



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.10>

УДК: 621.372.54

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ОБЗОРНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ИНВЕРСНЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ

В.П. Бердышев<sup>1</sup>, В.В. Осипов<sup>2</sup>, А.В. Сухов<sup>3</sup>, В.И. Филатов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ВА ВКО им. Г.К. Жукова,  
170022, Тверь, ул. Жигарева, д.50

<sup>2</sup>Центр визуализации и спутниковых информационных технологий,  
ОРВС ФГУ ФНЦ НИИ Системных исследований РАН  
117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1

<sup>3</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

<sup>4</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2023 г.

**Аннотация.** В статье представлена модель оценки вероятности обнаружения воздушных объектов в условиях применения модернизированной радиолокационной станции с инверсным синтезированием апертуры при решении задач обнаружения и разрешения таких объектов. Приведены результаты компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** вероятность обнаружения, обзорная радиолокационная станция, инверсное радиолокационное синтезирование апертуры.

**Финансирование:** Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН «Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)» по теме № FNEF-2022-0022.

**Автор для переписки:** Осипов Владислав Вадимович, [kt-mati@mail.ru](mailto:kt-mati@mail.ru)

## Введение

С целью своевременного обнаружения воздушных объектов (ВО) с помощью наземных радиотехнических средств (РТС) малых, средних и больших высот, формируется радиолокационное поле измерительной информации. К таким РТС могут относиться радиолокационные станции (РЛС) метрового диапазона волн (МДВ). Преимущества использования РЛС МДВ являются: большая дальность обнаружения воздушных объектов за счет использования отраженной от земли электромагнитной энергии (ЭМЭ); меньшее затухание ЭМЭ в атмосфере; большая и более сглаженная по ракурсу эффективная поверхность рассеивания (ЭПР) ВО; слабое влияние технологии малозаметности (стелс-технологии) на ЭПР и дальность обнаружения ВО [1, 2].

Недостатки использования РЛС МДВ связаны с: повышенными требованиями к размерам подстилающей поверхности; невысокими разрешающими способностями и точностью определения угловых координат; сложностью определения высоты и угла места ВО.

Новизна излагаемых результатов определяется следующим:

- направления работ по улучшению ТТХ РЛС предлагается сосредоточить на использование широкополосных сигналов для реализации разрешения по дальности 5-10 м и, как следствие, распознавания нескольких ВО;

- конкретными путями достижения высокого разрешения по дальности и азимуту в РЛС МДВ для получения дальностных и азимутальных портретов ВО в интересах распознавания объектов предложено использование многочастотных зондирующих сигналов (МЧЗС) и инверсного радиолокационного синтезирования апертуры (ИРСА), а также алгоритмов формирования двумерного радиолокационного изображения ВО;

- полученные результаты представлены с результатами имитационного математического моделирования двумерных радиолокационных изображений (ДРЛИ) ВО в РЛС МДВ.

Актуальность исследования обуславливается необходимостью обосновать и доказать результатами математического моделирования возможность

повышения вероятности правильного обнаружения ВО при использовании режима инверсного радиолокационного синтезирования апертуры (ИРСА).

## 1. Постановка задачи исследования

Обнаружение когерентных сигналов со случайной начальной фазой и флюктуирующих со случайными амплитудой и начальной фазой производится путем сравнения с порогом модульных значений корреляционного интеграла вида  $Z = \sqrt{z_1^2 + z_2^2}$ , где  $z_1$  и  $z_2$  соответственно действительная и мнимая часть комплексного числа. При этом, в случае наличия только помехи условное распределение плотности вероятности подчиняется закону Релея (1), а при наличии как помехи и сигнала – обобщенному закону Релея (2) [3]

$$p_n(Z) = \frac{Z}{v_0^2} \exp[-Z^2 / 2v_0^2], \quad (1)$$

$$p_{cn}(Z) = \frac{\frac{Z}{v_0^2} \exp\left[-\frac{Z^2 + \mathcal{E}}{2v_0^2}\right]}{\left[\frac{Z\mathcal{E}}{v_0^2}\right]}, \quad (2)$$

где  $v_0^2$  – дисперсия случайной величины  $z$  с нулевым математическим ожиданием,  $I[(Z\mathcal{E})/v_0^2]$  – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $\mathcal{E}$  – энергия сигнала.

Ключевым параметром, ограничивающим стабильное обнаружение маловысотных и малоразмерных объектов является необходимое отношение сигнал/шум  $q$ , которое определяется требуемой вероятностью правильного обнаружения  $P_{ПО}$  при заданной ложной тревоге  $P_{ЛТ}$ , которые, в свою очередь, определяются статистическими характеристиками сигнала цели и шумов. При этом, такие цели отличаются сложной конфигурацией. Наличие отдельных плоскостей, уголков, элементов с резонансным характером отражений приводит к тому, что в элемент разрешения попадает малое число отражателей. Поэтому, рассматривая ЭПР как случайную величину, плотность ее вероятности для ВО обычно характеризуется логнормальным законом или законом распределения

« $\chi^2$  с четырьмя степенями свободы» (3), а плотность вероятности мощности помехового сигнала  $P_{\Pi}$  в элементе разрешения обычно характеризуется экспоненциальным законом (4) [9]:

$$p\left(\frac{\sigma}{\sigma_u}\right) = \frac{4\sigma}{\sigma_u^2} \exp\left[-\frac{2\sigma}{\sigma_u}\right]; \quad (3)$$

$$p\left(\frac{P}{P_n}\right) = \frac{1}{P_n} \exp\left[-\frac{P}{P_n}\right]. \quad (4)$$

## 2. Модель оценки вероятности обнаружения ВО

Характеристики обнаружения отражений при медленных флюктуациях сигнала со случайной начальной фазой и амплитудой представлены на рис. 1, где изображены зависимости вероятности правильного обнаружения  $P_{\Pi O}$  от отношения сигнал/помеха  $q = P_{\Pi} / P_{\Pi}$  при заданной вероятности ложной тревоги  $P_{\Pi T} = 10^{-6}$  и  $P_{\Pi T} = 10^{-4}$  в одном элементе разрешения и различном числе  $N_H$  обзоров РЛС, получены по известной формуле [6, с.163]:

$$P_{\Pi O} = P_{\Pi T} \left[ \frac{1}{1 + N_H (q^2/2)} \right]. \quad (5)$$

Из анализа зависимостей, показанных на рис. 1, видно, что для обеспечения  $P_{\Pi O} = 0,8$  требуется отношение сигнал/помеха  $q_{TP} = 11$  дБ, а  $P_{\Pi O} = 0,5$  – отношение  $q_{TP} = 6$  дБ в одном элементе разрешения при однократном и, например,  $q_{TP} = 8$  дБ при четырехкратном обзоре.

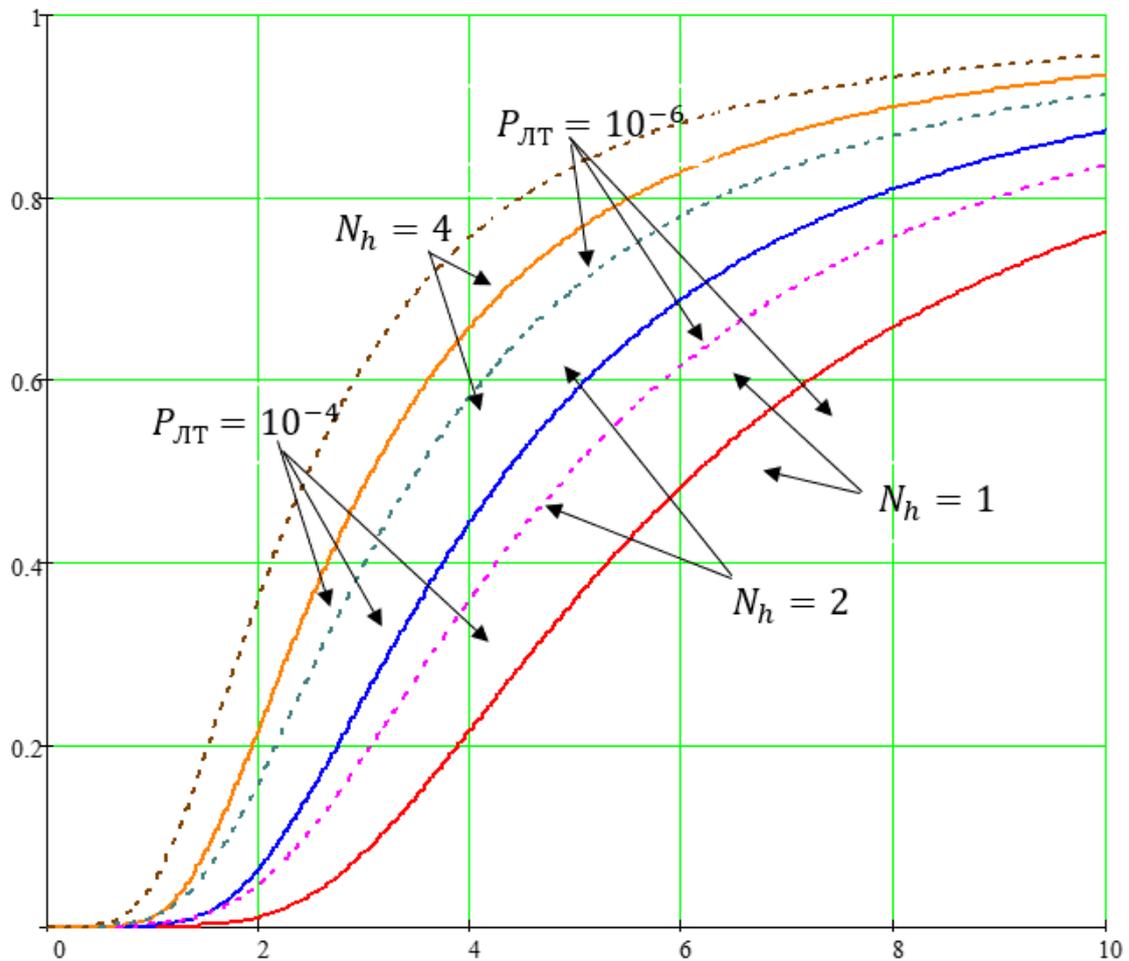


Рис. 1. Характеристики обнаружения РЛС ( $P_{ПО}(q)$ ).

Указанные значения  $q$  позволяют обосновать требования и возможности обнаружения РЛС при максимальной дальности с синтезированием апертуры. При синтезировании апертуры происходит когерентное накопление  $N_k = F_{П} T_C$  импульсов, где  $F_{П}$  – частота повторения, а  $T_C$  – время синтезирования апертуры, что в  $N_k$  раз увеличивает отношение сигнал/шум по сравнению со стандартными режимами функционирования РЛС. Время синтезирования  $T_C$  определяется требуемым линейным разрешением РЛС по азимуту  $\delta l_{\beta}$  равно

$$T_C = \frac{\lambda R_0}{2\delta l_{\beta} V_t \sin \theta_H}, \quad (6)$$

а число накапливаемых импульсов  $N_k$  равно [4]:

$$N_k = \frac{\lambda R_0 F_{П}}{2\delta l_{\beta} V}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – длина волны, м;  $R_0$  – максимальная дальность обнаружения РЛС, м;  $V_t$  – тангенциальная скорость полета, м/с;  $\theta_H$  – курсовой угол наблюдения  $90^\circ$  ( $\sin \theta_H = 1$  – боковой обзор).

В соответствии с [4] отношение мощности сигнала к мощности внутреннего шума при инверсном радиолокационном синтезировании апертуры определяется:

$$q_{РСА} = \frac{P_{CP} G^2 \lambda^2 \sigma_{Ц} N_k}{(4\pi)^3 R_0^4 k T K_{Ш} L_{\Sigma}}; \quad (8)$$

а выражение для максимальной дальности обнаружения  $R_0$  при условии, что мощность внешних помех меньше мощности внутренних шумов приемника РЛС с ИРСА определяется:

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{P_{CP} G^2 \lambda^3 \sigma_{Ц}}{2(4\pi)^3 q_{ТР} k T K_{Ш} L_{\Sigma} \delta l_{\beta} V_t \sin \theta_H}}; \quad (9)$$

где  $P_{CP} = P_{И} \tau_{И} F_{П}$  – средняя мощность излучения, Вт;  $G$  – коэффициент усиления антенны;  $\sigma_{Ц}$  – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) цели, м<sup>2</sup>;  $kT = 4 \cdot 10^{-21}$  Вт /Гц;  $K_{Ш}$  – коэффициент шума приемника;  $L_{\Sigma}$  – суммарные потери в высокочастотном тракте при распространении волны и при обработке сигнала;  $\delta l_{\beta}$  – линейная разрешающая способность ИРСА по азимуту, м;  $V_t$  – тангенциальная скорость полета, м/с;  $\sin \theta_H = 1$  (боковой обзор).

Как видно из (9), требуемое отношение сигнал/шум в РЛС с ИРСА уменьшается пропорционально  $R_0^3$ , а не  $R_0^4$ , как в обычной РЛС. Это объясняется увеличением числа когерентно накапливаемых импульсов  $N_k$  с увеличением дальности для обеспечения постоянства разрешения по азимуту. Суммарные потери  $L_{\Sigma}$ , кроме потерь в высокочастотном тракте и при распространении электромагнитных волн, учитывают также потери при обработке сигналов.

### 3. Результаты компьютерного моделирования

Рассмотрим определение дальности обнаружения для случаев обнаружения мало – ( $V_t \leq 100$  м/с – аэростаты, вертолеты, дельтопланы),

средне – ( $V_t$  от 100 м/с до 1000 м/с) и высокоскоростных ВО ( $V_t$  более 1000 м/с), при различных значениях ЭПР.

Расчеты, проведенные по (5) – (9) при стандартной РЛС без ИРСА и с ИРСА: средняя мощность передатчика  $P_{cp} = 1800$  Вт; коэффициент усиления антенны  $G = 700$ ; длина волны  $\lambda = 1$  м; требуемое отношение сигнал/помеха  $q_{TP} = 6$  дБ (согласно рисунку 1 –  $P_{ПО} = 0,5$  и  $P_{ЛТ} = 10^{-6}$ );  $kT = 4 \cdot 10^{-21}$  Вт /Гц; коэффициент шума приемника  $K_{Ш} = 3,5$  дБ (6); суммарные потери при обработке  $L_{\Sigma} = 20$  дБ (100); линейные разрешающие способности ИРСА  $\delta l_{\beta} = \delta r = 5$  м;  $\sin \theta_H = 1$  (боковой обзор) при различных частотах повторения  $F_{П}$ , тангенциальных скоростях полета  $V_t$  и значений ЭПР  $\sigma_{ц}$  показаны на рисунках 2, 3, 4 и 5.

Возможности стандартной РЛС без применения режима ИРСА по обнаружению различных ВО показаны на рисунке 2. Из рисунка видно, что дальность обнаружения при заданном уровне  $P_{ПО}$  в РЛС без применения режима ИРСА не зависит от тангенциальной составляющей скорости полета ВО.

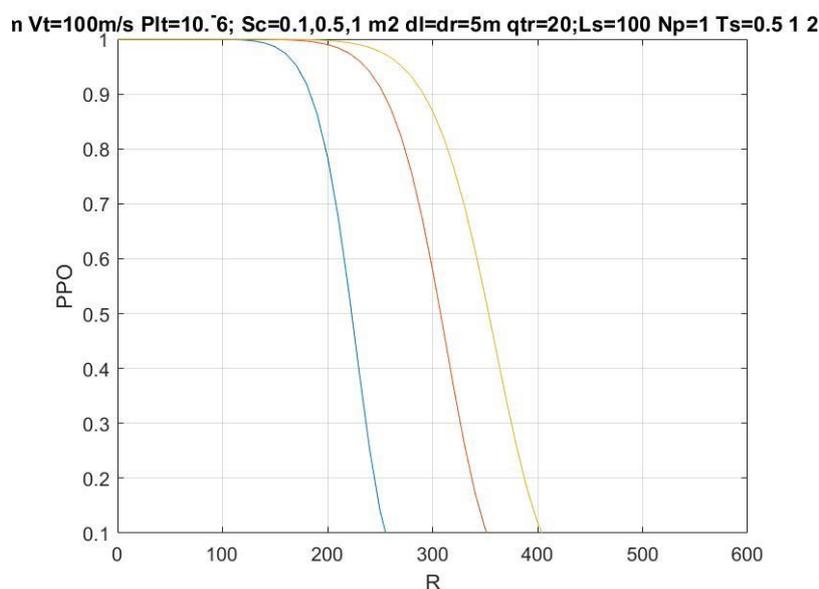


Рис. 2. Зависимости  $R_0$  от  $V_t$  (а) и  $R_0$  от  $\sigma_{ц}$  (б) для РЛС без ИРСА при различных уровнях сечения  $P_{ПО}$ .

Зависимость вероятности правильного обнаружения РЛС без и с ИРСА от дальности по цели представлена на рисунке 3.

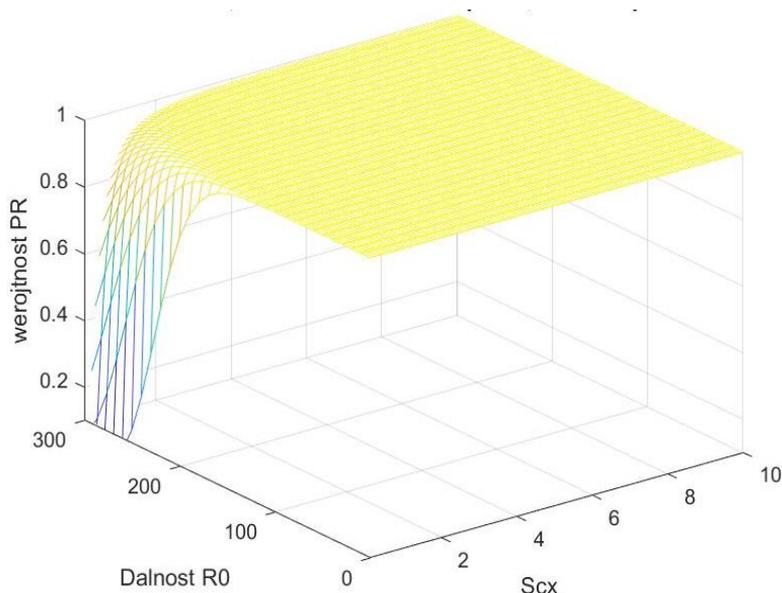


Рис. 3. Зависимости  $P_{ПО}$  от  $R_0$  и заданных  $V_t$  (а) и  $R_0$  от  $\sigma_{Ц}$  (б) для РЛС без ИРСА и с ИРСА при  $V_t = 100$  м/с при различных уровнях сечения  $P_{ПО}$ .

Зависимости  $R_0$  от  $\sigma_{Ц}$  (а) и  $P_{ПО}$  от  $R_0$  и  $\sigma_{Ц}$  (б) для РЛС с ИРСА при различных частотах повторения  $F_{П}$  и  $V_t = 100$  м/с показаны на рисунке 4.

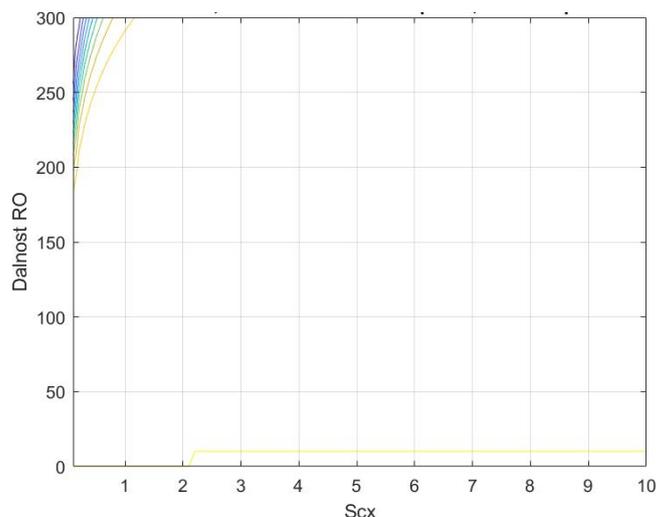


Рис. 4. Зависимость  $R_0$  от  $\sigma_{Ц}$  (а) и  $P_{ПО}$  от  $R_0$  и  $\sigma_{Ц}$  (б) для РЛС с ИРСА при различных частотах повторения  $F_{П}$  и  $V_t = 100$  м/с.

На рисунке 5 показано полусечение зоны обнаружения (ЗО) РЛС в вертикальной плоскости для различных диапазонов высот, полученное с использованием [2].

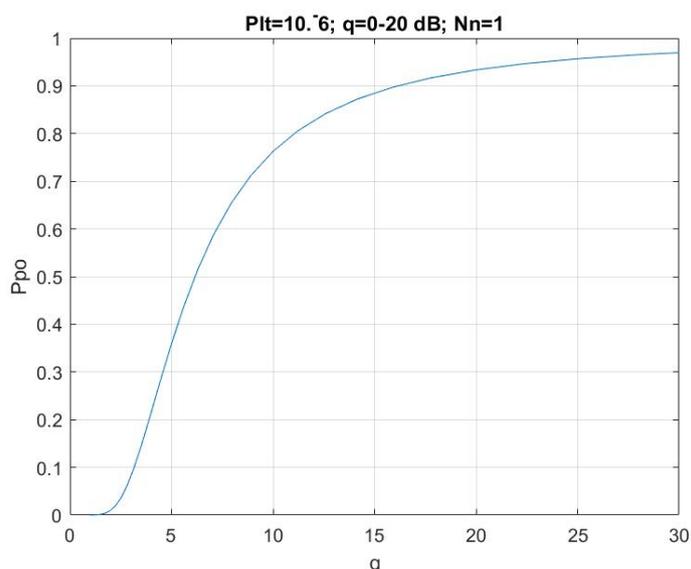


Рис. 5. Полусечение ЗО РЛС в вертикальной плоскости в диапазоне высот.

Применение режима ИРСА позволяет повысить дальность обнаружения ВО с 300 км до 340 км (на 11,3%) для высот полета ВО 10 км. Существенно увеличивается дальность обнаружения для высотных целей с 500 км до 600 км при  $\varepsilon = 2^\circ$  (рисунок 5).

## Заключение

Таким образом, с помощью разработанной методики оценки вероятности обнаружения ВО с помощью РЛС метрового диапазона с ИРСА аналитически обоснована и доказана результатами математического моделирования возможность повышения вероятности правильного обнаружения ВО при использовании режима инверсного радиолокационного синтезирования апертуры.

**Финансирование:** Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН «Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)» по теме №FNEF-2022-0022 «Математическое обеспечение и инструментальные средства для моделирования, проектирования и разработки элементов сложных технических систем, программных комплексов и телекоммуникационных сетей в различных проблемно-ориентированных областях».

## Литература

1. Сухов А.В., Пузийчук С.И. Информационный анализ эффективности радиопротиводействия беспилотным воздушным судам. *Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования*. 2022. №5 (69). С. 58-69.
2. Бердышев В.П., Кордюков Р.Ю., Стучилин А.И., Короченцев О.Н., Нерастенко А.А., Цыганов А.А., Созыкин А.Г., Бердышев Р.В., Панкрушин В.Н. Программа расчета зоны обнаружения РЛС метрового диапазона по различным типам воздушных объектов. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2015661726. Заявка № №2015619014, дата поступ. 22.09.15, дата регистрац. 06.11.2015. Москва, ФГУ ФИПС, 2015.
3. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Я.Д. Ширмана. Москва, Советское радио, 1970. 560 с.
4. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Под ред. Г.С. Кондратенкова. Москва, Радиотехника, 2005. 368 с.

### Для цитирования:

Бердышев В.П., Осипов В.В., Сухов А.В., Филатов В.И. Модель оценки вероятности обнаружения воздушных объектов обзорной радиолокационной станцией метрового диапазона с инверсным радиолокационным синтезированием апертуры. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.10>