

Управление воздушными комплексами метеорологического мониторинга с учетом слепых зон радиолокационных станций

Кокуев А.А.^{1*}, Макаров К.В.^{1**}, Тимошенко А.В.^{2***}

¹Радиотехнический институт, РТИ, улица 8-го Марта,
10, строение 1, Москва, 127083, Россия

²Радиотехнический институт им. Академика А.Л. Минца, улица 8-го Марта, 10,
строение 1, Москва, 127083, Россия

*e-mail: akokuev@oaorti.ru,

**e-mail: kmakarov@oaorti.ru

***e-mail: atimoshenko@rti-mintsu

Аннотация

В статье проводится обоснование необходимости учета слепой зоны бортовых метеонавигационных радиолокационных станций в математической модели обнаружения зон конвективной облачности при осуществлении информационного обеспечения метеорологического мониторинга. Проводится анализ модели радиолокационной станции, выделяется критерий качества поиска – ширина зоны обнаружения одного летательного аппарата. Необходимость учета слепой зоны подтверждается численным моделированием.

Ключевые слова: информационное обеспечение, метеорологический мониторинг, бортовая метеонавигационная радиолокационная станция, слепая зона, зоны конвективной облачности.

Введение

В настоящее время, для обнаружения опасных для полетов зон конвективной облачности и грозовой деятельности, а также для навигационного ориентирования по характерным радиолокационно-контрастными наземным объектам широко используются метеонавигационные радиолокационные станции (МН РЛС) [1,2]. Обнаружение опасных зон проводится в рамках метеорологического мониторинга заданной зоны поиска и реализуется в виде дежурства нескольких летательных аппаратов, которые, используя бортовую МН РЛС в режиме поиска, осуществляют полет колонной соблюдая заданную дистанцию друг относительно друга. Важной характеристикой описанного дежурства является угол поиска φ_i – угол между направлением движения летательных аппаратов с МН РЛС и направлением движения зон конвективной облачности. Увеличение угла поиска приводит к уменьшению необходимого количества летательных аппаратов для обнаружения опасных зон, однако слишком большое значение угла поиска приводит к тому, что зоны конвективной облачности перестают быть различима МН РЛС установленной на летательном аппарате. Также при больших углах поиска, из-за особенностей импульсно-доплеровских метеонавигационных радиолокационных станций, используемых на летательных аппаратах, зоны облачности с недостаточной радиальной скоростью становятся не видны МН РЛС, т.е. в зоне обнаружения возникает слепая зона (заштрихована на рис. 1б). Эта особенность бортовых радиолокационных станций должна быть учтена в математической модели обнаружения при формировании динамической пространственной структуры

летательных аппаратов (схемы размещения летательных аппаратов в зоне поиска в зависимости от времени).

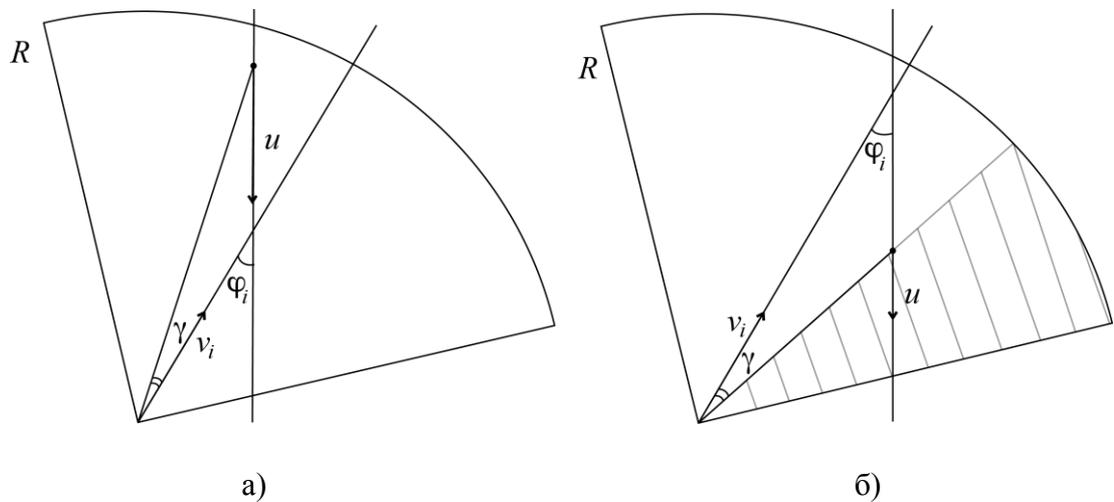


Рис 1. Линия визирования в а) верхней и б) нижней частях зоны обнаружения
Целью настоящей статьи является обоснование необходимости учета слепой зоны.

Математическая модель обнаружения зон конвективной облачности

Для обнаружения зон конвективной облачности современные летательные аппараты оснащены импульсно-доплеровскими бортовыми метеонавигационными радиолокационными станциями. Такая радиолокационная станция в режиме поиска может обнаруживать и сопровождать цели в заданном диапазоне углов по азимуту. Диапазоны углов могут отличаться в зависимости от модели и модификации МН РЛС, но для упрощения дальнейшего изложения положим, что рабочий диапазон углов МН РЛС по азимуту составляет от минус 45 градусов до 45 градусов относительно оси движения летательного аппарата. Дальность обнаружения обозначим R .

Принцип, заложенный в основу МН РЛС [3], подразумевает регулярное облучение зон конвективной облачности зондирующими импульсами и дальнейшую обработку отраженного от них излучения [4,5]. Особенностью импульсно-доплеровских МН РЛС является невозможность обнаружения зон облачности, движущейся с радиальной скоростью меньше пороговой скорости u_l .

Предположим, что зона конвективной облачности располагается в некоей точке области обнаружения МН РЛС (см. рис. 1а). Для того, чтобы определить будет ли обнаружена эта зона облачности, требуется вычислить значение радиальной скорости зоны облачности – проекцию скорости зоны облачности на прямую, содержащую линию визирования: $u \cos(\varphi_i - \gamma)$. В случае, если зона облачности расположена в нижней части зоны обнаружения (как на рис. 1б), угол γ будем считать отрицательным, и тогда, выражение для проекции сохраняет свой вид для всех углов γ от минус 45 до 45 градусов.

Для обнаружения зоны конвективной облачности ее радиальная скорость должна быть больше некоторой известной предельной скорости u_l [4,5]:

$$u \cos(\varphi_i - \gamma) > u_l.$$

Следовательно, ограничение на угол γ имеет вид:

$$\varphi_i - \arccos\left(\frac{u_l}{u}\right) < \gamma < \varphi_i + \arccos\left(\frac{u_l}{u}\right)$$

Таким образом, полученные границы интервала указывают границы обнаружения цели. Для типичных значений u_l примерно 10 м/с и u примерно 22 м/с, получаем, что

$$\Psi_l = \arccos\left(\frac{u_l}{u}\right) \approx 63^\circ.$$

Т.к. угол γ не превышает 45 градусов, верхняя граница интервала не достигается ни при каких допустимых углах поиска.

Нижняя граница интервала может быть как меньше минус 45 градусов, так и больше. В последнем случае в зоне обнаружения возникает слепая зона, в которой зона облачности не будет видна.

Граница слепой зоны определяется $\gamma = \varphi_i - \Psi_l$, а значит при угле $\varphi_i = \Psi_l$ угол $\gamma = 0$, и слепая зона будет занимать всю нижнюю часть зоны обнаружения. При угле $\varphi_i = \Psi_l - 45^\circ$ угол γ равен минус 45 градусов, следовательно слепой зоны не будет.

Поскольку эффективность поиска определяется размерами слепой зоны, угол поиска φ_i целесообразно искать между крайними значениями в интервале:

$$\Psi_l - 45 \leq \varphi_i \leq \Psi_l.$$

Для удобства дальнейших расчетов введем угол Δ_i такой что, $\Delta_i = \Psi_l - \varphi_i$. Угол Δ_i определяет размер сектора в нижней части зоны обнаружения, который не входит в слепую зону, т.е. чем больше слепая зона, тем меньше угол Δ_i .

Вычисление ширины зоны обнаружения одного летательного аппарата

Поскольку требуется обеспечить, чтобы ни одна зона конвективной облачности не оказалась необнаруженной, необходимо рассмотреть, какая ширина зоны обнаружения одного летательного аппарата. Если все летательные аппараты в совокупности просматривают всю ширину зоны обнаружения, то все опасные зоны будут своевременно обнаружены, в связи с этим, ширина зоны обнаружения одного летательного аппарата представляет собой критерий качества поиска.

Для того, чтобы рассчитать ширину зоны обнаружения, перейдем в связанную систему координат и рассмотрим движение зон конвективной облачности в зоне обнаружения летательного аппарата. Для перехода в связанную систему координат необходимо из вектора скорости зоны облачности (скорость ветра) вычесть вектор скорости летательного аппарата (см. рис. 2).

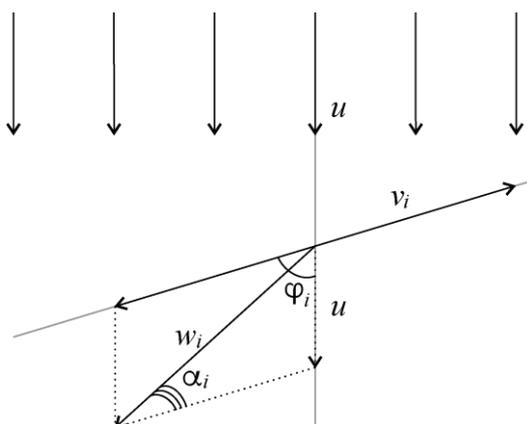


Рис. 2. Переход в связанную систему координат

В новой системе координат скорость цели w_i , и угол между новой скоростью зоны облачности и курсом движения летательного аппарата α_i составят соответственно [6]:

$$w_i = \sqrt{u^2 + v^2 + 2vu \cos \varphi_i},$$

$$\alpha_i = \arccos \left(\frac{v + u \cos \varphi}{\sqrt{u^2 + v^2 + 2vu \cdot \cos \varphi_i}} \right).$$

На рисунке 3 изображено движение зон облачности в зоне обнаружения летательного аппарата. Траектории движения зон облачности обозначены параллельными пунктирными линиями.

целесообразно оценить ширину h_i ее проекции на рубеж. Эта проекция будет определять ширину зоны обнаружения одного летательного аппарата. Величину h_i можно выразить через отрезки, из которых эта величина состоит:

$$h_i = s_i \cos \mu_i + t_i \cos \lambda_i.$$

На рисунке 3 отмечены углы α_i и φ_i , скорость зоны облачности w_i и u . Также в нижней части зоны обнаружения отмечен угол Δ_i сектора, не входящего в слепую зону. Таким образом, можно оценить значения углов λ_i и μ_i :

$$\lambda_i = 90^\circ - \varphi_i - \Delta_i,$$

$$\mu_i = 90^\circ - (45^\circ + \Delta_i + \lambda_i) = 45^\circ + \varphi_i.$$

Длину отрезков s_i и t_i , и значения углов ξ_i и χ_i :

$$s_i = \sqrt{R^2 - (w_i \tau \sin \xi_i)^2} - w_i \tau \cos \xi_i$$

$$t_i = \sqrt{R^2 - (w_i \tau \sin \chi_i)^2} - w_i \tau \cos \chi_i$$

$$\xi_i = 45^\circ - \alpha_i,$$

$$\chi_i = \Delta_i + \alpha_i.$$

Таким образом, все компоненты ширины зоны обнаружения одного летательного аппарата h_i выражены через исходные данные.

Полученные формулы позволяют также рассчитать ширину рубежа без учета слепой зоны. Для этого необходимо при вычислении всех компонент ширины принять угол Δ_i равным 45° .

Численное моделирование

Для обоснования необходимости учета слепой зоны, было проведено численное моделирование ширины зоны обнаружения одного летательного аппарата с учетом и без учета слепой зоны.

В рамках проводимого эксперимента, все параметры модели за исключением угла поиска φ_i были зафиксированы согласно таблице 1. Угол поиска φ_i менялся в пределах от 18 до 63 градусов.

Таблица 1.

Фиксированные значения параметров модели для численного эксперимента

Параметр	Значение
u_l	10 м/с
U	22 м/с
V	264 м/с
R	120000 м
τ	50 с

Для моделирования был использован пакет numru, а для построения графиков пакет matplotlib [7].

Результаты моделирования приведены на рисунке 4. С возрастанием угла поиска увеличивается влияние слепой зоны на ширину зоны обнаружения, а значит и на качество поиска. Максимальная разница между двумя графиками достигается при значении угла поиска $= 63$, разница составляет 9737 м, что примерно 14% от значения без учета слепой зоны. Это, в свою очередь, означает, что, в зависимости от пространственной структуры летательных аппаратов, имеют место участки зоны

мониторинга, в которых зоны конвективной облачности не будут обнаружены. Таким образом, при формировании динамической пространственной структуры летательных аппаратов необходимо учитывать в математической модели обнаружения наличие в МН РЛС слепой зоны.

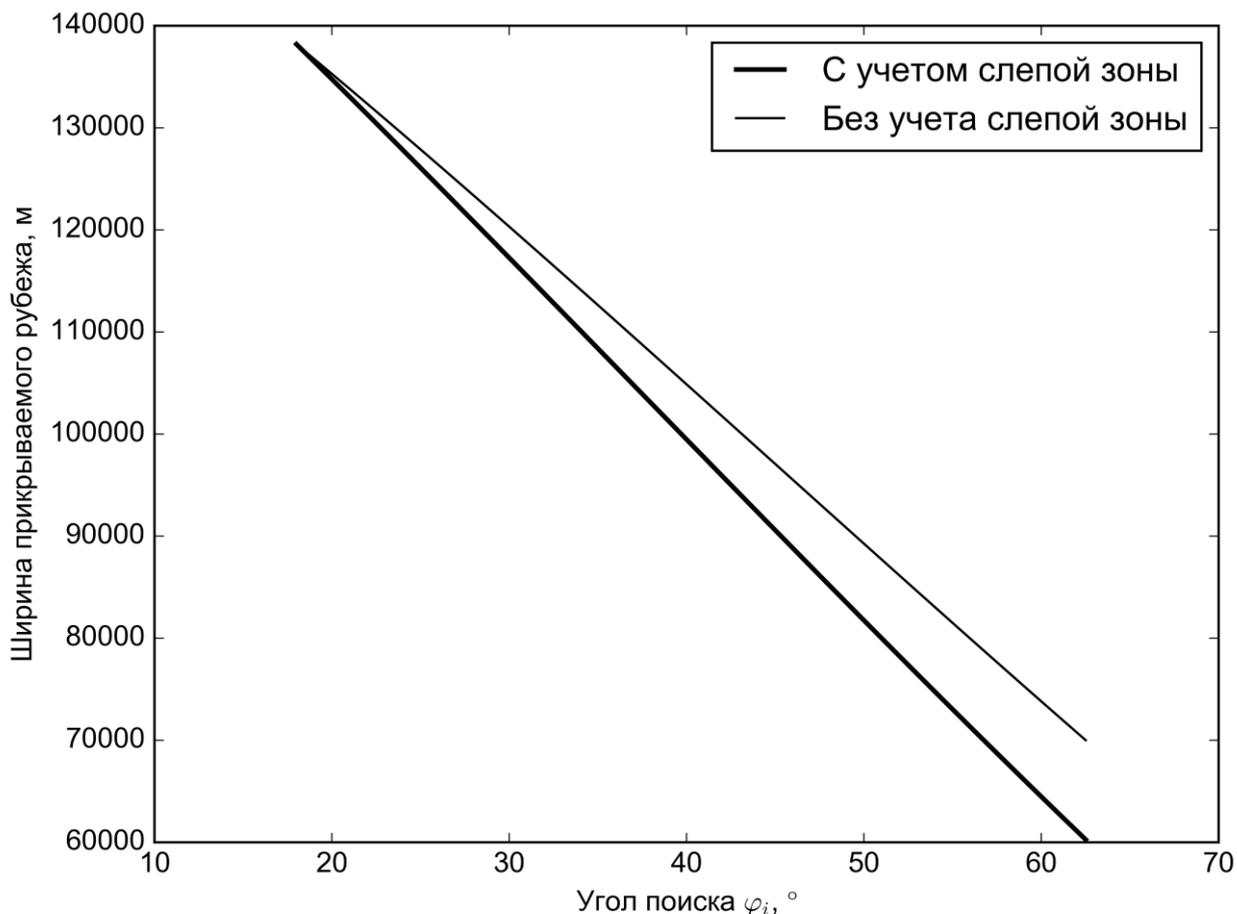


Рис. 4. График зависимости ширины прикрываемого рубежа от угла поиска, с учетом и без учета слепой зоны

Выводы

Математическая модель обнаружения зон конвективной облачности должна быть дополнена учетом слепой зоны бортовой метеонавигационной радиолокационной станции летательного аппарата, ввиду того, что отсутствие учета слепой зоны приводит к появлению участков зоны мониторинга, в которых зоны облачности не будут обнаружены. Полученный результат подтвержден численным

моделированием, которое показало разницу до 14% между шириной зоны обнаружения без учета и с учетом слепой зоны.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ
(№ НШ-6831.2016.8).*

Библиографический список

1. Лобанов М.М. Самолетные станции «Гнейс-2», ПНБ и «Гнейс-5». - М.: Советское радио, 1975. - 288 с.
2. Лобанов М.. Бортовые средства радиолокации. - М.: Воениздат, 1982. - 239 с.
3. Оводенко В.Б., Трёкин В.В. Исследование эффективности компенсации влияния среды на работу радиолокационной станции // Труды МАИ, 2016, выпуск № 88: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=70690>
4. Дулевич В.Е., Коростелев А.А., Клюев Н.Ф., Мельник Ю.А. Теоретические основы радиолокации: Учебное пособие для вузов. – М.: Советское радио, 1968. – 608 с.
5. Белоцерковский Г.М. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Советское радио, 1975. – 336 с.
6. Амелькин В.В., Рабцевич В.Л., Тимохович В.Л. Геометрия на плоскости: Теория, задачи, решения. – Минск, Асар, 2003. – 592 с.
7. Hunter J.D. Matplotlib: A 2D graphics environment // Computing In Science & Engineering. 2007. Vol. 9. no.3, pp. 90-95.