А.А., Седышев С.Ю.* // Вест. ПГУ. № 4. Серия С. Фундаментальные науки. 2014.
15. *Дмитренко А.А., Седышев С.Ю., Гориков С.А.* Устройство определения угловой координаты источника радиоизлучения в корреляционно-базовых комплексах пассивной локации. Патент РБ № 9864.

Библиотека БГУИР