

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ «ПОСТОРОННЕЙ» РЛС ДЛЯ СКРЫТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ КОРАБЛЕЙ И ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Ю. П. Мельников^а, доктор техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник

^а1-е Научно-исследовательское управление Научно-исследовательского центра ЦНИИ ВВС Министерства обороны России, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: при обнаружении групповых надводных и воздушных целей, прикрытых действующими в составе групп постановщиками активных помех, определение координат целей с помощью бортовых активных радиолокационных станций РЛС имеет недостаточную эффективность. Одним из путей решения задачи в этих условиях является использование в бортовых системах радиотехнического наблюдения отраженных сигналов РЛС противника, работающих в районе конфликта, в качестве источника электромагнитной энергии, подсвечивающей при своей работе в штатном режиме соседние цели. **Цель исследования:** количественное определение условий применения в пассивных бортовых системах радиотехнического наблюдения переотраженных сигналов конкретных типов РЛС корабельного и авиационного базирования, при которых обеспечивается определение координат целей, составляющих группу. **Методы:** получение соотношений, связывающих дальности между конфликтующими объектами с погрешностями определения координат целей, техническими характеристиками излучателей, эффективных поверхностей рассеивания целей и приемным потенциалом бортовой системы радиотехнического наблюдения. **Результаты:** построены семейства кривых для оперативной оценки возможностей применения в станциях радиотехнического наблюдения режима приема переотраженных сигналов, когда в условиях интенсивного применения противником средств радиоэлектронного подавления, при котором определение координат объектов затруднительно или вообще невыполнимо, возможно при использовании «посторонних» РЛС скрытное определение дальностей до них с требуемой точностью в достаточно широком диапазоне условий. Выбор условий включает, прежде всего, определение приоритетного ряда подсвечивающих РЛС по параметрам обнаружения объектов, критерием выбора является максимум произведения дальностей Rd (от наблюдателя до РЛС «подсвета» и от наблюдателя до объекта), когда обеспечивается прием сигналов с заданной вероятностью. Вторым условием выбора типа РЛС является вероятность получения информации о координатах объекта с заданной точностью. Приведены соотношения и примеры графиков, с помощью которых определяются величины сомножителей в произведении Rd .

Ключевые слова — скрытное радиоэлектронное наблюдение, эффективность, определение координат объектов, переотраженные сигналы.

Введение

Использование для определения координат неизлучающих объектов радиолокационных систем, в которых передатчик и приемник не совмещены в пространстве, рассматривается в целой отрасли техники — разнесенной радиолокации [1]. Однако отличие рассматриваемых ниже способов состоит в том, что в разнесенной радиолокации передающий и приемный пункты составляют единую, связанную систему, в то время как для систем скрытного определения координат объектов точное расположение подсвечивающей, в том числе так называемой «посторонней» радиолокационной станцией (РЛС), как правило, не известно, равно как и ее технические характеристики. Важным отличием является также необходимость приема сигналов от РЛС как по главному, так и по боковому излучению ее антенны.

Возможность применения в радиоэлектронной аппаратуре скрытного радиоэлектронного наблюдения различного рода дополнительных измерений сигналов, пришедших на вход приемника разными путями, для определения коор-

динат излучателей рассматривалась в ряде работ ([2–4, 7, 8] и др.), в более ранних (1978–1980 гг.) журнальных статьях автора, а также в патентах, например, [5].

В частности, статьи [2, 3] посвящены вопросам определения координат летательных аппаратов (ЛА) по переотраженным сигналам: в статье [2] и других того же автора, — их высотометров; а в статье [3] — сигналов «посторонней» РЛС — авиационной станции радиолокационного дозора типа AWACS. В работах [7] и [8] наравне с другими рассмотрены методы оценки погрешностей определения координат групповой цели, составленной из нескольких отражающих (например, надводных или воздушных) объектов, оснащенных РЛС кругового обзора. При этом задача решается в интересах авиации, флота или ПВО.

В названных статьях не приводятся соотношения для погрешностей местоопределения и не рассматриваются численные примеры, определяющие условия применения переотраженных сигналов при скрытном наблюдении за надводными и воздушными целями на море. Предлагаемая статья посвящена упомянутым задачам.

Основные соотношения при использовании переотраженных сигналов при скрытном определении координат объектов

Схема взаимного расположения объектов при решении задачи радиотехнической разведки [8, 9] представлена на рис. 1. В точке И расположена РЛС кругового обзора; в точке О — точечный отражающий объект; в точке Р — пассивный приемник сигналов; расстояние от РЛС до точечного объекта $ИО = d$; расстояние от приемника до РЛС и от приемника до отражающего объекта соответственно $РИ = R$ и $РО = D$; угол между направлениями от приемника на РЛС и отражающему объекту $ИРО = \beta$; угол между направлениями от РЛС к приемнику и отражающему объекту $РИО = \psi$. При достаточно большом удалении приемного пункта от РЛС, т. е. при $РИ \gg ИО$, можно полагать, что $ИР \approx ИВ$ и $РО \approx ВО$ (например, при $РИ = 110$ км и $ИО = 10$ км последнее равенство выполняется с погрешностью 0,34 %). В этих условиях справедливо приближенное равенство

$$\Delta \approx (ИО + ОР) - ИР = d(1 - \cos\psi), \quad (1)$$

где Δ — разность хода прямого и отраженного от объекта, расположенного в точке О, сигнала.

Предполагается, что в станции радиотехнического наблюдения измеряются параметры Δ , β и ψ , при этом угол ψ вычисляется по соотношению

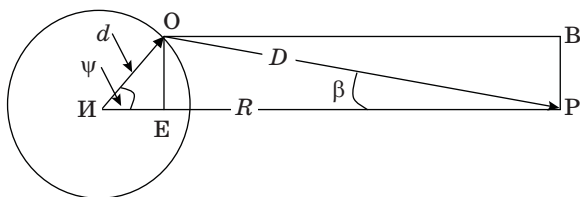
$$\psi = \frac{2\pi \Delta t}{T}, \quad (2)$$

где Δt — время задержки между моментом облучения самолета-разведчика главным лучом и моментом появления отраженных сигналов; T — период сканирования РЛС подсвета.

Для оценки погрешностей измерения дальности до самой РЛС в работе [8] рассмотрена система уравнений, вытекающая из рис. 1:

$$\left. \begin{aligned} d + D &= R + \Delta; \\ D / \sin \psi &= d / \sin \beta; \\ d^2 &= R^2 + D^2 - 2RD \cos \beta, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

которая может быть составлена для всех объектов, находящихся в зоне видимости РЛС (точка И, см. рис. 1).



■ Рис. 1. Взаимное расположение излучателя (И), отражателя (О) и разведчика (Р)

Решение системы дает

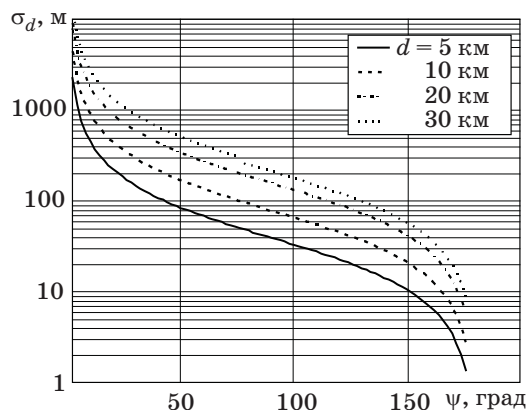
$$R_1 = \frac{\Delta \sin(\psi + \beta)}{\sin \psi + \sin \beta - \sin(\psi + \beta)}; \quad (4)$$

$$D_1 = \frac{\Delta \sin \psi}{\sin \psi + \sin \beta - \sin(\psi + \beta)}; \quad (5)$$

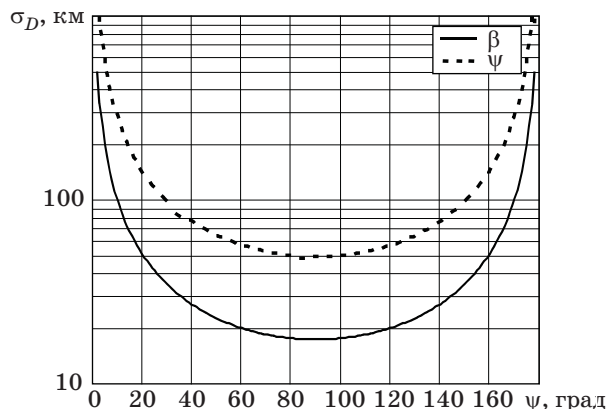
$$d_1 = \frac{\Delta \sin \beta}{\sin \psi + \sin \beta - \sin(\psi + \beta)}. \quad (6)$$

Здесь индекс «1» означает первый вариант определения дальности, соответствующий измерению двух параметров — β и Δ .

В работе [8] получены соотношения для оценки погрешностей определения дальностей между объектами d , а также расстояний R, D между ЛА-разведчиком, источником сигналов и отражателями для различных способов местоопределения. Два семейства зависимостей представлены на рис. 2 и 3.



■ Рис. 2. Погрешности определения дальностей d между объектами в зависимости от угла ψ и дальности между ними



■ Рис. 3. Погрешности определения дальности от приемного пункта до объектов в зависимости от угла ψ для разных сочетаний измеряемых углов

Результаты расчета (см. рис. 2) получены по следующим исходным данным: $D = 400$ км, $\sigma_{\Delta} = 30$ м, $\sigma_{\psi} = 0,5^{\circ}$, $E_{с.отр}/N_0 = 2$, $\theta_0 = 1,5^{\circ}$ и $d = 5, 10, 20, 30$ км.

Из графиков следует, что в большинстве случаев ($\approx 90\%$) погрешность измерения взаимного положения объектов не превышает 1 км, а в половине случаев — 200 м.

На следующем рисунке (см. рис. 3) показаны зависимости погрешностей определения дальности D от ЛА-разведчика до отражающего объекта (точка O , см. рис. 1). Кривые рассчитывались по формулам [8] для разных способов местоопределения при $D = 400$ км, $d = 20$ км, $\sigma_{\psi} = 5 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_{\beta} = 10^{-3}$, $\sigma_{\Delta} = 30$ м. Погрешности измерения угла β приняты существенно меньшими, чем погрешности угла ψ , из-за значительно меньшего влияния на процесс измерения угла β нестабильностей положений элементов антенны, нестабильностей фазовых трактов и др.

Из графиков, в частности, следует, что для принятых исходных данных относительная погрешность измерения дальности D не более 10 % до одного из двух объектов, находящихся в зоне взаимной радиолокационной видимости, обеспечивается в 85 % случаях при измерении параметров Δ , ψ , β и при одной работающей РЛС. Та же погрешность имеет место при измерении Δ_1 , Δ_2 и β при двух работающих РЛС. Измерение параметров Δ_1 , Δ_2 и ψ обеспечивает 10 % погрешности в 60 % случаях взаимного положения объектов.

Приведенные оценки разрешают полагать, что использование в станциях, размещенных на ЛА, скрытного наблюдения позволит получать достаточно высокие для пассивных средств точности в условиях интенсивного применения средств радиоэлектронной борьбы, когда в бортовой РЛС ЛА канал дальности может быть забит помехами. Однако для реализации этих возможностей необходимо соблюдение по крайней мере двух условий: наличия в зоне наблюдения хотя бы одной работающей на излучение достаточно мощной

РЛС, например кругового обзора, и способности станции скрытного наблюдения принимать и анализировать сигналы этих РЛС подсвета.

Основные характеристики авиационных и корабельных РЛС, которые могут быть использованы в качестве «подсвечивающих»

В составленной по данным работ [9] и др. табл. 1 приводятся основные характеристики четырех обобщенных типов авиационных и корабельных РЛС, излучение которых может быть использовано в качестве «подсвечивающего» при решении задачи скрытного наблюдения при действиях на море. Основными качествами, которые необходимо учитывать при выборе РЛС подсвета, являются:

- высокий энергетический потенциал;
- широкая зона обзора;
- непрерывная (или с минимальными паузами) работа на излучение;
- возможность приема бокового излучения и др.

Энергетические ограничения

В качестве объекта наблюдения может быть ЛА или боевой корабль, на которых отсутствуют работающие на радиоизлучение РЛС. Станция скрытного наблюдения принимает сигналы в широком секторе обзора (в идеале, в круговую) как по главному направлению излучения РЛС (точка I , см. рис. 1), так и по боковому, измеряет угол β между направлениями прихода прямого (излучаемого по боковым лепесткам антенны РЛС) и отраженного сигнала, а также разность времени Δ_t между приходом этих сигналов. Рассмотрим энергетические соотношения при наблюдении за неизлучающими объектами с использованием сигнала подсвета от одной из типовых РЛС (см. табл. 1). Оценку необходимого приемного потенциала станции радиотехнического наблюдения необходимо выполнить для двух приемных ка-

■ Таблица 1. Основные характеристики РЛС, используемых для подсвета целей

№ типовой РЛС	Носитель	Диапазон частот, ГГц	Импульсная мощность, кВт	Ширина диаграммы направленности по азимуту, град	Коэффициент усиления антенны, дБ	Уровень боковых лепестков, дБ	Период сканирования антенны, с
1	Корабль	~ 3	1000	1	30*	-25*	10*
2		~3	4000	1	ФАР, 38*	-25*	Переменный
3	Самолет	~0,43	1000	7	25	-20*	12
4	радиолокационного дозора	~3,3	900	1	37,4	-50*	10

* Получено приближенно на основании данных о габаритах антенн, учета влияния факторов их размещения на носителях и общих положений, касающихся фазированных антенных решеток (ФАР), и приведенных в работе [6].

налов: канала приема сигналов подсвечивающей РЛС, отраженных от неизлучающего объекта, и канала приема прямых сигналов этой же РЛС, излучаемых по боковому направлению в сторону ЛА-разведчика. Прием этих сигналов, используемых в качестве опорных в разнесенном способе местоопределения, необходим для измерения основного параметра способа — разности хода сигналов Δ , прошедших разными путями [8].

При радиолокации с вынесенной точкой приема [1] требуемый для приема отраженных сигналов потенциал станции радиотехнического наблюдения определяется как

$$\frac{G_2}{P_2} = \frac{(4\pi)^3 d^2 R^2 (c/\text{ш})_{\text{потр}}}{P_1 G_1 \lambda^2 \sigma \eta_1 \eta_2}, \quad (7)$$

где G_2 — коэффициент усиления антенны станции наблюдения; P_2 — чувствительность приемника при отношении «с/ш» = 1; d — дальность от разведываемого объекта до ЛА-разведчика; R — дальность от РЛС подсвета до ЛА-разведчика; $(c/\text{ш})_{\text{потр}}$ — потребное для станции наблюдения отношение сигнал/шум на его входе; $P_1 G_1$ — энергетический потенциал РЛС подсвета; λ — длина волны; σ — эффективная поверхность рассеяния разведываемого объекта с учетом различия в направлениях облучения и приема; η_1, η_2 — коэффициенты ослабления в антенно-фидерных трактах.

Подстановка в соотношение (1) технических характеристик РЛС третьего типа (см. табл. 1) дает при $\eta_1 \eta_2 = 0,5$; $(c/\text{ш})_{\text{потр}} = 5$; $G_2/P_2 = 10^{13}$ 1/Вт и $\sigma = 10 \text{ м}^2$ (например, палубный вертолет) значение $Rd = 885 \text{ км}^2$. Последнее означает, что в пределах величин Rd , не превышающих 885 км^2 , отраженный от цели сигнал подсвечивающей РЛС будет обнаруживаться приемником наблюдения, размещенным в точке Р (см. рис. 1).

Значения произведения для других типовых РЛС, помещенных в табл. 1, приводятся в табл. 2 для двух значений эффективной поверхности рассеяния цели (1 и 10 м^2).

Отметим, что доступность переотраженных сигналов вычислялась при достаточно высоком приемном потенциале, равном 10^{13} Вт, что пред-

полагает, например, наличие в станции наблюдения приемника с чувствительностью порядка -110 дБ/Вт [9] и специальной антенны с усилением $10-20 \text{ дБ}$.

Для оценки возможностей канала приема прямых сигналов РЛС подсвета, излучаемых по боковому направлению в сторону самолета-разведчика, предполагалась чувствительность, равная традиционной [9] (порядка -70 дБ/Вт). Дальность обнаружения при этом рассчитывалась по известному соотношению

$$D = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_1 \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot v}{P_2}}, \quad (8)$$

где v — коэффициент ослабления бокового излучения (предпоследний столбец табл. 1). Результаты расчетов для четырех типов РЛС подсвета приведены в последнем столбце табл. 2.

Рассмотрение характеристик энергетической доступности, приведенных в табл. 2, свидетельствует, что наибольшие ограничения по дальностям создает недостаток энергетики при обнаружении переотраженных сигналов от воздушных целей, имеющих сравнительно небольшие эффективные поверхности рассеяния.

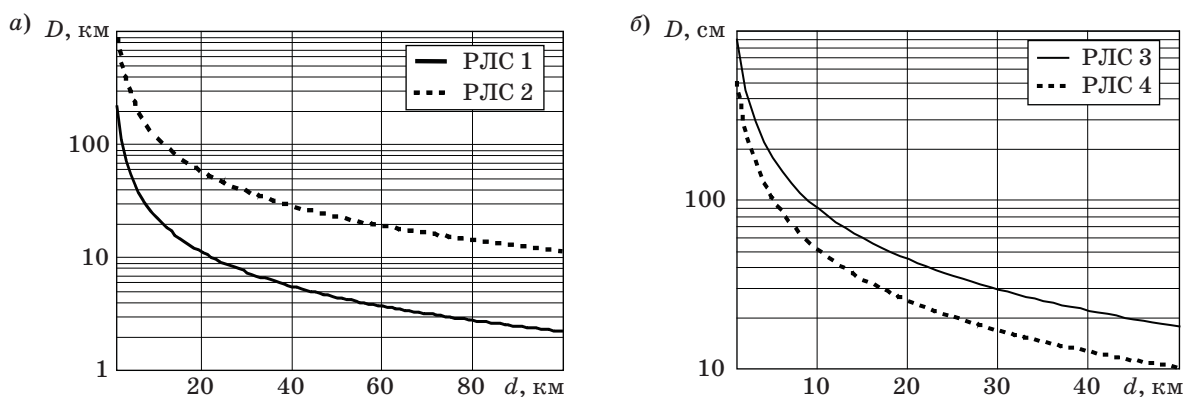
Эти ограничения должны учитываться при планировании вариантов решения задач разведки надводных и воздушных объектов на море. На рис. 4, а, б представлены графические построения, которые могут служить исходным материалом для такого планирования.

Расчеты проведены на основании данных табл. 2 для целей с $\sigma = 10 \text{ м}^2$ (корабельные вертолеты и самолеты). Из рис. 4, а, в частности, следует, что при использовании в качестве РЛС подсвета станции 1-го типа или другой РЛС кругового обзора с энергетическим потенциалом не менее 90 дБ/Вт воздушные цели в радиусе $1-2 \text{ км}$ от авианосца могут быть обнаружены станцией наблюдения самолета-разведчика на дальности не менее 100 км .

Использование в качестве РЛС подсвета многофункциональной корабельной станции 2-го типа позволит в несколько раз увеличить дальности обнаружения воздушных целей при дальности

■ Таблица 2. Дальности доступности отраженных и прямых сигналов обобщенных типов РЛС, используемых для подсвета целей

№ типовой РЛС	Носитель	Rd для $\sigma = 1 \text{ м}^2$, км ²	Rd для $\sigma = 10 \text{ м}^2$, км ²	Дальность обнаружения бокового излучения, км
1	Корабль	70	221	45
2		360	1140	25
3	Самолет радиолокационного дозора	280	885	313
4		160	506	7



■ Рис. 4. Дальности энергетической доступности переотраженных сигналов корабельных (а) и авиационных (б) РЛС при обнаружении воздушных целей

до объектов разведки не менее 200 км. В связи с нерегулярностью обзора пространства антенной системой этой РЛС, построенной на ФАР, определение угла ψ по соотношению (2) не может быть использовано, необходим другой комплекс измерений, учитывающий указанное обстоятельство.

Результаты расчетов дальности энергетической доступности для РЛС авиационного базирования приведены на рис. 4, б.

Особенность этого случая применения метода обнаружения воздушных целей, не имеющих на борту собственных источников активного излучения, состоит в том, что дальность до РЛС подсвета D определяется не маршрутом самолета-разведчика, как в случае рис. 4, а, а маршрутом самолетов радиолокационного дозора противника, координаты которых должны быть предварительно определены по известным алгоритмам местоопределения движущихся излучающих воздушных целей [8].

Заключение

Сочетание приема бортовой станцией скрытного радиоэлектронного наблюдения прямых и отраженных от неизлучающих объектов сигналов с измерением разности времени между моментами прихода этих сигналов, а также пеленгов дает возможность, как показано в работе, определить дальность до объектов со сравнительно высокой точностью в достаточно широком диапазоне условий. В статье рассмотрены типовые варианты

высокопотенциальных РЛС кругового обзора корабельного и воздушного базирования, особенности использования их излучений и ограничения, построены семейства кривых для оперативной оценки возможностей применения в станциях радиотехнического наблюдения режима приема переотраженных сигналов, когда в условиях интенсивного применения противником средств радиоэлектронного подавления, при котором определение координат объектов становится затруднительным или вообще невозможным, появляется возможность скрытного определения дальностей до них в достаточно широком диапазоне условий. Выбор условий включает, прежде всего, определение приоритетного ряда подсвечивающих РЛС по параметрам обнаружения объектов, критерием выбора является максимум произведения дальностей Rd (от излучателя до РЛС подсвета и от наблюдателя до объекта), когда обеспечивается прием сигналов с заданной вероятностью. Вторым условием выбора типа РЛС является вероятность получения информации о координатах объекта с заданной точностью. Величины сомножителей в произведении Rd определяются при использовании соотношений и графиков, приведенных в статье. Материал статьи может быть использован при оценке эффективности выполнения задач скрытного радиоэлектронного наблюдения в условиях интенсивного применения средств радиоэлектронной борьбы обеими конфликтующими сторонами.

Литература

1. Аверьянов В. Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. — Минск: Наука и техника, 1978. — 184 с.
2. Ягольников С. В. Разностный метод определения координат ЛА по сигналам их высотомеров одним

бортовым средством разведки // Радиотехника. 1997. № 5. С. 49–52.

3. Гладков В. Е. Обнаружение целей с использованием «постороннего» источника излучения // Радиотехника. 1997. № 9. С. 42–44.
4. Мельников Ю. П. Методы оценки погрешностей пассивного определения координат объ-

ектов при использовании сигналов удаленной обзорной РЛС // Радиотехника. 2000. № 9. С. 27–32.

5. Патент США № 4.176.357 от 27.11.79.
6. Radar Handbook/Editor in Chief Skolnik Merrill I. (Merrill Ivan). Third Edition. — The McGraw-Hill Companies, 2008.
7. Лешко Н. А., Цыбульник А. Н. Радиотехническая разведка и скрытная радиолокация. — Ярославль: ЯГПУ им. К. Д. Ушинского, 2006. — 152 с.
8. Мельников Ю. П. Воздушная радиотехническая разведка (методы оценки эффективности). — М.: Радиотехника, 2005. — 304 с.
9. Перунов Ю. М., Мацукевич В. В., Васильев А. А. Зарубежные радиоэлектронные средства / под ред. Ю. М. Перунова. В 4 кн. Кн. 1: Радиолокационные системы. — 336 с.; Кн. 2: Системы радиоэлектронной борьбы. — 352 с.; Кн. 3: Антенны. — 304 с. — М.: Радиотехника, 2010.

UDC 621.396.969

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.108

Assessing the Efficiency of using Multipath Signals of an «Outside» Radar for Covert Determination of Coordinates of Ships and Aircrafts

Melnikov Y. P.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, Leading Researcher, ypurusul@gmail.com

^a1st Research Department of Central Air Force Research Institute, Ministry of Defense, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: When you detect a group of surface and air targets covered by active noise generators operating in groups, the on-board active radars cannot effectively determine the target coordinates. To solve this problem, the on-board electronic surveillance systems can use multipath signals from the adversary's radars working in the conflict area as a source of electromagnetic energy, in its normal mode illuminating the nearby targets. The purpose of this work is to quantitatively define how passive airborne electronic surveillance systems can use multipath signals from particular types of radar on ships and aircrafts, specifying the coordinates of the targets which make up the group. **Methods:** We have to obtain the correlations which would bind the distances between the conflicting objects with the errors in specifying the target coordinates, technical characteristics of radiators, effective surface of target scattering and the input capacity of the on-board electronic surveillance system. **Results:** Families of curves have been built to rapidly assess the possibility for electronic surveillance stations to function in the mode of receiving multipath signals when, under heavy adversary's jamming which makes the specification of the target coordinates difficult or impossible, there are ways to use «outside» covert radars to estimate distances to the targets with the required accuracy in a wide range of conditions. The choice of conditions primarily involves defining the priority number for the illuminating radars by object detection parameters; the choice criterion is the maximum of product Rd (the factors are the distances from the observer to the illumination radar and from the observer to the object) when the signal reception is provided with a given probability. The second condition for choosing the radar type is the possibility to obtain information about the coordinates of the object with the specified accuracy. The values of the factors in the product Rd are determined using the ratios and graphs whose examples are listed in the article.

Keywords — Covert Surveillance Avionics, Efficiency, Object Coordinate Determination, Multipath Signals.

References

1. Aver'ianov V. Ya. *Raznesennye radiolokatsionnye stantsii i sistemy* [Separated Radars and Systems]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1978. 184 p. (In Russian).
2. Yagol'nikov S. V. Difference Method for Determining the Coordinates of the Aircraft on the Signals their Altimeters one Airborne Reconnaissance. *Radiotekhnika*, 1997, no. 5, pp. 49–52 (In Russian).
3. Gladkov V. E. Target Detection Using the «Parties» Source. *Radiotekhnika*, 1997, no. 9, pp. 42–44 (In Russian).
4. Melnikov Y. P. Methods of Estimation Errors Passive Positioning of Objects when Using Remote Surveillance Radar Signals. *Radiotekhnika*, 2000, no. 9, pp. 27–32 (In Russian).
5. Patent USA No 4.176.357 from 27.11.79.
6. *Radar Handbook*. Editor in Chief Skolnik Merrill I. (Merrill Ivan). Third Edition. The McGraw-Hill Companies, 2008.
7. Leshko N. A., Cybul'nik A. N. *Radiotekhnicheskaja razvedka i skrytnaja radiolokatsiia* [Electronic Intelligence and Covert Radar]. IaGPU im. K. D. Ushinskogo Publ., 2006. 152 p. (In Russian).
8. Melnikov Y. P. *Vozdushnaia radiotekhnicheskaja razvedka (metody otsenki effektivnosti)* [Air-Electronic Reconnaissance (Methods for Evaluating the Effectiveness of)]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2005. 304 p. (In Russian).
9. Perunov Yu. M., Macukevich V. V., Vasil'ev A. A. *Zarubezhnye radioelektronnye sredstva* [Foreign Radio-Electronic Means]. Ed. Yu. M. Perunov. Vol. 1. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar Systems]. 336 p. Vol. 2. *Sistemy radioelektronnoi bor'by* [Electronic Warfare Systems]. 352 p. Vol. 3. *Antenny* [Antennas]. 304 p. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. (In Russian).